

规划支持系统

迎接信息技术的春天

(初稿)

龙瀛 著

2006 年底，于北京西城

序 言

前言

城市规划是一相对比较传统的领域，已经经历了上千年的发展，计算机技术的出现，一方面提高了城市规划工作的效率，一方面也促进了学科自身的发展。计算机技术在城市规划中的应用日益广泛，不同阶段的计算机技术发展水平，往往也对应着不同的计算机辅助规划系统的形式，主要经历了规划算法、简要规划模型、电子数据处理系统、信息管理系统(MIS)、决策支持系统(DSS)、地理信息系统(GIS)、空间决策支持系统(SDSS)等多个阶段。

目前，以面向对象技术、GIS技术、网络技术、组件技术、数据库技术和可视化技术等为代表的计算机技术日益成熟，信息技术已经进入了其发展的“春天”，这也促进了新一代计算机辅助规划系统——规划支持系统(PSS, Planning Support System)的产生，可以说规划支持系统是迎接信息技术的春天这一特定时期的产物。规划支持系统并不是传统的计算机信息技术在规划领域的简单应用，而是将规划自身的基础理论以专业规划模型的形式，溶入到最为先进的信息技术中，这种模式赋予信息技术以灵魂，能够保证规划理论和知识通过信息技术得到更有效的应用，提高规划编制的效率，并通过先进的可视化技术进行规划成果的最终表达。

目前国际上规划支持系统方面的研究已经取得了一定的成果，在指导城市规划的过程中取得了学术界和应用界一致的认可，在提高规划的科学性、提高规划编制效率、改善规划成果的表达效果等方面，具有传统的信息系统无法比拟的优势，这一方面的研究在国际上现在正逐步深入。据笔者多年来对国内规划支持系统的调查、分析与研究，国内鲜见规划支持系统的具体应用，仅能够从文献中看到规划支持系统的简要介绍。即便个别文献称其系统为规划支持系统，但如以规划支持系统最为核心的定义来约束，则一般难以成为真正的规划支持系统。本书是对规划支持系统的全面介绍，如其概念、研究进展、理论技术基础、国际实践、笔者实践等。其中将有一定的篇幅介绍由笔者首次提出的基于规划支持模型实现规划支持系统的模式。

本书具有较强的综合性和交叉性，是对规划领域应用计算机技术的一次纵览。本书共五章，“第一章规划支持系统概述”主要介绍规划支持系统的基本概念、发展历程、相关概念辨析、系统结构、系统开发思路等，“第二章规划支持系统基础”主要介绍构建规划支持系统的基础理论和技术，如地理系统分析理论、地理信息系统、遥感技术、规划模型、可视化技术等，“第三章规划支持系统实现”主要介绍笔者提出的基于规划支持模型的规划支持系统实现形式，“第四章国际典型系统”主要介绍目前国际上比较主流的规划支持系统的系统形式、系统功能、应用情况等，“第五章系统应用实践”主要介绍笔者近年来在规划支持系统领域的具体实践案例。

由于规划支持系统是一个国际前沿的研究领域，该方面的研究和应用正处于探索阶段，加之时间有限，本书研究的一些方面尚不完全成熟，肯定有不少错误及不足之处，谨希望本书能够“抛砖引玉”，作者将无比欣慰，也欢迎读者对本书的意见反馈给作者，作者表示不尽感激。

龙瀛，2006年底，于北京西城

longying0522@sina.com

作者简介



龙瀛，男，26岁，1998年至2004年就读于清华大学，荣获清华大学优秀硕士毕业生（2004年）及系科技优秀个人称号（多次），主要研究方向为规划支持系统、区域与城市生态环境规划和水集成系统规划等。自2000年以来一直从事规划支持系统方面的研究，有着多年规划支持系统方面的研究经历，主持或作为核心技术人员参与了多项规划支持系统相关的设计、开发、后续应用等多方面工作。基于所开发的规划支持系统和研究经历，在国内核心期刊上发表了十余篇相关领域的学术论文。

在硕士论文阶段，对规划支持系统方面的研究成果进行总结，形成了硕士论文“规划支持模型研究”，在其中提出了规划支持模型（Planning Support Model）的概念，并对其进行了深入的分析，提出了在规划支持模型基础上开发规划支持系统的核心技术解决方案，该模式定有望成为规划支持系统下一阶段的发展趋势。

同时目前所在的单位 北京市城市规划设计研究院，是在城市规划领域位于国内前列的甲级城市规划设计、研究单位，在主持或参与的多项规划、研究工作中，作者积极推进规划支持系统在相应业务中的应用，已经积累并将继续充实规划支持系统领域的研究工作。

内容简介

规划支持系统是目前国际上最为流行的计算机辅助规划系统的形式,以其集成性、交互性、动态响应等特点而著称,特别适合于辅助规划的编制,其国际上正处于研究的热点阶段,而在国内的研究还很少。本书旨在推进国内规划支持系统方面的研究走向成熟。

本书分为五个部分,第一章对规划支持系统进行了全面的概述,第二章重点介绍规划支持系统的理论和技术基础,地理系统分析理论、地理信息系统、遥感、城市模型、专业规划模型、可视化技术和其他计算机技术等,第三章重点介绍笔者提出的基于规划支持模型的规划支持系统实现方式,第四章重点介绍目前国际上比较常见的规划支持系统实例,最后一章重点介绍笔者多年来在该领域的实践案例。

本书本着理论与实践相结合的原则,从国际研究进展、系统具体分析、系统设计开发基础,到国际和笔者的实践,对规划支持系统进行了全面而系统的介绍,尤其在分析规划支持系统基础理论方面进行了全面的综述,并针对规划支持系统的实现方式提出了独到的见解。可供区域与城市规划、土地利用规划、市政规划、水资源规划、生态环境规划、交通规划等领域的科研人员、高校教师和学生参考。

文字目录

1	规划支持系统概述	18
1.1	计算机辅助规划	19
1.2	规划支持系统	21
1.2.1	发展历程	21
1.2.2	系统定义	23
1.2.3	系统目标	24
1.2.4	系统结构	25
1.3	系统开发	26
1.3.1	GIS 与模型	26
1.3.2	开发模式探讨	27
1.4	相关概念辨析	27
1.4.1	CAP 与 CAD	27
1.4.2	PSS、GIS 和 SDSS	28
1.4.3	城市规划管理信息系统、城市规划信息系统、城市规划决策支持系统	28
1.5	关于本书	30
2	规划支持系统基础	31
2.1	地理系统分析理论	32
2.1.1	概述	32
2.1.2	系统预测方法	35
2.1.3	系统模拟方法	46
2.1.4	系统评价方法	58
2.1.5	系统优化方法	72
2.1.6	系统决策	82
2.1.7	地理系统分析相关软件	92
2.2	地理信息系统	98
2.2.1	GIS 理论	99
2.2.2	GIS 在城市规划中的应用	102
2.2.3	GIS 研究前沿	102
2.3	遥感技术	104
2.3.1	遥感数字图像处理技术	105
2.3.2	遥感技术在城市规划中的应用	108
2.3.3	遥感研究前沿	109
2.4	城市模型	110
2.4.1	发展历程	110
2.4.2	典型城市模型	113
2.4.3	DRAM/EMPAL	114
2.4.4	MEPLAN/TRANUS	115
2.4.5	CUF	117
2.4.6	UrbanSim	118

2.4.7	Place3s.....	118
2.4.8	TLUMIP.....	119
2.4.9	IRPUD.....	120
2.4.10	SLEUTH.....	120
2.4.11	POLIS.....	121
2.4.12	KIM.....	122
2.4.13	Metrosim.....	123
2.4.14	DELTA ^U	124
2.4.15	典型城市模型对比.....	125
2.5	专业规划模型.....	126
2.5.1	空间相互作用模型 (Spatial Interaction Models , SIM).....	126
2.5.2	区位模型 (Location Models).....	128
2.5.3	区域结构模型 (Regional Structure Models).....	131
2.5.4	生态环境模型 (Ecological Environmental Models).....	133
2.5.5	城市经济模型 (Urban Economic Models).....	141
2.5.6	人口模型 (Population Models).....	144
2.5.7	交通模型 (Traffic Models).....	145
2.5.8	市政模型 (Municipal Models).....	151
2.6	可视化技术.....	154
2.6.1	在城市规划中的应用.....	155
2.6.2	关键技术.....	155
2.6.3	相关软件.....	159
2.7	其他计算机技术.....	162
2.7.1	面向对象编程.....	163
2.7.2	组件技术.....	164
2.7.3	空间数据库.....	165
2.7.4	空间数据挖掘.....	166
2.7.5	网络技术.....	167
2.7.6	多媒体技术.....	168
3	规划支持系统实现.....	169
3.1	规划支持模型.....	170
3.2	模型设计.....	170
3.2.1	需求分析.....	170
3.2.2	总体设计.....	172
3.2.3	详细设计.....	174
3.3	模型开发.....	179
3.3.1	COM 开发模式.....	180
3.3.2	Geodatabase 开发模式.....	186
3.4	模型应用.....	190
3.4.1	数据标准化.....	191
3.4.2	水环境解析.....	192
3.4.3	污染源解析.....	193
3.4.4	基本服务区解析.....	196
3.4.5	方案生成.....	197

3.4.6	辅助水质模拟.....	199
3.4.7	方案评价及优选.....	199
3.4.8	阶段实施方案的制定.....	201
3.5	模型应用评价.....	201
4	国际典型系统.....	203
4.1	INDEX.....	204
4.1.1	总体介绍.....	204
4.1.2	模块设置、主要功能.....	204
4.1.3	应用案例 ¹	206
4.2	WHAT IF?.....	207
4.2.1	总体介绍.....	207
4.2.2	模块设置.....	208
4.2.3	应用案例.....	209
4.2.4	小结.....	210
4.3	COMMUNITY VIZ.....	210
4.3.1	总体介绍.....	210
4.3.2	模块设置.....	211
4.3.3	主要功能.....	212
4.3.4	案例分析.....	214
4.3.5	小结.....	215
4.4	CITYGREEN.....	216
4.4.1	总体介绍.....	216
4.4.2	模块设置.....	216
4.4.3	主要功能.....	217
4.4.4	应用案例.....	219
4.5	GB-QUEST.....	220
4.5.1	总体介绍.....	220
4.5.2	系统界面及操作流程.....	220
4.5.3	模块设置和功能简介.....	223
4.5.4	应用案例.....	225
4.5.5	小结.....	226
4.6	NATURESERVE VISTA.....	227
4.6.1	系统简介.....	227
4.6.2	模块设置及工作流程.....	227
4.6.3	系统特点 ¹	231
4.6.4	应用案例.....	231
4.7	WEAP.....	233
4.7.1	总体介绍.....	233
4.7.2	系统界面.....	234
4.7.3	操作步骤.....	236
4.7.4	系统特点 ¹	237
4.7.5	应用案例.....	237
4.8	AEZWIN ¹	238
4.8.1	总体介绍.....	238

4.8.2	模块功能.....	239
4.8.3	应用案例 ¹	241
4.9	WADBOS.....	244
4.9.1	总体介绍.....	244
4.9.2	系统界面.....	244
4.9.3	功能介绍.....	246
4.9.4	模块设置.....	246
4.9.5	小结.....	248
4.10	RAMCO.....	248
4.11	EXPERT CHOICE	249
4.11.1	总体介绍.....	249
4.11.2	应用步骤.....	250
4.11.3	应用案例.....	251
4.12	DEFINITE.....	252
4.12.1	总体介绍.....	252
4.12.2	系统界面与操作步骤 ¹	252
4.12.3	应用案例.....	253
4.13	BLM ePLANNING	261
5	系统应用实践.....	263
5.1	城市总体规划支持系统.....	264
5.1.1	AutoCAD 与 Photoshop.....	264
5.1.2	专业规划模型.....	266
5.1.3	地理信息系统和遥感.....	266
5.1.4	办公自动化系统及其他.....	269
5.1.5	应用总结.....	269
5.2	城市污水处理系统规划支持系统.....	270
5.2.1	系统构建.....	271
5.2.2	系统功能.....	271
5.2.3	规划方案的辅助确定和分析.....	272
5.2.4	应用总结.....	274
5.3	节约用水系统分析模型.....	274
5.3.1	模型基本情况.....	274
5.3.2	模型应用.....	278
5.3.3	应用总结.....	283
5.4	生态环境规划管理空间决策支持系统.....	283
5.4.1	区域生态环境管理.....	284
5.4.2	空间决策支持系统设计.....	284
5.4.3	应用总结.....	288
5.5	限建区规划支持系统.....	288
5.5.1	系统需求分析.....	288
5.5.2	系统数据流程分析.....	289
5.5.3	系统设计及开发.....	290
5.5.4	系统应用.....	292
5.5.5	应用总结.....	296

插图目录

图 1CAP 系统沿革示意图	20
图 2CAP 系统形式及其相关应用时间序列图	21
图 3PSS 系统基本结构框图	26
图 4 地理空间数据处理流程图	35
图 5 云南优势的产业发展的先后顺序框图	36
图 6 贝叶斯预测递推算法流程图	42
图 7 系统仿真流程图	47
图 8BP 网络的拓扑结构图	50
图 9BP 学习算法的计算步骤框图	51
图 10 元胞自动机与人工神经网络集成模型结构图	52
图 11 综合集成法用于区域规划的步骤示意图	58
图 12 模糊综合评价流程图	59
图 13 决策的一般步骤示意图	83
图 14 效用曲线类型	86
图 15 智能体心智状态组成图	90
图 16 GIS 构成图	99
图 17 遥感信息从成像到遥感产品输出的过程图	105
图 18 遥感数字图像处理流程图	106
图 19 DRAM/EMPAL 结构图	114
图 20 MEPLAN/TRANUS 模型设计功能结构图	116
图 21 Metrosim 模型流程图	123
图 22Voronoi 多边形	130
图 23 克里斯泰勒结构图	132
图 24 区域水污染控制系统要素构成示意图	171
图 25PSM 模型功能需求分析图	172
图 26PSM 模型总体结构图	174
图 27 域模型 (左一、左二)、关系模型 (左三) 及方法模型 (右一) 的类结	

构图.....	174
图 28 要素模型设计图.....	175
图 29 关系模型结构框图.....	177
图 30 模拟模型的类结构图.....	179
图 31COM 组件的概念框图.....	181
图 32 基于 COM 的模拟模型库框图.....	182
图 33PSM-CAP 系统结构框图.....	184
图 34 水质模拟模块结构框图.....	185
图 35ArcGIS 接入 Geodatabase 方式框图.....	187
图 36 方法模型界面.....	188
图 37“FORE 污染源水量”方法的可视化设计界面.....	188
图 38ArcGIS 平台中 Macro 的设计界面.....	189
图 39ArcGIS 平台中 Macro 的运行界面.....	189
图 40A 市水污染控制规划技术路线图.....	191
图 41 数据预处理和标准化流程图.....	192
图 42A 市水环境功能区划图（左）和 2002 年水质评价图（右）.....	192
图 43A 市工业污染源分布图.....	193
图 44A 市生活和工业污水排放量各镇（街道办事处）统计图.....	194
图 45 独立排放工业污染源空间分布图.....	194
图 46 需要预处理的工业污染源空间分布图.....	195
图 47 基本服务区及其污水量分布图.....	197
图 48 基本服务区 COD 及氨氮污水浓度分布图.....	197
图 49 水污染控制系统规划方案生成流程.....	197
图 50 基础规划方案污水处理厂服务区分布图及排放口分布图.....	197
图 51 水污染控制系统调整规划方案（左：方案 1 右：方案 4）.....	198
图 52 规划方案评价及优选技术路线图.....	199
图 53 规划方案评价指标体系图.....	200
图 54INDEX 系统界面图.....	204
图 55INDEX 基本操作流程图.....	205
图 56 INDEX 主要规划支持功能示意图.....	206

图 57 (左) 青少年通过触摸屏的方式参与社区规划	207
图 58“WHAT IF?”思想在城市规划中的公众参与.....	208
图 59“WHAT IF?”初始界面图.....	208
图 60“WHAT IF?”概念模型图	209
图 61“WHAT IF?”两种不同的假设方案对比图.....	209
图 62 城市用地空间布局图(左为集约模式,右为分散模式)	210
图 63 基于 ArcView 开发的 CommunityViz 界面	211
图 64CommunityViz 的系统界面	211
图 65CommunityViz 3.0 软件组体系结构.....	212
图 66Scenario 360 组件界面图	213
图 67SiteBuilder 3D 组件界面图	214
图 68 用 CommunityViz 生成的 Dome 区域 3D 场景图	214
图 69 洛杉矶社区新公园的选址适宜情况示意图	215
图 70CITYgreen 主界面.....	217
图 71CITYgreen 辅助规划基本流程图.....	217
图 72 左 树冠垂直投影遥感影像图 右 用 CITYgreen 数字化后的图片.....	218
图 73 树木生长模拟情况对比图(左:生长前;右:生长后)	219
图 74QUEST 初始界面图.....	221
图 75QUEST 参数设置界面图.....	221
图 76 “对未来的选择”层次结构图	222
图 77 “对未来的选择”系统操作界面.....	222
图 78 空气质量结果报告图.....	223
图 79 QUEST 各子模块相互影响关系图.....	224
图 80QUEST 研究区域空间分布图	226
图 81 左 交通预测情景.....	226
图 82 NatureServe Vista 系统操作界面.....	227
图 83 要素保护价值空间分布图	228
图 84 区域保护价值空间分布图	229
图 85 土地利用方案评估图.....	229
图 86 土地利用方案和管理实践政策转换界面	230

图 87Explore Sites 工具界面	230
图 88 纳帕流域保护价值计算界面	232
图 89 纳帕流域 NatureServe Vista 分析报告效果图	232
图 90 纳帕流域土地保护规划方案评价结果图	233
图 91WEAP 基本操作界面	234
图 92WEAP 数据界面	235
图 93WEAP 结果显示界面	235
图 94WEAP 时间序列分析界面	236
图 95WEAP 记录界面	236
图 96Steelpoort 盆地基本情况示意图	238
图 97WEAP 模拟结果示意图	238
图 98AEZWIN 系统结构图	239
图 99AEZWIN 数据准备阶段系统效果图	240
图 100AEZWIN 设定研究区域和数据集示意图	240
图 101MCMA 模型界面	241
图 102AEZWIN 分析结果图	241
图 103AEZWIN 区域及方案选择图	242
图 104AEZWIN 指标选择示意图	242
图 105 Kenya Nyeri 地区土地资源评估图	242
图 106 变量期望最低最高值输入界面	243
图 107AEZWIN 规划结果示意图	243
图 108AEZWIN 规划结果一览表	243
图 109Micro-scale 窗体	244
图 110WadBOS 模拟结果图	245
图 111Macro-scale 窗体	245
图 112WadBOS 工具栏和标题栏	246
图 113 WadBOS 功能结构图	246
图 114WadBOS 模型空间尺度示意图	247
图 115Landscape 子模块界面	248
图 116 RAMCO 界面图示	249

图 117Expert Choice 目标层	250
图 118 方案层的建立及其综合分析示意图	250
图 119 四种类型的敏感性分析图 (从左到右、从上到下依次为 Performance、 Dynamic、Gradient、Head-to-head)	251
图 120DEFINITE 初始用户界面	252
图 121DEFINITE 问题定义 (Problem definition) 示意图.....	253
图 122 对 “ comfort ” 影响值的标准化界面	254
图 123DEFINITE 多指标评价界面	255
图 124DEFINITE 各方案加权值总和图.....	255
图 125 敏感性分析：比较多指标分析的结果	256
图 126 敏感性分析：概率表	257
图 127 敏感性分析：“ Car ” 选择方案在 “ Travel time ” 改变情况下的敏感性 分析.....	257
图 128DEFINITE 案例最终报告	258
图 129 用 Electre 2 方法的比较 MAC 分析结果.....	259
图 130Hondsbossche 海堤的三种建设方案示意图	260
图 131 “ 沙丘型围堤 (Dunes) ” 和 “ 潮汐水道 (Tidal gully) ” 的成本收 益表.....	260
图 132 三种方案的概率分析图	261
图 133 三种方案的不确定性分析表	261
图 134ePlanning 界面	262
图 135 中心城绿地系统结构图	265
图 136 旧城景观视廊及街道对景保护规划图	265
图 137 地面风速变化分布图 (规划与现状对比, 单位 m/s)	266
图 138 市域限制性分区图.....	267
图 139 市域高程分析及山前生态保护区范围图	268
图 140 市域植被生长状况 (NDVI 指数) 示意图	268
图 141 市域用地现状图.....	269
图 142Geodatabase 结构框图	271
图 143 城市污水处理系统规划支持系统功能框图	272
图 144 污水处理厂服务区与规模确定方法	272

图 145 系统前台 Arcinfo 设定街坊图层服务区从属字段	273
图 146 通凉流域污水处理厂规划方案对比图 (左为方案一、右为方案二)	274
图 147 节水系统分析模型基本框架	275
图 148 水资源及供水子系统终端分类图	276
图 149 用水子系统终端分类图	277
图 150 节水系统分析模型应用技术路线	279
图 151 节水对策评价指标体系	282
图 152 REEM-SDSS 的总体框架结构	285
图 153 REEM-SDSS 的数据库系统框图	286
图 154 REEM-SDSS 的模型库系统框图	286
图 155 REEM-SDSS 的知识库系统框图	287
图 156 REEM-SDSS 应用层模块框图	287
图 157 限建区规划技术路线图	289
图 158 限建区规划支持系统数据流程图	290
图 159 限建区规划支持系统基本框架图	291
图 160 限建区规划支持系统开发截图	291
图 161 限建区规划支持系统设计及开发流程图	292
图 162 限建区规划支持系统应用流程图	295
图 163 某图幅限建分区分布图	295
图 164 某图幅限建要素分布图	295
图 165 某图幅限建单元、分区图及导则表	296

表格目录

表 1 规划各阶段所采用的工具一览表.....	19
表 2 现代地理学中的数学方法的内容体系	33
表 3 采用 Saaty 标度法确定 b_{ij}	60
表 4RI 的取值.....	60
表 5 常用的距离计算方法.....	63
表 6 实物型投入产出表.....	66
表 7 决策矩阵.....	83
表 8 典型城市模型对比表.....	125
表 9 数值域模型设计表.....	175
表 10 字符域模型设计表.....	176
表 11 方法模型设计表.....	177
表 12 模拟模型结构设计表.....	179
表 13PSM 模型开发模式对比表	180
表 14Geodatabase 与 PSM 模型的概念对应关系表(Martin Fowler 等, 2000) □	187
表 15PSM 模型与 PSM-CAP 系统对应关系表	190
表 16 预测污水量汇总表.....	195
表 17 预测污染负荷汇总表.....	196
表 18 规划方案列表	198
表 19 各规划方案水质影响指标评价结果表.....	199
表 20 方案属性分析结果表.....	200
表 21 方案综合评价指标属性归一化结果表.....	201
表 22Turner Field 停车场与亚特兰大城区停车场树木经济收益表	220
表 23QOL 标准设置情况表.....	258
表 24 通凉流域方案一查询结果	273
表 25 水资源需求预测方案示意表	280
表 26 北京市域 2020 年水资源需求预测结果表	280

表 27 节水对策集及其作用域分析281

1 规划支持系统概述

本部分是规划支持系统的概述篇章，将对规划支持系统进行全面、系统的概述，首先对计算机辅助规划系统进行了历史沿革分析，之后主要就规划支持系统的发展历程、基本定义、系统发展目标、系统结构、相关概念辨析、系统开发模式等进行介绍，以使读者对规划支持系统这种计算机辅助规划系统的研究前沿，有较为全面的认识，最后给出本书的基本使用方式，以便于读者使用。

1.1 计算机辅助规划

城市规划是一相对比较传统的领域,已经经历了上千年的发展,自从在计算机出现之初老一辈规划工作者用磁带存储介质的计算机进行简单的数据计算,就开始了计算机的应用历程。计算机技术的出现,一方面提高了城市规划工作的效率、精确性和科学性,一方面也促进了学科的发展。

在城市规划过程中所使用的计算机软件系统,就是计算机辅助规划(Computer Aided Planning, CAP)系统最为明了和简单的定义。计算机软件产品更新换代日益频繁,规划工作者所采用的计算机辅助规划系统也随之发生了重大的变化,从最初的简单计算功能,到后来的基本的绘图功能,再至目前广为使用的辅助规划工具 Autodesk AutoCAD、Adobe Photoshop 和 ESRI ArcGIS 等。目前在城市规划编制的各个阶段,计算机的应用一般都比较普遍,经常涉及的软件工具如表 1 所示。

表 1 规划各阶段所采用的工具一览表

工作阶段	实现目标	应用软件
基础图纸	遥感影像处理/图斑分类识别	Erdas Imagine /Photoshop
	地形图整理	Autocad/R2V
	用地/类型/面积识别、分类	ArcGIS/Excel
前期调研	入户调查及数据整理	Excel
	数据叠合/生成 GIS 数据库	ArcGIS
基础图纸处理	数据库分类/建立查询与计算	Access
	遥感影像处理/图斑分类识别	Erdas Imagine /Photoshop
	建成区边界矢量化整理	Autocad/Raster2Vector
	面积统计及 GIS 数据库生成	ArcGIS
数据整理	面积数据整理及统计	Excel
	人口工业等社会经济数据整理	Excel
数据分析	相关分析/回归分析	SPSS
研究设计	社会经济数据分析	SPSS
	体块模型	SketchUp
	研究文本	Word
绘图及成果表现	方案设计及工程图纸	Autocad/Cards
	工程图纸	Autocad
	图纸着色及修饰	Photoshop
	三维模型及表现图	3dsMAX
	设计分析图	Photoshop/Illustrator
	多媒体演示	Director

计算机技术在城市规划中的应用日益广泛,主要用于辅助城市规划的编制、研究等工作。“计算机辅助规划”的具体技术内涵是结合相关的规划理论,引入各种计算机软硬件技术,来推进规划工作的完成,在整个规划过程中,CAP 系统一直担任着规划数据的存储、管理、

计算、查询和表达等功能。目前的计算机辅助规划技术，已经广泛应用于区域规划、城市规划、专项规划的各个领域。随着计算机技术的发展，计算机辅助规划的内涵和外延都发生了较大的变化，可以说 CAP 是一含义广泛且不断演变的概念。

计算机最初应用于规划是在 20 世纪 50 年代末，从 20 世纪 80 年代前期开始，随着硬件水平的提高、成本革命性的降低、大众软件的发展以及地理信息系统的兴起，CAP 系统发生了显著的变化，规划界使用计算机已日趋广泛。在城市规划领域，不同阶段的计算机技术发展水平，往往也对应着计算机辅助规划系统形式的重要变革，主要经历了规划算法、简单规划模型、电子数据处理系统、信息管理系统（MIS）、决策支持系统（DSS）、地理信息系统（GIS）、空间决策支持系统（SDSS）等多个阶段（计算机辅助规划系统沿革如图 1 所示，国外 CAP 相关技术产生的时间如图 2 所示）：

（1）规划算法阶段：这一阶段的 CAP 系统仅仅是较为简单的规划算法，这些算法大多由 Fortran 语言编写、在 DOS 下执行，可以说这些简单的规划算法是 CAP 系统的雏形，实现了 CAP 系统最为核心的功能。这种形式的 CAP 系统的局限性在于用户在利用这些软件包求解实际的规划问题时，必须严格符合系统界定的有关条件，同时这种形式的 CAP 系统输入输出一般都是文本文件，具有较大的局限性。

（2）MIS-CAP 阶段：20 世纪 60 年代初，Gallanher 提出了 MIS 的构想，随后 MIS 得以广泛的应用，在这样的背景下，一些研究者开发了管理信息系统，即 MIS-CAP，为规划的编制提供信息服务。这一阶段的 CAP 系统主要功能基本上是规划相关数据的储存、管理和一般业务性数据的处理，具有一定的模拟预测功能，但其空间数据处理和决策分析的功能相当薄弱。

（3）GIS-CAP 及 DSS-CAP 阶段：20 世纪 90 年代以来，是计算机软硬件技术发展的黄金时期，相关计算机技术的出现促进了 CAP 系统的快速发展，出现了以 GIS 为核心的 GIS-CAP 系统、以 DSS 为核心的 DSS-CAP 系统以及二者的集成 SDSS-CAP 系统（胡金柱，1989）^[1]。这类系统在处理规划的空间数据和解决半结构化决策问题方面，取得了较大的进步，这方面的研究，曾一度是国外一些国家的研究重点。

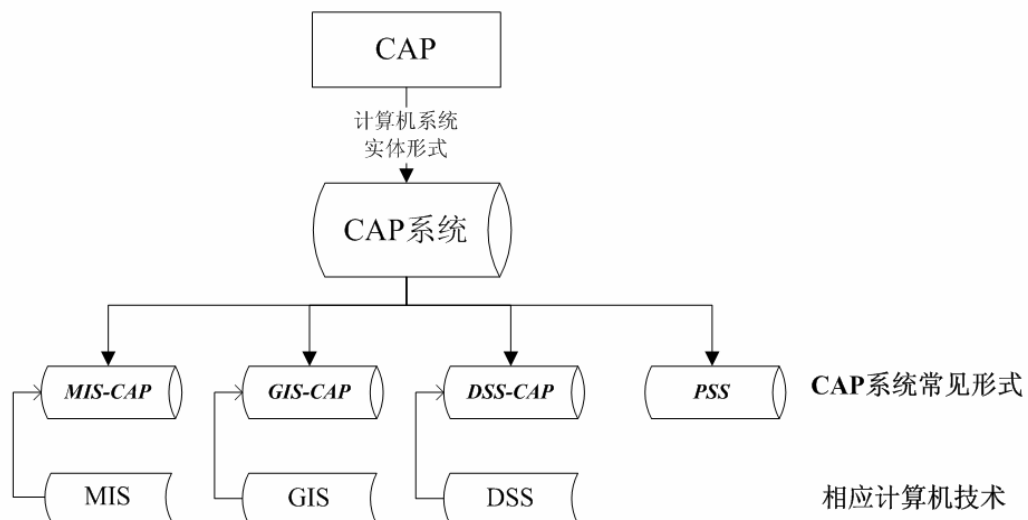


图 1 CAP 系统沿革示意图

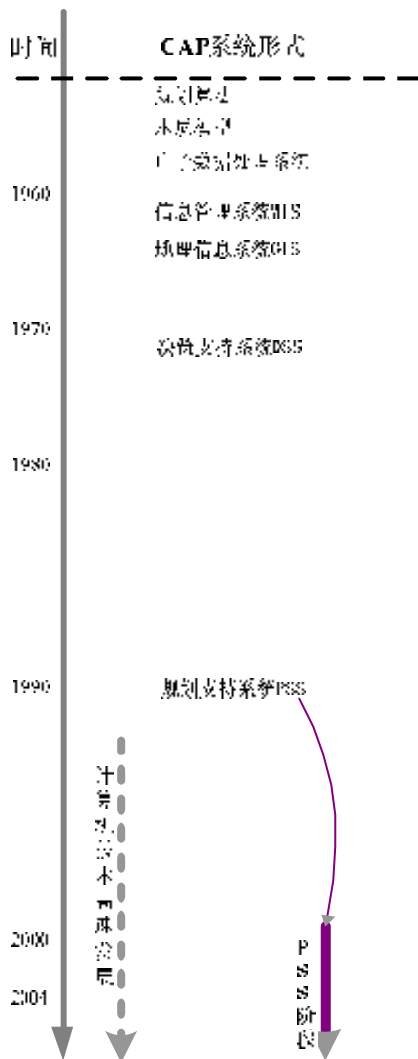


图 2CAP 系统形式及其相关应用时间序列图

目前，以面向对象技术、GIS 技术、网络技术、组件技术、数据库技术和可视化技术等为代表的计算机技术日益成熟，这也促进了新一代计算机辅助规划系统——规划支持系统（PSS，Planning Support System）的产生，由此 CAP 系统进入了新的发展阶段。

1.2 规划支持系统

1.2.1 发展历程

计算机技术最初应用于规划是在 20 世纪 50 年代末和 20 世纪 60 年代，PSS 的理念也是在那一阶段提出的，规划界的电脑巨人 Britton Harris (1960)^[2]一直希望建立一套方法来集成专业模型与规划方案生成，并开发了几个修正的计算机模型。

1989 年，由 Britton Harris 提出了 PSS 的概念（刘楷，2003）^[3]，10 年后被广泛接受。

1993年, Britton Harris 等(1993)探讨了GIS和PSS的关系,并提出了对PSS的两点核心要求,其中一个要求是“sketch planning”,即概略规划,可以进行规划方案的寻优,另一个要求是需要广泛的工具来识别所建立的规划方案或决策的实施效果。^[4]

1995年, Batty 提到过鼓舞人心的、一部分人认为是实事求是的标准化桌面规划支持系统的远景发展目标。它主要强调了计量领域和非计量领域(如政治决策)的交互界面。

1996年, Batty 和 Dansham 通过展示预测模型和规范模型是如何嵌入GIS作为框架的,进一步地证明计算机使用的可选择性和灵活性。他们特别关心的是如何证明定位—分配方法能够与GIS有效连接,以形成PSS的基础部分。

1997年, Richard E.Klosterman (1997)对城市规划和信息技术进行了多年序列分析,认为当前PSS所需要的分析、显示模块在原型方面都比较成熟,最为困难的任务是对这些模块进行集成,形成服务于用户的完整系统,由此,他提出了数据管理模块、分析模块、显示模块等的标准化的建议。^[5]

1998年,鉴于早期PSS的开发一般都是松散结合的工具集, Bishop (1998)建议采用统一的界面,实现工具集的集合,以此模式开发PSS系统^[6]。同时, Bishop 对之前的规划支持系统开发情况进行了综述性研究。

1999年, Lewis D. Hopkins (1999)提出了结合当时计算机技术和模型工具的PSS的详细系统框架结构,该框架结构的核心是地理模型和规划要素,包括居民、 workflow、投资、设施、法规、GIS功能组件等。但作者也坦言,他提出的只是PSS的系统框架结构,而并没有以此框架尝试开发一个具体的PSS。^[7]

2000年~2001年,基于Internet建立了全世界范围PSS系统的名录(Stan Geertman 和 John Stillwell, 2004)。^[8]

2001年, Richard K.Brail 和 Richard E.Klosterman 等联合出版了《Planning Support System: Integrating Geographic Systems, Models and Visualization Tools》一书(ESRI出版社),该书是PSS最早的专著。该书由之前关于规划支持系统方面发表的15篇学位论文构成,分为规划支持系统纵览、模拟与方案生成、可视化三个部分。

2002年, Stillwell (2002)出版了《Planning Support System in Practice》一书(Springer出版社),作者在书中提出在规划过程中通过引入PSS来促进公众参与的理念和实际范例,重点分析了基于可视化、元胞自动机、多个体系统、案例推理系统、模糊算法等技术的规划支持工具,并介绍了战略规划、土地利用规划、基础设施规划、环境规划等各类规划中的PSS应用实例。整体上该书属于一本以案例为线索的规划支持系统专著。^[9]

2003年,我国同济大学的硕士研究生刘锴在《国外城市规划》杂志上发表了 Awais Latif Piracha 等人撰写的“Planning Support System as an Innovative Blend of Computer Tools: An Approach for Guiding Decisions on Industrial Locations in Punjab Province, Pakistan”一文的译文“与计算机技术创造性结合的规划支持系统”,首次在公开发表物上将规划支持系统的概念引入国内;

2004年, Stan Geertman 和 John Stillwell (2004)等人对名录进行详细分析并识别各类具有代表性的PSS系统的主要特征,并给出了PSS的未来发展趋势。

2005年,我国武汉大学的杜宁睿和李渊在《武汉大学学报(工学版)》发表了“规划支持系统(PSS)及其在城市空间规划决策中的应用”一文,同样引入了规划支持系统的概念,

并应用目前的主要规划支持系统之一“WHAT IF?”应用于我国的规划实践中。

2006年,叶嘉安出版了《地理信息与规划支持系统》一书,该书的模式和《Planning Support System in Practice》一书比较类似,介绍了作者在规划支持系统方面的不同实践案例。

随着PSS研究的增多,以及计算机技术的不断进步,计算机技术在城市规划和环境规划领域应用方面,已有每年一度的“计算机在城市规划管理中应用(Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, CUPUM)”会议,就这一方面的研究问题进行交流 and 讨论(P. Rizze, 1999)^[10]

同时,国外在近十年来有多个应用于实际工作的PSS问世,将在本书规划支持系统实例一章对其进行详细介绍。总体上,PSS最初是由国外学者提出,近年来在国外已经有了较大的进展。而近几年,PSS的概念才引入国内,从发表的学术论文和专著看,有变热的趋势。

对于目前关于PSS发表的国外、国内的基本专著看,一般都是侧重于从案例的角度进行规划支持系统的介绍,而对其理论基础、设计开发模式等方面的介绍很为薄弱,本书将在以往研究的基础上,提出适合我国规划编制工作的PSS系统结构。

需要指出的是,在国际国内主要学术数据库中以“planning support system”为关键词或者题名进行搜索,一般搜索结果并不是本书所指的规划支持系统的范畴,而是规划决策支持系统(Planning DSS)。

1.2.2 系统定义

Stillwell在其专著中提出,规划支持系统是基于地理信息技术的由规划理论、信息、方法、工具等构成的,用于各尺度公共或个人规划任务的专业工具集(Stillwell, 2002)。可以说,每一个规划支持系统都包括规划师用来分析和规划特定规划事务的一套特定组件,这些组件可以是数据集、计算机算法,也可以是可视化组件、规划理论、规划模型等。规划支持系统通过交换信息用于支持规划过程,也可以辅助规划方案的生成。^[1]

Klosterman在其专著中,综合Han、Kim等人的研究成果,认为规划支持系统类似于决策支持系统,主要用于提供交互式的、集成式的、参与式的方式来处理非常务性、非结构性的规划问题。它更应该关注长期的战略性的问题,而不像DSS那样用于个人或个体组织处理短期的政策制定问题。PSS并不是一个可以替换目前规划师所采用的软件工具的全新的计算机辅助规划技术,而应该是一个集成了有利于规划开展的信息技术框架。它不应该是某一种或某一类技术,而应该是采用所有适合特定规划目的的一系列工具。任何一个复杂的PSS都应该采用一整套适用不同功能的信息技术。总体上,Klosterman认为PSS更应该是一套松散集成在一起的工具集,其中每个工具在规划过程中实现特定的功能,总体上构成了一套信息技术框架。

Harris、Batty等人认为,规划支持系统不应该被认为是封闭的由众多能够接收原始数据并自动生成规划方案的计算机模型构成的系统,它应该是提供了一套实现规划师、公众、政府之间交互的规划信息框架,包含一系列与现实世界相关的结构性的可利用的而不是原始数

[1] 原文为:“PSS are geo-technology related instruments consisting of theories, information, methods, tools, et cetera for support of unique professional public or private planning tasks at any spatial scale.”

据,同时还包括一整套软件工具用于分析、预测、制定决策。它还应该支持各方之间的信息交互,并能动态、快速地产生新的规划方案。

在对相关文献对规划支持系统的定义进行调研的基础上,结合目前计算机技术的发展和规划领域的研究进展,笔者对规划支持系统的概念进行了整合:规划支持系统应该是一系列计算机软件工具的集合,它是与计算机软硬件技术同步发展的,主要建立在地理系统分析理论、规划模型、地理信息技术、可视化等理论和技术的基礎上。目前构成规划支持系统的一系列工具多为松散联结方式,但其终极目标是紧密一体式集成。系统性、动态性、交互式是规划支持系统的基本特征。

PSS 是基于计算机的方法和模型的综合,能够实现辅助规划的功能。PSS 并不是传统的计算机信息技术在城市规划领域的简单应用,而是将城市规划自身的基础理论以专业规划模型的形式,溶入到最为先进的信息技术中,相比信息技术在城市规划中的简单应用,这种模式赋予信息技术以灵魂,能够保证规划理论和知识通过信息技术得到更有效的应用,提高规划编制的效率,并通过先进的可视化技术进行规划成果的最终表达。

1.2.3 系统目标

在近十年规划支持系统的实际应用中,使用 PSS 是否可以产生更好的规划效果?PSS 是否可以通过促进更好规划的编制提高人们的生活质量?PSS 是否可以促进“为公众规划”向“与公众规划”的变革?实际上,一方面因为规划师的意识,一方面因为 PSS 自身的发展阶段和发展水平,在 PSS 的应用过程中目前还存在着一系列的问题:

1. 城市规划师和城市设计者一般都存在抵触系统分析理论和计算机模型的情况,相应的意识普遍不高,相比经济师使用电子表格、医药专家使用 ECG 技术,认为地理分析技术、规划模型是不可或缺工具的规划师的比例仍然非常低;
2. 21 世纪初的规划实践中采用地理信息技术或规划模型还远远不是世界范围的,也远远没有被有效地集成到具体的规划编制过程中;
3. 1998 年 Klosterman 曾提出,规划支持工具的应用情况,和十年之前没有太多进步,虽然前景似乎比较令人兴奋,但也可能以后 25 年在规划中新工具的应用仍然令人失望;
4. 规划师从事的分析任务的多样性、商业软件开发费用高昂、目标市场小等原因,都导致了规划支持工具将继续落后于其他领域软件的发展;
5. GIS 虽然应用于一些规划实践中,但一般仍然停留在数据统计、专题图制作等初级阶段,其对规划的决策分析过程的影响依旧很小。

同时,原有的规划过程主要是通过分析/研究决定规划、教育公众规划方案、宣告规划、保护规划和规划师自己。实践证明,原有的规划流程并不具有很好的效果,所以公众参与的视角也在变化。^[2]

鉴于规划支持系统在实际应用中存在的问题和规划编制自身的转变需求,对现阶段和下

[2] Urban & Regional Planning in the United States and GIS in Planning, Milton Ospina, Urban & Regional Planning and Economic Development Solutions Manager, ESRI, 2006, 5

一阶段规划支持系统的基本发展目标如下^[3]：

1. 系统中的模型和方法应“尽可能的简单，而不是尽可能的多”，容易理解、容易使用是系统最基本的需求；
2. 系统基于 GIS 和网络是不可阻挡的发展趋势；
3. 系统能够根据客观条件和主观因素的变化进行快速的反馈；
4. 系统应能够揭示规划政策或方案对未来产生的影响；
5. 系统设计应便于公众参与的开展，能够综合公众建议，辅助进行方案或政策的调整；
6. 系统应具有友好的用户界面；
7. 系统应便于多个规划方案的生成。

上面所列的是一个规划支持系统应该满足的基本条件，是规划支持系统发展的基本目标，目前国际上典型的 PSS，一般都符合其中的多数条件。计算机技术的进步和规划理论的成熟，将进一步推进 PSS 的发展，PSS 定将向更高的目标发展，以目前的眼光来看，PSS 的中级目标应该是：

1. 各模块紧密集成在一起的灵活的、界面友好；
2. 可以根据特定的任务帮助用户选择适当的分析或预测工具，辅助用户采用最为恰当的方法解决问题；
3. 利用 PSS 建立已有的各个尺度的空间或属性数据与分析模型的恰当链接；
4. 运行适当的模型来分析不同规划方案或政策实施的效果的影响；
5. 以地图、表格、视频、音频等形式同步显示分析或规划结果。

总体上，规划支持系统的终极目标是易用、灵活、智能、紧密、高效，什么人都可以用，适应各种数据/方法/模型/流程/表现方面的变化，适合各个尺度、各种数据、各种大小的研究区域，适合各种研究深度。

1.2.4 系统结构

PSS 对决策者来说不仅是一个决策支持系统，它同时还提供工具、模型和规划所需的信息。PSS 有一整套相关信息技术的集成（如 GIS、电子表格、模型和数据库），它们在规划的不同阶段有着不同的应用。GIS 的地理信息处理、图形显示和建模能力，专业规划模型的决策支持功能，以及可视化技术良好的方案表达能力，使得地理信息技术、专业规划模型和可视化技术成为 PSS 的重要组成部分，一般的 PSS 系统结构框图如图 3 所示。在基本要素的支持下，实现了相应的辅助规划功能模块，由统一的用户界面提供用户访问 PSS 的接口。

[3] GIS Supports Planning and the Public Participation Process with Planning Support Systems, Milton Ospina, Urban & Regional Planning and Economic Development Solutions Manager, ESRI, 2004, 2

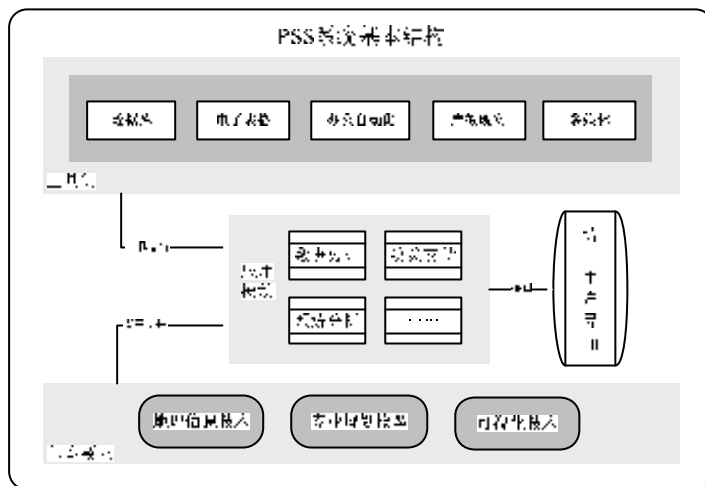


图 3 PSS 系统基本结构框图

规划支持系统是辅助规划的信息技术的框架，它的基本构成要素主要是地理系统分析理论、地理信息技术、城市模型、专业规划模型、可视化技术和其他计算机技术，对于一个完整的综合的规划支持系统，以上六个要素缺一不可，其中地理系统分析理论提供了规划分析的一套基本理论框架和方法集，地理信息技术提供了空间数据获取、分析和表现的平台，城市模型和专业规划模型提供了规划领域最为核心、先进的规划理念，可视化技术保证规划过程、规划结果的更加容易理解，其他计算机技术如网络技术、多媒体技术等，保证了规划编制过程的交流和公众参与。

在下一章“规划支持系统基础”中，将就这六个规划支持系统的基本要素进行介绍，并在第三章“规划支持系统实现”中，介绍将这六个基本要素整合为一个完整的规划支持系统的解决方案。

1.3 系统开发

1.3.1 GIS 与模型

纵观 GIS 在国外城市规划等领域的应用，可以发现其最主要的弱势在于它和模型的集成不够紧密。按照模型与 GIS 结合的紧密程度可以分为松散联结 (Loose coupling)、紧密联结 (Tight coupling) 和完全集成 (Full integration) 三种形式 (Harris, 1989; Harris, 1993; Batty, 1995; Klosterman, 1995) ^{[11][12][13]}

松散联结，主要实现 GIS 和模型之间的数据导入导出，数据从 GIS 中导出到模型中作为模型输入，而模型的输出也可以返回到 GIS 进行显示和进一步的空间分析。这种结合一般不需要代码的编写，也是现阶段使用最多的一种结合方式，但往往要求用户对 GIS 和模型同时非常熟悉，同时需要的工作量较大。

紧密联结，是在 GIS 环境中编写模型程序，即利用 GIS 专业软件提供的二次开发语言，对软件进行二次开发，把模型的算法用 GIS 专业软件的二次开发语言表达出来，实现模型与 GIS 的数据交换；这种结合方式需要开发者有程序设计基础，现阶段使用比较多，相比松散联结方式，应用效率有明显提高。

完全集成,是把模型和 GIS 集成在一起,采用二次开发技术,直接在模型中进行数据的计算获得、分析、表达,同时也可以进行参数的率定、灵敏度分析、不确定性分析等工作。目前多用 VB 或者 VC 等 OOP(面向对象编程)语言对 MO 或 AO 等 GIS 专业组件进行二次开发,在一个平台上的同一界面实现 GIS 与模型的结合都属于完全集成。这种趋势目前正在不断增强,这就把规划者从自己设计模型中解脱出来。然而,除非大部分的常用模型都能与 GIS 完全集成,否则对其他两种结合方式的需求仍会依然存在。

1.3.2 开发模式探讨

对于规划支持系统,其内部的模型与 GIS 的结合方式,上面提到的三种都存在,只是不同的 PSS 发展阶段,适用不同的结合模式,现阶段的 PSS 中模型与 GIS 的结合还处于松散联结阶段,需要的开发工作一般较少,而完全集成,则是规划支持系统的远景发展目标。

无论采用哪一种结合模式,都应该满足上文提到的规划支持系统的基本目标,也都应该了解采用哪些规划模型和定量化方法,本书不对松散联结的 PSS 作过多介绍,因为在下一章的规划支持系统基础部分,提供了松散联结开发模式的基本素材,读者只需对其进行组装即可。本书将在规划支持系统实现一章重点提出一种完全集成的规划支持系统实现模式。

这种模式的核心思想是将构成规划支持系统的六个核心要素采用组件的方式进行封装,进而采用统一的 COM 标准进行要素之间的集成,以构成完全集成的规划支持系统。系统的开发过程中,尽量采用模型与功能模块、功能模块之间紧密集成的方式进行开发,这种方法需要较多的开发工作,但是可以显著提高规划效率。系统总体结构方面,可以采用分层分模块进行开发,系统主要分为四个层次——系统底层、系统应用基础层、系统应用层和统一用户界面(龙瀛,贾海峰,2004)^[14]。其中系统底层是在 COMGIS、COM 和 Geodatabase 数据模型的基础上,开发符号库、仿真模型库、数据库、模型库和知识库,该层是系统开发的基础;系统应用基础层主要实现数据标准化、编辑、表达和模拟等功能;系统应用层主要按照专业分为空间、生态、交通和市政规划等模块;统一用户界面向用户提供进入各应用层模块的接口。

系统的开发策略方面,具体将在规划支持系统实现一章进行介绍。

1.4 相关概念辨析

下面就与规划支持系统相关的常见的概念进行辨析,以了解规划支持系统与其的区别和联系。

1.4.1 CAP 与 CAD

“计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)”的概念早于 CAP,发展也较 CAP 成熟。CAD 与 CAP 的不同之处主要体现在以下几方面:

1. 系统的侧重点不同:CAD 系统侧重于设计,而 CAP 系统则更侧重于数据管理、查询、分析、计算、表达等。在 CAD 与 CAP 共同涉足的领域,如城市规划、城市工程规划,由于 CAD 的出现较 CAP 早,所以这一领域曾一度为 CAD 系统所占领,

随着 CAP 系统的出现和完善, 鉴于 CAD 系统和 CAP 系统的侧重点不同, 操作平台正由 CAD 系统向 CAP 系统过渡;

2. 应用领域不同: CAD 的应用领域较为广泛, 如建筑、机械、服装设计等, 在城市规划领域也有所应用, 而 CAP 的应用主要是各类规划领域, 不及 CAD 应用广泛;
3. 软件成熟度不同: 目前很多行业的 CAD 软件已较为成熟, 具有较强的通用性, 而 CAP 软件的发展较为缓慢, 且一般是针对某一规划项目而设计开发, 通用性较差。

1.4.2 PSS、GIS 和 SDSS

PSS (规划支持系统, Planning Support System), 是 CAP 系统的一种形式, 一般是以 GIS 和规划专业模型为核心的集成系统, 用于实现特定的规划辅助功能, 它通常通过一个由共用的界面和一套工具集的集成环境为规划者提供相关支持; GIS 是通用的空间数据生成、处理、编辑和表达的平台, 包括众多的空间分析模型, 兼具空间表达功能。它具有较为广泛的应用, 目前有较多的商业 GIS 软件如 ESRI ArcGIS、MapInfo Professional 和 IDRISI 等。大多数情况下, 实现特定功能的 GIS 是 PSS 的重要组成部分; 而 SDSS (空间决策支持系统, Spatial Decision Support System), 即有空间数据支持的决策支持系统 (Decision Support System, DSS)。

PSS、GIS 和 SDSS 有较多的共同点, 都可以在规划过程中起到规划辅助的功能, 都是 CAP 系统的一种形式。在欧洲, 就有一种观点, 即将 PSS 称之为空间决策支持系统 SDSS。因而在概念上常常不容易将它与 SDSS 相区别。事实上二者既相互联系又各有侧重。Geertman 和 Stillwell 认为 PSS 和 SDSS 最主要的共同特点就是应用强大的信息技术和已有的专业知识帮助规划者和决策者了解规划和决策环境, 从而提高规划和决策的效率和准确率, 这种认识反应了二者之间的紧密联系 (杜宁睿, 李渊, 2005)^[15]。二者的区别在于:

1. PSS 一般应用于对重大问题和未来发展战略提供多种可能性的分析, 以进行比较、交互式讨论和沟通, 从而最终达到辅助决策的目的; 而 SDSS 则侧重于对具体问题和目标提供决策方案。
2. PSS 的使用者一般是具有规划技术背景的规划师和对规划感兴趣的公众群体, 而 SDSS 的使用者一般是决策者或决策分析者。
3. PSS 侧重于计算、表达等功能, 而 SDSS 则侧重于决策的制定。

总体上 PSS 与 GIS、SDSS 的主要区别在于: PSS 是“量体裁衣”专门用于支持规划相关任务的计算机系统。

1.4.3 城市规划管理信息系统、城市规划信息系统、城市规划决策支持系统

城市规划的编制和管理工作中一般都涉及信息系统的应用, 国内文献中出现的该领域信息系统的名称主要有城市规划管理信息系统、城市规划信息系统和城市规划决策支持系统等, 有必要对齐概念进行辨析, 以明确本书所研究的规划支持系统与相关概念的区别和联系。

一、城市规划管理信息系统

按目前的城市规划体系,规划的主要业务可分为规划编制和规划管理两大部分。城市规划管理的主要职责是城市用地的规划和建设工程的管理,其业务工作主要包括规划编制成果管理、建设申请审批、规划实施的监督检查、内部业务档案管理、对外信息服务等,数据要求较为复杂。主要依托的技术包括计算机网络、数据库管理系统、图形处理系统、工作流处理系统,这就需要城市规划管理信息系统(UPMIS, Urban Planning Management Information System)一方面应根据城市规划管理部门的工作内容和业务流程,提供辅助日常办公与文档处理的功能,另一方面还要具有集成管理海量图文数据并实现基于网络的数据传输与处理的功能(宋小冬,2006)^[16]。

城市规划管理信息系统所服务的目前主流的城市规划管理系统一般都融合了办公自动化和地理信息系统,保证规划管理部门的办公流程管理与地理信息的集成,主要目的在于规划管理信息化、业务流程自动化、图文传递网络化、办案办公协同化、跟踪督办现代化、决策分析科学化(严荣华等,2001)^[17]。

FINAL 城市规划管理信息系统与本书提及的规划支持系统的核心区别在于,城市规划管理信息系统主要应用于规划管理方面,实现的主要功能是规划管理部门的办公自动化,而规划支持系统主要应用于规划编制方面,实现的主要功能是系统分析、科学决策。

二、城市规划信息系统

城市规划信息系统(Urban Planning Information System, UPIS)是利用计算机技术对城市规划信息进行获取、处理、存储、管理分析及辅助决策支持的系统,其所包括的信息可分为:1 支持城市规划的信息,如基础地形、地质、地籍、社会经济统计、地价信息等。2 规划产生的信息,如规划的法规、规章、规范、图则等,这是规划编制、规划立法和规划管理的最终结果和趋势(孙汉青,卢明山,2002)^[18]。

一个完善的城市规划信息系统是以城市规划数据库为核心,将计算机技术、通信技术、网络技术、地理信息系统技术、遥感技术、城市规划及系统科学的理论和方法综合应用于城市规划与管理事务的图文一体化技术集成系统。

城市规划信息系统不仅涉及规划编制、规划管理和规划方法的相关内容,还包含了城市管理其他方面的内容。城市规划信息系统不仅对政府的各部门管理和决策提供科学的宜居,而且也为广大的市民提供服务(丁建伟等,2001;陈顺清,1998)^{[19][20]}。^[4]

三、城市规划决策支持系统

决策支持系统是以管理科学、运筹学、控制论和行为科学为基础,以计算机技术、仿真技术和信息技术为手段,针对半结构化的决策问题,支持决策活动的具有智能作用的人机系统(蒋恒恒,罗玉军,2002)^[21]。其主要由数据库、模型库、知识库和方法库构成。

而城市规划决策支持系统(Urban Planning Decision Support System, UPDSS)从本质上是一种决策支持系统,其以城市规划数据库为核心,计算机技术、通信技术、网络技术、地理信息系统技术、遥感技术、城市规划及系统科学的理论和方法综合应用于城市规划与管理事务的图文一体化技术集成系统,其目标是实现城市规划信息的采集、传输、存储、加工、维护、使用以及动态更新、统计分析和辅助决策等功能(张妍,尚金城,2002)^[22]。

四、对比分析

[4] 2001年 Robert Laurini 出版的《Information Systems for Urban Planning》一书对城市规划信息系统作了全面系统的介绍。

1. 城市规划管理信息系统与本书提及的规划支持系统的核心区别在于,城市规划管理信息系统主要应用于规划管理方面,实现的主要功能是规划管理部门的办公自动化,而规划支持系统主要应用于规划编制方面,实现的主要功能是系统分析、科学决策。
2. 城市信息系统是城市信息系统既可应用于城市规划编制,又可应用于城市规划管理,可以说是城市规划管理信息系统的数据基础,一般仅具有数据统计、分类等功能,弱于辅助规划或辅助决策功能;
3. 城市规划决策支持系统作为一种决策支持系统,相比规划支持系统,二者的区别类似 SDSS 与 PSS 的区别。但总体上,城市规划决策支持系统比较接近规划支持系统。

1.5 关于本书

目前关于规划支持系统的公共出版物还很少,本书在写作的过程中,一直围绕以向读者全面系统地介绍 PSS 为目的,本书结构的设置、内容的编写、素材的选择等各个方面都是围绕着这个核心目的开展的,因此有必要将笔者推荐读者使用此书的方式进行说明。

- (1) 本书对规划支持系统进行了全面系统的介绍,由浅入深地介绍了这一领域的研究进展、相关概念、整体的实现形式等等,实现了从入门到精通的写作目的。但具体的技术细节,笔者并没有作过多深入介绍,可以通过参考其他基础教材了解;
- (2) 本书在城市模型、专业规划模型、地理系统分析理论和国际典型系统方面,都尽笔者能力之所及作了非常全面的介绍,可以在实践中随时查找,作为从事计算机辅助规划系统工作的工具书或设计手册甚至黄页;
- (3) 本书在规划支持系统实现一章,提出了一种新型的适应目前计算机技术的 PSS 设计和开发模式,但 PSS 的实现模式并不限于这一种,国外的研究者也在相应文献中提到了其他实现模式,读者可以参考本书的相关参考资料了解其他实现模式;
- (4) 通过笔者的调研,目前国际上已有的另外几本关于规划支持系统方面的专著(具体见参考文献),其形式无外乎都是案例或已有学术论文的集合,而对 PSS 本身并没有作比较系统的介绍,尤其是 PSS 的基础技术。本书在这一方面有了较大的突破;
- (5) 本书最后一章是笔者在规划支持系统方面的实践案例介绍,主要采用的是规划支持系统实现部分的 PSS 实现思路,算是对这种系统实现模式的部分探索性工作。因为篇幅限制,其他案例及这方面的最新研究进展,可以通过网络参考笔者的学术论文。

2 规划支持系统基础

本部分将就规划支持系统的基础构成要素进行详细介绍，主要包括地理系统分析理论、地理信息系统、遥感技术、城市模型、专业规划模型、可视化技术和其他计算机技术，重点介绍地理系统分析理论和规划模型两个部分。该部分是设计、开发和应用规划支持系统的理论和技术基础。

2.1 地理系统分析理论

2.1.1 概述

(1) 系统与地理系统

从自然界到人类社会存在着各种各样的系统，系统是指由若干个可以相互区别、相互依存、相互联系与作用的要素所组成，具有某种结构和特定功能，处在一定的环境中，以达到某种预定目标的有机体。由此可见，系统的组成包括：要素——构成系统的基本单元；结构——要素之间相互联系、相互作用的机构、方式和秩序；功能——各要素在一定结构下形成的效应；行为——实现系统目标所进行的活动；环境——系统以外的其他与之相关的事物。相关性、目的性、等级性、整体性、环境适应性和动态性是系统的基本特征（汪树玉，刘国华，2002）^[23]。

地理系统是指一定地域空间范围内自然、经济和社会文化等组成部分相互作用、相互转化且具有一定结构和功能的整体。从系统的要素及相互关系看，地理系统是一个开放的、复杂的巨系统（Qian X S等，1990）^[24]，按照其研究对象的性质，地理系统一般分为自然地理和人文地理两个子系统。地理系统结构的特征从时空关系看，具有区域性、连续性、相容性和不可逆性；从量的关系看，具有相关性、模糊性、非线性和巨型性；从组织关系看，具有整体性、层次性和有序性；从发生与演化看，具有可变性、因果性、突变性、可模拟性和不可逆性等（成伟光，李军，1999）^[25]。

(2) 地理学及其数学方法

地理学是一门研究地理环境及其与人类活动之间相互关系的综合性、交叉性学科。它以分布、形态、类型、关系、结构、联系、过程、机制等概念构筑其理论体系，注重的是地理事物的空间格局与地理现象的发生、发展及变化规律，追求的目标是人地系统的优化——即人口、资源、环境与社会经济协调发展。

为了进一步深入地在地理学中开展量化研究，揭示地理现象发生、发展的内在机制及运动规律，从而为地理系统的预测及优化调控提供科学依据，数学方法日益广泛而深入地应用到地理学中。它的出现反映了地理学朝着量化方向发展的新趋势，这种新趋势就是在地理学研究中，以定量的精确判断来补充定性的文字描述的不足；以抽象的、反映本质的数学模型去刻划具体的、庞杂的各种地理现象；以对过程的模拟和预测来代替对现状的分析和说明；以合理的趋势推导和反馈机制分析代替简单的因果关系分析；以最新的量化技术革新地理学的传统研究方法。Burton I. (1963) 用“计量革命”一词，对自 20 世纪 50 年代末期开始的以数学方法在地理学中的应用为内涵的计量运动作了形容，并认为，“此后将不再是革命了，因为它已经成为现代地理学研究的主流方向之一。”^[26]

在现代地理学研究的各个分支领域中，数学方法在不同的要求与方式下得以应用，如分布型分析、相互关系分析、类型研究、网络分析、趋势面分析、空间相互作用分析、系统仿

真研究、过程模拟与预测研究、空间扩散研究、空间行为研究、地理系统优化调控研究等诸多方面。目前,现代地理学中的数学方法不但继承了现代地理学发展史上计量运动(陈彦光, 2005)^[27]的成果,而且吸收了40多年来系统科学、系统分析方法、计算机科学、现代计算理论及计算方法等领域内的研究成果,其主要内容体系如表2所示(徐建华, 2002)^[28]。

表2 现代地理学中的数学方法的内容体系

数学方法	用途
概率论	用于地理现象、地理要素的随机分布研究
抽样调查	用于地理数据的采集和整理
相关分析	分析地理要素之间的相关关系
回归分析	用于拟合地理要素之间具体的数量关系、预测发展趋势
方差分析	研究地理数据分布的离散程度
时间序列分析	用于地理过程时间序列的预测与控制研究
主成分分析	用于地理数据的降维处理与地理要素的因素分析与综合评价研究
聚类分析	用于各种地理要素分类、各种地理区域划分
趋势面分析	用于拟合地理要素的空间分布形态
协方差与变异函数	用于研究地理要素的空间相关性及其空间分布的数量规律
克立格法	用于地理要素的空间局部估计和局部插值
马尔可夫过程	用于研究随机地理过程、预测随机地理事件
线性规划	用于研究有关规划与决策问题
投入产出分析	用于产业部门联系分析、劳动地域构成分析、区域相互作用分析
多目标规划	用于研究有关规划与决策问题
线性规划	用于研究有关规划与决策问题
动态规划	用于有关多阶段地理决策问题的求解
网络分析	用于交通网络、通讯网络、河流水系等地理网络的研究
层次分析法	用于有关多层次、多要素战略决策问题的分析
风险型决策分析法	用于各种风险型地理决策问题的分析
不确定型决策分析法	用于各种不确定型地理决策问题的分析
模糊数学方法	用于各种模糊地理现象、地理过程、地理决策和系统评价研究
控制论	用于地理过程、地理系统的调控研究
信息论	用于各种地理信息的分析、处理
突变论	用于突发性地理现象、地理事件的研究
耗散结构理论	用于有关地理系统、地理过程的组织与演化问题研究
协同学	用于有关地理系统、地理过程的自组织问题研究
灰色系统方法	用于灰色地理系统的分析、建模、控制与决策研究
系统动力学方法	用于地理系统的仿真、模拟和预测
分形理论	用于有关地理实体的形态以及要素分布形态的自相似机理研究
小波分析	用于多层次、多尺度、多分辨率的地理时空过程时频分析
人工神经网络	用于有关地理模式的识别、地理过程机制的自学习和预测等
遗传算法	用于复杂的非线性地理问题的计算
元胞自动机	用于地理过程的计算机模拟

(3) 系统分析与地理学

系统分析一词是由美国兰德(RAND—Research and Development)咨询公司首先使用的,他们为解决复杂问题,发展并总结出一套标准的方法和步骤,称之为系统分析。系统分析是运用科学和数学手段研究系统的一种方法^[5],它需要遵循以下原则:整体性与目的性相结合、递阶分层分解和综合协调相结合、长远利益与当前利益相结合、定量分析与定性分析相结合。系统分析的步骤包括:界定问题、调查资料、明确系统目标与功能、拟定达到目标的策略和或方案、选择评价标准、建立模型、模拟与仿真、方案选择与优化。

20世纪以来,“系统思想”、“系统分析”的理论方法引入到了地理学,形成了所谓的地理学中的“系统革命”,其任务就是在地理研究中广泛地应用系统思想、模型方法、最优化方法等系统分析方法,推进地理学向现代化和理论化发展(张超,沈建法,1993)^[29]。地理系统分析就是将系统分析方法这一工具应用于地理系统的建模、预测、模拟、评价、优化、决策规划之中,以最有效的实现系统的目标。数学方法已经融入到地理系统分析的各个环节之中,成为地理系统分析研究中定量分析、模拟运算、预测、决策、规划及优化设计的重要手段。在本章中将对地理数据采集与预处理、系统预测方法、系统模拟方法、系统评价方法、系统优化方法、系统决策方法进行介绍,在每个部分,将首先介绍方法的理论,然后以一些具体的研究实例来说明该方法在城市研究与城市规划中的应用。

(4) 地理数据采集与预处理

地理数据是对进行地理系统分析的基础,也是数学方法在地理学中应用的先决条件。地理数据具有数量化、形式化与逻辑化的基本特征,同时具有不确定性、多维性和多种空间尺度等特点。地理数据可以分为空间数据和属性数据两种,其中空间数据用于描述地理实体、要素、现象、时间、过程产生和发展的地理位置、区域范围和空间联系,坐标是描述空间数据的主要手段;属性数据是指上述地理量的属性特征。

地理信息的采集就是应用各种手段通过各种渠道收集地理信息的过程,渠道主要包括观测、测量部门的有关专业数据,统计年鉴、公报,以及单位或个人不定期的调查数据,档案,地图图件,遥感数据等。

大部分原始资料不能直接用于地理系统分析,需要对这些数据进行预处理,转换为地理数据库可以统一存储和管理的数据格式。常见的不同原始资料转换为地理数据库的处理方法如图4。

[5] 美国麦氏科学技术大百科全书. McGraw-Hill Yearbook of science & Technology, 2000

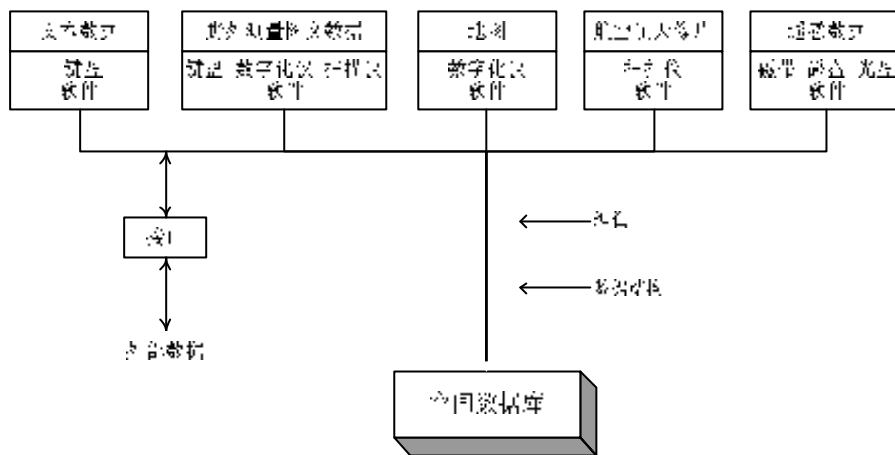


图 4 地理空间数据处理流程图

2.1.2 系统预测方法

预测是对事物（或现象）将要发生的或目前还不明确的情况进行预先估计和推测，预测要建立在在对事物的历史与现状的调研，以及对之有关各种主要因素发展的分析基础上。预测的原则包括惯性原则、类推原则、相关原则和概率推断原则。预测的一般步骤包括：（1）明确预测对象、界定问题范围和目标；（2）搜集、整理有关资料；（3）根据问题的目标与掌握的资料，选择合适的预测方法，建立相应的预测模型；（4）评价预测模型，分析其能否对事物的未来进行预测，分析其可行性与精度；（5）利用模型进行预测；（6）分析预测结果，找出可能产生的误差及其原因，并进行预测结果的调整。

预测从性质上分有定性预测和定量预测，其中定性预测根据预测者的经验、逻辑判断、直觉，预测事件发展的方向、态势等定性结果；而定量预测则根据统计数据、实验数据、以及相关的数学模型，从数量上来描述事件发展趋势和程度。定量预测又包括因果关系模型（如回归预测、人工神经网络等）、时间序列模型、因果关系模型和时间序列模型相结合的模式、灰色模型和概率预测模型等。下面对主要系统预测方法进行介绍。

（1）定性预测

1) 方法简介

定性预测方法是根据预测者的经验、逻辑判断、直觉来预测事物发展的方向、态势等定性结果的方法。定性预测着重对事物发展的性质进行预测，主要凭借人的经验以及分析能力，着重对事物发展的趋势、方向和重大转折点进行预测^[6]。其优点在于注重于事物发展在性质方面的预测，具有较大的灵活性，易于充分发挥人的主观能动作用，且简单、迅速，省时省费用；其缺点是易受主观因素的影响，比较注重于人的经验和主观判断能力，从而易受人的知识、经验多少和能力的大小的束缚和限制，尤其是缺乏对事物发展作数量上的精确描述。

定性预测主要包括 Delphi 法（专家咨询法）、主观概率法等。

Delphi 法由美国兰德公司 1964 年创立，通过信函调查的形式，反复背对背地征求专家

[6] <http://course.shufe.edu.cn/course/tjyc/multimedia/2.ppt>

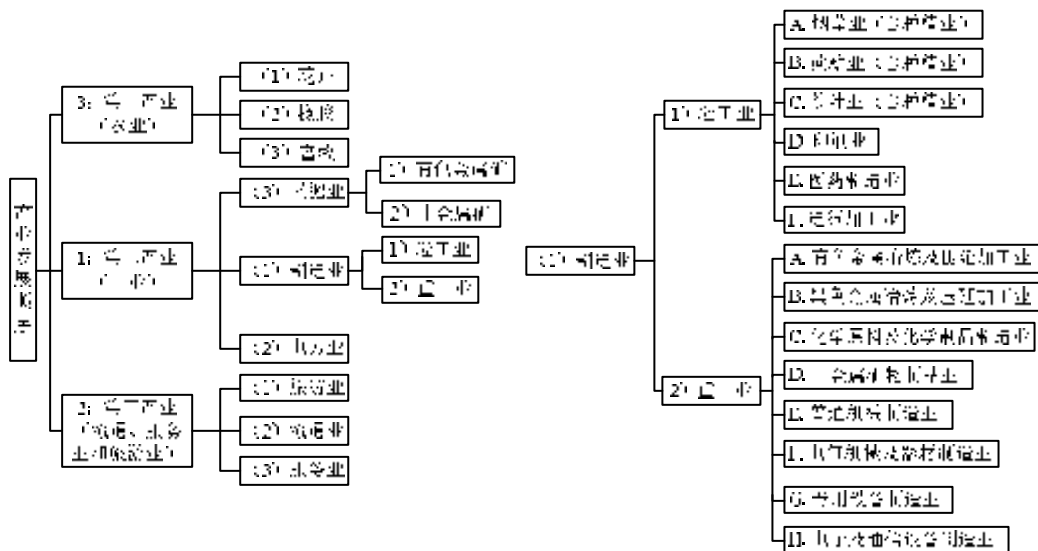
的意见，并对每次调查的结果进行汇总，再将汇总结果反馈给专家，直到得出趋于一致的结果为止，是对专家经验判断的一种匿名收集程序。现在已经成为最流行的专家评估方法。Delphi 法的主要步骤包括：(1) 明确预测目标、挑选专家、发放调查提纲（目标、问题、背景资料）；(2) 各专家匿名填写表格，征询分多轮进行；(3) 每一轮反复，都带有每一条意见的统计反馈；(4) 对于有些在统计上离群的应答值，可请求应答者考虑是否更正其应答值或请其陈述理由；对每一轮反复，皆应提供必要的反馈信息；(5) 重复步骤 2~4，使每轮反复所获得信息量逐渐趋小，到一定点后，组织者可认为意见已趋收敛，终止调查工作。Delphi 法的优点在于适用于在数据稀缺的情况，能更广泛收集到各方意见，消除心理因素影响，而缺点在于不能完全消除“随大流”倾向。除了预测，Delphi 法也经常用于系统评价中，进行打分和确定参数权重。

主观概率法是依靠专家经验的一种相对定量化程序，它要求每位专家给出事件可能发生的概率，以概率的平均值作为预测结果能够进一步消除 Delphi 方法中“随大流”倾向。其步骤包括准备相关资料、编制主观概率调查表、分析数据、判断预测。

2) 应用实例

定性预测法目前主要用于预测和分析中的指标体系的建立和权重的赋予方面，而较少的用于整体的预测中。

李德庆等（2002）^[30]采用定量与定性分析相结合的方法，包括层次分析法、Delphi 法、专家顾问法，以及资料佐证法，确定了 2010 年前云南的优势产业及其先后顺序。Delphi 法在预测中的作用在于确定“判断矩阵标度定义表”，即对影响云南产业的要素进行打分，并对打分结果进行数学处理，形成了判断矩阵，确定了产业优先发展的顺序。作者整理专家意见后，形成预测结论：云南省产业发展的基本思路是使产业发展从对自然资源的过度依赖转向主要依靠科学技术和开发人力资源；从对资源的传统整合转向全球化、网络化的现代整合（横向一体化），建立起不同层次的产业体系，促进云南产业结构和技术升级，提高经济的整体素质和效益，为云南经济的发展奠定坚实的产业基础。云南具有比较优势的产业发展的先后顺序用如图 5。



分析法、Delphi 法和头脑风暴法经过多次综合专家意见最终确定 26 项指标作为甘肃省生态环境质量综合评价体系。刘志学等 (2005) [32] 运用外部因素和内部因素分析矩阵, 确定城市物流发展的内外部环境关键要素, 采用层次分析法和 Delphi 法相结合的综合赋权方法计算各要素评分值及内外部环境因素总加权评分值。

(2) 回归预测

1) 方法简介

回归 (Regression) 预测是因果关系模型的一种。回归这个概念最早由英国著名生物兼统计学家 F. Galton 在 19 世纪末期提出, 回归分析的主要目的是确定因变量的数学期望如何随自变量的变化而变化的规律, 利用回归分析所获得的回归方程或所建立的回归模型来预测因变量的未来发展称为回归预测²⁴。

回归预测从自变量数量上分包括一元回归和多元回归; 从回归模型上分包括线形回归和

非线性回归。其体系如下: 回归预测

$\left\{ \begin{array}{l} \text{线性回归} \\ \text{非线性回归} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{一元线性回归} \\ \text{多元线性回归} \end{array} \right.$
	$\left\{ \begin{array}{l} \text{一元非线性回归} \\ \text{多元非线性回归} \end{array} \right.$

回归预测的一般步骤包括: 确定回归模型、根据已有数据求解模型参数、进行回归模型检验、进行预测。

一元线性回归就是基于一个自变量的线性方程式展开的回归分析, 其模型的表达式为 $y = a + bx + e$, 若 e 服从正态分布, 且 e 相互独立, 从样本数据中可以拟合出经验性一元线性回归方程 $\hat{y} = a + bx$ 。多元线性回归模型为 $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_kx_k + e$, 若 e 服从正态分布, 且 e 相互独立, 从样本数据中可以拟合出经验性多元线性回归方程 $\hat{y} = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_kx_k$ 。回归模型参数估值方法最常用的为最小二乘法, 即使

$$Q = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_{1i} + a_2x_{2i} + \dots + a_kx_{ki})]^2 \text{ 达到最小, 根据极值}$$

的必要条件, 可以求出参数 a_k 。预测模型的检验方法有回归方程拟合优度检验 (相关性检验) 回归方程显著性检验 (F 检验) 回归系数的显著性检测 (T 检验) 和残差分析 (DW 检验)。

非线性回归的思路和步骤是: (1) 根据经验或绘制散点图, 选择非线性回归方程, 常用的方程包括多项式函数、复合函数、生长函数、对数函数、三次函数、S 形曲线、指数函数、逆函数、幂函数和逻辑函数等; (2) 通过变量置换, 把非线性回归方程转化为线性回归; (3) 用线性回归分析中采用的方法来确定各回归系数; (4) 对方程和系数进行显著性分析; (5) 通过变量反代换, 将线性方程还原, 获得非线性回归方程和回归模型。

2) 应用实例

回归预测在城市规划研究中主要用于城市人口规模测、建设用地规模预测、用水量预测、城市垃圾产量预测以及区域物流规划等诸多方面。

孙秀锋等(2005)^[33]从我国城市建设用地的实际情况出发,以中国城市统计年鉴数据为基础,采用回归预测方法,比较了四种回归预测方程(线性,三次多项式、幂函数、指数函数)的预测结果,选用三次多项式回归方程,预测了未来一段时期内我国城市非农业人口的规模,进而推算出城市人口规模,并根据可能的人均用地水平科学地预测了未来我国城市建设用地规模。

刘守芳等(2006)^[34]通过对城市生活垃圾产生状况的分析,指出城市垃圾产生量与城市规模、数量、城市经济的发展程度、城市人口的多少及居民的收入、消费水平等诸多因素有关,预测时通常考虑的因素包括人口、能源结构、生活方式和消费水平等。选取我国西部和东部的典型城市成都、上海进行研究,运用多元线性回归模型(考虑城市人口数与城市国内生产总值)对两城市垃圾量进行预测,为城市建设规划和垃圾综合处理提供依据。

(3) 神经网络

1) 方法简介

神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)是在对人脑组织结构和运行机制的认识理解基础之上模拟其结构和智能行为的一种工程系统。早在20世纪40年代初期,美国心理学家McCulloch、数学家Pitts就提出了神经网络的第一个数学模型,从此开创了神经科学理论的研究时代。其后,美国的F. Rosenblatt、Widrow和Hopf、J. J. Hopfield等学者又提出了感知模型,使得神经网络技术得以蓬勃发展。

神经系统的基本构造是神经元(神经细胞),它是处理人体内各部分之间相互信息传递的基本单元。据神经生物学家研究的结果表明,人的一个大脑一般有 $10^{10} \sim 10^{11}$ 个神经元。每个神经元都由一个细胞体,一个连接其他神经元的轴突和一些向外伸出的其他较短分支——树突组成。轴突的功能是将本神经元的输出信号(兴奋)传递给别的神经元。其末端的许多神经末梢使得兴奋可以同时传送给多个神经元。树突的功能是接受来自其他神经元的兴奋。神经元细胞体将接受到的所有信号进行简单的处理后由轴突输出²⁸。

神经网络是一个具有高度非线性的超大规模连续时间动力系统,是由大量的神经元广泛互连而成的系统,它的这一结构特点决定着神经网络具有高速信息处理的能力。虽然每个神经元的运算功能十分简单,且信号传输速率也较低,但由于各神经元之间的极度并行互连功能,最终使得一个普通人的大脑在约1秒内就能完成现行计算机至少需要数10亿次处理步骤才能完成的任务(王秀峰,卢桂章,2004)^[35]。

神经网络的特点表现在于:知识存储容量很大,知识与信息的存储表现为神经元之间分布式的物理联系;具有很强的不确定性信息处理能力,即使输入信息不完全、不准确或模糊不清,神经网络仍然能够联想存在于记忆中的事物的完整图象;健壮性,生物神经网络不会因为个别神经元的损失而失去对原有模式的记忆,神经网络也有类似的情况,因某些原因,无论是网络的硬件实现还是软件实现中的某个或某些神经元失效,整个网络仍然能继续工作;具有自学习功能,具有高速寻找优化解的能力,利用一个针对某问题而设计的反馈模型神经网络,就能发挥计算机的高速运行能力,可以很快找到优化解。

神经网络也属于因果关系模型,目前已经提出了近60种神经网络模型。按照神经网络的构造可以将神经网络分为前馈网络模型和反馈网络模型(郭齐胜等,2006)^[36]。前馈型神经网络,又称前向网络,神经元分层排列,有输入层、隐层(亦称中间层,可有若干层)和输出层,每一层的神经元只接受前一层神经元的输入;反馈型神经网络中,如果总

节点(神经元)数为 N , 那么每个节点有 N 个输入和一个输出, 也就是说, 所有节点都是一样的, 它们之间都可相互连接, 反馈神经网络需要工作一段时间才能达到稳定。

学习方法是体现人工神经网络智能特性的主要标志, 离开了学习算法, 人工神经网络就失去了自适应、自组织和自学习的能力。按照学习方式不同, 可将人工神经网络分为有监督学习(Supervised Learning)、非监督学习(Unsupervised Learning)和再励学习(Reinforcement Learning)等几大类^[7]。在有监督的学习方式中, 网络的输出和期望的输出(即监督信号)进行比较, 然后根据两者之间的差异调整网络的权值, 最终使差异变小。在无监督的学习方式中, 输入模式进入网络后, 网络按照一预先设定的规则(如竞争规则)自动调整权值, 使网络最终具有模式分类等功能。再励学习是介于上述两者之间的一种学习方式。

应用最广泛的人工神经网络模型是由 Rumelhart 等人于 1985 年提出的前馈网络(Back-propagation network, BP)模型; 另外, 其他较为常用的模型还有 1982 年美国物理学家 Hopfield 提出的单层反馈网络——Hopfield 网络以及由 Kohonen 于 1982 年提出的自组织特征映射网络(Self-organizing feature map, SOM), 也称 Kohonen 网络。这些模型的具体原理和应用实例参见文献(王安麟, 2004)等。^[37]

2) 应用实例

人工神经网络方法适用于地理模式识别、地理过程模拟与预测、地理系统的优化等问题研究。在城市规划中, 人工神经网络被用于宏观经济预测、产业结构预测、用水量预测、水质评价预测和预警、交通流量预测、城市燃气管网预测、公路网规模预测、土地利用变化预测等方面。

赖红松(2003)^[38]等对城市建设用地量预测中, 采用灰色预测 GM(1,1)和自回归移动平均模型 NARMA(p,q)的递归网络模型预测相结合的方法, 结合前馈神经网络 FNN(Feedforward Neural Network)对它们的预测值进行组合预测, 得到更为准确的预测值。以杭州市为例, 作者对杭州各类建筑用地(居住用地、工业用地、道路广场用地、对外交通用地、公共设施用地、绿地)用地量进行预测, 根据 1980~1988 年的统计数据建立模型, 预测了 1989~1994 年的用地量。结果表明 FNN 模型的组合预测效果优于任一单一模型。

李存军(2004)^[39]等提出一种基于神经网络的融合预测方法。这种方法根据预测数据各属性的特点, 将数据构造为多个相关的时间序列。在此基础上, 对各序列采取不同的处理方法, 然后采用具有单隐层的三层 BP 神经网络模型计算相关序列与预测对象的映射关系, 进行融合, 得到最终的预测结果。作者对成都二环路某路口一个方向的交通流量进行了试验, 结果表明, 采用这种方法可以有效地改善数据预测的误差。基于神经网络的数据融合预测与传统的预测方法相比, 由于充分利用了预测对象的各种信息, 在预测的准确程度上有很大的提高。

曾光(2006)^[40]运用人工神经网络方法预测了高新区建设与城市发展的关系, 以武汉市和武汉东湖高新区为例, 选取武汉东湖高新区的 5 个主要指标(总收入、企业数、出口额、年 R&D 投入、员工数)和武汉市城市发展的 4 个主要指标(GDP、城区人口、第三产业比重、大专以上学历者), 在 BP 模型模拟下, 由 1995~2001 的数据预测了 2002 年的情况, 与实际值相比除了 GDP 外, 其他三类指标的预测结果与实际值都很接近, 结果表明运用人工神经网络中的 BP 模型, 通过构建、训练、测试, 能够比较准确的预测两者的发展关系。

除了系统预测, 人工神经网络还可以用于系统模拟, 将在下面的章节进行介绍。

[7] <http://www.hrlab.org/s11.ppt>

(4) 时间序列分析预测

1) 方法简介

时间序列 (Time Series) 是指按时间顺序排列起来的一组数据, 它展示了研究对象在一定时期内的变动过程, 可以从中分析并寻找事物变化特征、趋势和发展规律。时间序列分析研究的不是事物间的相互依存或因果关系, 而是事物随时间的演变规律, 并用来预测事物未来的发展。从系统论的观点看, 时间序列分析研究系统总体或系统要素的变化趋势, 其基本假设是时间序列应遵循惯性原则, 即被预测事物的过去变化趋势在一定条件下会延续到未来。

时间序列分析预测的基本方法包括简单回归分析法、趋势外推法、平滑预测法、自回归法和自回归移动平均模型。

(1) 简单回归分析法的应用条件为时间序列有两个以上的变量, 假设一个变量的变化大体上可由其他一个或多个变量来决定, 其基本思想是回归分析, 它适用于序列间的关系和结构分析以及较长期的预测。

(2) 趋势外推法认为事物发展规律与时间本身的推移相关联, 可以建立序列与时间的函数关系, 其基本思想同样是回归分析, 利用已知的具有各种变化特征的曲线对序列的长期趋势进行拟合, 它适用于精度不高的中长期趋势预测, 常用的方程包括一元线性方程、二次函数、复合函数、生长函数、对数函数、三次函数、S 形曲线、指数函数、幂函数等。

(3) 平滑预测法的应用条件为事物的发展有连续性, 即从过去状态到现在状态到未来状态, 其基本思想是用序列过去值的加权平均数来预测未来的值, 且通过权数的大小体现事物发展中不同时期与现实联系的紧密程度, 它适用于短期预测, 其限制在于预测只根据部分数据, 对全部数据中的信息利用不足。平滑预测法分为移动平均法、滑动平均法和指数平滑法, 下面分别进行简要介绍。

移动平均法: 设某一时间序列为 y_1, y_2, \dots, y_t , 则下一期 ($t+1$ 时刻) 的预测值为 $\hat{y}_{t+1} = \frac{y_t + y_{t-1} + \dots + y_{t-n+1}}{n} = \hat{y}_t + \frac{1}{n}(y_t - y_{t-n})$, 其中 n 为移动平均值 (点数)。

滑动平均法: 其公式为 $\hat{y}_t = \frac{1}{2l+1}(y_{t-l} + y_{t-(l-1)} + \dots + y_{t-1} + y_t + y_{t+1} + \dots + y_{t+l})$, l 为单侧平滑时距 (点数)。

指数平滑可以分为一次指数平滑和高次指数平滑。由于篇幅, 仅介绍一次指数平滑, 其公式为 $\hat{y}_{t+1} = \sum_{i=0}^{n-1} a(a-1)^i t_{-j} = a y_t + a(a-1)\hat{y}_t$, 其中 a 为平滑系数, 当时间序列较平稳, 数据波动较小时, a 取值可小一些, 在 0.05~0.3 之间; 而当数据起伏较大时, a 则应取较大的值, 在 0.7~0.95 之间, 具体应用时可通过经验和试算, 以误差尽可能小为好。高次平滑可参考文献 28。

(4) 自回归法 (Autoregression, AR) 的应用条件为因变量 (y , 下同) 的变化不仅与自变量 (x , 下同) 有关, 还受到 y 的历史状态的影响, 其基本思想是回归分析, 并引入了 y 的历史数据的影响, 它适用于简单回归分析中残差项存在一阶自相关情况的序列。

(5) 自回归移动平均模型分为 ARMA 模型 (Autoregressive Moving Average Model) 和

ARIMA 模型 (Autoregressive Integrated Moving Average), 前者针对平稳随机序列的分析, 从数据 y 自身当中提取各种因素来解释序列的变化规律, 常用于对随机性波动较频繁序列的短期预测; 后者针对非平稳随机序列, 通过差分或季节差分以及各种变换进行平稳化处理后, 再采用 ARMA 模型。

时间序列分析预测的步骤包括: 分析数据序列变化特征, 如通过散点图, 观察基本趋势、有无周期、确定预测区间等; 建立或选择预测模型; 利用模型进行预测; 评估预测值, 如不合理, 则进行调整。

2) 应用实例

时间序列分析预测在城市规划与城市分析中的应用主要有: 各类建设用地规模预测, 能源供需结构预测, 需水量预测, 废水废物产生量预测, 资产投资预测, GDP 预测, 人口规模预测等方面。

王明文等 (2003)^[41]以温州港为例, 分析了温州港的区位优势和发展潜力, 采用时间序列分析、相关分析、弹性系数等方法综合分析, 预测了温州港未来的吞吐量, 根据温州市的经济规模、发展潜力及温州港的区位优势, 将其功能定位为以国际集装箱和大宗散货运输为主的多功能、综合性、开放型的沿海主枢纽港。

张波 (2006)^[42]用 ARMA 模型对湖北人均国内生产总值 (1978~2004) 时间序列建模并进行短期外推预测。作者以湖北 1978~2004 年人均 GDP 历史数据为样本, 首先对数据进行平稳化和均值化处理, 而后采用 BOX-JENKINS 法建立 ARMA 模型, 选用非线性最小二乘法来估计参数。

(5) 贝叶斯预测

1) 方法简介

贝叶斯 (Bayes) 预测模型是一种因果关系与时间序列结合的模式。贝叶斯预测是在英国统计学家 P. J. Harrison 和 C. F. Stevens 于 1971 年提倡下发展起来的方法 (周均扬, 2003)^[43]。它是运用贝叶斯统计方法进行的一种预测, 在状态变量空间建立动态模型, 将研究对象 (或系统) 的过程通过状态方程和观测方程来进行描述。所谓贝叶斯统计方法就是在统计推断中使用先验分布 (见后) 的方法。

非贝叶斯统计在做统计推断时只依据两类信息, 一是模型信息, 一是数据信息。而贝叶斯统计尚须利用另外一种信息, 即有关总体分布的未知参数的信息, 因为这类信息在进行试验以前就有, 故一般称为先验信息。贝叶斯统计要求用未知参数的一个概率分布来表示, 这个概率分布就称为先验分布。其一般模式是利用先验分布和样本信息推算后验分布。贝叶斯预测不仅利用了过去的信息, 还包括人的因素, 贝叶斯预测利用客观信息和主观信息相结合的方法进行预测, 这是其重要的基本思想之一 (张效令, 1992)^[44]。

设在 t 时刻, q_t 表示模型参数, $p(q_t)$ 为先验概率, y_t 为观测向量, $p(y_t | q_t)$ 为观测似然函数, $p(q_t | y_t)$ 为后验概率, 设 D_t 为 t 时刻及其以前时刻所有有效信息的集合, D_0 为 $t=0$ 时初始信息的集合, 在没有外部信息的条件下, D_t 可计为

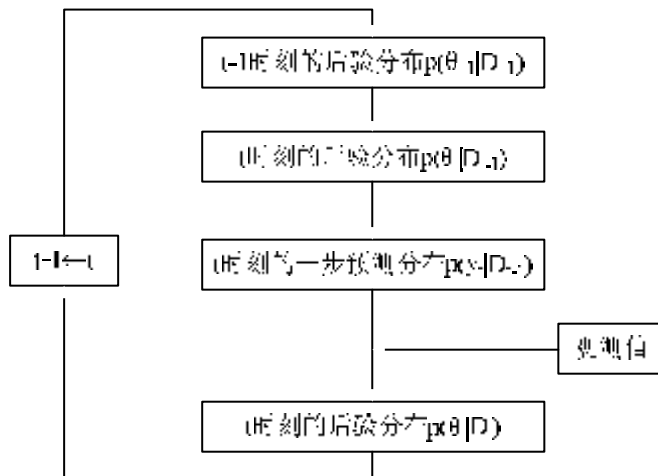
$D_t = \{y_t, D_{t-1}\} = \{y_t, y_{t-1}, \dots, y_1, D_0\}$, 故有 $p(\mathbf{q}_t | D_{t-1}) = \int p(\mathbf{q}_t | \mathbf{q}_{t-1}, D_{t-1}) dF(\mathbf{q}_{t-1}, D_{t-1})$,

其中 $F(\cdot)$ 是分布函数 , 由于 $p(y_t | D_{t-1}) p(\mathbf{q}_t | D_t) = p(y_t | \mathbf{q}_t, D_{t-1}) p(\mathbf{q}_t | D_{t-1})$, 因此

$p(\mathbf{q}_t | D_t) \propto p(y_t | \mathbf{q}_t, D_{t-1}) p(\mathbf{q}_t | D_{t-1})$, 这就是贝叶斯公式 , 通过先验概率可以求得后验概

率。所谓先验概率是指根据历史资料或主观判断 , 未经实验证实所确定的概率 ; 而后验概率是指通过抽样调查、试验或其他手段 , 获得更确切的信息 , 对预计的概率进行修正得到的概率。贝叶斯预测的另一个重要基本思想就是建立动态模型 , 并把预测分布看成是条件概率分布 , 预测者根据先验信息 $\mathbf{q}_t | D_{t-1}$, 求出预测分布 $p(y_t | D_{t-1})$, 并运用贝叶斯公式求得后验

信息 $\mathbf{q}_t | D_t$, 并不断对后验信息进行修正 , 从而求得人们所需的预测数值。贝叶斯预测递推算法的框图如图 6 所示。



年继续上升，不会有下降的趋势。

秦小虎等(2005)^[47]提出了一种基于贝叶斯网络模型理论的交通事预测方法。在综合考虑交通事故成因的基础上利用领域专家知识构建网络模型,在已有的事故数据的基础上提出基于贝叶斯法预测模型的学习算法,并通过计算变量间的条件概率来计算事故发生的可能性,达到事故预测的目的,最后通过历史数据进行仿真实验,对仿真结果和该模型的适用范围进行了分析。

(6) 灰色预测

1) 方法简介

灰色系统是指部分信息未知,部分信息已知的系统。灰色系统理论所要考察的对象是对信息不完备的系统,通过已知信息来研究和预测未知领域从而达到了解整个系统的目的,研究的是信息不完全的对象内关系不明确的机制(胡庆国等,2006)^[48]。灰色系统理论是由我国学者邓聚龙教授于20世纪80年代首创的一种系统科学理论,主要包括灰色系统建模、灰色关联分析法、灰色预测方法、灰色规划方法和灰色决策方法等,其他方法将在后面的章节逐一介绍。

灰色预测是利用灰色系统理论中的灰色模型GM(1,1)所做的预测(赖红松等,2004)^[49]。一般地说,社会系统、经济系统、生态系统等都是灰色系统。灰色系统理论认为对既含有已知信息又含有未知或非确定信息的系统进行预测,就是对在一定方位内变化的、与时间有关的灰色过程的预测。尽管过程中所显示的现象是随机的、杂乱无章的,但毕竟是有序的、有界的,具备潜在的规律,灰色预测就是利用这种规律建立灰色模型对灰色系统进行预测。

灰色模型GM(1,1)^[8]: 设时间序列 $X^{(0)}$ 有 n 个观察值, $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$,通过累加生成新序列 $X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)\}$,

则GM(1,1)模型相应的微分方程为: $\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = m$, 其中: a 称为发展灰数; m 称为

内生控制灰数。设 \hat{a} 为待估参数向量, $\hat{a} = \begin{pmatrix} a \\ m \end{pmatrix}$,可利用最小二乘法求解。解得:

$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n$ 。求解微分方程,即可得预测模型: $\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{m}{a} \right] e^{-ak} + \frac{m}{a}$,

$k = 0, 1, 2, \dots, n$,通过累减,还原为相应的原数列值: $\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k)$ 。

灰色预测的步骤包括预测模型的建立、模型检验、评估预测值的精度。

灰色预测一般有四种类型²⁸:

(1) 数列预测,对某现象随时间的顺延而发生的变化的变化所做的预测定义为数列预测,其预测的结果是该指标在未来各个时刻的具体数值;

(2) 灾变预测,对发生灾害或异常突变时间可能发生的时间预测称为灾变预测,如果表征系统行为特征的指标超过了某个阈值,则称发生了灾害;

[8] <http://course.shufe.edu.cn/course/tjyc/keyandguide/10.doc>

(3) 系统预测, 对系统中众多变量间相互协调关系的发展变化所进行的预测称为系统预测;

(4) 拓扑预测, 将原始数据作曲线, 在曲线上按定值寻找该定值发生的所有时点, 并以该定值为框架构成时点数列, 然后建立模型预测未来该定值所发生的时点。

2) 应用实例

城市规划和研究中的各类预测, 往往收集到的资料和信息不完全、不对称, 这些资料和信息恰恰介于白色(已知)与黑色(未知)之间。运用灰色理论及灰色预测模型能对其量化值进行较为准确的拟合和预测, 而这些拟合预测值是各级城市规划不可缺失的依据(高红建等, 2005)^[50]。灰色预测方法主要应用于城市建设用地规模变化趋势预测、能源需求预测、人口规模预测、耕地面积预测、灾害预测、环境质量预测、用水量预测、公共交通以及客货运量预测等多方面。

胡静等(2005)^[51]分析了柳州市城市规模变化趋势, 运用灰色系统分析法对影响城市规模变化的驱动因素进行分析, 通过灰色预测模型 GM(1, 1)预测了柳州市 2010 年的城市规模。灰色 GM(1, 1)不寻求统计规律和概率分布, 而是从无规律的原始数据中找出规律, 即对数据进行一定的处理后形成较有规律的时间序列数据, 可以揭示事情发展阶段性的过程, 可以将事物动态发展的本质内容反映到预测的模型中, 具有十分广泛的应用。利用 GM(1, 1)模型对柳州市城市规模的预测建模, 不依靠其他数据的预测, 更能体现城市自身发展的规律性。

高红建等^{错误!未定义书签。}采用灰色理论建模, 以 GDP 预测为例详细说明了灰色预测模型 GM(1, 1)的建模过程。以江苏省扬州市宝应县 GDP 预测为算例, 应用灰色理论和灰色预测模型进行推算。依据宝应县 2000~2004 年 GDP 的统计结果, 建立灰色预测模型对宝应县未来(2005~2020 年)GDP 进行了预测。同时作者提出, 总体规划中灰色理论的运用特别要重视前期的资料收集和准备工作, 收集系统全面的基础资料对预测结论精度的提高具有重要意义。在理论模型建立后, 还要重视对后期预测结论的检验、修正、分析与评价, 尽可能提高预测的精度。根据灰色理论建立灰色预测模型在城市总体规划中的应用, 是建立在严谨的预测过程和严格的数学理论基础之上的, 预测结果可作为规划编制的依据。

(7) 概率预测

1) 方法简介

对事件的全面预测, 不仅要能够给出事件发生的各种可能结果, 而且还要给出每种结果出现的概率, 这就是事物发生的概率预测。概率预测的方法主要有模拟抽样法和马尔可夫预测法。

模拟抽样法是用按一定的概率分布产生随机数的方法来模拟可能出现的随机现象, 又称蒙特卡洛(Monte Carlo)法, 是 20 世纪 40 年代中期由于科学技术的发展和电子计算机的发明而被提出的一种以概率统计理论为指导的非常重要的数值计算方法, 是指使用随机数(或更常见的伪随机数)来解决很多计算问题的方法(鹿成, 王仲奇, 1998)^[52]。蒙特卡罗方法的基本思想是: 当所求解问题是某种随机事件出现的概率, 或者是某个随机变量的期望值时, 通过某种“实验”, 以这种事件出现的频率估计这一随机事件的概率, 或者得到这个随机变量的某些数字特征, 并将其作为问题的解。蒙特卡洛法处理问题的主要步骤包括: (1) 构造模型, 确定描述研究对象的概率分布; (2) 运行模型, 根据确定的模型结构进行随机抽

样,即数字模拟,根据产生的随机数落在某一概率映射区间,则认为对应该区间的事件发生了;(3)根据预测要求,统计各事件发生的频数,运用数理统计方法求算各种统计量,进行评价与预测分析,选择最佳模拟方案。

马尔可夫 (Markov) 预测法,是基于马尔可夫链,根据事件的目前状况预测其将来各个时刻(或时期)变动状况的一种预测方法^[9]。其中的一些基本概念描述如下:(1)状态,是指某一事件在某个时刻(或时期)出现的表象。(2)事物变化过程仅仅与事物的近期状态有关而与过去的状态无关,该特性被称为无后效性,俄国数学家马尔可夫(A. A. Markov)对这种无后效性的随机过程首先进行了深入研究,因此这种随机过程被称为马尔可夫过程(Markov Process)。(3)一系列的马尔可夫过程的整体称之为马尔可夫链。(4)状态转移概率,指在系统动态演化过程中,从一种状态转化为另一状态的可能性。

假定某一个事件的发展过程有 n 个可能的状态,记为 E_1, E_2, \dots, E_n , 记 p_{ij} 为从状态 E_i 转变

为状态 E_j 的状态转移概率,则矩阵 $P = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & \cdots & p_{nn} \end{pmatrix}$ 表示由系统一次转移概率的全体,称

为转移矩阵。状态概率 $p_j(k)$ 表示事件在初始 ($k=0$) 状态为已知的条件下,经过 k 次状态转移后,在第 k 个时刻(时期)处于状态 E_j 的概率,根据马尔可夫过程的无后效性及 Bayes

条件概率公式,有 $p_j(k) = \sum_{i=1}^n p_j(k-1)p_{ij}$ ($j=1,2,\dots,n$)。记行向量 $p(k) = [p_1(k), p_2(k), \dots, p_n(k)]$, 则可以得到逐次计算状态概率的递推公式:

$$\begin{cases} p(1) = p(0)P \\ p(2) = p(1)P = p(0)P^2 \\ \vdots \\ p(k) = p(k-1)P = \cdots = p(0)P^k \end{cases}。$$

在地理事件的预测中,如果某一事件在初始时刻(或时期)的初始状态已知,则利用递推公式,就可以求得它经过 k 次状态转移后,在第 k 个时刻(时期)处于各种可能的状态的概率。马尔可夫预测的基本方法就是利用状态之间的转移概率矩阵预测事件发生的状态及其发展变化趋势。马尔可夫预测法的基本要求是状态转移概率矩阵必须具有一定的稳定性。因此,必须具有足够的统计数据,才能保证预测的精度与准确性。

2) 应用实例

在城市规划研究中,蒙特卡洛法主要用于水质预测、产业发展规模、交通拥挤预测等方面;马尔可夫预测法可以用于城市需水量预测、土地利用变化预测、灾害预测、房价预测、公共交通运输量预测等。

陈涛等(2004)^[53]阐述了城市道路交通系统涨落和触发的数学描述,论述了最大交通流的交通分配对应路段饱和度最大值,建立出现涨落后城市道路交通系统的自组织过程静态数学模型;依据最大交通流导致路段最大饱和度原理将模型简化,并利用蒙特卡洛方法,将

[9] <http://jpkc.xmu.edu.cn/jrgc/material/sk/6/6.0.ppt>

模型应用于出现涨落后道路拥挤预测。

焦瑞峰等(2006)^[54]运用灰色理论和蒙特卡洛相结合的方法建立水库出库水质预测模拟模型,首先采用灰色关联分析方法科学准确地识别出主要水质影响因素,之后用蒙特卡洛方法确定主要影响因素的概率分布,对不同数值出现的概率进行估计,在此基础上对水库出库水质进行预测。其中用蒙特卡罗方法预测很大程度地克服了专家直接给定方法的主观任意性,并且可同时考虑不同影响因素对水质状况的影响。

刘俊等(2005)^[55]应用马尔可夫链预测法进行了地价的预测。地价常常因为受到很多不确定性因素的影响,从而使得其涨落呈现出不确定性。这些不确定性因素多是随机的,如供需关系、土地使用者对不动产市场的主观预测及其心理期望等。应用马尔可夫链理论建立起地价运动数学模型,应用结果与实际情况吻合较好,这说明了该模型应用的可行性。与其他地价预测模型(时间序列模型、空间分布预测模型)相比,马尔可夫链预测模型在预测地价的同时还可以预测达到某一地价水平的平均时间,这是其他预测模型难以实现的。

何瑞珍等(2006)^[56]以郑州市为研究对象,利用1995年、2000年的土地利用现状图,利用GIS分析了土地利用动态变化过程以及土地利用各类型之间的相互转化情况。在此基础上,得到研究区土地利用变化的转移矩阵,据此分析郑州市1995~2000年间土地利用动态变化的空间过程。同时运用基于马尔可夫预测的马尔可夫模型对2005年和2010年的土地利用动态变化及演变趋势预测进行了分析,得出研究区内耕地进一步增加,林地总面积在减少,城乡、工矿、居民用地的总量在减小的结论,从而达到全面把握郑州市土地变化规律的目的。

2.1.3 系统模拟方法

为了对系统进行研究,需要对其进行“试验”,一种方式是在真实系统上进行,另一种则是按照真实系统构造一个模拟系统——模型,在模型上进行“试验”。往往由于系统不存在或在真实系统上“试验”无法进行等原因,必须采用模型对系统进行研究。

模型是一个系统的物理、数学的或以其他方式的逻辑表达,它以某种确定的形式(如文字、符号、图表、实物、数学公式等)提供关于系统的知识。系统模型的建立首先要求了解研究对象的实际背景,明确预期达到的目标,确定刻画该系统的状态、特征和变化规律的若干基本变量。

模型一般分为概念模型、物理模型和数学模型,其中数学模型在系统分析中最为常用。按照不同的方法,数学模型有不同的分类,包括线性模型与非线性模型,连续模型与离散模型,时域模型与频域模型,集中参数模型与分布参数模型,动态模型与静态模型等等。从建模方法上,有机理分析法、网络图论法、模糊集论法、蒙特卡洛法、层次分析法、基于仿生学建模方法和复杂系统建模方法等等。

本节主要介绍地理系统模拟的主要建模方法,包括系统仿真、系统动力学、蒙特卡洛法、基于仿生学的人工神经网络、基于自组织理论的元胞自动机、用于模拟复杂系统的基于Agent建模和CAS理论、定性与定量相结合的综合集成法等。

(1) 系统仿真

1) 方法简介

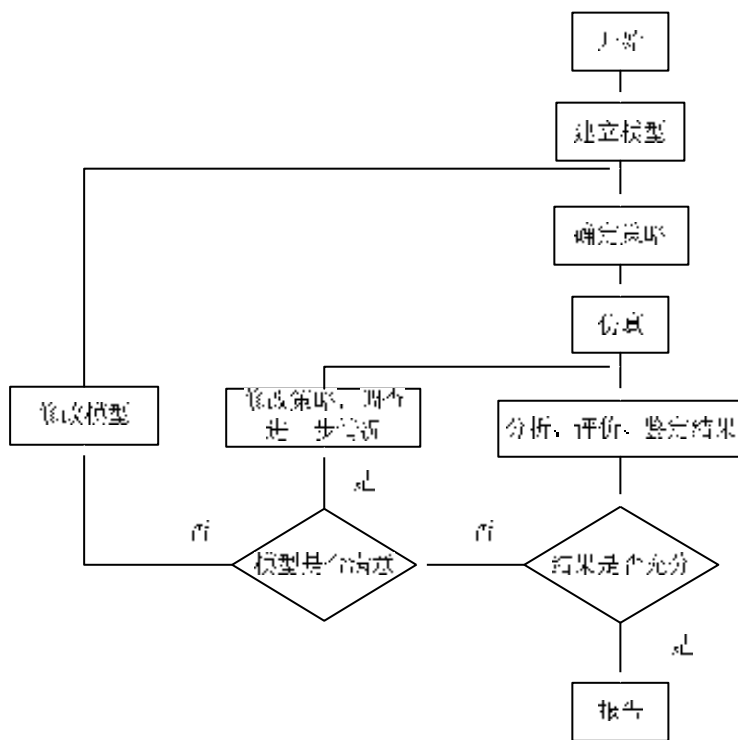
系统仿真 (System Simulation), 就是在分析系统各要素性质及其相互关系的基础上, 建立能描述系统结构或行为过程的、且具有一定逻辑关系或数量关系的仿真模型, 据此进行试验或定量分析, 以获得正确决策所需的各种信息 (陈禹, 钟佳桂, 2006) [57]。

系统仿真的实质是一种对系统问题求数值解的计算技术, 尤其当系统无法通过建立数学模型求解时, 仿真技术能有效地来处理; 仿真是一种人为的试验手段, 它和现实系统实验的差别在于, 仿真实验不是依据实际环境, 而是作为实际系统映象的系统模型以及相应的“人造”环境下进行的; 仿真可以比较真实地描述系统的运行、演变及其发展过程。

系统仿真的作用在于: (1) 仿真的过程也是实验的过程, 而且还是系统地收集和积累信息的过程。尤其是对一些复杂的随机问题, 应用仿真技术是提供所需信息的唯一令人满意的方法。(2) 对一些难以建立物理模型和数学模型的对象系统, 可通过仿真模型来顺利地解决预测、分析和评价等系统问题。(3) 通过系统仿真, 可以把一个复杂系统降阶成若干子系统以便于分析。(4) 通过系统仿真, 能启发新的思想或产生新的策略, 还能暴露出原系统中隐藏着的一些问题, 以便及时解决。

系统仿真的模型结构可以表示成以下的数学形式: $E = f(X_i, Y_i)$ 。其中, E 为系统效应, X_i 为可以控制的变量与参数, Y_i 为不可控制的变量与参数, f 为 X_i 和 Y_i 之间的关系。

系统仿真的流程如图 7 所示 (周德群, 2005) [58] :



在城市规划中,系统仿真方法较多的应用于交通规划、环境规划和污水水质模拟等方面。

李利军等(2006)^[59]分析了现有的道路三维建模方法的不足,提出了一种基于 MultiGen Creator/Vega 的实时生成城市道路网三维模型的方法,论述了实现城市道路网的可视化仿真的关键技术,为城市道路网规划方案的展示提供了一种新的思路。

杨龙海等(2006)^[60]通过计算机模拟再现车辆在交叉口的行驶过程,研究道路系统交通流的宏观或微观特征,进而实现交通管理与控制的辅助决策,根据城市道路系统中车辆行驶过程中的不同特征,将车辆的行驶过程分为道路路段运行、交叉口进口道运行和交叉口内运行等3个过程,建立对应城市交通微观仿真模块,分别描述有关微观仿真模型,更真实地从微观角度体现交通特征,并给出交通微观仿真程序流程图。

樊立萍等(2005a)^[61]以河流水质为最终目标,根据河流纳污能力控制废水排放量,可有效保护河流生态质量。本文根据国际水协发布的1号河流水质模型,构造了能模拟河流水质动力学和生化特征的仿真平台。进一步以河流断面氨浓度为控制指标,研究了基于河流水质的排水系统的排污流量控制问题。

近年来,基于计算机技术的可视化仿真技术,尤其是三维仿真在城市规划设计中被广泛地应用。应用计算机仿真技术,设计者可在计算机中模拟穿行、观察该规划方案;可在审视该规划方案的同时,随时停留以对重点地段的规划方案进行多方探讨并审查该方案与周边环境的关系。同样在方案审批时,也可将规划设计方案制作成三维模型,并将其结合入现状三维模型,生成规划审批三维模型,任意视角观察和分析,大大提高工作效率。通过仿真技术,可将城市建设的不同地区、不同发展阶段的规划设计方案结合现状制作成城市建设形态发展跟踪三维模型。真实“再现”规划建设方案,科学、客观地分析城市发展形态,减少或避免由于规划失误造成的损失和遗憾(颜景旸,2006)^[62]。关于可视化技术将在后面的章节介绍。

(2) 系统动力学

1) 方法简介

系统动力学(System Dynamics)是美国麻省理工学院福瑞斯特(Jay W. Forrester)教授于1956年首创的一种运用结构、功能、历史相结合的系统仿真方法。它可以定量地研究高阶次、非线性、多重反馈、复杂时变系统(周德群,2005)^[28]。它从因果关系结构入手,建立系统仿真模型,通过计算机仿真,展示不同的政策方案下系统的动态行为,从而寻求解决问题的正确途径。

系统动力学的研究对象是社会大系统,社会大系统有下面两个特点:因果性与反馈性,当某一种社会现象发生时就会引起其他的现象发生,彼此之间有一种互相影响、互相依赖的关系;非线性:社会大系统各因素之间的关系复杂,虽然有些社会事物之间的关系可以用线性或近似线性来模拟,但还有相当多的事物不能用线性来表达,也就是非线性。

系统动力学解决问题的步骤包括:(1)系统分析,包括明确系统仿真的目的、确定系统边界、确定系统行为的参考模式(即用图形表示出系统中主要变量,并由此引出与这些变量有关的其他重要变量,通过各方面的定性分析,勾绘出有待研究问题的发展趋势);(2)分析系统结构,确定系统因素之间关系(正关系、负关系、无关系),以系统结构的因果关系图和流程图的形式表现;(3)建立 DYNAMO 方程,并进行参数的确定和赋值;在 DYNAMO 模型中,主要有6种方程,分别为:L—状态变量方程、R—速率方程、A—辅助方程、C—常熟方程、N—初始条件方程、T—Y坐标方程,各方程的具体形式请参见(周德群,2005);

(4) 计算机仿真实验;(6) 结果评估和模型修正,包括模型结构/行为适合性、模型结构/行为与真实系统一致性的检验。

2) 应用实例

1968年出版的 Jay W. Forrester 的《城市动力学》(Urban Dynamics),总结了美国城市兴衰问题的理论与应用研究成果,1970年代以后,系统动力学应用于全球人口、资源、粮食、环境等方面的未来和发展研究,陆续出版的 Jay W. Forrester 的《世界动力学》(World Dynamics)、Donella Meadows 等的《增长的极限》(The Limits to Growth)等,提出了著名的世界动力学模型(World Dynamics Model),目前,系统动力学广泛应用于规划领域的各个方面。

臧鸿晓等(2005)^[63]讨论了环境规划中区域社会—经济—环境模型建立的原则,提出了适合非定态城市发展过程中规划因子的预测方法,并给出了江苏靖江“十一五”期间环境规划中的具体应用。作者采用系统动力学的方法,对其社会—经济—环境数据进行收集和处理,利用 Matlab Simlink 模块建立带有驱动动量和延迟—反馈机制的动力学模型,探索变量之间的相关关系,对未来的状况进行预测分析,其分析结果不仅可以作为规划、决策的依据,而且可以将采取的策略反馈到模型中,观察其效应,评价采用策略的作用,更好地对规划目标可实现性进行评估。

王爱萍等(2001)^[64]利用系统动态学的方法,在对土地利用系统进行系统分析的基础上,构建了无棣县土地利用系统动态模型。并根据土地利用系统系统动态学模型的模拟结果,从合理组织土地利用的全局出发,采用统筹安排,协商调整的方法,编制了无棣县土地利用总体规划的基础方案。

汤洁等(2005)^[65]根据农业生态环境系统多目标、多层次、多变量、非线性的特点,应用系统动力学的原理与方法,建立系统动力学仿真模型,模拟封闭系统的动态变化,定量预测系统行为。并以吉林省大安市为例,采用系统动力学方法,开展了该区生态环境规划仿真研究,经过模型调控对比,提出了适合经济发展的最佳方案。

(3) 蒙特卡洛方法

1) 方法简介

蒙特卡洛方法在概率预测中已有介绍。蒙特卡洛法作为一种数值计算方法与其他数值计算方法相比,其优点体现在:首先,蒙特卡洛法的收敛速度与问题维数无关,决定了蒙特卡洛法对多维问题的适用性;其次,蒙特卡洛法受问题的条件限制的影响小;再次,其程序结构简单,便于编制和调试。蒙特卡洛法的问题在于收敛速度慢,误差大,而且对于大系统通常不适用。

2) 应用实例

蒙特卡洛法在城市规划研究的系统模拟中,一般可以用于水流模拟、水质模拟(苏小康等,2006)^[66]、交通模拟等方面。

许仕荣等(2005)^[67]把以物理过程为基础的模拟特征融入到概率模型中,建立了城市雨水径流污染负荷的概率模型,以评价流域雨水径流对受纳水体的污染程度和为城市雨水管理、受纳水体水质控制及规划提供依据。采用蒙特卡洛随机抽样法,对长期的径流污染负荷进行了模拟试验。利用产生的伪随机数,按照 t (降雨历时)、 v (径流量) 的分布特点,随机生成一组 t 、 v 代入模型,得出相应的污染负荷值,试验结果的分布就可以近似为该流域

长期污染负荷分布,从而可以得出该流域的长期雨水径流污染负荷的概率分布特征。并以某市一小区的 TP (总磷) 负荷为例进行了验证,模拟结果与实测结果较为一致。

王皓等(2006)^[68]基于蒙特卡洛方法建立了交通容量限制下的居民出行总量动力学模型,使用模糊推理方法预测出租车对出行总量的分担率,在此基础上求得了该城市的出租车最佳数量。根据基于激励约束机制的出租车定价模型,结合司机和乘客的共同利益,给出了油价上涨后的调价方案。

宋巍等(2005)^[69]介绍了如何使用蒙特卡洛方法计算一个错综复杂的公交线路的覆盖面积,为城市公共交通线路规划提供了科学依据。首先建立取样空间,之后编程实现蒙特卡洛法模拟计算公交站点覆盖率和覆盖面积,随着随机点的数量增加,估算值就越来越接近实际的情况,实现了对实际情况的模拟。

(4) 人工神经网络

1) 方法简介

人工神经网络的基本思想在系统预测方法一节中已有叙述,本节间要介绍神经网络中最常用的 BP 模型。

前馈网络(Back-propagation network, BP)模型(许国志,2000)^[35],是一种单向传播的多层前向网络。在模式识别、图像处理、系统辨识、函数拟合、优化计算、最优预测和自适应控制等领域有着较为广泛的应用。BP 网络的拓扑结构如图 8 所示^[10]。

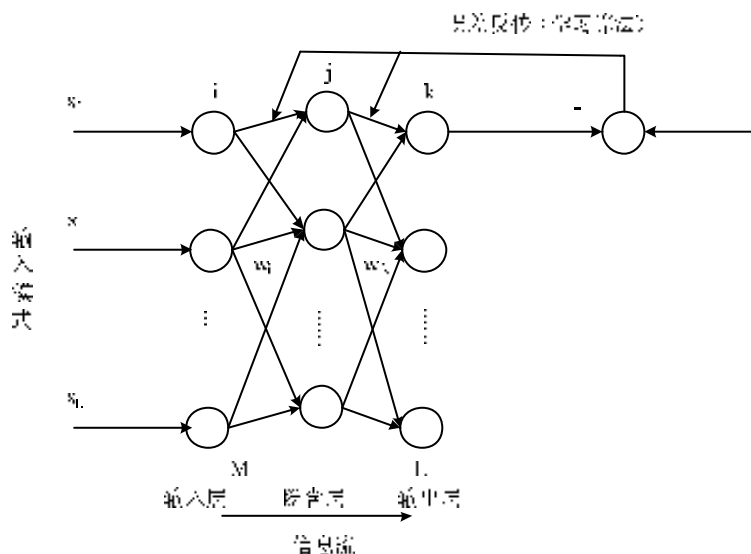


图 8BP 网络的拓扑结构图

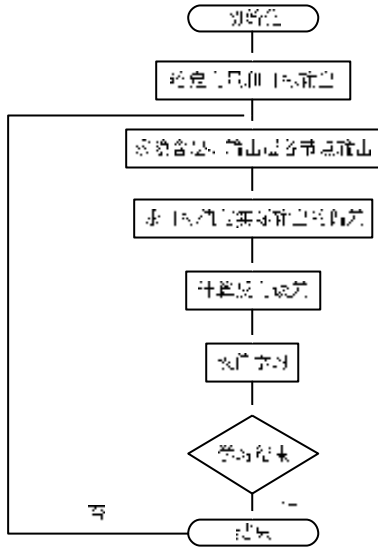
BP 网络是一种强有力的学习系统,分类能力和模式识别能力强于反馈网络,其结构简单且易于编程;从系统的观点看,BP 网络是一静态非线性映射,通过简单非线性处理单元的复合映射,可获得复杂的非线性处理能力。但从计算的观点看,其缺乏丰富的动力学行为。

BP 算法的基本思想是最小二乘算法。它采用梯度搜索技术,以期使网络的实际输出值与期望输出值的误差均方值最小。BP 算法的学习过程由正向传播和反向传播组成。在正向

[10] <http://www.hrlab.org/s11.ppt>

传播过程中，输入信息从输入层经隐含层逐层处理，并传向输出层，每层神经元的状态只影响下一层神经元的状态。如果在输出层不能得到期望的输出，则转入反向传播，将误差信号沿原来的连接通路返回，通过修改各层神经元的权值，使误差信号最小。

BP 学习算法的计算步骤如图 9 所示：



精度；经验与理论公式相结合的方法可以弥补宏观模型的不足；采用神经网络方法对模型的不稳定情况进行分析，从而得出状态模型的不准确程度；采用模型驱动的神经网络方法建立给水管网宏观模型，建成的模型具有更好的学习能力和容错能力。

黎夏等（2005）^[73]提出了基于神经网络的元胞自动机，并将其用来模拟复杂的土地利用系统及其演变。作者通过神经网络、元胞自动机和 GIS 相结合来进行土地利用的动态模拟，并利用多时相的遥感分类图像来训练神经网络，能十分方便地确定模型参数和模型结构。文中所提出的元胞自动机与人工神经网络集成模型是由简单的网络组成，如图 10 所示。该模型包含两大相对独立模块：模型纠正和模拟。这两个模块使用同一人工神经网络。在模型纠正模块中，利用训练数据自动获取模型的参数，然后该参数被输入到模拟模块进行模拟运算。整个模型的结构十分简单，用户不用自己定义转换规则及参数。

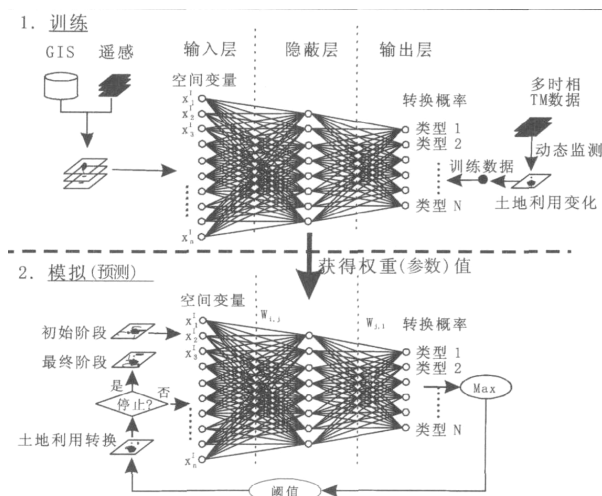


图 10 元胞自动机与人工神经网络集成模型结构图

(5) 自组织理论

1) 方法简介

一般来说，组织是指系统内的有序结构或这种有序结构的形成过程，从组织的进化形式来看，可以把它分为两类：他组织（Other-organizing）和自组织（Self-organizing）。如果一个系统靠外部指令而形成组织，就是他组织；如果不存在外部指令，系统按照相互默契的某种规则，各尽其责而又协调地自动地形成有序结构，就是自组织（许国志，2000）^[74]。

自组织理论是 20 世纪 60 年代末期开始建立并发展起来的一种系统理论。它的研究对象主要是复杂自组织系统（生命系统、社会系统）的形成和发展机制问题，即在一定条件下，系统是如何自动地由无序走向有序，由低级有序走向高级有序的。它是一种新的理论，目前尚未形成完整规范的体系。自组织理论主要由三个部分组成：耗散结构理论（Dissipative Structure Theory）、协同学（Synergetics）和突变论（Catastrophe Theory）。

比利时物理化学家 L. Prigogine 于 20 世纪 70 年代创立了耗散结构理论，用以研究系统在远离平衡的条件下，由于其内部的非线性相互作用，而发生从无序热力学分支向耗散结构分支转化，并形成一种稳定的有序结构的现象。耗散结构理论主要研究系统与环境之间的物质与能量交换关系及其对自组织系统的影响等问题。建立在与环境发生物质—能量交换关系基础上的结构即为耗散结构，如城市、生命等。远离平衡态、系统的开放性、系统内不同要

素间存在非线性机制是耗散结构出现的三个条件(申维, 2001)^[75]。

德国物理学家哈肯(H. Haken)于1969年提出了协同学,协同学主要研究系统内部各要素之间的协同机制,认为系统各要素之间的协同是自组织过程的基础,系统内各参量之间的竞争和协同作用是系统产生新结构的直接根源。由于系统要素的独立运动或在局部产生的各种协同运动以及环境因素的随机干扰,系统的实际状态值总会偏离平均值,这种偏离波动大小的幅度就叫涨落。当系统处在由一种稳态向另一种稳态跃迁时,系统要素间的独立运动和协同运动进入均势阶段时,任一微小的涨落都会迅速被放大为波及整个系统的巨涨落,推动系统进入有序状态。

R. Tom的突变论建立在稳定性理论的基础上,认为突变过程是由一种稳定态经过不稳定态向新的稳定态跃迁的过程,表现在数学上是标志着系统状态的各组参数及其函数值变化的过程。突变论认为,即使是同一过程,对应于同一控制因素临界值,突变仍会产生不同的结果,即可能达到若干不同的新稳态,每个状态都呈现出一定的概率。

此外, M. J. Feigenbaum的混沌理论和M. Eigen的超循环理论等也属于自组织理论。

2) 应用实例

自20世纪60年代自组织理论被提出以来,不少国内外研究者将自组织理论应用于对城市的研究,并认为城市具有自组织性,其自组织现象表现在城市各子系统自觉地相互作用、相互制约、协调行动上;城市的自组织性并不仅仅局限于城市整体的自组织过程,还表现在城市系统的多个层面,其内部的自然、社会、经济、文化、人口等子系统之间具有自组织机制。自组织理论,可以用于城市功能分区研究,城市增长模拟,土地利用演化模拟和交通模拟等方面。

谭遂等(基于自组织理论的两城市空间结构动态模型比较)介绍并比较了两种城市结构自组织模型——Krugman的自组织模型与Allen的自组织模型。这两种模型都是基于自组织理论,但又从各自不同的角度出发,模拟了城市系统的形成与发展,有助于规划者理解他们所必须面对的复杂现象,具有较高的理论与实践价值。

Allen模型为规划者与政策的制定者提供一种帮助他们理解产生复杂的空间结构的动力学机制。这种演化模型允许规划者探索给定政策或行动后的可能的结果。该模型对城市系统所进行的模拟也是相当精确的。Allen等曾经应用该模型对1950年到1980年美国的城市结构变化进行模拟,结果表明该模型相当精确地复现了历史。我国有人应用该模型模拟了我国1981~1984年间29个省、市、自治区城镇的人口空间分布,结果表明误差在5%之内。此外,在模型中作者还重现了“孪生城市”以及郊区化等复杂的空间格局演化现象。

Krugman模型作为一种理论模型,该模型展示的是在一个近乎平坦的城市系统中如何通过企业、消费者等微观主体间的相互作用形成制造业集聚的城市。相对于Allen模型而言,该模型具有更为系统的微观经济学基础。

(6) 元胞自动机

1) 方法简介

元胞自动机(Cellular Automata, CA)是20世纪50年代冯·诺伊曼(von Neumann)为了构造一个能够自我复制的机器首次提出的,是一个时间和空间都离散的动力系统^{错误!未定义书签。}。

元胞自动机包括元胞、元胞状态、邻域和规则四个部分。元胞意为任何空间尺度上的对象,这些对象必然与某些其他对象相邻;元胞状态用有限组数值描述;规则即状态转移函数,是根据细胞当前状态及其邻域情况决定下一时刻细胞状态的函数;一个元胞下一时刻的状态决定于本身的状态和它邻居元胞的状态,邻居有冯诺依曼型、摩尔型、扩展的摩尔型、马格勒斯型等。所有元胞根据同样的转移规则进行变换,确定合适的转移规则是元胞自动模型的关键。

元胞自动机是一个生命自我复制程序,其系统演化过程是从无序的初始状态发展成有序结构,也就是说,元胞自动机是基于自组织理论的³⁷。不同于动力学模型,元胞自动机不是由严格定义的物理方程或函数确定,而是用一系列模型构造的规则构成。凡是满足这些规则的模型都可以算作是元胞自动机模型。因此,元胞自动机是一类模型的总称,或者说是一个方法框架。其特点是时间、空间、状态都离散,每个变量只取有限多个状态,且其状态改变的规则在时间和空间上都是局部的。元胞自动机的构建设没有固定数学公式,元胞变种多,行为复杂。

S. Wolfram 在详细分析了一维元胞自动机的演化行为与计算机实验的基础上,将所有元胞自动机的动力学行为归纳为四大类(薛小杰,谭克龙,2005)^[76]:(1)平稳型,自任何初始状态开始,经过一定时间运行后,元胞空间趋于一个空间平稳的构形,元胞不随时间变化而变化;(2)周期型,经过一定时间运行后,元胞空间趋于一系列简单的固定结构或周期结构,由于这些结构可看作是一种滤波器,故可应用到图像处理的研究中;(3)混沌型,自任何初始状态开始,经过一定时间运行后,元胞自动机表现出混沌的非周期行为,所生成的结构的统计特征不再变化,通常表现为分形分维特征;(4)复杂型,出现复杂的局部结构,或者说是局部的混沌。

2) 应用实例

自 20 世纪 80 年代以来,Couclelis、Batty 和 White 等为代表的许多学者先后对城市元胞自动机进行了深入的研究,取得了丰富的研究结果。最初的城市 CA 模型主要集中探讨城市形态及城市动态演化的基本特征。这些模型只是用于检验假设和有关的城市发展理论,研究的对象基本是虚拟的城市,对真实性的城市研究不多。

近年来,随着 GIS 的快速发展,已有学者将 CA 与 GIS 结合。GIS 使得模拟的空间不再是单一均匀的,由此可获得更具真实性的模拟结果。例如,White 等提出了基于高分辨率影像的城市 CA 模拟,利用遥感图象作为训练数据,可以使得 CA 模拟结果更接近现实。

CA 也可以用来模拟经过规划优化的城市形态。黎夏和叶嘉安等较早地提出了用于城市规划的 CA 模型,将一系列约束条件引进 CA 模型中,可使得城市的发展能兼顾到保护优质农田需要,并形成紧凑性的城市形态。不同的城市发展形态对应一定的开发和环境费用,利用重力模型对它们进行评价,可找到合适的城市发展形态。这些 CA 模型已被用来对珠江三角洲快速的城市发展进行研究。Ward 等也利用了约束性的 CA 模型对澳洲东海岸的黄金海岸的一个城市区进行了模拟。

郭鹏等(2004)^[77]将复杂适应系统理论与 CA 模型结合,构建城市增长仿真模型,并应用该模型对西安市的城市增长过程进行了仿真。结果表明,在 CA 中引入适应性思想更能反映城市发展的客观规律,尤其是对“城市空心化”的模拟,其中一些结论对城市规划具有积极的指导意义。

(7) 基于 Agent 建模

1) 方法简介

Agent (主体) 是一个运行于动态环境的具有较高自治能力的实体, 是复杂系统的构件。用计算机程序来表述少数支配主体相互作用的规则, 通过计算机仿真系统的涌现行为的方法, 被称作基于 Agent 的建模 (Agent-Based Modeling, ABM) 方法 (陈森发, 2005)^[78]。所谓涌现性 (Emergence), 是指系统中整体具有而部分不具有的东西。ABM 方法建立在归纳逻辑之上, 所用的模型是由计算机程序表示的, 根据模型让系统在计算机上产生、演化, 使研究者能够直接观察系统的生成、演化过程。

Agent 是一种具有智能的实体, 有自治性、社会能力、响应性和能动性的属性, 而且具有知识、信念、责任、承诺等精神状态方面的特征 (薛领等, 2004)^[79]。其基本结构包括环境感知模块、执行模块、通信模块、信息处理模块、自适应模块、决策与智能控制模块、知识库、任务与承诺表等。复杂系统往往需要运用多个 Agent 来刻画, 这种由多个 Agent 组成的系统称为多 Agent 系统 (Multi-Agent System, MAS) (申维, 2001)。

面向 Agent 的仿真建模方法中, 首先要对需要仿真的系统进行面向 Agent 的分析, 然后对涉及到的各个 Agent 进行建模, 其过程可以简要概括如下 (李英, 马寿峰, 2006)^[80]: (1) 对仿真系统进行需求分析, 面向 Agent 的需求分析是一种独立于计算域的分析方法, 目的是获得某一类问题的求解模式, 因此这种分析结果具有更大的稳定性和可复用性, 尤其适合于复杂仿真系统的分析; (2) 对任务进行分解, 并将分解后的任务分配给相应的 Agent, 确定所需要的 Agent 的种类, 以及每种 Agent 的功能。(3) 对每一种 Agent 进行分析, 设计和建模, 对 Agent 的描述需要包括 3 个方面: Agent 与外界的交流渠道、Agent 内部的推理方式、Agent 对外界的动态反应行为, 根据需要为 Agent 建立相应的知识库, 设计相应的推理机制; (4) 根据 Agent 之间的通讯需求, 建立仿真系统的基本框架。

2) 应用实例

ABM 在城市规划中可以被用于城市空间演化模拟、城市土地利用模拟、交通模拟等方面, 而 ABM 与 CA 的技术整合将成为一个发展趋势, 英国高级空间分析中心 (CASA) 正与美国华盛顿大学合作开展 SprawlSim 研究项目, 旨在开发一个虚拟实验环境以探索美国城市蔓延的成因、机制、特性及调控手段, 其基本的空间模拟技术强调交通与土地利用模型、ABM、CA、3D 可视化等方面的综合集成。

张金牡等 (2004)^[81]提出了一种外部模型 (描述宏观现象) 与内部模型 (微观决策) 相结合的 Agent 模型, 试图从人与人相互作用的关系来理解城市扩展现象的机理。主要讨论了构造外部模型和内部模型及其相结合的方法、Agent 观察和探测外部信息的方式以及构建模拟系统等问题。在此基础上基于 Java 和 Swarm 平台开发了模拟系统 UrbanSwarm, 并基于其对北京市土地利用变化进行动态模拟。

薛领等 (2003)^[82]基于 ABM 方法设计了一个城市演化的模拟模型, 旨在探索城市中居民、企业等大量微观主体非线性互动而导致的宏观空间结构的演化过程。作者针对城市空间演化的几种典型模式, 利用在 Swarm 环境下实现的多主体城市模拟系统, 通过微观层面的动态模拟进行分析和对比, 并结合定性的认识对所模拟的城市演化模式进行了评价和讨论。

李新延 (2005)^[83]对 MAS 进行了理论和技术分析, 研究了将其应用于城市用地模拟的必要性和可行性。作者利用 MAS 从城市用地演变机制出发, 研究建模思路和方法, 基于 RePast 建模软件, 采用 Java 语言开发了一个模拟城市用地演变的模型。该模型由三个主要

模块构成：Agent 模块、Main 模块以及 GIS 模块，主要实现了两方面功能，一是实现了空间数据的输入、输出及简单的空间数据管理功能；二是构建了主体，模拟了主体的动态决策过程。Agent 模块负责主体的运行；Main 模块负责建立模型框架同时也是模型的对外接口；GIS 模块负责空间数据的管理。模型运行结果表明，MAS 可以用于模拟城市用地的变化，为城市规划和城市管理提供指导性意见。

(8) CAS 理论

1) 方法简介

复杂适应系统 (Complex Adaptive System, CAS) 理论是由美国 SFI (Santa Fe Institute) 的 J. Holland 教授于 1994 年首次提出的，他把经济、生态、神经系统、计算机网络等称为复杂适应系统，认为存在某些一般性的规律控制着这些复杂适应系统的行为。

CAS 最基本思想是适应性造就复杂性。系统中的成员称为具有适应性的主体，简称主体，所谓适应性，是指它能够在环境以及其他主体进行交流，并在这种交流中学习或积累经验，且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式，整个系统的演变或进化都是在这个基础上产生的 (陈禹，钟佳桂，2006)。

CAS 理论的主要特点如下：(1) 主体是主动的、活的实体，这是 CAS 和其他建模方法的关键区别，这个特点使其可以有效应用于经济、社会、生态等其他方法难于应用的复杂系统；(2) 个体与环境的相互影响和互相作用是系统演变和进化的主要动力；(3) 把宏观和微观有机联系起来，通过主体和环境的相互作用使个体的变化成为整体系统的变化的基础，统一的加以考虑；(4) 引进了随机因素的作用，使它具有更强的描述和表达能力，通过遗传算法，CAS 能更好的处理随机因素问题。

CAS 理论包括微观和宏观两个方面。在微观方面，CAS 理论的最基本的概念是具有适应能力的、主动的个体，简称主体 (Agent)。这种主体在与环境的交互作用中遵循一般的刺激—反应模型，所谓适应能力表现在它能够根据行为的效果修改自己的行为规则，以便更好地在客观环境中生存；而在宏观方面，由这样的主体组成的系统，将在主体之间以及主体与环境的相互作用中发展，表现出宏观系统中的分化、涌现等种种复杂的演化过程^[11]。

2) 应用实例

CAS 理论直接用于城市规划和研究的例子还比较少，下面简要介绍几个具体例子。

顾珊珊等 (2004)^[84]以 CAS 理论为指导思想，利用 SWARM 平台建立了基于多主体离散的动态交通模拟系统。使用自下向上的建模方法进行模拟：将车辆及信号灯作为具有适应性的主体，利用元胞自动机模拟动态交通流；同时将激励学习方法与遗传算法相结合，对信号灯周期进行自适应优化。通过主体不断的“学习”，交通系统在宏观方面涌现出一定的动态特征和规律。

张凡等 (2006)^[85]在城市地价模型中，引入 CAS 理论对地价变化趋势进行建模、仿真，为研究城市地价问题提供了一种新的思路。基于 CAS 理论，建立城市地价变化趋势的仿真模型，模型分为环境、适应个体、环境与适应个体之间的交互三部分，分别描述环境和适应个体的属性、行为及其规则。以西安土地基准地价作为实例背景建立的基于 CAS 理论的城市地价变化趋势仿真模型，放入 200 个适应个体在一个 128×128 的网格中。在每 200 步仿真

[11] <http://infoweb2.cueb.edu.cn/UserFiles/2006-4/17/200641710492909.doc>

周期时,随机抽取 100 个左右的土地单元样点计算其平均值,仿真得出的地价值在经过一段时间的快速增长后逐渐趋于稳定,仿真模型得到的四级综合用地的基准价格变化趋势稳定在 1230 元/m²,而实际的四级综合用地的基准价格稳定在 1335 元/m²。仿真结果所反映出的地价变化趋势与现实情况基本一致。

(9) 综合集成法

1) 方法简介

综合集成法 (Meta-Synthetic Engineering) 是我国学者钱学森于 1990 年为解决开放的复杂巨系统问题而提出的^[12]。综合集成法其实质是将专家群体 (与主题有关的专家)、统计数据和信息资料 (亦与主题有关的) 以及计算机三者有机结合起来,构成一个高度智能化的人机交互系统,它具有综合集成的各种知识,从感情上升到理性,实现从定性到定量的功能。它的主要特点如下 (刘敏等, 2001)^[86]: (1) 定性研究与定量研究有机结合,贯穿全过程; (2) 科学理论与经验知识结合,把人们对客观事物的点点知识综合集成解决问题; (3) 应用系统思想把多种学科结合起来进行综合研究; (4) 根据复杂巨系统的层次结构,把宏观研究与微观研究统一起来; (5) 必须有大型计算机系统支持,不仅有管理信息系统、决策支持系统等功能,而且还要有综合集成的功能。

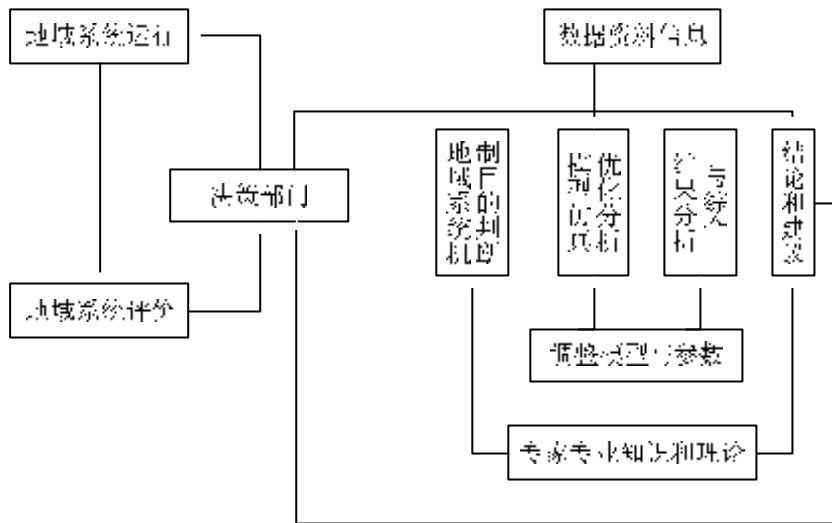
综合集成法是研究和处理复杂巨系统问题的可行且有效的方法,其在对区域发展研究对象的界定上实现多元集成化,尤其是在传统系统论的基础上将人类的研究、决策、执行等智能活动视为发展对象系统的内部行为,使区域人地系统发展成为一种开放的巨型智能系统,以此为指导形成的区域发展构架体系即为一个解决区域可持续发展问题的辩证程序系统,其应用形式主要为综合集成研讨厅体系 (Hall for Workshop of Meta-Synthetic Engineering, HWME) (郝丽莎,赵媛, 2006)^[87]。

2) 应用实例

综合集成法主要应用于区域规划和区域分析中。

刘敏等 (2001) 介绍了综合集成法用于区域规划的步骤:首先是由专家群体依据所掌握的科学理论、经验知识和对实际问题的了解,共同对区域运行机制进行讨论和研究,明确区域发展中存在的问题,对解决问题的途径和方法作出经验性假说,并用系统的思想和观点把上述问题纳入系统框架,界定系统边界,为系统建模打下基础。其次是系统建模,就是将区域系统的结构、功能、输入—输出关系用数字模型、逻辑模型描述出来。建立系统模型后,就可借助计算机模拟系统的功能,也就是系统仿真可研究系统在不同输入下的反应、系统的动态特征及未来行为的预测等,这就是系统分析。优化的目的是找出使系统具有我们所希望的功能的最优、次优或满意的规划方案。经过以上步骤的分析结果,由专家群体共同再分析、讨论和诊断,其中包括理性的、感性的、科学的和经验的知识的相互补充。如果专家群体认为结果不可信,还要修正模型,调整参数,重复上述工作,直到各方面专家都认为结果可信为止。以上步骤可用图 11 表示。

[12] <http://baike.baidu.com/view/220677.htm>



统的方法，是一种以模糊推理为主的定性定量结合、精确与非精确相统一的方法。它根据给出的评价标准和某些实测标志值，通过模糊变换后对事物或现象进行综合评价，该方法能较好地处理多因素、模糊性等问题（陆宁等，2006）^[89]。

在模糊综合评价中，存在两个论域：评价等级论域，如优秀、良好、合格、不合格等，记为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ；评价因素所组成的论域，记为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 。单因素评价中，根据事物的某一因素 u_i ，其对第 j 个评价等级 v_j 的隶属度为 r_{ij} ，其中 $r_{ij} = m_j(u_i)$ ， $0 \leq m_j(u_i) \leq 1$ 称为隶属函数，隶属函数的确定方法有专家评定法和利用典型函数（如正态型、上三角型、下三角形、 Γ 形等）。则该事物在评价集上的模糊向量为 $r_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}\}$ ，如果有多个因素，对应每个因素都有一个评价等级隶属度向量，组合起来形成评价矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ ，代表因素论域到评价论域的一个模糊关系。需要给定评判因素的权数分配

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}, (0 < a_i < 1, \sum_{i=1}^m a_i = 1)$$

，则评价结果为 $B = A \circ R = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ ，其中

$$b_j = \max \left\{ \min \{a_1, r_{1j}\}, \min \{a_2, r_{2j}\}, \dots, \min \{a_m, r_{mj}\} \right\}。$$

模糊综合评价的主要步骤是，首先建立评价因素集，对各评价因素选择适当的标准，在对每个评价因子进行单项评价的基础上，给出各单因子隶属于各级标准的隶属度，并根据各评价因素对评价结果的不同影响确定权重，然后进行模糊变换，求得最终的综合评价结果，即隶属于某一标准的隶属度。该模型的建立流程如图 12 所示：

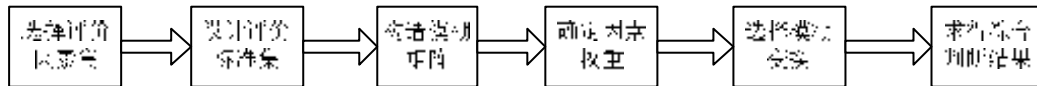


图 12 模糊综合评价流程图

2) 应用实例

模糊方法针对规划中大量不确定性和含混性问题，是一种比较适应的解决方法，它常常用于资源与环境质量评价、生态评价、土地适用性评价等各方面。

陆宁等在确定生态城市规划方案影响因素的前提下，采取层次分析与模糊综合评价相结合的方法，对生态城市规划方案作出评价。通过深入的调查研究，汇总得出影响生态城市规划方案的因素，如政治因素、城市的社会组织形态、城市行政管理体制、交通的便利度、通讯设施完善度、文化因素、社会制度、经济因素、地方民俗特色、文化艺术传统、经济资源等共计 33 项指标，运用层次分析法确定递阶结构模型各层次的权重集，采取专家会议法，建立判断矩阵 A ，之后运用模糊综合评价法，建立评语集和影响因素的评价矩阵，最后依据对应评语集最大隶属度原则，评判生态城市规划方案的可行性。该文章认为模糊综合评价法增强了生态城市规划方案评价的科学性，提高方案评价的可靠度，是探索使生态城市规划达到最佳效果的新途径。

左文喆等（2006）^[90]在综合分析唐山市区地质环境状况的基础上，基于组件式 GIS 工具 MO (Map Objects)，利用模糊综合评判方法，通过划分评价单元、选取评价因子、划分

指标体系、建立模糊关系矩阵、利用 VB 和 MO 编程实现评价等几个步骤,对唐山市区进行了地质环境评价,根据评价结果,将唐山划分为地质环境不同的 4 类区域,为城市的发展及规划提供依据。

(2) 层次分析法

1) 方法简介

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是由美国运筹学家 T. L. Saaty 于 20 世纪 70 年代初提出的,他将分解和综合的思维过程用数学方法进行描述。层次分析法能简化系统分析和计算,使人们的思维过程层次化,逐层比较多种关联因素,并将一些定性或者半定性的因素加以量化,为分析、评价、决策或控制事物的发展提供定量依据。

层次分析法的过程如下:

(1) 首先把问题层次化,根据问题的性质,将问题分解为不同的基本组成要素,并按照因素间的相互关联影响以及隶属关系将因素不同层次地聚集组合,形成一个多层次的分析结构模型。最高层表示要解决问题的目标;中间层为实现目标而采取的策略、准则等;最低层表示用于解决问题的措施、方案政策等。各层次间也可以建立子层次,子层次从属于主层次的某个元素,又与下一层次元素有联系。

(2) 构造判断矩阵,判断矩阵表示针对上一层次中的某元素而言,评定该层次中各有关元素的重要性的情况。设上一层次中元素 A_k 与下层 n 个元素 $B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ 有关,记 b_{ij} 表示对于因素 A_k 而言元素 B_i 对元素 B_j 的相对重要性,全部比较结果可列成如下矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times n}$ 称为 A_k 的影响元素的判断矩阵。 b_{ij} 的确定可采用 Saaty 标度法,如表 3 所示。

表 3 采用 Saaty 标度法确定 b_{ij}

B_i / B_j	相等	稍微重要	明显重要	强烈重要	极端重要
b_{ij}	1	3	5	7	9

(3) 层次单排序及一致性检验,其目的是针对上一层次中的某元素,确定本层次与之有联系各元素重要性次序的权重值,它是本层次所有元素对上一层次某元素而言的重要性排序的基础。其任务就是求出判断矩阵的最大特征值和它所对应的特征向量,即计算满足 $BW = \lambda_{\max} W$ 的 λ_{\max} 以及相应的 W ,其分量就是对应元素 B_i 的单排序权值。一致性采用一致

性指标 CI 和平均随即一致性指标 RI 判断。其中, $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, RI 的取值如表 4 所示:

表 4 RI 的取值

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当 n 大于 2 时, 计算随机一致性比率 $CR = CI/RI$, 当 $CR < 0.1$ 时, 认为判断矩阵具有满意的一致性。否则需要重新调整判断矩阵, 直至出现具有满意的一致性。

(4) 层次总排序, 利用同一层次中所有层次单排序的结果就可以计算对上一层而言的本层次所有元素的重要性权重值。设第 A 层的 m 个因素为 A_1, A_2, \dots, A_m , 得到的层次总排序权值分别为 a_1, a_2, \dots, a_m , 其下一层次 B 包括 n 个元素 B_1, B_2, \dots, B_n , 它们对于 $A_k (k = 1, \dots, m)$ 的单层次排序权值为 $w_1^k, w_2^k, \dots, w_n^k$, 这样层元素的层次总排序权值为 $\sum_{k=1}^m a_k w_1^k$ 。层次总排序的一致性检验从高层到低层逐层进行, 设 A 层中因素 $A_k (k = 1, \dots, m)$ 对应 B 层次判断矩阵的一致性指标为 CI_k , 平均随机一致性指标为 RI_k , 则 B 层次总排序随机一致性比率为

$$CR = \frac{\sum_{k=1}^m a_k CI_k}{\sum_{k=1}^m a_k RI_k}$$

当 $CR \leq 0.1$ 时, 认为该层次总排序的结果具有满意的一致性, 否则需对本

层次 (B) 的各判断矩阵进行调整, 再次进行分析。

2) 应用实例

层次分析法在城市规划和研究中应用较为广泛, 主要有城市交通系统评价、土地规划评价、生态环境评价、城市竞争力评价、可持续发展能力评价等诸多方面。

喻良等 (2002)^[91] 根据层次分析法的基本原理, 以福州市为例, 在城市生态环境质量评价中建立了层次分析模型, 作者根据生态环境质量构成要素将分层结构分为 A 、 B 、 C 、 D 四层; 通过自上而下计算某一层各因素对上一层某个因素的相对权重, 分别构造出 $A-B$ 、 $B-C$ 、 $C-D$ 的判断矩阵; 根据数据资料、专家意见和作者的认识, 加以平衡后给出判断矩阵的数值; 计算 C 层和 D 层对于 A 层的相对重要性排序权值, 进行层次总排序; 依据 D 层中的 31 个具体指标在各年的实际值比该指标在厦门市 2000 年的实际值, 求得各指标的相对评分值, 进而得到福州市各年的指标评分和各年的城市生态环境质量综合评分值。

焦叶芬 (2006)^[92] 根据土地利用指标选择的科学性、整体性、层次性、可操作性、动态性、前瞻性原则, 分析我国城市发展的一般规律, 结合重庆市的实际情况, 以及指标数据的可获得性, 选取投入类指标、产出类指标共 8 个指标构建了城市经济效益评价的指标体系, 采用层次分析法, 通过纵横向对比, 对重庆城市土地的经济效益进行了深入分析, 总结出重庆城市土地的经济效益总体水平低、波动较大、投入偏高影响了其经济效益及集约化水平不高等特点。

除了评价之外, 层次分析法也被用于决策中, 这将在后面进行介绍。

(3) 相关分析

1) 方法简介

系统中常常涉及多个要素, 相关分析 (Correlative Analysis) 的任务就是揭示各个要素

之间互相关系的密切程度，这主要是通过相关系数的计算与检验来完成的。相关系数分为样本相关系数和等级相关系数。

对于两个要素 X, Y ，它们的样本值分别为 $x_i, y_i (i=1, \dots, n)$ ，则它们之间的样本相关系

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

数被定义为 $r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$ ， \bar{x}, \bar{y} 分别为两个要素样本值的平均值。

对于无法或不适宜直接以数量确定其差异大小的统计数列，应按照排列次序以确定其高低，根据等级分配的两组资料间的相关关系，称为等级相关。两个要素 X, Y 有 n 对样本值，令 N_X 代表要素 X 的序号， N_Y 代表要素 Y 的序号， $d_i^2 = (N_{X_i} - N_{Y_i})^2, (i=1, \dots, n)$ ，它们的样本值分别为 $x_i, y_i (i=1, \dots, n)$ ，代表两要素的同一组样本位次差的平方。则

$$r_{xy} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

r_{xy} 就表示这两个要素之间的相关程度的统计指标，其值介于区间 $[-1, 1]$ 。 $r_{xy} > 0$ ，表示正相关； $r_{xy} < 0$ ，表示负相关。 r_{xy} 的绝对值越接近于 1，表示两要素关系越密切； r_{xy} 越接近于 0，表示两要素关系越不密切。相关系数求出之后，还需要对其进行检验，因为相关系数随样本的多少和取样方式的不同而不同，需要通过检验来确定其可信度。相关系数的检验是在给定的置信水平下，通过查相关系数检验的临界值表来完成的。一般认为，当 $|r_{xy}| < r_{0.1}$ 时，两要素不相关。

对于多要素间的相关程度的测定，则采用偏相关系数和复相关系数的计算与检验来完成。在多要素所构成的地理系统中，当研究某一个要素对另一个要素的影响或相关程度时，把其他要素的影响视为常数（保持不变），即暂不考虑其他要素的影响，而单独研究那两个要素之间的相互关系的密切程度时，则称为偏相关。用以度量偏相关程度的统计量，称为偏相关系数。几个要素同时与某一个要素之间的相关关系，用复相关系数来测定。

2) 应用实例

相关分析用于揭示地理要素之间的相关关系，是一种基础的数学地理方法，较少的单独使用，而经常用于其他系统方法中，作为其中的一个步骤。

朱文明等（2000）^[93]，分析了长江三角洲城镇空间格局与区域经济相关性，以地均财政收入与城镇空间破碎度建立回归方程，相关系数为-0.826，表示地区的地均收入和破碎度呈负相关。

(4) 聚类分析

1) 方法简介

聚类分析 (Cluster Analysis) 是研究多要素事物分类问题的一种方法。其基本原理是根据样本自身的属性,用数学方法按照某种相似性或差异性指标,定量地确定样本之间的亲疏关系。根据分类对象的不同可将聚类分析分为 Q 型聚类分析和 R 型聚类分析两大类。Q 型聚类分析是对样本进行分类处理,R 型聚类分析是对变量进行分类处理。聚类分析的特点在于不但可以了解个别变量之间关系的亲疏程度,而且可以了解各个变量组合之间的亲疏程度,可以综合利用多个变量的信息对样本进行分类,同时分类结果直观。

进行聚类分析前需要对数据进行处理并对距离进行定义。假定有 n 个地理样本,每个样

本有 p 个指标,则构成了一个 $n \times p$ 阶矩阵 $X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix}$, 数据处理的目的主要是为

了消除指标间的差异,进行标准化。最常见的方法是总和标准化,即 $x'_{ij} = x_{ij} / \sum_{k=1}^n x_{kj}$ 。定义

距离的目的是描述样本之间的亲疏性。常用的距离计算方法见表 5。

表 5 常用的距离计算方法

方法名称	公式
绝对值距离	$d_{ij} = \sum_{k=1}^p x_{ik} - x_{jk} (i, j = 1, \dots, n)$
欧式 (Euclidean) 距离	$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2} (i, j = 1, \dots, n)$
平方欧式 (Squared Euclidean) 距离	$d_{ij} = \sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2 (i, j = 1, \dots, n)$
明科夫斯基 (Minkowski) 距离	$d_{ij} = [\sum_{k=1}^p x_{ik} - x_{jk} ^g]^{1/g} (i, j = 1, \dots, n)$
切比雪夫 (Chebychev) 距离	$d_{ij} = \max_{1 \leq k \leq p} x_{ik} - x_{jk} (i, j = 1, \dots, n)$

聚类分析法有系统聚类法、动态聚类法和模糊聚类法等。

系统聚类法是使用最多的聚类分析方法,其使用步骤包括:首先各样本自成一类,这样对 n 个样本就相当于有 n 类;计算各类间的距离,将其中最近的两类进行合并;计算新类与其余各类的距离,再将距离最近的两类合并;重复上述的步骤,直到所有的样本都聚为一大类时为止。当聚类进行到某一步时,要考虑类与类之间的距离 d_{pq} , 根据 d_{pq} 的定义不同,系统聚类法有多种类型,包括最短距离法、最长距离法、类平均法、重心法等。

动态聚类其实是一种凝聚的层次聚类,又称为逐步聚类法,是以类间距离尺度为基础的

这句话不完整。对于给定的初始聚类,把最邻近的聚类融合起来以降低聚类的数量。重复这个过程,每次都把最邻近的聚类融合,直到最终的聚类数目。在每次聚类过程中都会动态地判定每次连接数据的归类是否合理,如果不合理则将对每次的连接数据重新归类处理,直到分类比较合理为止,这样形成一个最终的分类结果(罗积玉,刑瑛,1985)^[94]。

模糊聚类法是将模糊数学理论应用于聚类分析,其基本思想为计算样本或变量之间的相似系数,建立模糊相似关系,对此相似关系进行一系列的合成改造,建立模糊等价关系,根据模糊等价关系得到变量或样本之间的模糊等价矩阵,然后根据不同的截取水平 λ 对模糊矩阵进行截取分类。

2) 应用实例

聚类分析是定量地研究地理事物分类问题和地理分区问题的重要方法,在城市规划中,它主要应用在环境质量评价、人口结构分析、土地利用潜力研究、经济水平分析、城市实力比较、交通状况分析等方面。

栾维新等(2000)^[95]在深入分析大连市城市和农村建设用地现状的基础上,论证了调控农村建设用地是土地管理重点。作者认为大连市域内各地区间的自然、经济、社会等方面条件的差异,是形成农村居民点人均用地空间差异的基础。采用聚类分析方法将农村居民点分为5类,相应提出了各类农村居民点整理潜力及其实现对策,为村镇规划和土地整理规划提供依据。

周春山等(2005)^[96]利用第五次人口普查资料,以街道为基本单位,运用因子分析和聚类分析方法,将广州市建成区的住房空间结构划分为四大类:解放前建成的旧房区、改革开放前建成的机关公房和原工业企业公房集中区、20世纪50年代开始发展的设施相对简陋的住房分布区、上世纪90年代快速发展的商品房和自建房集中区。并从城市发展历程、城市规划、旧城改造、住房制度、房地产业的发展等方面分析住房空间结构的形成原因,进一步推导了中国大城市的住房空间结构模式。

郭艳桃等(2006)^[97]在建立城市资源利用效益评价指标体系的基础之上,参考城市土地利用的经济效益、社会效益和生态效益三方面13个指标,利用SPSS对国内34个直辖市、计划单列市和省会城市的土地利用效益情况进行了聚类,分析了我国不同区域城市在土地利用效益方面的各自特征,并对国内城市土地利用的整体状况进行了评价。

(5) 主成分分析

1) 方法简介

多变量问题在地理学研究中十分常见,变量太多会增加问题分析的难度和复杂性,而且在实际问题中,多个变量之间一般具有相关性的,这就有可能产生信息重叠的情况。主成分分析(Principal Component Analysis)是在各变量相户关系分析的基础上,用较少的新变量代替原有的较多变量,同时尽可能保留原有变量反映的信息的方法。

从数学角度看,主成分分析是一种降维处理技术。假定有 n 个地理样本,每个样本有 p 个指标。则构成了一个 $n \times p$ 阶矩阵。

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix}$$

降维处理就是用较少的综合指标 z_1, \dots, z_m 来代替原有指标 x_1, \dots, x_p ，而且这些综合指标能尽量多地反映原有的信息，同时综合指标之间彼此独立，可以通过综合指标的排序来确定对原有信息保留的贡献度。最简单的方法就是把新指标作为原有指标的线性组合，通过调整组合系数达到上述要求。

主成分分析的计算步骤如下：

(1) 计算相关系数矩阵。公式为：

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{np} \end{pmatrix}$$

其中 r_{ij} 为原指标 x_i, x_j 之间的相关系数。

(2) 计算相关系数矩阵的特征值 I_i ，并按照大小顺序进行排列，求得特征值对应的特征向量。

(3) 计算各主成分贡献率和累计贡献率。每个主成分的贡献率为 $I_i / \sum_{k=1}^p I_k$ ，累计贡献率为 $\sum_{k=1}^i I_k / \sum_{k=1}^p I_k$ ，一般取累计贡献率达 85%~95% 的特征值 I_1, \dots, I_m 为所对应的主成分。

(4) 借助专业知识对结果进行解释与推断。

2) 应用实例

主成分分析能对系统中错综复杂的信息进行提取和精练，能够揭示变量之间的某种关系，而这些关系往往是别的方法或具体的专业知识所难以预料的。在城市规划与研究中，主成分分析法常用于土地利用变化分析与规划、区域物流评价、环境影响评价、城市生态评价等。

位欣等 (2006) [98] 以黄石市 1996~2004 年土地变更数据为依据，对该市土地利用变化的幅度、速度及利用程度变化情况进行了分析。根据主成分分析方法的思路和要求、黄石市土地利用变化驱动系统的实际状况以及黄石市现有的资料水平，选取人口总数、城市化水平、国内生产总值、社会固定资产投资、经济非农化率、农业结构比值、技术进步类因子、农业机播面积 8 个自变量因子，采用主成分分析方法，选取第一、第二主成分，从各因子的主成分载荷矩阵中可以看出，第一主成分包括人口总数、经济非农化率、农业结构比值、有效灌溉面积，表明农业技术也是其土地利用强度变化的驱动因子之一；第二主成分包括城市化水平、国内生产总值、社会固定、资产投资和农业机播面积，表明黄石市的土地利用强度也受

社会经济发展的驱动。由主成分贡献率表可知。人口总数、城市化水平、国内生产总值等经济类因子是黄石市土地利用变化的最主要因素；其次为农业技术的进步。

孔凡娥(2006)^[99]等选用衡量城市实力的四类指标(城市规模、城市经济、城市基础设施、社会发展水平),用聚类分析方法,确定与广州处于同一级别的中心地城市;用主成分分析法提取影响主因子,采用影响力指数计算2004年广州腹地的断裂点,并结合流态分析。将广州城市腹地划分为包括广东、广西、湖南、云南、贵州、四川、海南在内的直接腹地以及包括重庆、江西、福建和湖北在内的竞争腹地。然后用同样方法计算广州1985、1994年的断裂点,比较改革开放近20年来广州城市腹地的变化,分析了变化的原因。

(6) 投入产出分析

1) 方法简介

投入产出分析(Input-Output Analysis)是美国著名经济学家、诺贝尔经济学奖获得者瓦西里·里昂惕夫(Wassily Leontief)在20世纪30年代所提出的一种经济数量分析方法。它以棋盘式平衡表的方式反映研究一个经济系统各个部分之间表现为投入与产出的相互依存关系,并以其在深刻复杂的经济内涵与简洁数学表达形式上的完美结合,成为经济系统分析的不可替代的工具。

投入产出模型按照时间来分,可以分为静态投入产出模型和动态产出模型。静态投入产出模型,主要研究某一时期各产业部门之间的相互关系问题;动态投入产出模型则针对若干时期,研究再生产过程中各产业部门之间的相互联系问题。投入产出模型按照不同的计量单位,可以分为实物型和价值型,前者是按实物单位计量的,后者是按货币单位计量的。

实物型投入产出表(表6),是以各种产品为对象,以不同的实物计量单位编制出来的。表的横行反映了各类产品的生产与分配使用情况,它的一部分作为中间产品供其他产品生产过程中使用,另一部分作为最终产品供积累、消费和出口,两部分之和就是最终一定时间内各类产品的生产总量 q 。表的纵列,反映了各类产品生产过程中,消耗的其他产品(由于各类产品的计量单位不一致无法相加)。表的第一栏中,表示中间产品之间的流量, q_{ij} 表示第 i 类产品流向第 j 类产品的数量,或者说是第 j 类产品生产过程中消耗的第 i 类产品的数量, q_{ii} 表示各类产品的自身消耗量。按每一行可以建立一个方程,得到 $n+1$ 个方程:

$$\sum_{j=1}^n q_{ij} + y_i = q_i (i=1,2,\dots,n), \sum_{j=1}^n q_{oj} = L$$

表6 实物型投入产出表

投入 \ 产出	中间产品				最终产品	总产品
	1	2	...	n		
1	q_{11}	q_{12}	...	q_{1n}	y_1	q_1
2	q_{21}	q_{22}	...	q_{2n}	y_2	q_2
.
.
.
n	q_{n1}	q_{n2}	...	q_{nn}	y_n	q_n

产出 投入	中间产品				最终产品	总产品
	1	2	...	n		
劳动	q ₀₁	q ₀₂	...	q _{0n}	1	L

令 $a_{ij} = q_{ij} / q_j$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 则 a_{ij} 表示每生产单位 j 类产品需要消耗的 i 类产品的数量, 它被称为产品的直接消耗系数。同理, 劳动的直接消耗系数为: $a_{0j} = q_{0j} / q_j$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$)

$$\text{若令: } A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, Q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T, Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T, \text{ 则 } AQ + Y = Q$$

即 $(I-A)Q=Y$, 这表明了总产量与最终产品之间的关系, 若已知各类产品的总产量, 则可以通过上式求出各类产品的最终产品需求量; 若已知各类产品的最终产品需求量, 则可以得到各类产品的总产量。

在模型中, 直接消耗系数矩阵 A 反映了生产过程的技术结构。模型通过 $I-A$ (列昂捷夫矩阵, Lyanjef Matrix) 建立了总产品与最终产品之间的联系, 通过列昂捷夫矩阵 $(I-A)^{-1}$ 建立了最终产品与总产品之间的联系。

对投入产出模型作一些改造, 就可以将其用于区域经济活动分析中, 因为一个较大的区域都是由若干个比较小的区域构成的, 每个小区域都是较大区域的组成部分。区域经济活动的投入产出模型就在一个较大的区域内, 揭示若干个较小区域的各部门经济活动之间的相互联系。

2) 应用实例

投入产出分析被普遍用于经济预测和规划、分析重要决策、事件影响和经济—环境依存关系等方面, 投入产出技术的应用领域十分广泛, 国家、地区间、地区、部门甚至企业都可以作为一个经济系统进行投入产出分析。

赖力等 (2006) ^[100] 以 2002 年江苏省经济为例, 依照投入产出模型思路, 采取 Ferng 的改良计算方法, 对江苏经济的需求、进口、出口以及积累各项的生态性土地占用及化石能源地占用做出一一估算, 调整了足迹结果, 转换成以全球标杆衡量的虚拟土地, 以评估江苏这样的开放型经济区域的可持续发展能力。

武志峰等 (2006) ^[101] 讨论了投入产出理论在资源环境综合核算中的应用, 在传统的资源经济投入产出核算基础上, 综合考虑环境资产的损耗和破坏以及污染导致的环境质量下降, 设置科学的环境生态指标体系, 建立资源环境经济投入产出的基本框架, 设立相关的投入产出模型, 对资源环境经济的投入产出进行综合核算, 研究资源环境与经济的综合平衡关系。

(7) 小波分析

1) 方法简介

小波分析 (Wavelet Analysis) 是在傅立叶 (Fourier) 分析基础上发展起来的一种新的时频局部化分析方法 ²⁸。小波变换 (是分析还是变换, 请确认) 的概念是由法国石油信号处理工程师 J. Morlet 在 1974 年首先提出的, 通过物理的直观和信号处理的实际需要建立的反演

公式^[13]。

小波分析方法是一种窗口大小(即窗口面积)固定,但其形状,时间窗和频率窗都可改变的时频局部化分析方法。即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,所以被誉为“数学显微镜”。原则上讲,传统上使用 Fourier 分析的地方,都可以用小波分析取代(张明等,2003)^[102]。

小波变换作为一种新兴的时频分析方法,一方面利用对信号的时域加窗变换取消了整周期采样限制,加之其频域紧支撑性保证了一定的带通滤波性能,因而能适应信号小范围波动。另一方面,小波变换特有的尺度伸缩功能使其具备了很强的奇异、突变信号鉴别能力,能有效地检测到非平稳信号的瞬时、奇异成分,并显示其时域的产生和持续时间^[14]。

记 $L^2(R)$ 是定义在整个实数 R 上满足条件的全体可测函数 $f(x)$ 及其相应的函数运算和内积所组成的集合,那么小波就是函数空间 $L^2(R)$ 中满足下述条件的一个函数或者信号

$$\Psi(x) : C_y = \int_R \frac{\Psi(w)}{|w|} dw < +\infty, \int_R \Psi(w) dw = 0, \text{ 上述条件称为容许性条件,满足这一条}$$

件的函数 $j(t)$ (时间域) 和 $\Psi(t)$ (频率域) 称为小波函数。典型的小波有:(1) Shannon

$$\text{小波: } \Psi(t) = \frac{\sin(2pt) - \sin(pt)}{pt}; (2) \text{ Gaussian 小波: } g(t) = e^{-t^2/2}; (3) \text{ Morlet 小波:}$$

$$y(x) = e^{icx} e^{-t^2/2}; (4) \text{ Mexican 小波: } h(x) = (1-t^2)e^{-t^2/2}。$$

2) 应用实例

小波分析为现代地理学提供了一种新的方法手段,适用于解决一些多尺度、多层次、多分辨率问题,如气候变化、植物群落的空间分布、遥感图像处理等。但是,面对一个具体问题,怎样选择小波,在学术界并没有取得共识。

江静等(2000)^[103]运用 Morlet 小波分析和纬圈小波变换研究了南海地区降水的多时间层次和多空间层次结构,分析了南海季风的时间尺度特征和南海季风的爆发及实际演变规律。

何萍等(2003)^[104]利用云南省楚雄市气象观测站 1959~2000 年资料与其郊区南华气象观测站资料进行比较,并用小波分析方法,通过与北京、上海等大城市热岛强度进行对比分析,找出了我国不同城市热岛强度分布特征,发现楚雄市热岛强度的年变化和日变化规律。

(8) 分形理论

1) 方法简介

分形(Fractal)理论是 20 世纪 70 年代以来发展起来的一种横跨自然科学、社会科学和思维科学的新理论。它主要研究和揭示复杂的自然现象和社会现象中所隐藏的规律性、层次

[13] [http://www.image2003.com/image2003bbs/dispbbs.asp?boardid=10&replyid=19532&id=3941 &page=1&skin=0&Star=1](http://www.image2003.com/image2003bbs/dispbbs.asp?boardid=10&replyid=19532&id=3941&page=1&skin=0&Star=1)

[14] <http://218.69.114.37/wf/~CDDBN/Y538645/PDF/y5386450011.pdf>

性和标度不确定性，为人们通过部分认识整体提供了一种新的工具。^[28]

分形理论是在“分形”概念的基础上发展起来的，分形是指其组成部分以某种方式与整体相似的几何形态，或者在很大的尺度范围内，无特征尺度却有自相似性和自仿射性的一种现象。分形形体中的自相似性可以是完全相同，也可以是统计意义上的相似。例如在一个水系的主流上分布着支流，支流上又分布着支流，每个层次的“支流”在“主流”上的分布情况几乎相同，这就是自相似性；城镇体系规模分布也具有自相似性，也满足分形的特征。

分形维数是分形的定量表征和基本参数。常用的分形维数有：(1) 拓扑维数：

$$d = \frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)}$$

，其意义为用尺度为 r 的小盒子覆盖一个 d 维的几何对象，则覆盖所需要的数

目 $N(r)$ 与所用尺度 r 的关系；(2) Hausdorff 维数：是对拓扑维数在分数上的推广，

$$D_0 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)}$$

；(3) 信息维数：可以看作对 Hausdorff 维数的推广，将每个小盒子编号，

并记分形中的部分落入第 i 个小盒子的概率为 P_i ，那么用尺度为 r 的小盒子所测算的平均信

$$息量为 $I = - \sum_{i=1}^{N(r)} P_i \ln P_i$ ，用其代替 $N(r)$ ，则信息维数定义为 $D_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{I}{\ln(1/r)}$ 。$$

自相似原则和迭代生成原则是分形理论的重要原则。它表征分形在通常的几何变换下具有不变性，即标度无关性（标度不变性）。当把尺度从 r 变换为 Ir 时，其自相似结构不变，

$$即满足 $N(Ir) = \frac{1}{(Ir)^{D_0}} = I^{-D_0} N(r)$ 。$$

2) 应用实例

1994 年英国学者巴蒂 (M. Batty) 与朗利 (P. A. Longley) 作出版了分形理论用于城市研究中的第一部专著《分形城市》(Fractal Cities: a Geometry of Form and Function)，探讨的内容有城市的边界线、土地使用的形态、城市形态与城市增长等。此外，蒂波特 (S.Thibault) 和马钱德 (A. Marehmad) 于 1987 年研究了法国里昂 (Lyon) 市的运输网络，如公共交通网、郊区铁路网以及排污设施网的分形特征。对城市形态与城市增长的刻画需要发展新的理论和模型，这是分形城市研究中的重点，也是当前国际学术界的前沿热点。常见的分形增长模型有以下几种(叶俊,陈秉钊,2001)^[105]:扩散置限凝聚模型(Diffusion-Limited Aggregation model)简称 DLA 模型，电介质击穿模型(Dielectric Breakdown Model, DBM)，以及元胞自动机模型(Cellular Automata model, CA)等。

在我国，徐建华以甘肃省城镇体系为例，运用分形理论对城镇体系的结构进行研究。城镇体系规模分布具有自相似性，即满足分形的特征，作者分析了城镇体系规模结构的分形特征，对于一个区域的城镇，给定一个人口尺度 r 去度量，则人口数大于 r 的城镇数 $N(r)$ 与 r 的关系满足分形模型，采用 1999 年 14 个城市数据，以 $\ln N(r)$ 为纵坐标， $\ln r$ 为横坐标做出散点图，然后用线性回归进行模拟，得到分维值 $D=0.8714$ ，说明甘肃省城镇规模分布比

较分散，首位城市垄断性强，人口分布差异大。

冯涛等(2006)^[106]采用河南省2003年的统计数据，测算了17个城市规模分布分型维数。河南省城市的时空结构具有自仿射分形性质，在大中城市等级尺度上呈现分形模式。河南省城市的分形结构特征表明河南省城市的自组织演化具有优化趋势，未来的城市规划应该充分利用现已发育的分形结构，着重培育良好的分维关系，促进河南省城市体系的良性发展，虽然目前河南省的城市规模在大中城市的等级上表现出一定的分形模式，但是这种模式还比较微弱，城市发展速度不一。

(9) 灰色关联分析

1) 方法简介

传统统计学分析的不足包括：(1)要求有大量数据，数据量少就难以找出规律；(2)要求样本服从某种典型的概率分布，这种要求往往难以满足；(3)计算量大；(4)可能出现量化结果与定性分析结果不符的现象。我国统计数据十分有限，现有数据灰度较大，加上人为原因，许多数据没有典型分布规律，采用传统的数理统计方法往往难以奏效。灰色关联分析法弥补了这些问题，它对样本的多少和有无规律都同样适用，计算量小，不会出现量化结果与定性分析结果不符的情况。

灰色关联分析(Grey Relational Analysis)的基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密，曲线越接近，相应序列之间的关联度就越大，反之就越小。

设 x_1, x_2, \dots, x_N 为 N 个因素，反映各因素变化特征的数据列分别为 $\{x_1(t)\}, \{x_2(t)\}, \dots, \{x_N(t)\}, t=1, 2, \dots, M$ 。因素 x_i, x_j 在 t 时刻的关联系数定义为

$$x_{ij}(t) = \frac{\Delta_{\min} + k\Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(t) + k\Delta_{\max}}, \quad \text{其中 } \Delta_{ij}(t) = |x_i(t) - x_j(t)|, \quad \Delta_{\max} = \max_j \max_i \Delta_{ij}(t),$$

$\Delta_{\min} = \min_j \min_i \Delta_{ij}(t)$ ， k 为介于 $[0,1]$ 区间上的灰度。将关联曲线 $x_{ij}(t)$ 与 $x_{ii}(t)$ 和坐标轴围

成的面积分别记为 S_{ij} 与 S_{ii} ，则定义 x_j 对 x_i 的关联度为 $g_{ij} = \frac{S_{ij}}{S_{ii}}$ ，在实际计算中，通常用近

$$\text{似公式 } g_{ij} \approx \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M x_{ij}(t)。$$

利用灰色关联分析还可以进行灰色聚类评估，通过灰色聚类，可以检查许多因素中是否有若干个因素关系十分密切，具体方法可参考文献123。

2) 应用实例

在城市规划和研究中，灰色关联分析法在环境质量评价、生态敏感性评价、人口结构分析、经济分析、城镇体系发展分析与规划等方面的应用都有文献报道。

梁祺等(2004)^[107]，研究了江苏区域经济发展水平差距成因，选取人均耕地面积、实际利用外资额、专业技术人员比重、人均固定资产净值、人均工业用电几个因素。由于各因

素之间的影响不确定,是一种灰色关系,因此该研究采用灰色关联分析方法,建立回归方程,找出了苏南苏北经济差距形成与扩大的主要影响因素:城镇工业发展水平和互联网用户所占比例。

李俊莉等(2005)^[108]分析论证了开发区发展对中国有关66个城市的影响贡献程度,作者以52个国家级经济技术开发区和53个国家级高新技术产业开发区为例,采用灰色关联分析法对总影响度进行了综合排序。首先确立参考序列;而后选取5类影响度指标的最大值构成参考序列,该序列表示了有关66个城市群组内开发区在经济规模、空间规模、经济外向度、经济增长活力、财税收入5方面对城市影响贡献的已知最大程度;之后计算各城市影响度序列与参照序列的灰色关联度,最后依据灰色关联度的大小排序,进行分析评价。结果表明开发区建设对所在城市发展影响较大的主要集中在沿海、省会和大城市,在中西部地区相对影响较小,而在个别区位优势明显的中小城市影响也颇显著。

(10) 趋势面分析法

1) 方法简介

趋势面分析(Trend Surface Analysis),是利用数学曲面模拟地理系统要素在空间上的分布及变化趋势的一种数学方法。它实质上是通过回归原理拟合一个二维非线性函数,模拟地理要素在空间上的分布规律,展示地理要素在空间上的变化趋势。

趋势面抽象并过滤掉了一些局域随机因素的影响,使地理要素的空间分布规律明显化,因此,趋势面只是一个模拟地理要素空间分布的近似曲面,通常把实际的地理曲面分解为趋势面和剩余面两部分,前者反映地理要素的宏观分布规律,后者对应微观局域,即随机因素影响。趋势面分析的要求就是所选择的趋势面模型使趋势值最大而剩余值最小。

趋势面分析首先要建立趋势面模型,设地理要素的实际观测数据为 $z_i(x_i, y_i)(i=1, 2, \dots, n)$,趋势值拟合值为 $\hat{z}_i(x_i, y_i)$,有 $z_i(x_i, y_i) = \hat{z}_i(x_i, y_i) + e_i$, e_i 为剩余值。用于计算趋势面的数学方程式有多项式和傅立叶,最常用的是多项式拟合形式,一次趋势面模型为 $z = a_0 + a_1x + a_2y$,二次趋势面模型为 $z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2$ 。

其次对趋势面模型进行参数估计,一般应用最小二乘法,使得残差平方和最小。

对于拟合结果同样需要进行适度检验,以确定趋势面法能否应用于实际研究中,一般通过 R^2 检验、 F 检验和逐次检验来完成。

2) 应用实例

趋势面分析法常常被用于模拟资源、环境、人口及经济要素在空间上的分布规律,其在空间分析和评价中具有重要价值。

张渭军等(2006)^[109]在分析现有面降雨量计算方法及降水站点相互关系的基础上,采用移动趋势面分析法对已知站点降水进行拟合,采用二元三次多项式模型进行趋势面拟合,根据最小二乘法确定模型系数。并在GIS的支持下建立区域降水三维模型。通过某地区62

个雨量站点的年降雨量进行了实例演示,比较已知站点实际降雨量和拟合降雨量后,发现最大相对误差为 8%,平均相对误差为 5.1%。降水趋势面图可直观地反映该地区的降水量变化趋势。

郭晋平等(2002)^[110]在 Arc/Info 支持下,采用空间趋势面分析法和统一网格样点取样法,对山西省文水市关帝山天然次生林区 1959 年、1972 年、1982 年和 1992 年 4 个时期景观要素空间分布趋势进行定量化分析。以样点的生态潜力值为因变量,分别以样点的水平纵坐标和横坐标、样点的海拔和坡向、样点的坡向和坡度为自变量,建立了景观要素水平分布趋势面模型、景观要素沿海拔和坡向梯度分布趋势面模型以及景观要素沿坡向和坡度梯度分布趋势面模型,并对各个趋势面模型进行动态分析。从高度异质和变化的复杂景观中,揭示了一些不随时间发生根本变化的森林景观空间分布格局及其主要控制因素。

2.1.5 系统优化方法

寻找一个最优控制方案或者最优控制规律,使研究对象(或系统)能最优地达到预期的目标,这就是最优化问题,简称优化(Optimization)(符曦,1995)^[111]。最优化问题解决的是怎样来选择一组可变参数,在满足规定的条件下,使问题的某种指标或目标最优。待求的可变参数称为设计变量,衡量问题解决得好坏或设计的优劣指标称为目标函数,规定要满足的条件称为约束条件,这些构成了最优化问题的三要素。

约束条件的形式可以是等式或不等式方程,当问题有很多约束时,这些等式约束构成的超曲面(n 维空间曲面)和不定式约束构成的半空间将在整个空间内分割出一个区域,落在该区域内的设计点全部满足约束条件,故称该区域为可行域。优化问题中,如果所得的解对应的函数值优于可行域上所有可行点的函数值,那么所得的解称为全局最优解;如果所得解对应的函数值优于它邻域($N_e(x^*) = \{x \mid \|x - x^*\| < e, e > 0\}$)内各可行点的函数值,那么所得的解成为局部最优解。

按照目标函数的个数,优化问题可分为单目标优化和多目标优化;按照约束条件的有无,优化问题可分为有约束优化和无约束优化;按照目标函数类型分类,优化问题可分为线性优化和非线性优化等。下面将对主要的系统优化方法进行介绍。

(1) 线性规划

1) 方法简介

当目标函数与约束条件都是设计变量的线性函数时,所构成的优化问题称为线性规划(Linear Programming)。线性规划是最优化方法中发展较快、应用较广和比较成熟的一个分支。早在 20 世纪 30 年代末,就有人在解决运输问题中开始研究应用线性规划的方法。自 1947 年丹泽(G. B. Dantzing)提出求解线性规划问题的一般方法——单纯形法之后,线性规划在理论上趋于成熟,在实际应用中日益广泛与深入。特别是随着计算机速度的不断提高,线性规划适用的领域更加广泛。

线性规划问题有如下特点:(1)可行域是凸多面集;(2)若有最优解必位于多面集的某个极点上;(3)线性规划是凸规划,所得的解是全局最优解。所谓凸集的几何解释就是,如果一个集合是凸集,那么连接集合中任意两点的线段也必包含在此集合中。

线性规划的基本模型是求 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, 使得 $\max(\min)f(X) = CX = \sum_{i=1}^n c_i x_i$,

并满足 $\begin{cases} AX \leq (\geq, =) b \\ X \geq 0 \end{cases}$, 其中 $A = (a_{ij})_{m \times n}$; $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为设计变量 ; $f(X)$ 为目标

函数 ; 需满足的条件为约束条件。

线性规划的模型求解有图解法、单纯形法等多种计算方法。

对于二变量线性规划问题, 可以采用图解法找到问题的答案。其步骤有 (1) 由约束条件画出可行域 ; (2) 画目标函数的等值线 ; (3) 确定等值线移动方向, 观察等值线移动方向, 以该方向作为搜寻最优解的方向 ; (4) 沿最优解搜寻方向平移等值线, 找到等值线与可行域相接的最终边际点, 该切点即为最优解。当问题仅仅涉及两个变量时, 图解法是非常方便的。但是, 当变量达到 3 个以上, 就无法直观地通过坐标图求解了。

单纯形法是求解线性规划问题的一般方法, 也是通用方法。当变量或约束条件较多时, 可行域的顶点数量也较多, 难以采用检验所有顶点的方法来求解线性最优化问题, 该方法将问题代数化, 然后通过迭代法寻找答案。该方法求解线性规划问题的直观解释为: 按照一种规则的方式, 从可行域的一个顶点向另一个相邻的顶点转换, 直至找到最优点为止。由于搜寻最优顶点的迭代过程固定、程式化, 可以借助于计算机来完成。单纯形法的步骤包括: (1) 用标准形式表达线性优化问题 ; (2) 选择初始顶点 ; (3) 选择寻优方向, 所选择变量能使目标函数最迅速地增加 ; (4) 迭代, 确定寻优方向的变量增量, 达到另一顶点 ; (5) 最优解的判别, 单纯形表中目标函数关系式的所有变量系数均小于或等于零。单纯形法的具体步骤请参见有关运筹学或线性规划方面的书籍。

2) 应用实例

线性规划作为一种经典的优化方法, 在城市研究与城市规划方面的应用也十分广泛, 主要体现在交通规划、能源规划、环境规划、人防工程规划、水资源调控、污染物控制和废物处置等诸多方面。

李亚军等 (2005) ^[112] 从城市交通运输的需求和供给角度分析了制约城市交通发展的约束条件, 以满足整体社会效益最大化、成本最低为目标建立了确定城市交通方式最适规模结构模型。作者认为导致城市规模产生变化的影响因素 (如城市人口、经济水平等) 与形成不同交通方式的经济特点的影响因素 (如居民年龄、出行距离、收入水平等在一定程度上) 存在相关性。并基于此建立多目标线性规划模型, 确立在不同城市规模下的最优运输方式结构, 并利用大连市的实际交通资料进行计算。该模型的建立, 为科学分析城市交通效率、确定城市交通运力发展比例、制定城市交通发展规划提供了依据。

樊京春等 (2003) ^[113] 用线性规划方法优化了能源的结构, 使能源、环境、经济效益得到协调统一。其目标函数为总能源的费用最小 ; 约束条件为达到国家环境质量二级标准, 实现能源的清洁化利用。在此基础上进行线性优化, 得到了各类能源的最优比例, 为能源规划工作中战略实施方案的选择提供了参考。

刘兆金 (1996) ^[114] 运用系统分析的方法研究浦东运河水环境综合整治规划问题。首先对该流域进行了功能区划, 提出了各区段的使用功能与相应的水质目标 ; 其次, 建立了浦东运河的水质模型, 分同步测试和静水两种条件分别对其进行了水质和容许纳污能力分析, 确定了其水环境容量 ; 最后以优先治理工业污染源、城镇生活污染源和养殖业污染源为基本原

则,并利用线性规划模型,从社会、经济、环境多方面综合对主要非点污染源治理进行了优化分析,由此确定了实现区划目标的综合整治措施。

(2) 整数规划

1) 方法简介

最优化问题中的变量(部分或全部)限制为整数时,称为整数规划。若在线性规划模型中,变量限制为整数,则称为整数线性规划。

依照决策变量取整要求的不同,整数规划可分为纯整数规划(所有决策变量要求取非负整数,这时引进的松弛变量和剩余变量可以不要求取整数)、全整数规划(除了所有变量要求取非负整数外,系数 a_{ij} 和常数 b_i 也要求取整数,这时引进的松弛变量和剩余变量也必须是整数)、混合整数规划(只有一部分的变量要求取非负整数,另一部分可以取非负实数)、0-1 整数规划(所有变量只能取 0 或 1 两个整数)^[15]。

从数学模型上看,整数规划似乎是线性规划的一种特殊形式,求解只需在线性规划的基础上,通过舍入取整,寻求满足整数要求的解即可。但实际上二者却有很大的不同,通过舍入得到的解(整数)不一定就是最优解,有时甚至不能保证所得到的解是整数可行解。

目前所流行的求解整数规划的方法,往往只适用于整数线性规划。目前还没有一种方法能有效地求解一切整数规划。常用的方法包括:(1)分枝定界法,可求纯或混合整数线性规划;(2)割平面法,可求纯或混合整数线性规划;(3)隐枚举法,求解“0-1”整数规划,包括过滤隐枚举法和分枝隐枚举法;(4)匈牙利法,解决指派问题(0-1 规划特殊情形);(5)蒙特卡洛法,可用于求解各种类型的整数规划。

整数规划的具体方法细节请参见运筹学方面书籍。

2) 应用实例

整数规划在城市规划中的应用体现在选址规划、物流规划、交通规划、土地利用规划等方面。

王海燕(2005)^[15]针对循环经济模式下城市固体废弃物物流系统在规划时涉及的固体废物分拣中心、废旧物资回收站、固体废物处理厂和卫生填埋场等设施的选址、数量和固体废物物流流向流量等问题,建立了针对城市固体废弃物物流系统优化问题的混合整数规划模型,优化了相关设施的选址、数量、固体废弃物从一个设施流向另一个设施的流量的分配等问题,使整个城市的固体废弃物处理成本最低。

石英等(2006)^[16]根据基本农田保护区布局优化包括的耕地综合质量排序和耕地入选(入选为基本农田保护区的耕地)两个决策过程的特点,相应建立了基于属性测度的属性层次排序模型和0-1整数规划入选模型。在此基础上,以MapGIS为二次开发平台,编制了基本农田保护区布局优化决策支持系统,并利用该模型对山西省太原市万柏林区东社乡的基本农田保护区布局优化进行了实证。结果表明,该模型有效地解决了乡级基本农田保护区布局优化的决策问题,同时也为区域土地利用优化提供了一种新方法。

[15] <http://lxy.sjzu.edu.cn/001/jpk/jch/2.doc>

(3) 非线性规划

1) 方法简介

目标函数或约束条件是设计变量的非线性函数的优化问题称为非线性规划 (Non-linear Programming), 其与线性规划求解时的区别体现在如果线性规划的最优解存在, 其最优解只能在其可行域的边界上 (特别是可行域的顶点上); 而非线性规划的最优解 (如果最优解存在) 则可能在其可行域的任意一点。由于非线性函数的形态多样且较为复杂, 目前没有一种较为通用与可靠的算法, 而只是针对具体的问题类型, 有一些公认为较为合适的算法, 除了对简单和性态 (目标函数的可微性、单调性等) 良好的问题能够运用微分和变分等解析法求解外, 绝大多数的实际问题都需要借助计算机通过迭代算法这种数值计算方法寻求问题的局部或全局最优解^[16]。

按照是否有约束条件, 非线性规划可分为无约束优化问题和有约束优化问题, 无条件约束非线性规划可以写为: $\min f(x)$; 而有条件非线性规划的一般形式可以写为:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } g_i(x) \geq 0, \quad i=1, \dots, p \quad (\text{s.t. 为 subject to 的简写, 受限制于}) \\ h_j(x) = 0, \quad j=1, \dots, q \end{cases}$$

求解非线性规划的迭代

步骤如下: (1) 选取初始点 x^0 , 令迭代轮次 $k=0$; (2) 构造搜索方向, 依照一定规则, 构造 f 在点 x^k 处关于可行域 K 的可行下降方向作为搜索方向 p^k (3) 寻求搜索步长, 以 x^k 为起点沿搜索方向 p^k 寻求适当的步长 t_k , 使目标函数值有某种意义的下降; (4) 求出下一个迭代点, 迭代公式为 $x^{k+1} = x^k + t_k p^k$, 若 x^{k+1} 已满足某种终止条件, 停止迭代; (5) 以 x^{k+1} 代替 x^k , 回到 (2) 步。

对于步长的确定, 一维搜索算法是一种基本的算法, 由于步长的试探或计算的次数很多, 它在优化过程中耗时占很大份额, 应该选择较有效的算法, 常用的算法包括牛顿法、平分法、三次差值法、黄金分割法、分数法 (斐波那契法, Fibonacci 法)、抛物线法 (二次插值法) 等。

无约束优化和有约束优化问题的搜索方向的方法有所不同。前者的搜索方向取目标函数的下降方向, 常用的有负向梯度方向、共轭梯度方向、牛顿方向和拟牛顿方向等; 后者的搜索方向既要满足下降性又要满足可行性, 常用的有 Zoutendijk 可行方向、简约梯度方向和投影方向等。

关于算法的详细原理介绍, 请参看文献 [错误! 未定义书签。]、(李军, 徐玖平, 2003) [117]。

2) 应用实例

在城市研究中, 非线性规划模型主要用于交通网络优化、市政管网优化和土地利用规划等方面。

[16] <http://lxy.sjzu.edu.cn/001/jpk/jch/3.doc>

王圃等(2002)^[118]利用非线性规划对水泵的节能和供水系统设计进行优化,水泵优化运行的非线性规划一般都可以分成两部分:水泵运行的优化计算与水力模拟。在水力模拟阶段,通过水力计算在事先预测的用水需求下确定各水泵组合的流量及所需的能量消耗。在优化计算阶段,则利用简约梯度法搜索问题的最佳解决方案。供水系统优化的非线性规划模型可利用单纯形法求出最优的实际管径。

田继敏等(1998)^[119]为解决桂林市产业和人口空间布局问题,提出了城市土地可持续利用规划模型。该模型为约束非线性混合整数多目标优化模型,其特点是建模基于组团的属性,简化了对数据的需求。作者简要介绍了城市土地可持续利用规模模型,基于投入产出关系估算了分行业的单位产值对应的货物运输量,然后以交通量和交通周转量为评价标准,利用连续逼近方法和 Huff 商区模式分别建立了货物运输、居民出行交通影响评价模型。

(4) 多目标规划

1) 方法简介

很多实际问题需要考虑多个目标,如经济效益目标、生态效益目标、社会效益目标等等,因而需要采用多目标规划(Multiple Objective Programming)方法进行求解。多目标规划问题的特点包括:优化所追求的目标有两个以上;各目标之间具有矛盾性;通常不能求得绝对最优解,只能求得满意解(较优解);问题的解是一个集合,决策人可以根据偏好进行选择。

单目标问题中,各种决策方案的目标值之间是可以比较的,各种方案总是可以分出优劣,因此一般都存在最优解。多目标规划问题中,对某个目标的“优化”可能导致其他目标的“非优化”甚至“恶化”,因此,一般不存在能够同时满足各个目标最优化的最优解。多目标优化问题的求解,除了要“优化”单个目标本身,还要平衡各个目标间的关系,因此,多目标优化问题的解是经过各目标权衡后相对满意的方案。

多目标规划问题的目标函数是由多于两个分目标函数组成的向量值函数,各分目标可以经处理统一为求极小,也可以区分为一类求极小而一类求极大。

多目标规划方法有:(1)约束法,其思想是解决主要目标的优化,同时兼顾其他目标,使他们满足一定限值。(2)分层序列法,将各个分目标按重要性依次排列,然后依次解决每个问题。(3)评价函数法,该方法的基本思想是用某种评价函数将多目标转化为单目标,常用的评价函数法有理想点法、线性加权法、平方和加权法、max-min法和乘法评价函数(4)功效系数法,此法是评价函数法的一种发展,先将各分目标的好坏统一用某种功效系数来表示(即打分),再由功效系数构成评价函数,从而求得满意解。

2) 应用实例

多目标规划在土地利用、物流设施规划、区域水资源配置、城市公共交通网规划等方面都得到了应用。

胡启洲等(2003)^[120]分析了城市公交线网的优化原则、多个优化目标(乘客直达率最大、线网日均满载率最大、线网覆盖率最大、线路重复系数最低、公交企业利益最大)以及约束条件(线路长度限制、线路非直线系数的限制、线路的路段不均匀系数的限制、乘客平均换乘次数的限制、线路负载效率系数的限制),提出了公交线网多目标规划的函数表达式及相应约束条件的数学表达式。

张雪飞等(2006)^[121]在考虑不同水质和水源的基础上,研究了决策变量的约束条件,

综合考虑不同用水户的用水效益,综合考虑社会、经济、环境三个方面效益,确定不同用户的用水效益系数,考虑不同水质水源水量的约束、不同用水户需水量的约束、污水排放量与污水处理能力关系的约束,建立了多目标优化模型,并调用 Matlab 优化工具箱对多目标进行求解。作者将该模型应用于唐山市区,给出了 5 种不同的水资源优化配置方案,能够合理配置唐山市区有限的水资源。

(5) 灰色规划

1) 方法简介

普通的线性规划、非线性规划、0-1 规划和多目标规划都是静态模型,不能反映约束条件随时间变化的情况,当规划模型或约束条件中出现灰数时处理不便,理论上求解的问题在实际中由于技术技巧问题难以求解。而灰色系统的思想和建模方法,可以使上述问题得到一定程度的解决。灰色规划(Grey Programming)就是将灰色预测与含有灰元的规划相结合,算法实现简单。

灰色系统思想与不同类型的普通规划结合,派生出灰色线性规划、灰色 0-1 规划、灰色非线性规划、灰色多目标规划等。由于篇幅限制,只简单介绍灰色线性规划。

首先介绍一些概念:灰概念,指内涵不确定而外延确定的概念;灰度,度量灰概念的量;灰数,信息不完全的数,只知道大概范围而不知道其确切值的数,是一个数的区间;灰数的白化值,指通过补充信息使灰数变成白数的取值;灰元,指信息不完全的元素。

$$\text{灰色线性规划的一般形式为求 } \max(\min) Z = CX = \sum_{i=1}^n c_i x_i, \text{ 满足 } \begin{cases} \otimes(A)X \leq (\geq, =) b \\ X \geq 0 \end{cases},$$

$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为决策变量向量, $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]$ 为目标函数的价值系数向量, c_j 可

以是灰度, $\otimes A$ 为约束条件的系数矩阵, A 为 $\otimes A$ 的白化矩阵, $A = (a_{ij})_{m \times n}$,

$b = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T$ 为约束向量。

在对灰色线性规划求解时,需要首先将灰色参数白化,一般可以指定 A 中元素的值,即将 $\otimes A$ 中的元素白化,首先按最小白化值 a_{ij} 作一次计算,如果无解,则用最大白化值 \bar{a}_{ij} 作一次计算,或者取区间 $[a_{ij}, \bar{a}_{ij}]$ 中其他白化值进行计算,如果白化值参数选择合适,则往往能够使规划从无解变为有解。

灰色规划的其他方面的细节请参考文献(邓聚龙,1989)和(刘思峰等,1999)^{[122] [123]}。

2) 应用实例

灰色规划在城市规划中主要用于水环境规划和土地结构规划等方面。

徐敏等(2003)^[124]通过把灰色参数和灰色变量视为混沌变量,利用混沌运动的遍历性、随机性、规律性以及初值敏感性的特点,尝试应用具有优秀随机搜索性能的混沌优化方法求解水环境灰色非线性规划问题。实例研究证明,该方法具有搜索速度快、求解精度高的优

点,因此对目标函数的优化结果比常规数值解法、遗传算法更加有效。

耿红(2000)^[125]利用灰色线性规划法对广西田阳县土地利用结构进行了优化及分析。具体采用一组灰色线性方程作为系统模型的约束条件,采用数学函数来表达土地利用结构优化的目标以评价不同土地利用方案的效益。以土地利用现状为基础,根据田阳县土地资源的特点及土地利用总体规划的要求共设置了11个变量;设置了土地总面积约束、人口总量约束、宏观计划约束等13方面共23个约束条件,最后应用灰色线性规划计算程序求得3个土地利用结构优化供选方案,并最终得到最优方案。

(6) 动态规划

1) 方法简介

20世纪50年代初,美国数学家贝尔曼(R. Bellman)等人提出动态规划(Dynamic Programming),用于处理多阶段决策过程的优化。所谓多阶段决策过程(又称序列决策过程),是指该过程可以分解为一系列互相联系而衔接的发展阶段,每个阶段可以用某一或某些参数描述过程的特征。为使整个过程达到最优,各阶段的决策不能任意选取也不能局限于某一阶段考虑。动态规划便是寻求最优策略使问题达到最优目的的一种方法。

贝尔曼提出了解决多阶段决策过程问题的“最优化原理”(Principle of optimality):“一个过程的最优决策具有这样的性质:即无论其初始状态和初始决策如何,其今后诸策略对以第一个决策所形成的状态作为初始状态的过程而言,必须构成最优策略”^[17]。简言之,一个最优策略的子策略,对于它的初态和终态而言也必然是最优的。

动态规划将多变量决策问题分解为多个单(或几个)变量的优化问题顺序求解,其实它不仅是一种算法,还是构造问题的一种模式。动态规划的基本思路是将 n 个决策变量的优化问题,作为 n 个阶段的串体系,每个阶段仅一个(或几个)变量待优化,并通过递推方式逐个阶段地寻求整个问题的最优解。

动态规划的主要步骤有:(1)根据问题的特征,划分为若干阶段,化成多阶段决策过程;(2)正确选择状态变量,使它既能描述过程的演变又满足无后效性要求(所谓无后效性是指过程的过去历史只能通过当前状态影响未来的发展);(3)列出每一阶段适宜的状态变量;(4)写出状态变量方程,可以用解析式、图表或算法表示;(5)确定目标函数,应具有可分离性并满足递推要求;(6)求解动态规划,按照变量与函数的性质可采用分析法、填表法和标号法。

2) 应用实例

目前,动态规划在自然资源分配、城市管网规划、城市经济决策、土地利用规划、水利规划等方面已经得到了较为广泛的应用。

孙文等(2006)^[126]通过分析大量实际资料,剖析了渭南市区供水系统各要素及其相互关系和水源工程的特点,建立了渭南市区水源优化调度模型,运用动态规划方法,把渭南市区城市供水优化问题转化为一个动态的多阶段决策问题,即把同时对各个部门进行水资源最优分配问题看作分阶段依次对各个部门进行水资源分配的问题。

黄明华(2002)^[127]利用动态规划的理论对榆林市进行城市规划。在确定了城市的远景规模及整体布局结构之后,以动态规划方法对每一阶段可能规模与布局结构进行分析,即所

[17] <http://www.zsqz.com/jsbase/suanfa/dtguihua/chapter2.htm>

谓的“分期”阶段，这里的“每一阶段”是淡化了的时间概念，只体现在土地利用空间上，即人口规模与土地利用空间相对应，而不是与具体的时限相对应。最终确定的榆林城市结构布局分为 6 个分期，追求一种动态的完整，使其能够在城市发展过程中保持布局结构的持续合理。一方面，不仅使得城市布局在近期、远期及远景规划图中合理，而且在近期与远期之间，远期与远景之间也能够合理；另一方面使得当城市发展的用地规模与时间产生不同步时，城市的布局也不会因此而产生大的影响。

(7) 遗传算法

1) 方法简介³⁵

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是由美国密歇根大学 John H Holland 教授等在 20 世纪 60 年代创立的一类仿生型的优化算法。它以达尔文的进化论和孟德尔遗传变异理论为基础，模拟生物界进化过程，是一种自适应、启发式、全局优化的高效搜索算法。

遗传算法摒弃了传统的搜索方式，其模拟自然界生物进化过程，采用人工进化的方式对目标空间进行随机化搜索。它将问题域中的可能解看作是群体的一个个体或染色体，并将每一个体编码成符号串形式，模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程，对群体反复进行基于遗传学的操作（遗传、交叉和变异），根据预定的目标适应度函数对每个个体进行评价，依据适者生存，优胜劣汰的进化规则，不断得到更优的群体，同时以全局并行搜索方式来搜索优化群体中的最优个体，求得满足要求的最优解。

遗传算法是一类随机化算法，但是它不是简单的随机走动，它可以有效地利用已有的信息来搜索那些有希望改善解质量的串，类似于自然进化，遗传算法通过作用于染色体上的基因，寻找好的染色体来求解问题。与自然界相似，遗传算法对待求解问题本身一无所知，它所需要的仅是对算法所产生的每个染色体进行评价，并基于适应度值来选择染色体，使适用性好的染色体比适应性差的染色体有更多的繁殖机会。

遗传算法在解决问题时包括 5 个要素：问题可能解的遗传表示（作为染色体）、建立可能解的初始群体（种群）、评价函数（评价每个染色体所代表个体的优劣）、遗传操作（如选择、复制、交叉和变异）、遗传算法中的各种参数（群体大小、交叉概率和变异概率等）。

遗传算法的工作过程和步骤：(1) 初始化染色体群体；(2) 评价群体中每个染色体，得到每个染色体的适应值；(3) 根据适应值选择父母染色体；(4) 对父母染色体实施遗传操作产生后代；(5) 对新染色体评价，并按照某种原则替换父母染色体，形成新一代群体；(5) 如果满足终止条件，则停止计算，并返回最好的染色体，即问题的解，否则从步骤 (3) 开始。

关于遗传算法的详细介绍，请参看文献（陈国良，1996）^[128]。

2) 应用实例

遗传算法在思路上突破了以往最优化方法的框架，以其极强的解决问题的能力得到了广泛的应用，在城市研究和城市规划中主要体现在交通规划、土地规划、能源规划、遥感数据处理、管网优化等多方面。

郭鹏等（2005）^[129]利用遗传算法的全局优化搜索能力，构建了一个城市土地利用的优化模型。该模型采用与土地利用现状图相对应的二维矩阵编码，利用层次分析法构建了顾及土地功能协调性、土地比例协调性、人口、交通 4 个方面的多目标适应度函数。应用该模型

对某城市的城市土地利用空间结构进行了优化配置。在土地利用优化中,一个“染色体”就是一个土地利用的规划方案,适应度就是对土地利用规划方案的评价结果。作者采用二进制编码方式,考虑居住用地、公建用地、工业用地、村庄用地 4 种土地利用类型,对土地利用现状图的每一个栅格进行编码,得到一个二维矩阵。选用 AHP 法从土地功能协调性、土地比例协调性、人口、交通 4 个方面对城市的土地利用状况进行评价后,采用三种遗传操作——选择操作、交叉操作、变异操作进行优化计算。结果表明,该模型能够反映城市土地利用的客观规律,优化后的方案能很好地符合城市规划上的各种需要。利用遗传算法的全局优化搜索能力建立的城市土地利用优化方案具有许多优点:能产生多套方案,并可以从中选择相对的满意解作为优化的方案;考虑了来自土地功能协调性、土地比例协调性、人口、交通等方面的影响,综合了许多因素,产生的结果将反映大众的意愿而不仅仅是规划者个人的思想。

曹玖等(2005)^[130]分析了城市轨道交通接驳公交(Feeder Bus)线网的功能,初步界定了车站影响区,并将其用离散化编码表示,以运营者消耗和使用者消耗之和最小为公交线网优化目标函数,建立模型,最后介绍了使用遗传算法搜索最优路线的计算步骤,包括编码方式的确定、产生初始群体、建立适应度函数、以接驳公交消耗最小为目标输出推荐线路。

(8) 模拟退火算法

1) 方法简介

模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)是一种模拟物理系统退火过程的随机迭代寻优方法(王新生,姜友华,2004)^[131]。Kirkpatrick(1983)^[132]首次使用模拟退火法求解组合最优化(Combinatorial optimization),经过 20 年的研究和应用,模拟退火算法已发展成为非线性优化的有效工具(岳琪,沈冰,2006)^[133]。其基本思想是,在算法迭代的开始阶段,搜索过程随机性很大,除了接受优化解外,还用由一个温控系数来控制的概率接受恶化解,当算法迭代一定次数后(称为一个 Markov 链长度),进入下一阶段迭代,这时算法接受恶化解的概率要较前阶段低一点,充分迭代后又进入下一迭代过程,接受恶化解的概率又要小一点,如此不断迭代,直到达到某个停止规则时算法终止(最后阶段不接受恶化解)。这时得到的解是一个优化解,但不能保证它一定是最优解。

模拟退火算法的效率高低,能否收敛到全局最优解,在很大程度上取决于冷却进度表的参数设置。冷却进度表中包括 4 个参数:(1)控制参数 t 的初值一般要取较大的值;(2)控制参数 t 的衰减系数 r ,要求缓慢衰减, r 的取值在 0.80 到 0.98 之间;(3)控制参数 t 的终值,常可简化为在相继若干个 Markov 链中解无变动时终止算法,也可以是迭代总次数达到一定数目时终止算法;(4)Markov 链的长度 L_k 一般要求足够大。在实际参数设置中,存在计算时间和解质之间的权衡。如果选择较短的 L_k 和较小的 t ,算法将较快终止,结果将可能是得到局部最优解。相反,则可得到一个较好的解,但一般需要以较长的计算时间为代价。只要设置较小的 r 和较大的 L_k ,算法几乎在所有情况下都能产生一个非常合适的解(Aerts J CJH 等,2002)^[134]。

2) 应用实例

模拟退火算法在城市研究与城市规划中主要用于交通规划、土地空间布局等方面,管网优化方面也有报道。

王秋平等(2006)^[135]分析了城市单点交叉口交通流特性与通行能力,建立以平均延误时间最短、平均停车次数最少为目标以相位有效绿灯时间、饱和度及周期时长为约束条件的城市单点交叉口信号配时优化非线性函数模型,用遗传算法及遗传模拟退火算法对其进行求解,可将车均延误时间优化至 10^{-3} s,减少了平均停车次数,获得较为理想的效益值,从而提高了交叉口服务水平。

王新生等(2004)发展了一种模拟退火算法辅助生成城市土地空间布局方案,首先建立了城市土地空间配置问题的数学模型,目标函数是最小化土地开发费用、最大化不同功能地块间的空间协调性。该模型应用于湖南省长沙市暮云工业区用地规划的结果表明,模拟退火算法是一种辅助城市土地利用规划的有用的、有潜力的优化方法,其主要优势在于两方面:一是其优化过程不受函数的约束条件的限制,不需要辅助信息,只依赖优化目标的函数值,所以能够求解非线性、高维的优化问题;二是算法的执行时间短,费用少。产生城市土地空间布局方案的过程十分复杂且繁重费时,随着问题的复杂程度增加,规划师的劳动将成倍增加,在这种情况下SA的优势将更加明显。它可以产生满足规划要求的城市土地空间配置方案;但是,除非在优化中考虑了所有的规划目标、实际约束条件等,否则SA只能作为在决策过程早期阶段的一种快速的、简单的优化技术,其产生的规划方案也仅能为决策者和规划者提供参考。

(9) 网络分析

1) 方法简介

网络分析(Network Analysis)是运筹学的一个重要分支,主要运用图论方法研究各类网络的结构及其优化问题²⁸。许多现实的地理问题,只要经过一定的简化和抽象,就可以将它们描述为网络,并可以进一步量化地测度它们的拓扑结构、连通性和复杂性,问题的核心就转变为网络优化问题。目前关于网络拓扑研究,最多、最常见的是基于平面图描述的二维平面网络。所谓平面图被定义为:各连线之间不能交叉,而且每一条连线除顶点以外,不能再有其他的公共点(牛文元,1987)^[136]。

网络分析中最常见的问题是最短路径和选址问题。

最短路径问题的内涵包括纯距离意义上的最短路径、经济距离意义上的最短路径和时间意义上的最短路径。目前公认为求解最短路径问题最适合的算法是1959年由荷兰的E. W. Dijkstra提出的标号法^[18],这个方法在求解过程的每个步骤中,都对网络图中的每个定点赋予一个(或几个)相应的数,这些数就成为该定点的标号。标号法的优点是不仅可以求出起点到终点的最短路径长度,而且可以求出起点到其他任何一个顶点的最短路径及其长度。

选址问题是区位论研究的主要方向之一,选址问题的数学模型取决于可供选址的范围,以及怎样判定选址的质量两个方面的条件。根据其选址的质量判据,可以分为求网络图的中心点和中位点两类问题。中心点选址问题的质量判据为使最佳选址位置所在顶点的最大服务距离为最小,适用于医院、消防站点等服务设施的布局;中位点选址问题的质量判据为使最佳选址位置所在顶点到网络图中其他各顶点的最短路径的距离总和达到最小。

2) 应用实例

网络分析方法是现代地理学必不可少的主要方法之一,对于许多现实的地理问题,如城镇体系、城市地域结构、交通、商业网点布局、供电与通讯线路问题等等。

[18] http://en.wikipedia.org/wiki/Edsger_Dijkstra

王海珍等(2005)^[137]以厦门2000年TM影像解译的土地利用现状图、绿地系统现状图与规划图为基础资料,运用景观格局分析方法评价了厦门本岛绿地系统的现状与已有规划。在此基础上,应用网络分析法构建了旨在优化生态网络的多个绿地系统规划方案。通过 α 指数、 β 指数、 γ 指数等网络结构指数的分析,进行规划方案的比选,从中选出最优的规划方案。结果表明优化方案能使景观的破碎化程度得到改善,绿地斑块形状的复杂性程度进一步增加,景观连接度得到提高。应用景观指数和网络分析法相结合的方法,可以定量评价城市绿地系统现状以及规划的合理性。

隋玉正等(2006)^[138]利用青岛市交通图作为数据源,选取市内主要旅游景点作为网络分析的节点,利用GIS对景点的通达度和相对连通性进行分析,找出旅游交通网络中各节点间的所有路径。根据各路段的通行能力和对客流的分配情况对网络状况进行分析,并讨论了青岛市旅游交通网络存在的问题,提出了优化青岛旅游交通网络的对策。

张译等(2006)^[139]利用网络分析法分析了城市公交系统的拓扑性质。首先将城市公交系统划分为公交站点网络和公交线路网络,通过引入网络分析中的拓扑参数来对城市公交系统进行分析,以北京市公交系统为例,计算并分析了这两种网络的拓扑参数,并从交通工程的角度对这些拓扑参数的意义进行了研究。

2.1.6 系统决策

在实际生活和生产中,为达到某种目标,需要从若干个解决方案中选择一个最优或合理方案,这就构成了决策问题。决策作为一门完整理论是在20世纪40年代由美国的赫伯特·西蒙(Herbert A. Simon)、詹姆士·马奇(James G. March)等人提出的^[19],决策是为了达到某一目的,从若干可行方案中经过论证、分析、优化、综合判断后确定应采取的决断行为。系统决策就是根据系统的状态和目标,选取若干可能的方案,并运用定性与定量的方法,对这些方案所产生的后果进行综合分析,按照某种衡量标准,选择一种最佳或满意方案。

决策问题一般有如下要素:决策者——决策者对社会、经济、环境以及承担风险程度的主观意念;决策目标——根据现实与差距,希望达到的结果;决策准则——根据目标和价值观念制定的判断方案优劣的标准;可选方案——达到目标的有效途径(方案集、策略集);自然状态与状态概率——影响决策,但不受决策者主观控制的客观条件,称为状态集或随机事件集,自然状态出现的可能性或概率,称为状态概率;损益值、效用值——在不同的自然状态下,采取某种行动方案所获得的收益、损失或效用。也有文献将事件、对策、效果、目标作为决策的四要素。

决策应理解为一个过程,需要经过提出问题、收集资料、确定目标、拟定方案、分析评价后才能获得。作出决策后,还要检查和监视它的执行情况,发现偏差及时反馈和修正。决策的一般步骤如图13所示:

[19] <http://www.cei.gov.cn/template/economist/doc/xrxrxl/200312296308.htm>

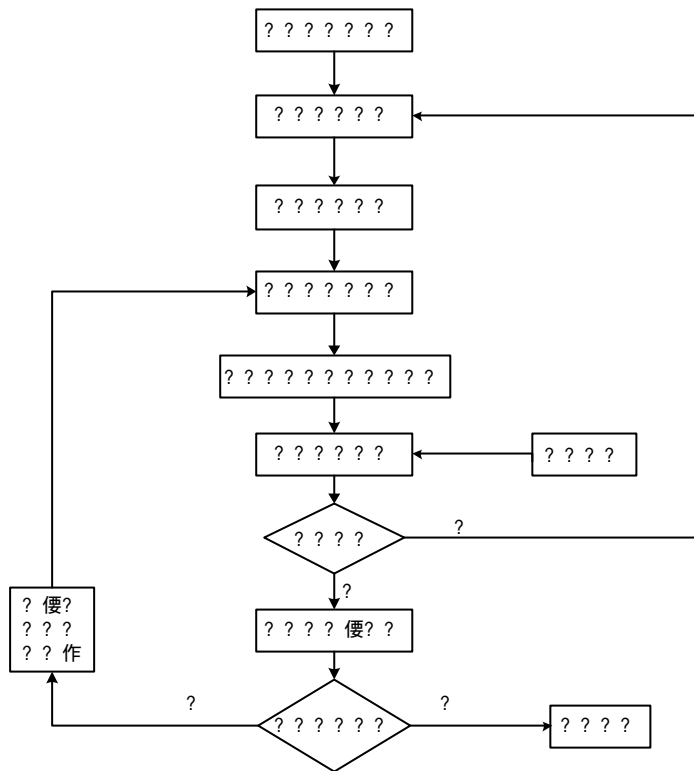


图 13 决策的一般步骤示意图

为了便于表达与分析,将问题的各种可行方案(记为 $y_i, i=1, 2, \dots, m$) 可能存在的自然状态(记为 $x_i, i=1, 2, \dots, n$) 及其对应的结果(记为 $v_{ij}, i=1, 2, \dots, m$) 汇成矩阵 $(v_{ij})_{mn}$, 如表 7 所示,称为决策矩阵。根据决策目标的不同,决策矩阵中元素 v_{ij} 可以代表收益也可以代表支出。

表 7 决策矩阵

	x_1	x_2	...	x_j	...	x_n
	p_1	p_2	...	p_j	...	p_n
y_1	v_{11}	v_{12}	...	v_{1j}	...	v_{1n}
y	v_{21}	v_{22}	...	v_{2j}	...	v_{2n}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
y_i	v_{i1}	v_{i2}	...	v_{ij}	...	v_{in}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
y_m	v_{m1}	v_{m2}	...	v_{mj}	...	v_{mn}

决策从结构上可以分为:程序决策——表现为重复出现和例行状态,可以由人们设计出一套固定的程序来处理;非程序决策——表现为新颖、无结构,具有不寻常的影响,人们无

法设计一套固定程序来处理它们。决策从其目标可以分为：单目标决策——系统只有一个目标的决策问题；多目标决策——系统具有一个以上目标的决策问题。决策从问题的自然状态可以分为：确定型决策——不含有随机因素，自然状态完全确定，决策者只需在多个行动方案中选择一个最优方案，可采用之前介绍的优化、评价方法解决；风险型决策——对自然状态缺乏充分了解，但根据客观资料和经验，能估计出各状态的出现概率，由于不够肯定，使得作出的决策存在一定风险；不确定型决策（或非确定型决策）——对自然状态的出现一无所知，没有任何资料 and 情报对各种状态的出现概率进行估计。有学者将风险型决策和不确定型决策归为随机型决策²⁸。

下面将对主要的决策方法进行介绍。

（1） 风险型决策

1) 方法简介

许多地理问题，常常需要在自然、经济、技术、市场等各种因素共存的环境下做出决策。这些因素中，有许多是决策者所不能控制也不完全了解的，对于这一类决策问题的研究，需要采用风险型决策（Decision Making Under Risk）方法来解决。

风险型决策的方法主要有最大可能法、期望值法、决策树法（树型决策法）、灵敏度分析法和效用分析法（效用理论）等。

对风险型决策问题可选择概率最大的自然状态进行决策，称为最大可能决策法，其本质就是将大概率事件看成必然事件，小概率事件看作不可能事件，将风险型决策问题转化为确定型决策问题。应用时需要满足某一自然状态出现的概率比其他的概率大很多、各行动方案在各自然状态下的损益值差别不是很大的条件。

一个行动方案的期望值，就是该方案在不同自然状态下的损益值与其相应的概率的乘积之和，它代表了该方案的平均损益。期望值法需要计算各行动方案的期望损益值，并以其为依据，选择平均收益最大或者评价损失最小的行动方案作为最佳决策方案。利用期望值法进行决策，不能防止在个别偶然情况下会出现较大的偏差，它掩盖了偶然情况下的损失值，所以在这一点上具有一定风险。但由于偶然情况出现的概率较小，因此以期望值作为最佳方案选择依据的风险较小。

决策树法是以树状图形作为分析和选择方案的一种方法。其基本结构是决策树，它由决策点、方案分支、状态节点、概率分枝和结果点等要素构成。该方法决策的依据与期望值法相同。决策树法的步骤包括：（1）画出决策树；（2）计算期望损益值，由树梢开始，经树枝、树干，逐渐向树根依次计算各方案的损益值；（3）剪枝，即方案的比较择优过程，对各方案的期望损益值进行比较优选，剪掉舍弃方案所在的分支，保留选取的最优化方案。决策分析的逻辑顺序是从树根至树干、树枝、树梢逐渐展开。

对于风险型决策问题，其各个方案的期望损益值是在对状态概率预测的基础上求得的，由于状态概率的预测会受到不同因素的影响，因此必须对可能产生的数据变动是否会影响最佳决策方案进行选择分析，这就是灵敏度分析。

效用分析法（效用理论）将在下节单独介绍。

在实际应用中，可以采用不同的方法进行计算比较，通过综合分析，选择最佳的决策方案。
错误！未定义书签。

2) 应用实例

严艳(1999)^[140]将新疆旅游发展规划分为3个阶段,分别与“九五”、“十五”和“十一五”3个五年计划吻合,考虑到供给差别和可能投入的不同,制定了新疆旅游业了高速、中速和低速三种发展方案。发展规划中的年增长率以调研判断法和专家咨询法预测。规划方案采用决策树分析法给出树状分析方案,分别计算三个阶段下三种方案下国际和国内旅游业将接待的旅游者数量和旅游创汇收入,最后推荐中速发展方案作为最终方案。

(2) 效用理论

1) 方法简介

1944年 Von Neumann 和 Morgenstern 发表了《对策理论与经济行为》(Theory of Games and Economic Behavior),建立了现代效用理论(Utility Theory),论证了效用值的存在性。对不确定性决策问题的各种后果可设定效用,而且决策者所偏好的方案必定是期望效用最大的方案,现代效用理论已成为决策的重要基础理论(韩长福,赵纪新,2006)^[141]。

决策者的主观因素对决策过程有重要影响,决策者对决策问题的主观价值、态度和倾向不同,即对风险的态度是不同的。期望值法没有考虑决策者对风险的主观态度,特别是在存在较大风险或决策只能使用一次时,应该考虑决策人对风险的态度。

效用理论中引入“效用”这个指标来量化决策者对待风险的态度。效用的大小可以用效用值表示,一般情况下,决策者最偏爱的损益值的效用值赋予1,而最不偏爱的赋予0。效用值是反映决策者对某事物价值偏好度量的效用函数,是评价主体效用在数值上的映射,其实质是将效用的数学期望值转换成效用值的数学期望值,并且不论是单变量的还是多变量的,可直接量化或不能直接量化的,最终都可转换为量化的数值。

效用理论是建立在一系列有关合理行为的公理和定理基础上的,主要有存在性公理、有序性公理、传递性公理、风险态度可数量化公理和等价代换定理。

在决策问题中,设自然状态为 e ,行动方案为 Q ,收益值为 Y ,记可能的最大和最小收益为: $\max(Y)=Y^*$, $\min(Y)=Y_*$,二者均为有界数,则对于任一收益值 Y 都存在有决策者的效用 $u=u(Y)$,且满足 $0=u(Y_*)=1$, $u(Y^*)=1, u(Y_*)=0$ 。称 $u(Y)$ 为决策问题的效用函数。以不同的决策方案的收益值作为横坐标,相应的效用值作纵坐标所绘制的曲线成为效用曲线,是效用函数的几何表示,一般有三种类型——保守型、冒险型和中间型,如图14所示。

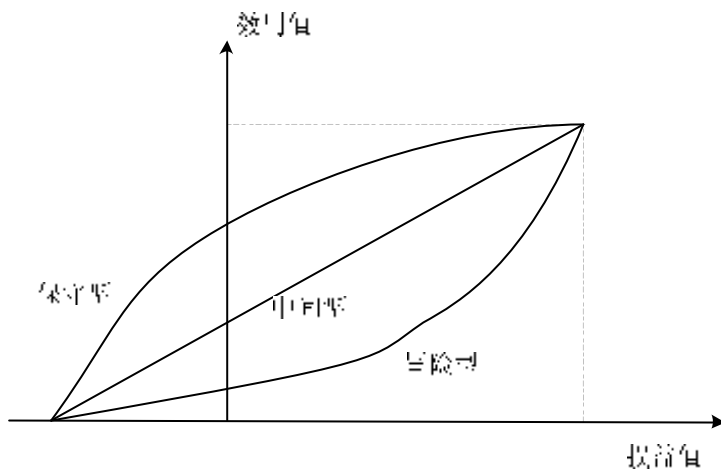


图 14 效用曲线类型

实践表明,大多数决策者属于保守型或中间型。绘制效用曲线的基本方法是运用心理测定法向决策者提问,了解决策者的心理倾向,测出不同收益值对应的效用值而绘制,常用的方法有直接提问法和对比提问法。

当效用曲线画出后,就可以按照期望效用值进行决策。先在效用曲线上找出每个行动方案在不同状态下的损益值的效用值,再计算各个行动方案的期望效用值(期望值法中的收益值改成与其相应的效用值),最后选择期望效用值最大的方案作为最佳方案。

2) 应用实例

效用理论在投资决策中应用较多,在城市规划研究领域,效用理论在交通规划、选址规划等方面有文献报导。

周溪召等(2002)^[142]根据我国城市混合交通阻抗的特点,将出行者看作出行的消费者,考虑出行者出行决策的同时性,以离散选择和随机效用理论为分析工具,研究了基于对称阻抗的交通网络出行、讫点、方式和路径随机选择的组合模型,模型的分析过程体现在出行选择、目标选择、方式选择、路径选择组合行为随机效用最大化。

杨文建等(2002)^[143]引用多属性效用理论对我国工程移民系统中移民安置区的规划选点问题进行了目标和效果测度,通过评估单属性和多属性效用函数对每个备选方案的可能影响,然后计算每个备选方案的期望效用以评估备选方案,期望值最大的方案即可作为最终方案。

朴庆日等(2003)^[144]总结了以往国内学者对城市功能区划的量化方法研究,认为在层次分析法中对指标权重的确定存在主观因素过多等不足,严重影响了研究的科学性。为了克服上述不足,作者将多属性效用理论的代理价值法与博弈论应用于城市功能区划研究中,并以深圳市南山区物流中心的选址为例,阐述了代理价值法与博弈论在城市功能区划中的具体实践操作。

(3) 不确定型决策

1) 方法简介 错误!未定义书签、错误!未定义书签。

在不确定型决策问题(Decision Making Under Uncertainty)中,每一种自然状态的发生

是随机的，而且各种自然状态发生的概率也是未知的和无法预先估计的。这类问题的决策，主要取决于决策者的素质、经验和决策风格等，没有一个完全固定的模式可循，对于同一个决策问题，不同的决策者可能会采用不同的处理方法。通常有悲观准则、乐观准则、折衷准则、等可能准则和后悔准则等。

悲观准则：由于担心失误可能造成较大损失，故对客观情况持保守或悲观态度，采取从各行动方案可能产生的最坏结果出发，选择其中最好者的策略。

乐观准则：与悲观原则相反，决策者对客观情况持乐观态度，采取“好中之好”的策略。

折衷准则：当决策者认为不应太保守也不能太冒险时，可以根据情况确定一个 0、1 之间的数，然后在决策矩阵中计算各方案（各行）中收益最大值和最小值关于该数的线性组合，选择各方案中组合值的最大值作为行动方案。

等可能准则：认为当没有确切理由表明事件集合中某个时间比其他事件有更多的发生机会时，只能认为它们的发生机会是均等的，决策者按此计算各方案或策略的收益期望值，并以最大期望值对应的方案最为决策方案。

后悔准则：决策者从后悔的角度去考虑问题。把在不同自然状态下的最大收益值作为理想目标，把各方案的收益值与这个最大收益值之差称为未达到理想目标的后悔值。然后从各方案最大后悔值中取最小者，从而确定行动方案。

对于同一决策问题，采用不同决策方法可以得出不同的决策方案，理论上也不能证明对于解决不确定型问题应采取何种评选标准，但这并不表明在解决不确定型决策问题时可以任意选择决策准则，而应该根据实际情况，选择合适的决策方案。悲观准则决策方法主要由那些比较保守稳妥并害怕承担较大风险的决策者所采用；乐观准则决策方法主要是由那些对有利情况的估计比较有信心的决策者所采用；折衷准则和等可能决策方法主要由那些对形势判断既不乐观也不太悲观的决策者所采用；后悔准则决策方法主要由那些对决策失误的后果看得较重的决策者所采用。

2) 应用实例

由于不确定型决策的准则难以量化，因此在城市规划和城市研究中，虽然研究对象具有不确定性，但是不确定型决策的这些准则在实际的应用中还比较少的作为一种单独的方法，一般与其他方法集成应用。

(4) 多准则决策

1) 方法简介

由于系统具有多方面的属性，分析一个方案的好坏，评价的准则（Criterion）往往不只是一个而是多个，追求的目标也有多个。此外总目标比较抽象复杂时，常需分解成分目标，而分目标又可能需用一个或几个准则来评价，由此形成一个层次复杂、结构多样的多目标多准则体系。

多准则决策（Multiple Criterion Decision Making, MCDM）分为两类，多目标决策（Multiple Objective Decision Making, MODM）和多属性决策（Multiple Attribute Decision Making, MADM）（叶义成等，2006）^[145]。

多目标决策问题以目标来定准则，目标明显而属性隐含，决策变量常是连续可变的，因

此有无限多的方案，多目标决策可分为三类：(1) 决策人和分析人事先商定偏好，分析完成后即可择优决策；(2) 分析人提供解集，由决策人决定；(3) 交互型方法，决策人与分析人不断交换意见，直到决策人满意为止。

多属性决策问题是以属性来定准则，属性明显而目标隐含，决策变量通常取离散值，因而方案数有限，大多用于评价和方案选择中，对于此类问题，应确定属性、建立准则、计算各方案的属性值，然后建立方案—属性矩阵，再按建立的矩阵体系进行决策。

对于属性多、方案多、目标多的复杂问题，通常采用层次决策分析法。层次决策分析法将层次分析法运用于决策中，是一种定性与定量相结合的决策方法，它将决策者对复杂系统的决策思维过程模型化、数量化。运用此方法，决策者通过将复杂问题分解为若干层次和若干因素，在各因素之间进行简单的比较和计算，就可以得到不同方案的重要性程度，为最佳方案的选择提供依据。层次分析决策法常常被运用于多目标、多准则、多要素、多层次的非结构化的复杂系统决策问题，特别是战略问题的研究，具有十分广泛的实用性。

2) 应用实例

城市规划中的土地适宜性评价、主导产业选择、区域产业非均衡协调发展研究（任剑，王坚强，2006）^[146]和选址规划等问题都是多准则决策问题，可利用多准则决策方法对其进行分析和决策。

王宏伟等（2004）^[147]探讨 GIS 型分析决策方法在城市空间结构增长多目标决策过程中的应用，其主要目标包括土地利用技术经济合理性、生态环境质量、社会效益、经济效益、城市布局与建设条件和城市—区域关系。借助 GIS 技术，城市规划师在对影响城市空间结构增长的主要因素进行图层管理和空间分析基础上，采用人机对话的方式形成较合理的城市空间结构增长方案；将层次分析法和模糊数学相结合，研究建立了城市空间结构增长方案的评价模型群，并以玉溪市为例进行了应用研究。

李红等（2004）^[148]认为层次分析法是一种实用的多准则决策方法，可以将一个复杂问题表示为一个有序的递阶层次结构，并利用人们判断决策方案的优劣进行排序，该方法能统一处理决策中的定性和定量因素，具有系统性、简洁性、实用性、有效性等优点。作者应用层次分析法，以环境位置因素、经济因素和水库库容因素作为准则，在 4 个方案中进行决策，确定了某水库的选址问题。

刘卫东等（2005）^[149]在港口群中的铁矿石运输枢纽港的发展战略研究中，对日照港成为矿石主枢纽港的战略可行性进行了评估与分析。作者提出 12 个方案，确定了 9 个指标，以经济效益、时间效益和服务环境作为目标，采用层次分析法，通过建立递阶层次结构、构造两两比较判断矩阵、计算单一准则下元素的相对权重和元素对总目标的组合权重，得出最终评价结果。

此外，叶嘉安等（2006）^[150]介绍了多准则决策用于土地适宜性评价方面的原理和应用实例。

（5） 贝叶斯决策

1) 方法简介

按照期望值进行决策时，所取自然状态的概率直接影响着期望值的计算，为了提高决策的正确性，必须使估计的状态概率符合实际的状况，这包括事先通过合适的方法来初步估算

状态概率,和后面通过调研与必要的试验获得补充信息来修正概率。也就是先验概率需要进行修正,以得到后验概率,而求得后验概率的方法是贝叶斯定理,因此这种决策称为贝叶斯决策(Bayes Decision)。贝叶斯定理以及相关概念见 0.1.5 节(5),这里不再赘述。

贝叶斯决策过程的步骤为^[20]:(1) 验前分析,根据历史和统计资料以及自己的经验和知识,估计状态变量的先验概率与分布,算出各方案的期望与结果,根据所定准则对各方案进行评价和选择。(2) 预后验分析,决定是否值得搜集补充资料以及从补充资料可能得到的结果和如何决定最优对策。(3) 搜集补充资料,取得条件概率,包括历史概率和逻辑概率,对历史概率要加以检验,辨明其是否适合计算后验概率。(4) 后验分析,根据取得的新信息,用概率的乘法定理计算联合概率,用概率的加法定理计算边际概率,用贝叶斯定理计算后验概率,修正先验概率。预后验分析与后验分析十分相似,都需要运用贝叶斯定理修正先验概率,只是在预后验分析阶段从未进行调查,根据可能的补充信息进行修正,以分析采集信息和调查研究是否值得;后验分析是在进行过调查研究以后,根据实际取得新信息进行分析修正。(5) 用后验概率进行决策分析。(6) 序贯分析,对于比较复杂的决策问题,需要划分若干阶段,序贯分析是包括有多阶段的信息搜集和数值计算的过程,它包括一系列的先验分析和预后验分析、采集新的信息、作出后验分析和决策。

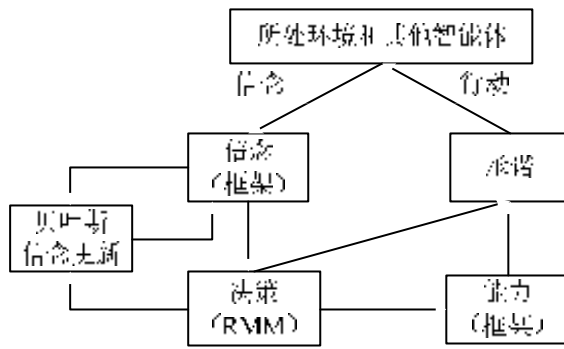
贝叶斯决策的优点在于能对信息的价值或是否需要采集新的信息做出科学的判断,能对调查结果的可能性加以数量化的评价,而不是像一般的决策方法那样,对调查结果或者是完全相信,或者是完全不相信;贝叶斯决策巧妙地将何调查结果和先验知识两种信息有机地结合起来;它可以在决策过程中根据具体情况下不断地使用,使决策逐步完善和更加科学。其局限性在于它需要的数据多,分析计算比较复杂,特别在解决复杂问题时,这个矛盾就更为突出;有些数据必须使用主观概率,有些人不太相信,这也妨碍了贝叶斯决策方法的推广使用。

2) 应用实例

贝叶斯决策在城市规划中还没有较多的应用,但是其通过先验知识得到后验知识的“学习”过程为科学决策提供了一个新的思路和方法。

欧海涛等(2001)^[15]在基于递归建模方法(Recursive Modeling method, RMM)的城市交通多智能体系统中的信念更新采用贝叶斯学习方法,使智能体可以确定其他智能体的准确模型并实时更新信息。在城市交通控制领域建立多智能体交通控制系统,仿真结果表明了该方法的有效性,对实现智能交通系统具有重要意义。智能体心智状态的组成如图 15,由于分布式环境中的动态变化特性,应在 RMM 方法中对智能体的信念在其观测行为的基础上不断更新。作者提出采用贝叶斯学习的方法,不断更新智能体中关于其他智能体合理模型的分配概率,以实现这一动态过程。信念更新过程主要有:1,在该智能体的知识库中识别其他智能体的可能模型;2,对初始信念为其他智能体的模型分配先验概率(如果无先验知识则分配相同的概率);3,在一给定时间点处理观测其他智能体的行为;4,使用贝叶斯学习更新与其他智能体相关的信念,并将这些信念存储到其知识库中,返回 3。

[20] <http://course.shufe.edu.cn/course/tjyc/multimedia/15.ppt>



控制)集; q 为马尔可夫转移律族, 族的参数是可用的行动; φ 是定义在 $G(\varphi = \{(i, a): a \in A(i), i \in S\})$ 上的单值实函数; 若观察到的状态为 i , 选用行动 a , 则下一步转移到状态 j 的概率为 $q(j|i, a)$, 而且获得报酬 $\varphi(j, a)$, 它们均与系统的历史无关; V 是衡量策略优劣的指标(准则)。策略是提供给决策者在各个时刻选取行动的规则, 记作 $p = (p_0, p_1, p_2, \dots, p_n, p_{n+1}, \dots)$, 其中 p_n 是时刻 n 选取行动的规则。从理论上来说, 为了在大范围寻求最优策略 p_n , 最好根据时刻 n 以前的历史, 甚至是随机地选择最优策略。但为了便于应用, 常采用既不依赖于历史、又不依赖于时间的策略, 甚至可以采用确定性平稳策略。

2) 应用实例

MDP 在许多最优化问题, 如林业管理、电话网络、水库调度、设备更新和维修、控制工程等方面都有应用, 并正在向工程、生物、经济更多的领域渗透。在城市规划方面, MDP 多用于分析、预测作为决策的一种支持, 而直接用马尔可夫过程决策进行方案比较和决策的实例较少。

王兴菊等(2002)^[154]在沐浴水库(山东省烟台地区莱阳市)优化调度过程中, 对马尔可夫单链弹性相关及动态规划理论及其应用进行了研究, 由马尔可夫单链弹性相关理论求得相应的条件概率流量, 将供水流量作为决策条件, 以工业、生活、灌溉和发电用水及 3 个保证率为效益函数, 以净效益最大为目标函数, 建立了相应的数学模型, 并编制了计算程序, 绘出了水库优化调度三维空间面图, 在实用中大大加强了调度面的灵活性和针对性。经实践证明, 方法可靠且效益显著。

宓瑞红等(2005)^[155]利用马尔可夫链建立了贫困县农村劳动力流动趋势模型, 对贫困县农村劳动力转移达到稳定状态的年限及其极限概率作出定量预测, 利于政府部门认识村劳动力流动的趋势, 科学地引导该区域农村劳动力的有序流动, 对政府和有关部门制定贫困县农村劳动力转移的决策具有一定的借鉴意义。

熊云波等(2002)^[156]以上海市中心城区近 50 年来有代表性的土地利用类型图为数据源, 采用 GIS 技术分析了上海市近 50 年来的土地利用总量变化; 并在 GIS 支持下分别计算出相邻时间点不同土地利用类型的状态转移矩阵, 利用马尔可夫模型对上海市中心城区土地利用空间演变过程进行了模拟分析和定量预测研究。结果表明, 上海市中心城区土地利用类型逐渐呈现一种圈层分布, 自市中心向外分别是: 以城市居住用地和城市其他建设用地为主、以城市工业用地为主、以农业用地为主。这种空间分布与转移过程对城市规划和经济建设决策具有一定参考价值。

(7) 灰色决策

1) 方法简介

灰色决策(Grey Decision)是在决策模型中含灰元或一般决策模型与灰色模型相结合的情况下进行的决策, 重点研究方案选择的问题。灰色决策包括灰色局势决策、灰靶决策、灰色关联决策、灰色发展决策、灰色层次决策、灰色聚类决策等, 其中灰色局势决策是地理学研究中常用的决策分析方法, 本节重点介绍该方法, 其他方法请参考其他文献。

灰色决策方法将事件、对策、效果、目标等决策四要素综合考虑的一种决策分析方法。灰色局势决策的数学模型, 实质上是运用有关的数学语言对决策四要素之间的相互关系所作的综合性描述, 包括以下几个基本内容: (1) 决策元、决策向量与决策矩阵, 构成了灰色局势问题的模型; (2) 效果测度, 就是不同目标之间进行比较的量度; (3) 多目标综合决策

矩阵,当局势有多目标时,对各种目标需综合考虑,得出局势决策综合矩阵;(4)决策原则,就是选择最佳的局势,可以有两种方式,由事件选择最好的决策——行决策,由对策匹配最适宜的事件——列决策。

灰色决策的基本步骤包括:给出事件与对策;确定目标;给出不同目标的白化值;计算不同目标的效果测度,写出决策矩阵;计算多目标的综合效果测度,写出多目标的综合决策矩阵;按照行决策或列决策原则,选择局势最佳。根据行决策和列决策的结果,若在全局上难以协调,达不到整体效益最优的目的,这时需要建立有序化决策矩阵,即将矩阵中的决策元从左到右,从上到下按大小降幂排列,再进行综合评判;或者进行归一化处理,即对决策行和决策列进行归一化后,再选择行和列同时最优的局势。

2) 应用实例

灰色决策在城市规划中可用于交通网络规划、产业规划、环境规划等方面。

王强等(2002)^[157]介绍了利用灰色决策理论对部队营区建筑规划方案进行优选的方法,作者将5块地皮的建设作为5个事件,以7个方案作为7种对策,考虑了投资效益、功能合理、环境质量、建筑面积4个目标,按照各方案在不同地皮上的建筑面积产出量矩阵,得到不同目标下的效果测度矩阵,按照灰色决策准则得到最优决策。

陈启明等(2000)^[158]以11家城市污水处理厂作为事件、各厂的可废弃程度的分级作为对策,构成局势。采用灰色局势决策原理建立数学模型,以污水处理厂的各项现状指标作为目标,通过将不同量纲的目标值以效果测度统一计量,并根据综合效果测度确定最优局势,对11家污水处理厂的综合优劣性能进行量化并排序,作为污水处理厂去向决策的依据。

叶玉玲等(2005)^[159]结合都市圈城际轨道交通线网规划评价决策的特点,探讨了城际轨道交通线网评价指标体系和线网规划方案评价方法的优选,提出适用于都市圈城际轨道交通线网规划评价的“层次分析法—熵—灰色关联”组合评价模型。该模型将层次分析法、信息熵理论和灰色关联决策方法有机结合起来。模型中的决策方法采用灰色关联决策法,步骤包括:灰色关联模型的建立,评价指标矩阵量纲归一化处理,方案的灰色关联系数确定和计算灰色关联度,最后根据两者之间的关联程度评价方案的优劣。

2.1.7 地理系统分析相关软件

地理系统分析中,无论预测、模拟、优化,还是评价、决策,都需要经历复杂的建模和计算过程,面对大量的地理数据和复杂的系统,不借助有利工具难以达到目的。目前,已经有一些较为成熟的软件工具,虽然它们大多不是为了地理系统分析而开发,但是将其应用于地理系统分析中将大大提高分析工作的效率和分析的精确度。下面将按四类——统计分析软件、数值计算软件、最优化问题软件、建模工具及仿真平台来介绍地理系统分析中较为常用的软件及工具。

(1) 统计分析软件

1) SAS

SAS系统全称为Statistics Analysis System,意为统计分析系统。最早由北卡罗来纳大学的两位生物统计学研究生开发,并于1976年成立了SAS软件研究所,正式推出了SAS软

件。SAS 是用于决策支持的大型集成信息系统，但该软件系统最早的功能限于统计分析，至今，统计分析功能也仍是它的重要组成部分和核心功能。SAS 的最新版本为 9.1 版。经过多年的发展，SAS 已被全世界 120 多个国家和地区的近三万家机构所采用，直接用户则超过三百万人，遍及金融、医药卫生、生产、运输、通讯、政府和教育科研等领域。在数据处理和统计分析领域，SAS 系统被誉为国际上的标准软件系统，并在 1996-1997 年度被评选为建立数据库的首选产品。

SAS 系统是一个组合软件系统，它由多个功能模块组合而成，其基本部分是 BASE SAS 模块。BASE SAS 模块是 SAS 系统的核心，承担着主要的数据管理任务，并管理用户的使用环境、进行用户语言的处理、调用其他 SAS 模块和产品。SAS 系统具有灵活的功能扩展接口和强大的功能模块，在 BASE SAS 的基础上，还可以增加如下不同的模块而增加不同的功能：SAS/STAT（统计分析模块）、SAS/GRAPH（绘图模块）、SAS/QC（质量控制模块）、SAS/ETS（计量经济学和时间序列分析模块）、SAS/OR（运筹学模块）、SAS/IML（交互式矩阵程序设计语言模块）、SAS/FSP（快速数据处理的交互式菜单系统模块）等。

STAT 模块提供了一些可靠、完整的统计分析过程，主要有方差分析（包括一元、多元的单因素及多因素的方差分析），线性相关和回归分析（包括聚类分析、主成份分析、因子分析、典范相关分析）以及非参数测验等，共计 26 个过程。每个过程还提供多种不同算法和选项。STAT 模块是 SAS 系统的精华。

SAS 经过多年的发展，现已成为一套完整的计算机语言，其用户界面也充分体现了这一特点：它采用 MDI（多文档界面），用户在 PGM 窗口中输入程序，分析结果以文本的形式在 OUTPUT 窗口中输出。使用程序方式，用户可以完成所有需要做的工作，包括统计分析、预测、建模和模拟抽样等。由于 SAS 系统是从大型机上的系统发展而来，在设计上也是完全针对专业用户进行设计，因此其操作至今仍以编程为主，人机对话界面不太友好，并且在编程操作时需要用户最好对所使用的统计方法有较清楚的了解，非统计专业人员掌握起来较为困难。

2) SPSS

SPSS 是软件英文名称的首字母缩写，原意为 Statistical Package for the Social Sciences，即“社会科学统计软件包”。但是随着 SPSS 产品服务领域的扩大和服务深度的增加，SPSS 公司已于 2000 年正式将英文全称更改为 Statistical Product and Service Solutions，意为“统计产品与服务解决方案”，标志着 SPSS 的战略方向正在做出重大调整。

SPSS 是世界上最早的统计分析软件，由美国斯坦福大学的三位研究生于 20 世纪 60 年代末研制，1984 年 SPSS 总部首先推出了世界上第一个统计分析软件微机版本 SPSS/PC+，开创了 SPSS 微机系列产品的开发方向，极大地扩充了它的应用范围，并使其能很快地应用于自然科学和社会科学的各个领域，世界上许多有影响的报刊杂志纷纷就 SPSS 的自动统计绘图、数据的深入分析、使用方便、功能齐全等方面给予了高度的评价与称赞。迄今 SPSS 软件已有 30 余年的成长历史，是世界上应用最广泛的专业统计软件。目前的最新版本是 SPSS 14。

SPSS 是一个组合式软件包，它集数据整理、分析功能于一身。用户可以根据实际需要和计算机的功能选择模块，以降低对系统硬盘容量的要求。SPSS 的基本功能包括数据管理、统计分析、图表分析、输出管理等等。除了一般的统计分析功能（如平均值、方差、众数、频数、分位数等）之外，SPSS 提供的模块还可以进行多种分析，包括聚类分析、回归分析（线性、非线性、一元、多元）、因子分析、ARIMA、指数平滑预测、主成分分析、相关分

析、方差分析等。

与其他著名的统计分析软件如 SAS 等相比, SPSS 具有操作界面友好、结果输出精美、辅助教学功能强大等突出的优点,因此 SPSS 成为国际上公认的最受欢迎的统计分析软件之一。在众多用户对国际常用统计软件 SAS、BMDP、GLIM、GENSTAT、EPILOG、MiniTab 的总体印象分的统计中, SPSS 多项指标均获得最高分。SPSS 采用类似 EXCEL 表格的方式输入与管理数据,数据接口较为通用,能方便地从其他数据库中导入数据。

在城市规划和城市研究中,统计分析软件中的主成分分析、聚类分析、相关分析和回归预测等功能较为常用。应用的方面包括经济发展情况综合评价、土地利用变化驱动力分析、人口增长预测、城市用水量预测等等。统计分析软件能够快速给出分析、评价及预测的结果,并且可以根据分析结果绘制图形,使结果更为直观。

(2) 数值计算软件——MATLAB

MATLAB 是 MATRIX LABoratory 的缩写,直译为“矩阵实验室”,是 MathWorks 公司于 1984 年推出的(张志涌,徐彦琴,2001)^[160]。MATLAB 早期主要用于现代控制中复杂的矩阵、向量的各种运算。MathWorks 公司于 1992 年推出了具有划时代意义的 MATLAB4.0 版本,并推出了交互式模型输入与仿真系统 SIMULINK,它使得控制系统的仿真与 CAD 应用更加方便、快捷,用户可以方便地在计算机上建模和仿真实验。1997 年 MathWorks 推出的 MATLAB 5.0 版,允许了更多的数据结构,1999 年初推出的 MATLAB5.3 版在很多方面又进一步改进了 MATLAB 语言的功能。最新的版本是 MATLAB 7.0。

除了其强大的计算功能外, MATLAB 的语言也颇具特色, MATLAB 语言最突出的特点就是简洁,用更直观的,符合人们思维习惯的代码,代替了 C 和 FORTRAN 语言的冗长代码。MATLAB 给用户带来的是最直观,最简洁的程序开发环境。

功能强大的工具箱是 MATLAB 的另一特色。MATLAB 包含两个部分:核心部分和各种可选的工具箱。核心部分中有数百个内部函数;工具箱又分为两类:功能性工具箱和学科性工具箱。功能性工具箱主要用来扩充其符号计算功能、图示建模仿真功能、文字处理功能以及与硬件实时交互功能;而学科性工具箱是专业性比较强,如控制系统工具箱(control systems toolbox),系统识别工具箱(system identification toolbox),信号处理工具箱(signal processing toolbox),鲁棒控制工具箱(robust control toolbox),最优化工具箱(optimization toolbox)等,这些工具箱都是由该领域内学术水平较高的专家编写的,用户无需编写自己学科范围内的基础程序就可以直接进行该学科内的前沿研究。

由于 MATLAB 功能的不断扩展,现在的 MATLAB 已不仅仅局限于现代控制系统分析和综合应用,它已是一种包罗众多学科的功能强大的“技术计算语言(The Language of Technical Computing)”。MATLAB 集科学计算、图像处理、声音处理于一身,是一个高度的集成系统,有良好的用户界面,并有良好的帮助功能。MATLAB 不仅流行于控制界,在机械工程、生物工程、语音处理、图像处理、信号分析、计算机技术等各行各业中都有极广泛的应用。

MATLAB 中与系统分析相关的有人工神经网络工具箱、小波分析工具箱、统计工具箱

(包括各种统计函数,相关系数函数、系统聚类函数、多元线性回归函数、非线性回归函数、主成分分析函数等)、最优化工具箱(包括非线性最小化函数、多目标达到问题、非线性方程求解)等。

在城市规划和城市研究中, MATLAB 可用于解决回归预测、人工神经网络预测、相关分析、模糊综合评价、线性规划、灰色规划、动态规划等方面的问题,已有的应用实例包括交通系统规划、经济发展分析、城市给排水管网规划、土地资源评价、城市化水平分析及预测、生态城市评价、城市发展指标体系建立、环境评价与环境规划、城市需水量预测等。

此外, MATLAB 中的 Simulink 工具箱是一种常用的仿真平台,将在下文加以介绍。

(3) 最优化问题软件包——LINDO API/LINGO/What's Best !

LINDO API、LINGO、What's Best ! 是美国 LINDO 系统公司 (LINDO Systems Inc.) 开发的一套专门用于求解最优化问题的软件包。

LINDO API 用于求解线性规划和二次规划问题, LINGO 除了具有 LINDO 的全部功能外,还可以用于求解非线性规划问题,也可以用于一些线性和非线性方程(组)的求解,等等。LINGO 还是解决最优化问题的一种建模语言,包括许多常用的函数,可供使用者建立优化模型时调用,并提供与其他数据文件(如文本文件、Excel 电子表格文件、数据库文件等)的接口,易于方便地输入、求解和分析大规模最优化问题。LINDO 和 LINGO 的最大特色在于可以允许优化模型中的决策变量是整数(即整数规划),而且执行速度很快(谢金星,薛毅,2005)^[161]。LINDO 的最新版本是 6.1, LINGO 的最新版本是 10.0。

What's Best ! 是一个组件,主要处理由 Excel/Access 生成的数据文件的规划问题,可以在 Excel 表格中建立大型的线性、非线性和整数模型。What's Best ! 可有效地求解数据庞大的规划问题。What's Best ! 的线性、整数和非线性求解引擎是针对大型的商业使用的,其在 Excel 中运算的速度和容量都是一流的。What's Best ! 容易入门和上手,大部分的使用者在安装后几分钟内即可开始建模。What's Best ! 的最新版本是 8.0^[22]。

由于这些特点, LINDO 系统公司的线性、非线性和整数规划求解程序已经被全世界数千万的公司用来做最大化利润和最小化成本的分析。应用的范围包含生产线规划、运输、财务金融、投资分配、资本预算、混合排程、库存管理、资源配置等等。

在城市规划和城市研究中,上述最优化问题软件包能在规划模型建立后快速给出最优解,有助于提高规划的精确度和规划效率。应用的方面包括选址问题、水资源规划、土地利用结构优化、消费结构的分析与预测等等。

(4) 建模工具及仿真平台

1) SWARM

SWARM 是美国 SFI (Santa Fe Institute) 为复杂适应系统 (CAS) 建模而设计的软件平台。1995 年 SFI 发布了 SWARM 的 beta 版,此后,大约 30 个用户团体安装了 SWARM 并用它积极开展建模工作,并完成了一定的有水准的学术论文。开发 SWARM 的目的就是通过科学家和软件工程师的合作制造一个高效率的可信、可重用的软件实验仪器,它能给予

[22] <http://www.lindo.com/products/wb/wbm.html>

科学家们一个标准的软件工具集,从而提供了一个设备精良的软件实验室帮助人们集中精力于研究工作而非制造工具(丁浩,杨小平,1997)。^[162]

SWARM 是一组用 Objective-C 语言编写的类库,Objective-C 是一种面向对象的 C 语言,最初只能在 Unix 操作系统和 X Windows 界面下运行,1998 年 SWARM 推出了可以在 Windows 95/98/NT 上运行的版本,从而使 SWARM 越来越有利于非计算机专业人士使用。

SWARM 的建模思想就是让一系列独立的 Agent 通过独立事件进行交互,研究由多个体组成的复杂适应系统的行为。通过这些类库(包括许多可重用的类)来支持模拟实验的分析、显示和控制,即用户可以使用 SWARM 提供的类库构建模拟系统使系统中的主体和元素通过离散事件进行交互。由于 SWARM 没有对模型和模型要素之间的交互作任何约束,所以 SWARM 可以模拟任何物理系统、经济系统或社会系统。

在城市规划和城市研究中,已有使用 SWARM 对城市土地利用变化和城市演化进行模拟的报道。张金牡等提出了一种外部模型(描述宏观现象)与内部模型(描述微观决策)相结合的 Agent 模型,从人之间的相互作用来理解城市扩展现象的机理,讨论了构造外部模型和内部模型及其相结合的方法,在此基础上基于 Java 和 Swarm 平台开发了模拟系统 UrbanSwarm,并对北京市土地利用变化进行了动态模拟。薛领等采用基于 ABM 方法设计了一个城市演化的模拟模型,探索城市中居民、企业等大量微观主体非线性交互互动而导致的宏观空间结构的演化过程,针对城市空间演化的几种典型模式,利用在 SWARM 环境下实现的多主体城市模拟系统,通过微观层面的动态模拟进行分析和对比,为可持续的城市规划和管理提供支持。

2) Repast

Repast 是 Recursive Porous Agent Simulation Toolkit 的缩写,由芝加哥大学的社会科学计算研究中心开发研制,是一种在 Java 语言环境下用于设计基于 Agent 的模拟模型平台,其最初的设计目标是为社会仿真提供一个易于使用、易于扩展且功能强大的仿真工具包,但现在 Repast 已发展成一个通用的多 Agent 仿真平台(姜昌华等,2006)。^[163]

自从 2000 年 1 月 Repast 发布 1.0 版本以来,开发活动一直很活跃,目前的最新版本为 3.1。Repast 最初只有 JAVA 语言的实现版本,从版本 3.0 开始,还提供了 C#和 Python 语言的实现版本,进一步扩大 Repast 用户的范围。

Repast 从 SWARM 借鉴了很多设计经验,二者的图形用户界面也很相似,因此被认为是类 SWARM 仿真工具包。Robert Tobias 与 Carole Hofmann 对包括 Repast、SWARM 在内的 4 种多 Agent 仿真工具进行了评价比较,结果表明 Repast 在几乎所有的评分项目上,如文档、建模仿真能力、易用性等都位居第一,其综合得分也最高^[23]。Repast 不仅为多 Agent 仿真提供了大量的基础性功能,还为仿真模型的实现提供了一个编程框架。

与 SWARM 相比,Repast 的优势在于:(1)功能更强大:二者的功能都很强大,但 Repast 在网络结构生成、Agent 的空间关系管理方面更为出色。这使 Repast 更适于复杂社会网络、商业网点选择等网状结构系统的仿真。在仿真数据的可视化表现上,Repast 也更具优势,其生成的各种图表清晰、美观。(2)易用性更好:借助于 Java 语言的跨平台特性,Repast 在多个操作系统上的安装、使用都很容易。(3)语言基础:Repast 以 Java 作为其实现语言及仿真模型的编程语言,因此仿真模型的实现人员有丰富的编程资源可供参考。而且 Java 语言具有功能强大的支持类库,为 Repast 进一步发展提供了良好的基础。

[23] <http://www.nd.edu/~swarm03/Program/Abstracts/HoweSwarm2003.pdf>

在城市规划和城市研究中,李新延等(2005)从城市用地演变机制出发,研究建模思路和方法,利用 Repast 软件和 GIS 空间数据库,初步构造了一个模拟城市用地演变的模型。模型由三个主要模块构成:Agent 模块、Main 模块以及 GIS 模块,模型主要实现了两部分功能,一是空间数据的输入、输出及简单的空间数据管理,二是构造了主体,模拟了主体的动态决策过程。赵凛等(2006)^[164]在城市交通系统研究中提出了采用基于 Agent 的仿真建模方法,使用 Repast 平台对复杂适应系统实现快速建模,并结合城市交通系统中提供交通信息服务的实例,阐述了使用 Repast 仿真平台对城市交通系统进行建模的过程。

3) StarLogo

StarLogo 是由麻省理工学院(MIT)多媒体实验室开发的一个免费的可编程软件平台,用于基于主体(Agent)的建模方法。StarLogo 以软件的方式描述了主体以及主体与环境、主体与主体之间的交互过程,从而可以研究由多个主体组成的复杂适应系统的运行机制,如生物免疫系统、交通运输以及市场经济等。StarLogo 是简单、直观,构思巧妙的建模仿真工具,从一种新的视角帮助人们分析和理解复杂适应系统(游文霞,王先甲,2006)^[165]

StarLogo 的最初版本只适用于 Apple 公司的 Mac 机,2000 年 2 月推出了第一个基于 Java 开发的 StarLogo 1.0 版本,该版本突破了早期的 StarLogo 只能在 Mac 机上运行的局限,可以在 Unix, Windows PC 等不同的计算机上运行,目前 StarLogo 的最新版本是 2.0 版本。它实际上是一组用 Java 编写的类库,采用了面向对象的编程方法,用户可以利用这些可重用的类库来模拟复杂系统。与此同时,StarLogo 还为用户提供了良好的操作界面,如图表、按钮和窗口等,用户可以通过界面来进行仿真分析、控制和结果的显示。在编程语言上,StarLogo 提供的是一种类似于 Logo 的并行语言,可以通过向仿真主体发命令来生成图片和动画,形象直观,容易理解。

StarLogo 平台定义了三种“角色”:海龟(Turtles)、点(Patches)和观察者(Observers)。用户通过建立这些角色来构建复杂系统。海龟是 StarLogo 世界里的主要活动对象,每一个海龟就是一个独立的行为主体 Agent,通过对海龟制定相应的行为规则,可以用它来代表现实世界中的任何一个对象;点是海龟存在的环境,所有点构成的一块大背景(Canavs),就是海龟活动的范围;观察者相当于一个监控员,它以第三者的眼光来“俯视”StarLogo 世界中的海龟和点,观察者能够创建新的海龟,并能监控现有的海龟和点的行为。StarLogo 通过对海龟和点进行编程,使得海龟和海龟所处的环境都具有了自己的变化方式。海龟和点之间的交互作用体现了主体与环境的关系,海龟与海龟之间的相互影响则体现了主体与主体之间的关系,在程序运行时,所有的海龟和点都以系统规定的时间步长,按照各自的行动规则并行运转,系统呈现整体行为。

StarLogo 的图形化表现方式是它的一大优点。这种简单直观的图形界面使得 StarLogo 能够吸引非专业人士来用它对自己所关心的问题建模。

在城市规划和城市研究中,有报道将 StarLogo 可用于交通流的仿真(李伟等,2005)^[166],研究者基于 Agent 对多车道交通流进行了模拟,并与实际的道路交通流特点进行了比较。在仿真中,采用了面向 Agent 的仿真软件 StarLogo。从微观上看,所描述的车辆模型能够完成加速和换道过程;从宏观上看,仿真中交通流特点与实际情况是一致的。

4) MATLAB/Simulink

Simulink 是 MATLAB 的扩展,是实现动态系统建模和仿真的一个软件包。Simulink 与用户的接口是基于 Windows 的模型化图形输入,所谓模型化图形输入是指 Simulink 提供了

一些按功能分类的基本的系统模块,用户只需要知道这些模块的输入输出及模块的功能,而不必考察模块内部是如何实现的,通过对这些基本模块的调用,再将它们连接起来就可以构成所需要的系统模型,用户无须书写大量的程序,只要通过简单直观的鼠标操作,就可以构造出复杂的仿真模型,使用户可以把更多精力投入到系统模型的构建而非编程上。Simulink 的最新版本是 Simulink 5.0 (王正林,刘明,2006)。^[167]

Simulink 的特点包括:(1)有完整的功能模块库,可用于建立单入单出,多入多出,线性/非线性,离散/连续/混杂及多速率系统,适用面广;(2)支持矩阵数据类型和线性代数运算(3)支持 M 语言和 C 语言方式的功能扩展(3)与 MATLAB 紧密结合,可以利用 MATLAB 的数学图形和编程功能,在 Simulink 内完成诸如数据分析,过程自动化,优化参数等工作,工具箱提供的高级的设计和 analysis 能力可以通过 Simulink 的封装手段在仿真过程中执行;(4)交互仿真, Simulink 框图提供了交互性较强的线性/非线性仿真环境。

在城市规划和城市研究中, Simulink 的应用已有报道。 Simulink 能建立线性或非线性模型,能反映模型在发展中设定的各变量的变化情况,研究范围大到整个城市的动力学研究^[168],小至对城市交通系统和河流水质模拟的仿真(樊立萍等,2005b)^[169]都有应用的实例。

5) Vensim

Vensim 是由美国 Ventana System 公司开发的系统动力学仿真软件,模拟和动态系统的有机结合,有利于解决复杂系统的动态平衡问题。 Vensim 采用工具箱的方法来处理模型与数据,图形化的界面可以使用户从程序中解放出来,使用户可以方便地对动力学系统进行概念化、分析、仿真和优化等研究工作。 DYNAMO 语言 (DYNAMO 是系统动力学世界模型的建模语言,其特点是语法简单、容易掌握。一个用 DYNAMO 语言编写的程序,也就是一个针对某一问题的系统动力学模型,它反映了由于系统状态变量之间的反馈作用,使系统的状态连续地变化^[24])中所有的方程、命令等均可以通过 Vensim 的相应工具栏完成,操作非常方便。其最新版本为 6.5a。

另外 Vensim PLE (个人学习版)和 Vensim PLE plus 是 Vensim 的简化版,主要用于简单的动态系统,提供了一种简单、富有弹性的从常规的循环或储存过程和流程图建立模型的方法。

在城市规划和城市研究中,已有利用 Vensim 进行水资源研究、交通对城市中心发展的研究和利用 Vensim 建立中国可持续发展系统动力学仿真模型^[170]的报道。范英英等^[171]在研究北京市水资源供需现状的基础上,采用系统动力学方法构建了北京市水资源动态预测模型,对人口、产业结构和政策 3 个约束水资源供需平衡的核心因子进行分析,并将它们的变化趋势作为参数输入北京市水资源系统动力学模型中,利用 Vensim 进行动态仿真模拟,得到未来北京市水资源供需平衡变化的两种典型情景。张林峰等^[172]分析城市中心基于自组织理论的形成机制,采用系统动力学的研究方法,建立城市中心内部相互作用的系统动力学模型和多中心之间相互竞争的系统动力学模型,利用 Vensim 软件进行实例仿真模拟,研究了交通对城市中心发展的影响。

2.2 地理信息系统

自1963年加拿大测量学家R. F. Tomlinson提出并建立第一个GIS (Geographic Information

[24] <http://l-eme.gdcc.edu.cn/ztzs/fzxt/6-2.htm>

System, 地理信息系统) 以来, 随着信息、测绘、地理学等相关科学的迅速发展, GIS在全球得到不断发展, 日益受到各个国家和地区的重视 (马勇等, 2003) [173]。

GIS是以地理空间数据库为基础, 在计算机软硬件的支持下, 对空间相关数据进行采集、管理、操作、分析、模拟和显示, 并采用地理模型分析方法, 对信息管理和辅助决策具有重要意义。总体上, GIS是集计算机科学、地理学、测绘遥感学、城市科学、信息科学为一体的技术。

GIS一般包括以下5个主要部分, 如图16所示: (1) 系统硬件: 包括计算机主机, 数据输入、存储和输出设备; (2) 系统软件: 包括计算机系统软件、GIS软件 (如国外MapInfo公司的Mapinfo、GenaWare公司的GenaMap、ESRI公司的ArcGIS、TYDAC公司的SPANS等, 国内中科院地理所的SuperMap)、其他支撑软件和应用分析程序等; (3) 地理空间数据; (4) 应用人员; (5) 分析模型。



图 16 GIS 构成图

GIS的功能主要有 (王丹, 2004) [174]: (1) 数据采集: 主要用于获取数据, 包括已有的数字化数据、人工编码、数字化地图等, 并保证数据在内容上、空间上的完整性和一致性; (2) 数据整理: 包括数据核查、纠错、格式化和转换等; (3) 数据存储: 将不同来源、不同属性的数据以恰当的形式存储于空间数据库中, 以方便查询分析; (4) 数据查询: 以特定的请求再现数据信息; (5) 空间分析: 进行数据的地理操作和转换及统计分析, 如缓冲区分析、空间插值分析、叠置分析、领域分析、网络分析等; (6) 可视化显示与输出: 通过屏幕、打印、拷贝等形式来展示GIS所产生地图、图像、表格等多种形式的结果。

自20世纪90年代以来, GIS技术得以迅速发展, 并被广泛应用到包括资源管理、自动制图、设施管理、城市和区域的规划、人口和商业管理、交通运输、石油和天然气、教育、军事等九大类别的一百多个领域。特别是在一些发达国家, GIS的应用遍及环境保护、资源保护、灾害预测、投资评价、城市规划建设、政府管理等众多领域。近年来, 我国经济建设的迅速发展加速了GIS应用的进程, GIS在城市规划管理、交通运输、测绘、环保、农业、制图等领域都发挥了重要的作用, 取得了良好的经济效益和社会效益 (曹瑜, 胡光道, 1999) [175]。

2.2.1 GIS 理论

(1) GIS 数据结构

GIS的操作对象是空间数据, 因而空间数据是GIS的核心。空间数据是指以地球表面空间位置为参照的自然、社会和经济等方面的数据, 可以是图形、图像、文字、表格和数字等。它可以分为两类: 矢量数据和栅格数据, 二者最根本的区别在于表达空间概念的方式 (黄杏

元等, 2001):^[176]

矢量数据结构利用几何学中的点线面及其组合体来表示地理实体空间分布,这种方式能最好的逼近地理实体的空间分布特征,数据精度高,数据存储冗余度低。矢量数据结构分为简单数据结构,拓扑数据结构和曲面数据结构等几种主要类型。

栅格数据结构将空间分割成有规则的网格,在各网格上给出相应的属性来表示地理实体。栅格数据结构表示的是二维表面上地理要素的离散化数值,每个网格对应一种属性,网格通常是正方形,有时也采用矩形、等边三角形和六边形。用栅格数据表示实体时,与原来实体特征相比信息将有所丢失。

对比两种数据结构,矢量数据结构便于面向对象的数据表示,其数据结构紧凑,有利于网络分析,图形精度高,但是数据结构复杂,对硬件与软件技术要求比较高;而栅格数据的结构简单,进行空间分析和地理现象的模拟比较容易,并有利于与遥感数据进行匹配应用,但栅格数据图形数据量大、投影转换比较困难,而且图像质量比较低,对象识别的效果不如矢量数据。

(2) GIS 数据的获取、输入与处理

GIS 中空间数据的来源和类型繁多,主要有以下几种:地理数据(几何数据),来源于各种地图和专题图;影像数据,来源于遥感;地形数据,来自传统地形图;属性数据(非几何数据),来自各类调查报告、实测数据、文献资料等;元数据,来源于调查、推理、分析和总结得到的有关数据的数据(聂庆华, 2006)^[177]

地理数据的采集(输入)需要对已有的地图进行数字化,主要包括地图跟踪数字化和地图扫描数字化;属性数据包括定性和定量数据,定性数据一般用来描述要素的分类或进行标明,定量数据用于说明要素的特征。

空间数据进入数据库后还需要进行数据处理,即对数据进行筛选、排序、转换和纠正,以达到为空间分析与空间决策服务的目的。空间数据处理包括预处理和数据处理两个步骤。在预处理过程中,主要是对数据的误差或错误进行检查与纠正,数据处理包括图形坐标变换、图幅拼接、图像纠正、数据结构转换和拓扑生成等。

(3) 空间分析

空间分析是 GIS 的重要功能之一,是基于地理对象的位置和形态的空间数据的分析技术,其目的在于对空间数据进行深加工或分析,获取新的信息,通过分析算法,从空间数据中获取有关地理对象的空间位置、空间分布、空间形态、空间形成、空间演变等信息。空间分析是 GIS 的主要特征。空间分析能力(特别是对空间隐含信息的提取和传输能力)是 GIS 区别与一般信息系统的主要方面,也是评价一个地理信息系统的主要指标。空间分析运用的手段包括各种几何的逻辑运算、数理统计分析,代数运算等数学手段。

空间分析的主要步骤如下:(1)陈述问题,明确空间分析的目的;(2)明确为达到目的所需要的空间数据;(3)讨论和分析空间数据集;(4)执行空间分析,应用 GIS 空间分析方法实现分析目标;(5)检验分析结果;(6)表达空间分析结果。

空间分析中主要的方法可以分为两类:(1)产生式分析:包括数字地面模型分析、空间叠加分析、缓冲区分析、空间网络分析、空间统计分析等;(2)咨询式分析:包括空间集合分析、空间数据查询等。

产生式分析中,数字地面模型(Digital Earth Model, DEM)是定义于二维区域上描述

地表形态多种信息空间分布的有序数列。它是各种地学分析、工程设计和辅助决策的重要基础性数据,数字地面模型分析内容包括地形因子的自动提取、地表形态的自动分类和地学剖面的绘制与分析;空间叠加分析是在统一空间参照系统条件下,每次将同一地区两个地理对象的图层进行叠合,以产生空间区域的多重属性特征,或建立地理对象之间的空间对应关系;空间缓冲区分析是根据分析对象的点线面实体,自动建立它们周围一定距离的带状区,用以识别这些实体对邻近对象的辐射范围或影响度;空间网络分析用于分析由点线的二元关系构成的系统,分析某种物质在空间上的运动,经常用于分析城市道路系统、地形管网系统、流域水网等;空间统计分析主要用于数据分类,根据具体的分类算法,从数据中获取所需的信息。

咨询式分析中,空间集合分析是在空间叠加分析的基础上进行的逻辑选择过程,通常是按照两个逻辑子集给定的条件进行逻辑交运算、逻辑并运算、逻辑差运算等,如土地利用类型、土壤类型、河流水系分布等数据分别在不同的三个数据层上,在GIS对其进行叠置后,根据指定条件进行逻辑运算,提取出需要的数据;空间数据查询是按照给定的条件,从空间数据库中检索满足条件的数据,用以回答用户的问题。

(4) GIS 系统设计

GIS系统已有比较成熟的设计模式,从设计流程上,大致可以分为四个主要阶段:系统分析、系统设计、系统实施、系统运行和维护,这种设计方法被称为生命周期设计法。系统分析的任务是对系统用户进行需求调查和可行性分析,最后提出系统的目标和结构方案。系统的设计分为总体设计和详细设计,总体设计的内容主要包括用户需求、系统目标、总体结构、系统配置、数据库设计、系统功能设计等;详细设计的内容包括子系统设计、数据库详细设计、功能模块设计和用户界面设计等。系统实施要按照详细设计方案确定的目标和方法分阶段、分步骤完成系统开发,其内容包括系统硬件和软件的引进和调试、系统数据库的建立、应用管理系统的开发、系统测试和联调以及系统验收和鉴定。系统运行和维护是为保证系统正常工作而采取的一切措施和实际步骤。生命周期设计法的特点是严格分阶段进行,便于开发工作的组织(张正栋,2005)。^[178]

生命周期法的问题在于开发过程比较长,用户反馈比较迟,另一种开发思路——原型化设计法应运而生。该方法是根据用户提出的要求,由用户和开发人员设计出初步方案,在较短时间内开发出一个能满足用户基本要求的初步原型,经用户一定时间的试用后,根据用户意见进行修改或扩充,产生新的原型,如此反复迭代,形成一个比较完善的GIS系统。该方法能使用户更快地看到系统的实际效果,使开发人员及时获得反馈,将系统开发的风险降到最低。

一般认为,用户对新系统的功能要求十分明确时,系统设计可直接采用生命周期法,以利于开发经费与时间的控制。

(5) GIS 输出

GIS的输出内容主要包括空间数据和属性数据两部分,从载体形式角度,输出内容可分为常规静态地图和动态的数字地图。

常规地图主要以线划、颜色、符号和注记等表示地形地物。根据内容,常规地图可分为全要素地形图、各类专题图、遥感影像地图以及统计图表、数据报表等。其中各类突出表示一种或几种自然或社会经济现象专题图已经成为GIS的主要输出产品。

数字地图是一种崭新的地图形式,其核心是以数字来记录和存储地图。与常规地图相比,

有以下优点：存储介质是计算机磁盘，其信息存储量大、体积小；可以在计算机软件支持下在高分辨率的显示器实现地图显示；便于与 GIS 和 RS 结合，实现地图的快速更新。

GIS 中为了输出各种图件，硬件上也必须配备相应的输出装置，主要有：显示器，用于屏幕输出；矢量绘图仪，用于矢量绘图输出；打印机、胶片拷贝机，用于栅格绘图输出以及其他各种地图的输出。

2.2.2 GIS 在城市规划中的应用

城市规划可以分为规划管理和规划编制，前者是日常性的工作，后者则往往包含非常规性、战略性的内容。GIS 技术几乎可以应用到城市设计与管理的每一环节中，对提高规划设计的质量、规划管理的效率都具有明显的作用。GIS 在城市规划设计与管理中可以有力推动管理的严密性、决策的科学性、规划的合理性。GIS 在城市规划设计中的应用将有助于信息载体数字化、业务规范化、数据动态化、管理网络化；GIS 在城市规划中的应用将不会仅仅局限在辅助管理上，在对规划数据进行综合分析、深层次的数据挖掘的基础上，GIS 还可以对整个城市的发展趋势做出预测和模拟，为决策者提供科学的依据。

在规划管理中，传统模式下，规划部门或者是利用文件的方式，或者采用目前流行的数据库来管理规划数据。前者的缺陷是规划数据的空间实体与属性信息脱节，数据更新、维护、查询比较困难；而后者的缺陷是不具备根据数据库信息定义相应的实体的能力；两者共同的缺陷是不具备空间查询、分析能力。而 GIS 强大的空间数据管理能力可以解决了上述问题，使其在规划数据管理上有着广阔的应用前景。青岛市某规划部门利用控制性详细规划数据以及规划路网信息建立了控制性详细规划数据库，基本实现了对控规数据的现代化管理，以有效的数据组织形式进行数据库管理、更新、维护、进行快速查询检索，可以多种方式输出设计管理所需要的信息，为规划设计、规划管理提供了强有力的帮助（乔相飞等，2005）^[179]。

在规划编制中，从城市规划的内容上看，GIS 技术在城市规划相关的土地开发管理、交通、住房、市政建设、环境保护等方面都有广泛的应用，典型的例子包括公共服务设施选址规划，土地适宜性评价，交通领域的网络分析、路径选择，公共服务，市政设施的容量配置、选址，环境规划与管理等。从城市规划的各个步骤上看，GIS 几乎可以应用到规划的各个环节中（叶嘉安等，2006），包括基础资料调查、现状分析、建模预测、方案制订、方案优化选择、规划实施、评价监测与反馈等。

通过在规划中引入 GIS 技术，可以在基础资料调查方面可以节省大量时间，利用 GIS 强大的空间数据储存、处理能力，可以对土地现状进行分析，将土地开发状况和土地适宜条件相叠合，找出土地开发与环境不相适应的位置；利用 GIS 的建模和预测功能能够模拟规划远景方案，并通过其可视化技术以专题图形式显示，便于规划人员制定多套方案，并通过优化模型、多准则决策分析与 GIS 的结合进行方案比选与制定；在规划实施过程中，GIS 可对开发项目的环境影响进行评价，对如何减轻环境影响提出政策上的建议；最后，GIS 与遥感技术的结合可以实现对土地利用和环境变化的监测，从而实现对规划的反馈和评价。

2.2.3 GIS 研究前沿

在未来的几十年内，GIS 将向着数据标准化（Interoperable GIS）、数据多维化（3D&4D GIS）、组件化（COMGIS）和网络化（WebGIS）等方向发展（陈绍杰，2002）^[180]。

(1) Interoperable GIS

目前的 GIS 大多是基于具体的、相互独立和封闭的平台开发的,它们采用不同的数据格式,对地理数据的组织也有很大的差异。这使得在不同软件上开发的系统之间的数据交换存在较大的困难,采用数据转换标准也只能部分地解决问题。另外,不同的应用部门对地理现象有不同的理解。对地理信息有不同的数据定义,这就阻碍了应用系统之间的数据共享,带来了领域间共同协作时信息共享和交流的障碍,限制了 GIS 技术的发展。

1996 年,美国成立了开放地理信息系统联合会,旨在利用其推出的开放地理数据互操作规范(Open GIS, OGIS) 给出一个分布式访问地理数据和获得地理数据处理能力的框架,各软件开发商可以通过实现和使用规范所描述的公共接口模板进行互操作。OGIS 规范是互操作 GIS 研究中的重大进展,它在传统 GIS 软件和未来的高带宽网络环境下的异构地学处理环境之间架起一座桥梁。目前,OGIS 规范初具规模,很多 GIS 开发商也先后声明支持该规范。国内的一些具有战略眼光的 GIS 软件商也在密切关注着 OGIS 规范,并已着手开发遵循该规范的基础性 GIS 软件^[25]。

(2) 3D & 4D GIS

GIS 处理的空间数据,从本质上说都是三维的。但是,目前 GIS 的主要应用还停留在处理地球表面的数据上,大多数 GIS 平台都支持点、线、面三类空间物体,不能很好地支持曲面(体),这种试图用二维系统来描述三维空间的方法,必然存在不能精确地反映、分析和显示不够生动和形象等问题。三维 GIS 目前的研究重点集中在三维数据结构的设计、优化与实现,以及可视化技术的运用、三维系统的功能和模块设计等方面(郝力,2002)。^[181]

另一方面,GIS 所描述的地理对象往往具有时间属性,即时态。随着时间的推移,地理对象的特征会发生变化,而这种变化可能是很大的,但目前大多数 GIS 都不能很好地支持地理对象和组合事件时间维的处理。因此,如何设计并运用四维 GIS 来描述、处理地理对象的时态特征也是 GIS 的一个重要研究领域。

(3) COMGIS

COMGIS(Component GIS)的基本思想是把 GIS 的功能模块划分为多个控件,每个控件完成不同的功能。各个 GIS 控件之间,以及 GIS 控件与其他非 GIS 控件之间,可以方便地通过可视化的软件开发工具集成起来,形成最终的 GIS 应用。控件如同一堆各式各样的积木,分别实现不同的功能(包括 GIS 和非 GIS 功能),根据需要把实现各种功能的“积木”搭建起来,就构成 GIS 基础平台和应用系统(邬伦等,2001)^[182]。

组件软件的可编程和可重用的特点在为系统开发商提供有效的系统维护方法的同时,也为 GIS 最终用户提供了方便的二次开发手段。因此,COMGIS 在很大程度上推动了 GIS 软件的系统集成化和应用大众化,同时也更好地适应了网络技术的发展,是一种 WebGIS 的解决方案。

(4) WebGIS

飞速发展的 Internet/Intranet 已经成为 GIS 新的系统平台,利用 Internet 技术在 web 上发布空间数据供用户浏览和使用是 GIS 发展的必然趋势。WebGIS 使 Internet 用户从任一节点均可浏览 WebGIS 站点中的空间数据、制作专题图、进行各种空间检索和空间分析。WebGIS 要求支持 Internet/Intranet 标准,具有分布式应用体系结构,它可以看作是由多主机、多数据库与多台终端通过 Internet/Intranet 组成的网络。WebGIS 系统可以分为四个部

[25] <http://www.gissky.com/Gis/ShowArticle.asp?SID=11&ID=110>

分：WebGIS 浏览器、WebGIS 信息代理、WebGIS 服务器和 WebGIS 编辑器。（这种情况下应该用、而不是，）

目前，国外的 ESRI、MapInfo、Intergraph 和 AutoDesk 等公司已经提供了各自的 WebGIS 解决方案，WebGIS 是 GIS 走向社会化和大众化的有效途径，也是 GIS 发展的必由之路。

2.3 遥感技术

遥感（Remote Sensing，RS）最早出现在美国一项军事科研计划中，简单理解就是“遥远感知”，泛指各种非直接接触的，远距离探测目标的技术。

通常人们所认为的遥感的概念是指：从远距离、高空以至外层空间的平台（Platform）上，利用可见光、红外、微波等传感器，通过摄影、扫描等各种方式，接收来自地球表层各类地物的电磁波信息，并对这些信息进行加工处理，从而识别地物的性质和运动状态的综合技术（李建新，2006）^[183]。遥感技术，就是利用了物体的电磁波特征，即一切物体，由于环境条件的不同而具有反射或辐射不同波长电磁波的特性。因此遥感必须具备三个要素：接受、记录远方地物电磁波辐射信号的专用设备；将电磁波信号形成图像；通过图像的处理与分析感知远方事物。

遥感远距离感测地物环境反射或辐射电磁波的仪器，叫做传感器，如照相机、扫描仪等。传感器可分为被动式传感器（passive sensor）是一种收集太阳光的反射及目标物辐射的电磁波的遥感方式，而主动式传感器（active sensor）是向目标物发射电磁波，然后收集目标物反射回来的电磁波的遥感方式。装载传感器的运载工具，叫做遥感平台，如飞机、飞艇和人造卫星等。

空间分辨率（Spatial resolution）是遥感中的重要概念，是表示能够以何种细微的程度观测目标的度量指标。在光学领域，常把可以观测到的观测目标上的两点的最小间隔叫做分辨极限，其倒数定义为分辨率（resolution），它表示景物信息的详细程度。随着光学传感器硬件技术的发展，目前军用的遥感卫星分辨率高达 0.2m，投入商业应用的卫星分辨率也可以达到 1m，这种高分辨率遥感卫星的出现，为遥感提供了更为广阔的应用空间，如城市规划、汽车导航、房地产销售、电信线路选址等。

遥感信息从成像到遥感产品输出大致要经过下面几个过程，如图 17 所示：遥感数据获取（地物空间信息主要由搭载在遥感平台上的传感器来获取，传感器接收到地物目标的电磁波信息，记录在存储介质上）、数据处理、图像处理、信息提取/融合/集成、产品输出。

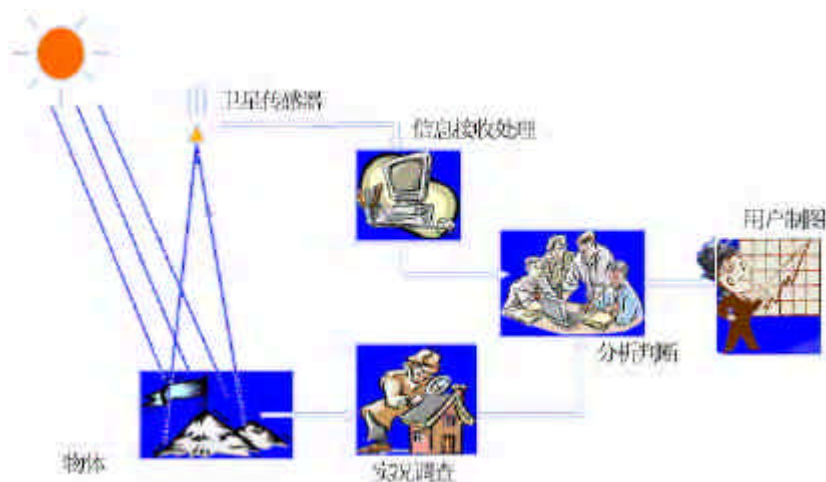


图 17 遥感信息从成像到遥感产品输出的过程图

经过几十年的发展，目前遥感技术已广泛应用于城市规划、资源环境、水文、气象、地质科学和地理等领域，成为一门实用的、先进的空间探测技术。在未来的十年中，预计遥感技术将步入一个能快速、及时提供多种对地观测数据的新阶段，其应用领域随空间技术的发展，尤其是地理信息系统和全球定位系统技术的发展及相互渗透，将会越来越广泛。

2.3.1 遥感数字图像处理技术

能够从宏观上观测地球表面的事物是遥感的特征之一，所以通过遥感平台上的传感器采集的遥感数据几乎都是作为图像数据处理的。遥感中所进行的数据处理绝大部分都属于图像处理的范畴，甚至可以看成是数字图像处理。因此，对遥感数据的处理大多是在数字图像处理系统中进行的（戴昌达等，2004；朱述龙等，2006）。^{[184][185]}

遥感数字图像处理流程如图 18 所示：

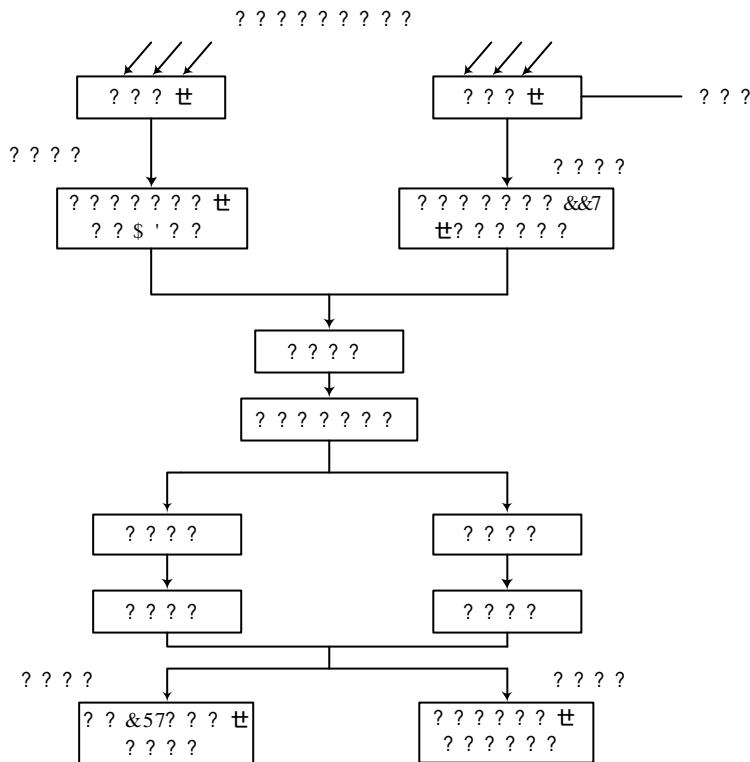


图 18 遥感数字图像处理流程图

遥感数字图像处理系统包括硬件、外围设备和软件。其中硬件主要指显示设备，包括专用处理机型和通用计算机型；外围设备包括把模拟图像变换为数字图像的输入设备，把数字图像输出到纸或胶片上的图像输出设备，能记录大量图像数据的图像数据存贮设备等；图形处理软件的功能包括数据输入/输出（磁带数据的读取等），影像显示、操作（图像显示、坐标测量、色调变更等），校正处理（几何校正、图像增强等），分析处理（各种变换处理、分类处理等）、图像输出。

(1) 遥感图像的储存方式

由于遥感空间分辨率的不断提高，遥感图像的数据量日益增多，为了管理和使用方便这些“海量”数据通常采用串符型记录方式，存放在大容量的外部存储器中，这种串符型数据的具体排列格式有 BSQ、BIP、BIL 三种。BSQ (Band Sequential) 格式，是按图像的波段顺序分为独立文件纪录存放，每个波段的文件则以像元的行、列序号排列，仅需对一个波段数据进行处理时这种格式最方便；BIP (Band Interleaved by Pixel) 格式，使按波段顺序相间排列各列像元数据，这种格式可以一次调出各波段的同一像元；BIL (Band Interleaved by Line) 格式，按波段顺序相间排列各行像元数据，具有以上两种格式的这种特性，比较节省存储空间。

(2) 遥感图像的校正

地面站经系统处理提供给用户的遥感卫星图像，存在不少非系统性误差，因此需要进行校正处理，主要包括几何校正和辐射校正。地面站完成粗校正，用户拿到的常规产品是经过地面站校正过的，但是用户仍需进行精校正以满足后续分析要求。几何精校正利用控制点

改正原始图像的几何变形，产生一幅符合某种地图投影或图件表达要求的新图像，包括三个步骤：选取控制点、依据控制点对数据进行空间变换、对图像进行重新采样。辐射校正是在消除传感器系统产生的辐射畸变的基础上，校正由大气散射和吸收引起的辐射误差以及太阳高度角和地形等光照条件差异引起的辐射误差。

(3) 遥感图像的增强

遥感图像的增强处理在于改进图形显示、提高遥感图像的视觉效果和可解译性，使应用者易于获得感兴趣的有用信息。从数学意义上，图像增强就是根据图像的灰度、颜色、纹理和形状，结合显示介质和人的视觉系统特点，进行从原始图像到增强图像的变换。根据处理空间的不同，遥感图像增强可以分为基于图像变换的频域方法和基于图像空间的空域方法两类。图像变换的频域方法常用有傅立叶变换、Hough 变换、K-L 变换和 K-T 变换等；空域增强处理方法主要有灰度增强、边缘增强和彩色增强等。

(4) 遥感图像的数据融合

单源遥感技术只能反映目标的某一个或几个方面的特性，为了更准确地识别目标，必须从多源数据中提取比单源数据更丰富、可靠和有用的信息。把各具特色的多源遥感数据互相结合，进行综合分析和对比才能充分发挥遥感技术的作用，数据融合技术应运而生，通过数据融合，一方面可以去除无用信息，一方面又能从海量多源数据中将有用信息集中融合，便于各种信息特征互补。目前采用的数据融合方法大多是基于像元层面上的融合，首先需要实现不同图像像元间的高精度几何配准，然后才能实现像元波谱信息融合。在高精度几何配准中，通常采用无冗余三角网子域图像配准法；像元波谱信息融合的常用方法有代数运算融合、高频调制融合和小波变换融合等。

(5) 遥感图像分类

不同地物的特征和性质不同，在图像上的表现不一，因而可根据它们的变化和差异来识别和区分监测不同的地物，这就需要对不同时间序列的图像进行地物分类。分类是以区别图像中所含的多个目标物为目的，对每个像元或比较匀质的像元组给出对应其特征的名称，把这些名称为分类类别。在分类中所注重的是各像元的灰度及纹理等特征。

分类大致按以下顺序进行：(1) 考虑应用目的及图像数据的特性确定分类类别。(2) 找出这些具有特征的类别的特征量。(3) 为了找出分类的基准，需要提取出对应于分类别的训练数据。(4) 为了测定总体特征，可采用对图像中代表给定类别的部分进行采样。(5) 使用设定的分类基准对各像元进行分类，包括对每个像元进行分类和对每个预先分割的匀质区域进行分类。(6) 把已知的训练数据及分类类别与分类结果进行比较，确认分类的精度及可靠性。

遥感图像分类方法主要有(杨长保,丁继红,2006)^[186]：根据基于统计分析分类方法、人工神经网络分类、基于多源数据融合的分类、基于专家知识和地学知识的图像分类等。遥感图像的分类算法很多，但没有一种算法是最普遍和最佳的，这主要是由遥感图像数据的复杂性决定的。因此，需要针对具体遥感数据不断对原有分类方法进行改进和组合，以结合实际情况来达到更好的效果。

(6) 遥感数据的不确定性和尺度问题

遥感信息从成像到遥感产品输出大致要经过下面几个过程：遥感数据获取、数据处理、图像处理、信息提取/融合/集成、产品输出在这一过程中，由于操作和环境等各种影响也引入了各种误差：数据获取误差、数据处理误差、数据转换误差、分类和信息提取误差、误差评价产生的不确定性，这些误差最终将会对遥感产品产生不确定性，而且遥感信息的不确定性是可传递的（林宗坚，张永红，2006）^[187]。

尺度（scale）是一个广泛使用的术语，无论是遥感图像的分辨率问题还是地图的比例尺问题，都可称为尺度问题。尺度问题是对从天空观测地球的首要挑战，地表信息在时间和空间上的分辨率都有极大的跨度，即存在着多级尺度（王红等，2004）^[188]。由于对遥感观测的尺度效应了解不够，以至于对一些基本物理定理、定律、概念在遥感像元尺度上的适用性不清，对在一个遥感像元尺度上建立的模型在另一像元尺度的适用性不清，这使得对遥感观测的面状信息缺乏理解，难以进行面状信息与传统点信息之间的转换。这也是导致 95% 的海量遥感数据无法有效利用、前期卓有成效的遥感应应用难以再上新台阶的根本原因之一。

2.3.2 遥感技术在城市规划中的应用

遥感探测范围大、可随时更新、成图速度快、收集资料方便等特点使其成为空间数据获取的重要手段。国内外在遥感数据应用于城市规划方面已有很多应用实例，如美国斯科特代尔市（Scottsdale）利用高分辨率遥感获得该市的三维数字地图、植被分类分布图、精确的洪泛区预测模型、建筑物变化分析及水资源管理等数据；法国利用 TM 影像监测南特市（Nantes）大气质量；美国利用高空间分辨率遥感数据为公共交通运输系统的分析和空间建模提供支持。我国的城市规划者也在城市综合调查、城市地理基础背景分析、土地利用、交通规划、城市环境、绿地系统规划、城市污染监测等方面利用遥感技术开展了许多工作（沈琪，马金辉，2006；吴健平，张立，2003；徐振华，李挺，2005）^{[189][190][191]}。

卫星遥感技术在城市规划中的应用可以归纳为城市空间信息现状分析、城市变化检测及规划实施监督等三个方面。

城市空间信息现状分析主要包括城镇体系分析、城市内部用地结构分析、建筑密度与建设容积率分析、城市环境污染分析等。

在城市规划中，除了要对城市中的各种要素进行现状分析外，还需要对城市进行变化检测。由于卫星遥感具有重复成像的特点，因此是变化监测的有效手段。遥感变化检测是通过不同时相遥感图像的组合、加工、处理，获得地物动态变化信息的技术。变化检测的方法一般可分为两大类：（1）基于影像分类，如分类后比较法和多时相图像分类法；（2）基于单个像元波谱变化，如彩色合成法、图像代数运算法、多时相组合数据法、变化向量法和两值变化掩膜法等。

对规划实施情况进行监督是城市规划管理部门一项主要的日常工作，包括监测未经批准的建设工程及检查规划批准项目的落实情况。在城市建设过程中存在一些未批先用、越权批地等违法的建设工程项目，作为城市规划管理部门来说，需要及时发现这些违法行为，并进行立案查处。监测未经批准的建设工程首先是要监测新建的建设用地（包括在建和竣工），然后，与规划工程分布图进行叠置分析，产生一张违法建设用地的分布图，并以此查处违法建设工程。利用卫星遥感检测新的建设开发用地已有不少研究工作，如 Yun Zhang（2001）

[192]曾利用卫星遥感方法研究上海市区房屋开发情况检测,分类结果表明,宽度在 10~20m 以上的房屋都能被检测出,提取精度在 86%以上。

2.3.3 遥感研究前沿

随着遥感技术的发展,获取地球环境信息的手段越来越多,信息越来越丰富。为了充分利用这些信息,应建立全面收集、整理、检索以及科学管理这些信息的空间数据库和管理系统,加快进行遥感信息机理研究,研制定量分析模型及实用的地学模型,新一代传感器的研制和应用,进行多种信息源的信息复合及环境信息的综合分析等构成了当前遥感发展的前沿研究课题。当前遥感发展的特点主要表现在以下几个方面:

(1) 基础理论研究

主要包括电磁波模型、大气校正、微波遥感三方面的研究。

1) 地物光谱特征和地物的对应关系模型即电磁波模型是遥感技术最核心理论,随着各种光谱传感器的开发,这方面的研究随之也提到日程上来;2) 在对地光学遥感中,大气影响是妨碍遥感定量化的关键因素之一,因而引起遥感学家的广泛重视,国际上已经提出了许多大气辐射校正模型,主要有基于图像特征模型、地面经验线性模型、大气辐射传输理论模型、混合光谱模型等(陈述彭等,1998)^[193];3) 微波遥感技术具有其特殊的特点,微波能穿透云雾、雨雪,且不需要太阳的照射,具有全天候工作的能力,同时微波对地物有一定的穿透能力,能提供不同于可见光和红外遥感所能提供的某些信息,因此微波遥感得以广泛应用(张卡等,2004)^[194],微波遥感在地面目标微波特性、图像散斑的平滑处理、图像的几何校正和辐射校正方法等方面还有待深入研究。

(2) 硬件技术

随着遥感应用的广泛和深入,对遥感图像和数据的质量提出了更高的要求,其空间分辨率、光谱分辨率及时相分辨率的指标均有待进一步地提高;不断提高传感器的功能和性能指标,开拓新的工作波段,研制新型传感器,提高获取信息的精度和质量,将是今后遥感发展的一个长期任务和发展方向。

目前,一方面微波遥感、同一卫星装载多种传感器成为今后发展的重要遥感手段,另一方面,传感器的研制向更高的空间分辨率方向发展,并形成多级空间分辨率影像序列的金字塔,跨度从美国国家海洋与大气管理局气象卫星的 1.1km 到 QuickBird 的 0.61m;与此同时,传感器的研制向立体观测能力方向发展,以获取数字高程模型;此外,高光谱遥感的出现和发展是遥感技术的一场革命,高光谱成像光谱仪获取的光谱比现在普遍使用的多光谱在光谱分辨力上要高得多,因而在对地物的识别和分类上也表现出多光谱所不可能达到的能力(倪金生等,2004)^[195]。

(3) 遥感的综合应用不断深化

从单一信息源(或单一传感器)的信息(或数据)分析向多种信息源的信息(包括非遥

感信息)复合及综合分析应用发展;从静态分析研究向多时相的动态研究,以及预测预报方向发展;从定性判读、制图向各种遥感信息模型的建立以及专家系统支持下的定量分析发展;从对地球局部地区及其各组成部分的专题研究向地球系统的全球综合研究方向发展。

2.4 城市模型

纵观城市科学的发展历史,从对城市现象的记载、描述,到对其进行归纳、总结,再到对城市事物之间的关系描述,最后发展到用系统的观点看待城市,其发展历程经历了一个从定性到定量的过程。现阶段,定量化程度已经越来越成为衡量该学科发展程度的标志。城市模型是在对城市地理系统进行抽象和概化的基础上,对城市空间现象与过程的抽象数学表达,是理解、模拟与预测城市空间现象变化、对城市系统进行科学管理和规划的重要工具,可以为城市政策的执行及城市规划方案的制定和评估提供可行的技术支持。

2.4.1 发展历程

城市模型的研究始于20世纪初期。20世纪初到50年代中期是城市模型发展的初级阶段,是对城市空间分布模式进行描述的研究阶段。

20世纪50年代末,计算机的出现和推广给城市和区域模型带来了新的生机,这一时期计算机辅助城市模型系统被引入规划,城市模型迅速发展,并于20世纪60年代掀起城市模型研究的高潮。1959年美国规划师协会杂志JAPA特刊反映出了这种因计算机发展带来的对城市模型前景的乐观展望。

但当这种城市模型的乐观情绪发展到20世纪70年代的时候,一些不良反应在美国显现了,一方面大尺度城市模型需要处理大量数据,另一方面计算机的处理能力有限,这一时期,模型运动也似乎停止了,很少有复杂的城市模型被新开发,已有的模型没有达到既定目标的例子也很明显(Richard E Klosterman, 1994)^[196]。1973年Douglass B. Lee(1973)在JAPA上发表了著名的“大尺度模型的安魂曲(Requiem for Large-Scale Models)”一文中,表达了对城市模型的质疑和悲观,他的论点对规划学术界和实践领域都是一个巨大的冲击,这一时期,一些支持Lee或者反对Lee的部分甚至所有观点的人们都在对这个问题进行激烈讨论^[197]。

20世纪70年代后期,理论界出现了一些新的发展:如关于估计与标定的问题、最优地块大小的空间定义问题得到了解决;用最优化的一般概念将区位(Location)与交通联系起来的城市系统综合性理论的开发等(朱玮,王德,2003)^[198]。20世纪80年代,出现了整合了混沌、碎散、秩序、多样性、自组织、自发性、演化、协作行为、增长收益等系统观念的正式理论,从1973年到1994年之间,开发的模型有22种之多(Elisabete AlvesdaSilve, 2003)^[199]。

从20世纪90年代开始,随着GIS技术的日益成熟,GIS在城市模型研究中的应用及与城市模型的集成已经成为城市模型发展的重要趋势。目前,城市模型研究的内容在不断地扩展,城市模型研究向动态化、综合化的方向发展(赵强,胡连生,2006)^[200]。

从早期的中心地理论开始,城市模型研究经历了形态结构模型、静态模型、动态模型三个发展阶段。下面对各个发展阶段进行具体的介绍。

(1) 城市形态结构模型阶段

在计算机产生之前,一些学者已经尝试在城市形态与结构方面对城市模型进行研究,这一阶段是城市模型发展的初级阶段。

1925年,美国社会学家伯吉斯(E.W.Burgess)通过分析不同职业人口的居住区特点及其地域分异,创立了同心圆(Concentric Ring Model)城市土地利用模式,伯吉斯的同心圆模式反映了一元结构城市的特点,动态分析了城市地域结构的变化,但是,模式没有考虑城市交通的作用,过于规则化(张小林等,1995)^[201]。

1933年,德国地理学家克里斯泰勒(W.Christaller)根据村落和市场区位,提出著名的中心地理论(Central-place Theory)。1940年,另一德国经济学家勒什(Losch)利用克里斯泰勒的理论框架,从产业市场区位的角度,提出了与克里斯泰勒中心地理论极其相似的中心地理系统空间分布模型,理论以静态局部均衡理论为基础,对市场、交通及行政因素影响下的中心地理系统空间分布模式进行了描述(孙战利,1999)^[202]。

1939年,美国学者霍伊特(H.Hoyt)进一步发展了伯吉斯的学说,在研究了美国大量城市住房租金状况之后,提出了城市土地利用的扇形理论,认为城市土地利用均是从市中心区既有的同类土地利用的基础上,由内向外扩展,并继续留在同一扇形范围内,但该理论的缺点是只依据房租为分区指标,忽视了与其他城市因素的关系(陈干等,2000)^[203]。

1945年,美国地理学家哈里斯(C.D.Harris)和厄尔曼(E.L.Ullman)提出了多核心土地利用模式,认为城市就像一个细胞结构体,城市的土地利用是环绕几个分立的核心生长点成长,在城市内部结构中除CBD外,还有其他次要的中心生长点,城市地域具有复杂性和影响因素的多样性,然而在该理论中,对各小区之间的职能联系及城市核心形成的规律与作用涉及较少。

事实上,城市形态结构模型并不能称为真正的城市模型,仅仅是对城市土地利用方式的空间模式和城市空间形态结构的研究,只能被称为城市模型的初级阶段或初期尝试阶段。

(2) 静态城市模型阶段

随着计算机的问世,城市模型得以蓬勃发展。根据城市模型是否具有时间维,可以把城市模型分为静态模型和动态模型两大类。

静态城市模型是不考虑时间维的城市模型。静态城市模型主要分两类,一是城市统计模型,主要包括方差分析、相关分析、回归分析、判别分析、聚类分析、主成分分析和投入—产出分析等;二是空间相互作用模型,主要包括空间扩散模型、距离衰减规律、引力模式和潜力模式等。在这两类模型中,以空间相互作用模型最为瞩目。

1964年,地理学家劳利(Ira S. Lowry)提出了基于重力的引力模型,该模型将多个应用于城市某一方面的子系统模型结合起来,是空间相互作用模型中的典型代表。劳利模型也是第一个综合性的城市模型,其核心是一对相互依存的空间相互作用模型:居住地和服务地,前者影响工作地点的人口分布,后者影响人口配置的服务市场。劳利模型是城市模拟方面的重要里程碑,因为它指出了将子系统模型连接起来的重要性。1966年,格瑞(R. A. Grain)应用了经济方法,对原有的劳利模型进行重写,被称之为格瑞—劳利(Grain - Lowry)模型。

1999年,陈顺清提出城市发展的向心力—离心力—摩擦力的相互作用概念模型,建立

城市土地价值与增值的理论,探讨城市增长各阶段的典型土地增值模式,提出城市增长与土地增值的理论(陈顺清,1999)^[204]。这一模型是静态城市模型的进一步发展,初步反映了城市组织结构的形成和发展变化过程。

(3) 动态城市模型阶段

真实的城市系统是一个不断变化的、随机性、非平衡、非线性的系统,静态模型能够描述和反映城市空间实体的分布以及实体间的相互作用情况,能够反映城市系统达到平衡状态时的情况,但要揭示城市更大量的复杂现象和动态机制,对城市扩展的微观相互作用进行模拟就很不够了,这时更需要采用动态城市模型。自20世纪60年代末开始,伴随计算机辅助城市模型在20世纪50年代被引入规划后,动态城市模型已成为城市模型研究的主要方向。动态城市模型是考虑时间维的城市模型,目前其发展主要有二个方向:以系统动力学为代表的城市模型、和以离散动力学如元胞自动机(CA)、分形理论和自组织理论等为代表的城市模型,目前,系统动力学模型仍占据主要地位,但在GIS和RS发展的带动下的离散动力学城市模型如元胞自动机城市模型将是城市模型未来的重要发展方向之一。

1) 系统动力学城市模型

系统动力学城市模型又被称为基于微分方程的城市动力学模型,模型通过分析系统结构,选取适当因素,建立它们之间的反馈关系,并在此基础上建立一系列微分方程,构建系统动力学方程,进而模拟不同策略因素输入时城市系统的动态变化行为(陈干等,2000)。

1969年,富雷斯特(Jay W. Forrester)将系统动态学应用于城市结构的动态变化研究中,用一系列微分方程对城市各指标的变化进行动态模拟,但是由于模型缺乏位置、距离等空间概念,无法反映城市空间结构的演化。

1971年,威尔逊(J.L. Wilson)将最大熵原理引入劳利模型,通过一组非线性微分方程展示了城市的突变等复杂运动特征,但威尔逊仅仅是在模型中增加了对居住、服务业因子影响的时间因子,还不是一体化的城市动力学模型。

20世纪80年代初,登奇纳斯(D. Dentinos)和穆拉里(H. Mullaly)将生态学中反映捕食与被捕食者动态关系的Volterra-Lotka方程引入城市动态分析。但这些模型与城市系统动态学模型一样,还不是真正的空间动力学模型,无法描述城市或城市空间结构的演化(景方,2003)^[205]。

1994年,韦格勒(M. Wegener)将交通、人口、雇员等城市子系统模型联系起来,建立了Dortmund模型,虽然它将城市视为一个动态非平衡系统,但是在模型中的时间因子还是时间阶段的概念,所以还谈不上是真正的动态模型。

1997年,张新生(1997)^[206]在前人研究的基础上提出了城市空间增长动力学机制,并建立了基于个体行为的城市空间动力学模型,实质上是威尔逊模型的扩展。

2) 离散动力学城市模型

A、基于元胞自动机的城市模型

城市的发展过程中还包含着城市设计者、居住者即人的理性作用。基于微分方程的动态或准动态动力学城市模型,在考虑城市建模中的理性人的作用时就显得无能为力了,它们往往仅从宏观的空间尺度出发,研究对象也往往是对城市居住区、商业区等的机械划分,无法

反映造成城市动态性、自组织性和突变性等城市微观结构和理性人个体行为。

元胞自动机在 20 世纪 60 年代开始应用于地理学研究领域,是一个离散的、有限状态的、以一定布局规则排列的细胞集合。因为 CA 是一个基于微观个体相互作用的时空一体化动态模拟模型,采用“自下而上”的建模方式,而没有一个既定的数学方程,因此比起动力学城市模型来说,具有更好的开放性和灵活性。作为复杂性科学的重要研究工具,CA 模型可以较好地模拟城市作为一个开放的耗散体系所表现出的突变、自组织、混沌等复杂特征(陈干等,2000)。

1985 年,美国加州 Santa Babara 大学的 Couclelis (1997)对细胞自动机在地理学中的应用潜力从理论上作了充分的阐述,她最先将 CA 用于城市扩展、预测建模,她开创了利用 CA 模拟城市发展的先河,从此以后,各种各样基于 CA 的城市模型便逐渐发展起来^[207]。

从 1996 年开始,Clark, K.C. (1998)等利用城市发展的历史数据,根据城市的交通、地形条件等参数,建立了与 GIS 集成的 SLEUTH 模型,并据此先后对旧金山和华盛顿都市区进行了成功模拟和长期预测^[208]。Silva 等 2002 年应用该模型对里斯本和波尔图进行了模拟和预测,之后,又有专家对该模型进行了评价和扩展。

1998 年,Wu F (1998)基于 GIS 实现了 CA 与多因子评价模型(MCE)的有机集成,对我国广州市的城市扩张进行了模拟^[209]。

周成虎等(1999)在其建立的GeoCA-Urban模型中,给城市土地单元赋予了生命特征,遵循生命轮回,根据其活力,土地单元具有三个不同的状态值,“青年”、“中年”和“老年”,同时,不同的状态值将随之产生不同的行为规则^[210]。

2002 年,黎夏等将基于 BP 神经网络的 ANN-CA 模型引入可持续土地发展规划,该模型与 GIS 紧密集成。此外,在模型中还引进了灰度的概念。2003 年,Yeh 等又对该模型的功能进行了扩展(Li Xia, 2001)^[211]。

B、基于分形理论的城市模型

分形理论是现代非线性科学研究中的一门新兴数学分支,诞生于 1975 年著名科学家曼德布罗特(B.B.Mandelbrot)发表的划时代专著《分形:形态,机遇和维数》。此后,分形理论逐渐在在众多学科领域里有着广泛的应用。

1985 年,阿林豪斯(S.ArLinghaus)发表了《分形呈现中心地》,为分形理论在城市研究领域的应用做了开拓性的工作,从此该领域的分形研究得到了蓬勃发展。1989 年,阿林豪斯等用数学严格证明了中心地的廖什体系可用分形生成。

1994 年,白迪(M. Batty)对格瑞—劳利模型进行了扩展,利用分形中的凝聚扩散模型模拟了城市的增长,白迪(M. Batty)与朗雷(P. A. Long ley)合著了的《分形城市》,成功地证明了自相似原理的存在,探讨的内容有城市的边界线、土地利用的形态、城市形态与增长等,是城市分形的总结和里程碑。

2.4.2 典型城市模型

目前世界上使用的典型的的城市模型包括:1985 年美国 Stephen H.Putman 开发的基于空间相互作用的 DRAM/EMPAL 模型;1990 年英国 Eschenique 开发完成的 MEPLAN 模型和 1990 年委内瑞拉 Barra 开发的基于空间输入—输出的 TRANUS 模型;1994 年美国加利福尼亚

亚大学 Landis 开发的基于 GIS 的 CUF 模型 ;1996 年美国华盛顿大学城市仿真和政策分析中心开发的基于微观仿真的 UrbanSim 模型 ;1995 年 David Simmonds 顾问机构开发的 DELTA 模型等 , 下面对这些模型进行介绍。

2.4.3 DRAM/EMPAL

细分居住分配模式 (Disaggregated Residential Model , 简称为 DRAM) 和就业人口分布模型 (Employment Allocation Model , 简称为 EMPAL) , 统称 DRAM/EMPAL 模型 , 是由美国宾西法尼亚大学的 Stephen H.Putman 于 20 世纪 70 年代开发的交互式土地利用和交通整合软件包 , 已被美国多个地区如底特律、休斯敦、洛杉矶、凤凰城和圣地亚哥的交通部门应用。之后 Putman 等人又在这两个模型的基础上研制开发了城市交通土地利用软件包(Integrated Transportation-land use package , ITLUP) (Putman,S.H. , 1975)。^[212]

一、模型目的与模块介绍

DRAM/EMPAL 起源于劳利模型 ,DRAM 是一个用于预测不同类型的居民分布的单约模型 , 居民的分布取决于规划年的就业分布及与居民区工作出行的概率 , 这一概率受当地交通阻抗和地区吸引力的影响。EMPAL 是一个修正的单约外减模型 , 可按人口分布、交通阻抗及产业的配套关系预测几种不同的就业分布 (潘海啸 , 1999)^[213]。DRAM/EMPAL 能够得出合理的基准预测结果作为交通需求模型的输入 , 并评估使用土地上便利性的总体变化所带来的影响 , 典型预测期一般为未来 5 ~ 10 年 , 运输规划预测范围可以为 20 ~ 25 年 , 该模型由三个主要部分组成 : 细分居住分配模型 DRAM、就业人口分布模型 EMPAL 和出行需求模型 (Travel Demand Model) , 具体结构如图 19。

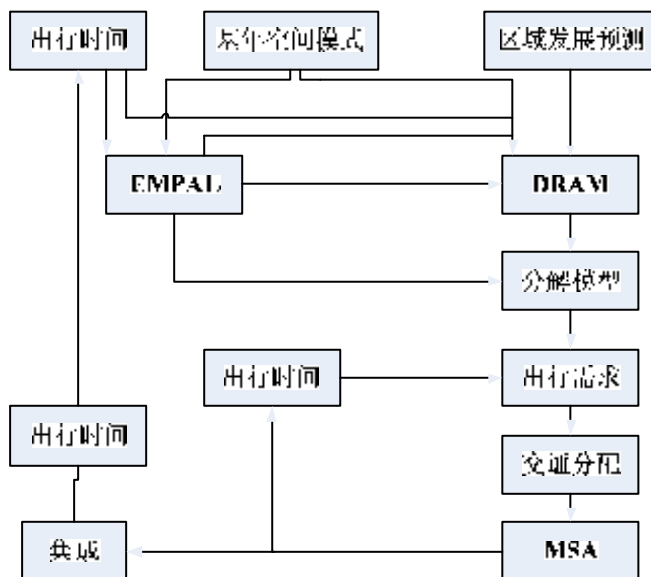


图 19 DRAM/EMPAL 结构图

二、模型数据要求

DEAM 模型需要的输入数据包括 : 职业类型、按收入水平划分的居民户分类、可用于发展的闲置用地、居住用地、区域间的出行阻抗矩阵 (时间或费用) 等。EMPAL 模型中所需的输入数据包括 : 过去 5 年的职业类型、总土地面积、过去 5 年总居民户数、区域出行阻抗矩阵 (时间或费用)。DRAM 根据收入水平预测每个区的居民总户数 , EMPAL 预测不同

类型的行业水平。

三、目前模型存在的问题及建议

在模型的应用和研究过程中,人们对 DRAM/EMPAL 提出了一些问题,也给出了一些建议:

1. 该模型需要投入比较多的资源。除了需要大量的时间资源,用于帮助校准和运行模型外,还需要较高要求的人力资源。建议对 DRAM/EMPAL 进行简化。
2. 在实际情况下,就业人数和家庭数量之间的关系错综复杂,如家庭搬迁并不一定影响家庭人员中的上班人数、兼职人数和工作变动情况。在反映实际情况中的这些关系时,DRAM/EMPAL 显得很不真实。这与模型的基本结构有关,目前尚无很好的建议。
3. 缺少重要的家庭/人口统计特征,如家庭结构/孩子的存在、生活周期、工人人数和种族划分,而这些因素一般被认为会影响位置选择和交通行为。
4. DRAM/EMPAL 所用的区域系统是不一致的,这种不一致性可能会造成模型交互作用的信息丢失或影响预测结果的精确性。
5. 土地市场的作用在模型中没有体现出来,运输服务或政策对土地价格的影响也无法预测。在实际中,竞争土地的中标者有权决定土地利用定位,这一结果由市场交易决定。如果不考虑土地的市场性作用,很难捕获城市发展过程的关键方面,或检验许多影响土地或开发项目价格的公共政策。
6. 模型可能因为忽略重要吸引力条件或区域聚集问题,造成无法准确预测土地利用对交通变化的敏感性。
7. 城市建筑物一般不能与其所进行的活动割裂开来,DRAM/EMPAL 模型本身不具有住房和商业空间特性,因此模型的行为比那些说明土地、建筑物和活动以及彼此之间关系的模型的透明度要低。
8. 模型呈静态,不能真实反映在既定时间内小部分家庭和企业搬迁的实际情况,而且模型反映的是土地和房地产市场达到平衡状态时的情况,而真实情况是城市发展是一个渐进过程,土地和房地产市场可能永远无法达到平衡状态,只能不断向平衡状态靠近。建议在模型的使用过程中,在较长时间内对模型行为进行更严格的检验,以得到比较可靠的结果。

总之,DRAM/EMPAL 是目前美国应用最广泛的土地利用模型。但由于使用需要投入相当多的时间和专业知识,一般只有大的都市规划组织(MPO)考虑使用。此外,DRAM/EMPAL 能与其他城市模型进行集成,如 TRANPLAN、EMME/2 和 MINUTP 等。

此外,由于目前使用 DRAM/EMPAL 的规划人员和分析师对模型提出了越来越多的要求,而该模型的预测和政策冲击分析能力越来越难以满足用户要求,Putman 已经指出停止该模型的开发,将用一种名为 METROPILUS 的新模型代替。

2.4.4 MEPLAN/TRANUS

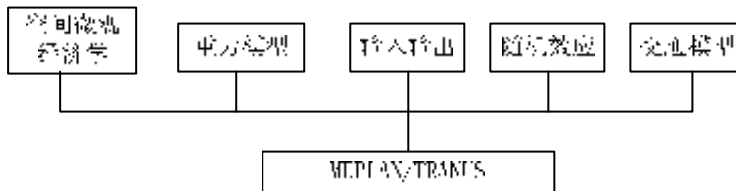
MEPLAN 和 TRANUS 是两个紧密相联的城市模型,它们都是英国 Marcial Eschenique 公司自 1967 年以来开发的,在开发过程中,MEPLAN 由英国的 Eschenique 继续开发,TRANUS 由委内瑞拉的 Barra 开发,它们的原理、模型结构、输入、输出基本相同,这两个模型在世界上很多国家得到应用,其用户遍及欧洲、美洲、亚洲。模型基于扩展的 logit 模型开发,所涉及的相关理论主要是离散选择分析(Discrete choice analysis)和随机效用理论(Random Utility Theory)。

一、设计目标和功能

MEPLAN/TRANUS 可以模拟城市空间的土地利用、房地产市场、交通系统中的活动，该模型能够预测因土地利用类型的变化而引起的土地和房屋价格变化，因需求所诱发的生产量和区域需求的变化情况，区域范围内的人口、就业的分布和增长情况等。

该模型可以应用于城市或区域尺度，从经济、财政、环境等方面来评估政策和活动对土地利用和交通的影响，也可以评估城市房地产方面的政策和项目对城市系统的影响。MEPLAN/TRANUS 最显著的特征是它将城市或区域中的成分紧密地结合起来，如人们的活动、土地利用、交通系统等。

图 20 为 MEPLAN/TRANUS 的模型设计功能结构图，由图可以看出，MEPLAN/TRANUS 的理论基础是空间微观经济学和重力模型；将交通要素融入模型中，确保地点和出行选择决策的内部一致性；使用拓展的输入输出经济模型来反映各经济区域间，经济区域住户、土地市场间的相互关系；将离散和随机的概念应用到交通的产生、模式选择、路径选择、地点选择到土地利用选择等各方面。



2.4.5 CUF

加利福尼亚城市未来模型 (California Urban Futures Model, CUF) 是由加利福尼亚大学伯克利分校的 John Landis 设计的, 目的在于模拟城市开发项目所对应的土地与开发政策之间的相互影响, 应用范围主要是城市和“可开发土地单元”。模型受现有土地利用情况、土地利用政策和开发项目的利润等因素的共同影响, 其目的是对加利福尼亚市政府进行土地利用管制的影响进行评估。

Landis (1994) 认为 CUF 是“用 GIS 进行数据整合和空间分析的第一个大规模城市模拟模型, 而不仅仅只具有显示功能。CUF 是第一个模拟公共土地利用政策和私人土地开发商之间相互作用和影响的可行城市规划模型, 其相互作用方面包括有关建议开发项目的位置、规模和密度、政府对开发项目的土地利用政策等。该模型是第一个具体用于评估地区、子区域和局部土地利用替代方案的大型城市模型^[214]。”

该模型运行于 ArcGIS 的 UNIX 工作平台。模型只有其作者在旧金山海湾地区使用过, 目前其与水文模型的集成工作正在加利福尼亚大学戴维斯分校由 Bob Johnston 主持进行。

一、作用和功能分析

(1) 预测

为对比备选的土地利用政策, CUF 可以在基准年份的基础上按 5 年增量对所需要预测的年份进行预测。在建立土地利用模型时, 需要大量的结构调整和扩展结构, 包括土地市场价格的计算、添加商品房地产市场要素、运输市场要素和较严格的需求界定等。在开发新的模型或扩展其他现有的模型时, 需要对该模型中的一些要素进行分析。

(2) 政策分析

CUF 是设计用于评估备选土地利用政策的模型, 在预测情景中可向用户提供引入相关土地利用政策的多种方法。但是按照目前的结构, 模型所产生的政策预测结果的有效性仍值得怀疑。许多政策通过价格影响开发项目, 包括限制供应量或增加开发成本等, 如果没有价格调整机制来调解供求关系, CUF 可能无法衡量价格变化对家庭在备选位置住房偏好等方面的影响。

二、模型结构原理

CUF 主要包括四个组成部分: 自下向上的人口增长子模块, 提供对模型系统需求方的预测; 空间数据库, 提供对模型系统供应方的预测; 可开发土地单元 (DLU); 空间分配子模块, 用于将预测增长值分配到可开发土地单元 (DLU)。此外, CUF 是唯一能与 GIS 系统完全集成的土地利用模型, 可在 ArcGIS 环境下运行, 还能与 GIS 相兼容, 层与层之间的交叉将多个图层集成为一个单独的数据库。

三、输入与输出数据

CUF 输入数据主要是各个可开发土地单元, 这些土地单元数据包含的一系列 GIS 图层, 如城市边界、湿地、斜坡、农用地类型、现状土地利用情况、主要高速公路和道路、场址与最近城市边界的距离、市场住宅密度、典型新家居价格、新家居建造成本等。

输出数据主要是对各个可开发土地单元的居住用地吸收量、新住房建造情况、新开发项目的容积率预测结果。

2.4.6 UrbanSim

UrbanSim是由美国华盛顿大学城市仿真和政策分析中心开发的,用JAVA代码编写的仿真模型包,模型主要用于城市增长管理、城市土地规划和交通政策分析等,它以城市发展过程中的主要部门(家庭、商业、开发者、政府等)为研究对象,以年为单位,进行从短期到长期的准动态化仿真,旨在协调土地利用规划、交通运输规划和环境保护三者之间的关系。

模型最初设计于1996年,目前UrbanSim已经完成了从实验性阶段到应用阶段的转变,第二代产品被应用到美国的俄勒冈州尤金—斯普菲尔德、夏威夷和盐湖城以及我国台湾等地(段瑞兰,郑新奇,2004)^[216]。模型的运行依赖于一系列第三方软件,分别是JAVA运行环境、输出和输入数据库MySQL、ESRI公司的MapObjects组件等。

一、模型设计目标

UrbanSim由一系列相互作用的模块组成,这些模块模拟了影响城市系统发展和土地利用政策的主要因素,如家庭的搬迁、居住地点、工作地点、房地产开发商对开发地点的选择等,较好地适用于具有复杂时空特征的地理系统的研究,尤其是城市复杂系统行为的动态仿真。

UrbanSim主要解决以下问题:一个城市区域是如何发展的?不同土地利用政策和不同政策的组合对城市发展有哪些影响?有些因素如可接受的房屋价格也在模型使用的范围之内,因为它可以用来预测房价,根据收入的非集计家庭及其他特征预测也在模型提供的功能之内,因为它们也可以评价可接受性因素对不同方案的影响,城市绿地的规划也是模型考虑的一个方面,因为绿地的规划影响土地的供给并且绿地也是确定居住和商业地点的一个影响因素。

模型的基本分析方法是敏感度分析和动态离散化分析方法。

二、模型结构

UrbanSim包括经济和人口转型、家庭和工作流动、可达性、家庭和工作位置选择、房地产开发和土地价格等子模块,这些子模块相互独立又彼此联系。其中两个来自外部的模块是:宏观经济模块和交通需求模块,其中宏观经济模块用于预测未来的人口和行业就业等宏观经济条件;交通需求模块系统与UrbanSim松散耦合,用于预测区域之间综合交通设施和拥挤时间等交通条件。

三、数据的输入和输出

模型的输入数据需要与GIS软件相结合,模型验证所需的数据需要用统计软件来处理,输入数据包括:人口和工作数据、家庭、商业、开发成本、土地利用现状、区域经济预测、交通系统规划、土地利用规划、土地发展政策和交通可达性等。

UrbanSim的输出结果一般包括:远景年的人口分布、家庭的分类、商业的分类、土地利用的分类、住房的分类、各种非居住用地的面积、各种土地利用类型的密度、土地价格等。

2.4.7 Place3s

Place3s由美国柏诚公司(Parsons Brinckerhoff)开发,Place3s概念的提出是在1991年,“Place3s”代表的意思是以社区能源、经济和环境的可持续发展为原则进行规划,是一个使社区规划者能更好地理解发展决策对改良的可持续发展能力的作用而创建的土地利用与城

市设计方法。该模型可以帮助收集通向可持续发展的复杂性平衡分析所需要的数据。Place3s 是建立在 GIS 平台 (ArcView) 上的分析软件。

一、模型功能

Place3s 的设计目标是为了谋求社区、州、国家的可持续发展,应用 Place3s 可以对社区在土地综合利用、土地再开发潜能、居住及工作情况、客货运输、公共基础设施的改进、能源利用等方面进行效率评价。

二、模型特征

Place3s 最大的特征就是将公众参与、规划、数量分析等整合到一个合作式的规划过程中,适于对特定区域及邻近区域的评估。同时 Place3s 侧重于:对社区开发方式的影响评价、交通模式选择、对基础设施建设成本控制、社区潜力的重新开发,社区可居住性规划和设计等方面。通过对上述社区发展过程的重视和选择,提高居民经济水平和生活环境质量。

Place3s 可以通过评估一个社区的现状和将来的期望值来帮助一个社区达到它的长期目标,这个过程是通过对不同方案的比选而得到的最终结果。它不是一开始就创造一个最佳方案,而是通过一个相对简单而且量化的过程来比较不同的规划方案。

三、Place3s 模块分析

Place3s 的模块分为基础模块和约束模块两类。基础模块用于实现计算功能;约束模块用于确定研究区域内对开发项目的限制,是从现有文档中抽象出来的制约条件,用以显示有多少开发项目(百分数)受限于现状和未来条件,如环境资源、已开发土地、公共用地等。

四、输入输出数据

Place3s 利用 GIS 系统获得数据,所需要的输入信息包括:常规的能源供应情况、可再生能源的利用情况、基础设施信息、交通特性、就业情况和气候情况等。

Place3s 输出信息包括:居民总户数、总就业岗位、用水总量、公交服务地区的居民总户数、公交服务地区的总就业岗位数、城市绿地周边区域居民总户数、城市绿地周边区域总就业岗位数、户均出行千米数、重建社区产生的就业和住宅数、就业/住宅比例、公交可达性等。

五、优点及不足

Place3s 的优点主要有两方面:(1)使用简便且基于 GIS,生成的情景结果和数据为实时互动的,这些结果和数据可以从出行需求、潜力和环境作用等方面与社区目标进行对比,方便开发人员共享。(2)能使社区成员获得了对项目的“所有权”意识,并了解土地利用模型和运输用途的重要关系。

Place3s 模型的简便也是其不足之处。Place3s 不是真正传统意义上的“模型”,该工具简单地使用用户规定的土地利用变化,并根据设定的关系快速分析性能指标,而这种分析一般是基于全国数据而不是地方数据,不能反映土地市场参与者的复杂性,以及企业之间和企业与家庭之间的关系等影响位置选择和出行需求的因素。

2.4.8 TLUMIP

美国 Oregon 州交通厅决定从 1996 年起建立一个交通和土地利用整合模型 (Transportation and Land Use Model Integration Program, TLUMIP), TLUMIP 的目的是提供一个能够对土地利用、交通、环境之间相互作用进行定性、定量分析的工具。这个模型可运

用于不同的空间尺度,通过利用地点选择和活动选择来连接土地利用、交通、环境之间的相互作用。

TLUMIP 有两个组成成分,分别是上文介绍过的 TRANUS 和 UrbanSim。

2.4.9 IRPUD

IRPUD 是德国国民研究委员会 (National Research Council) 资金支持的欧盟委托项目 “PROPOLIS” 中开发的一个模型,目的在于为了促进欧盟的可持续发展。IRPUD 主要用于模拟整个地区的运作,并为主要的大城市做灵活的决策支持。IRPUD 模型包括了一个多模块的运输网络和区域组织,输出包括一系列的多角度的图形或图表等规划数据。模型输出可以根据用户需要,选择一定的输出指标。模型的运行周期是一年及以上。

IRPUD 是一个独立模型,开发者们试图对模块进行扩充,添加一些整体咨询组件等,IRPUD 对其他的城市模型如 DELTA、URBANSIM 等有重要的影响,对 TLUMIP 也有间接影响。

2.4.10 SLEUTH

SLEUTH是著名的元胞自动机专家克拉克 (Keith C. Clarke) 在美国地质勘探局和美国国家科学基金会的资助下开发的一个城市增长模型,是克拉克元胞自动机增长模型 (Clarke Cellular Automation Urban Growth Model) 和土地利用/土地覆盖模型Deltatron的改进产品,“SLEUTH”表示输入数据层首字母缩写:坡度 (Slope)、土地利用 (Landuse)、排除层 (Exclusion)、城市范围 (Urban extent)、交通 (Transportation) 和阴影 (Hillshade)。目前,SLEUTH已经在旧金山、芝加哥、里斯本、华盛顿和巴尔的摩等地得以成功应用(Clarke, K.C., 2002 ;)^{[216] [26]}。

一、模型功能

SLEUTH 是用于模拟和预测城市增长的 CA 模型,既可以用来重构过去连续的城市空间数据 (城市的范围与土地利用变化),揭示城市过去的结构特征和发展规律,又可以对城市发展进行模拟与预测,具有较大的实际应用价值。

二、运行方法与模块分析

SLEUTH 模型基于地图、航空图片和遥感等数据,模拟研究区域过去的空间变化,预测未来合理的结果,主要以四种模式来模拟城市空间的生长和变化:(1) 自发增长模式 (Spontaneous growth);(2) 中心积聚增长模式 (New spreading center growth);(3) 边缘增长模式 (Edge growth);(4) 交通网络影响增长模式 (Road-influenced growth)。四种增长模式以各自的增长周期 (如年) 连续运行,用 5 个交互系数对增长规则进行控制。

SLEUTH 以均质单元点阵空间 (Grid Space) 为工作基础,每个均质单元点阵空间相邻有 4 个单元格,每个单元格被赋予两种属性 (城市建设用地、非城市建设用地),并通过 5 项交互系数对时间序列中的各个单元格进行调控,决定每个单元格状态的交互系数取决于相邻的单元格,这些交互系数是:(1) 扩散 (Diffusion);(2) 繁衍 (Spread);(3) 蔓延 (Breed);(4) 坡度阻碍 (Slope Resistance);(5) 道路引力 (Road Gravity),每个系数是 0 和 100 之间的一个整数 (Elisabete AlvesdaSilve, 2003)。

[26] 更多的信息请参考 <http://www.ncgia.ucsb.edu>

增长环 (Growth Cycle) 是 SLEUTH 运行的基本单位。它由一系列唯一值的系数开始, 然后运用每个增长规则。最后, 评估城市增长率大小。如果增长率超出最高临界值 (Critical_high) 或未达到最小临界值 (Critical_low), 自修改规则就会在特定范围内调整系数去模拟城市增长繁荣和萧条状态。复杂的模拟由初始条件、一系列增长环组成, 从第一个历史时期的增长环开始到最后时期的增长环结束 (陈学刚, 2005)^[217]。

城市扩展模型 (UGM) 是 SLEUTH 主要组成部分, 是一个运行于 Unix 操作系统的 C 应用程序。UGM 有三个运行阶段: 测试阶段, 校准阶段, 预测阶段。测试阶段用于确保模型正确编译和运行。模型的大部分工作在预测和校准阶段进行, 这两个阶段也是最复杂的过程。校准阶段确定特定的系数值, 这些系数影响城市增长的转换规则。

三、模型数据

SLEUTH 需要输入 5 张 8 位的灰度的 GIF 格式图像文件到校准模型中, 进而预测城市空间增长 坡度、交通、排除层、城市范围、土地利用和阴影。这些数据要求具有同样的空间分辨率, 而且必须按照明确的命名格式。坡度反映了城市的地形基本条件, 宽阔、平坦的区域适宜发展城市, 可以利用数字高程 (DEM) 模块获得; 交通网络条件是城市发展的重要条件, 城市一般倾向于沿交通线发展; 排除层表示完全不能城市化的地区, 一般包括水体、公园、国家森林公园等土地利用类型。

对于数据输出, 模型通过生成一系列实验的预测图和空间图像来模拟城市的生长。

2.4.11 POLIS

POLIS (Projective Optimization Land Use Information System) 模型是 20 世纪 60 年代初 Prastacos 为旧金山海岸地区政府协会 (the Association of Bay Area Governments, ABAG) 开发的一个模型^[27], POLIS 基于劳利模型, 在海岸地区一个传统的土地利用—交通模型的基础上, 综合 BEMOD 模型和 PLUM 模型开发的。20 世纪 80 年代 ABAG 进一步完善了该模型的建模系统。

一、模型原理介绍

POLIS 是一种简单的数学程序, 用来优化地理位置和交通方式的选择方案。POLIS 的数学基础是随机效益理论, 该理论主要用于描述个体从一些可选项中选取合适的位置, 使得自己的效益最大化的过程^[28]。POLIS 代表了一种新的尝试, 对规划进行一系列约束, 同时也将空间聚集经济体制融入到实际的土地利用模拟过程中, 同时还包括消费者剩余理论、效用和熵值最大化理论。这一理论方法同样还阐述了在非线形规划中结合一些有用的数学分析程序的可行性。

POLIS 模型试图用消费者剩余理论、效用理论以及熵最大化理论来限制规划的边界, 它寻求一个与工作、零售的多方式出行、服务出行以及特别是与基本产业雇员的集聚效益相关联的区位剩余的最大化:

$$\begin{aligned} \text{Max} Z(T_{ijm}, S_{ij}, \Delta E_j^n, \Delta H_i) = & -\frac{1}{b} \sum_{ijm} [\ln(1/W_i \sum_m W_{ijm}) - 1] - \frac{1}{I} \sum_{ijm} T_{ijm} [\ln(T_{ijm})] \\ & - \sum_{ijm} T_{ijm} C_{ijm}^w - \sum_{k \in k_{ser}} (1/b_k^s) \sum_{ij} S_{ijk} [\ln(S_{ij}^k / w_j^k)] - 1 - \sum_{ijk} S_{ij}^k C_{ij}^k + \sum_{i, n \in k_{gas}} (f_i^n) \Delta E_i^n \end{aligned}$$

[27] <http://ntl.bts.gov/lib/7000/7500/7505/789761.pdf>

[28] <http://www.abag.ca.gov/abag/overview/pub/p2002/modeling.html>

在上述模型表达式中, T_{ijm} 表示 i 小区到 j 小区采用 m 方式的工作出行量; S_{ij}^k 表示在 k 种零售或服务里的出行数; C_{ijm} 表示方式 m 的区间出行费用; w_i 表示 i 小区对居住的吸引力——居住吸引参数; w_j^k 表示作为地方服务或零售活动中心的 j 小区的吸引力——零售服务吸引参数; f_i^n 表示 i 小区特定的聚集潜力函数 (Agglomeration potential); a^n 表示聚集潜力函数的参数; ΔE_i^n 表示在基本就业单位 n 中被额外分配到 j 小区的工作数; ΔH_i 表示在 i 小区中的新的落户数。

模型的目标函数有: 空间熵; 两项出行费用 (上班出行费用和服务出行费用); 一个地区范围内基本就业小区分布的调整项。目标函数受一系列的线性约束, 如: 变量的非负限制; 由模型计算得到的上班出行交通量, 零售以及服务的花销要和每一个小区的工人数及住房情况相匹配; 每一个小区的居住及工业用地的可得量要和分配到这些小区额外的居住及就业相一致; 小区总的住户和工作岗位在空间总量上要保持平衡等。

1986年 Prastacos 将 POLIS 应用到海岸地区。旧金山海岸地区的 9 个县包括 520 万居民, 被划分为 107 个规划小区, 主要的产业类型有: 制造业、交通保险以及房地产业。模型通过分析基本年的情况以及对地区可达性计算来确定自然资源受限制下的活动, 把在农业和矿产业中的主要就业分配到小区中去。在模型的应用中包含了公共和私人两类交通方式, 通过将模型生成的工作及服务出行熵的水平与“观察”值相匹配, 得到一个工作出行量和零售服务出行量。

二、模型特点及优缺点分析

该模型也存在一些问题, 首先, 此框架中缺少对拥挤敏感的详细网络情况的分析; 其次, 从理论角度来讲, 由于城市不断地增长和变化以及其他一些额外条件, 是否存在能同时解决交通活动特征和城市活动分配两个问题的最优化方法本身就存在争论, 结果存在不确定性, 再次, 模型受到土地供给量的制约, 如房屋的供给、不同城市的发展政策、该区域可提供的就业机会, 分配给该地区的房屋供给量, 这使得该模型很多时候只能是理论上成功, 并不能用于实践。

但是从概念上毫无疑问, 这种数学方法有助于分析者构造出新的模型结构, 也提供了一个将各种规划限制纳入考虑的有效机制 (赵童, 2000)^[218]。

2.4.12 KIM

KIM (1989) 的芝加哥综合城市系统模型是目前美国应用最为广泛的模型, 是复杂经济学模型的典型代表。该模型引入了经济学的投入产出、供需关系和地租等基本概念和相关分析方法, 把土地和交通系统当作市场概念来处理^[219]。

该模型属于非线性的均衡静态模型, 模型综合了 Mills 的城市系统均衡思想、Wilson 的概率性空间相互作用理论、Boyce 等人的交通设施区位模型以及 Beckman 等人的网络供需平衡概念, 把土地利用、运输路线以及方式选择与城市交通运输网络联系起来, 将均衡市场拓展到非线性的、熵/效用最大化了的网络规划形式。该模型在交通与活动场所的需求与供给之间建立了一种普适平衡公式。

模型的根本在于它通过各个小区的活动水平的配置来保证在 i 地点生产 r 类产品的边际成本加上均衡状态下从 i 到 j 用方式 k 运送的单位成本应等于在 j 地点生产 r 类产品的边际

成本，从而达到一个综合性的供需平衡。

Kim 已经开始着手于对这一模型的校正，在一个相当集聚的空间水平上，利用从芝加哥地区收集到的多元数据源对模型进行验证，以保证其在政策研究的应用中，并非要一定在必需投入基础上才能达到良好的产出效果。但如何将模型中的动态分配解译成实际的区域内土地利用安排，在模型中并没有说明。然而，对于从交通运输网络细节反映城市的动态分配这一问题，Kim 是做的较好的，该模型也比较适合用于城市发展战略选择。

2.4.13 Metrosim

Metrosim 是由美国 Alex anas 等人从经济发展角度开发的城市土地利用——交通仿真模型，目的在于研究城市土地利用和交通发展以及相关政策之间的相互作用。该模型以指定的经济行为和明晰的市场运行机制为基础，通过分析交通项目及与之相关联的居民出行变化、土地利用控制政策、就业增长变化情况和居民收入增长变化等，提供不同的政策选择方案，从而在城市的发展过程中，协调交通需求与土地利用的关系。

一、模块分析

Metrosim 模型主要依据劳动力、住宅和商业市场平衡的原理，在模块结构中主要包括 4 个市场均衡模块(图 21 中黄色标记)——劳动力市场、就业分配平衡模块、房地产市场平衡模块和交通配置平衡模块，以及在模块中还考虑交通和市场价格直接影响和间接影响。通过反复调用模型中这几个均衡模块模块，修改各模块相关的参数，使每个模块之间达到平衡稳定状态，最终生成一个城市土地利用和交通流量系统协调发展的方案。

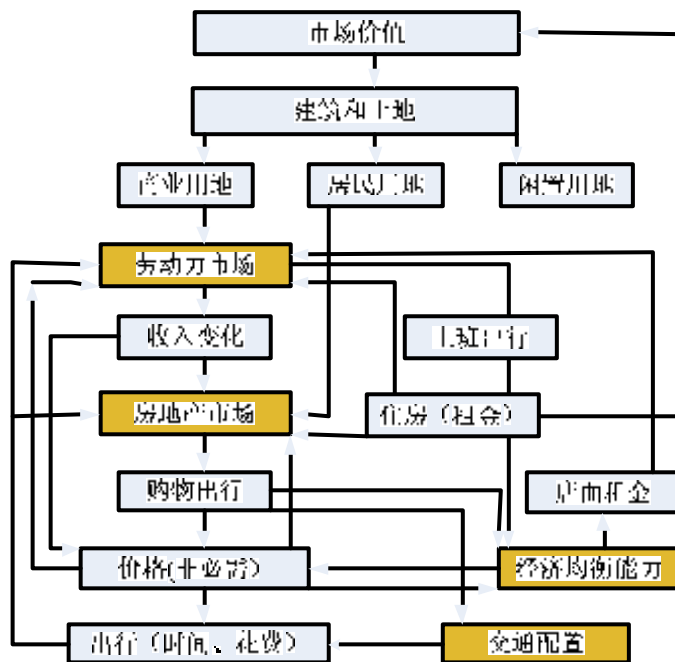


图 21 Metrosim 模型流程图

由图 21 可以看出，从总的市场价值角度考虑，市场活动的主体——劳动力及其活动空间主要受建筑和土地制约，而土地利用方式主要有商业用地，居住用地和闲置用地，前两者

为劳动力提供活动场所、生存场所，与劳动力市场的发展相互制约。这几个模块通过交通和市场价格连接起来，成为一个有机整体。交通的便利性决定了人们出行所花费的时间、方式及费用（上班、购物），进一步影响各种用地的空间分配和价格市场以及劳动力市场的流动。

二、模型应用

在 Metrosim 模型中，用户能够得到基本的通用产出值：交通流量估算、交通堵塞情况、就业变化、新的居民区和商业区空间结构、土地利用变化等。运用投入产出分析模式，Metrosim 能在大都市区对交通和土地利用进行一次性长期平衡预测，根据已有的每年土地利用和交通变化情况，收敛到一个理想的稳定平衡状态。

在该模型应用过程中需要利用一些统计数据，如人口普查、城市税收、不动产值等资料，这就需要在应用该模型之前需花费相当多的精力来准备基础数据，因此在已有的应用案例中，绝大部分都是在美国国内的应用，而很少涉及到其他国家地区。模型提出后，分别以芝加哥和纽约地区作为案例进行了实地研究。芝加哥案例中由居民区位置和决策子模块构成；在纽约地区的应用中，没有出行选择模块，而是增加了商业固定资产市场模块。

从理论上讲该模型的设计思路是很有价值的，然而由于数据资料的限制，近些年来少见新的研究进展与应用。

2.4.14 DELTA^[29]

DELTA 模型最早由 David Simmonds 顾问机构在 1995 年开发，该模型用于描述土地利用随时间变化的情况。

一、模块分析

DELTA 模型利用 6 个城市子模块来模拟城市土地利用短期内的变化状况。这 6 个子模块涉及以下几个方面：建筑业的发展（The development of buildings）、人口统计的变化（Demographic change）、私家轿车拥有量的变化（Changes in car ownership）、居住和工作的区位与选择（Location and relocation of households and jobs）、就业率的变化（Employment status changes）、城市地区质量的变化（Changes in the quality of urban areas）。

另外，DELTA 模型还包括三个附加的区域子模块，来进行区域尺度、运动影响以及大区域之间的相互作用分析。这些子模块用于解决如下问题：家庭在劳动力市场区域间的迁移状况、不同劳动力市场区域中的工业和商业投资、劳动力市场区域间的产品和贸易等。

二、城市层面的模型应用

在城市层面，DELTA 是一个重要的区域可达性基础模型，区域每次土地利用活动的改变都可以根据区域属性的运输通达性估测出来。区域之间的关系由区域通达性指数来说明，这个指数根据先前的土地利用数据和运输成本矩阵来计算，这种计算有利于直接与 OD（Origin and Destination，交通起讫点）矩阵或运输成本联系起来。

DELTA 作为一个动态模型，能够预测土地利用逐年的变化状况，如城市家庭区位子模块的一个重要特色就是它能够从定居者中区分出哪些是移居者。即在任何年份，一般都只有很少一部分家庭会从一地迁移到另一地，模型假设家庭的迁移更倾向于迁往同类型家庭聚集的地区。

三、区域层面的模型应用

[29] <http://www.scotland.gov.uk/Resource/Doc/46930/0026893.pdf>

在区域层面，DELTA 增加了三个子模块：迁入迁出模块（Migration）、投资模块（Investment）和贸易生产（Trade and production）模块。迁入迁出模块描述了家庭在同一个区域内的迁移状况对城市层面的区位和环境因素的影响，而后两个子模块组成了 DELTA 的区域经济模块。

投资模块描述了由于设备折旧所引起的每个区域和部门承载力的下降状况，以及对于市场可达性，及成本（包括空间成本和资产投入的运输成本）都很敏感的替代性投资过程或新的投资过程。

贸易生产模块与 MEPLAN 模型的投入产出模块在概念上具有相似性，消费者的最终需求可以通过城市模型的输出计算出来。

四、模型的应用

当 DELTA 模型在两个层面上同时使用时，区域层面的模型要与城市层面的模型重叠起来。在实际应用中，每个区域家庭的数量需要迁入迁出模块来修正，每个区域就业状况也要由地区经济模块来修正。

在20世纪90年代中期，DELTA模型就开始在一些工程项目中得到成功的应用。其中的典范是DELTA与MVA的START运输模型配套使用，被应用于1995年爱丁堡城市规划中；之后，DELTA被作为大曼彻斯特战略规划模型（Greater Manchester Strategy Planning Model，简称GMSPM）的重要组成部分；DELTA还被应用于英格兰北部奔宁山脉的战略性环境评估项目（Strategic Environmental Assessment in the Trans-Pennine Corridor，简称SEATPC），在项目中开发的新模型TPCM第一次包含了区域层面的子模块系统，并被用于其他的很多研究中。

2.4.15 典型城市模型对比

通过以上对各个城市模型的介绍，下面给出以上模型的简单比较

表 8 典型城市模型对比表

序号	模型名称	地点	开发年份	开发人员/机构	模型结构原理	时间基础
1	DRAM/EMPAL	美国	20世纪70年代	Stephen H.Putman	空间相互作用	静态平衡
2	MEPLAN	英国	1984年	Marcial Echenique	空间输出、离散、随机	动态平衡
3	TRANUS	委内瑞拉	1982年	Barra	空间输出、离散、随机	动态平衡
4	CUF	美国	1994年	John Landis	离散选择	动态
5	Urbansim	美国	1996年	华盛顿大学城市仿真和政策分析中心	离散选择	动态
6	Place3s	美国	1991年（概念提出）	Parsons Brinckerhoff	最大能源效应	动态
7	TLUMIP	美国	1996年	Oregon州交通厅	空间输出	动态
8	IRPUD	德国	1994年	National Research Council	离散选择	动态
9	SLEUTH	美国	1997年	Keith C. Clarke	元胞自动机	动态

序号	模型名称	地点	开发年份	开发人员/机构	模型结构原理	时间基础
10	POLIS	美国	20世纪60年代	旧金山海岸地区政府协会	空间相互作用、随机效益理论	静态
11	KIM	美国	1989年	KIM	城市系统均衡思想、空间相互作用	静态
12	Metrosim	美国	1995年	Alex anas 等	离散选择	代表性的平衡
13	DELTA	英国	1995年	David Simmonds Consultancy	离散选择	动态

注：表中的“空间相互作用”是指模型具有类似于重力的物理联系；“离散选择”是指模型是以离散选择理论为基础，它是根据经济学模型“随机最大效应”的发展而来的，这个原理合适于人们在相互独立的情况下对不同方案进行选择。

2.5 专业规划模型

在规划支持系统中，除了常涉及到的城市模型外，还有很多专业规划模型，专业规划模型的专业涵盖范围很广，除了区域规划中经常涉及的空间相互作用模型、区位模型、区域结构模型外，还包括生态环境模型、城市经济模型、人口模型、交通模型和市政模型等在专业规划中经常用到的数学模型。本节将针对各类专业规划模型中比较经典的、常用的数学模型进行介绍，篇幅有限，没有涉及到的请参考其他专业资料。^[30]

2.5.1 空间相互作用模型 (Spatial Interaction Models, SIM)

如果两个区域之间发生人员流动、信息流动、商品流动、资金流动、公用设施利用，甚至知识传播，就可以认为它们之间存在空间相互作用。空间相互作用模型就是描述这种相互作用的数学模型。本节介绍的空间相互作用模型主要有牛顿模型、Clark 模型、Wilson 模型、零售引力法则和劳利模型（王铮等，2002）^[220]

1. 牛顿模型（即赖利模型）[Reilly, 1929]

赖利模型是一个识别空间中零售商控制市场范围界限的模型，由于形式类似牛顿引力公式，所以又称为牛顿模型。模型形式如下：

$$F_{ij} = G \frac{P_i P_j}{r_{ij}^2}$$

式中， F_{ij} 是吸引力； G 是介质常数； P_i 和 P_j 是区域 i 和 j 的规模，规模因研究的问题

[30] 各个专业规划模型的完整名称中，“()”内的为模型的中文名称或特殊说明，“[]”内的为模型的开发人员或机构及相应年代年份。

不同可以取作人口、工作机会等； r_{ij} 是两个区域的距离。

另外，赖利模型还可以计算在距离两个城市多远的地方，两城的吸引力达到平衡，从而作为其平分市场空间的断裂点，或者市场域的边界。

Haynes 和 Fotheringham 对赖利模型作了一些修正，修正主要有三个方面：添加距离修正指数、修正人口规模因子、添加规模参数。

2. Clark 模型

Clark 模型是用于描述城市人口分布的经验模型，其主要形式是人口密度随着距离的衰减规律，模型形式如下（陈彦光，1999）：^[221]

$$r(r) = r_0 \exp(-r / r_0)$$

式中， $r(r)$ 为距离市中心为 r 处的人口密度，参数 $r_0 = P_0 / 2\pi r_0^2$ 在理论上为市中心（ $r=0$ ）的人口密度， r_0 为城市总人口， r_0 被定义为城市人口空间分布的特征半径。

3. Wilson 模型（威尔逊模型）[Wilson, 1967]

威尔逊模型是利用区域之间的流强 T_{jk} 来定义区域之间的空间相互作用的模型。威尔逊模型将建立模型的方法由从数理统计角度寻找公式发展为从事物原理角度出发。

该模型假定区域是由区域结点构成的结点区域，区域 j 到区域 k 之间存在流量为 T_{jk} 的区间流动，流强则反映了区域 j 对区域 k 的作用强度。当区域 j 对某一区域的 T_{jk} 大于某一域值，即称该区域为区域 j 的市场域。

4. Law of Retail Gravitation（零售引力法则）[William Reilly, 1931]

零售引力法则的核心原则是城市零售商业从周围地域吸收的销售额与该城市到周围地域距离的平方成反比。

赫夫（D.L.Huff）1964 年在赖利理论的基础上，从概率论角度提出了一个计算零售范围的公式，称为 Huff 法。Huff 法是一种利用市场占有率来确定市场域的方法，如果 j 区域对 k 区域的市场占有率大于一个特定的域值，那么成为 k 区域为 j 区域的市场域。市场占有率 p 的计算方法如下：

$$p(d, s_j) = \frac{O_j f(r(d, s_j))}{\sum_{i=1}^N O_i f(r(d, s_i))}$$

式中， d 是市场的位置； s_j 是供应区域 O_j 的位置； $f(r(d, s_j))$ 是空间相互作用的核，其通常的计算方法为

$$f(r(d, s_j)) = \exp(-b(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2)^{1/2}$$

式中, (x, y) 和 (x_j, y_j) 分别是市场和供应区域的坐标, b 是距离衰减因子。

5. Lowry Model (劳利模型) [Ira S.Lowry]

劳利模型是基于重力模型的引力模型, 空间相互作用模型的典型代表。劳利模型的核心是一对相互依存的空间相互作用模型: 居住区位和服务区位, 前者相对于工作地分派人口, 后者相对于人口分派服务工作。原则上讲, 劳瑞模型的对象区域为封闭的城市区域(即没有人员的出入), 利用空间相互作用决定各区的住户数和就业人口的分布, 从而得出土地利用形态。

2.5.2 区位模型 (Location Models)

区位是指企业、产业、设施等在空间经济格局中的位置, 有时特指它们的盈利位置或者最优的经营位置。区位模型就是解释、计算空间区位格局的数学模型。本节介绍的区位模型主要有杜能区位、韦伯区位、市场区位、Voronoi 多边形、阿朗索地租理论、过滤论和互换论。其中, 过滤论和互换论是住宅区位模型(王铮等, 2002)。

1. Thunen Model (杜能区位) [杜能 (Von Thunen), 1975]

杜能农业区位论是为了解决企业型农业建立时代的合理农业生产方式是什么的模型。杜能从一个假想空间, 即“孤立国”出发, 探索合理农业生产方式的配置原则, 设想了一个从中心到外围地租不断下降的模型(李小建, 2004)。^[222]

杜能农业区位论主要由三个部分构成: 一是理论前提, 也就是“孤立国”的六个假设条件; 二是形成机制, 其中包括地租变化的计算方法; 三是农业生产方式的空间配置原则, 按照此原则, 在城市的周围, 将形成在某一圈层以某一种农作物为主的同心圆结构, 由中心圆的产业带是自由农业区, 第二环是林业区, 第三环是谷物轮作区, 第四环是谷草轮作区, 第五环是牧业区, 第六环是荒芜土地。克鲁格曼认为, 这个模型涉及到均衡理论、价值理论、土地价格理论等等, 具有广阔的应用前景。但该模型只揭示了从中心到外围的扩散效应, 而没有揭示同时存在的从外围到中心的聚集效应。

2. Weber Model (韦伯区位) [韦伯 (Alfred Weber), 1909]

韦伯工业区位论主要解决厂商的区位决策问题。韦伯通过探索工业生产活动的区位原理, 试图解释人口的地域间大规模移动以及城市的人口与产业的集聚的原因。韦伯区位包括运费指向论, 即在给定原料产地和消费地条件下, 如何确定仅考虑运费的工厂区位, 即运费最小的区位; 劳动费指向论, 即最小劳动费的区位; 集聚指向论, 即一定量的生产集中在特定场所会带来生产或销售成本降低。韦伯是第一个系统地建立了工业区位论体系的经济学者。他的区位论是经济区位论的重要基石之一。

韦伯区位有一类特殊问题——韦伯型设施区位: 与一般韦伯区位相比, 韦伯型设施区位也是对离散的空间区位配置, 不过不是对企业的最佳区位分析, 而是设施的最佳区位分析, 它是一个规划问题。韦伯型设施区位问题是一种特殊的多元韦伯区位问题, 模型通常可以表达为:

$$J = \min_{s \in \Omega} \sum_{s=1}^m \sum_{k=1}^n W_{sk} d(s, k)^a$$

式中, J 为选择的区位; n 为服务对象的数量, m 为设施的数量, $d(s, k)$ 表示服务对象 k 与设施 s 的空间距离, Ω 为所有可能布局设施的位置集合。

与一般韦伯问题不同, 设施区位问题的权系数 W_{sk} 是受约束的, 约束条件由具体应用来决定。

3. 市场区位 (即帕兰德区位)

帕兰德区位模型是为了解决市场竞争问题的模型, 即: 假设空间均为可利用的市场, 现在有若干企业在这个市场上, 他们怎样各自控制一个市场域, 以使自己的利润最大。当空间存在多个生产区位、运输成本不同的企业时, 市场空间被竞争为不同的市场域, 判断空间市场域划分主要依据是到岸价。

帕兰德认为当企业 k 的产品在区域 j 的到岸价相对最小时, 区域 j 即为该企业 k 的市场。到岸价的计算方法如下:

$$p_k^{(j)}(x) = r_k + a_k + c_k x$$

式中, $p_k^{(j)}(x)$ 是企业 k 的产品在区域 j 的到岸价, 它是市场与企业的距离 x 的函数; r_k 、 a_k 、 c_k 分别是企业 k 的期望利润、生产成本和单位运费。

4. 廖什原理 [Lösch, 1954]

杜能区位和韦伯区位都是描述不同的区位是如何布局的, 而廖什原理是解释为什么会出出现这种产业区位, 即正确的区位是纯利润最大的地点, 他认为在垄断竞争情况下, 首先着眼于确定均衡价格和销售量, 即平均生产费用曲线和需求曲线的交点, 再以此确定市场地域的面积和形状。廖什公式如下:

$$R_k = (p_k - c_k x) Q_k - F_k$$

或者表达成单位产品的利润形式:

$$r_k(x) = p_k^{(i)} - a_k^{(j)} - c_k x$$

R_k 、 $r_k(x)$ 是 j 区域生产的产品或单位产品 k 在区域 i 销售获得的利润, $p_k^{(i)}$ 是单位产品 k 在 i 区域的售价, c_k 和 x 分别是单位产品 k 的单位距离运费和 i 区域到 j 区域的距离,

Q_k 、 F_k 分别是产品 k 的生产规模和固定成本, $a_k^{(j)}$ 是在 j 区域生产单位产品 k 的成本。

5. Voronoi 多边形

一个企业的市场域基本是圆形, 但是如果有多个利润、产品趋同的企业便会发生市场域的竞争。Voronoi 多边形就是用来模拟这种竞争条件下市场区位过程所产生的结果, 也就是不同企业如何分割市场的情况。若要判断一个地方或者区域是否属于一个企业的市场区位, 唯一的判据就是区域与空间的距离, 具体计算方法如下:

设空间企业或设施位置集为 $P = \{P_1, \dots, P_n\}$, 则市场域可以被定义为:

$$R(p_i) = \{p \mid d(p, p_i) < d(p, p_j), \forall j \neq i\}$$

式中， R 为市场域， p_i 和 p_j 表示设施位置， d 表示距离。

如果企业有序、等距分布，则产生的结构为正六边形，而实际情况多为不规则多边形。Voronoi 多边形基本示意如图 22 所示。

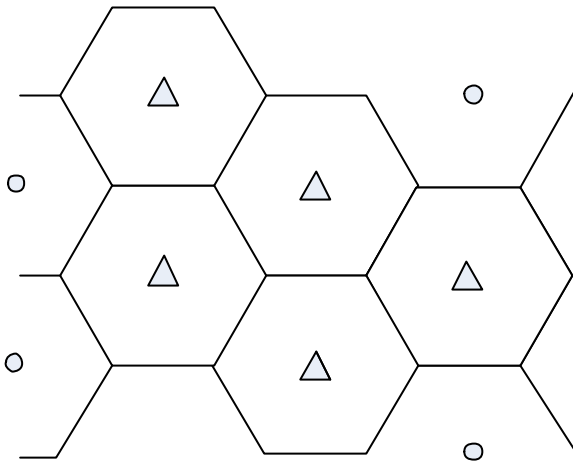


图 22 Voronoi 多边形

6. 阿朗索地租理论[William Alonso, 美国]

阿朗索在杜能理论的基础上，建立厂商对城市土地的投标曲线，然后根据经济学中的一般均衡原理，在土地市场的均衡中创造包括农业、工商业和居住用地在内的土地价值模式。阿朗索将该理论用于讨论不同类型的用地需求，各种用地需求竞争不同区位的土地，他的分析丰富和完善了区位理论。

该模型中，城市是一个无任何特征的平原，区位用到市中心的距离来表示。家庭对区位和消费束的选择用一个静态效用最大化模型来描述。阿朗索的地租理论成为单一城市中心土地利用模式的理论依据。

7. 过滤论[伯吉斯 (E. W. Burgess)]

过滤论认为那些收入最高的家庭往往住在离市中心最远、最新的住宅中，留下以前的住宅由那些收入较低的家庭来居住，最贫穷的家庭则居住在最陈旧的住房中，直到城市中心那些最陈旧的住房被拆除，由中央商务区所取代。但是过滤论不适合政府制定住房政策，因为政府无法要求新住房必须在外围（孟志勇等，2003）。^[223]

斯威尼 (Sweeney) 于 1974 年首先进行过滤论定量化和模型化的研究，在随后发展的模型中充分考虑了维修技术和成本、建筑技术和成本变化等对住宅过滤的影响。

8. 互换论 [温哥 (L. Wingo) 和阿朗索 (W. Alonso) 分别提出]

互换论中假设，任一地区的住房条件取决于住在那里的家庭类型，互换论是需求方的理论。而一个家庭在选择住宅区位时，是在距离城市中心的延长而趋于下降的住宅费用与趋于增加的交通费用之间进行“互换”，并挑选住在综合费用最低的位置。因而住房的开发要按

照家庭的这种需求进行(孟志勇等,2003)

米尔利斯(J.A.Mirrlees)和伊文思(A.W.Evans)对互换论进行了修改,发展成住宅密度理论。它在互换论的基础上再加上人们对住宅密度的要求:当住宅密度与家庭有关时,低密度可以有一个更好的生活环境;密度高则每一单位建筑面积的价格越低。因此开发商开发一个地区时,将按较高的密度为收入较低的居民建房,或按较低的密度为收入较高的居民开发。

2.5.3 区域结构模型(Regional Structure Models)

区域结构模型是用来描述或规划区域空间结构的数学模型。区域空间结构是区域经济结构在地域上的表现形式,它是空间结构单元在空间关联形成的一定模式(pattern)。本节介绍的区域结构模型主要有杜能结构、克里斯泰勒结构、韦伯结构、西蒙模型、城镇体系递阶规模模型、中心-腹地结构、枢纽-网络结构、中心地理论和城市首位度模型(王铮等,2002)

1. 杜能结构

杜能区位在空间扩散过程中形成空间结构,该结构是以中心城市为中心的环形区域和扇形区复合的结构,这类空间结构的共同特点是对空间作了带状划分。

Wilson和Birkin于1987年考虑了空间存在多个中心市场,空间不均匀的情况,对杜能结构进行了发展,得到WB模型(Wilson-Birkin模型)。他们考虑了产业带变化是受产业利润驱动的,以及产品与市场的关系与空间相互作用有关这两点,因而发展了土地的产业利用转化模型。WB模型从微观的企业行为的机制出发,得到宏观的区域结构特征。

2. 克里斯泰勒结构[Christaller, 1933]

当多个市场(或城市)存在时,地域空间会围绕中心进行划分,形成一个个中心点与多边形腹地格局匹配的结构,这种结构称为克里斯泰勒结构。与杜能结构的光滑曲线不同,克里斯泰勒结构的廓道呈多边形;杜能结构的中心地嵌(patch)突出市场性质,而克里斯泰勒结构则更突出产业中心的意义。克里斯泰勒结构是递阶的,一级地域还可以包含二级中心城市和二级地域。克里斯泰勒结构基本结构如图23所示。

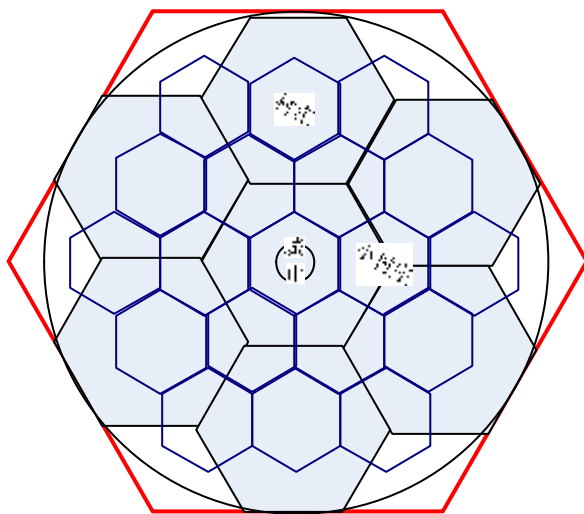


图 23 克里斯泰勒结构图

3. 韦伯结构

韦伯区位中资源、市场和企业或设施以点的形式分布，形成散点型韦伯结构，所以区位中的基本单位都是以点的形式存在的。设施或企业是空间结构的中心——葩嵌，而其他区位单位就是基质。

韦伯结构分为散点型韦伯结构和网络型韦伯结构两种。其中散点型韦伯结构又称为韦伯结构，是韦伯结构的基本形式，散点型韦伯结构的分析模型一般都是设施区位的配置方法。而网络型韦伯结构又称为网络结构，考虑了空间网络的韦伯结构即为网络结构。城市之间都是有道路或其他线路连通的，从而形成由廊道构成的空间结构，将区域中所有的城市用线路连接起来，就可以得到区域的网络结构。通过研究流量和道路的配置，可以得到空间网络最优配置。

4. Simon model (西蒙模型，即城镇体系随机规模模型) [Simon, 1955]

城市群是由不同规模的城市相互配合形成的城镇体系，并由一个中心城市控制整个体系。随机模型假设城镇规模服从某种随机分布，这种分布是城市发展中空间、人口竞争的平衡点。一个很常用的模拟分布是 Pareto 分布：

$$y = AN^{-a}$$

式中， y 为人口数为 N 的城市数目； N 由规范化得到，即总人口除以最小城市的人口数； A 和 a 是经验参数，一般由统计数据给出。

5. 城镇体系递阶规模模型 (Christaller-Lösch model, 克里斯泰勒 - 廖什模型) [廖什]

城镇体系递阶规模模型来源于克里斯泰勒的中心地结构学说，并为廖什发展而得。他认为一个中心城市在地域上控制若干个次级城市，次级城市又控制若干个更小城市，类似于克里斯泰勒结构。递阶模式中，城市群中的城市不仅有层次，而且上级城市对下级城市有经济上和行政上的控制作用，下级城市是上级城市的市场区。该模型可以用于计算各级城市的经济规模（供应量和需求量）。

6. 中心-腹地结构

中心-腹地结构所对应的理论是增长极理论，该理论认为工业不是均衡发展，而是在某一个点形成增长中心。这种结构具有扩张和倒灌两种效应，增长极出现后首先发生倒灌，吸引资源；后期由于空间竞争等效应，中心会向腹地扩张。最后形成一种类杜能结构，由内向外分成四带：核心地带、发展带、退化带和资源前沿区（发展带和退化带的过渡地带）。

7. 枢纽-网络结构 [van Klink, 1998]

枢纽-网络结构就是由于交通线的存在，围绕中心可能形成的以中心为葩嵌、交通线为廊道、其他产业点或城镇为基底的网络结构。该结构有一个典型特征：它是由功能节点构成的空间结构，节点可以是港口（承担贸易功能）城市（作为市场）或者生产功能的单位，这些节点决定区域的经济性质。

枢纽-网络结构强调节点和网络，忽略了中心-腹地结构中的空间连续性，所以二者结合，可以构成区域的基本结构类型。

8. Spatial Structure of Central-Place Systems (中心地理理论) [克里斯泰勒 (W.Christaller), 柏克曼 (M.J.Beckmann)]

中心地理论探讨了一定区域内城镇等级、规模、数量、职能间关系及其空间结构的规律性，并采用六边形图式对城镇等级与规模关系加以概括。每一个中心地都有一个服务范围，相邻同级中心地的服务范围之间的关系可用六边形服务网格来解释。同级中心地的服务范围有围绕中心地呈正六边形分布的趋势，中心地位于六边形服务范围的正中间。许多国家和地区已将中心地理论成功地运用来指导区域规划，城市建设和商业网点的布局（许学强，朱剑如，1998）。^[224]

9. Urban Primacy Model (城市首位度模型) [M. Jefferson (杰佛逊)]

首位分布是指由少数几个大城市占据主导地位的城市规模分布，在这种城市规模体系中，第一大的城市的作用十分突出。所谓首位度就是第一大城市与第二大城市的人口比值，首位度可以用来衡量首位城市的地位。如果一个国家或区域，城市规模呈首位式分布，说明首位城市在国家或区域的社会经济中起着明显的主宰作用（许学强，朱剑如，1998）。

2.5.4 生态环境模型 (Ecological Environmental Models)

生态环境模型是模拟生态环境过程、评价生态环境质量的数学模型。本节主要介绍非点源污染模型、水质模型、地下水模型、景观生态学模型、大气污染扩散模型等五大类的生态环境模型。

(1) 非点源污染模型 (Non-point Source Pollution Models)

非点源污染是指溶解的和固体的污染物从非特定的地点，通过径流过程而汇入接纳水体并引起水体的富营养化或其他形式的污染。非点源污染模型就是指模拟和计算非点源污染过程的模型，本部分介绍的非点源污染模型主要有 HSPF、AGNPS、SWAT、USLE、WEPP 和 ANSWERS。

1. HSPF (Hydrologic Simulation Program-Fortran) [EPA]

HSPF 模型主要模拟综合性的水文、水质过程，主要适用于流域模拟，可以模拟一次或几次的暴雨过程。该模型既可以模拟一般的污染物，又可以模拟有毒有机污染物。详细内容见水质模型中的“HSPF 模型”。

2. AGNPS (Agricultural Non Point Source) [美国农业部 USDA, 1989]

AGNPS 是面向事件的分布式参数模型，模型包括水文、侵蚀和化学物质迁移三个部分。模型对化肥的施用、降雨和径流以及渗透进行了模拟，且其模拟范围可以扩大到土壤和地下水中氮平衡的连续模拟（张瑛，阮晓红，2003）。^[225]

该模型主要用于流域面积大于 200 平方千米农村流域的非点源污染分析。在流域景观特征、水文过程和土地利用规划等研究领域均具有良好的适应性，但不适合用于流域物理过程的长期演变特性，以及土壤侵蚀的时空分布规律等方面的研究。

3. SWAT (Soil And Water Assessment Tool, 土壤雨水评估工具) [Jeff Arnold, 1994]

SWAT 模型是为了预测流域管理措施及气候对水质、泥沙和化学物质的作用而开发的一种连续性的物理模型，包括 SCS 水文模型、改进的通用土壤流失方程 RUSLE。该模型主要用于大型流域，也可以对流域内部的次一级流域进行模拟，其具有一个气象资料生成模块，可对日降雨和温度等进行模拟。另外，该模型增加了一个模块用以模拟侧向水流和地下径流，还可以模拟水池、水库、河道以及沟道中的泥沙、化学物质的泥沙损失量等（金鑫，2005）。

4. USLE (Universal Soil Loss Equation, 通用土壤流失方程) [A.W.Zingg 与 D.D.Smith 分别在 1940 年与 1941 年提出]

USLE 是应用最广的模拟土壤流失的经验模型,主要用于预测面蚀和沟蚀引起的年平均土壤流失。USLE 考虑了降水、土壤可蚀性、作物管理、坡度坡长和水土保持 5 个因子,方程式如下:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

式中, A 为多年年均土壤侵蚀量,单位为 $t/(ha \cdot a)$; R 为降雨/径流侵蚀力因子,单位为 $(MJ \cdot mm)/(ha \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子,单位为 $(t \cdot ha \cdot h)/(ha \cdot MJ \cdot mm)$; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为作物覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子。它们都是无量纲因子,分别定义为各自实际条件下的水土流失量与对应标准小区(标准小区定义为 22.13m/72.6 英尺, 9% 坡度条件, 顺坡耕作且处在休耕状态下的农田)条件下水土流失量的比值。

从上面可以看出, USLE 模型的特点是形式简单,影响因子物理意义明确,计算简单,所以得以广泛的应用;但是正是因为其简单也造成了它结果概化、不能体现土壤侵蚀的物理过程和机理。而且作为一个根据美国近 30 年观测得到经验统计模型,适用性和灵活性必然不高,给它的应用造成了一定的限制(金鑫, 2005)。

美国农业部于 1978 年和 1997 年对 USLE 模型进行了两次修订,得到 RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation(修正通用土壤流失方程), RUSLE 的结构与 USLE 基本相同,但对各因子的含义和算法做出了必要的修正,同时引入了土壤侵蚀过程的概念,如考虑了土壤分离过程等。与 USLE 相比, RUSLE 所使用的数据更广、资料的需求量也有较大提高,同时增强了模型的灵活性,增加了对次降雨土壤侵蚀的预报,适用范围更广,可用于不同系统的模拟。应用 RUSLE 模型,可明确对管理措施中侵蚀率的微小变化所需采取的预防措施,从而增加了该模型的实用性。

5. WEPP (Water Erosion Prediction Project) [美国农业部, 1995 年]

WEPP 模型是目前国际上最为完整,也是最复杂的土壤侵蚀预报模型,它几乎涉及到与土壤侵蚀相关的所有过程,包括天气变化、降雨、截留、入渗、蒸发、灌溉、地表径流、地下径流、土壤分离、泥沙输移、植物生长、根系发育、根冠生物量比、植物残茬分解、农机的影响等子过程。WEPP 模型是基于沟蚀和沟间侵蚀过程及泥沙运移机理的连续模拟,与通用土壤流失方程相比, WEPP 模型最大的优势在于能估算坡面土壤侵蚀的时空分布(罗细芳, 姚小华, 2004)。^[227]

WEPP 模型可模拟的流域物理过程有:日土壤水分平衡性、不同植被条件下(农作物、林地和草地等)的日蒸发散、年作物产量、畜牧产量预测、径流、灌溉时的侵蚀、林地侵蚀、细沟和沟间侵蚀、农业管理措施对侵蚀及水文过程的影响等。

6. ANSWERS (Areas Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation) [Beasley 和 Huggins 在基于 20 世纪 70 年代的原有 ANSWERS 模型基础上建立]

ANSWERS 是一种分布式物理过程模型,可用于评估土地利用和管理措施等的变化,对土壤侵蚀所造成的影响和土壤侵蚀的空间变化,可以模拟暴雨期间和雨后流域的特性。ANSWERS 模型可以计算径流传输条件下的土壤流失量(汪东川, 卢玉东, 2004)。^[228]

ANSWERS 模型结构化程度较高, 主要包括 3 大模块: 径流和入渗、泥沙、蒸发散。ANSWERS 模型的最新版本是 ANSWERS-2000, 它是于 20 世纪 90 年代中期开发的连续性模拟模型。在这个版本中, 养分模块对入渗进行了校正与改进, 并加入了土壤湿度与植物生长部分, 以允许进行长期而连续的模拟。

(2) 水质模型 (Water Quality Models)

水质模型是用来解释、模拟、预测河流、河口、湖泊和水库等水体的水质, 并进行污染管理的数学模型。本部分介绍的水质模型主要有 S-P 模型、MIKE 模型体系、QUAL 模型体系、WASP、BASINS 模型、HSPF、CE-QUAL-R1 与 CE-QUAL-W2 以及 Vollenweider 模型, 其中 Vollenweider 是湖泊 (水库) 水质模型。

1. S-P 模型 (Streeter—Phelps) [斯特里特 (H. streeter) 和菲尔普斯 (E. Phelps)]

S-P 模型是最早的水质模型, 这个模型可描述一维稳态河流中的 BOD-DO 的变化规律, 它广泛地应用于河流水质的模拟预测中, 也用于计算允许最大排污量 (汪家权等, 2004)。^[229]

该模型的主要假设为: DO 浓度仅取决于 BOD 反应与复氧过程, 并认为有厌氧微生物参与的 BOD 衰变反应符合一级反应动力学; 水中溶解氧的减少是由于含碳有机物在 BOD 反应中的细菌分解引起, 与 BOD 降解有相同速率; 由于氧亏和湍流而引起复氧, 复氧速率与水中氧亏成正比。

在一些研究中针对不同情况对 Streeter-Phelps 模型进行了一些修正, 如 Thomas 修正、Dobbins-Camp 修正、O'Connor 修正等。

2. MIKE 模型体系 [DHI (丹麦水动力研究所)]

MIKE 模型体系包括 MIKE11、MIKE21 和 MIKE3。MIKE11 是一维动态模型, 能用于模拟河网、河口、滩涂等多种地区的情况, 研究的变量包括水温、细菌、氮、磷、DO、BOD、藻类、水生动物、底泥、金属以及用户自定义物质。它有友好的用户界面, 能处理许多不同类型的水动力条件, 而且研究的水质变化过程很多 (汪家权等, 2004)。

MIKE21 是 MIKE11 的姊妹模型, 在全世界广泛应用, 用来模拟在水质预测中垂向变化常被忽略的湖泊、河口、海岸地区。MIKE3 是另一个由 DHI (Danish Hydraulic Institute, 丹麦水力研究所) 开发的模型, 与 MIKE21 类似, 但它能处理三维空间。MIKE 模型体系在中国也已有应用实例。

3. QUAL 模型体系 [EPA]

QUAL 模型可按用户所希望的任意组合方式模拟 15 种水质成分, 包括: BOD、DO、温度、藻类-叶绿素 a、有机氮、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、有机磷、溶解磷、大肠杆菌等。QUAL 模型可用于研究流入的污水负荷对受纳河流的水质影响, 也可用于非点源问题的研究。它既可作为稳态模型也可作为时变的动态模型 (汪家权等, 2004)。

QUAL 模型适用于混合较好的枝状河流。它允许河流有多个排污口、取水口及支流, 允许入流量有缓慢变化。其基本方程是一个平移-弥散质量迁移方程, 同时考虑了水质组分间的相互作用以及组分外部源和汇对组分浓度的影响。

QUAL 模型体系主要包括以下几种: QUAL2- 水质综合模型, QUAL2- 模型, QUAL2E, 以及 QUAL2E-UNCAS 等。

4. WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) [EPA]

WASP是一种水质模型系统,可用于对河流、湖泊、河口、水库、海岸的水质模拟。它包括水体模拟和底泥模拟两部分,允许用户研究1、2、3维系统和多种污染物类型。该模型可以解释和预测各种自然的和人为的因素造成的水质变化,有助于污染管理的决策(孙颖等, 2001)。^[230]

WASP包括两个独立的计算程序: DYNHYD和WASP,它们可以联合运行,也可以独立运行。DYNHYD是水动力学程序,它模拟水的流动;WASP是水质程序,它模拟水中各种污染物的运动与相互作用。

WASP最原始的版本是于1983年发布的,它综合了以前其他许多模型所用的概念。之后WASP模型又经过几次修订,如WASP5及WASP6。

5. BASINS 模型[EPA]

BASINS 模型是多目标环境分析系统,可对水系和水质进行模拟。它能模拟标准的富营养化过程,也能模拟其他水质指标。BASINS 是个多用途分析系统,它集成了GIS、美国国家分水岭数据与美国最先进的环境评估及造型模型。BASINS 有三个目标:简化环境信息的核查、支持点源和非点源的交替分析、提供完整的水分水岭和建模框架(汪家权等, 2004)。

该模型由6个相互关联的能对水系和河流进行水质分析、评价的组件组成,它们分别是国家环境数据库、评价模块、工具、水系特征报表、河流水质模型、非点源模型和后处理模块。

6. HSPF(Hydrological Simulation Program Fortran Model)[Johansen and others(1984)]

HSPF 是一套模拟流域水文、水质和常规有毒有机污染物情况的模型系统,可利用降雨、温度和太阳辐射的资料,土地利用类型资料,土地管理实践资料模拟发生在分水岭的水文、水力和水质过程。^[31]

HSPF 能模拟复杂的非点源污染的水文传输过程,包括泥沙迁移和污染物运动。尽管该模型是一个集中参数模型,但它可以整个流域分成若干水文特征相同的地块单元,在每个单元中分别输入水文参数和流域数据,来模拟每个地块单元的径流过程。

7. CE-QUAL-R1与CE-QUAL-W2[美国陆军工程兵团水道实验站]

CE-QUAL-R1 模型可以模拟水质参数垂向位置随时间的变化。它将一个水库概括为垂直方向一系列的水平层,且每一层内的热能和杂质都均匀分布。CE-QUAL-R1 可以模拟很多化学和生物过程(孙颖等, 2001)。

CE-QUAL-W2 是二维横向平均水动力学和水质模型。该模型由直接耦合的水动力学模型和水质输移模型组成。该模型原来是针对水库研制的,但它也能够用于河流和分层的狭窄河口。

8. Vollenweider模型[Vollenweider, 1975, 加拿大]

Vollenweider 模型是一种营养盐模型,以磷为主的预测模型,即把磷当作限制性营养因素。认为湖水中总磷浓度的变化主要受总磷的流入、流出及其在湖中的沉降作用的影响而提出的(饶群, 芮孝芳, 2001; 全为民等, 2001)。^{[231] [232]}

$$V \frac{dp}{dt} = W - Q \cdot p - v_a \cdot A \cdot p$$

式中, V 为湖泊容量,单位为 (m^3); p 为总磷浓度,单位为 mg/m^3 ; t 为时间,单

[31] http://www.ccepr.org/huanjing/frontend/fangxiangmain_19.htm

位为 a ; W 为磷年负荷量, 单位为 mg/a , Q 为湖水流出量, 单位为 m^3/a ; V_a 为沉积速率, 单位为 m/a ; A 为湖泊表面积, 单位为 m^2 。

该模型未考虑底质与水体界面的磷交换过程, 而且不能反映磷分布的时空变化。

(3) 地下水模型 (Groundwater Models)

地下水模型是用来模拟地下水流场及其溶质浓度变化空间分布的数学模型。本部分介绍的地下水模型主要有 MODFLOW、GMS、FEFLOW、Visual Groundwater 和 MT3DMS。

1. MODFLOW (The modular finite-difference groundwater flow model) [McDonald 和 Harbaugh, 20 世纪 80 年代]

MODFLOW 是一套专门用于孔隙介质中三维有限差分地下水流数值模拟模型。MODFLOW 已经在全世界的科研、生产、环境保护、水资源利用等许多行业和部门得到了广泛的应用, 成为最为普及的地下水运动数值模拟的计算软件。它已被广泛用来模拟井流、河流、排泄、蒸发和补给对非均质和复杂边界条件的水流系统的影响。

加拿大 Waterloo 水文地质公司于 1994 在 MODFLOW 的基础上开发研制的 Visual MODFLOW, 是目前国际上最为流行且被各国同行一致认可的三维地下水流和溶质运移模拟评价的标准可视化专业软件系统。Visual MODFLOW 允许用户单独或共同执行水流模型 (MODFLOW)、流线示踪模型 (MODPATH) 和溶质运移模型 (MT3D)。

2. GMS (Groundwater Modeling System, 地下水模拟系统) [美国 Brigham Young University]

GMS 是美国 Brigham Young University 的环境模型研究实验室和美国军队排水工程试验工作站在综合 MODFLOW、FEMWATER、MT3DMS、RT3D、SEAM3D、MODPATH、SEEP2D、NUFT、UTCHEM 等已有地下水模型的基础上开发的一个综合性的、用于地下水模拟的有图形界面的模型。GMS 模型模块多、功能全, 几乎可以用来模拟与地下水相关的所有水流和溶质运移问题 (徐乐昌, 2002)。^[233]

3. FEFLOW (Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System) [加拿大 Waterloo 水文地质公司]

FEFLOW 是三维的基于有限元的地下水模拟可视化软件包。它能够解决下列地下水模拟问题: 完全瞬时、半瞬时、稳态地下水流与溶质运移; 随时间变化的实体属性和约束边界条件; 饱和与不饱和流动; 包含滞留潜水面的承压与不承压含水层; 带有非线性吸附作用、衰变、对流、弥散的化学质量运移; 考虑贮存、对流、热散失、热运移的流体和固体热量运移; 密度变化的流动 (海水入侵等) (徐乐昌, 2002)。

4. Visual Groundwater [加拿大 Waterloo 公司]

Visual Groundwater 将图形技术与专业工具有效结合, 用于处理、显示、动画表现包括地层、土壤污染带、地下水高程、地下水浓度、地下水模拟结果等在内的复杂的地下水表面数据。将 Visual Groundwater 与其他地下水模拟模型集成使用, 就可以构建可视化功能强大的地下水模拟平台环境 (徐乐昌, 2002)。

5. MT3DMS [C. Zheng 和 P. Wang, 1998]

MT3DMS 软件不但能模拟地下水中污染物的对流、弥散, 而且能够同时模拟多种污染物组分在地下水中的运移过程以及它们各自的变化反应过程 (不包括各种组分之间的化学反应), 包括平衡控制的等温吸附过程、非平衡吸附过程、放射性衰变或简单生物降解过程。

MT3DMS 广泛适用于各种不同条件下地下水中污染物的运移问题,有关污染物的运移研究大都可采用 MT3D/MT3DMS 进行数值模拟。^[32]

(4) 景观生态学模型 (Ecological Landscape Models)

景观生态学模型是用于解释景观生态学现象、模拟景观生态学过程的数学模型。本部分介绍的景观生态学模型主要有“物种-面积”模型、M-W 模型、Levins 模型、空间显式模型和 JABOWA 模型。其中“物种-面积”模型和 M-W 模型是物种丰富度模型,Levins 模型和空间显式模型是复合种群模型,而 JABOWA 是林隙模型(邬建国,2000)。^[234]

1. “物种-面积”模型 [Preston, 1962]

物种-面积模型是描述岛屿中物种的丰富度随岛屿(广义:指海洋岛和陆桥岛等)面积或者陆地群落的取样面积呈单调增加趋势的模型,该模型的主要形式如下:

$$S = cAz$$

式中, S 为物种丰富度; A 为物种存在的空间面积; c 为物种的分布密度,反映了地理位置对物种丰富度的影响。 z 为统计指数,理论值为 0.263,通常为 0.18-0.35。

2. M-W 模型 (MacArthur-Wilson Model, 岛屿生物地理学平衡模型) [MacArthur and Wilson, 1967]

M-W 模型是描述岛屿的物种丰富度随着迁入和灭绝率的变化而达到动态平衡的模型。迁入率和灭绝率与距离和面积有关。该模型核心公式如下:

$$\frac{dS(t)}{dt} = I_0 S_p - (I_0 + E_0) S(t)$$

式中, I_0 : 单位种迁入概率或迁入系数; E_0 : 单位种灭绝概率或灭绝系数; S_p : 大陆物种库中潜在迁入种的数量。

3. Levins 模型 (spatial implicit model, 空间隐式模型) [Levins, 1969]

Levins 模型是用于模拟复合种群动态的模型,不直接考虑生境斑块的空间特征,从而使系统得到简化的模拟方法,方便了数学推导和理论探究,但是大大限制了其真实性。Levins 模型的一般形式如下:

$$\frac{dP}{dt} = mP(1-P) - eP$$

式中, P 用以表示已被一个种群所占据的生境斑块数量与总生境斑块数量之比,简称斑块占有率。 e 为物种灭绝系数; m 为物种定居系数。

4. Spatial Explicit Model (空间显式模型)

空间显式模型是用于模拟复合种群动态的模型,明确考虑生境斑块的空间特征及其亚种群动态,真实性得以增强,但是数学形式的复杂性却限制了它应用的普遍性。该类模型使局部种群内部动态、生物个体在缀块间的运动以及各种景观空间特征和过程都可以明确的包括在模型中(许冬焱,2003)。^[235]

IMF (关联函数模型) 是其中最简单并在许多情况下是最有用的。IMF 是一个基于单个

[32] <http://ere.coe.pku.edu.cn/hydro/download/mt3d.htm>

生境斑块的一阶线性马尔可夫模型，其中的生境在定居与未定居状态间有恒定的转换概率。

5. JABOWA 模型 [Botkin, Janak, Walls, 1972]

JABOWA 模型是第一个对复杂自然生态系统成功实现计算机模拟的模型。该模型对全球变暖、酸雨和商业性森林开发都进行了分析，可以改变森林位置、温度、降雨量、海平面、土壤等参数，而且可以模拟各种采伐活动 (Daniel B. Botkin, 1993) ^[236]

Shugart, H.H.和 D.C. West 于 1977 年通过改进 JABOWA 模型而得到的模拟田纳西东部林区的模型——FORET 模型。有以下几种改进：

(1) 安装了两个模块：SPROUT (树桩与根的萌发模拟)，这是因为考虑到无性繁殖是林区繁殖的主要模式，尤其是阔叶树种；GAUSS (一个标准随即数值发生器)，回返一个 DEGD 值 (生长期)。

(2) 移除两个模块：SITE (给出植物生长点的环境质量的模块)；CUT (采伐模拟)。

(3) 其他修改：把树木的种类从 13 增加到 33；把最小单元从 10m x 10m 的正方形区域变成直径为 1/12ha 的圆形区域。

(5) 大气污染扩散模型 (Air Pollution Dispersion Models)

大气污染扩散模型是一种用于处理大气污染物在大气中(主要是边界层内)输送和扩散问题的数学模型。本部分介绍的大气污染扩散模型主要有点源扩散的高斯模型、ISC3 模型、CALPUFF 模型、ADMS、UAM、Model-3 和 SMOKE 模型等。

1. 点源扩散的高斯模型

高斯模型是用于模拟高架连续点源污染的模型，它建立在一个三维坐标系基础上的，以排气筒的底端作为坐标原点；沿风向建立 X 轴；在水平面内与 X 轴垂直的是 Y 轴；在坐标原点垂直指向天空的是 Z 轴 (陈春云等, 2003) ^[237]

高斯模式的主要假设如下：

- (1) 污染物浓度在 y、z 轴上的分布为正态分布；
- (2) 风只在一个方面做稳定的水平运动，即 $u = \text{常数}$ ；
- (3) 污染物在扩散中没有衰减和新增；
- (4) 在 x 轴方向上，平流输送作用远大于扩散作用；
- (5) 浓度分布不随时间改变；
- (6) 大地表面是足够平坦的。

点源扩散的高斯模型有如下两种形式：

1) 不考虑地面对污染物的反射作用的形式：

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2pu_x s_y s_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2s_y^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2s_z^2}\right)$$

式中， Q 为单位时间排放量，单位为 mg/s ； s_y 为垂直于平均风向的水平横向扩散参数，单位为 m ； s_z 为铅直扩散参数，单位为 m ； u_x 为排气筒出口处的平均风速，单位为 m/s 。

2) 考虑地面反射作用的形式：

$$c(x, y, z, H) = \frac{Q}{2pu_x s_y s_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2s_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2s_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2s_z^2}\right) \right\}$$

式中， H 为点源距地面的高度，单位为 m 。其余参数同上式。

2. ISC3 模型，Industrial Source Complex[EPA]

ISC3 模型适用于计算中尺度复合工业源（点源、线源、面源等）排放的大气污染物（如 SO_2 、TSP、 PM_{10} 、 NO_x 和 CO ）对环境空气质量的影响。该模型能对近地面空气污染物浓度进行定量估算，以及对颗粒物的干、湿沉降量进行计算。模型可模拟的时段包括年平均、日平均和逐时浓度，适用于极坐标、直角坐标等体系。

3. CALPUFF 模型[美国加州空气资源局（CARB）]

CALPUFF 是一个多层、多种类、非稳态的高斯烟团扩散模型，可模拟变化的气象条件对污染物传输、转化和去除的影响。CALPUFF 的应用范围可从几十千米延伸到几百千米。模型不但包括了对近地影响的计算（如建筑物阻挡、烟羽抬升、地形影响等），而且考虑了长距离的影响的计算（如干沉降和湿沉降对污染物的去除作用化学转化、垂直风剪切、水面传输等）。模型可模拟各种无机污染物（如 SO_2 、 SO_4^{2-} 、 NO 、 NO_2 、 HNO_3 、 NO_3^- 等）和有机气溶胶的气相化学转化过程，同时也包括 SO_2 到 SO_4^{2-} 的液相化学转化过程。模型将复杂的地形影响详细参数化，并考虑了地形冲击、侧壁去除和陡峭地形对侧向烟羽延伸的影响。^[33]

4. ADMS（城市大气污染物扩散模型）[英国剑桥环境研究中心（CERC）]

ADMS 综合了典型的污染源大气扩散模型，同时增加了对污染物扩散过程中的化学反应和总悬浮微粒沉降的模拟，考虑了地形、地表粗糙度、气象条件的影响，最大限度地考虑了污染物扩散的影响因素。它的优点是气象参数可使用气象部门的常规数据。

由于稳定条件下的污染物扩散形式比较简单，基本符合高斯扩散模型的正态分布，ADMS 更主要考虑的是在中性至不稳定条件下的污染物扩散数学表达方式。在不稳定条件下，模型根据污染源自身的性质决定其易于沉降或是易于扩散，并采用不同的计算方式。在近中性至中性条件下，污染源自身性质所决定的扩散态势与气象条件的影响相比可以忽略不计，此时采用 Loft 模式计算污染源的扩散。

5. UAM（Urban Airshed Model）[NAPCA（EPA的前身），系统应用技术公司（Systems Application Inc.），20世纪70年代]

UAM 模型至今已经过了 20 多年的不断应用、评估、升级、扩展和改进。UAM-V 是一个三维网格化的光化学数值模型。UAM-V 模型基于大气扩散或化学组分连续方程，该方程

[33] <http://www.china-eia.com/indexcontent/jszc/gwzlhpmjs.htm>

描述了各污染物的排放、传输、扩散、化学反应和去除等过程的内在质量平衡关系。UAM-V 模型的主要特点有利用粗细网格嵌套进行多种精度模拟、嵌套网格间的双向交换；适用于多种坐标系统、烟羽网格化处理等。UAM-V 模型采用了改进过的 CB-IV 化学动力学机理，可模拟对流层内从 NO_x、VOC 和 CO 等前体物生成臭氧的化学和物理过程。在“无相互反应”模式下，UAM-V 模型能够模拟冬季的 CO 浓度场。UAM-VPM 模型则用来模拟局部或区域地区的一次颗粒物和二次颗粒物的排放、产生、输送和沉积过程。模型可模拟逐时浓度、日均浓度、月均浓度乃至年均浓度（刘烽，吴增茂，1999）。^[238]

6. Model-3（第三代空气质量模拟系统）[EPA，20世纪90年代]

该模型不再区分单一的污染问题，提出了“一个大气”的概念，将整个大气作为研究对象，在各个空间尺度上模拟所有大气物理和化学过程。该模型可以模拟污染物在大气中的传输扩散过程、气象化学过程、液相化学过程、气溶胶化学和动力学过程、云化学和动力学过程等。模型可以输出包括各种气态污染物和气溶胶组分在内的80多种污染物的逐时浓度，以及逐时能见度和干、湿沉降等，模拟输出结果可以使用可视化工具和分析工具进行后续处理（孙培德，楼菊青，2005）。^[239]

Model-3 仍然在不断更新和完善，不断增加大气科学和计算技术领域的新成果；增加新的模块和算法；开发和完善空气质量预报系统；开发决策支持系统，直接为决策者服务。

7. SMOKE 模型[美国北卡罗来纳微电子中心]

SMOKE 可以对排放数据进行处理，并且具有排放清单计算功能。SMOKE 针对固定点源、固定面源、流动源、天然源采用了不同的处理方法。对于固定点源，根据气象模式提供的参数计算点源的烟羽抬升，区分高架点源和低矮点源；对于固定面源，采用空间插值的办法将排放清单网格化；对于流动源，要求输入机动车辆数据之后采用与固定源类似的方法进行网格化和时间分配；对于天然源，输入植被覆盖资料，根据气象模式提供的土地类型和气象数据，计算逐时的、网格化的天然源排放量（孙培德，楼菊青，2005）。

2.5.5 城市经济模型（Urban Economic Models）

城市经济模型是用来解释、模拟、预测城市经济增长、空间分布的数学模型。本节介绍的城市经济模型主要有城市经济增长模型、空间经济学模型和其他经济模型三个部分，其中，城市经济增长模型包括凯恩斯乘数模型、哈罗德—多马经济增长模型、索洛增长模型、米德模型和累积因果模型，空间经济学模型包括 D-S 模型、CP 模型、FC 模型、FE 模型、GS 模型和垂直联系系列模型，而其他经济模型有 IS-LM 模型、AD-AS 模型、MPS 和 DRI 模型。

（1）城市经济增长模型

1. Keynesian Multiplier Model（凯恩斯乘数模型）[J. M. Keynes]

凯恩斯乘数模型用来模拟总支出的变动对国民收入变动的影响，用来解释短期产出水平是如何被决定的。经济学中的乘数，即当某一经济量值增加时所引起另一经济量值增加的倍数。其主要内容是：一定的投资增量将会引起一连串连锁反应，在具有社会闲置资源的条件下，增量投资将会引起对投资品需求的增加，由此导致投资品生产部门的收入增长。而收入增长又会引起消费品生产部门的收入增长。这种一环套一环的连锁反应，其最终结果是将获得一个若干倍于最初投资增量的国民收入增量。

2. Harrod-Domar Model（哈罗德—多马经济增长模型）[哈罗德（Harrod，1948）和多马

(Domar, 1957)]

哈罗德—多马模型以发达资本主义经济为背景，试图以凯恩斯的有效需求理论为基础。重点研究发达经济的长期稳定增长的必要条件，并寻求一种平稳而持续的经济运行所必需的经济增长率。该模型揭示了社会经济实现既无失业又无通货膨胀并在长期内稳定增长的条件（郭庆旺，1995）。^[240]

3. Solow Growth Model (索洛增长模型) [罗伯特·索洛 (Robert M. Solow)]

索洛增长模型是研究各种不同因素是如何对经济增长和发展产生影响的长期经济增长模型。劳动力与资本之间可相互替代的假设使得经济增长过程具有调整能力，因此该理论模型更接近于现实。所以该模型打破了一直以来奉行的“资本积累是经济增长的最主要的因素”的理论，指出长期经济增长除了要有资本以外，更重要的是靠技术的进步、教育和训练水平的提高。该模型是创立新古典经济增长模型的先驱（郭庆旺，1995；周伟林等，2004）。^[241]

4. 米德模型 [詹姆斯·爱德华·米德 (J. E. Meade), 剑桥大学]

米德模型是一种新古典经济增长模型，旨在表明最简单的古典经济体系形式能在均衡增长过程中运转的方式。该模型假定所有生产单位都是相互独立的，而且规模收益不变。由于这些假设的不现实性，米德增长模型不适用于欠发达国家，不过米德模型在阐明人口增长、资本积累以及技术进步对国民收入增长率和人均实际国民收入的影响方面有比较多的应用（郭庆旺，1995）。

5. 累积因果模型 [缪尔达尔 (Myrdal, 1957)]

累积因果模型强调城市经济中普遍存在着的规模报酬递增现象，认为资本和劳动力可以同时流入城市，而不像新古典城市经济增长模型认为的这两类要素呈现反向的流动趋势。不仅如此，规模报酬递增的条件还意味着城市间经济增长的差距可能在长期内存在，甚至可能扩大。该模型是一个长期以来对主流的新古典城市经济模型构成巨大挑战的理论。

(2) 空间经济学模型

1. D-S 模型 (Dixit-Stiglitz, 垄断竞争模型) [迪克希特和斯蒂格利茨]

D-S 模型是一个分析单个企业生产的规模收益递增现象的模型。在 D-S 模型中不是全面地考虑各种差异化的产品与其背后的诸多经济资源间的相互关系，而是用不变替代弹性函数 (CES 函数) 形式表示这种关系。该模型将单个消费者选择的离散性与市场的连续性结合起来，已经成为国际经济学、经济增长理论和空间经济学等诸多经济领域的理论基础。

2. CP 模型 (核心-边缘模型) [克鲁格曼, 1991]

该模型所考虑的是两种要素、两个部门、两个地区，也可以看成 $2 \times 2 \times 2$ 模型。两种要素是指不可流动的农业劳动力和可以流动的工业劳动力；两个部门是指工业和农业。核心-边缘模型模拟工农业需求、供给、价格以及劳动力流动等现象，主要考虑的是工业部门和工业劳动力的迁移问题（安虎森，2005）。^[242]

3. FC 模型 (Footloose Capital Model, 自由资本模型) [马丁和罗格斯, 2001]

FC 模型中引入了物质资本生产要素并把它作为企业的固定投入，资本的空间流动受名义资本收益率差异的驱动。该模型中生产资本的转移不会导致支出空间转移，而且不存在区域间的人口迁移，即区域生活成本的差异不会引起劳动力的流动。该模型对于描述初始对称经济现象没有太多意义，但是对分析非对称空间经济却很有优势，并在多区域的贸易政策分析中有着广泛的应用（安虎森，2005）。

4. FE 模型 (Footloose Entrepreneur Model, 自由企业家模型) [福斯里德于 1999 年, 奥塔维诺于 2001 年分别独立提出]

FE 模型中企业的固定投入来自于人力资本或企业家才能, 资本的转移会导致生产空间的转移; 生产空间的转移会导致消费支出的空间转移, 也即市场空间变化; 市场吸引力变化会导致人力资源转移。FE 模型中, 只有固定投入具有空间流动性, 而可变投入不具备空间流动性 (安虎森, 2005)。

5. GS 模型 (世界溢出模型) [马丁和奥塔维诺, 1999]

GS 模型是指知识和技术溢出发生在不同地区和企业之间, 知识和技术溢出不受空间距离影响的模型。GS 模型假设全球经济由两个国家或者区域、两个部门 (工业和农业)、两种要素 (资本以及劳动) 组成。GS 模型表明, 资本积累可以导致突发性聚集, 因此经济增长能改变经济区位 (安虎森, 2005)。

鲍德温、马丁和奥塔维诺于 2001 年改进了 GS 模型, 得到本地溢出模型——LS 模型。LS 模型改变了 GS 模型认为溢出不受空间距离影响的假设, 明确了空间对知识资本溢出效应的阻碍作用, 从而使知识资本的溢出效应具有部分本地化的特征, 这样就可以解释一个地区的创新源形成之后不容易被取代的原因。

6. 垂直联系系列模型

垂直联系系列模型认为在区际不发生劳动力流动的情况下, 也可以导致产业的聚集。由于劳动力在本区域内不同部门的流动性远大于区域间的流动性, 因而从国际角度来看, 该特征具有重要意义。垂直联系系列模型主要有 FCVL 模型和 FEVL 模型, 其中 FCVL 模型 [罗伯特·尼科德, 2002] 是 FC 模型的一个拓展, 它把垂直联系和资本流动综合起来考虑, 这在分析国家间或区域间产业聚集过程而言, 具有非常重要的意义。因此 FCVL 模型在分析具体的经济政策等方面具有优势 (安虎森, 2005)。

而 FEVL 模型 [奥塔维诺, 2002] 能够解出模型中内生变量的显性解。因此在分析、制定包含垂直联系的经济政策时, 使用 FEVL 模型就比较合适。

(3) 其他经济模型

1. 希克斯 - 汉森模型 (IS-LM 模型)

希克斯 - 汉森模型通过实现产品市场与货币市场的同时均衡来实现国民收入和利率的同时均衡, 这两者的平衡用 IS (投资 (I) - 储蓄 (S) 曲线) 曲线和 LM 曲线 (货币需求 (L) - 供给 (M) 曲线) 的交汇来模拟: IS 曲线上的每一点都表示储蓄等于投资, 并且同既定的利率和收入水平相适应; LM 曲线表明的是货币的需求与货币供给相等的利率和收入的组合。^[34]

收入的均衡水平是由 IS 曲线与 LM 曲线的交点决定的, 在收入均衡点上, 同时存在着以 LM 表示的货币市场的均衡和以 IS 表示的资本市场的均衡。

2. 总需求 - 总供给模型 (AD-AS 模型)

总需求 - 总供给模型将总需求与总供给结合在一起, 考察价格变化的原因以及社会经济如何实现总需求与总供给的均衡。模型的基本形式是联立的总需求和总供给曲线方程。主流学派认为总供给 - 总需求分析可以用来解释萧条状态、繁荣状态和滞胀状态的短期收入和价

[34] http://www.em-imu.cn/education/ed_bachelor/courseware/wangyan_xfjj/hgjy

格水平的是由什么机理决定的,也可以用来解释充分就业状态的长期收入和价格水平是由什么机理决定的。^[35]

3. MPS (MIT-Penn-SSRC)

MPS 模型是由美国联邦储备局、麻省理工学院和宾夕法尼亚大学共同研制的。MPS 是一个大型季度计量经济模型,共有 6 个主要子模型,包括 75 个随机方程和 96 个非随机方程。它可以用于短期经济预测(何新华, 2001)。^[243]

4. DRI 模型[美国数据资源公司 (Data Resource Inc)]

DRI 模型是美国最大的经济模型之一,它可用于结构分析预测和政策评价各方面。DRI 模型吸收了凯恩斯主义经济学、新古典经济学、货币学派的最新观点。模型有 7 个主要子模型,包括 379 个随机方程及 339 个非随机方程,并有 170 个外生变量。

2.5.6 人口模型 (Population Models)

人口模型是用来解释、模拟和预测人口增长、分布和流动的数学模型。本节介绍的人口模型主要有马尔萨斯人口模型、罗杰斯蒂人口模型、Leslie 人口模型、刘易斯二元经济模型、托达罗人口流动模型和人口再分布理论。

1. Malthus's population model (马尔萨斯人口模型) [英国人口统计学家马尔萨斯, 1789]

马尔萨斯人口模型是假设在人口自然增长过程中,净相对增长是常数,即单位时间内人口的增长量与人口成正比,从而推导并求解人口随时间变化的数学模型。模型基本公式如下:

$$N(t + \Delta t) - N(t) = rN(t)\Delta t$$

式中, $N(t)$ 为 t 时刻的人口数量, $N(t + \Delta t)$ 为 $(t + \Delta t)$ 时刻的人口数量, r 为人口净相对增长率。

2. Logistic Population Model (罗杰斯蒂人口模型, 又称为阻滞增长模型) [荷兰生物数学家 韦尔侯斯特 (Verhulst), 1838]

由于资源的有限性,随着人口的增加,自然资源环境条件等因素对人口增长的限制作用越来越显著,该模型引入常数 a , 用来表示自然环境条件所能容许的最大人口数,从而进行人口预测。该模型的缺点之一是 N_m 不易确定,事实上, N_m 是随着生产力水平的提高而增大的。该模型曾用于检验美国从 1790 年到 1950 年的人口,发现模型计算的结果与实际人口在 1930 年以前都非常吻合,自从 1930 年以后,误差愈来愈大,原因就在于 N_m 的变化。

3. Leslie 人口模型[20 世纪 40 年代]

Leslie 人口模型是一个预测人口按年龄组变化的离散模型。模型中将人口分成若干年龄组,同时假设各年龄组的男、女人口分布相同,这样就可以通过只考虑女性人口来简化模型。Leslie 模型将各组人口数量之间的关系用出生率和死亡率联系起来,从而建立起 Leslie 矩阵,并通过该矩阵对未来人口进行预测。

[35] http://www.em-imu.cn/education/ed_bachelor/courseware/wangyan_xfjj/hgjy

4. Lewis's Dual Economic Model (刘易斯二元经济模型) [W. A. Lewis (刘易斯), 1954年]

刘易斯模型是关于人口迁移与城市化动力的模型。刘易斯认为经济的发展依赖于现代工业的劳动力,劳动力的转移过程可概述如下:工业部门的获利用于投资进行生产扩张,吸引农村人口向城市转移,这个过程进行到农村剩余劳动力全部被工业部门吸收完为止。该模型的政策意义是,应该加速城市工业部门的发展,加快城乡人口流动,尽快实现工业化(张树安, 2005)。^[244]

在刘易斯二元经济模型的基础上,费景汉(John Fei)和拉尼斯(Gustav Ranis)进一步修正和发展了该模型,提出了以分析农业富余劳动力转移为核心、重视技术变化的“费—龙尼斯模型”(The Fei-Ranis Model)。该模型将农村劳动力向城镇的转移与工农业的发展联系起来。

5. Todaro model of population migration (托达罗人口流动模型) [M. P. Todaro (托达罗), 20世纪60年代]

托达罗人口流动模型是模拟农村人口向城市迁移的模型。该模型认为农民向城市流动的原因是预期的而不是现实的城乡工资差异,而且可能出现人口流动率超过工作机会增长率的现象,从而产生高失业率。该模型的政策意义是,应该消除扩大城乡实际收入差异的措施,发展农村经济才是解决城市失业问题的根本出路(周天勇, 2001)。^[245]

6. 人口再分布理论[Simon Smith Kuznets (西蒙·史密斯·库兹涅茨), 1955]

人口再分布理论认为人口分布变动是适应经济机会变化的结果。人口过程可以通过出生率和死亡率的变化等方式来适应经济发展,人口流动而形成的人口再分布是其中的主要方式,因为它更迅速而且直接。再分布作用具体表现在两个方面:一方面,伴随着经济发展的人口增长会自发刺激人口从过度密集地区流向相对稀疏的地区;另一方面,经济增长会通过工业化、城镇化等形式对人口分布产生更为重大的影响。

2.5.7 交通模型 (Traffic Models)

本节介绍的交通模型主要有车辆跟驰模型、交通排队模型、交叉口延误模型、宏观交通流模型和交通仿真软件五大类,其中,车辆跟驰模型主要包括刺激—反应模型、安全距离模型、生理—心理模型、模糊推理模型和元胞自动机模型,交叉口延误模型主要分为有信号交叉口的稳态延误模型和瞬态延误模型,以及无信号交叉口延误模型,宏观交通流模型主要包括出行时间模型、一般路网模型和两相流模型,而交通仿真软件主要有PARAMICS、AIMSUN2、INTEGRATION、TSIS、VisSim、TRANSYT、TRIPS、Cube、TransCAD和EMME/2等(刘运通等, 2002; 裴玉龙, 2004; 张晓萍, 2005)。^{[246] [247] [248]}

(1) 车辆跟驰模型 (Car-Following Models)

车辆跟驰模型是交通系统仿真中最重要的动态模型,用以描述交通行为即人一车单元行为。车辆跟驰模型是运用动力学方法,探究在无法超车的单一车道上车辆列队行驶时,车辆跟驰状态的理论。通过求解跟驰方程,不仅可以得到任意时刻车队中各车辆的速度、加速度和位置等参数,以描述交通流的微观特性,还可以通过进一步推导,得到平均速度、密度、

流串等统计参数，以描述交通流的宏观特性。

20 世纪 50 年代以来的车辆跟驰模型主要可以分为刺激—反应模型、安全距离模型和生理—心理模型等几类。近年来涌现出模糊推理模型和元胞自动机模型。

1. 刺激—反应模型

刺激—反应模型重在描述驾驶环境中各种刺激对驾驶员行为的影响，包括 GM 模型和线性模型。

GM (General Motor) 模型[Chandler , Herman 和 Montroll , 通用汽车研究实验室, 20 世纪 50 年代]假设驾驶员的加速度与两车之间的速度差成正比，与两车的车头间距成反比，同时与自身的速度也存在直接的关系。GM 模型可以清楚地反映出车辆跟驰行驶的制约性、延迟性及传递性。GM 模型形式简单，物理意义明确，作为早期的研究成果，具有开创意义，许多后期的车辆跟驰模型研究都源于刺激—反应基本方程。但是 GM 模型仍然存在一些问题，通用性较差。

GM 模型的一般表达式为：

$$a_{n+1}(t+T) = cv_{n+1}^m(t+T) \frac{\Delta v(t)}{\Delta x^l(t)}$$

式中， $a_{n+1}(t+T)$ —— $t+T$ 时刻第 $n+1$ 辆车的加速度；

$\Delta v(t)$ —— t 时刻第 n 辆车与第 $n+1$ 辆车之间的速度差；

$\Delta x^l(t)$ —— t 时刻第 n 辆车与第 $n+1$ 辆车之间的距离；

c, m, l ——常数。

而线性模型 (Linear Model) 假设驾驶员的加速度与两车之间的速度差以及两车的车头间距成线性关系。Helly 所提出的线性模型考虑了前面第一辆车是否制动减速对后车加速度的影响项。此后的仿真显示，尽管该模型能够较好地描述加速度较小状态下的交通流，但是当前车的扰动加大时，模型产生明显的错误，即产生明显大于实测的车头时距。

2. CA 模型(Collision Avoidance Models ,安全距离模型 ,也称防撞模型)[Kometani ,Sasaki]

CA 模型模型主要目的是寻找一个特定的跟驰距离，该距离通过经典牛顿运动定律推导出。如果前车驾驶员做了一个后车驾驶员意想不到的动作，为了防止发生碰撞，当后车与前车之间的跟驰距离应当大于某个特定的跟驰距离。

该模型的最初形式为：

$$\Delta x(t-T) = a v_{n-1}^2(t-T) + b_1 v_n^2(t) + b v_n^2(t) + b_0$$

式中， a, b_1, b, b_0 ——参数。其余符号含义参考 GM 模型。

Gipps 对此模型的研究取得了重大突破，他所提出的模型主要有两项限制因子：第一项内两个限制条件合并而成，即期望车速限制和由汽车动力特性决定的加速度限制，当该项对大多数车辆起作用时，交通流处于自由行驶状态；第二项是防止碰撞限制，当它起作用时，交通流处于拥挤状态。

3. AP 模型 (Action Point Models , 点反应模型 , 也称生理—心理模型) [Michaels]

AP 模型用一系列域值和期望距离体现人的感觉和反应 , 这些界限值划定了不同的值域 , 在不同的值域 , 后车与前车存在不同的影响关系。一旦超过某个速度感知域值 , 驾驶员将选择减速。速度差低于速度感知域值时 , 驾驶员感受到的只是距离的变化。是否感知到前车的变化是驾驶员进行操作的基础。

Michaels 的模型以感知域值划分跟驰状态 , 但是实际中有很多超过感知域值而驾驶员没有反应的事例。所以 1974 年 , Wiedemann 提出以行为域值划分跟驰状态的模型(即 MISSION 模型) , 行为域值模型充分考虑了驾驶员的生理、心理因素对驾驶行为的影响和制约 , 及由此而产生的不同驾驶行为 , 从建模方法上更接近实际情况 , 也最能描述大多数常见的驾驶行为。

4. 模糊推理模型[Kikuchi , Chakroborty]

基于模糊推理的模型是近年来才发展起来且发展较快的车辆跟驰模型 , 其核心仍是刺激—反应关系。该类模型主要通过驾驶员未来的逻辑推理来研究驾驶行为。它们的最大特色是将模型的输入项分为几个相互部分重叠的模糊集 , 每个模糊集用来描述各项的隶属度。并且根据实际运行过程来估计输出集的状态值 , 作为所有计算结果的总和。

5. STCA 模型 (Self-Timed Cellular Automaton) [Nagel , Schreckenberg , 1992]

STCA 模型是一种基于元胞自动机的交通模拟模型。交通问题中的研究对象多数是不连续的 , 车流运动有很大的随机性和不确定性 , 所以对于离散性和随机性现象描述比较有优势的 CA 模型可以比较好地描述交通问题。该模型将一条车道假设为具有 L 个格点的一维直线链 , 其上随机分布有 N 个粒子 (车辆) , 每个粒子只与前后紧邻的粒子发生相互作用。

(2) 交通排队模型 (Traffic Queuing Models) [Adams , 1936]

排队模型是基于研究“服务”系统的“服务”与“需求”关系的一种基于排队论的数学模型。1936 年 , 亚当斯 (Adams) 用排队论考虑未设置交通信号的交叉口的行人延误问题。目前排队模型在很多领域内都有应用 , 特别是在交通工程领域 , 对于研究车辆延误、道路通行能力 , 信号灯配时以及停车场、收费亭、加油站等交通设施的设计与管理诸方面都有广泛的应用。

(3) 交叉口延误模型 (Intersection Delay Models)

交叉口延误模型是用来计算车辆由于通路交叉口的存在而产生的延误的模型。车流在交叉口的延误是确定交叉口服务水平的基本参数 , 同时还可以用来估计候车道长度、车辆的燃油消耗、尾气排放等。

不同控制方式的交叉口 , 产生延误的机理不同 , 延误的计算方法也不同。交叉口延误模型主要分为有信号交叉口的稳态延误模型和瞬态延误模型 , 以及无信号交叉口延误模型。

1. 稳态延误模型

(1) 精确模型

精确模型是根据车辆的到达和离开过程服从某种统计分布的假设来描述交通延误的特

性,需要严格的假设条件。Beckman 最早提出定周期信号交叉口的平均延误模型,并假设车辆到达过程服从二项分布、车辆离开为确定性分布。

模型中过饱和流的期望排队长度和到达过程服从二项分布的假设大大降低了其实用性。Mcneil 根据一般到达、离开时间为常数的假设,将信号交叉口一个周期总的车辆延误分为红灯和绿灯周期内的中延误时间和两个部分,并给出了算法。

(2) 近似模型 [Webster]

在模型的应用过程中,通常并不知道绿灯开始时的排队情况。因此,利用精确模型来计算交叉口的延误往往比较困难,而近似模型则相对较为容易。Webster 根据理论研究和数值模拟的方法,最早建立了交叉口延误的近似计算模型,并被广泛应用。

2. 瞬态延误模型

May 和 Keller 将车辆的到达率和离开率用确定性的时间函数表达出来,得出瞬态延误模型。在流量与通行能力比值较小的情况下,平衡状态容易达到,稳态延误模型比较接近真实情况,但是,当交通流到达率接近信号交叉口的通行能力时,特别是高峰时段,交通流常常不稳定,这时应该使用瞬态延误模型。

3. 无信号交叉口延误模型

Harders 提出了计算无信号交叉口延误的模型。无信号交叉口是指两条相交道路,其中一条为主路,另一条为支路,其中主路具有优先交通流。该模型假设主路与支路均为单向流,而且主路车流的车头时距服从负指数分布,计算支路车辆平均延误 D 的公式如下:

$$D = \frac{1 - \exp[-(q_p t_c + q_n t_f)]}{q_m - q_n} + t_f$$

式中, t_c ——主路车辆之间可插车间隙,也称临界间隙; t_f ——支路车辆之间的跟随时间; q_p 、 q_n ——主路和支路车辆到达率; q_m ——支路通行能力。

(4) 宏观交通流模型 (Macro Traffic-flow Models)

当路段交叉口有机地形成道路网络而共同发挥作用时,单独评价交叉口和路段交通特性的方法会陷入困境。将微观交通流理论中的速度、流量、密度三个基本参数重新进行适当的定义,就可以从宏观的角度描述整个路网的交通特性,这就是宏观交通流模型。宏观交通流模型将交通流理论延伸至路网层次,从而为交通工程师提供一个评价整个道路交通系统控制策略的方法。宏观交通流模型主要包括出行时间模型、一般路网模型和两相流模型:

1. 出行时间模型

该模型通过出行时间图从总体上反映路网在给定时刻的运行状况,将车辆从路网上某一给定点进行排列,按照预定的间隔标定出每个车辆的时间和位置,这样就可以得到相等出行时间的轮廓线。此类模型目前已经被许多研究者采用,大多用来计算平均路网出行时间(单位距离)或者速度。

(1) 交通强度模型 [Vaughan , Ioannou , Phylactou]

交通强度模型是将交通强度作为距离的模型。该模型认为交通强度 I (单位区间总出行距离) 随着研究的地点与 CBD (Central Business District , 中央商务区) 距离的增加而减少。模型具体公式如下 :

$$I = A \cdot \exp(-\sqrt{r/a})$$

式中 , r —— 与 CBD 的距离 ; A、 a —— 经验参数。

不同城市具有不同的 A 值和 a 值 , 并且 A 值还随着高峰时段与非高峰时段的变化而发生变化。交通强度模型可以反映城市交通网络的宏观特性 , 但模型结果与实际有一定的出入。

(2) 平均速度模型 [Branston , 1963]

平均速度模型是用来进行城市及郊区的平均速度预测的模型。Branston 用回归分析法计算并检验得到的平均速度 (v) 与距 CBD 的距离 (r) 的关系模型。其中城市中心定义为放射线路的交汇点 , CBD 的出行速度选择在中心区 0.3km 以内的区域。每一条路段的平均速度可以通过路段长度与实际出行时间的比值得到。与实际比较吻合的算法有两种 : 负指数模型与幂函数模型。

2. 一般路网模型

(1) 速度-流量关系模型 [Thomson]

速度-流量关系模型是根据伦敦市观测数据得出的平均速度与流量之间关系的经验公式 , 核心公式形式如下 :

$$v = 30.2 - 0.0086q$$

式中 , v —— 平均速度 ; q —— 平均流量。

该模型参数与伦敦市实际情况很吻合 , 但是对于其他城市 , 以及市中心与市郊的不同区域 , 形式会有所变化 , 要根据具体的调查数据来进行标定。

(2) 关系模型 [Zahavi]

关系模型有 3 个基本变量 , I 为交通强度 (单位区域的出行距离) , R 为道路密度 (单位区域道路长度或通路面积) , v 为中间平均速度。根据英国和美国的调查数据 , 发现 I、 R 和 v 在不同城市的不同地区具有不同数值 , 但三者之间具有以下特定关系 :

$$I = a(v/R)^m$$

式中 , m 为参数 , 而且 m 趋近于 -1。

对于不同的城市具有不同的取值。它受到路网物理特性的影响 , 如道路宽度、交叉口密度等。因此 a 可以作为路网特性和交通性能综合效果的一个反映 , 可用于反映服务水平。

3. Two-Fluid model (两相流模型) [Prigogine , Herman]

两相流模型可用来描述城市路网集合流的交通状况。该理论认为 , 车辆在交通流中分为运动和停止两类 (即两相) , 后者包括车辆在运动的交通流中的停车 , 但并不包括处于交通

流状况以外的停车（比如停车场的停车等）。两相流模型为评价路网的服务水平提供了宏观方法，这时的评价并不受路网密度的影响。

（5） 交通仿真软件（Traffic Simulation Software）

1. PARAMICS（Parallel Microscopic Simulator）[英国 Quadstone 公司，1992]

PARAMICS 采用了并行计算技术，路网规模能达到 100 万个结点、400 万个路段、32000 个区域。PARAMICS 在仿真拥挤的道路网中有突出的表现。目前能仿真交通信号、匝道控制、与可变速度标志相连的探测器、VMS 和 CMS、车内信息显示装置、车内信息咨询、路径诱导等。

2. AIMSUN2（Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks）[西班牙 TSS 公司]

AIMSUN2 能够用于不同的路网（城市道路、公路、高速公路以及混合情况）、不同交通控制条件（有信号交叉口、无信号交叉口和匝道控制等）的交通模拟。该模型提供了两种不同的仿真：一种是基于输入交通流和转向比例的，另一种是基于 O-D（Dynamic Origin-Destination Matrix in Traffic Networks——交通网络中动态起点—迄点矩阵）和路径选择模型的，并且模型可以提供详细的统计输出。

3. INTEGRATION[M. Van Aerde，20 世纪 80 年代中期]

INTEGRATION 混合使用了单车和宏观的交通流理论，是一种准微观仿真软件。该模型能在路网上以十分之一秒的水平，再现跟驰、交换车道、可接受插车间距等行为。该模型可以模拟车队的消散，可以用动态 O-D 进行高速公路、合流、分流、交织、瓶颈的分析。

INTEGRATION 提供了详细的驾驶员（或车辆）行为模型，能够评价路径诱导系统的有效性、匝道控制和信号控制策略的影响、事故的模拟等。该模型可以用于交通控制、路径诱导、分配、可变信息标志等。用户的缺点是进行多路径分配。

4. TSIS（Traffic Software Integrated System）[美国联邦公路局]

TSIS 是一个大型的集成化的交通仿真工具箱，它适用于有信号控制的城市道路、高速公路，或者无信号系统与高速公路所组成的更复杂的路网系统。TSIS 主要有以下功能：土地使用与交通影响研究，高速公路与城市道路的立体交叉、信号配时以及协调控制，高速公路交织区的车道控制，公共汽车站点与行驶路线、合乘、匝道控制，事故检测与事故管理，对其他仿真软件的校验，原始数据的收集，对公众的演示，等等。

5. VisSim[德国 PTV 公司]

VisSim 是一个离散的、随机的、以十分之一秒为时间步长的微观仿真软件。VisSim 提供了图形化界面，用 2D 和 3D 动画向用户直观显示车辆运动，运用动态交通分配进行路径选择。VisSim 能够模拟城市道路和郊区公路的交通状况，特别适合于模拟各种城市交通控制系统。主要应用有：1) 由车辆激发的信号控制的设计；2) 公交优先方案的通行能力分析和检验；3) 收费设施分析；4) 匝道控制运营分析；5) 路径诱导和可变信息标志的影响分析等。

6. TRANSYT[英国的运输与道路试验室（TRRL），1967]

TRANSYT 是英国 TRRL 为确定道路网信号控制参数开发的一个道路交通流仿真软件，经过不断修正改良，在世界各地得到广泛应用。TRANSYT 将道路网中交通流的车群作为仿真对象，计算出在信号交叉路口发生的延误与停车次数，并可根据给定的周期长对相位差和绿信比进行优化。

7. TRIPS (Transport Improvement Planning System) [英国 MAV 公司，20 世纪 80 年代]

TRIPS 是一个专为职业交通规划师设计的综合交通模型，是国际上最广泛采用的交通模型软件包之一，主要用于交通需求分析和路网分析。Trips 可以分析简单的路段，也可以分析一个复杂的城市路网。它不仅可用于道路和公交系统，还能够用于研究非机动车交通，以及用来分析交通管理规划和混合交通方面的问题。

8. Cube[美国 Citilabs]

Cube 是由 TRIPS 发展而来的交通模拟与规划模型，它可以满足用户各种不同的需要，其各个模块之间相互互补，形成一个统一的整体。Cube 与 GIS 紧密结合，为用户提供强大的图形界面。Cube 适用于大型城市的交通规划，其容许的小区数、节点数、道路数都能满足最大的城市或地区的交通规划需求。

Cube 软件系列的产品有 Cube Voyager (宏观交通规划软件)、Cube Cargo (专为货运预测而开发的软件)、Cube Dynasim (微观交通仿真软件)、Cube Land (土地使用模拟软件) 和 Cube Polar (可直接与交通规划模型衔接的空气质量预测软件) 等。

9. TransCAD[美国 Caliper 公司]

Trans CAD 是第一个专为交通运输业设计的 GIS 软件，旨在帮助交通运输专业人员和组织机构存储、显示、管理及分析交通运输信息与数据。TransCAD 集 GIS 与交通模型功能于一体，提供的交通运输模型主要有网络分析模型、交通规划与出行需求模型、路径选择与运行管理模型等。

10. EMME/2(城市与区域规划系统) [加拿大 Montreal 大学的交通研究中心开发，后为 INRO 咨询公司继承]

EMME/2 系统为用户提供了一套内容丰富、可进行多种选择的需求分析及网络分析与评价模型。其最高版本可以处理 2800 个交通区、22400 个交通节点、56000 个路段、2800 条公交线路的交通网络。该软件支持多种交通方式，如小汽车、公共交通和其他辅助交通方式。同时该模型具有多种交通分配以及公共交通分配功能。

2.5.8 市政模型 (Municipal Models)

市政模型是用来辅助市政工程进行分析、设计和规划的数学模型。本节介绍的市政模型分为管网模型、雨水径流模型和能源模型三类，其中管网模型主要包括 WaterCAD、MIKE URBAN、StormCAD、SewerCAD 和 Stoner/SynerGEE，雨水径流模型主要包括 SWMM、STORM、MOUSE、POLLUTE 和 Wallingford，而能源模型主要包括 BESOM、MARKAL、LEAP。

(1) 管网模型 (Pipe Network Models)

1. WaterCAD给水管网模型 [美国海思德公司 (Haestad)]

WaterCAD 是一个完整的关于水资源的 GIS 系统,利用 WaterCAD 软件可以解决给水管网在设计和运行中的大量一般性问题,可以提高分析计算的效率,辅助工程师和决策者分析和管理工作网络(董祯恭,2006)。^[249]

WaterCAD 可对给水管网系统进行静态分析和设计;可对含有水泵、水塔和控制阀门等的给水管网系统进行动态模拟、分析和设计;进行消防用水量和平差分析,分析给水管网系统在极端用水条件下的表现;可对给水管网系统进行各种方案下的水文水力学计算和成本分析比较,并为用户产生各种图表、曲线和报告。

2. MIKE URBAN (给排水管网模拟模型) [丹麦 DHI (Danish Hydraulic Institute) 公司]

MIKE URBAN 模型是用来帮助自来水公司进行自来水供水分析的工具,分析的主要目的是在合适的时间提供满足一定水质和压力的自来水。该模型主要包括 MIKE URBAN WD (给水模块和 MIKE URBAN CS (排水模块)。MIKE URBAN 与第三方的数据处理程序(如 Matlab)相兼容。该模型主要有以下用途:拟建或改建的输配水管网系统优化和验证设计;自来水公司的实时调度,操作优化,爆管分析,费用分析,能量使用分析和损漏控制;泵房或者泵站的水锤模拟和分析;自来水管网中的水龄分析,水质分析和余氯分析,保证供水的卫生安全性;城市洪水管理---洪水预报、淹没范围和持续时间;污水溢流对河流和海岸的水质影响;城市排水管网和地下水之间的相互影响;管道输水能力和瓶颈分析;管道泥沙冲淤和水质分析。^[36]

3. StormCAD (雨水管网模型) [美国 Bentley (宾特利) 公司]

StormCAD 提供雨水系统从降雨到出流的设计、分析、模拟,是当今世界上最先进的排水管网设计、分析和规划工具,可以同时处理重力流管网系统和压力流管网系统。该模型可以选择不同的管材、管道形状以及阻力水头计算公式,适于比较广泛的模拟需求,同时该模型还具有自动优化设计功能,可以简化设计过程。

4. SewerCAD (排水管网模型) [美国 Bentley (宾特利) 公司]

SewerCAD 是先进的排水管网设计、分析和规划工具,可以同时处理重力流和压力流管网系统,并且可以配合各种标准尖峰系数进行稳定流分析与周期推演模拟。该模型主要有以下功能:资料管理、重力与压力流水力计算、剖面图生成、方案管理、管网布设、荷载和渗流以及入流计算、自动化设计与成本估算。

5. Stoner/SynerGEE [美国宾夕凡尼亚州 Stoner 公司]

SynerGEE (Stoner 的新版本) 是管道设计和分析工具,该模型包括 SynerGEE Electric (电力模块)、SynerGEE Gas (气模块)、SynerGEE Water (水模块) 三个部分, SynerGEE 模型在世界得到广泛应用。该软件可以根据压力、管径、流量等各种参数对管道进行稳态计算,也可以根据流量等参数的变化对系统进行动态调整。

(2) 雨水径流模型 (Stromwater Runoff Models)

1. SWMM [EPA, 1971]

[36] <http://www.dhigroup.com/RegionalSites/DHICChina/主要产品/给排水管网及污水处理数学模型软件/给排水管网模拟软件MIKEURBAN.aspx>

由美国环境保护局开发的SWMM (Storm Water Management Model, 暴雨雨水管理模型) 是一个针对暴雨及与之相关的雨水排放系统、接纳水体的城市暴雨管理模型。其主要功能是模拟暴雨径流过程、储水及雨水处理过程、污染物运输过程。该模型主要适用于城市区域的综合性的雨水水量、水质模拟, 可以模拟连续或一次降雨过程。

2. STORM [美国陆军工程兵团水文工程中心]

STORM 模型是应用于城市和非城市集水区域的降雨—汇流—水质一体化模型。该模型可用于分析雨水水量和水质变化, 给出暴雨事件中产生的雨水水量和水质的统计资料及污染物迁移变化过程。STORM 模型主要适合于模拟城市化地区的离散降雨过程, 但也可用于模拟非城市化地区1年以上的较长时间序列的降雨过程 (吴时强, 1996)。^[250]

但这个模型在单个降雨事件计算时有可能会误导结果, 尤其是中低降雨量事件, 而且这个模型仅得出集水区总体结果, 不能预测具体管道或明渠输运情况, 因而对小的更复杂的城市集水区, 以选用 SWMM 模型为宜。

3. MOUSE [丹麦水利研究所]

MOUSE 模型的服务对象是复杂的雨水污水管道排放系统, 其主要由系统界面、降雨事件系列的 dBase 系统、地面径流子模型、管道水流子模型、SAMBA (用于计算分析排水系统溢流的模型)、成果输出系统六个部分构成。MOUSE 模型中的管道水流子模型可对任意管网进行模拟计算, 可以考虑回水影响, 可模拟蓄水池、溢流堰及泵站的水流情况, 同时可以进行带有条件限制的水质模拟 (吴时强, 1996)。

4. POLLUTE [加拿大GAEA公司, 1988]

POLLUTE 模型是用于模拟城市和农村暴雨径流的模型。它由三个子模型构成, 即降雨/汇流模型、污染物排放模型、污染物滞留模型组成。降雨/汇流模型主要是预测模拟区域的日径流总量; 污染物排放模型是计算从各种不同使用类型的土地排出的污染物质; 而污染物滞留模型则用以计算集水区植被对污染物的滞留作用 (吴时强, 1996)。

5. Wallingford (沃林福特模型) [英国沃林福特水力学研究机构, 1978]

Wallingford模型包括降雨径流模型 (WASSP)、简单管道演算模型 (WALLRUS) 和完整管道演算模型 (SPIDA)、以及水质模拟模块 (MOSQUITO), 模型可以模拟暴雨和污水系统或者雨污合流污水系统 (时间步长为15分钟), 广泛应用于雨水设施的运行、设计和规划中 (谢莹莹等, 2006)。^[251]

目前Wallingford的最新版本是InfoWorks CS (改进并集成于1998年), 专门用于雨污水收集系统和污水处理厂, 可以精确地模拟雨污水收集系统。InfoWorks CS对污水系统或排水系统的关键要素可以做出快速、精确、稳定的仿真模拟, 预测系统的工作状态, 或降雨后雨水对水环境造成的影响, 可以完整地模拟回水影响、逆流、明渠、主干渠、复杂管道连接和复杂的辅助调控设施等。

另外生态环境模型部分介绍的MIKE、HSPF、WASP等模型也可以用于雨水管理。

(3) 能源模型 (Energy Models)

1. BESOM (The Brookhaven Energy System Optimization Model, 静态能源系统优化模型) [美国布鲁海文国家试验室, 1974]

BESOM是用于研究和评价未来能源供需问题, 以便提出相应的能源战略和政策的模型。BESOM 是一个线性规划模型, 它常用一个网络来表示, 其网络概念很简单, 一共有 27 个初级能源资源 (称之为供应部门) 和 22 个终端需求项。BESOM 模型主要解决在给定预测

的能源需求的水平下,如何决定各种能源的开发以及工艺过程中转换和环境等,使它得到最小支出的最优解(张奔,何大愚,1989)^[252]

2. MARKAL (MARKet Allocation, 马卡模型) [ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme), 即能源技术系统分析计划]

MARKAL是一个综合能源系统优化模型,在满足给定的能源需求量和污染物排放量限制条件下,确定使能源系统成本最小化的一次能源供应结构和用能技术结构。该模型以能源系统为模拟对象,它将复杂的能源系统模拟为线性规划模式,该模型主要模拟三个方面:能源服务未来需求、初级能源供应未来需求以及可能的能源技术(张奔,何大愚,1989)。

3. LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System) [斯德哥尔摩环境协会与美国波士顿大学]

LEAP是一个基于情景分析的能源-环境模型,可以用来做能源的需求及其相应的环境影响分析和成本效益分析,在做环境影响分析时,可以把非能源部门的温室气体排放也加入进来,做综合环境影响分析。LEAP模型是一个自下而上的计量经济模型,它可以根据终端用能的变化设置不同情景进行预测分析。具体而言,模型使用者可以基于目前状况以及对未来社会、经济和能源发展的不同理解,设定一系列的情景,并将相应的量化指标输入到模型中,最后对不同方案的结果进行分析比较,为决策者提供参考(张奔,何大愚,1989)。

2.6 可视化技术

可视化(Visualization)是利用计算机图形学和图像处理技术,将数据转换成图形或图像在屏幕上显示出来,并进行交互处理的方法和技术。它涉及计算机图形学、数字图像处理、计算机视觉、计算机辅助设计等多个领域,成为研究数据显示、数据处理和决策分析等一系列问题的综合技术(杨必胜等,2000)^[253]。可视化技术最早应用于计算科学中,并形成了可视化技术的一个重要分支——科学计算可视化(Visualization in Scientific Computing),科学计算可视化能够把科学数据,包括测量获得的数值、图像或是计算中涉及、产生的数字信息变为直观的、以图形图像信息表示的、随时间和空间变化的物理现象或物理量呈现在研究者面前。科学计算可视化自1987年提出以来,在各工程和计算领域得到了广泛的应用和发展。

空间信息可视化是现有计算机可视化技术的具体应用。以地理环境为依托,透过视觉效果,探讨空间信息所反映的规律知识是其核心目的。地理空间信息可视化通过强大的有效的地图系统将复杂的空间和属性数据以地理的形式展现出来,从而挖掘数据之间的关联性和发展趋势,做出及时的、正确的判断和决策。

可视化技术的主要特点有:(1)交互性,用户可以方便地以交互的方式管理和开发数据;(2)多维性,可以按数据每一维的值,对数据进行分类、排序、组合和显示,而用户可以看到表示对象或事件的数据的多个属性或变量;(3)可视性,数据可以用图像、曲线、二维图形、三维体和动画来显示。

可视化的一个重要技术是虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术。虚拟现实技术是图像技术、传感器技术、计算机技术、网络技术以及人机对话技术相结合的产物。它以计算机技术为基础,利用高性能、高度集成的计算机硬、软件及各类先进的传感器,去创造一个使参与者处于三维视觉、听觉和触觉的环境,具有完善的交互能力、能帮助和启发进入虚拟境界的参与者的构思的信息环境。利用计算机系统提供的人机对话工具,同虚拟环境中的物体交

互操作,使用户仿佛置身于现实环境之中,使参与者足不出户就能身处异景,如遥远的太空、海洋深处、甚至是微观世界(朱卫军,2006)^[254]。

2.6.1 在城市规划中的应用

随着计算机技术和信息技术的飞速发展,特别是在数字地球提出之后,建立数字城市的热潮持续高涨,可视化技术作为主要角色参与其中。

在城市规划与设计过程中,一般情况下,对预期的方案只能以比较抽象的语言来描述,虽然可以用效果图来表示方案,但效果图是静态的、单一角度的,不能完整全面地反映规划思路;另外,规划方案的实施也是一个动态的过程,要进行不断的补充和修改才能使规划思路一致地、彻底地、充分地体现出来。将可视化技术引入城市规划领域,可以把规划实施方法和预期结果比较清楚直观地表达出来,使政府决策人员和公众能更好地理解规划方案并进行和参与决策。

将可视化和信息查询与管理技术应用于数字城市建设中,使得人们对城市景观现状和规划设计的描述摆脱了基于二维地图和三维实物模型的表现方式,代之以计算机三维空间表现形式,使得决策者、规划师和用户对城市景观现状和规划设计蓝图有生动、直观的了解和更深刻的认识,从而拓宽城市规划、设计和管理人员的视角,使城市规划、基础设施设计更加科学化,对于城市可持续发展研究有重要意义(陈晓勇,丁松庆,2006)^[255]。

目前,GIS也正由2D GIS向3D GIS发展,可视化是3D GIS的重要组成部分。3D GIS对客观世界的表达能给人以更真实的感受,它以立体造型技术向用户展现地理空间现象,不仅能够表达空间对象间的平面关系,而且能描述和表达它们之间的竖向关系;另外对空间对象进行三维空间分析和操作也是3D GIS特有的功能。一些商用GIS系统中,已加入了三维GIS模块,一方面可以实现真实三维地形地貌的生成,另一方面实现了实时漫游功能,如ArcGIS的ArcScene、ERDAS IMAGINE的VirtualGIS模块等,能在实时三维环境下,提供GIS分析和实时三维飞行方式的访问和漫游,为可视化技术在城市规划中更好的应用提供了支持(王栋,2004)^[256]。

2.6.2 关键技术

将可视化应用于城市规划中,主要包括以下三个步骤:

(1) 城市三维数据获取。借助GIS软件和相关数据库软件,对区域地形地貌要素进行数字化,收集区域范围内自然条件、社会经济条件数据,建立区域的地面数字高程模型DEM(Digital Elevation Model, DEM) 区域自然条件数据库、区域社会经济条件数据库等;借助计算机辅助设计段,汇集多种建筑模型,建立建筑模型数据库。

(2) 三维城市建模。根据规划设计人员提供的规划方案和策略,建立模型数据库和空间数据库之间的连接,利用计算机软硬件工具的支持,建立三维城市模型系统。

(3) 可视化效果表达。组成专家评定小组,通过规划人员对可视化系统的亲身观察和体验,认识、判断在各种主导因素作用下所形成的各种规划方案的优劣,并辅助最终决策。

下面对城市可视化的关键技术进行介绍。

(1) 城市三维数据获取

城市三维数据中最主要的是地面数字高程模型数据、三维建筑物数据和纹理数据。

DEM 是三维地形模型显示的基础数据,它是根据采集的绘图区域地形等高线等图形数据,按一定的曲面内插算法拟合生成的。现有的城市三维模型建立中,获取 DEM 的途径主要有(1)直接使用二维 GIS 中的 DEM,通过实测高程点构成不规则三角网模型(Triangulated Irregular Network, TIN)得到;(2)通过数字摄影测量系统,处理航摄影像生成;(3)由机载激光扫描系统直接扫描并经过后续处理获得(3)用合成孔径雷达获取数字高程模型。

建筑物的平面数据主要指的是建筑物在俯视图中投影到地平面的轮廓线,目前有以下几种方式:(1)利用数字摄影测量的方法从影像数据中获取建筑物平面数据;(2)从原有的二维 GIS 中提取三维建筑物模型的平面信息,将其作为三维建筑物模型的底面。

建筑物高度数据的获取,主要有以下几种方法:(1)根据算法(如根据阴影信息),从影像中直接提取建筑物高度以及其他信息;(2)用激光测距仪(Laser ranger finder)结合 CCD 相机从地面获取建筑物的高度数据;(3)用激光扫描仪(Airborne laser scanner)结合空中影像,经过算法(如基于激光测距点云的建筑物自动提取、基于区域增长提取、基于三维 Hough 变换或 Delaunay 三角处理提取等(尤红建,苏林,2005)^[257])处理提取建筑物的高程数据;(4)利用原有二维 GIS 的地图资料建立的建筑物专题信息数据库,若原有的 GIS 专题信息数据库中如果含有建筑物高度信息,就可以直接利用;否则,从建筑物的层数和建筑物的使用性质估算建筑物的高度。

纹理数据对于 GIS 的数据管理和空间分析功能没有任何影响,但是,在地形模型表面和建筑物模型表面粘贴真实的纹理影像,给可以突出可视的景观信息,生成具有真实感的三维景观图。纹理的主要来源有航空影像上提取地表和建筑物所对应的纹理数据和近景摄影影像。目前,建筑物的纹理数据获取有以下几种方式:(1)地面摄影相片直接提取,这种方法需要用相机拍摄大量的建筑物侧面照片,其优点是能够使建筑物模型真实感强,缺点是获取速度慢,且数据量大,后续工作量也大。(2)由计算机做简单模拟绘制,这种方法采用了矢量纹理,其优点是数据量少,建立的模型浏览速度快,但缺乏真实感。(3)根据摄影相片由计算机生成,这种方法适合具有相似的纹理的建筑物群,可以对其中的一个建筑物进行纹理特征的提取,然后用计算机对其他建筑物进行批量处理。(4)由空中摄影获取,这一方法主要获取地面影像,但空中影像中也含有部分建筑物的侧面纹理,这种方法获取的纹理变形大,真实感也相对较差。

(2) 三维城市建模

城市三维基本模型的构建是应用计算机可视化技术生成虚拟城市三维环境的基础,它将真实世界的对象物体(如建筑、桥梁等)在相应的三维虚拟世界中重构,并根据系统需求保存部分物理属性。构建模型首先要建立对象物体的几何模型,确立其空间位置和几何元素的属性。三维城市模型包括许多类物体,如道路、水系、地形、建筑物等,其中重要的两类是地形和建筑物。

1) 地形三维模型的建立方法

DEM 中,不规则三角网(TIN)和规则格网(Grid)被广泛用于地学领域用来模拟地形

表面(王家辉,2001)^[258]。TIN模型是由分散的地形点构成的一系列不相交的三角形组成。它描述地面的真实性由地形点的密度决定,其适用于地形较为复杂的地区,具有较高的精度,而且能够插入地性线(如山脊线、谷底线),从而能够真实地模拟复杂的地形表面,但TIN模型的数据量较大。Grid模型是用一组大小相同的格子来描述地形表面,适用于地形较为平坦的地区。实际上Grid模型就是一个二维数组,数组的元素为格网结点上的高程值。一般从等高线转换到Grid模型,通常需要找到格网结点周围等高线上的点,然后进行插值计算。插值的算法较多,但无论采用哪一种方法,都取决于精度与数据量之间的平衡。

TIN模型最主要的优点在于能够充分地表达地形的结构特征,具有可变的分辨率,即当地形表面粗糙或变化剧烈时,TIN能包含大量的数据点,而当地形表面相对平缓时,TIN只需要最少的数据点;但是,TIN的缺点也很明显,主要表现在数据存储量大、操作复杂等方面。而GRID的优点主要在于数据结构简单、易于构造网格、数据存储量小、可以方便有效地进行各种分析与计算、建模方法直接等;它的缺点是在地势起伏不大的地区数据冗余量较大。两种模型各有其优点和缺点,没有一种能够完全满足实际的需要,在实际应用中究竟选择哪一种模型,还要根据具体情况来定,同时两种模型也是可以互相转化的。为了充分利用上述两种模型的优点,有研究者提出了混合模型(TIN-Grid),该方法在地形平坦的地区使用GRID模型,在复杂地区使用TIN模型。

2) 建筑物三维模型的建立方法

在城市中,建筑物是最重要的组成部分,因为城市中建筑物种类繁多,结构、造型和用途各不相同;不同的城市又具有各自的建筑风格,在特定地段,建筑物及其所处的环境以其特定的内涵可以反映出一个城市的特色(李春光,2004)^[259]。

对于任何复杂的建筑物,它总是可以分解为两个或者多个简单模型,这样就可以应用多个典型的简单模型来构建复杂的建筑物。一般而言,一栋建筑物可以分解为主体、特征体和附属物三个部分。主体就是主楼体,多为规则的几何形体如长方体、圆柱体等;特征体是指能区别该栋建筑物的标志性细节的物体如屋顶、房檐阳台、楼梯等;附属物即附属于该栋建筑物的物体如水箱、电视天线、悬挂物等等。现实世界的复杂性决定了对其进行三维重建的复杂性,可以对有限的特定类型来专门建模并归入城市景观模型库,在构建新的三维模型时候,就可以通过直接应用这些现有的模型,组合现有的模型或者是略微改造一下现有的模型就可以极快地完成新三维模型的构建。

在构建一栋复杂建筑物模型之前,通常首先需要将该建筑物立体分解为主体、特征体和附属物,然后应用建模软件针对各个部分因地制宜地建模。主体部分通常是先导入二维建筑物轮廓数据,在建模软件中赋予该封闭线划高度,之后添加各个侧面的纹理完成纹理映射,从而完成主体部分的建模工作。对于特征体和附属物,首先应该判断现有模型库中是否含有对应模型,如果有就可以直接利用建筑物特征模型库中现有的模型,将对应的现有模型导入到主体模型中,应用三维建模软件的图形编辑功能调整特征体模型和附属物模型的尺寸为合适值,然后和主体模型组合为一体,如果现有模型库中没有对应的特征体模型和附属物模型,那么就要用三维建模软件对特征体和附属物进行单独建模并加入到现有的模型库当中,然后和主体模型组合为一体。应用以上方法可以快速完成城市中的建筑物精细三维模型的建立。

3) 城市三维建模技术

目前,城市三维建模技术主要分为基于图形和基于图像两种。基于图形的三维建模技术是面向景物的几何模型的,其基础数据是景物的矢量几何数据。基于图像的三维建模技术则是通过一些预先生成好的图像来生成不同视点的场景画面,其基础数据是预先生成的栅格图

像数据。

基于图形的三维建模技术可以分为：(1) 影像与 DEM 相结合方式，即利用 DEM 生成三维地形透视图，将航空或航天遥感影像作为纹理映射到地形表面，构成一个面积比较大的三维地形景观。(2) 基于二维 GIS 的构建方式，即在二维 GIS 的基础上，利用 DEM 作为地物的载体，用制图学的原理和方法模拟地表纹理，使用地物的坐标数据和属性数据中的高度信息和模拟纹理来构建建筑物等地物对象，在此基础上可进行一些简单的量测和查询功能，但因使用的是模拟纹理，真实感较差。(3) 纯三维的构建方式，如利用机载或地面激光扫描仪获取地物三维数据，然后配合地面摄影影像或遥感影像进行，利用造型软件（3ds Max、AutoCAD 等）建模。

基于图像的三维建模技术可以分为：(1) 纹理贴图和环境贴图，在计算图形中，通过将图像粘贴在几何模型表面增强透视几何绘制法的视觉真实效果。(2) 全景建模法，全景建模法是由一系列参考图像给出场景描述。这些参考图像被变形和组合，以便构成在任意观察点的场景表示法。变形函数由图像流场信息来定义，该信息既可通过输入提供，也可由参考图像派生而得。

基于图形的建模技术的优点主要有：具有高度的真实感、便于与相关空间属性信息的关联以及在 3D GIS 中的拓扑关系建立比较简单等。而其缺点是与目前计算机硬件水平所不相适应的实时渲染算法不成熟。具有高度真实感的三维几何模型同时具有较大的几何数据量，从而造成三维景观实时渲染性能的下降。

而基于图像的三维建模技术较好地克服了几何模型数据量大的缺点，利用纹理信息映射的图像取代几何实体模型，从而以较小的数据量构建较为真实的三维景观，但是该方法也存在着交互性较差、真实感不强以及与 3D GIS 数据库关联较困难的缺点。

(3) 可视化效果表达

模型建好后，需要对模型进行可视化表达，包括两个部分，一是城市模型三维效果的表达，二是城市模型的动态显示。这部分工作需要借助专业平台、软件或自行编程实现。

城市模型三维效果表达的内容是对城市三维模型的环境、光照、阴影等进行特定描述，以增强虚拟环境的真实感。主要包括以下几个方面（艾丽双，2004）^[260]：

(1) 色彩和明暗，除了用线段绘制之外，还可以给城市三维模型加上颜色来创建实心的对象。

(2) 光照和阴影处理，给城市城市三维模型的每个侧面赋予不同的颜色有助于眼睛辨别出对象的不同侧面。在明暗处理之后，还可以给城市城市三维模型的后面加上阴影，这样就模拟出了位于某个角度光照之下的三维效果。

(3) 纹理贴图，就是将影像上的纹理“映射”到已经建立好的城市三维模型上，又称为纹理映射，这种技术的优点是在不增加空间数据的情况之下，充分表达了三维模型的表面细节。

(4) 雾化，是一种大气效果，它给场景中增加朦胧感，这种朦胧感通常与场景中对象与观察者的距离有关。非常远的对象变得很朦胧，近距离的对象则变得相对清楚一些，在模拟自然景观方面雾化的效果是十分明显的。

(5) 混合和透明度,混合是指场景中的颜色或者对象的混合,这种技术可以应用于各种用途,通过改变对象与场景的混合比例,可以让对象看起来像是透明的,从而可以同时看到对象和它背面的场景,还可以利用混合来达到反射的错觉,达到类似镜子的效果。

对一个三维城市模型进行动态显示,应使其具有以下功能:多角度观察、放大、漫游、旋转、任意选定路线的飞行或地面行驶效果的动态显示及可见点的判别等,达到三维场景浏览的目的(王磊,2003)^[261]。

2.6.3 相关软件

随着计算机技术和可视化技术的不断发展,用于三维建模和可视化的软件的发展也比较快,其中具有代表性的有 SGI 公司的 OpenGL 和 VRML 语言,MultiGen-Paradigm 公司的 Multigen Creator 和 Vega, Sun 公司的 Java 3D,国内的 VRMap、IMAGIS 和 Virtuozo 等(李清泉等,2003)^[262]。

(1) OpenGL

OpenGL 是近年来发展起来的性能卓越的三维图形标准,它是在 SGI 等多家世界闻名的计算机公司的倡导下,以 SGI 的 GL 三维图形库为基础的一个通用共享的开放式三维图形标准。目前许多大公司采用其作为三维图形标准,多数软件厂商也以 OpenGL 开发自己的产品,其中有代表性的有 3ds Max, ArcGIS 等等。OpenGL 实际上是一个开放式的三维图形软件包,它独立于窗口系统和操作系统,可以十分方便地在各种平台上移植,也具有与 Visual C++ 的紧密接口,保证算法的正确性和可靠性。OpenGL 具有建模、变换、颜色模式设置、光照和材质设置、纹理映射、位图显示和图像增强、双显存动画等功能。OpenGL 具有建模方便、能进行实时三维仿真、显示的真实感强、程序与操作系统独立、可移植等优点,因而广泛的被应用于可视化的实现中。OpenGL 也是数字城市、地理信息可视化的研究中研究者使用最多的工具(万剑华等,2003)^[263]。

(2) VRML

VRML,即虚拟现实建模语言(Virtual Reality Modeling Language),于1997年12月成为国际标准。它是一种与操作系统无关的描述可交互三维世界和对象的语言它定义了当今3D应用中绝大多数常见概念,诸如变换层级、光源、视点、几何、动画、雾、材质属性和纹理映射等等。并且,VRML具有行为特征的描述功能,既能用来连接互联网,也可以用于创建产品定义和虚拟现实世界复杂场景的三维描述。另外,VRML和HTML(Hypertext Markup Language,超文本标记语言)是紧密相连的,是HTML在3D领域中的延伸,由于VRML在网络上具有良好的模拟性和交互性,因而显示出了强大的生命力(钮心毅,2002)^[264]。

与传统的三维模型的表达方法不同,浏览由VRML构造的三维模型不需要专用的软件,用户通过一个在普通Web浏览器(如Internet Explore, Netscape等)安装的标准VRML插件就可以浏览三维模型数据。在城市规划中,采用VRML建立的模型文件小,对网络带宽要求不高,适合网络传输,对VRML数据的浏览又是一种互动的方式,因而VRML经常被用于城市规划的公众参与。

(3) Multigen Creator/Vega^[37]

Multigen Creator 是美国 MultiGen-Paradigm 公司开发的建模工具,它拥有针对实时优化的 OpenFlight 数据格式 (MultiGen-Paradigm 公司开发的一种标准数据格式),强大的多边形建模、矢量建模、大面积地形精确生成功能,以及多种专业选项及插件,能高效、最优化地生成实时三维数据库,并与后续的实时仿真软件 (Vega) 紧密结合,在视景仿真、模拟训练、城市仿真、交互式游戏及工程应用、科学可视化等实时仿真领域占据世界领先地位。

Multigen Creator 的基本模块为:Creator (Base Creator) 和 Creator Pro (是 Base Creator 的扩展集)。Base Creator 提供交互式多边形建模及纹理应用工具,构造高逼真度、高度优化的实时三维模型,并提供格式转换功能,能将常用 CAD 或三维动画模型转换成 OpenFlight 数据格式;Creator Pro 除包括 Base Creator 所有功能外,还有精确地生成大面积地形等功能。

Vega 是 MultiGen-Paradigm 公司最主要的工业软件,用于实时视觉模拟、虚拟现实和普通视觉应用。Vega 将先进的模拟功能和易用工具相结合,对于复杂的应用,能够提供便捷的创建、编辑和驱动工具。Vega 及其相关模块支持 UNIX 和 Windows NT/2000 平台,支持多种格式的数据导入,允许多种不同数据格式的同时显示。开发人员、工程师、设计师和规划师可以用最新的实时模拟技术将他们的设计综合起来。Vega 目前有如下的附加模块可用于城市规划:LADBM (大地景观数据库管理)、Marine (海洋仿真)、Non-Linear Distortion Correction (非线性失真校正)、SimSmith Vehicle Objects (车辆物体仿真)、SimSmith Vehicle Controls (车辆物体控制)、SensorWorks (增加对实际传感器效果的模拟)、RadarWorks (基于物理机制的雷达图象仿真)、MAT (大气工具)等。

作为一种可视化建模和仿真工具,Multigen Creator/Vega 在城市模拟仿真中的得到了广泛应用,与建模工具 3ds Max 相比,Multigen Creator/Vega 解决了虚拟城市三维建模中精细程度和数据量之间的矛盾(张帆等,2005)^[265],可对城市地形(李利军,孙利华,2006)、路网(靳文忠等,2004)^[266]进行快速的三维仿真。

(4) Java 3D

Java 语言是美国著名的 SUN 公司开发的计算机语言,问世于 1995 年,自从 Java 问世以来,许多人利用它来编写各种计算机程序,尤其是与网络有关的应用程序。SUN 公司则不断的为 Java 语言增添新的功能(吕志慧,2002)^[267]。

Java 3D 就是 Java 语言在三维图形领域的扩展,其实质是一组 API,即应用程序接口。利用 Java 3D 所提供的 API 就可以编写出运行于浏览器的三维动画软件,用于计算机辅助教学的远程三维教学软件,工程师所期望的三维辅助设计、分析和加工模拟软件,以及三维游戏软件等。Java 3D 不但具有 Java 语言所有的优点,还具备自己独特的优点,如面向对象的特征、安全性、稳定性、平台独立性和强大的交互功能等。

(5) VRMap^[38]

VRMap 产品系列是北京灵图软件技术有限公司开发的三维 GIS 平台软件,可以在 3D

[37] <http://www.window07.com/dev/code/2006-3-3/k71773.htm>

[38] <http://www.lingtu.com>

GIS 与 VR 领域提供从底层引擎到专业应用的全面解决方案。其海量数据处理能力、高级仿真效果、快速集成传统 GIS 数据构建场景、二次开发支持等关键技术指标均全面领先于国内外其他同类产品。与国内外同类产品相比,VRMap 能够为政府部门、企业、专业领域用户提供性能更优、持有与维护成本更低、扩展性更好的 3D GIS 和 VR 应用解决方案,是“数字城市”建设最佳的基础软件平台之一。

VRMap 的最新版本是 3.0,它提供了非常丰富、强大、易用的场景制作功能,用户可以非常轻松、快速地利用各类 GIS 数据、模型数据、科学计算数据等建立三维应用。其独到的匹配模型技术,可将不同类型的景观(花草、树木、道路、桥梁、楼宇等)通过动态匹配合成在一起,真实快速再现公路、铁路、树林、湖泊、建筑、园林等景观。另外 VRMap3.0 在产品的应用中不断丰富各类 GIS 分析工具、信息查询手段,功能更优于传统三维动画和三维仿真。

目前 VRMap 产品系列已在数字城市、军事作战指挥、电子沙盘及地形仿真、智能大厦、房地产展示、水利与自然灾害等专题分析与仿真、遥感测绘与土地管理、环保、气象、地质、石油化工、文物保护、电信设备设施管理等领域获得广泛应用。

(6) IMAGIS 和 VirtuoZo^[39]

IMAGIS 和 VirtuoZo 都是适普公司(Supresoft Inc.)开发的可视化软件。适普公司成立于 1996 年 7 月,是由现武汉大学、日本 SOFTBANK 公司和美国 Intel 公司联合投资成立的专业软件公司。

IMAGIS 三维可视地理信息系统是一套以数字正射影像(DOM)、数字地面模型(DEM)、数字线划图(DLG)和数字栅格图(DRG)作为处理对象的先进、完整的可视化 GIS 系统。该系统结合了可视化技术与虚拟现实技术,完全再现管理环境下的真实情况,把所有管理对象都置于一个真实的三维世界中,真正做到了管理意义上的“所见即所得”。IMAGIS 分为四大部分:三维可视地理信息系统(IMAGIS Classic),基于专业测量技术的城市建模和可视化系统(IMAGIS MagiXity),影像快速漫游系统(IMAGIS 3DBrowser)以及三维场景数据网络发布系统(IMAGIS Web3D)。由于信息来源多种多样、数据类型丰富、信息量大,该系统在数据的管理上采用了矢量数据和栅格数据混合管理的数据结构,二者可以相互独立存在,同时,栅格数据也可以作为矢量数据的属性,以适应不同情况下的要求。

VirtuoZo 全数字摄影测量系统能完成从自动空中三角测量到测绘各种比例尺数字线划地形图(DLG)和数字栅格地图(DRG)的生产。作为可以直接从数字影像中获取测绘信息的软件平台,它以灵活的数据交换格式、友好的用户界面、稳定快速的匹配算法、高度自动化的测图方式和生动的三维立体景观显示,被国际摄影测量界公认为三大实用数字摄影测量系统之一。VirtuoZo 可真实再现三维场景,为虚拟现实和再现现实提供数据。VirtuoZo 不但能制作各种比例尺的 4D 测绘产品,也是 3S 集成、三维景观和城市建模等强有力的操作平台。

[39] <http://www.supresoft.com.cn/>

(7) Civil 3D^[40]

Civil 3D 是 Autodesk 公司研发的土木工程软件包,是一个三维工程平台。使用此软件可以加快设计理念的实现过程,它的三维动态工程模型有助于快速完成道路工程、场地、雨水/污水排放系统以及场地规划设计,能够大幅提高设计师和规划师的工作效率,其最新版本是 Autodesk Civil 3D 2007。

Autodesk Civil 3D 的强大功能体现在它的动态工程模型上。该模型包含所有核心几何图形,并能够维护设计对象(例如点、曲面、地块、道路和放坡)之间的智能关系。表格、对象标签及各种分析显示均来源于该模型,因此如果该模型的任何部分发生改变,所有关联的部分会立即动态更新。例如,修改水平道路路线时,纵断面、道路模型、横断面图纸、土方、设计等高线以及完成的图纸都将自动更新。更新不仅表现在视觉效果的变化上,还将直接集成到模型中包含的核心数据中,从而确保所做的编辑反映到整个项目中。

(8) Gvitech CityMaker^[41]

Gvitech CityMaker 是清华城市规划设计研究院结合伟景行(Gvitech Technology)成立的清华规划院数字城市研究所研发的城市仿真软件系统。Gvitech CityMaker 是目前国内该领域应用很广的可视化软件平台,无论城市设计、论证、决策还是管理, CityMaker 都能够提供最佳的支持,优异的性能使得国内绝大多数应用虚拟现实技术的项目均采用 CityMaker 软件平台。如:北京 CBD 辅助规划审批系统、北京大栅栏历史风貌保护区城市设计系统、上海 2010 世博会土地利用研究系统和辅助规划设计平台,上海北外滩、上海国际汽车城、上海徐家汇、宁波新城、杭州钱江新城、徐州新城虚拟现实系统等等。

CityMaker 具有如下特点:

- (1) 能够快速地建立城市的三维模型,使用户在三维环境中设计方案;
- (2) 拥有雾效、光影等实时渲染功能,为模型提供快速和逼真的表现效果;
- (3) 能够对方案进行实时调整,任何一个场景中的设计都可以被即时地编辑和调整,以便可以及时地验证设计,而无需把精力花在重复制作效果图和模型上;
- (4) 拥有自动数据计算功能,可以根据三维数据的调整,自动计算和更新相关的设计参数,使用户能够更加专注于设计。

2.7 其他计算机技术

除了地理系统分析理论、地理信息系统、遥感技术、规划支持模型外,规划支持系统的构建还需要其他计算机技术作为支持,例如面向对象编程技术、组件技术、空间数据库技术、数据挖掘技术、网络与多媒体技术等。下面对主要的相关计算机技术进行介绍。

[40] <http://www.autodesk.com.cn/>

[41] <http://www.supresoft.com.cn/>

2.7.1 面向对象编程

面向对象编程 (Object Oriented Programming , OOP) 是一种计算机编程架构。OOP 的一条基本原则是计算机程序是由单个能够起到子程序作用的单元或对象组合而成。OOP 达到了软件工程的三个主要目标：重用性、灵活性和扩展性。为了实现整体运算，每个对象都能够接收信息、处理数据和向其他对象发送信息。

面向对象技术最初是从面向对象的程序设计开始的，它的出现以 20 世纪 60 年代 Simula 语言为标志。20 世纪 80 年代中后期，面向对象程序设计逐渐成熟，被计算机界理解和接受，人们开始进一步考虑面向对象的开发问题，并以 20 世纪 90 年代 Microsoft Visual Studio 系列 OOP 软件的流行为标志。

在面向对象编程中，比较重要的概念包括：对象——是一个现实实体的抽象，它含有数据及处理该数据的代码，是面向对象语言的最重要的特征；类——用于描述具有相同属性和方法的对象的集合，对象是类的实例；抽象——程序有能力忽略正在处理中信息的某些方面，即对信息主要方面关注的的能力；封装——也叫做信息封装，是指将相关的东西打包到一个单元中，之后便可用一个名字来引用这个单元；多态性——一个接口，多种方法，即一个名字可用于几个相关但不同的目的，多态性可以使程序中的数学运算符合常规的数学运算规则，为程序提供更强的表达能力，其次使得对不同类型的数据有同样的操作语义，可以实现程序的重用，而重用标识的资源，可以提高程序的可读性和可理解性；继承性——指一个对象可以得到另一对象的特性，通过继承，可以有效地以这种方式快速开发软件：创建最有代表性或者普遍意义的类，然后从该类继承变量或者方法创建新的类。封装、多态性和继承性被认为是面向对象编程中的三个核心。

传统的结构化分析与设计开发方法是一个线性过程，要求现实系统的业务管理规范，处理数据齐全，用户能全面完整地描述其业务需求。但传统的软件结构和设计方法难以适应软件生产自动化的要求，因为它以过程为中心进行功能组合，软件的可扩充和可复用能力较差。OOP 几乎没有引入精确的数学描述，而是倾向于建立一个对象模型，它能够近似地反映应用领域内的实体之间的关系，其本质是一种更接近于人类认知事物所采用的哲学观的计算模型。对象是对现实世界实体的模拟，因而能更容易地理解需求，即使用户和分析者之间具有不同的教育背景和工作特点，也可很好地沟通。

面向对象技术自 20 世纪 90 年代以来得到迅速的发展，它改变了以往软件系统分析、系统设计、系统开发的方式，大大提高开发的效率和维护的便利，因此从面向对象技术诞生以来，就在软件系统开发中得到了愈来愈多的应用。面向对象技术提出了对象、属性、方法、控制、类等软件工程概念，通过抽象的对象概念来模拟实际物理对象，由属性对对象进行描述，通过过程来改变对象的属性，完成某种操作或动作。其中的类、封装性、继承性、动态连接、多态性、模块化和实例化等概念和特性，使得对象一经创建即可被重复利用，也可以通过修改和扩充来创建相似的其他对象，因此以此为基础的软件系统开发、维护、扩展和集成变得容易和简便。

在规划支持系统和决策支持系统的构建中应用面向对象技术，可以使得系统的开发难度大大降低，节省系统开发和维护的人力物力以及时间，开发出的支持系统具有自身动态重组能力，增强了系统的灵活性和可用性，从而能够比较快速地对系统进行修改，及时准确地对相关问题作出判断，满足不同区域、不同时段、不同规划者和不同决策者的不同需求。

2.7.2 组件技术

组件 (Component, 简称 COM) 是完成特定功能的、符合二进制标准的软件模块。组件包含一个或多个对象。接口是组件中最重要的概念,它是组件实现的相关方法的集合,是组件与其客户之间严格类型化的契约。组件之间通过接口进行通讯,客户程序也必须通过接口调用组件的方法和功能。组件技术,是微软公司为了计算机工业的软件生产更加符合人类的行为方式开发的一种软件重用技术。在 COM (Component Object Model, 组件对象模型) 构架下,人们可以开发出各种各样的功能专一的组件,然后按照需要将它们进行组合,构成复杂的应用系统。

组件技术的优点体现在:(1)可重用性,由于组件标准是建立在二进制基础上的,因此可以重用组件对象的功能,而不用考虑组件具体是如何实现的;(2)开发语言无关性,即组件的实现不依赖于某一种特定的编程语言,并且编写组件的语言与调用组件的语言可以不同。

组件技术使近二十年来兴起的面向对象技术进入成熟的实用化阶段。在组件技术的概念模式下,软件系统可以被视为相互协同工作的对象集合,其中每个对象都会提供特定的服务,发出特定的消息,并且以标准形式公布出来,以便其他对象了解和调用。组件间的接口通过一种与平台无关的语言 IDL (Interface Define Language) 来定义,而且是二进制兼容的,使用者可以直接调用执行模块来获得对象提供的服务。传统的做法是将应用程序分割成文件,模块或类,然后将它们编译并链接成一个单模应用程序。它与组件建立应用程序的过程(称为组件构架)有很大的不同。一个组件同一个小微型应用程序类似,即都是已经编译链接好并可以使用的二进制代码,应用程序就是由多个这样的组件打包而得到的。自定义组件可以在运行时刻同其他的组件连接起来以构成某个应用程序。在需要对应用程序进行修改或改进时,只需要将构成此应用程序的某个组件用新的版本替换即可。早期的类库,提供的是源代码级的重用,只适用于比较小规模的开发形式;而组件则封装得更加彻底,更易于使用。

目前,主要有两种组件技术标准:OMG 公司制定的 COBRA 和 Microsoft (微软)公司推出的 COM。但由于微软在微机操作系统中的垄断地位,使得 COM 逐渐赢得了多数程序员的偏爱。COM 模型用于异质网络和操作系统中创建、使用和加入可重复使用的组件对象,理论上,这些组件对象可以互相通讯与交互,而与它们的开发语言、分布及原始平台无关。COM 规程包括一套标准 API、一个标准的接口集以及 COM 用于支持分布式计算的网络协议。可以把 COM 看作是某种(软件)打包技术,即把它看作是使软件的不同部分按照一定的面向对象的形式,组合成可以交互的过程和一组支持库。COM 对象可以用 C++、Java 和 VB 等任意一种语言编写,并可以 DLL 或作为不同过程工作的执行文件的形式来实现。

随着 COM 技术和 GIS 技术的发展,出现了组件式 GIS (COMGIS) 的概念。原来的巨型 GIS 系统正迅速分解为基本的 GIS 组件(宋关福,钟耳顺,1998;刘丹等,2002)^{[268][269]}。用户可以在可视化开发环境中将 GIS 组件嵌入到应用程序中,方便地实现 GIS 的相关功能。组件式 GIS 的基本思想是把 GIS 的各大功能模块划分为几个控件,每个控件完成不同的功能。各个 GIS 控件之间,以及 GIS 控件与其他非 GIS 控件之间,可以通过可视化的软件开发工具集成,形成最终的 GIS 应用。通过组件化,把 GIS 的功能适当抽象,以组件形式供开发者使用,将会带来许多传统 GIS 工具无法比拟的优点。

目前,COMGIS 的代表作应首推 MapObjects 以及 MapX 等。其中 MapObjects 由全球最

大的 GIS 厂商 ESRI(Environmental System Research Institute) 推出^[42] ;MapX 由著名的桌面 GIS 厂商 MapInfo 公司推出^[43]。国内的有北京超图地理信息技术有限公司的 SuperMap^[44]、武汉中地信息工程有限公司的 MAPGIS 组件^[45]和武汉吉奥信息工程技术有限公司的 GeoMap 等。

基于组件技术和COMGIS的规划支持系统和决策支持系统已有较多实例,包括环境规划、商业信息管理、资源管理、城市规划等。应用组件技术进行系统开发,不仅更有效地利用了GIS对于空间数据和属性数据的存储和分析能力,为用户提供面向需求的GIS功能,而且采用开放式的软件体系结构,降低开发成本,缩短系统开发和集成周期。在城市规划系统中,通过GIS平台和各种开发语言开发出各种模块(组件),例如数据输入、数据格式转换、地图编辑、数据管理、空间和属性组合查询、专题地图、图例显示、网络分析、拓扑处理、三维建模和三维模型显示等,组件之间通过属性、事件和方法等接口相互调用,集成在一起,能有效地实现系统各组件的重组和复用,提高了系统提高软件的可维护性和可靠性。

2.7.3 空间数据库

空间数据库是用于采集、存储、管理、检索、分析和表达空间数据和属性数据的计算机系统,能对海量数据进行存储和管理。空间数据库系统的形成和发展,是数据存储和管理的需要,也是对传统数据库系统在空间的扩展。

空间数据库是随着 GIS 的开发和应用而发展起来的数据库新技术,目前空间数据库系统尚不是独立存在的系统,它与应用紧密结合。空间数据库的研究始于 20 世纪 70 年代的地图制图与遥感图像处理领域,与传统数据库相比,空间数据库系统的扩充部分包括空间数据模型、空间关系、空间查询语言、空间索引、空间查询处理与优化、并行分布式空间数据库系统和空间数据仓库等。它涉及计算机科学、地理学、地图学、摄影测量与遥感、数字图像处理等多个学科。

空间数据库技术研究的主要内容包括以下几方面:

(1) 空间数据模型

空间数据模型是描述空间实体和空间实体关系的数据模型,一般来说可以利用传统的数据模型加以扩充和修改来实现,也可以用面向对象的数据模型来实现。

(2) 空间数据查询语言

空间数据查询包括位置查询、空间关系查询和属性查询等。前两种查询是空间数据库特有的,基本方式有面-面查询、线-线查询、点-点查询、线-面查询,点-线查询、点-面查询等。开发空间数据查询语言的目的是为了正确表达以上查询请求。

(3) 空间数据管理系统

空间数据管理系统的主要功能是对空间数据和空间关系的定义和描述,提供空间数据查询语言,实现对空间数据的高效查询和操作;空间数据的存储和组织;空间数据的直观显示等。空间数据管理系统比传统的数据库管理系统在数据的查询、操作、存储和显示等方面要

[42] <http://www.esri.com/software/mapobjects/index.html>

[43] <http://dynamo.mapinfo.com/miproducts/Overview.cfm?productid=1041>

[44] <http://www.supermap.com.cn/maindoc/simchin/products/supermapIII/index.htm>

[45] <http://www.mapgis.com.cn/product/dlxx.htm>

复杂许多。

目前，以空间数据库为核心的 GIS 的应用已经从解决道路、输电线路等基础设施的规划和管理问题，发展到更加广泛、复杂的应用领域。在城市规划中，空间数据是城市规划的基础，空间数据库的建立是各种规划支持系统的前提，其强大的储存、处理、分析空间数据的功能将为各种辅助规划系统和决策系统中的各种分析方法提供最基础性的支持。

2.7.4 空间数据挖掘

1989 年 8 月，在美国底特律市召开的第一届国际联合人工智能学术会议上，首次提出了从数据库中发现知识 (Knowledge Discovery in Database, KDD) 的概念。它针对的一般是非空间数据，但其研究和应用的成果势必对空间数据的利用造成影响，引导地理信息科学向更深的层次发展。1994 年，在加拿大渥太华举行的 GIS 国际学术会议上，我国李德仁院士首次提出了从 GIS 数据库中发现知识 (Knowledge Discovery from GIS, KDG) 的概念，并系统地分析了空间知识发现的特点和方法，认为它能够把 GIS 有限的数据库变成无限的知识，使 GIS 成为智能化的信息系统。1995 年，在加拿大召开的第一届知识发现和数据挖掘国际学术会议上，又提出了数据挖掘 (Data Mining, DM) 的概念，同时，李德仁院士也把 KDD 进一步发展为空间数据挖掘和知识发现，系统地研究或提出了可用的理论、技术和方法，空间数据挖掘和知识发现在地球空间信息学中的学科地位和基础。

数据挖掘是从大量的、不完全的、有噪声的、模糊的、随机的数据集中识别有效的、新颖的、潜在有用的，以及最终可理解模式的非平凡过程。它是一门涉及面很广的交叉学科，包括机器学习、数理统计、神经网络、数据库、模式识别、粗糙集和模糊数学等相关技术。

随着对地观测、获取设备的迅速发展，空间数据资源日益丰富。然而，数据资源中蕴含的知识远远没有得到充分的挖掘和利用，导致“数据爆炸但知识贫乏”；同时，要求用户详细分析这些数据并提取感兴趣的知识或特征是不现实的。因此，从空间数据库中自动地挖掘知识，寻找数据库中不明确的、隐含的知识、空间关系或其他模式越来越重要，空间数据挖掘 (Spatial Data Mining) 应运而生。

空间数据挖掘是在空间数据库的基础上，综合利用统计学方法、模式识别技术、人工智能方法、神经网络技术、模糊数学、机器学习、专家系统和其他相关信息技术完成的一个多步骤互相链接、反复进行的人机交互过程，其主要任务是按照一定的度量值和临界值抽取空间知识和进行与之相关的预处理、空间抽样和数据变换。

通过数据挖掘，可以从空间数据库中获得的知识类型有：普遍的几何知识、空间分布规律、空间关联规则、空间聚类规则、空间特征规则、空间区分规则、空间演变规则、面向对象的知识等。它们可用特征表、谓词逻辑、产生式规则、语义网络、面向对象方法和可视化等方法表达。

从空间数据库中挖掘数据、发现知识是一个多步骤互相链接、反复进行的交互过程 (1) 了解空间数据挖掘相关领域的情况，熟悉有关背景知识；(2) 从空间数据库中提取与空间数据挖掘过程相关的数据；(3) 检查数据的完整性及一致性，过滤其中的噪声数据，插补缺失数据；(4) 根据用户的要求，确定空间数据挖掘的目标知识类型；(5) 选择合适的数据挖掘、知识发现算法；(6) 运用选定的数据挖掘、知识发现算法，从数据库中提取用户需要的知识，对数据挖掘、知识发现的模式进行解释和评价。

空间数据挖掘的方法很多,根据发现对象可分为关系数据库、面向对象数据库、空间数据库、时态数据库、文本数据库、多媒体数据库、异质数据库、互联网 Web 等;根据发现方法可分为机器学习方法(归纳学习、决策树、规则归纳、基于范例学习、遗传算法等)、统计方法(回归分析、判别分析、聚类分析、探索性分析等)、神经网络方法(BP算法、自组织神经网络等)、数据库方法等;根据发现任务可分为分类、聚类、关联规则发现、时间序列预测、演化规则发掘等。

由于空间数据挖掘由空间数据库(主要是指 GIS 数据库)、数据挖掘系统和人机接口 3 部分组成,而从当前存在的系统状态看,空间数据库部分也是 GIS 系统的组成部分,所以空间数据挖掘的集成就是 GIS 系统、数据挖掘系统以及人机接口系统的集成。其中 GIS 系统与空间数据挖掘系统的集成是整个系统集成的核心。

在空间数据挖掘的理论和方法方面,空间数据挖掘重要的研究方向有:背景知识概念树的自动生成,不确定性状态下的数据挖掘,递增式数据挖掘,栅格矢量一体化数据挖掘,多分辨率及多层次数据挖掘,并行数据挖掘,新算法和高效率算法的研究,空间数据挖掘查询语言,规则的可视化表达等;在空间数据挖掘系统的实现方面,空间数据挖掘要研究多算法的集成,空间数据挖掘系统中人机交互技术和可视化技术,空间数据挖掘系统与 GIS、遥感解译专家系统、空间决策支持系统的集成等。

空间数据挖掘可以作为辅助决策支持和分析的工具,用于构建遥感解译专家系统和空间决策支持系统的知识库,也可以为空间数据仓库提供高级分析工具,还可以与 GIS 高度集成构成智能化软件。将空间数据挖掘的方法融入城市规划支持系统中,能为城市结构的调整提供现状分析和调整结果的模拟预测,为决策提供依据;同时,通过空间数据挖掘得到的空间三维数字地图也将突破二维表现方式的局限,城市规划信息系统的报建、勘察、审核、批复、监察、存档、公告等一系列的作业流程都将受到深刻的影响。

2.7.5 网络技术

计算机网络(network)就是在网络协议的控制下,由多台服务器,若干台终端,数据传输设备以及服务器与服务器间、终端与服务器间进行通信的设备所组成的计算机复合系统。它利用各种通信手段,例如电话、电报、微波通信等,把地理上分散的计算机有机地联系在一起,达到相互通信并共享软件、硬件和数据等资源的目的。

计算机网络的作用表现在:(1)信息交换,实现信息交换是计算机网络最基本的功能,主要完成网络中各个节点之间的通信;(2)资源共享,网络上的数据库和各种信息资源是共享的主要内容,它可以实现全世界的信息资源共享,极大地方便了人们的生活;(3)分布式处理,是指网络系统中若干台计算机可以互相协作共同完成一个任务,或者说,一个任务可以分布在几台计算机上并行处理,这不仅提高了系统的可靠性,而且大大地提高了工作效率。

网络技术与其他众多的信息技术一样,主要包含硬件和软件两方面的内容。网络基础设施、网络互连设备等属于硬件,而网络协议、网络程序和网络管理等属于软件。从网络的传输介质的角度出发,可以将网络分为无线网络和有线网络两大类。

网络技术的发展使时间和空间对于人们工作、生活和学习的限制得到了极大程度的缩小,建立在网络技术基础上的工作模式与传统模式相比,将更加自由、更少受到时间和空间的限制、有更广泛地域的合作者参与、有更多的学科交叉协作。这样的工作模式具体表现为:(1)空间角度:人们可能不需要在物质空间奔波,即可以与分布在更广阔地域的人合作,

共同完成工作，更广阔的地域意味着跨城市、跨区域、甚至跨国家；(2) 时间角度：人们的工作时间将更加自由，可以更及时地进行信息传递，工作时间与休息时间的界线将会越来越模糊，由于工作效率的提高实际工作时间有可能缩短；(3) 学科角度：“多学科融贯”的方法作为很重要的研究方法和工作方法已经为人们所熟知，但要实现真正意义上的“多学科融贯”并非易事，网络技术为多学科融贯提供了重要的技术保障，当然仅仅依靠网络技术还不足以实现多学科融贯，但是建立在网络技术基础上的多学科合作可以视为实现多学科融贯的有效途径之一。

网络技术的引入将对规划支持系统产生深远的影响，从数据的获取方面，网络技术为资源共享提供了可能，不同领域的数据可以通过网络传输与共享，提高工作的效率；对于规划者和决策者，网络技术提供了不同地点的参与者同时研究讨论同一问题的技术支持，这对于多位专家共同讨论某个重要规划项目是十分重要；同时通过网络，规划结果能够及时发布，有助于规划的透明化，促进公众参与。

2.7.6 多媒体技术

多媒体一词来源于英文“Multimedia”，利用计算机对多媒体进行处理和控制，形成了多媒体技术。多媒体技术是一种集声、像、图、文、通讯等为一体，并以最直观的方式表达和感知信息，以形象化的、可触摸（触屏）的甚至声控对话的人机界面操纵信息处理的技术。由于多媒体技术的迅速崛起和高速发展，越来越多的应用软件都大量使用了多媒体技术。

对多媒体技术的产生起到重要作用的技术条件主要有：计算机硬件条件的提高，包括大容量存储设备、高速处理器、高效声音适配器以及视频处理适配器等多种硬件设备和数码照相机、摄像机、投影仪等外围设备的出现与发展；数据压缩技术的出现，CD-ROM、VCD、DVD 的应用使得原本数据量非常大的文件能够轻松的保存和传输；多媒体的软件的支持，借助功能强大、使用方便的多媒体软件，多媒体技术得以运用于多领域、多学科中；相关技术支持，在多媒体技术中，每一种应用领域都有其独特的技术特点和条件，将相关技术融入多媒体技术中，是多媒体技术成功应用的关键。

多媒体技术主要针对的处理对象有：文字、图像、图形、动画、音频和视频信号。处理对象采用数字形式存储，形成相应文件，这些数据文件使用光盘、硬盘、存储芯片等作为存储介质。为了使计算机系统都能处理多媒体数据文件，国际上制定了相应的软件工业标准，规定了各个媒体数据文件的数据格式、采样标准以及各种相关指标。

多媒体技术的应用领域非常广泛，几乎遍布各行各业以及人们生活的各个角落，由于多媒体技术具有直观性、信息量大、易于接受和传播迅速等特点，多媒体应用领域拓展十分迅速，如科研设计、教育领域、娱乐业、商业广告、旅游业、互联网和过程模拟等领域。

在城市规划中，多媒体技术与 GIS 相结合，能够以视觉、听觉、触觉等形式直观、形象、生动地表达空间信息，改善 GIS 的数据采集、数据处理以及成果表达与输出的效能，大大提高规划空间信息可视化的效果。因此多媒体技术与 GIS 相结合已成为 GIS 技术的重要发展方向之一。

3 规划支持系统实现

第三部分主要对笔者提出的规划支持模型（Planning Support Model，PSM 模型）这种规划支持系统实现形式进行探讨，是本书的重要内容之一。本部分从 PSM 模型需求分析、总体设计、详细设计、开发模式以及整个应用流程进行了详细的介绍，PSM 模型取得了较为成功的应用，证明该模型具有较好的可移植性，同时开发工作少、规划效率高，可以作为规划支持系统推荐的实现形式。

3.1 规划支持模型

本部分的研究对象 规划支持模型封装了规划对象的各个要素，可以在 PSM 模型的基础上开发 CAP 系统。PSM 模型较好的可移植性使得它可以提高计算机辅助规划系统(CAP 系统)的开发效率，同时同一套 PSM 模型适用于不同 CAP 系统的开发，具有较好的普适性。笔者将在下文中以区域水污染控制系统规划中的 PSM 应用为例，介绍采用 UML 设计 PSM 模型的技术思路，并给出 PSM 模型的两种开发模式。

3.2 模型设计

模型设计是模型开发的基础，选择合适的工具和方法进行模型的设计，是模型开发和应用的有力保障，下面具体针对 PSM 模型的需求分析、总体设计和详细设计进行讨论。

3.2.1 需求分析

(1) 结构需求

PSM 模型主要通过通过对区域水污染控制系统的各要素以面向对象的方法进行模拟来实现辅助规划的功能，要对 PSM 模型进行结构设计，首先应明确 PSM 要模拟的具体实体系统的要素构成。

对于区域水污染控制系统这一复杂的系统，从结构上可以分为子系统、模块和单元三个层次，其中子系统层次主要包括污染物发生子系统、污水收集/输送子系统、污水处理子系统和接纳子系统。每个子系统又包括相应的模块，具体每个子系统的模块构成如下(其中接纳子系统主要指污水的接纳对象，这里以河流为例，具体包括概化后的河段以及河段两端的取水口、水文监测断面、水质监测断面和排污口等人工要素)：

1. 污染物发生子系统：独立工业污染源、生活污染源、工业园区、农业面源，城市面源；
2. 污水收集/输送子系统：污水泵站、污水管道；
3. 污水处理子系统：污水处理厂(或土地处理系统、氧化塘等)；
4. 接纳子系统：取水口、水文监测断面、水质监测断面、排污口和河段(或其他接纳水体如湖泊、海洋、土地、回用等)。

其中各模块之间的具体关系如图 24 所示，其中独立工业污染源和生活污染源的污水通过污水管道和污水泵站可以直接排入河流，也可以经过污水处理厂处理，经污水管道排入河流；而对于城市面源和农业面源，一般直接排入河流；工业园区的污水，通过其内部的污水处理系统一般可以直接排入河流。

对于基本元素相对较为复杂的模块，一般还可以分解为第三层次 单元，如污水处理厂模块还可以分解为格栅、曝气池和沉淀池等单元。本研究所讨论的 PSM 模型，考虑到规划的层次和需求，仅就第一层次和第二层次进行研究，不涉及第三层次 单元。

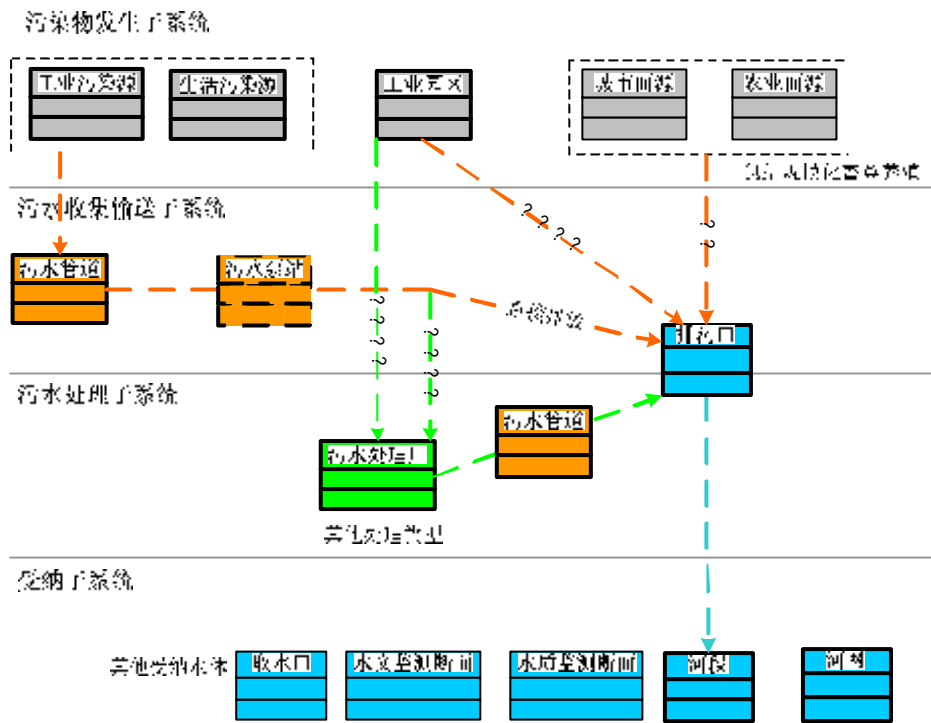


图 24 区域水污染控制系统要素构成示意图

(2) 功能需求

区域水污染控制系统规划，主要包括资料调查与处理、水环境解析、污染源解析、基本服务区（即汇水单元，是污水收集、处理的基本地理单元，若干个这样的基本服务区的组合构成污水处理厂的服务区）解析、方案生成、方案评价与优选和方案实施等几部分的工作，各步工作一般都涉及到空间、属性数据的管理和分析工作。规划各阶段 PSM 模型要实现的功能具体如图 25 所示。总体上 PSM 模型主要从数据标准化、数据处理、空间查询、数据分析和成果表达等几个方面起到辅助规划的作用。

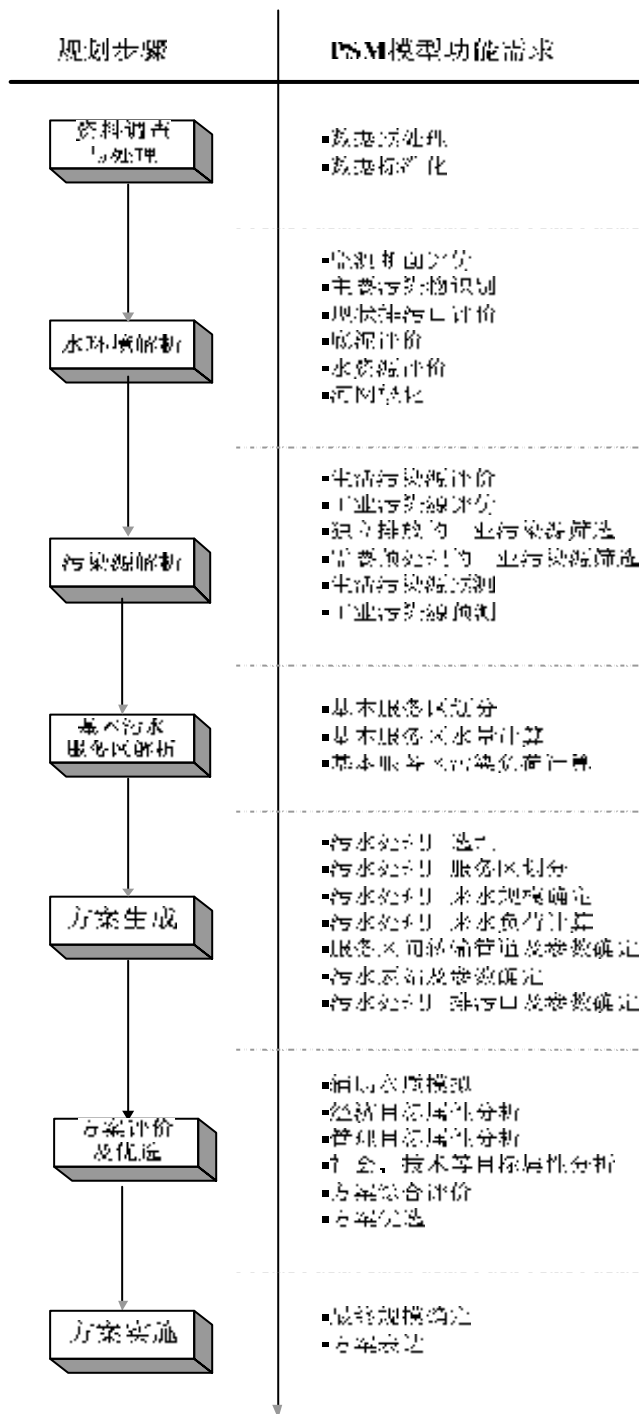


图 25 PSM 模型功能需求分析图

3.2.2 总体设计

(1) UML 简介

鉴于 UML 是软件工程上的通用建模语言,笔者采用 UML 对 PSM 模型的总体结构和具

体模型进行设计，以便于 PSM 模型的开发。

UML (Unified Modeling Language , 统一建模语言) 是一种软件工程建模语言，是第三代用来为面向对象开发系统的产品进行说明、可视化和编制文档的方法。它是由信息系统和面向对象领域的三位著名的方法学专家 Grady Booch、James Rumbaugh 和 Ivar Jacobson 提出的。这种建模语言得到了随之建立的“UML 伙伴联盟”的应用，并得到工业界的广泛支持，OMG 组织 (Object Management Group) 将其纳为业界标准。UML 目前已取代软件工程的众多分析和设计方法成为一种标准。

UML 是一种标准的图形化建模语言，它是面向对象分析与设计的一种标准。UML 的目标是用面向对象的方法描述任何类型的系统。最直接的是用 UML 为软件系统创建模型。UML 的应用贯穿在系统开发的五个阶段 需求分析、分析、设计、构造和测试。

(2) 模型定位

1. 服务于区域水污染控制系统规划，实现辅助规划的功能；
2. 作为 CAP 系统的开发基础，可以用来开发不同需求的 CAP 系统；
3. 模型应为其向智能化方向发展提供相应的接口和解决方案；
4. 模型应具有一定的通用性，便于向流域水污染控制系统规划和城市水污染控制系统规划过渡。

(3) 模型结构

区域水污染控制系统 PSM 模型的总体结构如图 26 所示，主要包括要素模型、规则模型、方法模型和模拟模型：

1. 要素模型用于定义区域水污染控制系统各模块层次的要素，是 PSM 模型的基础；
2. 规则模型主要任务是用于驱动要素模型对象的建立和维护，可以最大程度地减少要素模型应用于规划时的数据维护的工作量，提高数据的管理效率和完整性。其中域模型用于维护要素模型属性字段的取值范围，关系模型用于维护要素模型之间的拓扑关系；
3. 方法模型用于要素模型数据集的操作，辅助规划数据 (包括要素模型对象的属性数据) 的计算、查询、更新等功能主要是通过方法模型来实现的；
4. 模拟模型主要用于河流的水质模拟，模拟模型可以是新开发的水质模型，也可以是现有的水质模型。在设计阶段，只对模拟模型的选择和基本属性进行介绍。

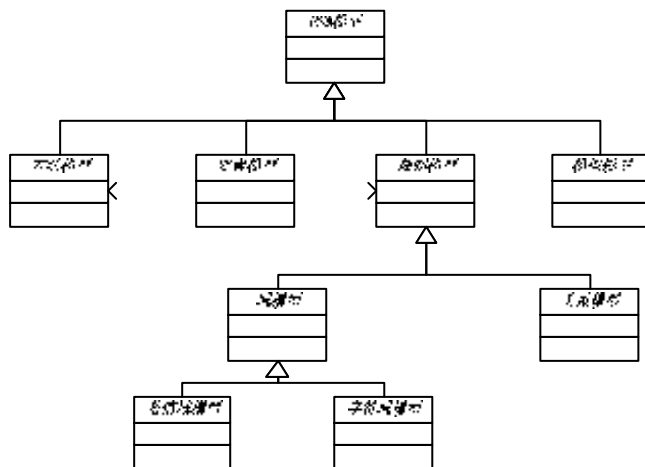


图 26PSM 模型总体结构图

下面具体就要素模型、域模型、关系模型、方法模型和模拟模型的设计进行介绍。

3.2.3 详细设计

(1) 要素模型设计

要素模型的类图如图 28 所示，主要考虑了区域水污染控制系统中模块层次的基本要素，主要包括独立工业污染源、生活污染源、农业面源、城市面源、工业园区、取水口、水文监测断面、水质监测断面、河段、河网、污水管道、排污口、污水泵站、基本服务区、污水处理厂、水质功能区和规划方案等。其中的规划方案要素模型用于组织区域水污染控制系统的各个要素，以便于进行规划方案的生成、评价和优选等工作。

(2) 域模型设计

域模型定义了各要素模型属性字段的取值范围，分为数值域模型和字符域模型两种。可以定义每个要素模型的属性字段对应某一个域模型的对象，以限制该成员变量的取值范围。采用 UML 进行域模型设计的类形式如图 27 所示。

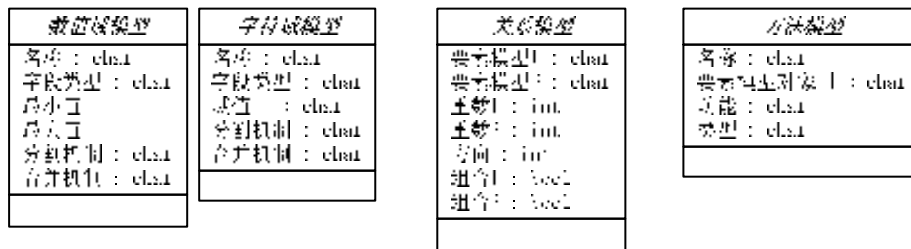
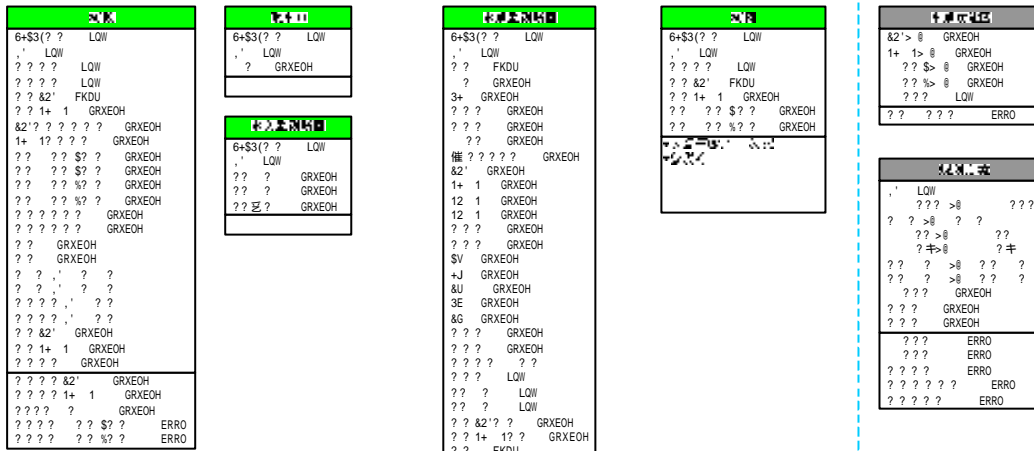


图 27 域模型（左一、左二）、关系模型（左三）及方法模型（右一）的类结构图

表 9 和表 10 分别为 PSM 模型中所设计的部分数值域模型对象和字符域模型对象，以及采用这些域模型对象的要素模型相应字段名称。



水质监测系统



水质监测系统



水质监测系统

图 28 要素模型设计图

表 9 数值域模型设计表

名称	字段类型	最小值	最大值	分割机制	合并机制	应用字段
Level	短整形	1	6	复制	复制	水体功能区划/现状水体级别字段（6代表劣V类水体）

名称	字段类型	最小值	最大值	分割机制	合并机制	应用字段
PH	短整形	1	13	复制	复制	水体 PH 值
Industry	长整形	1000	9999	复制	复制	工业污染源的行业代码

表 10 字符域模型设计表

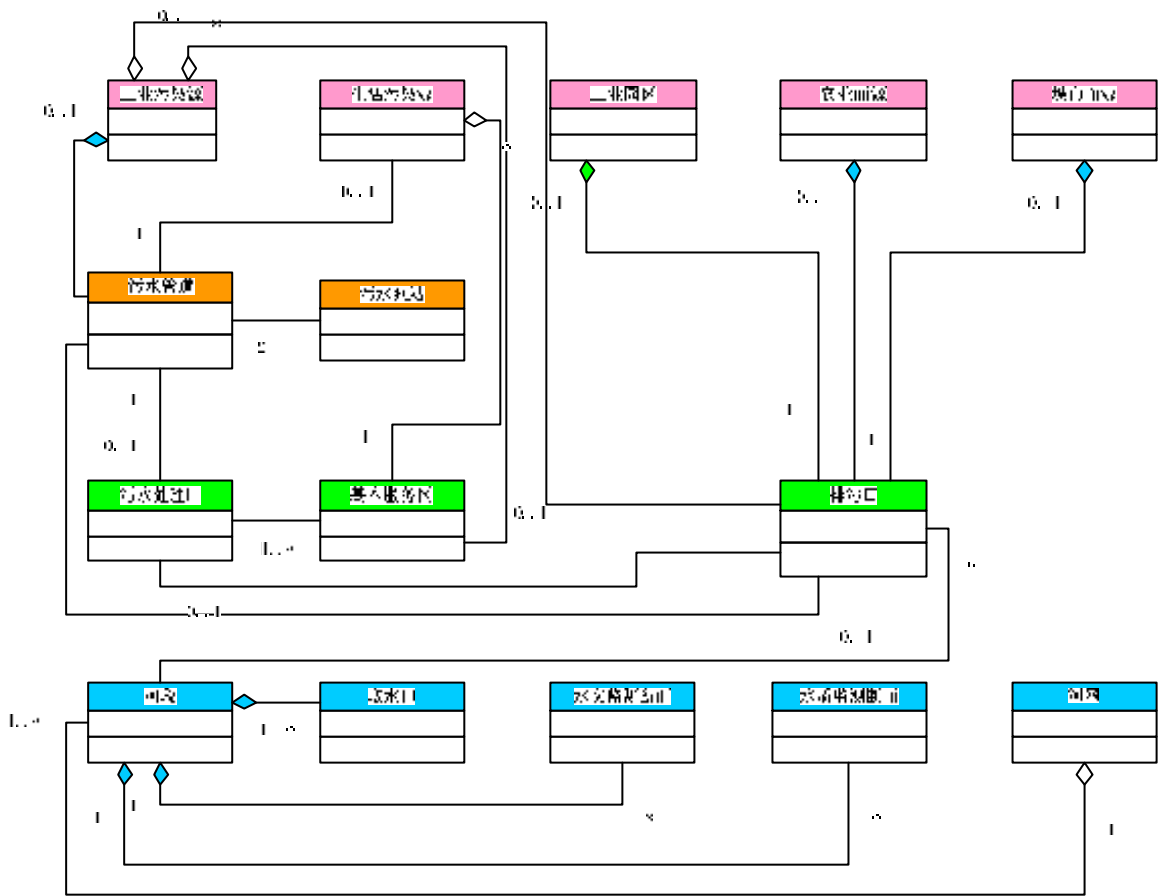
名称	字段类型	域值	分割机制	合并机制	应用字段
District	文字	研究区域内各行政区的名称	复制	复制	区名称
Town	长整形	研究区域内各镇的名称	复制	复制	镇名称
DN	长整形	100, 200, 300, 500, 800, 1000	默认值	复制	管径

(3) 关系模型设计

关系模型分为简单关系和复合关系：如果要素模型对象 A 和要素模型对象 B 之间是简单关系，对象 A 从系统中被删除后，对象 B 依然存在；而如果是复合关系，一个对象被删除，消息传送给相关联的对象，则其也将被删除。

图 29 中要素模型对象与要素模型对象之间的连线表示要素模型对象之间的关联，如污水处理厂要素模型和基本服务区要素模型的关联，表示一个污水处理厂至少对应一个基本服务区，它们之间是一种简单关系。而河段要素模型和监测断面要素模型的关联，表示一个河段可以有 0~ 个监测断面，一个监测断面在一个河段上，如果删除河段要素模型对象，则它所对应的监测断面要素模型对象也自动删除。

关系模型也以类的形式存在，其形式如图 27 所示。



注意：图中二元关系如果不带方向，默认为双向关系。

序号	名称	要素模型 对象数组	类别	功能
		污染源		
16	ASS 受纳河流	工业污染源, 生活污染源	生成	根据等标污染负荷, 统计主要受纳河流
17	ASS 主要污染源	工业污染源	生成	根据等标污染负荷, 统计主要污染源
18	ASS 主要贡献镇	工业污染源, 生活污染源	生成	根据等标污染负荷, 统计主要污染贡献镇
19	SEL 独立排放的工业污染源	工业污染源	更新	筛选独立排放污染源
20	SEL 预处理的工业污染源	工业污染源	更新	筛选预处理的污染源图层
21	SEL 预处理的工业污染源分类	工业污染源	更新	对预处理的工业污染源进行分类
22	FORE 污染源水量	工业污染源, 生活污染源	更新	更新污染源预测水量
23	FORE 污染源负荷	工业污染源, 生活污染源	更新	根据水量和浓度, 更新污染源预测负荷
24	SEN 基本服务区	工业污染源、生活污染源, 污水处理厂	更新	更新基本服务区的水量和负荷属性
25	SEN 污水处理厂图层	基本服务区, 污水处理厂	新建	生成污水处理厂图层
26	SEN 污水处理厂进水浓度	污水处理厂	更新	计算各污水处理厂的进水浓度
27	SEN 排放口图层	污水处理厂, 排放口	新建	完善排放口图层
28	SEN 干流排放口图层	排放口	新建	生成干流排放口图层
29	SEN 支流排放口图层	排放口	新建	计算支流排放口图存
30	SEN 河段纳污情况	河流、排放口	更新	统计河段各方案下的纳污情况
31	CAL 基建费用	污水处理厂、污水管道、污水泵站	更新	计算各方案的基建费用
32	CAL 运行费用	污水处理厂、污水管道、污水泵站	更新	计算各方案的运行费用
33	CAL 方案年总费用	污水处理厂、污水管道、污水泵站	更新	计算各方案的年总费用
34	CAL 方案水质模拟输入	排放口	生成	根据排放口图层数据, 为模拟模型提供输入数据
35	CAL 方案水质模拟输出	监测断面	更新	获得方案水质模拟结果, 更新监测断面图层
36	CAL 规划方案	规划方案、污水处理厂、污水管道、污水泵站、排放口	生成	生成各方案的详细属性表

序号	名称	要素模型 对象数组	类别	功能
37	CAL 方案综合评价	规划方案	更新	生成各方案的最终评价结果，以用于方案优选

注：方法模型“PRE 数据标准化 (1-10)”表示在本研究的 PSM 模型中，预留 10 个方法模型用于数据标准化。具体用于数据标准化的方法模型的预留数量取决于规划基础资料的数量、质量和深度等因素。

(5) 模拟模型设计

模拟模型（即专业规划模型）主要用于水质模拟，建立污染源与接纳水体之间的响应关系。可以采用 UML 对模拟模型进行设计，其类的形式如图 30 所示，每一个模拟模型对应于该类的一个对象。在 PSM 模型中，一般提供几个模拟模型用于选择。表 12 给出部分模拟模型的具体设计。

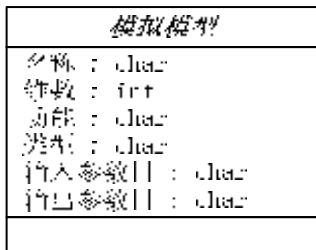


图 30 模拟模型的类结构图

表 12 给出了 PSM 模型中模拟模型结构的具体设计。

表 12 模拟模型结构设计表

序号	名称	维数	输入参数	输出参数
1	宏观水质模型	0	节点负荷信息及河流流量	节点基本水质
2	Streeter-Phelps(S-P)	1	排放口数据及河流参数	节点基本水质
3	CSTR	0 维串联的 1 维	水文参数及排放口参数	各段综合水质
4	QUAL-II	1	水文参数、排放口参数等	各断面综合水质

注：现有的水质模型较多，本文只列出几个典型的模型，具体的模型选取可在规划工作中，根据实际需求确定。宏观水质模型的具体设计将在下一章水质模拟模块开发中进行介绍。如无特殊说明，本论文中所提及的 COD 均指 COD_{Cr} 。

3.3 模型开发

在利用 UML 进行 PSM 模型总体设计和详细设计的基础上，需要采用计算机软件工程的相关技术对 PSM 模型进行开发，以用于 PSM-CAP 系统（基于 PSM 模型的 CAP 系统，下同）的开发。近年来计算机技术有了较为快速的发展，数据库技术、地理信息系统技术、面向对象技术都有了较大的进步，传统的面向过程的开发模式已显得不适应 PSM 模型 CAP 系统开发的需要。

对于可应用于不同区域的水污染控制系统规划的 CAP 系统，鉴于规划的详细程度、复杂度、规划人员的计算机掌握能力、CAP 系统开发投入、现有计算机软硬件条件等多方面的差异，需要不同的 PSM 模型及 PSM-CAP 系统的开发模式，以适应不同规划的需要。

本章主要提出基于 COM 和 Geodatabase 的两种 PSM 模型及 PSM-CAP 系统的开发模式，其中前者具有开发工作量大、系统相对灵活、规划效率高等特点，而后者具有开发工作量小、规划效率相比前者低和手动干预多等特点。具体对比如表 13 所示。

表 13 PSM 模型开发模式对比表

开发模式	COM 模式	Geodatabase 模式
功能	一般	较多
ArcGIS 支持	不需要	需要
辅助规划效率	较高	一般
系统成本	较低	较高
COMGIS 组件支持	需要	不需要
PSM 模型开发的工作量	较大	较小
PSM-CAP 系统开发的工作量	较大	较小
PSM 模型实体形式	DLL、OCX、EXE 等	Geodatabase
PSM-CAP 系统实体形式	应用软件	ArcGIS 扩展

3.3.1 COM 开发模式

下面就基于 COM 进行 PSM 模型和相应 PSM-CAP 系统开发的具体过程进行介绍。

(1) PSM 模型的开发

要素模型、域模型、关系模型和方法模型主要以 COM 方式进行开发。具体的开发流程如下（以 Visual C++ 为例）：

1. 框架生成：将 UML 设计的类图采用 CASE 方法导出为 Visual C++ 的工程文件，生成要素模型的结构代码（Boggs, Michael, 2002）；^[270]
2. 要素模型开发：应用 COM 技术对要素模型进行开发，设计并建立 COM 对象和相应的接口，采用 ATL 方法，C++ 语言和 Visual C++ 编译环境（Armstrong Tom, Patton Ron, 2001）；^[271]
3. 域模型开发：根据域模型的设计，修正要素模型的代码，实现各个域模型类的结构代码；
4. 关系模型开发：根据关系模型的设计，编写关系模型的代码，并将关系模型嵌入要素模型的生成、编辑等函数中；
5. 方法模型的开发：根据方法模型的设计，编写具体的实现代码，其中方法模型涉及到的要素模型类，以参数的形式出现在方法模型的对应函数中；
6. 模型打包：将 COM 对象打包成一个 DLL（Dynamic Link Library，动态链接库）文件，作为 PSM 模型的一部分，为 PSM-CAP 系统的开发提供底层支持。

模拟模型的开发是 PSM 模型开发的重点之一。作为建立污染源与河流水环境质量之间输入 - 响应关系的水质模拟模型，在一般的规划项目应用中，为了保证多个模拟模型能够紧密集成于 PSM 中，需要保证所有备选的模拟模型具有同样的封装形式和引用接口，基于组件的模拟模型是一种较好的解决方法。

一般的模拟模型都是采用面向过程方式进行开发，复杂的面向过程的模拟模型重新沿用面向对象的模式进行开发显然是不可行，下面具体针对传统模拟模型的组件化封装以及基于

组件的新模拟模型的开发进行探讨。

A、基于 COM 的模拟模型结构

在设计模拟模型组件时，必须先了解它需要提供的功能，分析组件应该提供几个接口，把实现的函数作为方法提供给用户，而对于一些中间调用的私有函数，则应该声明为实现类的私有成员函数，不应作为接口的方法函数公开。图 31 为 COM 组件的概念框图，COM 组件是以 DLL 或 EXE 文件形式存在的，其中 DLL 为进程内调用模式，而 EXE 为进程间（外）调用模式，图 31 展示的是以 DLL 形式存储的组件。一个 DLL 文件一般可以存储多个组件，每个组件可以有多个接口，每个接口包含若干函数。

每个 DLL 均有 DEF 文件用于描述 DLL 文件的入口，以便于其内部组件的调用。同时每个组件都有一个类厂，以便于访问该组件的接口。客户端可通过 CoCreateInstance 函数调用 DLL 文件中的组件。

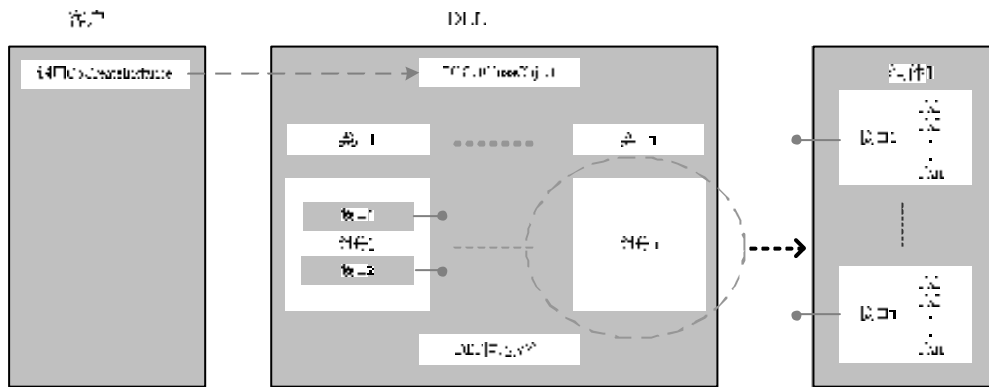


图 31COM 组件的概念框图

图 32 为基于 COM 的模拟模型库框图，其中模拟模型库以 DLL 形式存在，模拟模型库索引文件用于描述 DLL 中存储的若干模拟模型的信息。这里每一个模拟模型对应图 31 中的一个组件，每一个模型描述对应图 31 中的类厂，用于标识每个模拟模型所包含的子模型的信息。

每个模拟模型可以包括若干个子模型（对应于图 31 的接口），而每个子模型又由若干个函数来实现模拟模型的基本功能。通过建立子模型库索引即模型字典，可以实现所有模拟模型的索引，便于模拟模型的选择与应用。

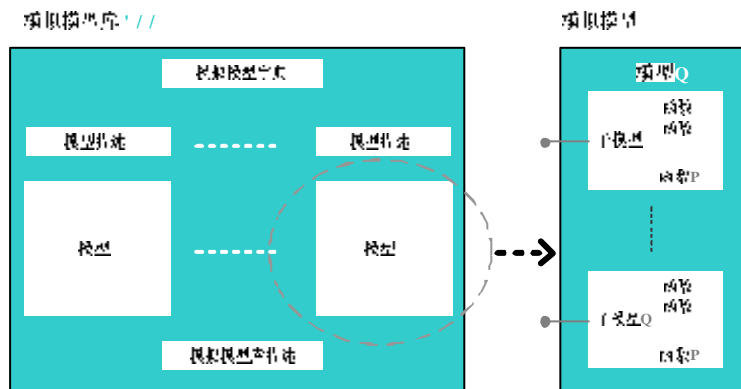


图 32 基于 COM 的模拟模型库框图

B、基于 COM 的模拟模型的开发

采用 COM 技术开发模拟模型库的主要思路：对于新开发的模拟模型，可以采用 COM 技术直接进行模拟模型的开发；对于已有的模拟模型，采用 COM 技术对已有的模拟模型进行封装，将模拟模型的输入输出模块按标准的格式集成到组件中。

一、基于 COM 的模拟模型的开发

模拟模型主要一般由三个方面构成，输入模块、处理模块、输出模块。采用 COM 技术开发模拟模型，需要利用 COM 标准来包装模型的算法，把运行结果作为接口返回给用户。

在采用 COM 技术进行模拟模型开发的过程中，应尽量把中间过程的接口留给用户，实现 COM 的层次功能，扩大其应用范围。开发过程中为了便于实现模型的参数率定、模型检验和灵敏度分析（状态与目标对参数，目标对约束）等功能，可以考虑把这些功能作为模拟模型组件所封装的函数，引出相应的接口给客户调用，以提高模拟模型的应用效率。

二、基于 COM 的已有模拟模型的封装

对于已有模拟模型的基于 COM 技术封装，国内外这方面的研究几乎没有，相对比较具有挑战性。基于 COM 技术的模型封装，主要思路是把待封装的模型集体打包至一个 DLL 文件中，利用 COM 标准来封装已，把模型的输入、输出作为组件接口供用户调用。对于不同类型的已开发的模拟模型，可以采用不同的封装方法，具体方法如下：

1. 对于复杂的含有多模块的模拟模型，应将其分解为多个接口，每个接口有相应的方法与属性，然后再将各接口实现的功能进行聚合或包容，实现整体的功能；
1. 基于 DOS 开发的模拟模型，一般以命令行和数据文件作为模拟模型的输入，通过键盘宏可以控制命令行的输入，同时数据文件也可以采用 COM 的库函数来读入，总体上的思路就是通过键盘宏来控制模拟模型的使用；
2. 对于基于 Windows 开发的模拟模型：如果它本来就是基于组件开发的，则可以利用 COM 的包容或聚合手段直接利用该模拟模型；如果不是，则也可以通过键盘宏来控制窗口的输入。

三、宏观水质模型的开发要点

下面具体给出一种基于 COM 的用于区域（流域）级别水质模拟的“宏观水质模型（Macro-water quality model, MWQM）”，该模型本质上为零维串联的一维模型，不考虑水体的自净能力，参数主要包括排放口的位置、水量、污染物负荷，以及概化后的河网空间分布、水量和长度等。

该模型基于组件进行开发，在将河流概化为单线河的基础上，通过建立包括河流起始点、污水排放口、干支流交点的点集，生成基本的河段空间数据集，完善其上下游、分支等拓扑关系，以及河段的相关属性数据：河段流量、长度、起点的污染物排放量、排放负荷等。

对于上下游河段之间的污染物响应关系，主要做了以下考虑：对于起点是排放口的河段，认为排放口的排放负荷瞬间在该河段内达到平衡，而对于起点是其他河段终点的河段，也认为在瞬间污染物达到混和，该河段的流量和总污染负荷是其各支流的总和。

对于概化后的河流，均为单线河，空间结构主要分为树状和环状两种，其中树状河流的

污染物浓度求解，可以参考排水管网的水力、水量计算方法，而环状河流的求解，可以参考水管网的压力平差方法。对于感潮河流，因为流量一直在变化，这类河流的模拟，需要获取同一个潮周期内不同时间段的流量资料，进行多次平行的水质模拟，以完成感潮河流整个潮过程的水质模拟。

这种模型具有需要基础数据少、算法执行效率高、易于与 PSM 模型集成和输入输出方便等特点，一定条件下可以用于水质的预模拟，对于自净能力较弱的河流，本模型更为适用。

四、基于 COM 的模拟模型的特点

总体上，采用上述方法开发的基于 COM 的模拟模型具有如下特点：

1. 符合模拟模型面向对象的开发趋势，便于应用于越来越多的面向对象开发的专业软件中；
2. 统一的接口标准便于模拟模型的调用，也便于模拟模型的层次架构的建立；
3. 基于 COM 的模拟模型是模型封装的一种新思路。这种方法可以避免各种模拟模型开发语言之间转换的复杂性，最大可能地实现代码的复用；
4. 为模拟模型与 GIS 的整合提供了便利条件，统一 GIS 应用与模型的开发模式。

(2) PSM-CAP 系统的开发

PSM 模型的开发结果是两个 DLL 文件，其中一个用于存储要素模型、域模型、关系模型和方法模型，一个用于存储模拟模型。在 PSM 模型开发的基础上，可以进行 CAP 系统的开发。根据需求分析，PSM-CAP 系统的基本结构如图 33 所示。主要分为四个系统层次，依次是系统底层、系统应用基础层、系统应用层和统一用户界面（接口）。每一层次分别基于下一层次开发，为上一层次提供服务。

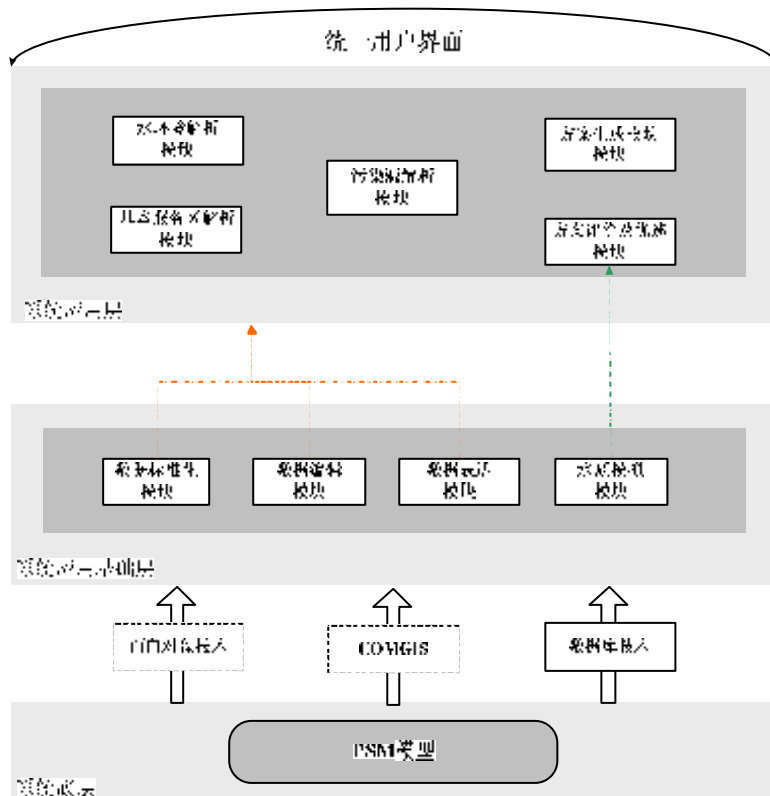


图 33 PSM-CAP 系统结构框图

整体上，PSM-CAP 系统的技术实现方法如下：

1. 开发语言及开发环境：C++ / Visual C++
2. 数据库平台：Microsoft Access
3. 基本组件：ESRI MapObjects、PSM 模型、ADO
4. 组件开发方法：ATL (Active Template Library)

PSM-CAP 系统的开发流程如下：

1. 准备阶段：在 PSM 模型开发的基础上，准备用于 PSM-CAP 系统应用基础层设计的两个 DLL 文件；
2. 系统应用基础层开发：本层次的开发方法和流程将在下文作具体介绍；
3. 系统应用层开发：在应用基础层开发的基础上，结合具体的系统需求和 PSM 模型的设计进行开发；
4. 统一用户接口开发：主要用于集成 PSM-CAP 系统各模块的主要功能，为用户提供访问系统应用层的接口；
5. 载入数据，进行系统测试，最终完成 PSM-CAP 系统的开发。

下面具体针对应用基础层各模块的开发进行介绍：

A 数据标准化模块

数据标准化模块主要用于对预处理后的电子数据（包括空间数据、属性数据）进行标准化，以用于要素模型对象的生成。其中空间数据的标准化部分，可以基于 COMGIS 组件，结合 PSM 模型的要素模型结构和方法模型进行开发，同时需要融入域模型和关系模型，以保证标准化后数据的完整性和有效性。

B 数据编辑模块

数据编辑模块主要实现对标准化后的空间数据（主要是指要素模型）进行编辑的功能，包括空间信息编辑和属性信息编辑。通过数据编辑，实现规划方案生成的功能。数据编辑模块可以基于 COMGIS 组件进行开发，同时该模块的开发应引入 PSM 模型的域模型和关系模型，以保证规划数据的完整性，实现系统的自动维护功能。

C 数据表达模块

数据表达包括空间数据表达和属性数据表达，其中空间数据表达是指空间要素的显示，主要用于根据相关数据文件显示区域水污染控制系统的基本要素，可以基于 COMGIS 进行开发：通过对 COMGIS 的函数接口进行有效封装实现数据表达的功能；而属性数据表达，主要用于显示水环境质量评价结果、污染源解析结果和规划方案的相关属性等，可以通过对数据库组件 ADO 进行封装实现。

D 水质模拟模块

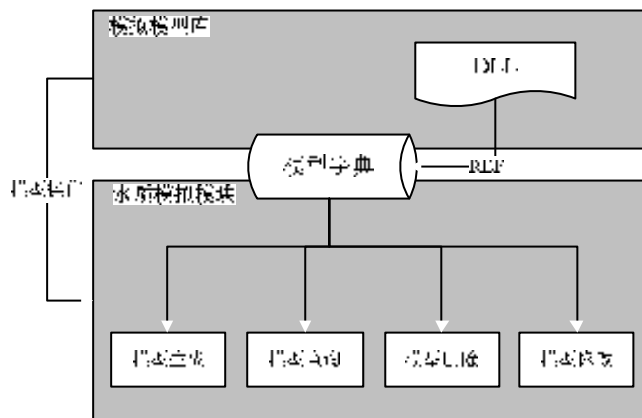
水质模拟模块的开发是在模拟模型开发的基础上，实现模型的管理功能，该模块的结构框图如图 34 所示，主要实现如下几方面的功能：

1. 模型表示：用知识、数据、子程序、对象等方法表示基本模型；
2. 模型存储：提供模型在计算机中的存储方法，便于进行模型管理；

3. 模型维护：提供模型的增加、删除、修改、查询、浏览等功能；
4. 模型运行：为模型的运行提供输入、输出的数据接口。

由于模拟模型基于 COM 进行开发，其开发成果为一个包括多个模拟模型的 DLL 文件，由于 DLL 中保存有该 DLL 文件的入口信息以及内部组件的信息，同时每个组件的类厂也具有该组件的接口信息，提取这些信息可以作为模型字典的索引，实现模型的查询功能。

同时，利用 COM 的注册表注册与卸载功能，可以实现模型的添加、删除功能；COM 的聚合与包容特性，使得模型的组合、生成等功能可以更方便地实现。对于模型输入输出的数据接口，可以针对 DLL 内不同模拟模型的输入输出特点编写文件接口，保证本模块与其他模块的数据交换。



3.3.2 Geodatabase 开发模式

基于 Geodatabase 开发的 PSM-CAP 系统,可以实现更为强大的功能,但是要依赖于 ESRI 的 ArcGIS 平台和微软的 Access 数据库或 SQL Server 数据库(本文选用 Microsoft Access 数据库)(Andy MacDonald, 2001)^[272]。这种开发方式主要包括三大模块的开发工作,其一为包括要素模型、域模型和关系模型的要素模块的开发,其二为基于 Microsoft Access 的方法模型的开发,其三为基于模拟模型的模拟模块的开发。

(1) Geodatabase

Geodatabase (地理数据库)是美国 ESRI 公司在 ArcGIS 8 中推出的一种新型的面向对象的空间数据库,是继 CAD 数据模型和 Coverage 数据模型之后的第三代地理数据模型。它采用面向对象技术将现实世界抽象为若干对象类组成的数据模型,每个对象类有各自的属性、行为、规则,对象类之间又有一定的联系。用户可以在已有的空间数据模型之上,建立符合自己需求的扩展模型,具有可扩展能力。

Geodatabase 相对于 Coverage 数据模型在支持复杂网络 (Complex Network)、支持要素类之间的关系 (Relationship)、支持面向对象 (Object Oriented) 的要素等方面进行了扩展。Geodatabase 可以对地理要素类和地理要素类之间的关系、地理要素类集合网络、要素属性表对象、注释类 (Annotation Class)、标注类 (Dimension Class) 等进行有效的管理,并支持对地理数据库要素类、关系以及几何网络进行建立、删除、修改等操作。同时,Geodatabase 数据模型提供了大量的实体对象模型 (如小溪、公路、建筑物、道路),让用户摆脱经过抽象的点、线、面模型,更接近于人类对地理空间世界的认识。

Geodatabase 有两种模式,即个人与多用户 Geodatabase,个人 Geodatabase 支持内置于 ArcGIS 系统并提供对本地数据的访问,适用于面向项目的 GIS,在 Microsoft Access 数据库平台上实现,提供生成和更新 Access 数据库的服务,可处理小型或适中的 Access 数据库。多用户的 Geodatabase 是通过 ArcSDE (空间数据库引擎)实现的。ArcSDE 可以生成和访问从小型到大型的 Geodatabase 并提供关系型数据的开放界面。ArcSDE 支持版本管理,可以远程访问地理数据,允许多用户查看和编辑相同的地理数据。本研究中采用个人 Geodatabase 模式,基于 Microsoft Access 实现。

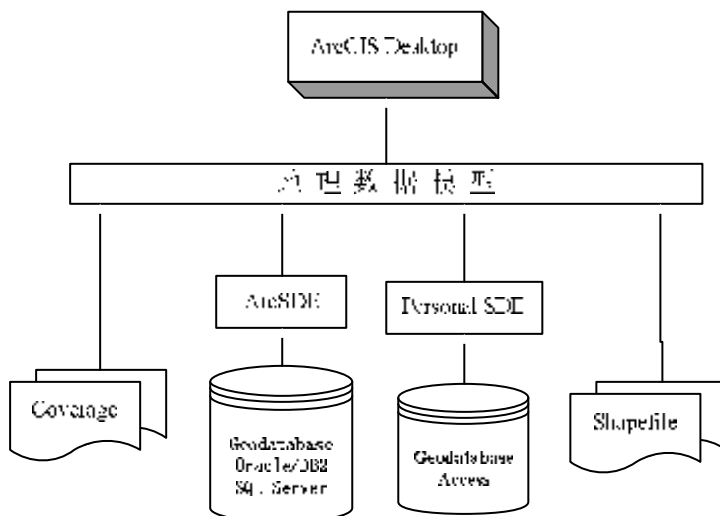


图 35 ArcGIS 接入 Geodatabase 方式框图

Geodatabase 数据模型的优点在于要素能够完全存储在一个数据库中，大型的地理要素类型可以进行无缝存储。Geodatabase 使用地理数据库数据模型，要素在数据库中被存储为相应的记录，使物理数据模型和逻辑数据模型更加接近。Geodatabase 中的数据对象与逻辑数据模型中定义的对象大体一致，同时 Geodatabase 可以不需编写任何代码实现大多数的定制。Geodatabase 数据模型的最主要优势在于，它包含的构架使得用户可以容易地创建智能化的要素，使这些要素更加真实地模拟现实世界里的对象的行为和相互作用。

(2) PSM 模型的开发

A 要素模型、域模型和关系模型的开发

在采用 UML 进行 PSM 模型设计的基础上，经过一定结构调整，可以应用 ArcGIS 的 CASE (Computer Aided Software Engineering, 计算机辅助软件工程) 工具的 CGW (Code Generation Wizard, 代码产生向导) 建立相应的 Geodatabase 数据模型，完成要素模型、域模型和关系模型的开发。在 Geodatabase 数据结构中的部分概念与 PSM 模型设计中涉及到的概念是一一对应的，具体如表 14 所示：

表 14 Geodatabase 与 PSM 模型的概念对应关系表 (Martin Fowler 等, 2000) ^[273]

序号	PSM 模型	Geodatabase
1	要素模型	要素类 (Feature Classes)
2	域模型	属性域 (Domain)
3	关系模型	关系类 (Relationship)

用 CASE 工具建立定制对象的步骤如下 (党安荣等, 2003): ^[274]

1. 把设计的 UML 模型输出到 Microsoft Repository 中；
2. 产生存根代码 (Stub-code) 和实施行为；
3. 产生定制对象的一个地理数据库模式，即要素模型的框架。

经过上述流程，要素模型、域模型和关系模型都已导入到 Geodatabase 数据模型中。如果要素模型、域模型和关系模型在成功导入 Geodatabase 之后还需要修改，可以通过 ESRI ArcGIS 的 ArcCatalog 软件进行修改，ArcCatalog 可以方便地进行要素类、属性域和关系类的修改，对 PSM 模型的设计进行补充。

B 方法模型的开发

方法模型是由多个 SQL (Structured Query Language, 结构化查询语言) 构成的，笔者开发的方法模型如图 36 所示，主要实现水环境解析、污染源解析、基本服务区解析和方案评价等几个方面的数据更新、数据计算和数据筛选等功能，

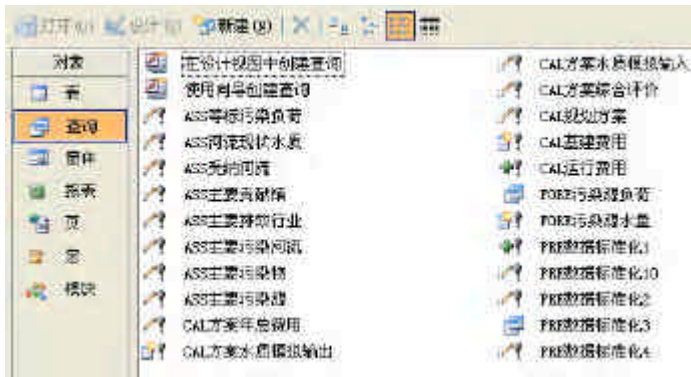


图 36 方法模型界面

方法模型可以通过三种方式进行开发，其一为应用 Microsoft Access 的查询构件进行可视化设计，“FORE 污染源水量”方法的可视化设计如图 37 所示，主要实现了污染源污水量预测的功能。

同时，方法模型的开发还可以通过 Microsoft Access 的查询构件直接输入 SQL 实现，如下所示：

```
UPDATE Source INNER JOIN Industry ON Source.IndustryID = Industry.LEVEL SET
Source.Q2006 = [Source].Q2006*Industry.[r02-06]^4*(1+Industry.[b02-06])^4,
Source.Q2010 = [Source].Q2006*Industry.[r07-10]^4*(1+Industry.[b07-10])^4,
Source.Q2020 = [Source].Q2010*Industry.[r11-20]^10*(1+Industry.[b11-20])^10
WHERE (((Source.Type)=1));
```

上面的 SQL 代码实现了和图 37 同样的功能，这种开发方式需要用户有 SQL 的语言基础。笔者推荐采用可视化方法进行方法模型的开发。

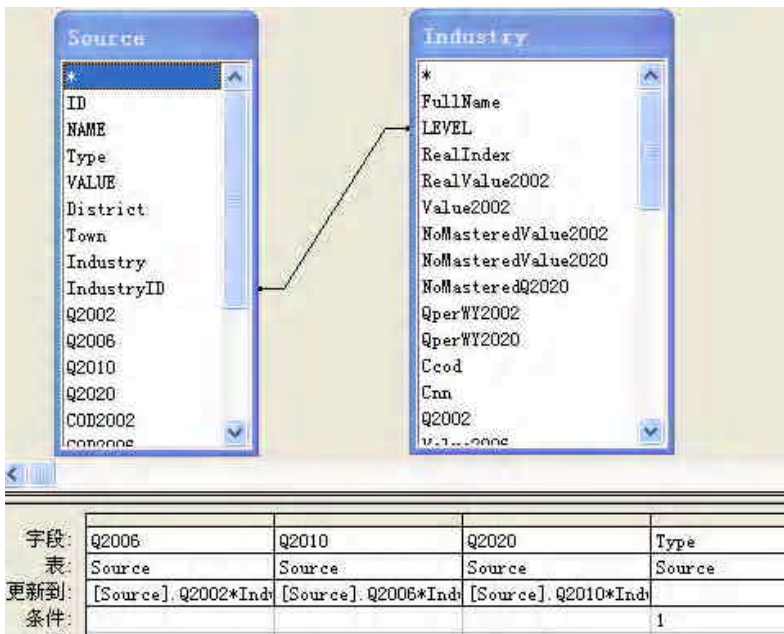


图 37 “FORE 污染源水量”方法的可视化设计界面

除了上述两种方法模型的开发方法，还可以脱离 Microsoft Access 的查询构件，通过采用 VBA 开发 ESRI ArcGIS 的 Macro（宏）方式实现。如图 38 所示。采用这种开发模式，

要求开发者对 ESRI ArcGIS 的 VBA 开发方法有一定的掌握。这种紧密结合的方法具有较强的集成性，一般可以把多个方法模型集中到一个 Macro 中，实现最终的功能，减少人机交互的次数。如可以把方法模型“FORE 污染源水量”和“FORE 污染源负荷”集成到同一个 Macro 中，实现污染源的预测功能。具体的 Macro 运行界面如图 39 所示。

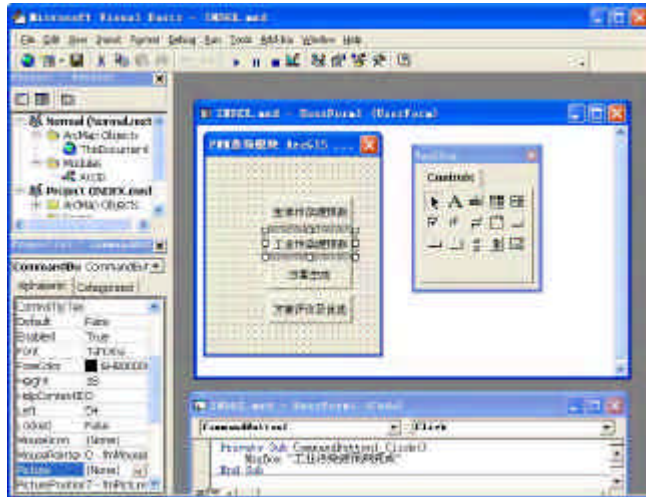


图 38 ArcGIS 平台中 Macro 的设计界面

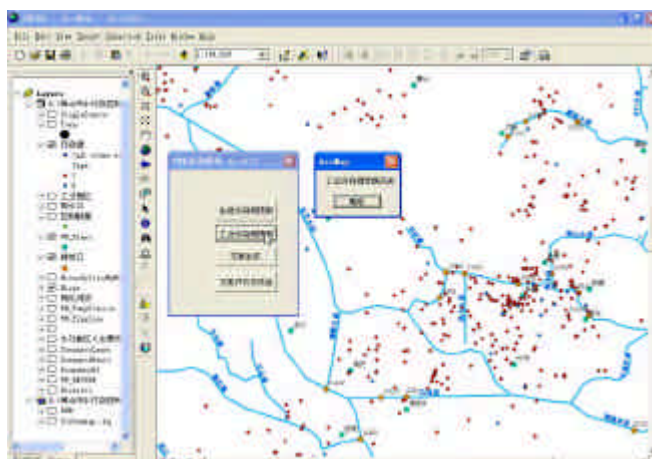


图 39 ArcGIS 平台中 Macro 的运行界面

C 模拟模型的开发

PSM 模型的模拟模型开发方法与 ArcGIS 和 Microsoft Access 平台相互独立，模拟模型的开发方法与上文提到的基于 COM 进行模拟模型开发的方法基本一致，开发结果为一个包括多个模拟模型实体的 DLL 文件，即为基于 COM 的模拟模型库。

基于 Geodatabase 开发的 PSM 模型，如果其方法模型基于 Microsoft Access 开发，则 PSM 模型的开发成果为一个 mdb 格式的数据库文件和模拟模块的一个 DLL 文件；如果方法模型基于 Macro 进行设计，则 PSM 模型的形式为一个 mdb 格式的数据库文件、ESRI ArcGIS 的一个 Macro 文件以及模拟模块的一个 DLL 文件。

(3) PSM-CAP 系统的开发

在 PSM 模型开发的基础上，需要少量开发就可以实现 PSM-CAP 系统的开发。PSM 模

型在相应的 PSM-CAP 系统的对应关系如表 15 所示。其中要素模型、域模型和关系模型以 Geodatabase 的形式存储于 Microsoft Access 中，可以直接为 ESRI ArcGIS 用于建立空间数据模型。

而 PSM 模型中基于查询构件设计的方法模型，可以直接用于 Microsoft Access 中，用于对 Geodatabase 相关数据进行操作；基于 Macro 开发的方法模型，可以直接应用于 ESRI ArcGIS 中。

对于以 DLL 形式存在的模拟模型，需要开发第三方的工具软件，应用该 DLL，建立工具软件与 Geodatabase 数据模型的接口，以实现 Geodatabase 向 DLL 提供模型输入（水文条件、排污情况等），同时模拟模型的模拟结果可以输出至 Geodatabase 中，完善要素模型监测断面的各方案水质属性。

表 15 PSM 模型与 PSM-CAP 系统对应关系表

序号	PSM 模型	PSM-CAP 系统
1	要素模型	ESRI ArcGIS
2	域模型	ESRI ArcGIS
3	关系模型	ESRI ArcGIS
4	方法模型（查询构件）	Microsoft Access
5	方法模型（Macro）	ESRI ArcGIS
6	模拟模型	工具软件

（4）特点及适用条件

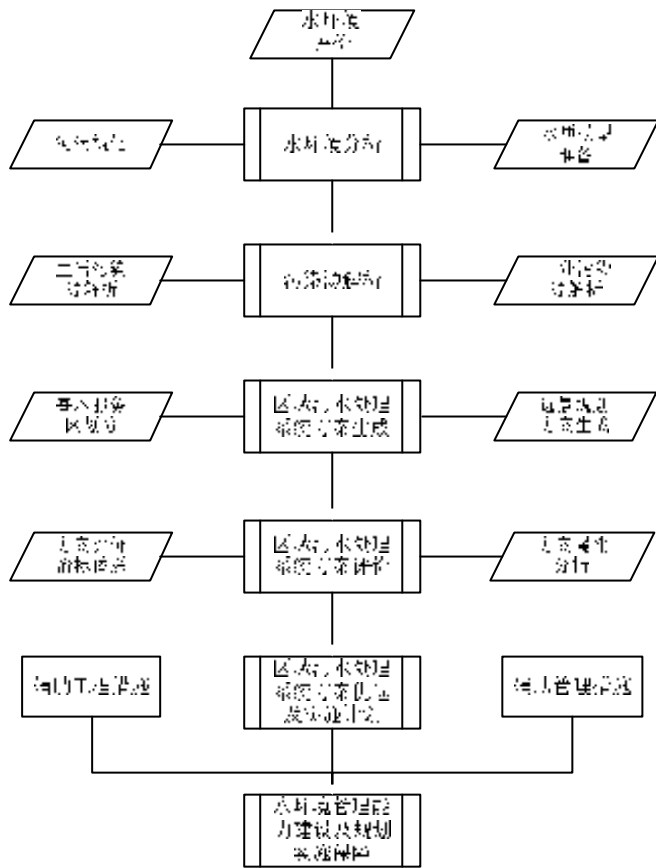
采用 Geodatabase 数据模型开发的 PSM 模型具有较强的适用性、功能强大、便于规划数据管理、易于操作、便于与其他平台进行数据交换和提高数据完整性等特点。基于这种开发模式的 PSM 模型具有较强的应用优势，同时具有如下的适用条件：

1. 需要 ESRI ArcGIS 和 Microsoft Access 的软件支持，要求操作者熟悉这两个平台；
2. 要求操作者有较为全面的 GIS 专业知识和数据库专业知识；
3. 要求操作者对 Geodatabase 地理数据模型有较为深入的认识；
4. 因为辅助规划过程中涉及到很多人机交互工作，所以同时也要求操作者对规划的内容和步骤有较为深入的掌握；
5. 适用于要把重点放在规划本身、不需过多的计算机开发工作的规划项目。

3.4 模型应用

我国华南某市（以下统称为 A 市）的水环境污染问题较为显著，因此开展了该市的水污染控制系统规划，用于指导各区、镇水污染控制基础设施的建设，尽量减少重复建设及不必要的浪费。规划的时间范围为三个阶段：近期 2004 年～2006 年，中期 2007 年～2010 年和远期 2011 年～2020 年。

该规划的技术路线如图 40 所示，在水环境现状评价、河流概化和河网水质模型建立的基础上，进行污染源的解析的工作，在此基础上提出多个远景规划方案并对之进行环境、经济等目标的评价，获得满意的远景规划方案，据此提出各规划水平年的实施计划，再辅以其他工程措施及管理措施，实现 A 市的水污染控制系统规划方案。



字和书籍等。大部分资料不能直接应用于PSM模型，需要利用PSM模型的相应方法模型对原始资料进行标准化，以完善部分要素模块的数据。

数据标准化首先要将各类原始资料电子化，转换为Geodatabase中的基本空间图层和属性表，之后利用PSM模型的方法模型“PRE数据标准化(1-10)”系列，对生成的中间数据进行处理，包括表格生成、表格更新、数据综合等操作，最终得到PSM模型的要素模型的基础数据。图41是不同原始资料的处理方法。

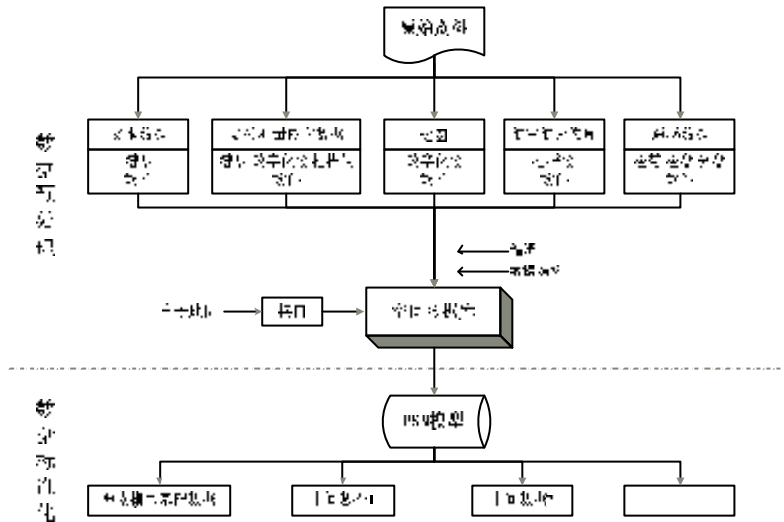


图 41 数据预处理和标准化流程图

3.4.2 水环境解析

水环境解析主要包括水环境现状调查与评价和水系概化两方面的工作。利用PSM模型的方法模型“ASS河流现状水质”和“ASS主要污染河流”，根据各监测断面的水质监测数据，进行河流现状水环境质量评价，据此给出主要超标河流和相应的水质超标因子。图42为A市水环境功能区划图和利用PSM模型得到的2002年水质评价图。

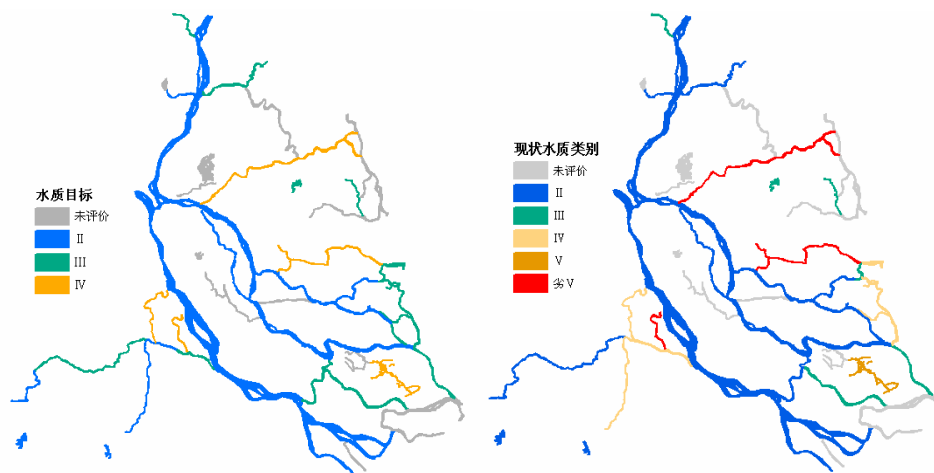


图 42A 市水环境功能区划图（左）和 2002 年水质评价图（右）

利用 ESRI ArcGIS 平台的数据编辑功能实现河网的概化工作，将河网概化为单线河段，生成要素模型中的河段要素，以在后续工作中建立取水口、排放口与河流的对应关系，作为水质模拟的工作基础。

3.4.3 污染源解析

污染源解析主要包括污染源现状评价、独立排放的工业污染源筛选、需要预处理的工业污染源筛选和污染源预测等四部分的工作。

(1) 污染源现状评价

污染源现状评价分为生活污染源现状评价和工业污染源现状评价。工业污染源现状评价是本次规划的重点(A市工业污染源分布如图43所示):以A市2002年环境统计数据库作为数据源,评价方法采用“等标污染负荷法”。根据计算所得的每个工业污染源的等标污染负荷指标,评价出主要污染因子、主要工业污染源、主要接纳水体、主要污染行业和主要污染镇等。

污染源现状评价工作中,各工业污染源的等标污染负荷计算主要利用PSM模型的方法模型“ASS等标污染负荷计算”实现,在此基础上利用其他方法模型如“ASS主要污染物”、“ASS主要污染源”、“ASS接纳河流”等进行污染源评价。

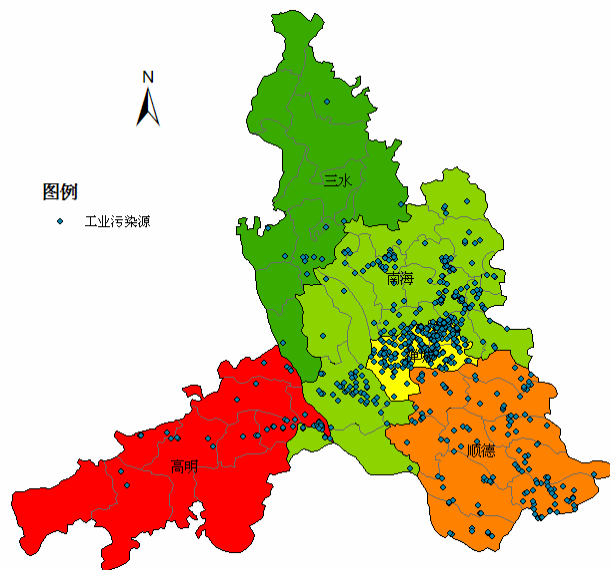


图 43A 市工业污染源分布图

A 市生活和工业污染源的污水排放量各镇(街道办事处)分布如图 44 所示。

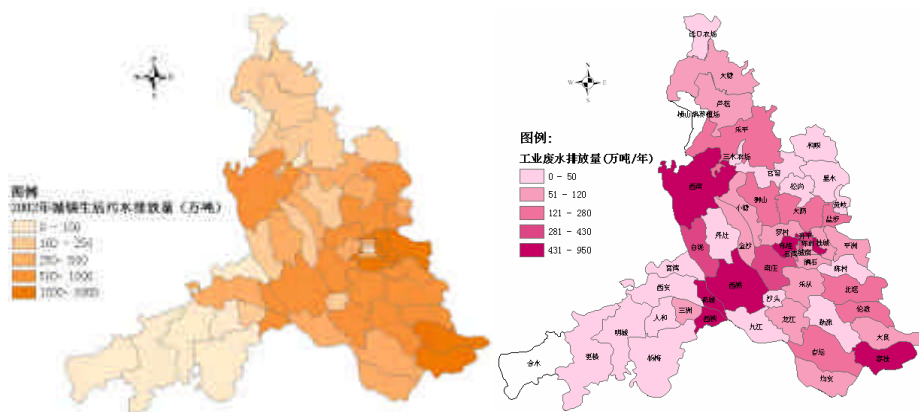


图 44A 市生活和工业污水排放量各镇（街道办事处）统计图

(2) 独立排放的工业污染源筛选

凡符合下述条件之一者，即按独立排放的工业污染源对待，独立排放的工业污染源的工业污水一般可以通过本地的工业污水处理厂处理后排放或直接排放：

1. 污水排放量较大，会对污水处理厂产生冲击负荷的工业污染源；
2. 有一定的污水排放量，但位置较为偏僻，离城市污水处理厂较远的工业污染源；
3. COD和氨氮浓度低于受纳水体的地表水环境功能区划标准、可直接排放的工业污染源；
4. COD和氨氮浓度略高于受纳水体的地表水环境功能区划标准、经过混合区后可达标排放的工业污染源；
5. 污水的水质不宜与生活污水合并处理的工业污染源。

利用 PSM 模型的方法模型“SEL 独立排放的工业污染源”，可以筛选出符合上述条件 1、3、4 和 5 的独立排放的工业污染源，利用 ArcGIS 的空间查询功能，可以筛选出符合条件 2 的独立排放的工业污染源。利用如上原则筛选出的独立排放的工业污染源的空间分布如图 45 所示。

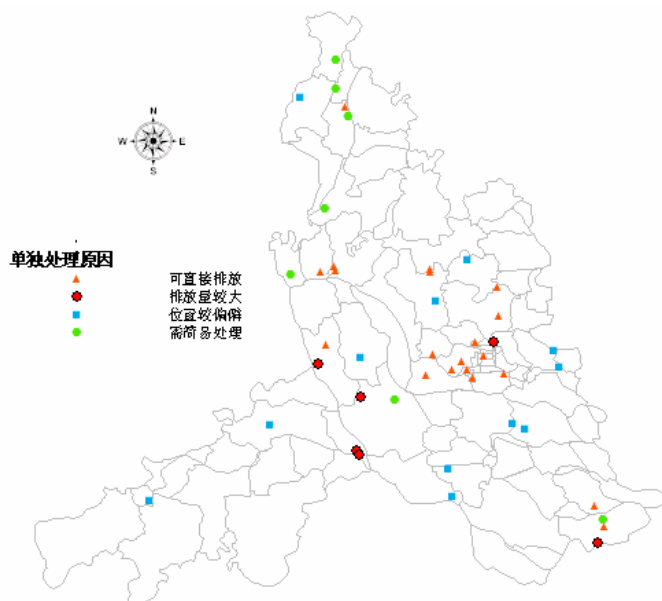


图 45 独立排放工业污染源空间分布图

(3) 需要预处理的工业污染源筛选

在污染源现状评价的基础上，筛选出进入市政污水处理厂前需要预处理的工业污染源。需要预处理的工业污染源筛选范围为与生活污水合并处理的企业。对于这类企业，如果其水质指标超过城市污水处理厂的来水浓度标准，则需要进行预处理，筛选标准采用省地方标准水污染物排放限值（DB44/26-2001）。

利用 PSM 模型的方法模型“SEL 预处理的工业污染源”，可以筛选出水质超标的工业污染源清单，同时由于目前 A 市大部分工业污染源都已配套了污水处理设施，筛选出来的需要预处理的工业污染源，结合方法模型“SEL 预处理的工业污染源分类”，可以分为两类（计 55 家，规模为 678.9 万吨/年），一类是现有污水处理设施可以满足排入城市污水处理厂标准的，计 42 家（规模为 497.4 万吨/年），另一类为该企业的污水处理设施不满足排入城市污水处理厂标准的，计 13 家（规模为 181.5 万吨/年）。筛选出的需要预处理的工业污染源空间分布如图 46 所示。

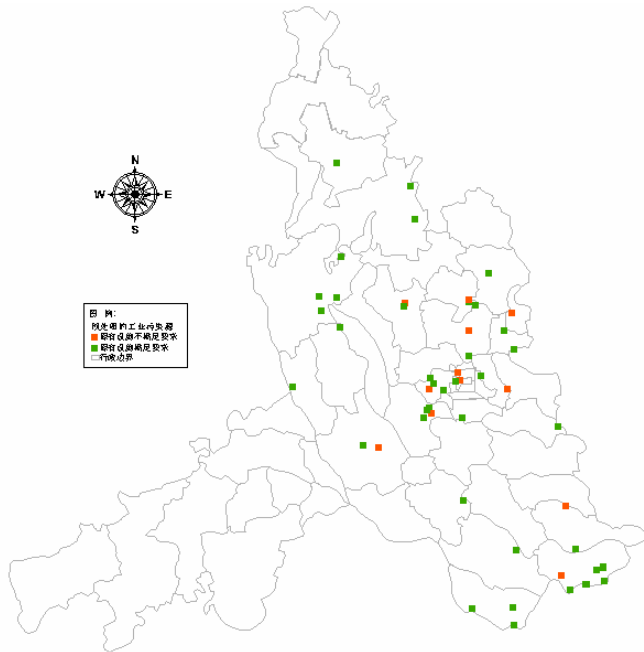


图 46 需要预处理的工业污染源空间分布图

(4) 污染源预测

污染源预测主要包括生活污染源和工业污染源的预测，预测主要包括污水量预测和污染负荷预测，分三个阶段——近期、中期和远期，其中工业污水量用万元产值法预测，而生活污水量用人口指数法预测。污染源解析的目的是为基本服务区水量、负荷的计算提供数据支持。

对于污染源预测的工作，可以利用 PSM 模型的方法模型“FORE 污染源水量”和“FORE 污染源负荷”实现。其中水量预测结果如表 16 所示，污染负荷预测结果如表 17 所示。

表 16 预测污水量汇总表

类型	污染源 数目	单位：万吨/日		
		2006 年 污水量	2010 年 污水量	2020 年 污水量

独立排放工业污染源	45	7.1	8.9	15.0
集中城市污水处理厂	614	132.3	165.4	294.2
其中合并处理的工业污染源	551	37.7	52.5	124.9
其中生活污染源	63	94.5	112.9	169.3
工业园区	10	40.0	59.5	109.0
总计	669	179.4	233.9	418.2

表 17 预测污染负荷汇总表

单位：kg/d

类型	2006年 COD	2010年 COD	2020年 COD	2006年 氨氮	2010年 氨氮	2020年 氨氮
独立排放工业污染源	1389	1729	2731	68	84	131
集中城市污水处理厂	390782	498572	921680	22885	28836	51762
其中合并处理工业污染源	154459	216234	498486	5870	8508	21292
其中生活污染源	236323	282339	423194	17015	20328	30470
工业园区	21600	32100	60000	2880	4280	8000
总计	413771	532401	984411	25833	33200	59893

3.4.4 基本服务区解析

要生成区域水污染控制系统的规划方案，首先应确定污水处理厂的基本服务区。利用 ArcGIS 的空间分析功能，根据 A 市的地形地貌、行政区划以及河网分布，经过空间划分得到 100 个基本服务区，作为构成污水处理厂服务区的基本要素。利用污染源与基本服务区的空间从属关系，并结合 PSM 模型的方法模型“SEN 基本服务区”，计算基本服务区各阶段的污水量及污染物负荷，分别如图 47 和图 48 所示。

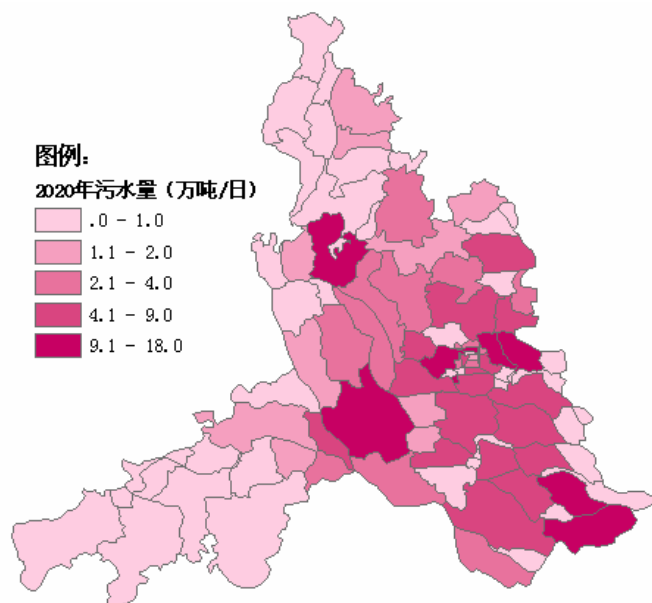


图 47 基本服务区及其污水量分布图

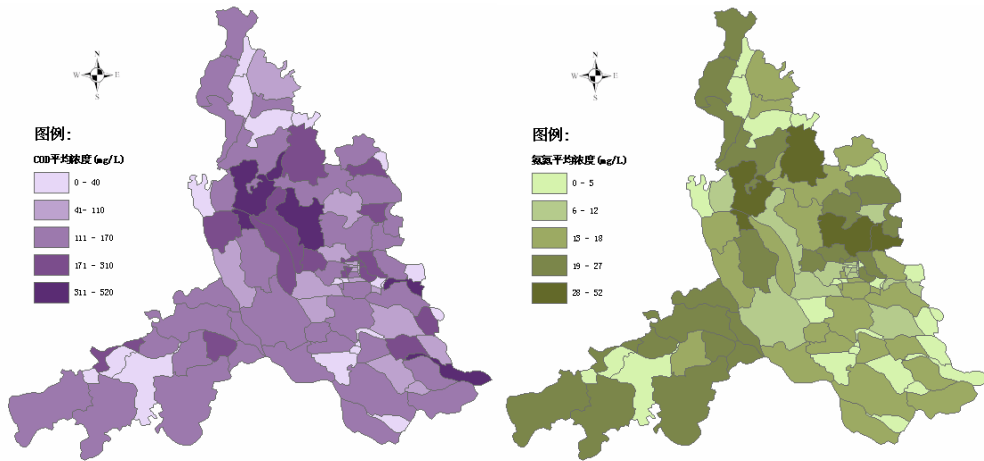
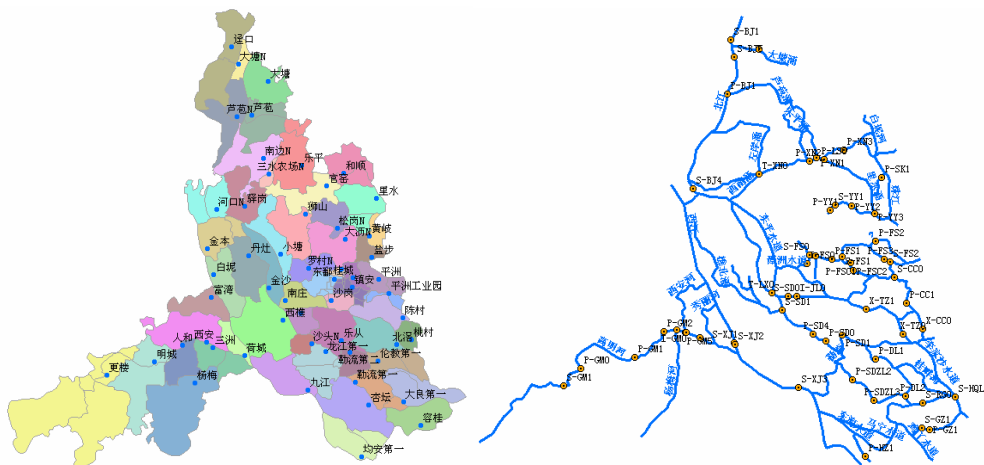


图 48 基本服务区 COD 及氨氮污水浓度分布图

3.4.5 方案生成

根据 2020 年的各基本服务区的污水量和负荷的预测数据，在划分污水处理厂服务区的基础上，确定水污染控制系统的 2020 年规划方案。方案生成的具体步骤如下（流程如图 49 所示）：



个河网进行水质模拟,如果全部监测断面水质达标,此即为确定的基础规划方案的服务区,如果监测断面水质不能够全部达标,则重新划分基础规划方案的服务区并确定处理程度,直至监测断面全部达标为止;

3. 调整污水处理厂服务区:通过合并必要的污水处理厂服务区的方式调整基础规划方案,分别从原有规划、集中处理、行政区划和集中分散处理相结合等角度调整基础规划方案的服务区;
4. 生成其他规划方案:在调整规划方案污水处理厂服务区划分的基础上,确定污水处理厂的选址、排放口分布和处理程度。如果有必要,还需确定污水处理厂服务区间的污水转输管道和污水提升泵站。

对于上述方案生成的四个步骤,主要是利用 ESRI ArcGIS 的编辑和空间分析功能,划分各污水处理厂的服务区,并确定污水处理厂的地址、排放口位置、处理程度,以及服务区间必要的污水转输管道和污水提升泵站;同时在规划的过程中,还结合了 PSM 模型的部分方法模型,如“SEN 污水处理厂图层”、“SEN 污水处理厂进水浓度”、“SEN 排放口图层”、“SEN 干流排放口图层”和“SEN 支流排放口图层”等,用于方案生成和数据处理。

本次规划最终确定了 1 个基础规划方案和 4 个调整规划方案,具体的方案描述如表 18 所示。其中部分调整规划方案的系统示意图如图 51 所示。

表 18 规划方案列表

序号	名称	集中污水处理厂数目	排放口数目	服务区间调水管道数目	污水泵站数目	方案特点
1	方案 0	56	74	0	0	基础规划方案
2	方案 1	53	73	8	3	参考原有规划
3	方案 2	43	70	13	4	最为集中处理
4	方案 3	48	69	9	1	参考行政区划
5	方案 4	52	71	4	0	集中、分散相结合

注:排放口的数据主要包括集中污水处理厂排放口、工业园区污水处理厂排放口以及工业污水处理厂这三类污水处理厂的排放口,所以排放口数目大于集中污水处理厂数目。

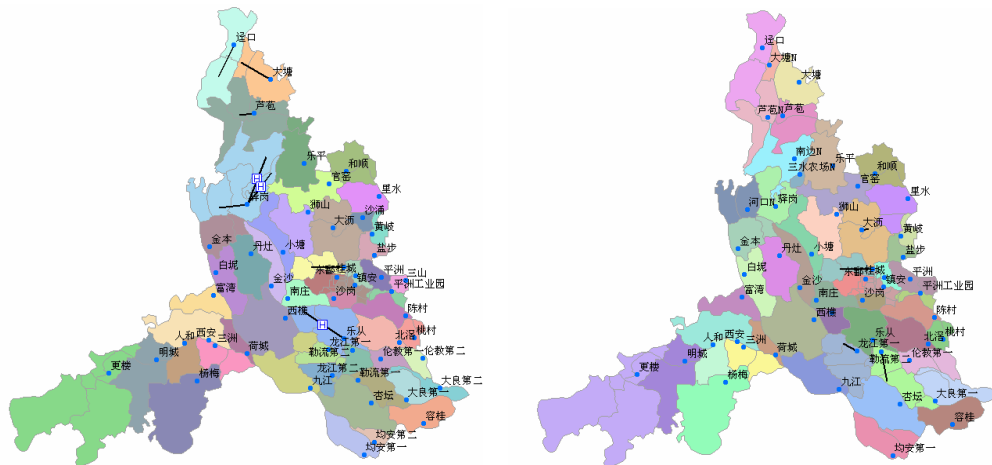


图 51 水污染控制系统调整规划方案(左:方案 1 右:方案 4)

3.4.6 辅助水质模拟

根据河流现状评价和污染源现状评价的结果，确定要模拟的河流水质因子，本规划最终选取的水质指标为 COD 和氨氮。利用 PSM 模型的方法模型“CAL 方案水质模拟输入”，为兄弟单位开发的感潮河流水质模型提供输入数据，以对各规划方案进行水质模拟。在水质模型的输出结果基础上，利用方法模型“CAL 方案水质模拟输出”完善监测断面要素，统计监测断面的达标率。

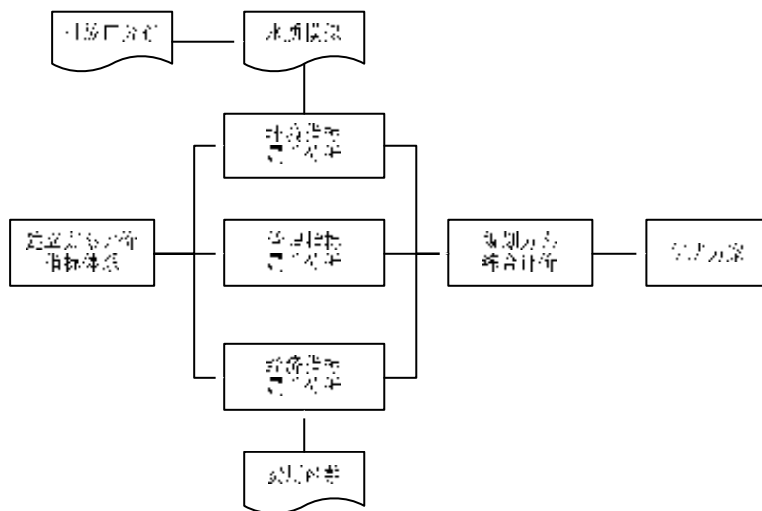
水质模拟的结果如表 19 所示。其中指标负荷是污染物指标达标指数（即模拟值与标准值的比值）在 50 个断面上的加和值；平均负荷是指总负荷在 50 个断面上的平均分布值。

表 19 各规划方案水质影响指标评价结果表

方案编号	污水处理厂数量	超标断面数量		指标负荷		总负荷	平均负荷	方案评价	方案排序
		COD	氨氮	COD	氨氮				
0	56	2	9	16.03	27.52	43.56	0.871	一般	3
1	53	1	9	16.48	26.37	42.84	0.857	好	1
2	43	4	9	17.81	26.61	44.42	0.888	差	5
3	48	2	9	16.91	27.83	44.73	0.895	较差	4
4	52	1	9	16.45	26.47	42.92	0.858	较好	2

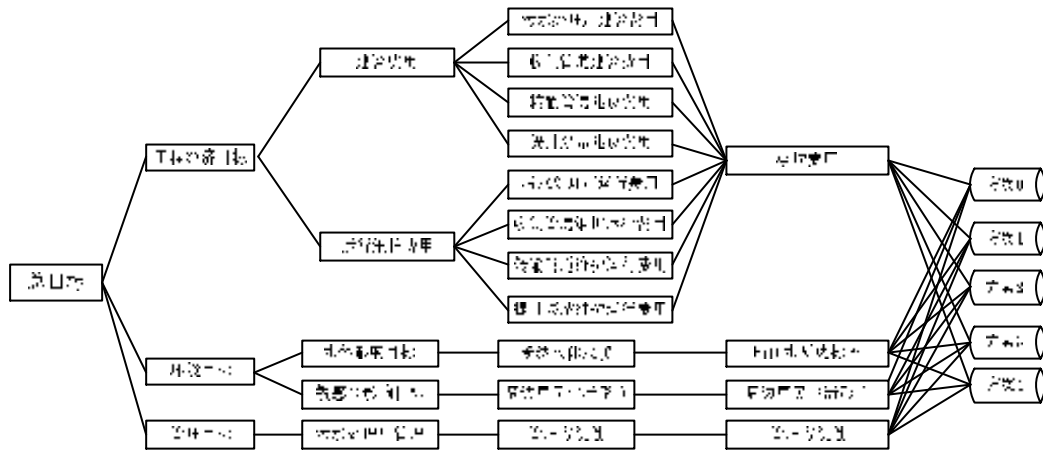
3.4.7 方案评价及优选

对于区域水污染控制系统规划，要综合考虑环境、经济等因素后推荐出较优的规划方案，属于有限个方案的多目标决策问题。为使决策合理化，必须采用科学的决策方法。方案评价及优选的技术路线如图 52 所示。



一般的工程方案决策分析方法,从工程经济、环境影响和管理等三方面建立了如图 53 所示的指标体系,并确定各底层指标的权重;

2. 方案属性分析:对于经济指标,可以通过建立费用函数对各类建设费用和运行费用进行计算(王富康等,1992;邵玉林,1999)^[277, 278],最终以年均费用量化该指标;对于断面水质达标率指标,以断面平均负荷量化;对于周边居民生活影响指标,以污水处理厂距中心城镇的距离来量化该指标;对于管理方便性指标,选取跨越不同镇(街道办事处)的污水处理厂的数量量化该指标。最后的方案属性分析结果如表 20 所示;



各方案的总价值。具体如表 21 所示：

表 21 方案综合评价指标属性归一化结果表

名称	经济	水质影响	陆地影响	管理方便性	总值
方案 0	0.442	0.448	0.406	0.445	0.438
方案 1	0.447	0.456	0.505	0.411	0.453
方案 2	0.450	0.440	0.355	0.334	0.423
方案 3	0.446	0.436	0.378	0.594	0.449
方案 4	0.458	0.455	0.496	0.411	0.459

4. 方案优选：从表 21 可以看出，方案 4 即相对集中相对分散的规划方案的投资费用最低，同时在 2020 年的水质模拟结果也相对较好，而且其在管理上也较为方便可靠。无论是从单项指标评价还是综合评价的角度，方案 4 都是较优方案，最后确定方案 4 为待实施的优选方案。

在以上四部分工作中，利用方法模型“CAL 基建费用”、“CAL 运行费用”中的费用函数，计算各方案的相应建设费用和运行费用，实现方案的经济指标评价；同时利用 ArcGIS 的空间分析功能，辅以 PSM 模型的方法模型“CAL 规划方案”和“CAL 方案综合评价”，实现各方案其他指标的评价和综合评价。

3.4.8 阶段实施方案的制定

在获得优选方案的基础上，还需要确定具体的水污染控制系统实施计划。其各阶段建设规模，除了参考各阶段预测来水量之外，还需要参考以下原则：

1. 要保证规划各阶段的监测断面水质达标率达到省和 A 市政府关于水环境保护的目标；
2. 远期重点考虑环境水质达标情况确定建设规模，近期主要考虑经济能力先建设最为必要的污水处理厂；
3. 水污染控制系统的建设要配合河流综合整治工作的开展；
4. 各阶段污水处理厂的规模的确定还要保证各阶段的污水处理率达到省市政府的目标。

参考以上原则，制定了相应的阶段实施计划，可以保证 2006 年 A 市污水处理率达到 81%，2010 年达到 91%，2020 年全部处理。

PSM 模型在“阶段实施方案的制定”这部分工作中主要起到了数据计算、统计，以及方案表达等功能。

3.5 模型应用评价

PSM 模型在 A 市水资源保护与水污染控制系统规划项目中，主要起到了规划相关数据

的管理和计算，以及成果表达的功能，相比一般的 CAP 系统，PSM 模型具有较好的可移植性、可维护性和数据完整性。在本项目中 PSM 模型得以充分应用，这种 PSM-CAP 系统模式已经被证明在相关方面优于传统的 CAP 系统(MIS-CAP ,DSS-CAP ,GIS-CAP 和 PSS 等)。具体而言，PSM 具有如下特点：

1. 较强的适用性。PSM 模型在设计过程中考虑了系统较好的可移植性，对于其他区域的水污染控制系统规划，本模型同样适用，可以以较快的速度转移到其他规划项目中；
2. 功能强大。PSM 模型需要依赖 ESRI ArcGIS 和 Microsoft Access 平台实现辅助规划的功能，借助于地理信息系统专业平台 ArcGIS 和桌面数据库通用办公软件 Access，基于这种模式开发的 CAP 系统相比其他开发模式可以实现更多的空间分析处理与数据库管理的功能；
3. 便于规划数据管理。所有的空间数据和属性数据都保存于同一个关系数据库中，提高规划数据的集成度；
4. 易于操作。只需要按照 PSM 模型要素模块的指定格式导入规划相关数据，就可以利用 PSM 模型的方法模型对原始数据进行处理并获得目标数据；
5. 便于与其他平台进行数据交换。利用 ESRI ArcGIS 强大的空间数据输入输出功能，以及 Microsoft Access 数据库的数据格式转换功能，可以充分利用各种格式的原始数据，同时还可将规划成果导出到其他平台进行后续处理；
6. 提高数据完整性。通过建立要素模型之间的关系以及要素模型的属性域，可以提高系统的自动维护能力，提高规划效率，降低系统维护的工作量。

基于 Geodatabase 开发的 PSM 模型，需要操作者熟悉 ESRI ArcGIS 平台的基本操作，这种松散的开发模式，在应用于规划的过程中，相比其他的开发模式，需要更多的 ESRI ArcGIS 和 Microsoft Access 方法模型的交互工作。同时，建议采用 COM 开发模式进行 PSM 模型及 PSM-CAP 系统的开发。

4 国际典型系统

目前欧美一些国家已经开发了一些用于实际操作的规划支持系统,本部分将对其其中的有代表性的作品进行介绍,主要有目前美国使用最广泛的关于土地利用规划等方面的 INDEX,基于情景分析方法开发的面向政策的用于土地利用规划、城市规划等方面的 WHAT IF?,以交互式分析、模拟 3D 现实环境以及协作式的社区理念而著称的 CommunityViz,用于量化城市森林和城市绿地、城市公园等所带来的生态效益并对其进行规划管理的 CITYgreen,系统模型与计算机游戏结合的用于公众参与、决策支持、对未来情景预测的 GB-QUEST,集成了丰富的生物学信息和政策信息的用于生物多样性保护的 NatureServe Vista,用于水资源评价和规划的 WEAP,用于交互式的多因素土地资源多准则评价的 AEZWIN,基于水资源动态分析空间模型的用于分析地区生态、社会、经济功能及其相互之间关系的 WadBOS,从物理、环境、经济、社会等方面针对海岸管理问题的 RAMCO,国际领先的面向多准则决策问题的 Expert Choice,已商业化的基于有限选择方案的 DEFINITE,用于与公众交互、同步地传递规划信息的可用于多个领域的 BLM ePlanning。

4.1 INDEX

4.1.1 总体介绍

INDEX 是目前美国使用最广泛的商业性分布式规划支持系统之一。该系统由 ESRI 公司于 1994 年开发完成，开发平台是 ArcGIS 9.0 和 ArcIMS。目前有面向不同领域客户的三个版本，分别是绘图版（Paint the Region）、规划设计版（PlanBuilder）以及定制版（Client-specific custom versions），主要用于土地利用规划、交通运输规划、建筑设计、环境规划等领域，此外，在水资源规划、能源利用规划、公共财政规划、非点源污染控制规划、洪涝灾害防治规划等方面也有应用。

4.1.2 模块设置、主要功能

下面以 PlanBuilder 版为例，介绍 INDEX 的系统界面和主要功能。在 PlanBuilder 版本包含了用 VB 语言编写的 INDEX 程序和 ArcMap 界面（图 54）。

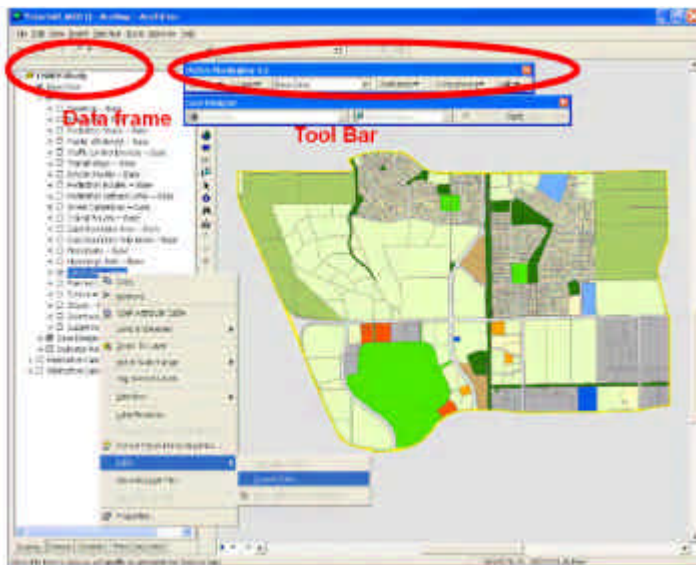


图 54 INDEX 系统界面图

资料来源：<http://www.crit.com/documents/planuserguide.pdf>

图 54 的 ArcMap 窗口内容表中，包含了 INDEX 的数据组（Data Frames），该数据组支持 INDEX 对地图文件的显示以及各种交互分析功能；在 INDEX 工具条中，包括“Studies”、“Cases”、“Indicators”、“Comparisons”和“Help”五个下拉菜单，能够对数据层及其要素进行各种操作，INDEX 基本操作流程图如

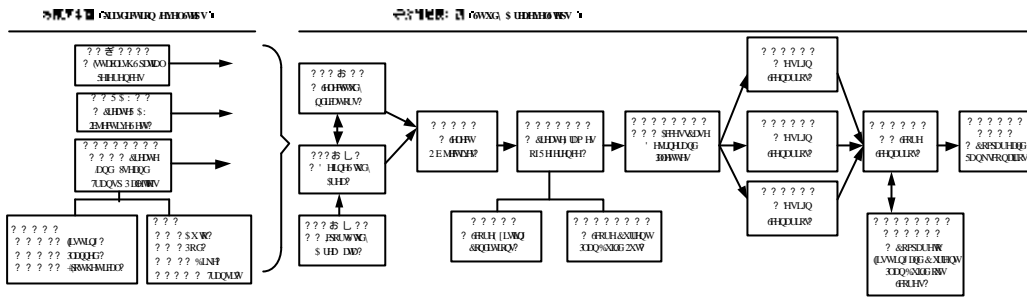


图 55 所示：

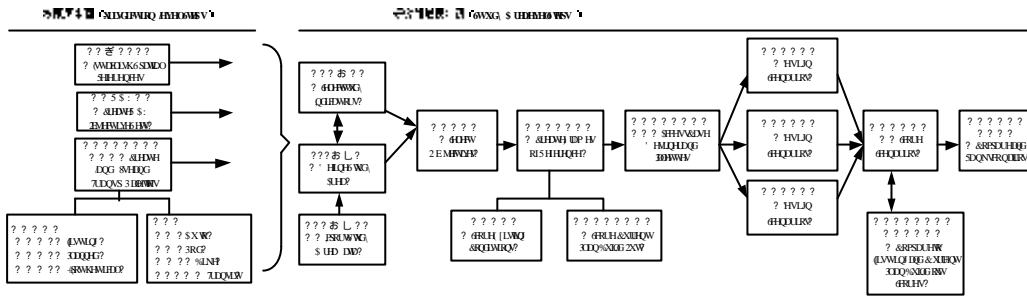


图 55INDEX 基本操作流程

资料来源：<http://www.crit.com/documents/planuserguide.pdf>

INDEX系统具有兼容性、交互性、功能多样化、可记忆性等特点，是基于GIS平台的人机交互式规划支持系统，在INDEX指标库中，包括75个以上多层次指标，利用高级程序计算不同规划方案对环境、交通、能源、公共财政等方面的影响，并利用多指标评价理论和方法，根据各方面的指标值，定量地评价各个规划方案。

在INDEX在功能模块设置方面，主要有以下几个特点：

1. 利益相关者目标模块 (Stakeholder objectives)。规划者可以通过等级加权工具 (Rating and weighting, RAW)，制定规划目标和重要方针的优先执行等级，从而反映决策者的价值取向。
2. 便利的数字化研讨设计工具 (Case designer for digital charretting)。为用户提供了在屏幕上绘制和编辑对象空间特性的功能，并在画版中设置和选择与规划目标相匹配的对象特征。
3. 指标值图形化 (Indicator mapping)。指标图形化是INDEX区别于其他规划支持系统的重要特性之一。INDEX提供了直观的图形化界面表示空间对象的指标数值，以便使用者对指标的执行和完成情况一目了然。
4. 多模式的交通网络 (Multi - model travel network)。INDEX利用独立的流通网络，把真实的土地利用和交通数据整合在一起，从而精确完整地反映二者之间的相互关系。
5. 后续发展评估模块 (Incremental development evaluation)。如果某方案被采纳后还有其他的增建计划，INDEX能够评估该增建部分是否与原规划目标一致。

与其模块设置相对应，INDEX 包括以下几个主要的规划支持功能：

1. 设定功能 (Design)。输入设定参数，生成即时交互式的假定方案和指标。
2. 浏览功能 (Visualize)。采用图像、3D、视频以及其他多媒体方式对已有成果进行浏览。
3. 分析功能 (Analyze)。利用所拥有的专业的数据分析工具对特定的数据进行分析。

4. 评价功能 (Score)。计算和评价不同假定方案对指标所产生的影响。
5. 比较功能 (Compare)。比较不同方案的可替代性以及分析各方案的可行性。
6. 监控功能 (Monitor)。对规划实施跟踪和监测。

INDEX 的主要规划支持功能如图 56 所示：



图 56 INDEX 主要规划支持功能示意图

资料来源：<http://www.crit.com/documents/planuserguide.pdf>

4.1.3 应用案例^[46]

INDEX 自 1994 年面世以来，得到了比较广泛的应用。在美国，INDEX 被应用于 35 个州的 100 多个机构，50% 以上城市级别以上的城市规划机构使用了 INDEX 规划支持系统，25% 的地方性城市规划单位、25% 的学术机构，和部分非盈利规划组织也利用 INDEX 辅助工作的开展。

在国外，INDEX 成功的应用案例比较多。2006 年 3 月 APH 杂志上刊登了 N.E. 伊利诺斯州区域规划获年度最佳规划的消息，该规划所应用的就是 INDEX 系统；佛罗里达州的 Indian River 郡、马萨诸塞州的 South Weymouth 郡等都在其城市规划中采用 INDEX 作为规划支持系统。

INDEX 的数字化研讨设计工具决定了其广泛的社区和市民参与性，甚至孩子们都可以参与城市的规划设计。在 2004 年 11 月 13 日举行的社区规划节上，美国俄勒冈州波特兰市的 500 个儿童和青少年应用 INDEX，通过触摸屏的方式，参与了 14 个街区的规划活动，孩子们不仅了解了他们的城市，而且在专家的指导下，通过 INDEX 很快就能参与社区规划规划方案的选择，为他们所居住的社区贡献意见（图 57）。在美国第四届理性增长会议上，INDEX 被作为一种专家研讨工具参与到城市的理性增长讨论中。

[46] 本小节案例的资料来源均出自：<http://www.crit.com/index/documents.html>

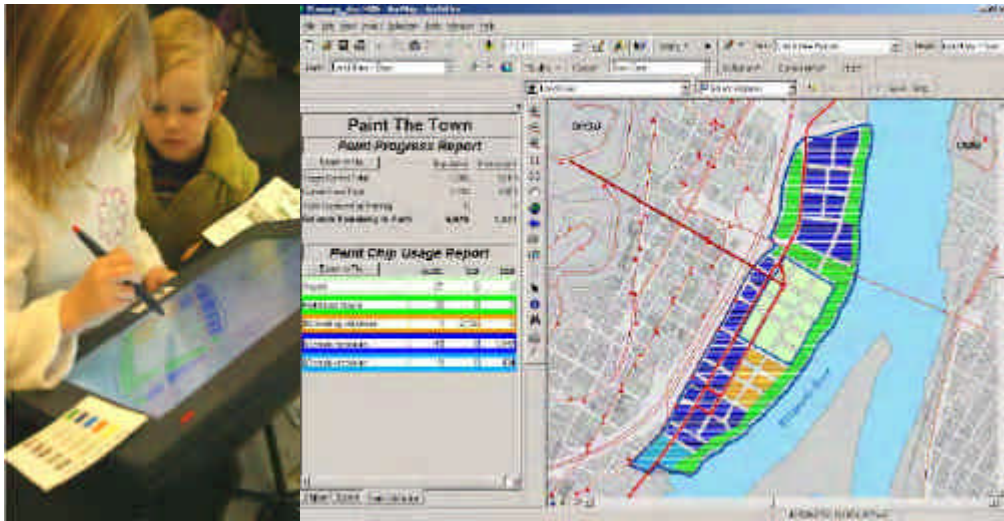


图 57 (左) 青少年通过触摸屏的方式参与社区规划
(右) INDEX 的 “Paint the Town” 平台

图片来源：[Http://www.crit.com/documents/planningday.pdf](http://www.crit.com/documents/planningday.pdf)

INDEX 还可以被应用于除社区规划和城市规划以外的其他很多领域，加利福尼亚州的城市 Chula Vista 为减少 CO₂ 的排放量，就曾应用 INDEX 软件对专家所提出的发展建议进行评估，作为制定更合理发展计划的有利向导，并取得了很好的效果。

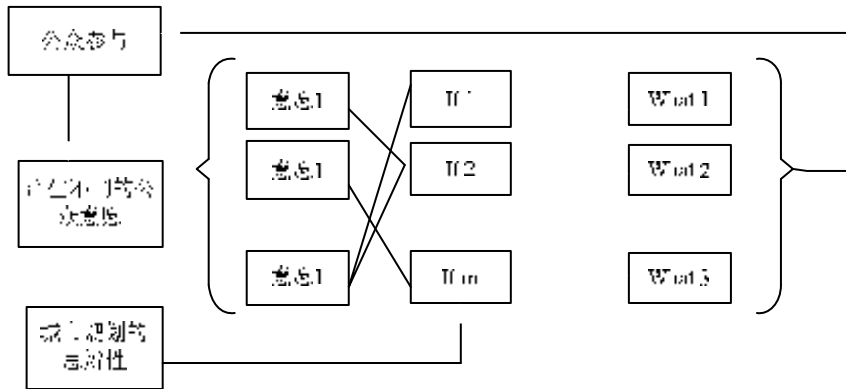
INDEX 在国内还处于起步阶段。2004 年，北京市城市规划设计研究院与林肯土地政策研究院及马里兰大学理性增长国家研究中心合作，首次将 INDEX 系统作为计量分析支持技术引入《北京城市总体规划 2004 - 2020 年》中，辅助确定城市空间布局。

4.2 WHAT IF?

4.2.1 总体介绍

“WHAT IF?”是美国 Richard E. Klosterman 教授与 ESRI 公司联合开发的商业化的交互式规划支持系统，该系统主要是在 ESRI 公司 MapObject 组件的基础上用 VB 语言编写而成的，并在开发过程中吸取了其他诸多系统的规划思想，其主要应用于土地利用规划、城市规划等领域，此外，在财政、运输、环境等部门也有应用。

该软件主要是基于情景规划思想 (Scenario Planning) 开发的，正如 “WHAT IF?”的名称所要表达的那样，“IF”表示“如果对于未来规划的假想或政策选择是正确的话”，“WHAT”表示“在这种选择下会产生结果”。因此，“WHAT IF?”所提供的不是单一而准确的预测，而是在政策方针可以选择的情况下，对不同选择情况所可能产生的不同结果的合理评价，以引导规划者做出合理的方案选择。“WHAT IF?”可以被看做是一种“面向政策”的规划支持工具。“WHAT IF?”在城市规划、社区规划中的应用流程如图 58 所示：



资料来源：李渊，朱庆，王静文. What If 思想和 MCE-GIS 技术在城市规划中的应用——以惠州概念规划为例. 国外城市规划. 2006, 21 (1): 89 ~ 92

4.2.2 模块设置

“WHAT IF?”的初始界面如图 59 所示。



图 59 “WHAT IF?” 初始界面图

图片来源：Richard E. Klosterman. The “What if? Collaborative Support System. Environment and Planning, B: Planning and Design. 1999 (26) : 393 ~ 408

从“WHAT IF?”的初始界面可以看出，在标题栏上除“File”、“Help”两个标准的 Windows 菜单以外，还有“Suitability”、“Growth”和“Allocation”三个菜单，代表了“WHAT IF?”的三个核心模块：土地适宜性评价模块、土地利用需求分析模块、土地利用需求分配模块^[47]：

[47] <http://www.crit.com/documents/planuserguide.pdf>

1. 土地适宜性评价模块 (Determining Land Use Suitability): 确定土地适宜性要素及要素的权重和等级, 给出土地适宜性空间分布图;
2. 土地利用需求分析模块 (Projecting Land Use Demands): 分别从住宅、工业、商业、生态保护地等几方面计算土地的需求情况, 根据对不同分析因子的计算, 得出不同用地类型的供给和需求结果;
3. 土地利用需求分配模块 (Allocating Projected Land Use Demands): 在土地利用需求分析的基础上, 对不同类型土地根据一定的标准进行空间分配, 并通过设置优先级的方式优先满足某种土地类型的需求, 得出相应的分配方案。

上述模块的结构在“WHAT IF?”的概念模型图中有比较清晰的反映, 如图 60 所示。

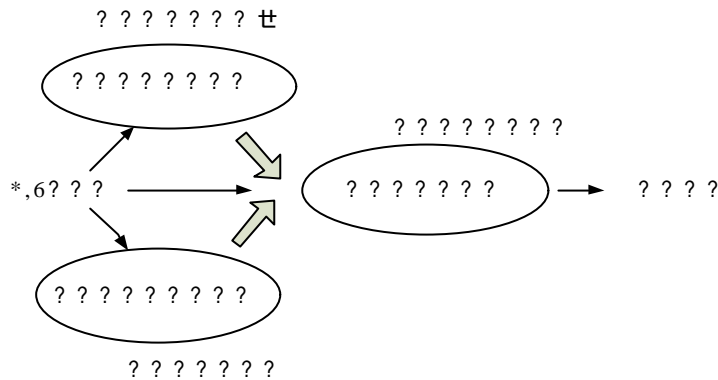


图 60 “WHAT IF?” 概念模型图

图片来源: 杜宁睿, 李渊. 规划支持系统 (PSS) 及其在城市空间规划决策中的应用. 武汉大学学报 (工学版), 2005, 38 (1): 137 ~ 142

具体的技术操作、详细内容等请参见 Klosterman (1999) 对“WHAT IF?”的介绍。

4.2.3 应用案例

在国内外规划实践中, “WHAT IF?” 已经有了一定的应用, 较为成功的应用有美国俄亥俄州 Medina 县的农田保护政策评估、澳大利亚 Hervey 湾土地使用规划等。下面以一个案例来说明“WHAT IF?” 的假设方案对比情况。^[48]

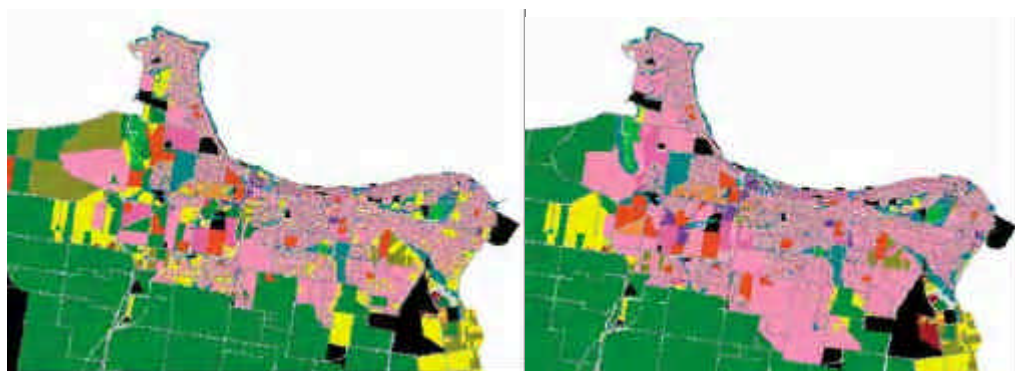


图 61 “WHAT IF?” 两种不同的假设方案对比图

图片来源: http://www.clroma3.it/allegati/263-ict_parte2.pdf

[48] http://www.clroma3.it/allegati/263-ict_parte2.pdf

图 61 为两幅由“WHAT IF?”生成的土地利用图,分别表示两种不同的假设方案,图 61 左为未受土地利用规划控制的假设方案,在这种假设场景下,橙色所表示的居民区分散于整个区域,显得杂乱无章。图 61 右为经过土地利用控制的假设方案,在这种假设场景下,密集分布的居民区显然比前一场景合理,黄色所表示的未利用土地和绿色所表示的城市边缘绿地也有较优化的配置。

在国内,也有个别将“WHAT IF?”用于城市总体规划阶段的土地利用研究。杜宁睿、李渊等(2005)选择我国西部某县城作为应用实例,详细介绍了“WHAT IF?”的应用步骤、技术路线及结果分析,探讨其在我国应用该系统的可能性和有效性。图 62 为该案例中用“WHAT IF?”生成的城市用地空间布局图,反映了两种不同模式下的城市发展前景,左图为土地集约利用情况下的城市发展情况,右图为土地分散利用情况下的城市发展情况。



图 62 城市用地空间布局图(左为集约模式,右为分散模式)

4.2.4 小结

与以往的类似系统相比,“WHAT IF?”兼容性强,能够应用于多种领域,其模块设计上条理分明,简明易懂,系统界面也颇简单直观,易于操作,这就保证了该软件不仅能被专业人员所掌握,同样适合政府部门和公众、个体人员等广大非专业人员使用。

正是因为“WHAT IF?”的上述优点,也衍生了一些明显的缺点:如系统不能够反映空间对象之间的相互吸引和干扰情况;也不能模拟城市参与者如家庭人员、商业人员、城市开发人员行为活动的影响情况;在技术操作上,“WHAT IF?”采用 GIS 数据作为数据源,但不能自行处理和修改 GIS 数据,这无疑给后期操作带来了不便。

4.3 CommunityViz

4.3.1 总体介绍

CommunityViz 规划支持系统是 Orton 家族基金组织在美国环境模拟中心(Environmental Simulation Center, ESC)支持下开发的,其目的是为土地利用、城市规划等市政部门提供革命性的规划支持软件组,为所有公众提供便利的规划决策参与平台。CommunityViz 被用于综合规划、交通运输、农业、土地多样性、环境、洪涝、能源等多个领域。尽管 CommunityViz 的开发目的是非盈利的决策支持系统,但因为种种原因,其尚未实现完全免费,属于商业软

件。

CommunityViz是基于GIS的规划支持系统,以交互式分析、模拟3D现实环境以及协作式的社区理念而著称。人们可以利用CommunityViz对可以选择的决策和规划行为进行权衡、分析其潜在的影响,对假定的情景从环境、经济、社会等不同角度进行决策分析。CommunityViz是ArcView的扩展程序,一般与ESRI ArcView整合才能使用(图63),它可以以各种下拉菜单的方式与ArcView整合。



图 63 基于 ArcView 开发的 CommunityViz 界面
资料来源：<http://207.145.30.84/Journal/protect/Vol16No1/Suen.pdf>

4.3.2 模块设置

CommunityViz 的系统界面如图 64 所示：

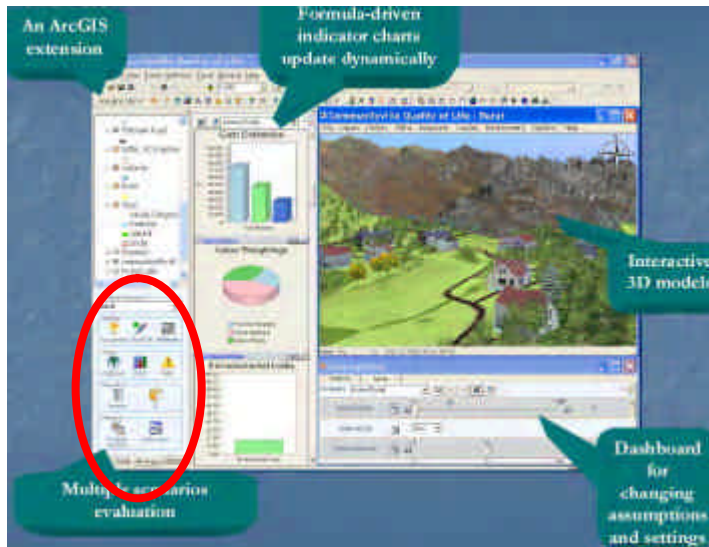


图 64 CommunityViz 的系统界面

由图 64 可以看出, CommunityViz 作为扩展程序整合到 ArcView 软件中, 界面主要包括五个窗口:(1) ArcView 窗口;(2) 多情景分析窗口;(3) 动态指标图表窗口;(4) 交互式 3D 模型浏览窗口;(5) 假定值和属性控制面板。CommunityViz 由三个功能模块所组成:

1. 情景生成模块 (Scenario Constructor)。情景生成模块是 CommunityViz 的核心模块, 用于生成、管理和分析假定情景。该模块在 CommunityViz 软件组中的两个软件中都是必不可少的, 它可以用于对情景进行影响分析、指标跟踪, 还能比较假定情景的土地利用情况。

2. 三维仿真模块 (Sitebuilder 3D)。三维仿真模块为用户提供了一个可视、虚拟的三维工作环境。在基础地形图上,用户可以添加航空、卫星影像,以及 3D 地物对象等,用户可以根据需要给对象属性赋值。此外,该模块还支持交互式的动态浏览功能。

3. 政策模拟模块 (Policy Simulator)。政策模拟模块是 CommunityViz 中数据处理能力最强的模块,该模块在数据处理程序、标准管理程序和模拟处理器的协助下,输出模拟结果,并从税收、土地利用和财政条例等方面来衡量所选政策的影响和方案相互之间的可替代性,为决策提供可行的参考。

4.3.3 主要功能

下面以 CommunityViz 3.0 版为例,说明 CommunityViz 软件组的主要功能。由图 65 可见,软件组主体包括 Scenario 360 和 SiteBuilder 3D 两个组件。

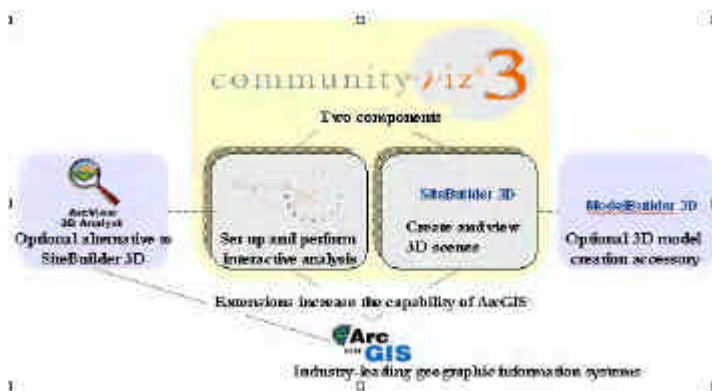


图 65CommunityViz 3.0 软件组体系结构

资料来源:

<http://www.communityviz.com/downloads/CV3/NewPresentations/WebPowerPoints/SystemComponentsOverview.ppt>

一、Scenario 360

Scenario 360 是交互式的决策工具,它将分析工具和决策框架系统引入 ArcGIS 平台,为用户提供动态、交互和实时的数量分析和直观、简明易懂的 2D 视觉效果,Scenario 360 作为 ArcGIS 的扩展程序载入 ArcMap 页面后,会在 ArcMap 内容栏的下方生成一个附加的工具栏,如图 66 所示:

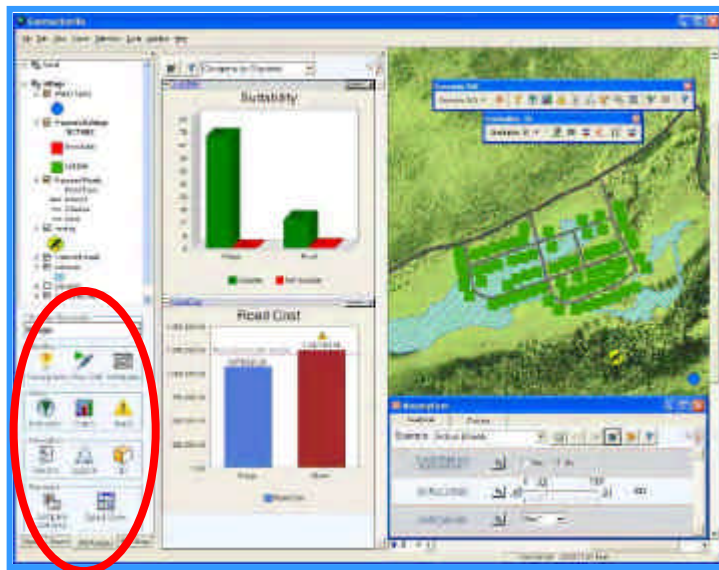


图 66 Scenario 360 组件界面图

资料来源：<http://www.placeways.com/support/?p=viewdownload&id=21>

Scenario 360 主要具有以下功能^[49]：

Scenario 360 可用于模拟土地利用假定方案，输出可视化的 2D 图形，并对所需要讨论的假定方案从经济、社会、环境等方面给出直观的评价结果，这些评估结果不仅包括直观影响，还包括潜在影响，不仅包括积极的效果，还有消极的影响。决策者能够在对假设情景进行模拟和评估结果的基础上，在宏观上把握全局。

Scenario 360 为用户提供易于操作的界面，能够在同一个窗口中并行比较两种以上方案，自动生成方案报告。

Scenario 360 能与 SiteBuilder 3D 整合，它所生成的 2D 图像在 SiteBuilder 3D 里面都可以被转换成 3D。

总之，Scenario 360 是一种有效、易用、可视化强的决策支持组件，主要被应用于总体规划、土地利用、选址规划、发展建议分析、财政平衡、视觉效果评估、可持续分析、环境影响评价、森林管理计划、火警危险评估等方面有广泛应用，用 CommunityViz 总裁 Doug Walker 的话来说，“比起前代同类产品来说，Scenario 360 在方案可视化和定量评价方案影响方面前进了一大步。”

二、SiteBuilder 3D

SiteBuilder 3D 组件主要用于为用户提供交互式的 3D 场景，以利于用户对选择方案以及方案对象有更直观的了解，SiteBuilder 3D 的界面如图 67 所示。

[49] <http://www.communityviz.com/index.asp?circuit=6&fuse=newsDetail&cid=492>

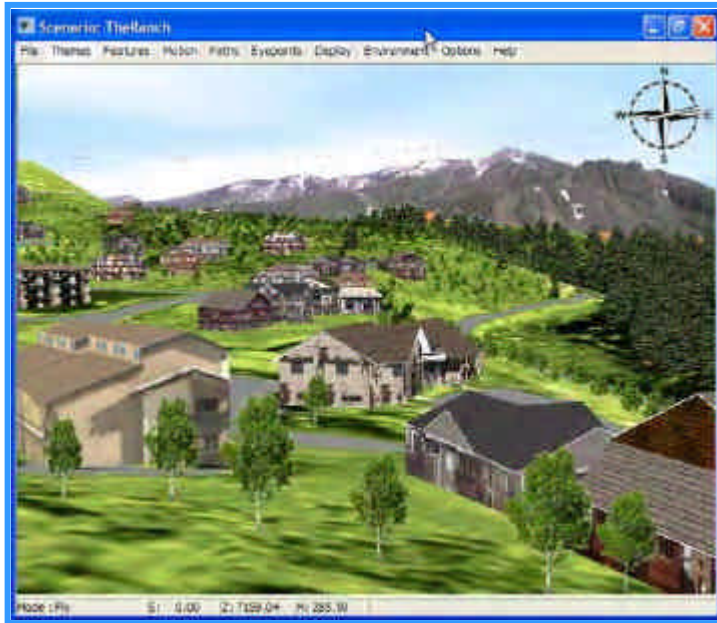


图 67 SiteBuilder 3D 组件界面图

资料来源：<http://www.placeways.com/support/?p=viewdownload&id=21>

SiteBuilder 3D 能够将 Scenario 360 中的所有以 2D 格式储存的文件转换成 3D 格式，为用户提供了直观的 3D 场景，有利于决策者更好地把握方案中对象的相互空间关系和对比不同方案所产生的影响。为方便用户的使用，在 SiteBuilder 3D 模型数据库中提供了 350 多个模型，这些模型包括到建筑、标志、平面图形、3D 对象等。SiteBuilder 所包含的实时 3D 浏览器（real-time 3D viewer）提供了 5 种不同的浏览方式，能够满足用户不同的浏览需求。

4.3.4 案例分析

2001 年，CommunityViz 扩展版被用于美国塔科马 Dome 区域规划，这项规划的目的是将该区域的一部分工业区和商业区调整为居住、娱乐、商业等一体的综合性区域，在项目中所涉及的方面包括了环境分析、交通运输、公共设施、办公娱乐等各方面，该规划受到了业界的广泛好评。图 68 为用 CommunityViz 生成的该区域 3D 场景图。



图 68 用 CommunityViz 生成的 Dome 区域 3D 场景图

资料来源：<http://gis.esri.com/library/userconf/proc02/pap0441/p0441.htm>

CommunityViz 还用于重要公共设施的选址规划中。在洛杉矶，大多数的公园都位于人口密度较低的城市边缘地区，因而出现的问题是，一方面公园的利用率低，另一方面社区居民与公园的连接性不高，为了改变这种情况，TPL (Trust for Public) 组织对洛杉矶的社区进行了调研，决定在城市人口密集区建设一个新公园。在这个新公园的选址过程中，TPL 设置了五个标准：

- (1) 尽量设置在儿童比例较高的地区；
- (2) 优先考虑设置其他人种比例较高的地区；
- (3) 尽量设置在低收入人口较高比例的地区；
- (4) 优先考虑设置在人口密度较高的地区；
- (5) 尽量设置在公园密度较低的地区。

在该项目中，CommunityViz 为公众提供了发表意见的平台，所生成的信息清晰、直观，为 TPL 提供了很好的决策参考。图 69 为用 CommunityViz 生成的洛杉矶社区新公园的选址适宜度分布情况，绿色越深表示越适宜用来建设新的公园。

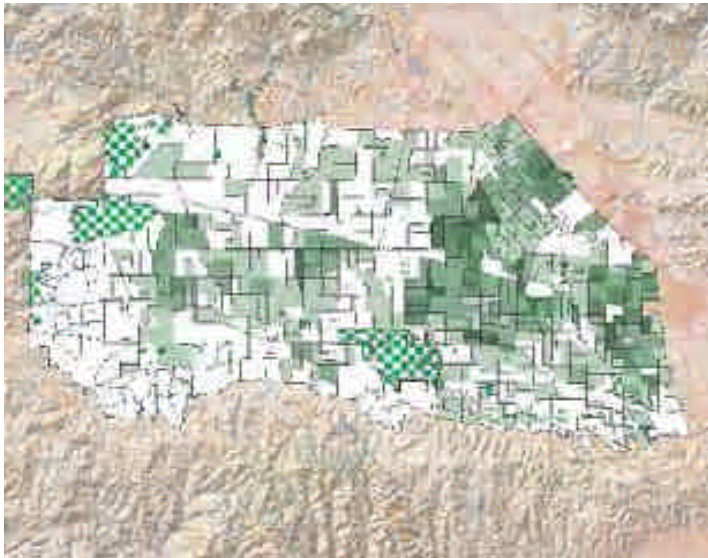


图 69 洛杉矶社区新公园的选址适宜情况示意图

资料来源：

<http://www.communityviz.com/downloads/resource%20library/case%20studies/Los%20Angeles,%20CA.pdf>

4.3.5 小结

如今，CommunityViz 已经在规划编制工作中发挥了很重要的作用。总体说来，CommunityViz 具有以下几方面优点：

- ◇ 结构清晰，界面友好，而且提供了丰富的教程、素材和案例，简单易学，不仅专业人员可以使用，非专业人员也可以通过学习很快地掌握软件的基本操作，因此具有广泛的公众参与基础；

- ◇ 提供了丰富的对象和场景模板，系统的功能都能整合于 ArcGIS 工具栏中，使用起来非常方便；
- ◇ 尚有很大的开发潜力。如在社区的可视化方面，工具属性值的设置选择项很丰富，用户可以根据自身需要随意设定。系统还能将多幅图像放在同一页面中进行对比，这是 CommunityViz 与同类产品相比的独特功能之一。人们还能够利用 Scenario 360 进行社会 - 经济学分析等。

但是 CommunityViz 也具有以下几方面缺点：

- ◇ Sitebuilder 3D 使用起来相对容易，但 Scenario 360 虽然使用起来易于入门，但若要进一步理解和应用，还需要操作者掌握一定的 GIS 知识；
- ◇ 多维、动态、仿真度高、实时的可视化图像往往需要大量的数据做支持，获取、维护和管理这些数据是 CommunityViz 应用过程中的最大难点；
- ◇ 由于需要处理大量的数据和显示高分辨率的图像，CommunityViz 对计算机硬件的要求比较高。

4.4 CITYgreen

4.4.1 总体介绍

城市的发展不能仅仅是大量自然景观转变为城市建筑的过程。如今人们越来越强烈地意识到城市森林、城市绿地也是城市必不可少的组成部分。CITYgreen 是美国林业署开发的 ArcView 的扩展模块。该软件一般用于量化城市森林和城市绿地、城市公园等所带来的生态效益，并对其进行规划管理。CITYgreen 在美国的森林研究领域的应用较为广泛(胡志斌等, 2003)^[279]，自 1996 年第一个版本问世以来，到 2002 年 5 月发行了 CITYgreen 5.0 版本，已完成了包括亚特兰大、华盛顿特区、新奥尔良、休斯顿和圣安东尼奥州等 20 多个城市的生态分析。

4.4.2 模块设置

图 70 是 CITYgreen 的主界面，CITYgreen 以扩展模块的形式整合于 ArcView 中，所以对 CITYgreen 的使用者来说，掌握 ArcView 的使用是熟练运用该软件的必要条件。

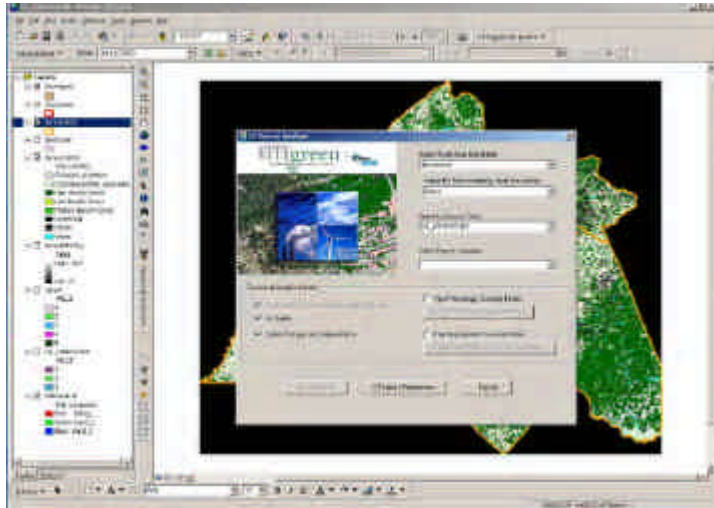


图 70CITYgreen 主界面

CITYgreen 包括两个功能模块：

1. 模型数据库

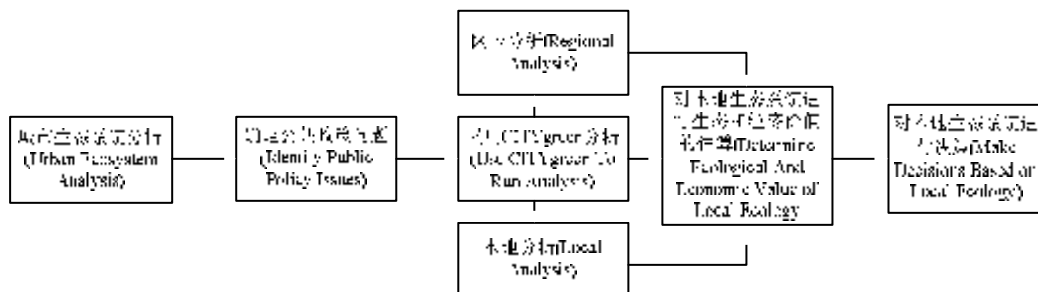
模型数据库包括空间数据与属性数据。空间数据一般包括遥感影像、航片和数字化图片等，主要用来存储空间对象（如树木、建筑物等）的几何特性。属性数据除系统数据库自身提供的数据库以外，还包括文献资料、野外调查数据等，用户可以根据需要进行数据编辑、查找、添加等操作。

2. 生态效益分析模块

该模块对模型数据库中的数据从固碳、大气污染物去除、节能、水土保持、提供野生动物生境等生态效益进行分析，输出分析报告，为决策者提供参考。

4.4.3 主要功能

CITYgreen 包括两个不同的模块：本地分析模块（Local Analysis Extension）和区域分析模块（Regional Analysis Extension）。这两个模块都是 ArcView 的扩展版本（Extension），用户可以在 ArcView 的“文件”菜单中进行设置，对这两个模块进行切换。图 71 表示 CITYgreen 在辅助规划的基本流程。



下面分别对本地分析和区域分析两个模块分别进行分析^[50]：

1. 本地分析模块

本地分析模块一般用于计算树木的经济价值，估算树木对减少洪灾风险的贡献，估量树木在能源利用方面所起到的作用，以及在碳的存储与的吸收、水土保持和洪涝风险防御、CO₂等污染物的清除、节能以及提供野生动植物栖息地等方面的生态效益。本地分析模块的主要功能有：

(1) 数字化功能

在 CITYgreen 中，常需要用到植被覆盖图等遥感资料，数字化这些图像是进行下一步分析的基础。CITYgreen 能够将一片树木树冠垂直投影数字化为同一个多边形区域，图 72 右为用 CITYgreen 对一幅树冠垂直投影遥感影像（左）处理后的图片，程序自动分析每个投影面积的大小。

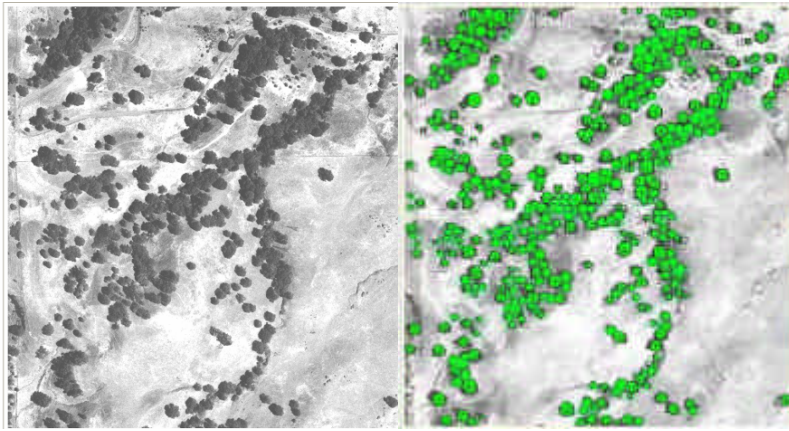


图 72 左 树冠垂直投影遥感影像图 右 用 CITYgreen 数字化后的图片

资料来源：<http://www.phytosphere.com/treeord/gis.htm>

(2) 树木生长模拟功能

本地分析模块可以根据植被现状对树木生长进行模拟，从直径、高度、种群等方面对植被的未来 10 年、20 年、30 年甚至更长时间的生长情况进行动态预测，估计树木未来的生态效益。但 CITYgreen 的模拟功能还只能被应用于圆形树冠的树木生长过程，草地、农田等植被的生长情况还不能模拟。在 CITYgreen 数据库中储存了 300 多种树木的生长率值，用户可以在控制面板中设置所需要的生长率，也可以对该数据库更新，图 73 为对某区域树木生长模拟的对比情况图，右图模拟了树木生长 20 年后的情况。

[50] <http://www.isa-arbor.com/publications/tree-ord/gis.aspx>



图 73 树木生长模拟情况对比图（左：生长前；右：生长后）

资料来源：<http://www.americanforests.org/productsandpubs/citygreen/success.php>

（3）树木生态效益的计量功能

CITYgreen 能够根据树种、树冠直径、树高等级（< 15 ft, 15-35 ft, >35 ft）、树木健康等级（5 个等级）等指标，计算树木多方面的生态效益，并能根据一定的核算方法将各项生态效益折算成经济价值。

2. 区域分析模块

区域分析模块从区域尺度衡量绿地或森林的经济价值，其分析尺度大于本地分析模块的分析尺度。区域分析模块能够处理遥感影像、分析大区域范围内植被覆盖及变化情况，为制订科学的城市绿色基础设施规划提供依据。该模块包括两个相互独立的组成部分：一是遥感影像分类程序，二是由美国农业部基于国家资源名录（National Resources Inventory, NRI）开发的流域分析程序。

（1）遥感影像分类程序

CITYgreen 利用归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）通过红外和近红外波段所包含的信息对遥感影像进行分类。CITYgreen 还能够检测两组 NDVI 分类图像的变化，生成一幅能够标识出变化区域的图像。

（2）流域（Watershed）分析程序

流域分析程序在整个流域的范围内来计量植被的生态效益，与本地分析模块的树木生态效益的计量功能类似，该分析程序所涉及的生态效益包括碳的存储与的吸收、水土保持和洪灾风险防御、CO₂ 等污染物的清除等，计量的尺度较大。

4.4.4 应用案例

CITYgreen 在国际城市森林（Urban Forest）的研究中得到了越来越广泛的应用，在美国，CITYgreen 参与了亚特兰大、华盛顿等 20 多个城市森林研究。在中国，人们也开始应用 CITYgreen 进行城市森林生态价值的估算。

1996 年，美国森林组织着手研究亚特兰大的热岛问题，组织者认为，城市温度的升高与树木的减少有直接关系。早在 1992 年亚特兰大相关部门就曾提出，所有停车场必须有树木覆盖，但这项建议并没有被采纳。为衡量停车场树木的具体价值，美国森林组织以 Turner Field 停车场（4 英亩）为例，采用 CITYgreen 模拟了树木种植前后的生态效益，并预测了亚特兰大城区（122 英亩）在未来 20~30 年内每年可能产生的效益，为 1992 年的建议提供

了可靠的数据支持,具体数据如下表所示,亚特兰大城区停车场树木在洪灾风险防御方面的收益每年可以达到 491000\$, 在空气污染物去除方面的收益也可以达到 7534\$。

表 22Turner Field 停车场与亚特兰大城区停车场树木经济收益表

	面积 (英亩)	现有树冠覆盖率	未来 30 年的树冠覆盖率	洪灾风险防御收益 (\$)	空气污染物去除收益 (\$)
Turner Field 停车场	4	5%	29%	16,000	275
Atlanta 所有停车场	122	7%	现有覆盖率 (7%) +30*树木年增长率	491,000	7,534

资料来源: <http://www.americanforests.org/productsandpubs/citygreen/success.php>

在国内,胡志斌等(2003)通过 ArcView 3.2 的二次开发语言 Avenue,建立了基于 CITYgreen 模型的城市森林管理信息系统,为城市森林结构的研究、生态效益综合评价提供了技术依据,并利用该系统对沈阳市区城市森林进行了结构分析和生态效益定量评价(胡志斌等,2003)。王晓春等(2005)采用基于 CITYgreen 以东北林业大学哈尔滨实验林场为例,结合航片判读与实地调查,对哈尔滨市 7 种主要乔木树种对 SO₂ 的去除能力进行了定量评价(王晓春等,2005)^[280]。

4.5 GB-QUEST

4.5.1 总体介绍

GB-QUEST是加拿大英属哥伦比亚大学(University of British Columbia)的可持续发展研究机构(Sustainable Development Research Institute, SDRI)于2001年开发完成的。其前身是Lower Fraser Basin 生态研究计划项目中开发的LFB-QUEST,1999年,一家私有公司在LFB-QUEST的基础上开发了其商业化版本,并将其作为乔治亚盆地远景计划(Georgia Basin Futures Project, GBFP)的核心技术支持,GB-QUEST因此得名,简称QUEST。QUEST是整合性系统模型与计算机游戏结合的公众参与、决策支持、对未来情景预测的规划支持系统,主要目的是,帮助各种非专家型的利益所有者,了解和研究在各自不同的区域发展条件下产生的未来假设情景。

4.5.2 系统界面及操作流程

图 74为QUEST的初始界面,可以看出QUEST的应用主要分为三个阶段:参数设置(Set Context)、对未来的选择(Options for the Future)和结论(Results)。



图 74QUEST 初始界面图

资料来源：http://www.basinfutures.net/play_gb_quest.cfm

1. 参数设置

在“参数设置”操作阶段，用户需要对一系列参数进行设置如优先等级（Rank Priorities）、外部条件（External Conditions）和运行机制（How the World Works），这些设置会对最终生成的假设情景产生影响。Set Context操作界面如图 75所示：

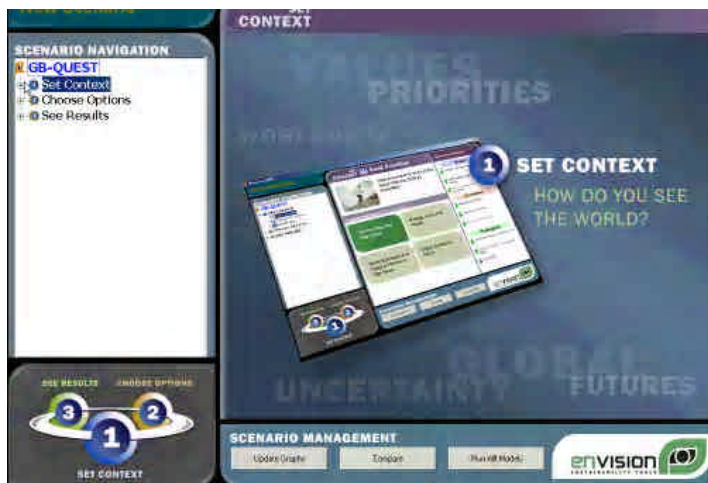


图 75QUEST 参数设置界面图

资料来源：

http://www.basinfutures.net/media/quest-flash/QUEST_FlashTour.html?speed=low

2. 对未来的选择

用户需要进行政策方面的选择，这些选择直接影响到假设情景的生成结果。这些选择包括三个大类（Categories）：城市发展（Urban Development）、资源（Resources）和经济（Economy）。每个大类由若干主题（Topics）构成，如在城市发展大类中，包括城市增长（Urban growth）、生活方式（lifestyles）、邻里关系（Neighbourhoods）和交通（Transportation）四个方面的主题。每个主题又由若干问题组成。具体层次结构如图 76 所示，系统操作界面如图 77 所示：

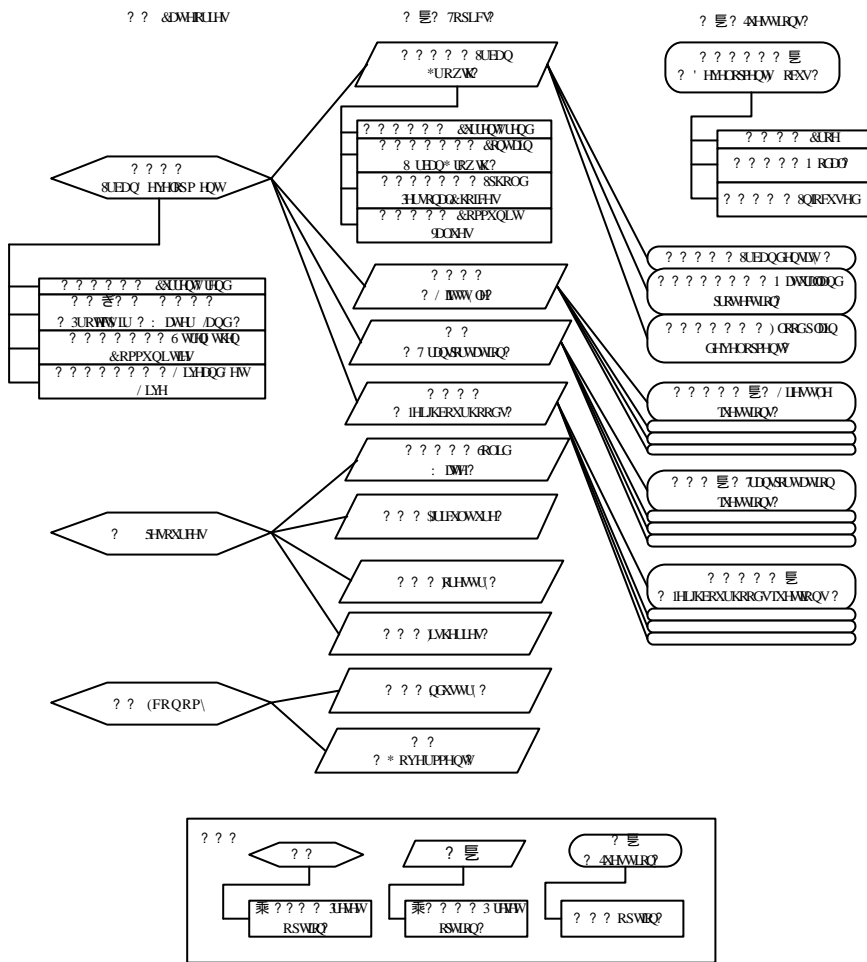


图 76 “对未来的选择”层次结构图

资料来源：Jeff Carmichael, James Tansey, John Robinson. An integrated assessment modeling tool. Global Environmental Change. 2004, (14): 171 ~ 183

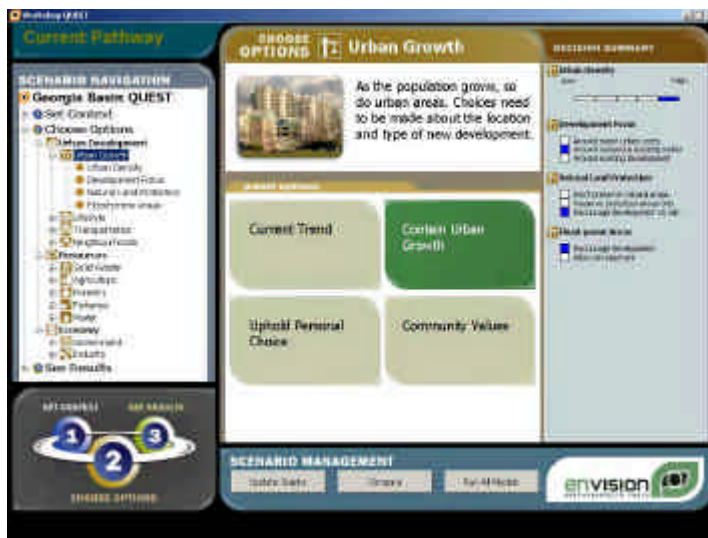


图 77 “对未来的选择”系统操作界面

资料来源：

http://www.basinfutures.net/media/quest-flash/QUEST_FlashTour.html?speed=low

3. 结论

在前两个操作阶段中，用户对需要生成的情景条件进行设置和选择，在“结论”操作阶段，用户可以浏览前两个操作所产生的结果。系统以图表方式对所生成的情景进行了详细的描述，用户可以通过参数设置决定需要浏览假设场景的哪一部分细节内容。对于特定的情景，界面还可以显示用户的哪一些选择对该情景产生了影响，图 78 为空气质量方面的输出报告，在图的右侧显示了对这些结果产生影响的对应选择。

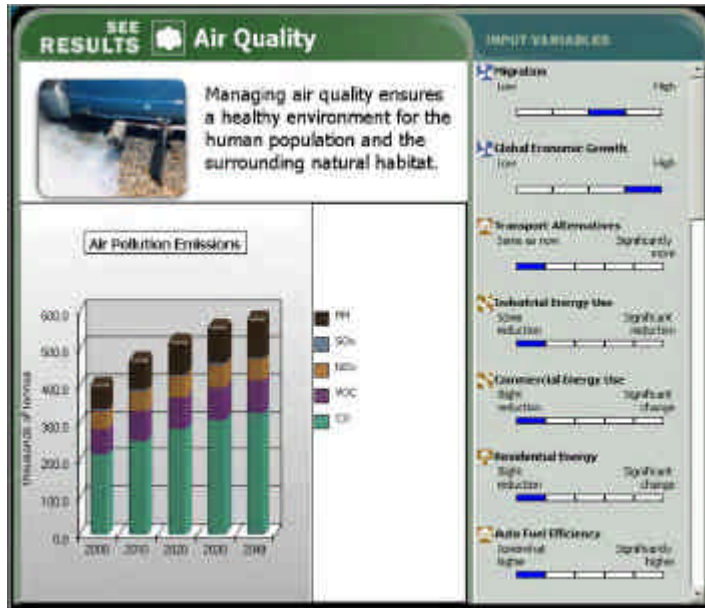


图 78 空气质量结果报告图

资料来源：http://www.basinfutures.net/media/quest-flash/QUEST_FlashTour.html?speed=low

4.5.3 模块设置和功能简介

一、模块设置

GB-QUEST 模块涉及到经济、社会、环境等各个方面，GB-QUEST 子模块有（Jeff Carmichael 等，2004）：^[28]

1. 人口统计模块（Demography）。人口统计模块是 GB-QUEST 模块中最重要的模块之一，因为人口增长会直接影响到经济、社会、环境等各方面。
2. 宏观经济模块（Macroeconomy）。宏观经济模块负责处理用户在宏观经济方面的选择。
3. 能源模块（Energy）。商业、工业、农业、运输、供电等都与能源的使用有关系，能源模块与其他许多模块都有关联，该模块还能估算温室气体的产生情况等。
4. 政府模块（Government）。税收影响到国家财政盈亏和政府运作方式，财政开支又与教育、健康、社会福利等方面有关系。
5. 城市增长模块（Urban Growth）。负责设置城市增长的区域分布，反映用户所选择的的城市类型。在该模块中，用户的设置会影响到城市农田、森林、工业等用地类型的地域分布。

6. 交通模块 (Transportation)。该模块建立了人们工作地点、学校、消费娱乐地点之间的联系,同时还负责传递原料、商品,与当地的空气质量和全球气候改变也有密切关系,所以交通模块也与其他许多模块密不可分。
 7. 农业模块 (Agriculture)。农业模块也是 GB-QUEST 模块中最重要的模块之一,影响到社会、经济、环境等各个方面。
 8. 空气质量模块 (Air Quality)。该模块的核心思想是,在特定天气条件情况下,研究居民日常的生活方式如何影响当地的空气质量。
 9. 固体废弃物模块 (Solid Waste)。社会行为对环境的影响,能源的利用与循环,垃圾的处理等都是固体废弃物模块所关注的问题,该模块与人口增长模块、宏观经济模块等都有联系。
 10. 水资源模块 (Water)。主要用于分析水的需求与供给。
 11. 生活成本指标 (Cost of Living Index)。该指标主要用于阐述该区域的不同生活成本,比较人们收入与消费随时间的变化情况。
 12. 生态足迹指标 (Eco-footprint Index)。生态足迹指标用于计算为养活当地居民需要消耗的资源 and 消化废弃物所占用的生态用地的面积。
 13. 邻里模块 (Neighbourhoods)。邻里模块反映邻里和社区的情况,如穿越城市所采取的交通方式的多样性、居民区与商业区的通达性,以及儿童的游乐场等等。
 14. 渔业模块 (Fisheries)。在渔业模块,用户可以进行政策选择以保持渔业的可持续发展。
 15. 林业模块 (Forestry)。在林业模块,用户可以管理林业,如决定木材砍伐的地点和数量,森林的保护、木材收入支配、林业就业人员配置等。
- QUEST的主题与子模块以及子模块之间相互影响,具体关系如图 79所示。

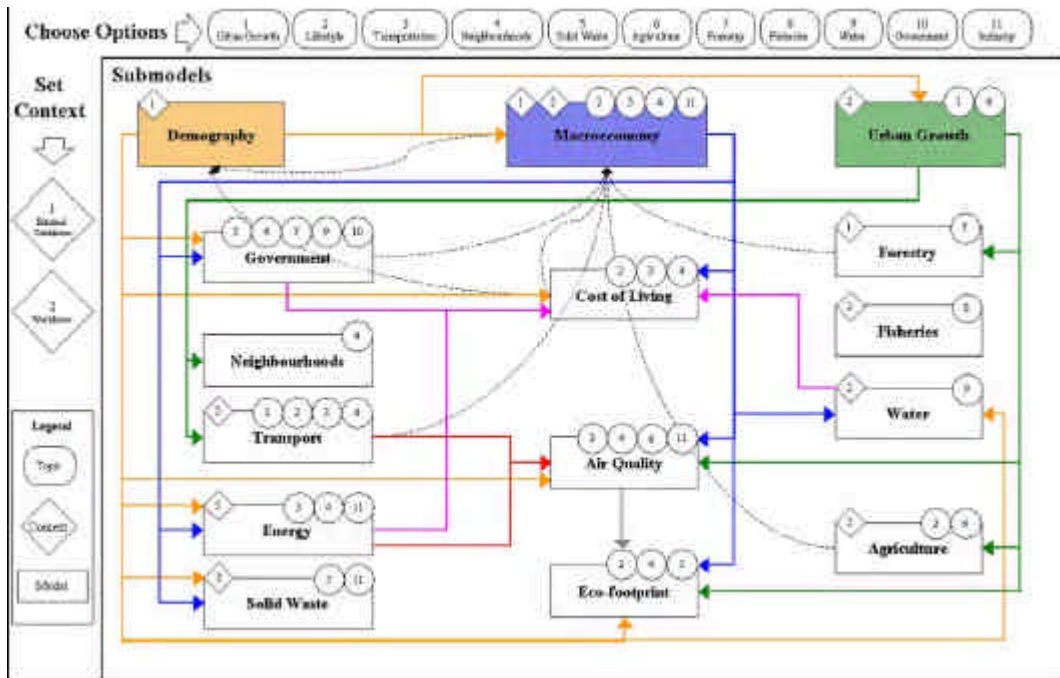


图 79 QUEST 各子模块相互影响关系图

资料来源：Jeff Carmichael, James Tansey, John Robinson. An integrated assessment modeling tool [J]. Global Environmental Change. 2004, (14): 171-183

在图 79 中，方框代表各个子模块；菱形框代表用户的外部选择：外部驱动力(External drivers) 和人们对区域的观点(Worldviews)；圆角方框表示主题(Topics)。在主流程图中，省略了方框、菱形框、圆角方框里的内容，用相对应的数字表示所要表示的对象，如 表示主题“ Urban Growth”。主题与子模块之间存在相互影响的关系，如在图 79 中，符号 存在于子模块“ Urban Growth”和“ Transport”上侧，说明主题“ Urban Growth”() 对其起直接影响作用。

各模块之间也存在间接影响。在流程图中，用实线箭头表示各模块之间的间接影响，用虚线箭头表示各模块之间反馈影响。可以看出，“ Urban Growth”子模块对“ Agriculture”有间接影响的作用。

二、功能简介

QUEST 是一个交互式的规划支持系统，主要具有以下几方面的功能：

1. 假设情景构造。人们可以根据所选择的假设条件短时间内生成研究区域的假设情景。这些假设条件由众多的选择项所组成，包括经济、社会、环境等各个方面的指标；
2. 教育。QUEST 以一种游戏式的开发模式，通过通俗易懂的界面和简单的操作，增加用户对可持续发展问题以及区域环境等问题的了解。特别是对青少年来说，QUEST 具有很好的教育引导功能；
3. 各利益所有者之间的交流和对话平台。QUEST 各模块之间具有交错复杂的关系，有利于各利益主体都能参与到对区域可持续问题中来，是各利益所有者之间良好的交流和对话平台；
4. 决策支持功能。QUEST 能够模拟区域未来 40 年的综合发展情况，为决策人员确定指定区域的发展规划提供了决策支持作用；
5. 创新性的理性增长模拟。QUEST 能够模拟在选择条件下的区域理性增长情况。

4.5.4 应用案例

乔治亚盆地地区远景计划^[51]是一项五年计划(1999-2004)，目的是在综合专家观点与公众意见的基础上，研究乔治亚盆地地区可持续发展的途径。该计划采用QUEST建立了公众对话平台，鼓励普通公众与各种利益群体参与到区域远景规划中来，对乔治亚盆地地区 40 年后的发展情景进行预测等等，研究地域分布如图 80 所示。

[51] <http://www.basinfutures.net/index.cfm>



图 80 QUEST 研究区域空间分布图

资料来源：Jeff Carmichael, James Tansey, John Robinson. An integrated assessment modeling tool[J]. Global Environmental Change. 2004, (14): 171-183

图 81 (左) 为用 QUEST 生成的交通结果报告图，其左侧以图表的形式显示了交通方面的预测结果报告，右侧控制栏中显示的是对该结果产生影响的用户选择；图 81 (右) 为乔治亚盆地的 Vancouver 地区 2040 年人口密度假设场景与 2000 年对比图，从两图的对比中可以看出清楚地看出 40 年后人口密度的变化情况。

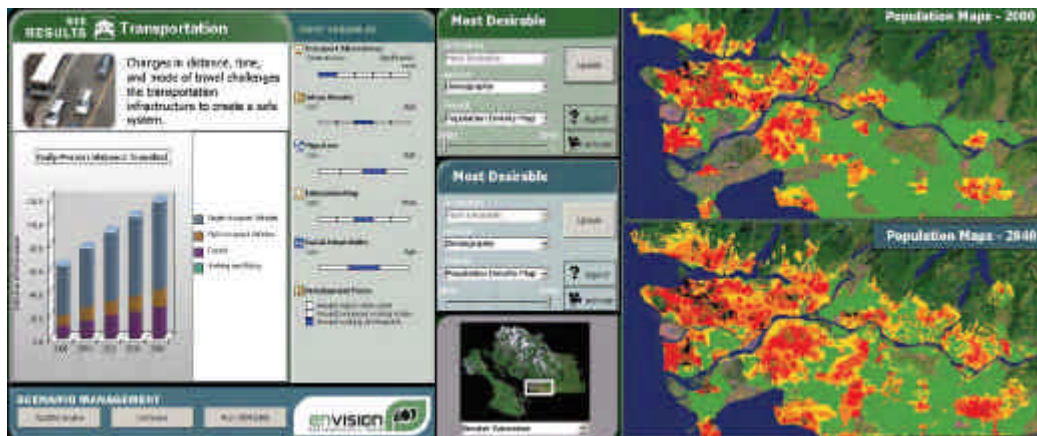


图 81 左 交通预测情景

右 乔治亚盆地 Vancouver 地区人口密度 2040 年假设情景与 2000 年对比图

资料来源：http://www.basinfutures.net/media/quest-flash/QUEST_FlashTour.html?speed=low

4.5.5 小结

作为一种交互式的计算机模拟工具，GB-QUEST 界面简单，容易操作，游戏式参与的模式，使很多普通公众能够参与到区域可持续发展中来；系统同时考虑了经济、社会、环境等多方面的因素，把各种利益所有者都能包含进来，是很好的公众决策参与平台。

该系统也具有一些缺点。如用户界面过于简单，尚不能够利用多媒体技术来表达所生成

的结果；对于非专业人员来说，生成假设情景之前所要做出的选择太多，这会减少公众对该系统的兴趣，这与系统的游戏式公众参与本意相违背；此外，一些专家也质疑系统的某些模块的精确度。

4.6 NatureServe Vista

4.6.1 系统简介

NatureServe Vista 是由国际自然保护组织（英文）与美国加利福尼亚大学的圣巴巴拉生物地理学实验室（Santa Barbara Biogeography Laboratory）、美国地质调查队（the U.S. Geological Survey）、怀俄明自然多样性数据机构（Wyoming Natural Diversity Database）、佛罗里达自然详查机构（Florida Natural Area Inventory）、Esri 公司等多家机构或组织的一批生物保护专家、信息分析专家、GIS 专家和软件工程师，经过两年共同研究开发的规划支持系统。该系统主要应用在土地利用和自然保护规划领域，目的是帮助规划者能够更好的了解区域的生态系统，确定各种资源的最优保护利用方案。

NatureServe Vista 是一个基于 ArcMap9.0、使用 C#.NET 开发的商业性规划支持系统，2005 年 3 月发布了 1.0 版，2005 年夏末推出了目前的 1.3 版，并计划于 2006 年秋季发布 2.0 版本^[52]。

NatureServe Vista 系统集成了丰富的生物学信息（脆弱生态系统的状态、濒危物种及其与不同土地利用方式的兼容性等）和政策信息（所属权、管理权以及保护机制），在后续的版本中将会集成其他广泛应用的关于保护的模块。该系统设计的宗旨是简单易用，便利用户能够得到有关生物多样性问题的定制的支持和专家帮助。

4.6.2 模块设置及工作流程

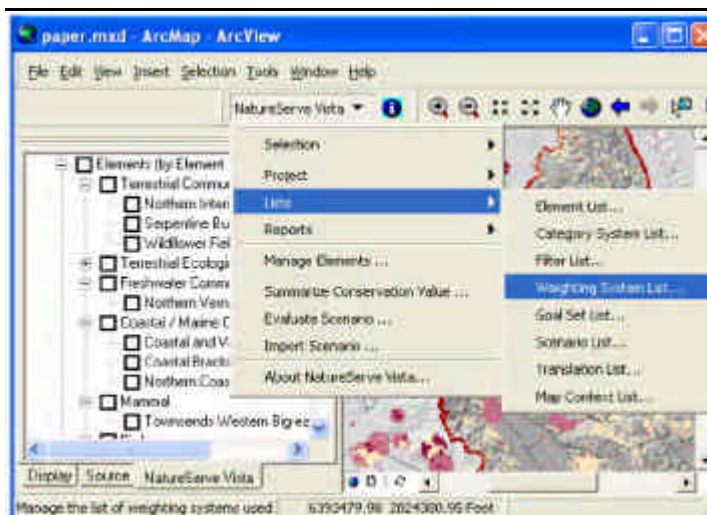


图 82 NatureServe Vista 系统操作界面

[52] http://www.natureserve.org/prodServices/DSS_Geospatial_Solutions_1103.pdf

图片来源：<http://gis.esri.com/library/userconf/proc04/docs/pap2185.pdf>

图 82 为 NatureServe Vista 系统操作界面，用户可以在 ArcView 主界面从 Vista 工具栏里或者内容表里获取 Vista 数据和功能函数。

NatureServe Vista 将生物多样性信息融入土地使用和保护规划工作中，协助决策者分析评价不同土地保护规划的价值，确定规划区域需要进行重点保护的物体和场所，制定土地资源管理和使用的决策文件，减少土地使用冲突，实现保护目标，以最低成本最大限度地保护和利用土地。

NatureServe Vista 系统包括 6 个功能模块，其中包括 5 个分析工具模块：保护要素确定模块（Identify Your Conservation Elements）、保护价值计算模块（Summarize Conservation Value）、保护方案制定模块（Generate Conservation Solutions）、土地利用方案评估模块（Evaluate Land Use Scenarios）、典型区域分析模块（Explore Sites and Create Mitigation Plans）；此外还有一个分析报告生成模块（Document Your Analyses and Generate Reports）。

1. 保护要素确定模块

NatureServe Vista 规划的重点是确定保护要素，NatureServe Vista 提供了项目数据库（The Project Database）、要素保护价值分布图（Element Conservation Value Maps）这两种工具来帮助用户完成这一步。

（1）项目数据库可以使用户集成多种数据信息，数据来源可以是多重来源或单一来源。对数据库中的每个要素，其属性主要包括名称、权重值、所属类别、存在的概率、数据可信度、保护数目、与各种土地利用类型的相容性等。

（2）要素保护价值分布图（如图 83 所示）中颜色越深表示要素评估价值越高。同时 NatureServe Vista 对每个要素生成一份报告，包括该要素的基本资料和保护价值分布情况等。

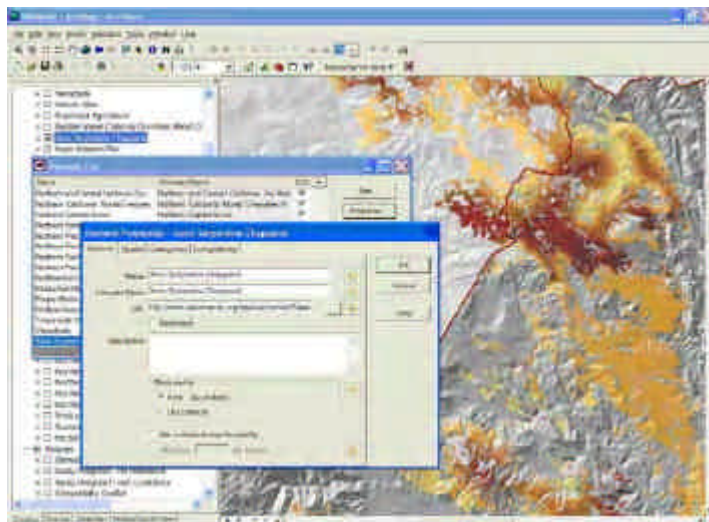


图 83 要素保护价值空间分布图

资料来源：http://www.natureserve.org/prodServices/vista/kf_manage.jsp

2. 保护价值计算模块

根据每个要素的稀缺性赋予不同的权重值，对整个规划区所有待保护要素的保护价值进行综合计算，生成规划区保护价值分布图（图 84），用于表征不同区域的保护等级，图中颜色越深的区域保护价值越高。

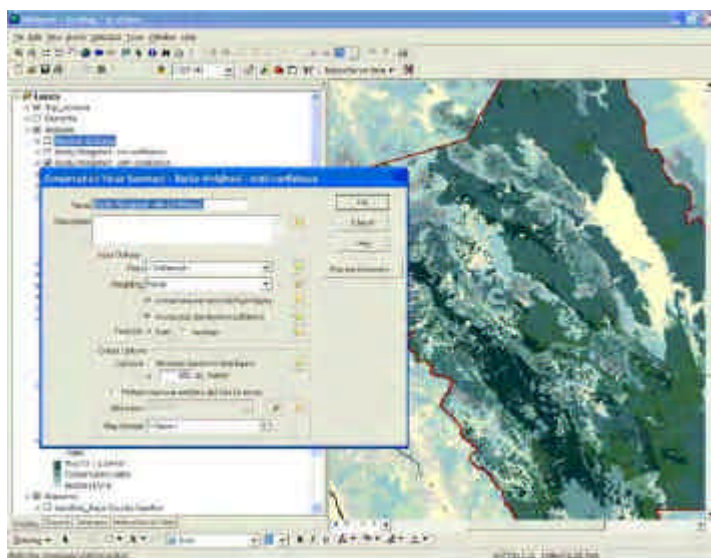


图 84 区域保护价值空间分布图

资料来源：http://www.natureserve.org/prodServices/vista/kf_summarize.jsp

3. 保护方案制定模块

NatureServe Vista 采用 Marxan、Spot 两种常用的工具，根据保护要素、保护目标和成本信息，辅助用户确定区域最优保护场所。

4. 土地利用方案评估模块

用户可以对现有的土地利用方案和管理实践政策进行评估。选择任意一种土地利用方案和管理实践政策，根据保护目标对所选方案进行计算评价，确定可以实现物种最低保护目标和限制物种保护的区域。如图 85 所示，颜色越深表示该地区的土地利用方案同物种保护冲突越严重，物种保护受到的生存威胁越大。

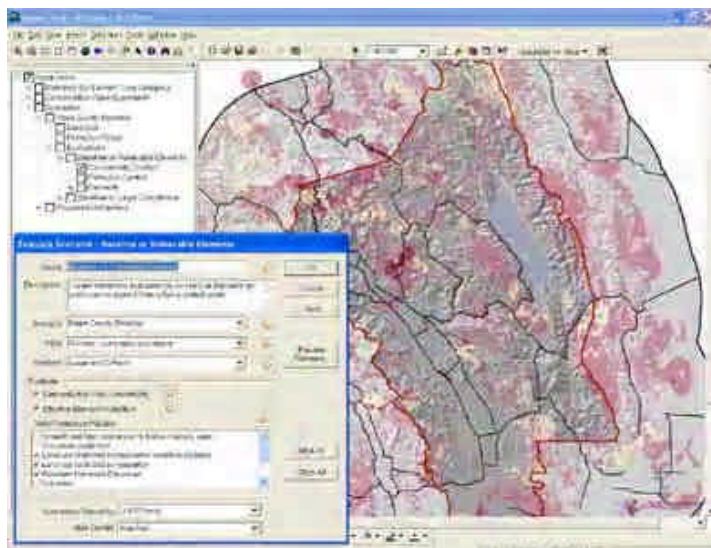


图 85 土地利用方案评估图

资料来源：http://www.natureserve.org/prodServices/vista/kf_evaluate.jsp

NatureServe Vista 提供一个转换向导，将规划区域的土地利用方案和管理实践政策导入到系统并自动转换成系统的标准格式（图 86）。

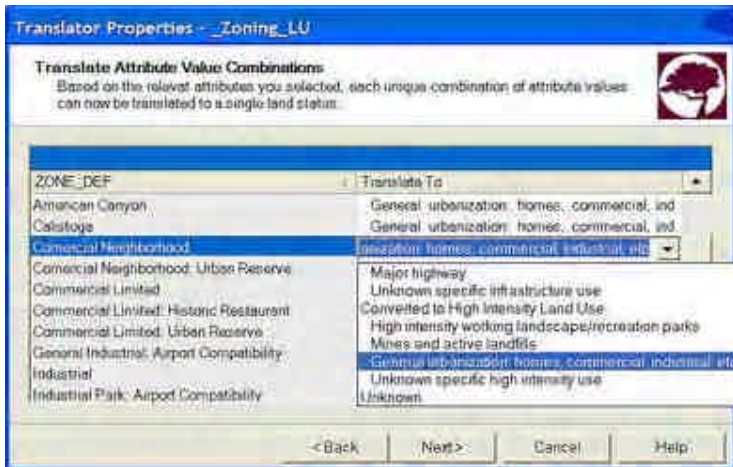


图 86 土地利用方案和管理实践政策转换界面

资料来源：http://www.natureserve.org/prodServices/vista/kf_evaluate.jsp

图 86 中把土地“商业社区”变成通用类“一般城镇化、住宅区、商业区、工业区等”土地利用清单，通用类清单可以反映出规划需求。

5. 典型区域分析模块

Explore Sites 是一个强有力的新工具，可以使用户比较不同的土地利用方案和管理实践政策对同一个区域的差异或者不同区域的差异，从而更好地理解保护要素的价值，以及保护要素与土地利用方式之间的相互作用关系。

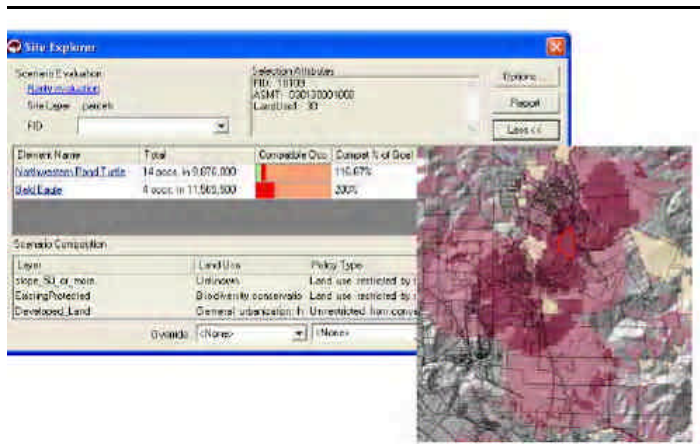


图 87 Explore Sites 工具界面

资料来源：http://www.natureserve.org/prodServices/vista/kf_explore.jsp

图 87 中用 Explore Sites 工具选出了特定地点的保护要素(红色多边形区), Explore Sites 记录了不同的土地利用方式和政策对该地点的影响以及保护要素的反馈作用。用户可以在菜单项目中选择不同的政策及土地利用方式，通过比较选择，得到最优的土地利用规划方案。

6、分析报告生成模块

为用户提供所有因素的详细报告文档（HTML 格式），同时还可以提供规划过程的每一步骤的文档，比如方案评估产生的报告文件等。这些资料可以一起列入分析报告，为用户供提供相关决策参考。

4.6.3 系统特点^[53]

1. 标准的技术平台

NatureServe Vista基于ArcMap平台开发，与ArcGIS的应用模式保持一致，可以方便灵活地制定、修改规划方案。

2. 灵活的数据结构

NatureServe Vista的内嵌式数据结构，允许用户选择多种数据来源构建的规划数据库。

3. 文档的实时记录

NatureServe Vista对每一步骤都能进行实时、详细的文档记录。用户可以引用、参考、总结这些记录，与合作伙伴或者相关机构讨论决策的细节过程，制定一个合理的决策方案。

4. 标准的报告

NatureServe Vista生成的HTML格式报告，方便用户将规划方案发布到网络上或者导入到MS WORD、EXCEL等办公自动化软件中。

5. 操作简易方便

NatureServe Vista的数据输入向导、使用指南、帮助文档等能够引导用户正确使用系统，得到所需要的结果，而NatureServe Vista的一系列自动化功能则有效地减少了用户亲自进行分析计算的大量时间，大大简化了土地利用规划、资源管理的复杂分析过程。

4.6.4 应用案例

一、纳帕流域生物多样性保护^[54]

纳帕(NAPA)流域作为一个重要的葡萄酒生产基地，同时也是美国物种最丰富的地区之一，据统计，纳帕流域至少存在着68种濒危物种，多个重要的自然群落，然而，在过去的十年中，越来越多的山地被开发成葡萄园，大量森林的消失，许多动植物尤其是当地的红腿青蛙和黄芪的生存受到威胁。纳帕流域的发展面临着生态保护与经济增长的平衡问题。为此，纳帕县环境保护者、葡萄酒商家和农民一起合作，起草一份蓝图，寻求一个可持续发展的方案，问题的关键是如何确定需要优先保护的最有生态意义的地区。

受纳帕当地的土地信托组织委托，国际自然保护组织与2001年组建了一个由多学科专家组成的团队，采用NatureServe Vista系统，研究纳帕流域的生态平衡问题，协助当地土地资源管理者确定需要进行重点保护的地区以及发展经济的地区。

图88是基于整个纳帕流域景观的保护价值评估分布图。选择的保护因素包括一系列濒危物种，图中有重要生态意义的地点用红色表示，颜色越深，表示受到保护的优先度越高。

[53] http://www.natureserve.org/prodServices/pdf/vista_brochure_march06.pdf

[54] http://www.natureserve.org/prodServices/pdf/DSS_Geospatial_Solutions_1103.pdf

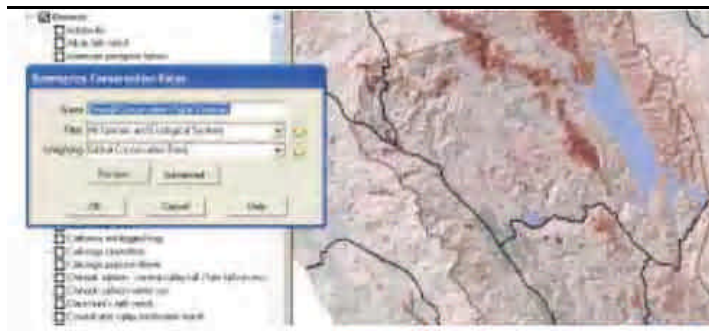


图 88 纳帕流域保护价值计算界面

资料来源：http://www.natureserve.org/prodServices/pdf/DSS_Geospatial_Solutions_1103.pdf

图 89 是 NatureServe Vista 生成的 HTML 格式的分析报告，可以很方便地在网络上发布。报告显示了规划区保护价值的现状空间分布，图中绿色代表保护用地，红色代表非保护用地。

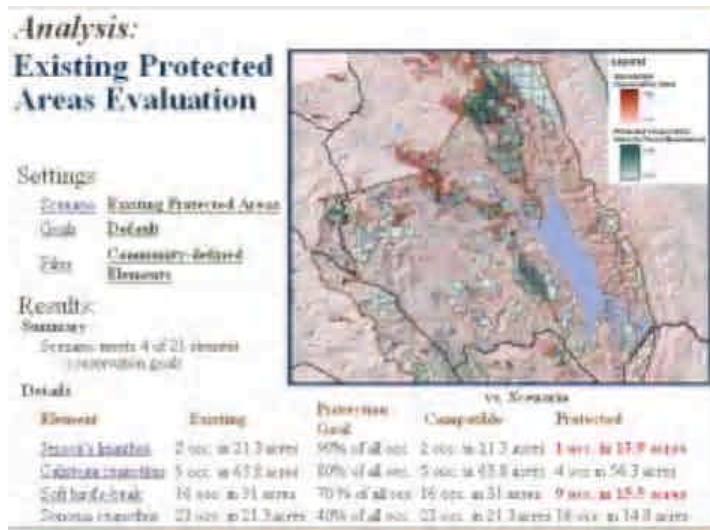


图 89 纳帕流域 NatureServe Vista 分析报告效果图

资料来源：http://www.natureserve.org/prodServices/pdf/DSS_Geospatial_Solutions_1103.pdf

在上面分析的基础上，对每种不同的土地利用方案进行评价，图 90 显示纳帕流域西北部如果采取保护措施，能够实现的预期的保护目标。

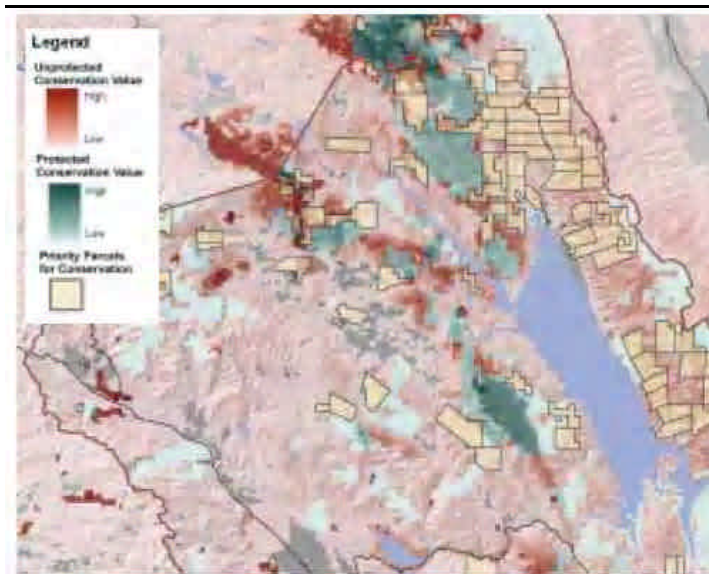


图 90 纳帕流域土地保护规划方案评价结果图

资料来源：http://www.natureserve.org/prodServices/pdf/DSS_Geospatial_Solutions_1103.pdf

二、Potlatch 有限公司森林保护^[55]

Potlatch 公司是美国中南部阿肯色州一个中等规模的木材厂，经营着一个面积较大的松树生产基地，该区域同时有许多稀有物种，包括只在松树林中生活的国家级濒危动物、红顶（red-cockaded）啄木鸟。因此对于个别同时具有很高经济价值和自然保护价值的林木站点，Potlatch 公司需要一种能够有效、快速、准确地评价该区的自然保护价值和林木生产效益的方法，以确定是否进行林木生产或者保护封林。

Potlatch 公司采用 NatureServe Vista 系统，首先确定了保护区内的物种和生态系统，然后假定几种不同的开采方案，分别计算每个林木站点的总的保护价值。在每种方案中又采用不同的方法对每个物种和生态系统赋予不同的权重值，然后根据计算的保护价值对林木站点进行排序，比较每个站点的林木产量和保护价值，确定适合生产林木的站点、应该进行保护封林的站点和需要作更进一步分析规划的站点。

4.7 WEAP

4.7.1 总体介绍

如今，水资源危机已经成为全球面临的威胁，而其开发与管理不善是导致这一危机的重要原因，水资源的分配、水环境的保护和水资源的可持续利用等一系列问题越来越受到人们的广泛关注。水资源评价和规划模型（The Water Evaluation and Planning Model, WEAP）把水资源供给、需求、水质管理、生态保护各方面整合在一起，将有限的水资源在农业、市政和环境等方面进行合理分配，作出规划和政策支持。WEAP 由美国 Stockholm 环境中心提供主要技术支持，美国军事水利工程中心（Hydrologic Engineering Center of the US Army）等也在该系统的改进方面做了许多工作。

[55] http://www.natureserve.org/prodServices/pdf/case_study_potlatch.pdf

WEAP操作界面友好,可以作为一个模块与其他系统进行整合,被人们应用到许多领域中,如水资源规划、地下水仿真模拟、生态需水计算,水污染控制规划等。WEAP自发行以来,已经被应用到美国、墨西哥、德国、巴西、中国、印度等许多国家的水资源评估和规划中,并越来越为人们所接受。

4.7.2 系统界面

WEAP主要包括五个界面:基本操作界面(Schematic)、数据界面(Data)、结果显示界面(Results)、时间序列分析界面(Overviews)、记录界面(Notes)^[56]。

一、基本操作界面

用户可以根据需要将ArcView图像或其他GIS栅格数据文件作为图层添加到系统中,系统界面(图91)包括了一些基于的GIS工具。

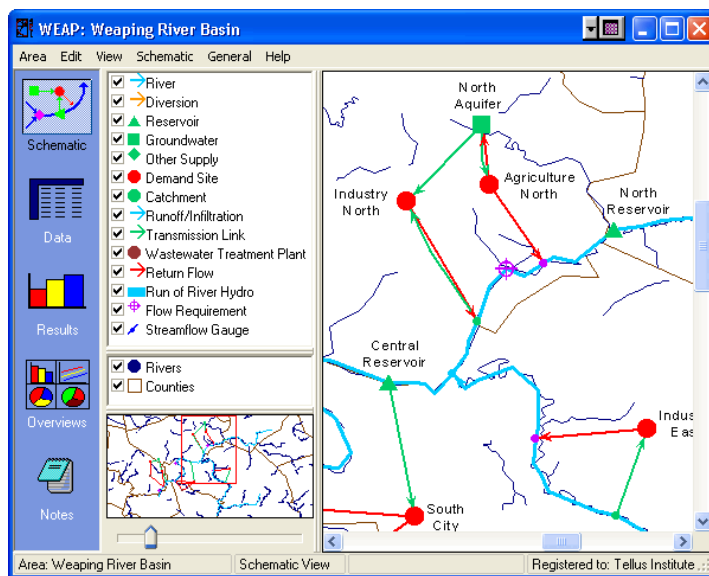


图 91 WEAP 基本操作界面

资料来源: <http://www.weap21.org/index.asp?doc=03>

二、数据界面

数据界面(图92)用于设置变量及它们之间的关系,可以在其中输入数学公式,还能与MS Excel进行动态连接。

[56] <http://www.weap21.org/index.asp?doc=02>

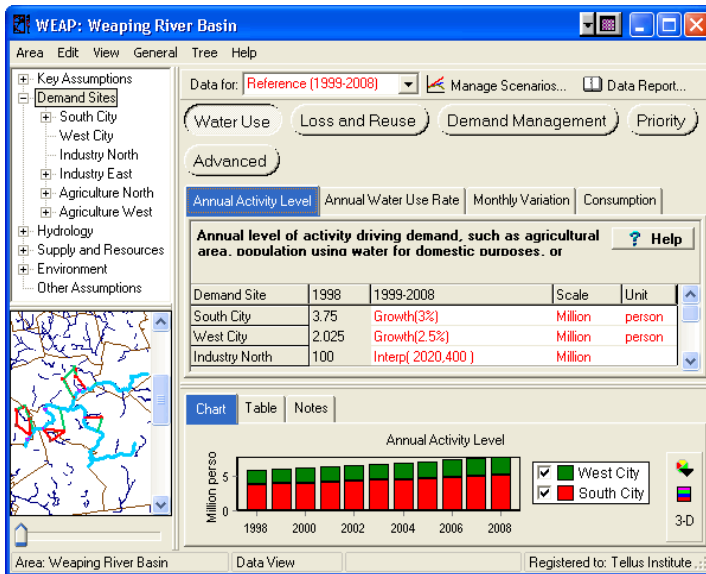


图 92WEAP 数据界面

资料来源：<http://www.weap21.org/index.asp?doc=03>

三、 结果显示界面

结果显示界面（图 93）用于显示系统的输出结果。界面有三个选择栏，“Chart”以图的方式显示输出结果、“Table”以数据表的方式显示输出结果，“Map”以地图的方式显示输出结果。

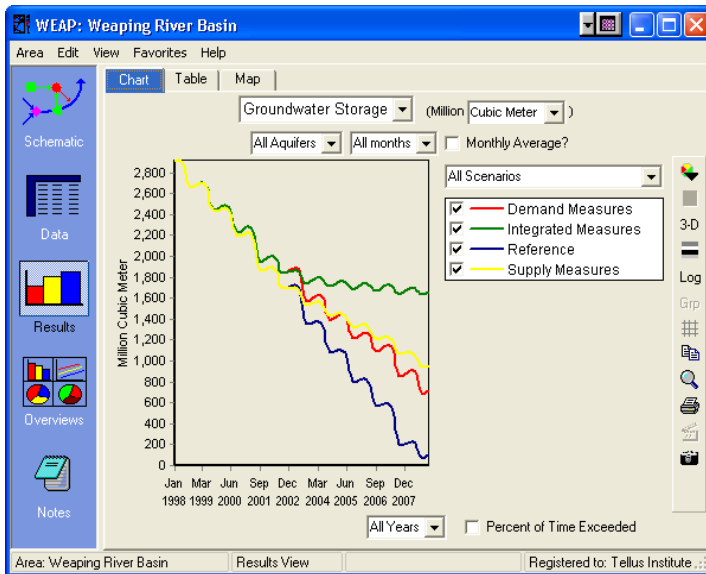


图 93WEAP 结果显示界面

资料来源：<http://www.weap21.org/index.asp?doc=03>

四、 时间序列分析界面

时间序列分析界面（图 94）以图（Chart）和表（Table）的方式突出显示重要的系统指标随时间序列的变化情况。

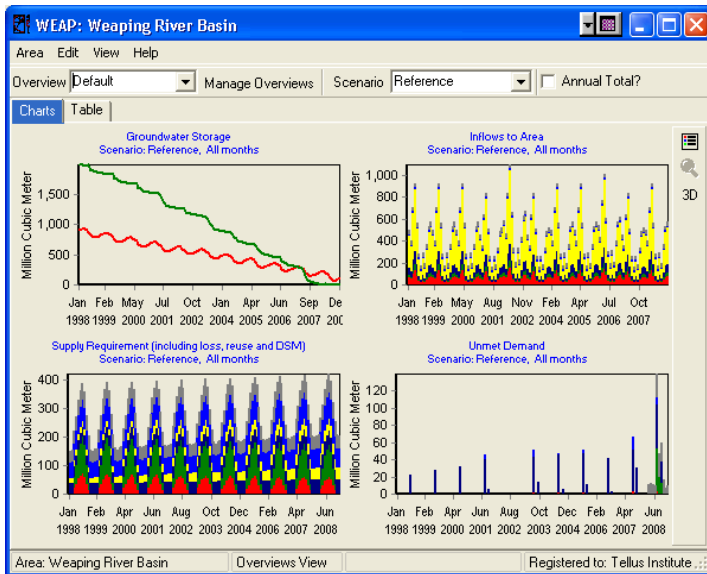


图 94WEAP 时间序列分析界面

资料来源：<http://www.weap21.org/index.asp?doc=03>

五、 记录界面

记录界面（图 95）用于记录系统的原始数据与预测数据值。

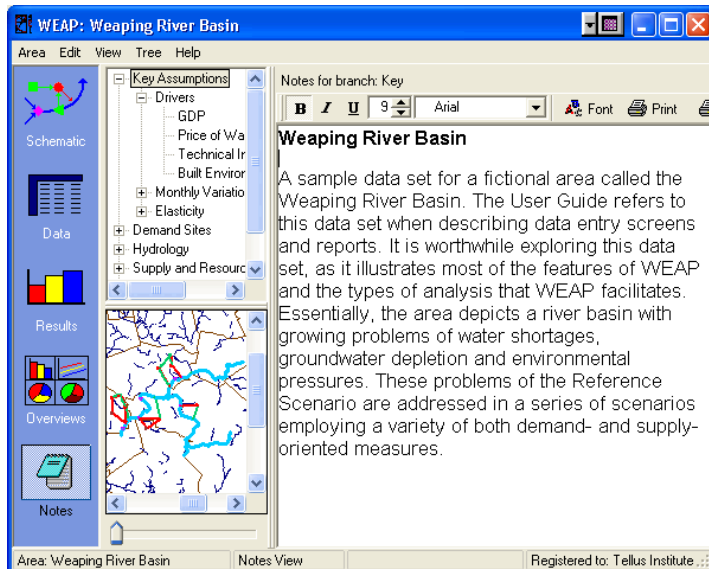


图 95WEAP 记录界面

资料来源：<http://www.weap21.org/index.asp?doc=03>

4.7.3 操作步骤

1. 研究定义（Study definition）。设置期限、空间边界、系统组件、系统配置等。
2. 初步计算（Current accounts）。在实际应用中，这一步骤可以被看作是校正的过程，使用户对水资源需求、污染程度、资源和供给等有一个初步的了解。
3. 假定场景（Scenarios）。构建若干假设场景，如水资源需求、供给、水文、污染等，这些场景能反映未来的政策、成本、气候等方面的情况。

4. 评价 (Evaluation) 从水资源充足程度, 成本和受益, 与环境目标的兼容性, 对突发事件的敏感性等方面来评估步骤 3 中的假设场景。

4.7.4 系统特点^[57]

1. WEAP 整合水资源供给、需求、水质、生态保护各个方面。
2. 明晰的功能结构, 使各种利益主体在开放平台上能够参与评估和规划。
3. 有一个关于水需求和供给的数据库, 用于链接水平衡模块。
4. 模拟假设情景。用水文学和政策的假设情景来模拟水资源需求、供给、渗透、流失、农作物需求情况和水污染情况等。
5. 界面友好, 容易操作, 图形界面一般用下拉菜单等控制, 输出结果用图表等方式表达, 简明易懂。

4.7.5 应用案例

Olifants 盆地是南非的一个人口密度较大、工业较密集的河谷地区。该地区水资源开采比较严重, 各种用水尤其是农业用水需求比较大, 因此该地区的水资源评估和规划工作越来越引起南非有关部门的重视。为能够迅速评价各种水资源配置方案, 南非水务和林业部门采用 WEAP 系统对 Olifants 盆地的水资源进行评估和规划。在评估中选择了 Olifants 盆地的一部分——Steelpoort 盆地作为研究范围。图 96 为该地区的基本情况示意图, 从该图可以看出 Steelpoort 盆地主要河流的分布情况。在研究中把每四个小排水流域分成一组的作为水文单位进行研究, 图 97 为 WEAP 的模拟结果, 反映了普通年份水资源的短缺量。^[58]

[57] <http://www.weap21.org/index.asp?doc=02>

[58] 本案例及图片均来自

<http://www.weap21.org/downloads/Olifants.pdf#search=%22Testing%20water%20demand%20management%20scenarios%20in%20a%20water-stressed%22>

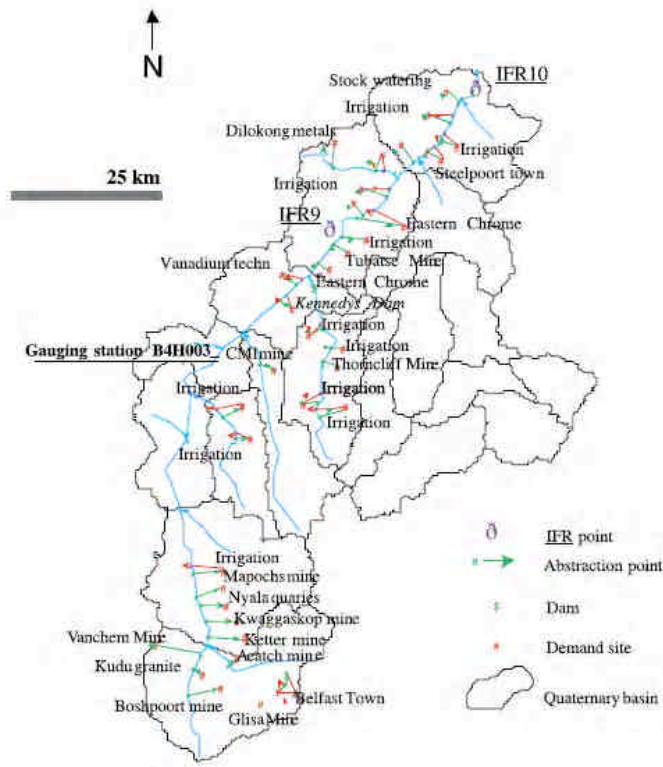


图 96 Steelpoort 盆地基本情况示意图

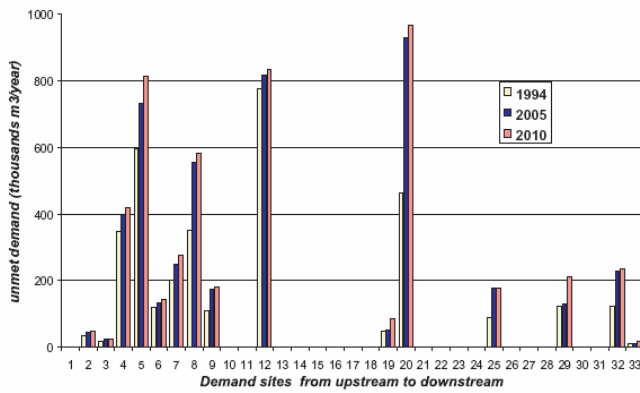


图 97 WEAP 模拟结果示意图

4.8 AEZWIN^[59]

4.8.1 总体介绍

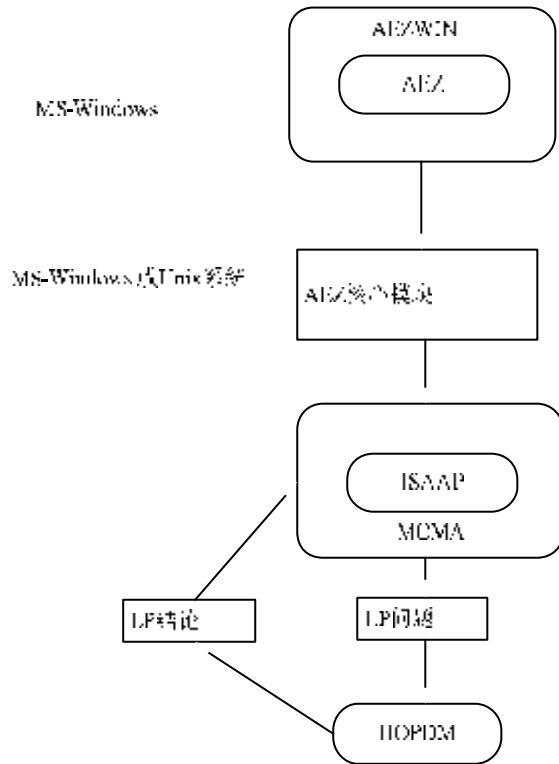
AEZWIN (Agro-ecological zoning for Windows) 是交互式土地资源评价多准则分析工具，是世界粮农组织 (FAO) 与国际应用系统分析研究所 (IIASA) 合作，在对原 AEZ 系统进行

[59] 若无特殊说明，本系统的图片均出自

<http://www.iiasa.ac.at/~marek/ftppub/MM/aez.pdf#search=%22AEZWIN%22>

改进扩展的基础上，于 1994 年推出的一个面向桌面应用的规划支持系统^[60]。AEZWIN 是对国家和地方两级进行农业生态区划分析的一个工具。它能够对土地适宜性和生产率进行评估，提出各种土地使用方案等，是进行农业环境分析、土地利用规划多目标优化的重要支持工具。

AEZ 是对农业生态系统发展潜力进行评估的 MS-DOS 平台的规划支持系统，当人们对不同利用方式进行评估时，应用中涉及到气候、土壤、土地类型、水资源供应、能源、养分和自然植被等多目标的土地资源评价问题，AEZ 的单一目标模块不能很好的反映决策者的参数选择，因此引进了多目标交互式分析模型 MCMA (Interactive multicriteria model analysis)，为使只懂基本电脑知识的人更好的应用该软件，又开发了友好的图形用户界面，将新系统命名为 AEZWIN，可以在 Windows 或者 UNIX 系统下使用。AEZWIN 系统结构图如图 98 所示。其中 ISAAP 表示交互式规范和附加参数选择分析 (Interactive Specifications and Analysis of Adjunction-Based Preferences, ISAAP)；LP 表示线性规划 (linear programming)；HOPDM 为 LP 问题的的一种解决模块。



报告。各种方案的分析与评价标准的选取是一个循环交替的过程，直至得到最优方案。AEZWIN 的具体应用步骤如下：

一、数据准备与管理

首先用户需要从数据库中调出数据，或者从外部导入数据（文本格式），数据准备阶段的不同步骤如图 99 示。AEZ 提供了高中低三种不同级别的数据标准，生成不同的表单；之后从作物适宜性分析菜单（crop suitability）选择研究区域（图 100），在 AEZ 程序中提供 A、B 两个适宜性分析子模块。模块 A 计算每种作物在其生长期内的最佳土地利用类型，模块 B 计算每一种作物在所有的生长期内的累积土地利用类型，一般选择 A 模块做适宜性分析；最后生成区域土地生产力数据库。

用户可以从 GIS 专题图中导入土地利用类型等属性，当所选基础数据的格式标准、作物种类、分析区域以及分析水平有所改变时，以上每一步骤都要相应地重新计算。



图 99 AEZWIN 数据准备阶段系统效果图

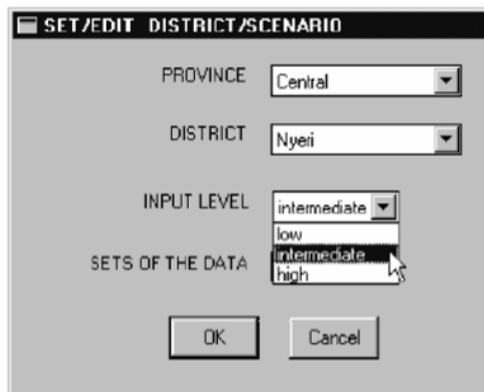


图 100 AEZWIN 设定研究区域和数据集示意图

二、交互式多目标模型分析

AEZ 中的分析菜单提供了单一标准分析模块（SC Optimization）和多标准分析模块（MC Optimization）。在多标准分析模块中首先是生成一个 AEZ 核心模型（AEZ core model），读入区域土地利用现状数据库，根据选择方案计算关系矩阵，由 MC problem Generation 自动生成特定格式的文件；核心模块计算完成以后，即可调用 MCMA 模块进行交互式的多目标分析（MC Model analysis），如图 101 所示。

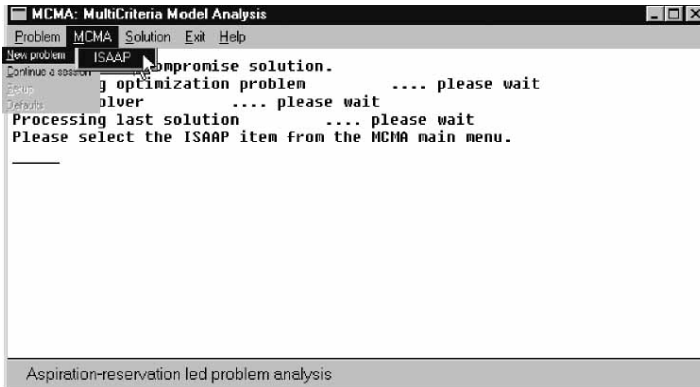


图 101MCMA 模型界面

继续上面的步骤或者选择新问题，打开一个已有AEZ核心模型文件，用户需指定一个定义好的标准文件（AEZ 自带的`aez.cri`文件提供了10个标准方案），用户可以自定义每一项的产出等变量（图 102），然后选择交互式规范和附加参数选择分析（Interactive Specifications and Analysis of Adjunction-Based Preferences, ISAAP），自定义每一目标变量的最优最差标准值，即定义了多目标分析的等级函数，根据指定的标准，ISAAP工具根据帕罗提效应（pareto-efficient），自动生成分析结果图（图 102）。在分析结果中，如果某项变量超过了预期目标，用户可以直接在坐标轴上添加修改点，并重新进行计算，直到达到要求为止。每一次的参数修改都会记录在历史文件中，用户可以打开比较，确定合适的标准。最后生成的结果报告文件，可以打印，输出文本文档，或者将结果数据导入到GIS属性文件中。

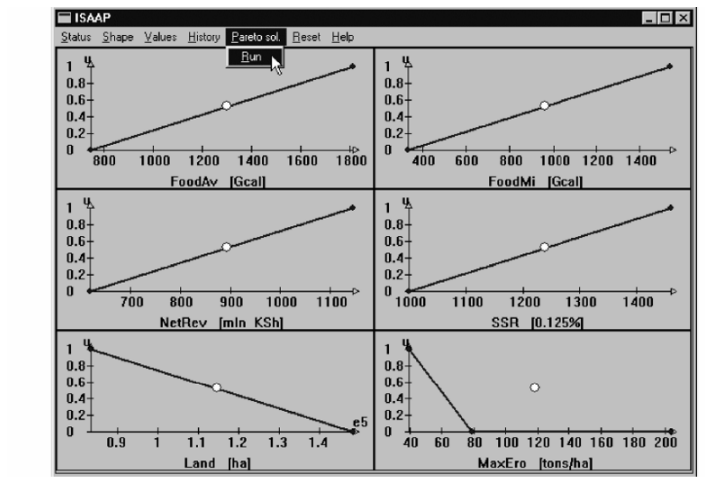


图 102AEZWIN 分析结果图

4.8.3 应用案例^[61]

1994年，联合国粮食与农业组织（Food and Agricultural Organization, FAO）与国际应用系统分析研究所（IIASA）下的土地利用变化部门与风险、模型和政策研究部门合作，以肯尼亚为研究对象，对AEZ改进扩展，推出了基于AEZ的面向桌面应用的Kenya AEZ 软件，即AEZWIN。下面以Kenya研究为例进行简单说明。

Kenya 分 8 个省 41 区，每一个区都有唯一的编码，并根据温度划分不同的温度区，为

[61] <http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/GAEZ/faq.htm>

了研究不同地区的作物产量与环境的协调发展，如控制土壤侵蚀在某个水平下、计算作物产出是否能保证粮食安全等问题，涉及到的数据包括地区名称、作物名称、种类、土壤类型、坡度、温度、生长期、土地类型、牲畜量、日用消费品、人均收入等社会经济指标。下面以 Nyeri 地区为例（图 103）介绍 AEZWIN 的应用。



图 103AEZWIN 区域及方案选择图

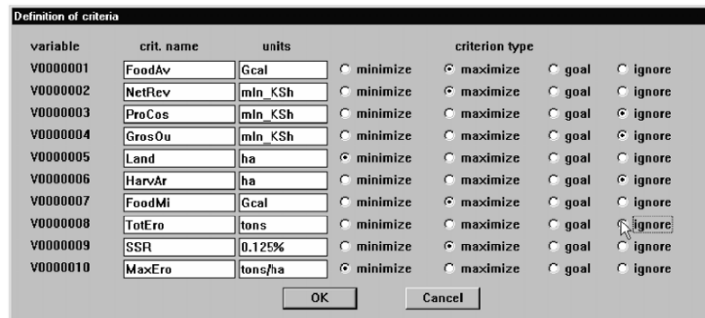


图 104AEZWIN 指标选择示意图

选取粮食平均产量 (FoodAv)、最低产量 (FoodMi)、农作物和牲畜净收入 (NetRev)、土地面积 (Land)、区域粮食自给水平 (SSR)、总土壤侵蚀量 (TolEro)、最大侵蚀量 (MaxEro) 等评价指标进行方案评价，如图 104 所示（每一指标可以选择是否参与计算），采用 pareto-efficient 方法得到最优方案，结果如图 105 所示。

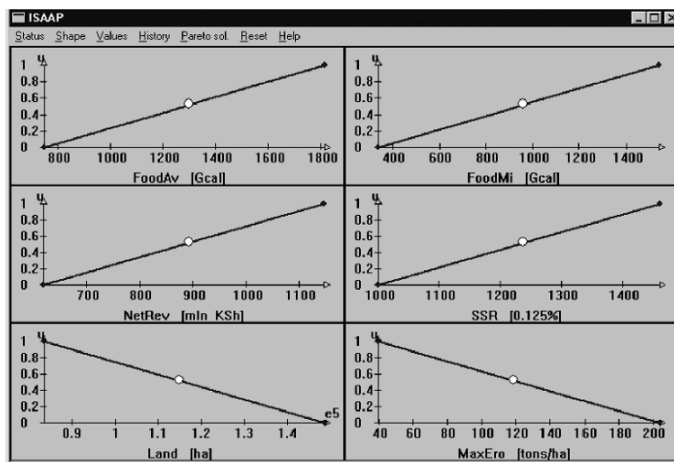


图 105 Kenya Nyeri 地区土地资源评估图

从图 105 可以看出，大约 115000 公顷（如图 105 白圆圈处所示）的生产用地，侵蚀量

为 120 吨/公顷，超出了可接受范围，因此需要重新调整，改变土壤侵蚀量的最高标准，可以直接在坐标轴上添加控制点（图 102），或者可以自己输入修改（图 106）。



图 106 变量期望最低最高值输入界面

一个变量参数的每一次修改，都会引起其他参数的自动调整，产生 pareto-efficient，经过多次修改，得到最终结果，最优方案可以以图的形式（图 107）或者数字表格（图 108）两种形式查看，由两图可以看出土壤侵蚀量最终下调到大约 58 吨/公顷，生产用地增加到 134000 公顷，粮食自给下调到 1198 吨，牲畜作物产出也有相应下调，这种方案基本能满足粮食安全与水土保持的需要。

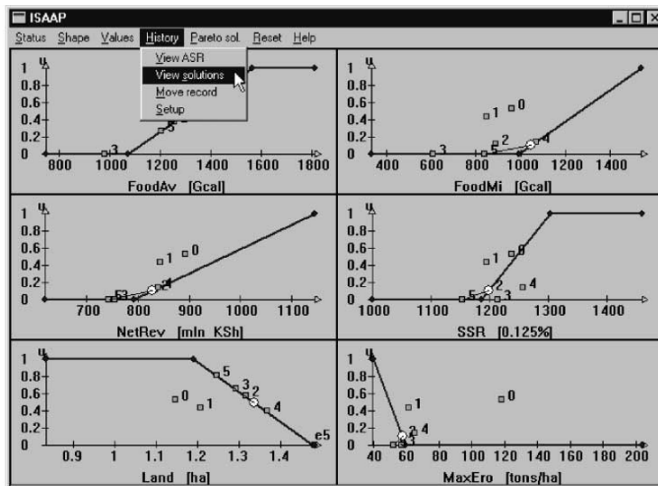


图 107AEZWIN 规划结果示意图

sol. nr.	FoodAv	NetRev	Land	FoodMi	SSR	MaxEro
0	1298.56	892.50	1.15e+05	960.48	1238.15	118.57
1	1200.85	844.22	1.21e+05	850.06	1196.01	61.94
2	1254.95	834.28	1.32e+05	887.23	1201.14	58.38
3	979.01	765.37	1.29e+05	609.84	1214.99	57.37
4	1452.64	840.18	1.37e+05	1067.86	1259.33	65.66
5	1202.59	743.15	1.25e+05	838.33	1154.25	52.47
6	1406.80	827.65	1.34e+05	1046.54	1198.76	58.11

图 108AEZWIN 规划结果一览表

4.9 WadBOS

4.9.1 总体介绍

Wadden Sea 是荷兰北部的一个重要海域，WaddenSea 及其沿岸地区在荷兰既有着重要的经济功能，在自然保护方面也起着很关键的作用。但是长期以来，这片海域由许多不同层次、不同目的和不同功能的机构管理，小至地方性的机构，大至欧盟。行政管理分散的结果是，当人们想要制定一些保护或开发这片海域的决策时，不同的利益主体会提出截然相反的意见，决策往往很难进行下去。基于此种原因，1996 年，CUBWAD 决定开发一个能为 Wadden Sea 地域提供整体决策支持、信息和知识准备的系统^[62]。

WadBOS (Wadden Sea Policy Support System) 是在参考知识系统 (Knowledge Based System, KBS) 专家系统 (Expert System, ES) 和决策支持系统 (Decision Support System, DDS) 理论的基础上开发而成的，它将 Wadden Sea 及其沿岸地区看作一个整体，在适当的空间、时间尺度上整合生态功能以及人类活动的影响，展示并模拟了荷兰 Wadden sea 及其沿岸区域的经济、生态和社会功能。

WadBOS 于 1997 年发行了第一个版本，1999 年发行了第二个版本，2002 年发行了 WadBOS-[ES2]，其主要用户是政府机构的决策人员、环境组织和商业机构等。

4.9.2 系统界面

打开 WadBOS，主页面主要由三个部分构成：Micro-scale 窗体（微观尺度窗体）、Macro-scale 窗体（宏观尺度窗体）、工具栏和菜单栏。

一、Mirco-scale 窗体

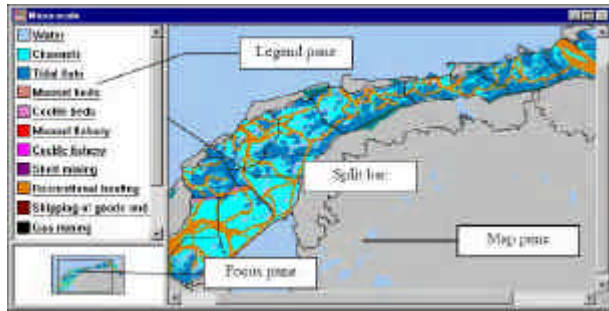


图 109 Micro-scale 窗体

资料来源: <http://www.riks.nl/RiksGeo/projects/wadbos/WadBOS.pdf>

滚动条将 Micro-scale 窗体划分成为三个部分(图 109):地图窗格 用于显示 Wadden Sea 区域的图像、图例窗格 用于显示地图窗格各图层的图例;微略窗格 用于显示小比例的显示窗格中的图像。在地图窗格中可以显示模拟仿真过程中的每一时间段内 Wadden Sea 区域的空间利用情况，点击鼠标左键能够看到模拟的结果(图 110)。

[62] <http://www.riks.nl/RiksGeo/projects/wadbos/WadBOS.pdf>

	Cells	opp. (ha)
Water	441	11025
Channels	0	0
Tidal flats	0	0
Mussel beds	0	0
Cockle beds	0	0
Mussel fishery	0	0
Cockle fishery	0	0
Shell mining	0	0
Recreational boating	0	0
Shipping of goods and people	0	0
Gas mining	0	0
Defence	0	0
Salt marshes	6	150
Land	26124	653100
Total	26571	664275

图 110WadBOS 模拟结果图

资料来源：系统截图

二、Macro-scale 窗体

如图 111，Macro-scale 窗体包括四个视图界面：

1. 视图 1：情景生成 (Scenario)。在该视图界面上能够输入在假设情况下的外界影响。
2. 视图 2：政策选择 (Policy options)。该模型部分反映了政策措施的易影响程度，用户可以在视图界面上选择或更改用于仿真的政策措施。
3. 视图 3：影响分析 (Impacts)。用于计算假设和政策措施选择，需要评价影响效果的情况下的相关信息。
4. 视图 4：系统框图 (System diagram)。反映了模型的综合情况，它一般被用作图形浏览工具来使用。

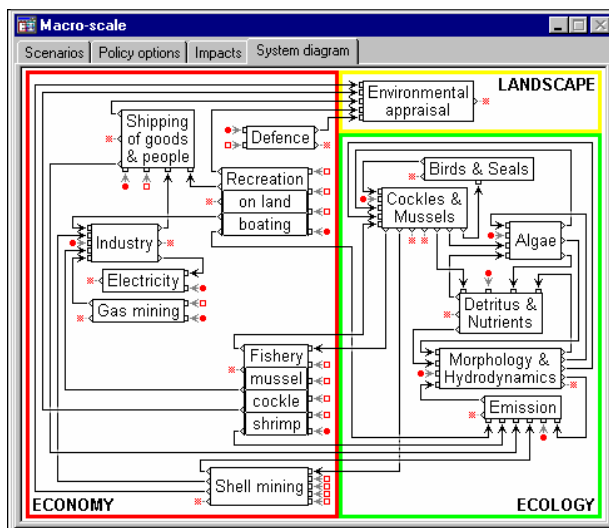


图 111Macro-scale 窗体

资料来源：系统截图

Micro-scale 与 Macro-scale 之间存在着紧密的关系，数据在二者之间能够交换。

三、工具栏和菜单栏

WadBOS 的工具栏（图 112）上的“Step”、“Run”、“Stop”、“Reset”等按钮用来运行系统的模拟功能。

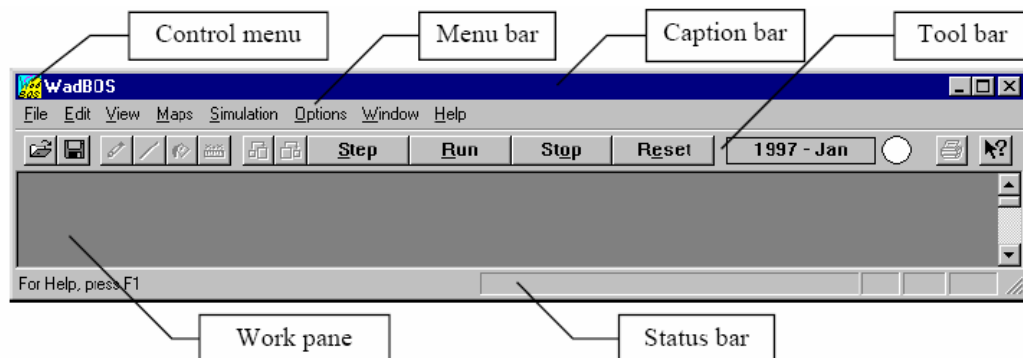


图 112 WadBOS 工具栏和标题栏

资料来源：<http://www.riks.nl/RiksGeo/projects/wadbos/ManualWadBOSInternational.pdf>

4.9.3 功能介绍

一、功能介绍

WadBOS 功能结构如图 113 所示，最上层是用户界面层（User interface），用于系统与用户的交互；其下是工具库（Toolbase）、模型库（Modelbase）和数据库（Database），分别用于储存系统所要用到的分析工具、模型和数据。



图 113 WadBOS 功能结构图

资料来源：<http://www.riks.nl/RiksGeo/projects/wadbos/WadBOS.pdf>

WadBOS 主要具有以下几方面的功能^[63]：

5. 分析功能：分析功能是 WadBOS 的最重要功能之一。它能评价政策的影响作用，为作出决策提供技术支持；
6. 教育功能：不同领域和专业的用户在 WadBOS 里不仅可以学到自己领域的知识，还能学到其他领域的相关知识；
7. 交流平台：将预期的政策所带来的影响可视化，方便政策制定者、各利益主体和公众进行交流和讨论；
8. 储存功能：WadBOS 可以被看做是一个动态的储存库，用来收集、存储信息、连接和管理各种知识。信息在 WadBOS 中以特定格式储存，方便用户之间的共享。

4.9.4 模块设置

模块的基本构造单位是模块构造块（Model Building Blocks, MBB）。MBB 分为不同的等

[63] <http://www.riks.nl/RiksGeo/projects/wadbos/WadBOS.pdf>

级，上一级别的MBB由若干子级MBB所组成。MBB又分为活动的MBB，和不可活动的MBB（不可活动的MBB在图形界面中用灰色框表示）。对活动的MBB，若某个MBB是最低级的MBB（无子级MBB），则点击该模块构造单元能够弹出对话框，通过这些对话框可以输入、修改信息或浏览系统的输出结果，否则，则弹出构成该MBB的子级MBB的信息；对于不可活动的MBB，其功能主要是增加界面的可读性。

在 WadBOS 中，MBB 的选择具有以下几个特点：

1. 各个模块包括了社会、经济、生态、生物学、自然科学和化学物质处理等各方面的内容。
2. 从三种空间尺度来整合各个子模块（如图 114）：
3. Wadden sea 整体尺度。
4. Wadden sea 的 12 个组成部分。
5. Wadden sea 的每个单元：将 Wadden sea 共分为 11,000 个单元，每个 25ha。
6. 从三个时间步骤上来运行模型：潮汐周期；月周期；年周期。

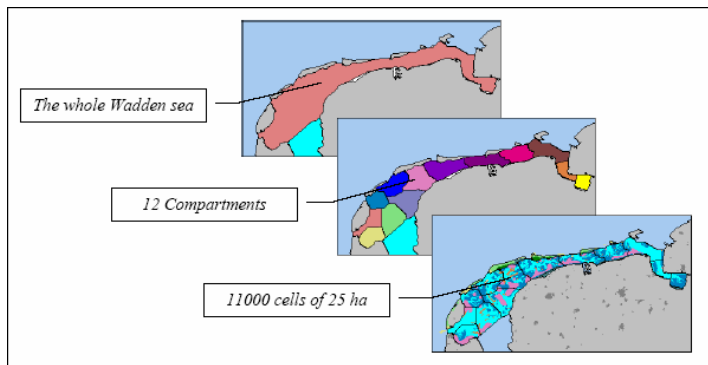


图 114WadBOS 模型空间尺度示意图

资料来源：<http://www.riks.nl/RiksGeo/projects/wadbos/WadBOS.pdf>

系统的最高层模块为用户界面层，包括三个子模块：经济子模块（Economic submodel）、生态子模块（Ecological submodel）、景观子模块（Landscape submodel），如图 111 所示，方框表示模块，箭头表示模块间数据的传递方向，各子模块之间存在很紧密的关联。当用户点击方框时，界面会显示出该模块的下一层子模块的情况。各子模块的具体组成模块或模块块如下所示^[64]：

1. 经济子模块（Economic submodel）。该类型的模块都与经济活动有一定的关系，其次级子模块有：
 - 娱乐（Recreation），包括岸边娱乐活动和游船等
 - 渔业（Fishing）
 - 采贝业（Shell mining）
2. 工业（Industry）
 - 油气田开采业（Gas mining）
3. 防护设施（Defence）
4. 生态子模块（Ecological submodel）。该子模块可以用于计量 Wadden Sea 区域的 12 个组成部分的：
 - 腐质、营养物质（氮、磷、硅等）的浓度（Detritus&Nutrients）。
 - 藻类、海扇类、贻贝、蚌类等的数量（Algae,Cockles&Mussels）
 - 铜、油、目标方位发送器等的分布情况（Emissions）。

[64] <http://www.riks.nl/RiksGeo/projects/wadbos/ManualWadBOSInternational.pdf>

5. 景观子模块 (Landscape submodel)。人类经济活动对海洋的原生景观会产生影响，景观子模块能计算出各“区域片”的景观类型，将其分为“近乎自然 (Nearly natural)”到“完全人造 (Entirely human)。”

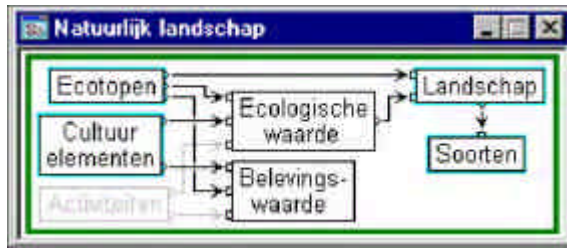


图 115 Landscape 子模块界面

4.9.5 小结

WadBOS 的前两个版本的开发耗时 20 个月，花费大约 400000€，这还不包括其他免费为软件开发提供帮助的科学家、相关领域专家的工作时间以及其他相关费用。WADBOS 目的就在于“收集、规范、连接关于 Wadden sea 地区的信息知识，为该地区的决策提供便利”。伴随知识探索的永无止境，WADBOS 模型的开发和完善工作也会继续下去。

4.10 RAMCO

RAMCO (Rapid Assessment Module for Coastal Zone Management) 是荷兰海岸管理中心 (Coastal Zone Management Centre, CZMC)、荷兰热带发展研究基金会 (Netherlands Foundation for the Advancement of Tropical Research, WOTRO) 与 RIKS 公司合作开发的关于海岸区域管理问题的总体评估总体决策支持环境平台。

RAMCO 是从物理、环境、经济、社会等方面动态研究海岸区域的整合系统，具有以下显著的特点：

1. 各个整合系统之间相互相互影响和干预；
2. 在空间系统上的相互影响；
3. 各系统之间都是动态平衡的；
4. 对不确定选择项能做出最优选择。

RAMCO 的模块设置和界面与 WADBOS 相似，因此在章节中不作详细介绍，其界面如图 116 所示：

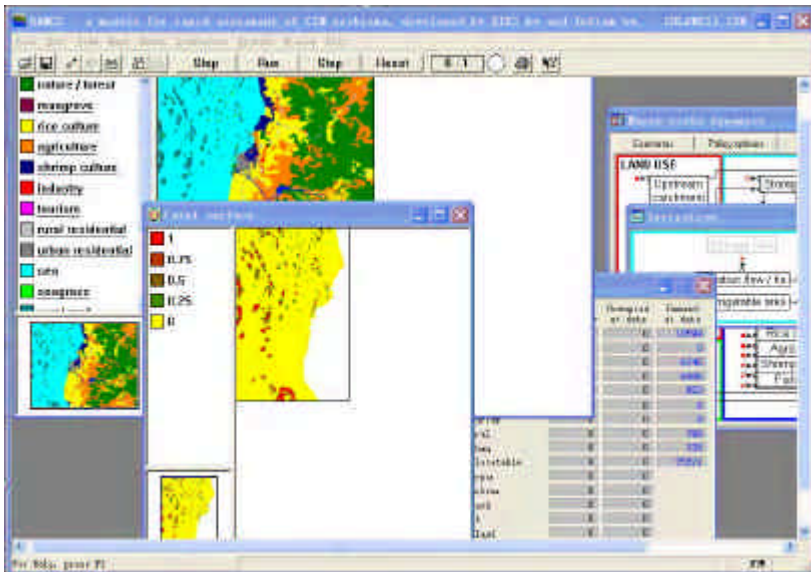


图 116 RAMCO 界面图示

资料来源：系统截图

4.11 Expert Choice

4.11.1 总体介绍

Expert Choice 公司成立于 1983 年，其主要产品 Expert Choice 是以层次分析理论（Analytical Hierarchy Process，AHP）为基础的协作式决策支持分析工具，它采用 AHP 方法的决策过程，可以帮助决策者更有效、更科学和更有依据地获得决策参考意见，至今已有 20 多年成功经验。

AHP 是一种功能强大且灵活的用于多目标决策的方法，目前在多个领域都受到重视，是应用较为广泛的决策理论之一。它是由美国宾夕法尼亚大学的 T.L.Saaty 于 20 世纪 70 年代提出的，它能够模拟人们的真实想法，在进行决策评估时，帮助人们将解决问题的考虑因素按重要程度架构成树状的阶层式逻辑结构，借助一对一的排序和比较，减少复杂的决策过程，并综合所有的分析结果，给人们提供较为合理的参考答案。

Expert Choice 是国际领先的协作决策软件和决策服务支持工具。Expert Choice 构建模型的方式浅显易懂，非专业的决策人员通过简单学习后就能掌握软件的使用；Expert Choice 还具有与 Access 或 SQL Server database 数据整合的功能，该软件功能中的“Data Conversion”使用户能够将数据库中的大量的数据转换成适合 Expert Choice 决策分析用的优先级数据；Expert Choice 还能自动产生界面美观大方、专业的枢纽图表以及专业报告等。

Expert Choice 的应用领域很广，主要有^[65]：资源分配与选择、人力资源管理、雇员表现评估、薪资决策、制定市场策略、决策分析、预测支出、分析规划、促进团体决策、费用效益分析、工程设计评估、生产作业管理、策略分析及评估、评估获益和合并、供货商评估、信用分析、顾客反应、IT 投资管理、产品定价、创新管理等。

[65] <http://www.scige.com/ReadNews.asp?NewsID=89&BigClassID=20&SmallClassID=28>

4.11.2 应用步骤

下面以一个“选择度假地点”的例子来说明 Expert Choice 的主要应用步骤：

1. 建立目标层，设定目标比较因素（Objectives）并定义各因素权重。

设定目标层（Goal）为“To choose the best vacation spot”（图 117），比较因素为在选择方案时所需要考虑的因素，在本例中选择四个评价指标为“Activities”、“Art and culture”、“Sights”、“Low Cost”，并设定各指标权重分别为 0.484、0.081、0.306、0.128。

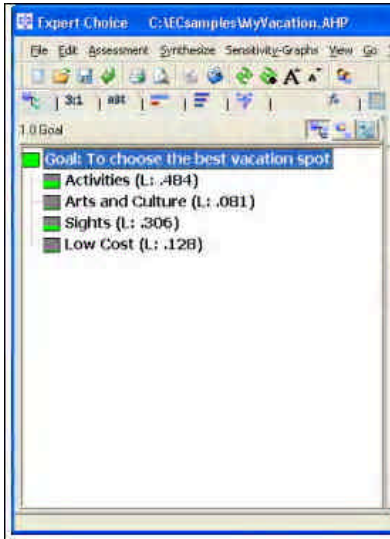


图 117 Expert Choice 目标层

资料来源：Expert Choice 帮助文档

2. 建立方案（Alternative）层，并进行综合分析。

在方案层中建立三个方案：“Orlando”、“San Francisco”、“New York”，并在评价表格中对各方案的各评价指标进行赋值，最后在综合分析窗口中即可以得到各方案的分析结果，如图 118 所示，“Orlando”的综合值为 0.407，“San Francisco”为 0.225，“New York”为 0.369。

“Orlando”的综合值最高，说明在因素权重为先前设定值的情况下，“Orlando”作为度假地点的可选择性最强。

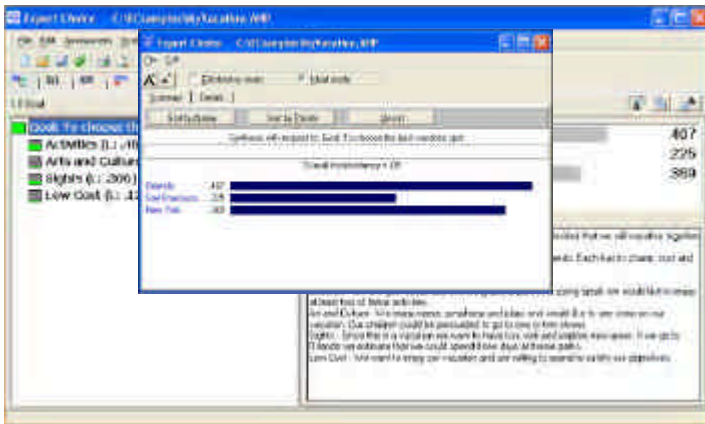


图 118 方案层的建立及其综合分析示意图

资料来源：Expert Choice 帮助文档

3. 敏感性分析。

打开敏感性分析窗口 (Sensitivity-Graphs), 进行敏感性分析。用户可以通过拖放鼠标来改变图标的长度, 分析在评价指标权重改变的情况下方案优先度的改变情况, Expert Choice 的敏感性分析有以下四种类型 (图 119):

(1) Performance 敏感性分析。这种类型的分析图突出了方案之间的排序关系和某个方案的优先程度。

(2) Dynamic 敏感性分析。这种类型的分析图一般用于观察某一因素权重改变的情况下方案的排序情况和优先度的变化。

(3) Gradient 敏感性分析。该类分析图着眼于特定的评价指标改变下的方案优先情况。

(4) Head-to-head 敏感性分析。突出方案两两之间的比较。



图 119 四种类型的敏感性分析图 (从左到右、从上到下依次为 Performance、Dynamic、Gradient、Head-to-head)

资料来源: Expert Choice 帮助文档

4.11.3 应用案例

Expert Choice自发行以来,就与AHP理念一起被人们所接受并受到欢迎。1995年,Expert Choice被应用于全球57个国家的各行各业。

FORD汽车公司利用Expert Choice评估客户对汽车设计的满意程度,选择下一代汽车的设计方案,增加了决策的效率;Expert Choice还在美国军方的历年计划和财政预算、以及战略计划的优先性选择中起到作用^[66];2004年1月8日,KMCI(国际知识管理联盟)宣布它已经与Expert Choice公司形成了战略联盟,它想运用Expert Choice的工具,综合它的“新知识管理”概念框架的关键因素,这样用Expert Choice建构的知识管理特定模板就能为K-STREAM技术手册的用户所使用^[67]。

在国内,Expert Choice也有应用,韩洁平,王欣等(2003)依据美国评价电子商务网

[66] <http://www.expertchoice.com/customers/successstories.htm>

[67] <http://www.chinakm.com/share/list.asp?id=2806>

站的权威标准,对联想、海尔、戴尔三家企业的商务网站进行了调查分析,形成Expert Choice的调查报告,具有指导和现实意义^[282];滕玮峰(2004)运用层次分析法和Expert Choice软件,探究了中国大陆旅游者对不同旅游安全因素的相对重要性的认识^[283]。

4.12 DEFINITE

4.12.1 总体介绍

DEFINITE (Decisions on a finite set of alternatives,有限方案决策)是荷兰阿姆斯特丹大学环境研究中心受荷兰财政部委托开发的基于有限选择方案的商业化决策支持软件包。1994年首次发行了DEFINITE的MSDOS版本,2001年又在MSDOS版多年用户使用反馈的基础上,发行了更为成熟的Windows版,实现了标准的Windows图形界面,并应用了Windows微通道结构(Micro Channel Architecture, MCA)技术。新版本的DEFINITE具有界面简洁、操作简单的特点,能快速为广大的非专业人员所掌握。

DEFINITE的用户主要包括:政府机构、顾问公司和工业公司、大学和科研机构以及个人等,DEFINITE的应用领域非常广泛,能用于许多城市规划问题的决策分析,如选择交通路线,选择工作地点,选择建筑的适合建设地点等。用户对所需要解决的问题列出不同的方案,DEFINITE对这些选择方案按照一定的标准进行评估,给出合理的参考意见,为决策支持提供技术支持。

4.12.2 系统界面与操作步骤^[68]

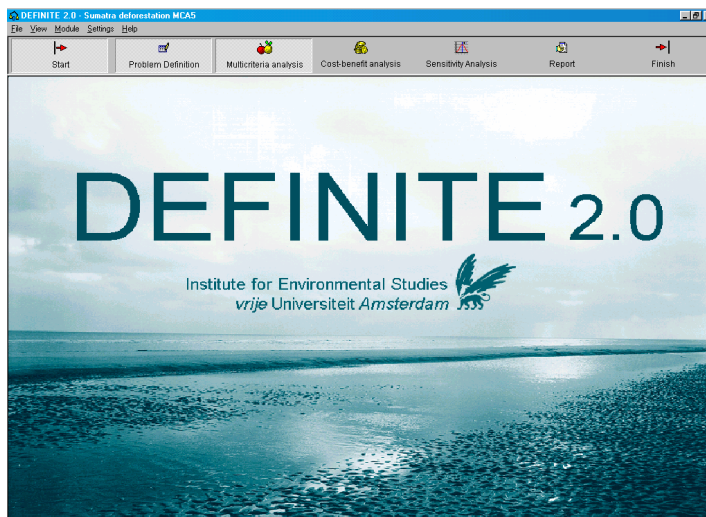


图 120 DEFINITE 初始用户界面

资料来源:系统截图

图 120为DEFINITE的初始用户界面,可以看出,DEFINITE具有标准的windows界面,

[68]

http://www.ivm.falw.vu.nl/Research_projects/index.cfm/home_subsection.cfm/subsectionid/3BFB0875-92E9-478E-B3AC260D7F75AF05

界面任务栏上的7个按钮表示应用DEFINITE的7个主要步骤：

1. 开始 (Start) ；
2. 问题定义 (Problem definition) ；
3. 多指标分析 (Multicriteria analysis , MCA) ；
4. 费用效益分析 (Cost-benefit analysis , CBA) ；
5. 敏感性分析 (Sensitivity analysis)。包括对多指标分析结果的敏感性分析 (Sensitivity analysis for results of multicriteria analysis) 和对费用效益分析结果的敏感性分析 (Sensitivity analysis for results of cost-benefit analysis) ；
6. 生成报告 (Report) ；
7. 结束 (Finish) 。

在上述7个步骤中，1、2、6、7是必须的，用户可以根据需要选择步骤3、4以及5，具体的操作步骤将在下面的案例分析中说明。

4.12.3 应用案例

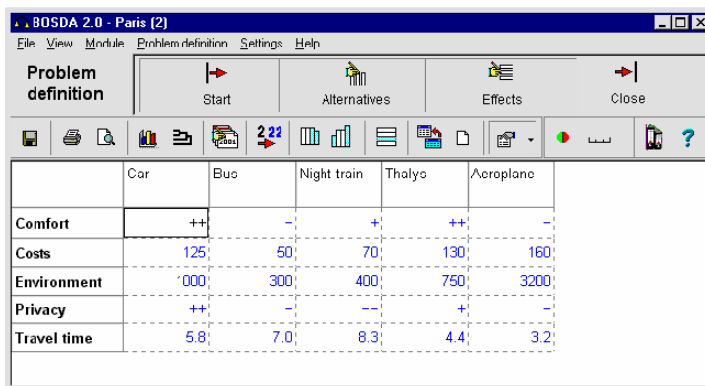
一、A journey to Paris^[69]

下面以“A journey to Paris”的例子来说明DEFINITE的主要操作步骤：

具体的问题是：一对荷兰阿姆斯特丹的夫妇要去巴黎旅行，为他们选择适合的交通方式。可供选择的方案有：“Car(小汽车)”、“Bus(长途巴士)”、“Night train(夜间火车)”、“Thalys(高速列车)”、“Aeroplane(飞机)”。

为交通方式的选择设置了五个评价指标：舒适度(Comfort)、费用(Costs)、环境(Environment)、私密性(Privacy)、时间(Travel time)。采用DEFINITE进行交通方式评价的具体过程如下：

1. 开始 (Start)。用户可以打开或新建一个DEFINITE文档。
2. 问题定义 (Problem definition)。选择方案的界面如下图 121所示，界面中包括一个评价指标表 (effect table)，用户可以在评价指标表中定义可选择方案的影响值 (effect score)，各影响值的衡量方式可以不同，比如，“Comfort”、“Privacy”用--，-，+，++四个等级来衡量，“Costs”的单位为欧元，用户也可以切换到图表界面查看指标表。



	Car	Bus	Night train	Thalys	Aeroplane
Comfort	++	-	+	++	-
Costs	125	50	70	130	160
Environment	000	300	400	750	3200
Privacy	++	-	--	+	-
Travel time	5.8	7.0	8.3	4.4	3.2

图 121DEFINITE 问题定义 (Problem definition) 示意图

[69] 本案例资料和图片来源：

http://www.ivm.falw.vu.nl/Research_projects/index.cfm/home_subsection.cfm/subsectionid/3BFB0875-92E9-478E-B3AC260D7F75AF05

3. 多指标分析 (Multicriteria analysis, MCA)。

图 123为多指标分析的界面。用户需要对各方案进行等级分析,分为三个子步骤:标准化 (Standardize)、设置权重 (Weighted) 和排序 (Ranks)。

(1) 标准化 (Standardize)

首先,需要对方案的评价指标进行标准化 (standardize),如图 122所示,在对“comfort”影响值的标准化中,将等级“-”标准化后值为0,“++”为1,“-”为0.25,“+”为0.75,其他指标的标准化方式类似。用户也可以根据需求设置标准化的方法。各方案的评价指标标准化后的数值以图形的方式表示在界面上。

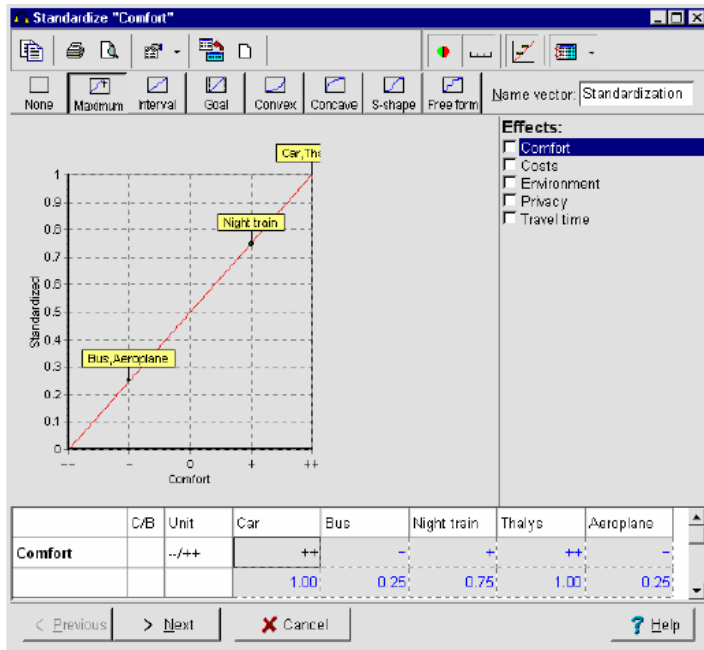


图 122 对“comfort”影响值的标准化界面

(2) 设置权重 (Weighted)

对各个评价指标设置权重 (Weighted),进行优先方案分析。这一步骤的操作比较复杂,DEFINITE提供了若干方法支持用户设置指标权重,如成对比较法 (Pairwise comparison) 等。

(3) 排序 (Ranks)

在上一步骤的基础上,计算各方案的总分值并对方案进行排序。DEFINITE提供了四种计算方法:加权求和法 (Weighted Summation)、Electre 2方法、Regime方法和Evamix方法。在本案例中,使用加权求和方法对各方案进行分值计算,图 124中给出了方案“Car”的总分值最高为0.79,优先程度最高,而“Aeroplane”的总分值最低,仅在“Travel time”影响标准中得分略高,其他评价指标的得分都是最低的。当然,用户对影响标准权重和分值的设置不同,得出的方案优先次序也不同,下一步将对多指标分析的结果进行“敏感性分析”,来反映这一变化。

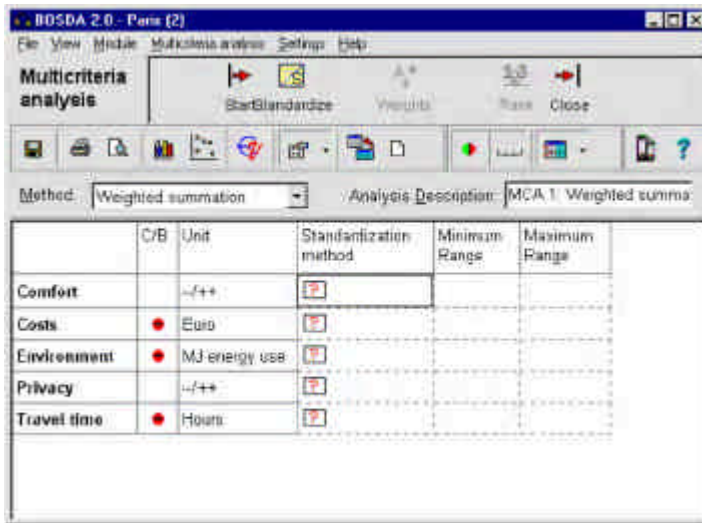


图 123DEFINITE 多指标评价界面

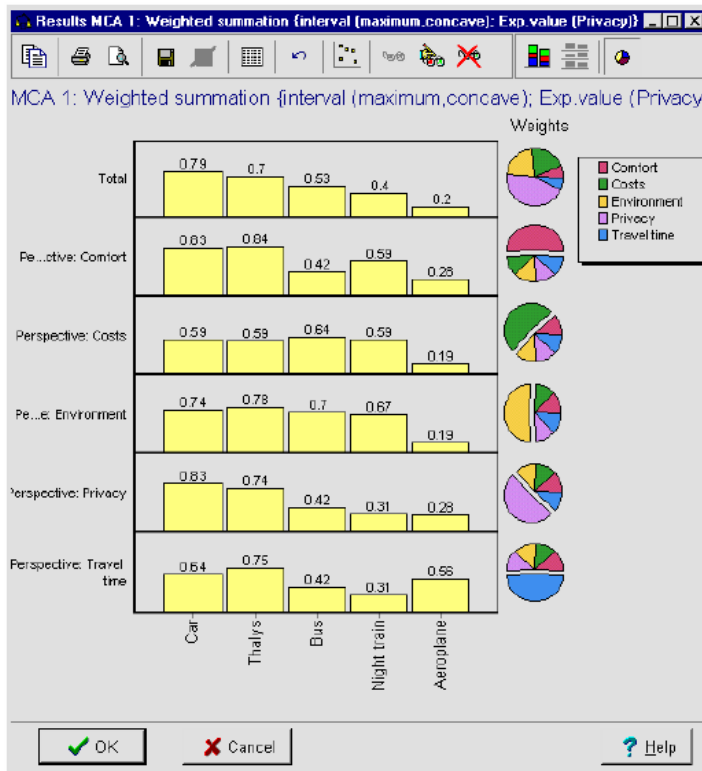


图 124DEFINITE 各方案加权值总和图

4. 敏感性分析 (Sensitivity analysis)

敏感性分析用于分析在评价指标的权重和分值改变的条件下方案优先次序的变化情况，敏感性分析主要分为三个步骤：

(1) 比较 (Compare)。比较在上一步骤中所生成的结果。如在下图 125中，横坐标表示，在上一步骤中关注不同评价指标所获得的各个多指标分析的结果，1为“Total”指标分析结果、2-6分别表示分别从“Perspective：Comfort”、“Perspective：Costs”、“Perspective：Environment”、“Perspective：Privacy”、“Perspective：travel time”来考虑方案优先)，纵坐标表示方案的优先序，不同颜色的曲线表示不同的交通方式，我们可以看出，在任一结果中，

“ Car ”的等级都要高于“ Night train ”和“ Aeroplane ”,而除了“Perspective :Comfort”, “ Bus ”都要优于“ Night train ”。

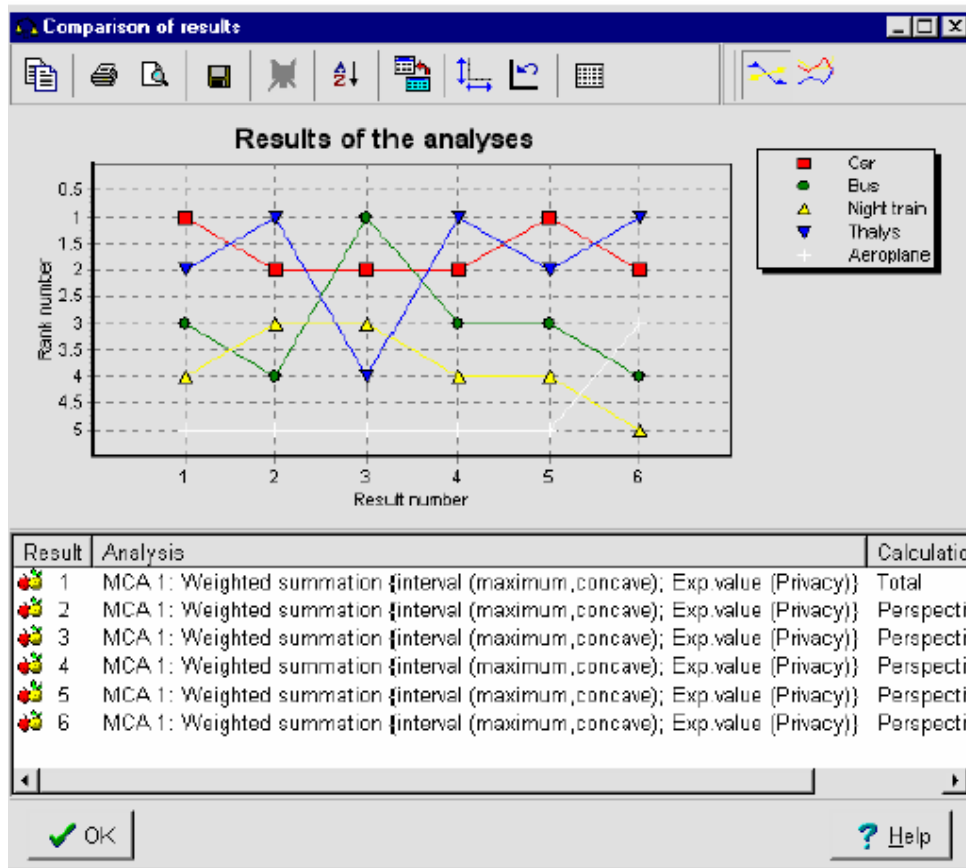


图 125 敏感性分析：比较多指标分析的结果

(2)不确定性分析(Uncertainties)。确定不确定性最终生成概率表(probability table)。概率表反映了某方案排序第一的概率。如图 126所示,圆圈的越大,表示选择方案排序第一的概率性越高,在该案例中,“ Car ”的概率是最高的。

(3)敏感性分析(Sensitivity)。改变分值或权重,观察方案排序的敏感性变化。图 127,反映了在“ Travel time ”改变情况下,选择方案的优先顺序变化情况。

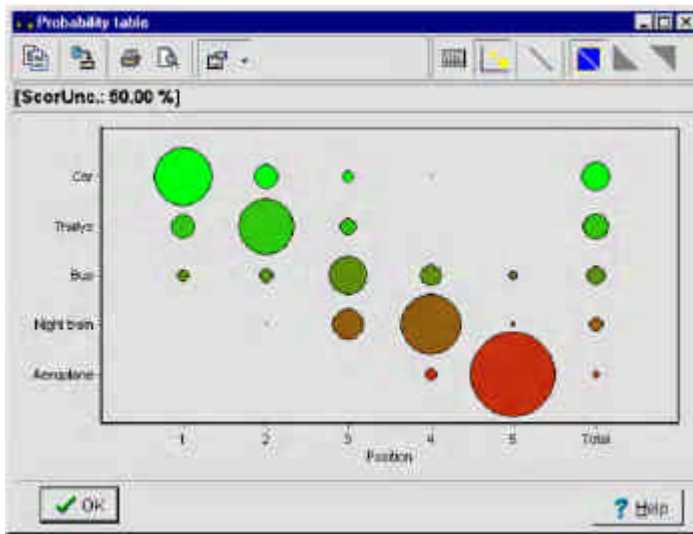


图 126 敏感性分析：概率表

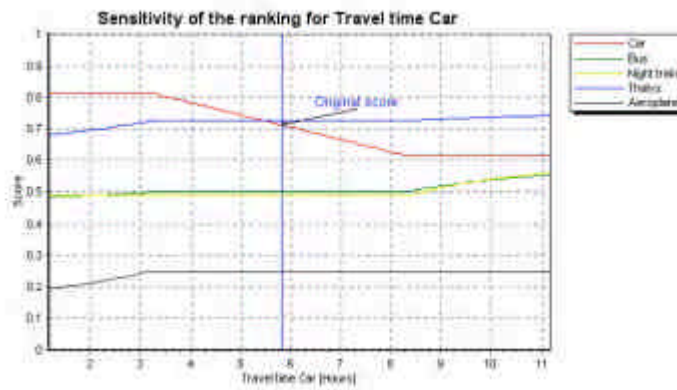


图 127 敏感性分析：“Car”选择方案在“Travel time”改变情况下的敏感性分析

5. 生成报告 (Report)

利用DEFINITE合并上述各步骤中所保存的结果，并生成最终的评价报告。DEFINITE 提供了与MS OFFICE兼容的报告格式，如TEXT和Microsoft Word，用户也可以根据自身需要选择报告中包含的内容，使用起来特别方便。图 128为“ A journey to Paris ”的最终Microsoft Word格式报告文档。

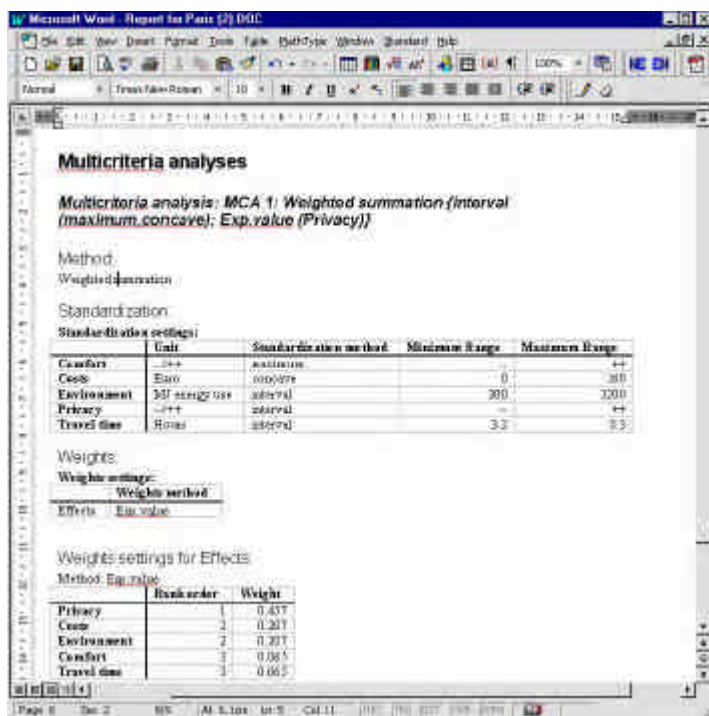


图 128DEFINITE 案例最终报告

6 . 结束 (Finish)

保存及关闭DEFINITE文档。

经过上一案例的介绍,我们已经对DEFINITE的操作步骤有了大概的了解,在具体的应用中,用户也可以选择“费用效益分析”以及对其结果的敏感性分析,操作步骤大致相同,不再累述。

二、多伦多市 (Toronto) 四个地区的中国人生活质量评估^[70]

Bryan H. Massam (2002) 应用DEFINITE对多伦多市 (Toronto) 四个地区的中国人生活质量进行试验研究。在实验中,选择的四个地区分别以Central、Eastern、Inner、Outer 标示,选择的样本数为80 (每个区域20个中国人),年龄范围为 > 65, Bryan H. Massam对“生活质量 (quality of life, QOL)”这个目标设置了14个评估影响标准 (如表 23),在估算中,作者分别应用了四种不同的多归技术:加权和方法、Electre 2方法、Regime方法、Evamix 方法,对四个地区的中国人生活质量进行排序,并生成了一系列的报告,如图 129 为用Electre 2方法生成的比较MAC分析结果,在分析结果中可以看出Outer地区的中国人生活质量要优于其他地区。

表 23QOL 标准设置情况表

1.	收入 (Income)
2.	个人健康情况 (Person health status)
3.	英语能力 (English language capacity)
4.	教育水平 (Education level)
5.	子女 (Children)

[70] 本案例资料及图片来源:

http://www.geodec.org/Massam_Wang.pdf#search=%22An%20Application%20of%20DEFINITE%3A%20the%20Quality%20of%20Life%20of%20Chinese%22

6.	配偶 (Spouse)
7.	朋友关系 (Friendship)
8.	风土人情 (Climate)
9.	硬件设施条件 (Quality of the physical environment)
10.	安全, 当地犯罪率 (Safety , local crime rate)
11.	公共交通 (Public transportation)
12.	公共医疗服务 (Health care service)
13.	社区服务 (Community service)
14.	政府对年长者的政策 (Government policy to seniors)

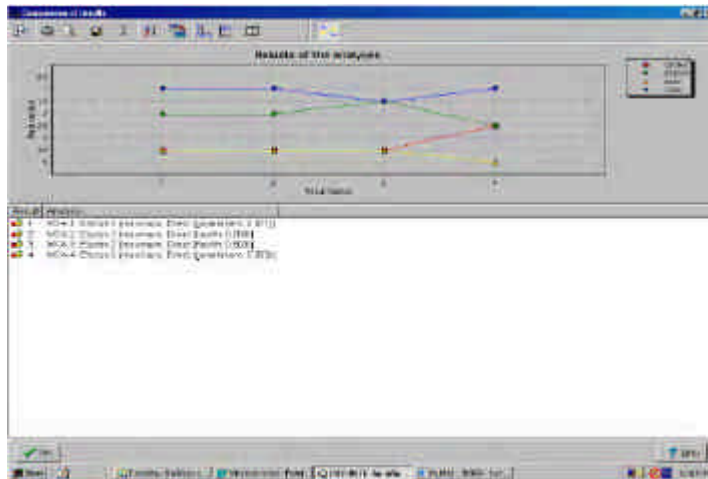


图 129 用 Electre 2 方法的比较 MAC 分析结果

三、Hondsbosche 海堤的成本受益分析^[71]

Hondsbosche海堤是荷兰北部阻挡海洋灾害的重要关卡,对这个海堤,荷兰水资源和运输部门的主要思想是,预警50-100年的洪灾情况,保持洪水危害区域的安全。对于防波海堤的建设,有三种选择方案:稜堡型工事围堤 (Bastion)、沙丘型围堤 (Dunes)、潮汐水道 (Tidal gully) (如图 130所示)。

1. 若选择“稜堡型工事围堤”方案,现行的关于海堤的政策都可以继续使用,而且它也符合动态海岸管理的法则;
2. 若选择“沙丘型围堤”,主要是考虑海岸附近的休闲娱乐设施等收益;
3. 若选择“潮汐水道”方案,则主要是关注自然的自我修复和适应性。

因此,有关部门应用DEFINITE来分析三种方案的成本受益情况,在具体应用中,成本 (cost) 包括投资和操作上的费用,受益 (benefit) 则包括农业、休闲、渔业、生物多样性、淡水存储和循环、固定资产、海岸附近居民的安全感以及对自然灾害的防御能力等许多方面。影响标准 (effect) 的时间尺度是2000-2050年。

[71] 本案例资料及图片来源:

http://www.ivm.falw.vu.nl/Research_projects/index.cfm/home_subsection.cfm/subsectionid/3BFB0875-92E9-478-E-B3AC260D7F75AF05



图 130 Hondsbossche 海堤的三种建设方案示意图

Scenario: Dunes		Scenario: Tidal gully	
Costs (1000 €)	Benefits (1000 €)	Costs (1000 €)	Benefits (1000 €)
Basic... 117431.90	Agricult... 18257.27	Basic... 244502.75	Agricult... 0.00
Invest... 8181.70	Security... 609.27	Invest... 4096.49	Security... 4701.09
	Diversity... 11311.08		Diversity... 0.00
	Freshwat... 4420.99		Freshwat... 11400.19
	Fishing... 662.04		Fishing... 0.00
	Percepti... 114019.90		Percepti... 118796.09
	Wildlife... 0.00		Wildlife... 11401.19
	Wildlife... 24771.99		Wildlife... 11877.09
Total: 125644.79	Total: 216430.19	Total: 248605.21	Total: 246206.41

图 131 “沙丘型围堤 (Dunes)” 和 “潮汐水道 (Tidal gully)” 的成本收益表

图 131 是方案 “沙丘型围堤 (Dunes)” 和 “潮汐水道 (Tidal gully)” 的成本受益表。由图我们可知, “沙丘型围堤” 方案在受益 “农业 (agriculture)”、“安全感 (perception of safety)”、“淡水存储 (fresh water storage)” 方面要优于 “潮汐水道 (Tidal gully)” 方案; 而 “潮汐水道 (Tidal gully)” 方案则在成本 “基本投资 (basic investment)”、受益 “渔业 (basic investment)”、“生物多样性 (biodiversity)” 等方面要优于 “沙丘型围堤 (Dunes)” 方案。由敏感性分析的概率分析 (图 132) 可以看出, 在三种方案中, “潮汐水道 (Tidal gully)” 方案排序第一的概率是最大的, 由不确定性分析表 (图 133) 也可以看出, 在三种方案中, “潮汐水道 (Tidal gully)” 是最优的, 而其他两种方案差别不大。

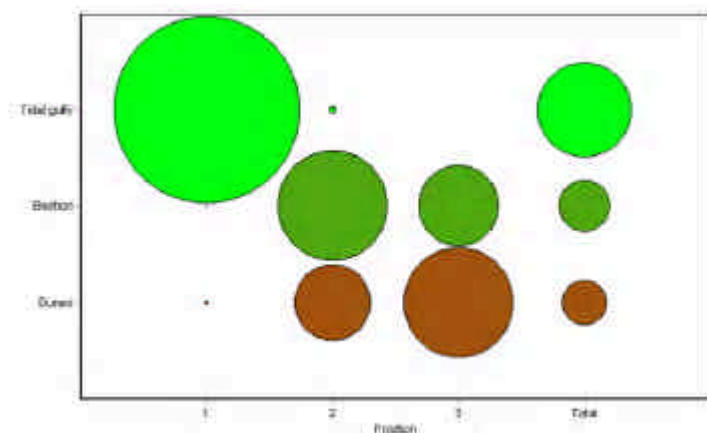


图 132 三种方案的概率分析图

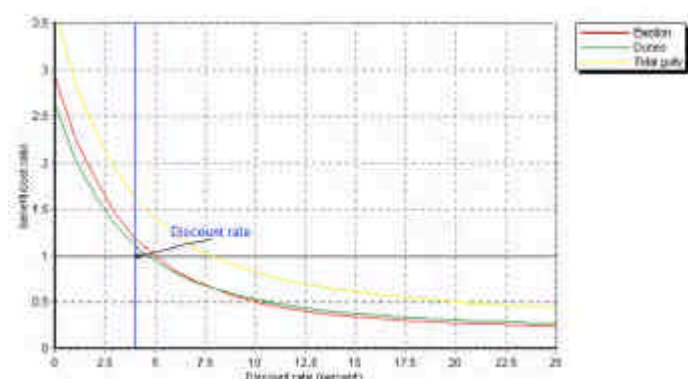


图 133 三种方案的不确定性分析表

4.13 BLM ePlanning

“BLM ePlanning”是美国土地管理办公署(Bureau of Land Management, BLM)与 ESRI 公司共同合作开发的,是“E-Gov for Planning and NEPA, 或称 ePlanning”项目的核心工具之一。该项目目的在于与公众交互、同步地传递规划信息(包括智能式、交互式的规划文本和规划图层、图表等)。

利用 BLM ePlanning,人们可以在互联网上打开土地利用规划文档、国家环境政策法案(National Environmental Policy Act, NEPA)文档和空间图像,查找、阅读相关信息,并能提交数据、文本,发表即时评论。这些数据、文本和评论作为档案被保存起来,为以后的规划提供决策参考。

BLM ePlanning 是基于 XML、数据库、动态内容管理和 GIS 等技术开发的,其中用到了 ESRI 的两个核心产品 ArcIMS 和 ArcSDE。BLM ePlanning 的适用领域主要有:能源与矿产,森林资源,牧草资源,渔业和野生动植物资源,荒漠,考古探测,历史遗迹以及其他自然生态资源保护区等,潜在的使用人群主要有项目领导人、编辑、资源专家、GIS 专家、数据库管理员,此外还包括普通公众。

BLM ePlanning 包括以下几个组成部分:

1. 办公自动化软件,以便于土地利用规划编制人员对土地规划文本和图层文本进行编

辑、管理和发布等。

2. WEB 交互式数字文档界面,用于与公众进行交流。BLM ePlanning 为用户提供一个发表针对土地规划评论的功能,用于收集公众的意见并能将这些评论储存在数据库中。

3. 后台处理工具,用于对公众的评论进行处理,对提交的 email 地址,传真,信件等进行收集和整理。

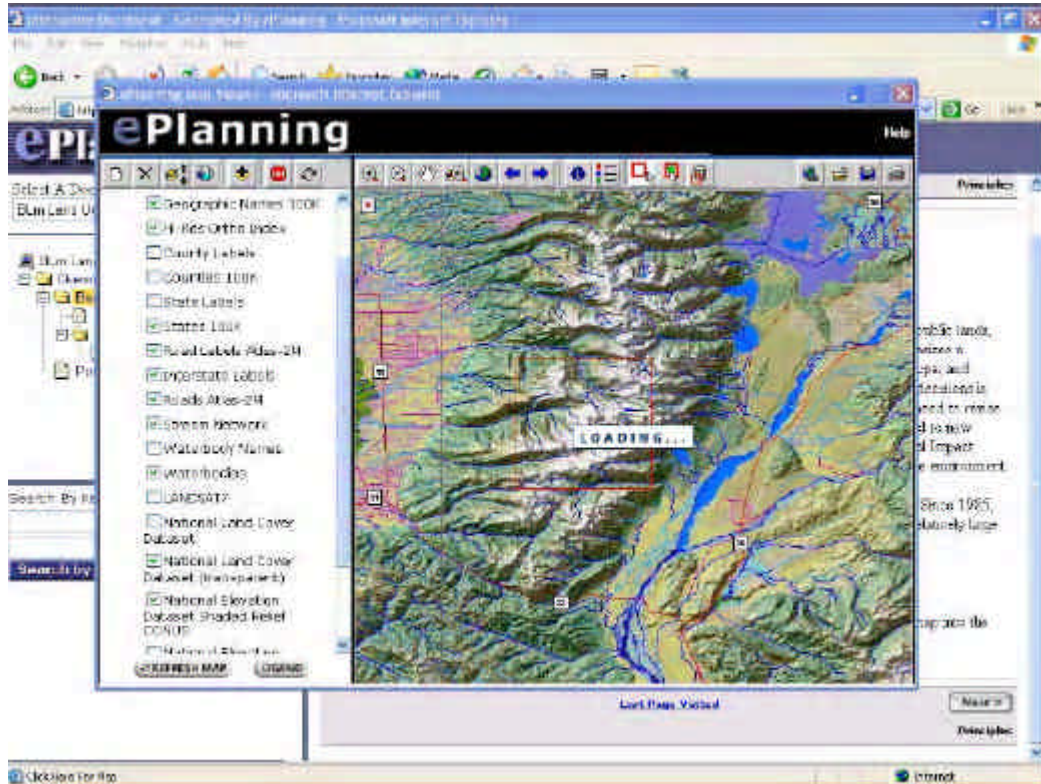


图 134ePlanning 界面

图 134 是 BLM ePlanning 的界面效果图,可以看出 BLM ePlanning 的使用与通常的网站基本相似,使用特别方便,普通公众就能够轻易掌握,为公众参与土地利用规划的编制提供了新的机制,是一种基于互联网的新型交互式规划支持系统。

5 系统应用实践

本部分主要介绍笔者近年来在规划支持系统领域的部分工作成果,如在北京城市总体规划中开发的“城市总体规划支持系统”,在北京市污水处理厂合理布局规划中开发的“城市污水处理系统规划支持系统”,在北京市节约用水规划中开发的“节约用水系统分析模型”,A市生态环境规划中开发的“生态环境规划管理空间决策支持系统”和在北京市限建区规划中开发的“限建区规划支持系统”等,这些系统中,虽然个别还称不上是真正的规划支持系统,但其设计思想和开发思想仍然可以作为规划支持系统设计开发的参考。

5.1 城市总体规划支持系统

新一轮的北京城市总体规划(2004 - 2020年)(以下简称总体规划或总规)修编工作中,在最终的规划文本和图纸背后,涉及到诸多专业的相互配合、大量数据的处理、众多规划图纸的绘制等多项复杂的工作。无论是图纸的绘制,还是城市布局的确定、城市人口的预测、交通网络的分析等方面工作,计算机辅助规划系统都起到了举足轻重的作用,可以说它是总体规划修编工作的幕后英雄,如果没有其广泛的应用,仅凭人工恐怕很难实现原有的规划设想。

在本次总体规划编制过程中,无论是规划的前期调研、基础数据处理,还是中期的规划成果编制,规划图纸的绘制,以及规划后期的规划文本排版、出版和规划成果的汇报,都应用了由众多软件工具松散集成的规划支持系统,主要体现在以下四个方面:

5.1.1 AutoCAD 与 Photoshop

在本次总体规划中,规划上报图和说明图都统一了底图模版,一般制图流程分为三种,其一是直接在 AutoCAD 中利用模版图层生成最终图纸,一种是在 AutoCAD 中绘制专业图,然后打印为 JPG 或者 TIFF 格式的图片,按照完全尺寸输出到 Photoshop 的模版中,对专题图进行渲染后最终出图,最后一种是基于 ArcGIS 和 Photoshop 的出图方式。

据统计,总规 80%的图纸是利用 Autodesk 公司的 AutoCAD 平台绘制,AutoCAD 软件的特点是容易掌握,可以实现精确的工程制图功能。总规中的规划工作者近十年来一直使用该套软件绘制规划图。总规另外 20%的图纸是采用 GIS 生成,具体在下面介绍。利用 AutoCAD 绘制的规划图纸,一般需要在 Adobe 公司的专业图像处理软件 Photoshop 中进行渲染,以强化图纸的表达,如图 135 中心城绿地系统结构图,经过 Photoshop 处理的 AutoCAD 图纸,更加生动形象。

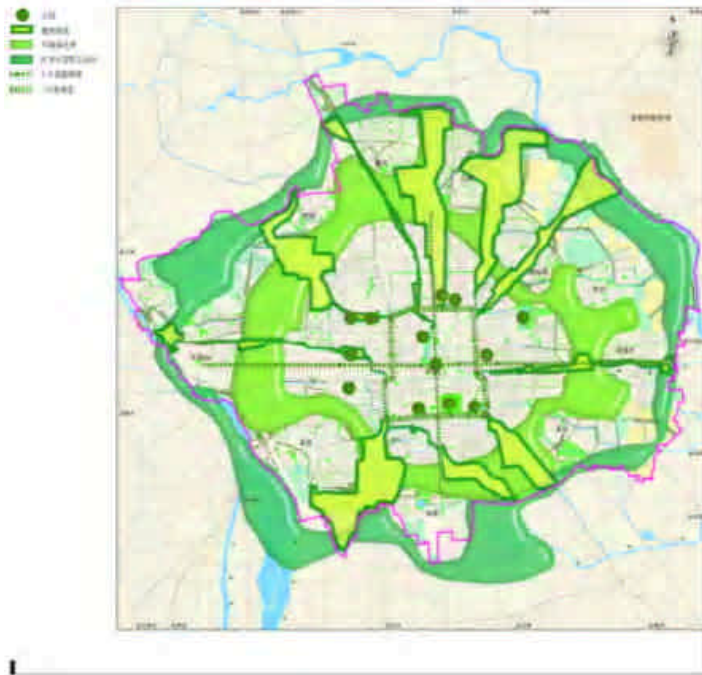


图 135 中心城绿地系统结构图

在规划过程中，还有少部分的概念规划图纸或者示意图，是直接 Photoshop 中基于底图绘制，如旧城景观视廊及街道对景保护规划图（图 136）。总体上，总体规划中以精确绘图著称的 AutoCAD 和以图纸渲染著称的 Photoshop 是绝对的出图主角。



图 136 旧城景观视廊及街道对景保护规划图

5.1.2 专业规划模型

城市规划，尤其是工程规划，往往需要一些专业模型作配合，本次总体规划中，采用的模型主要包括市政给水管网平差模型、市政排水管网水力计算模型、交通流量预测模型、交通网络分析模型、风场模拟模型、城市空气污染扩散模型、NDVI 指数计算模型、城市生态承载力分析模型等，一般在规划的过程中，较为简单的模型，如 NDVI 指数计算模型、城市生态承载力分析模型，可以直接将计算的结果指导图纸的绘制或方案的生成，而对于较为复杂的模型，如交通网络分析模型，其与绘图工具 CAD 或者 GIS 是松散集成的，通常由绘图工具生成规划方案，然后由专业模型实现规划方案的模拟，如果模拟的结果不符合规划的要求，则需要重新绘制规划方案，再由模型进行模拟，直至符合要求为止。图 137 为利用风场模拟模型生成的规划方案应用前后的地面风速变化分布图。一般较为复杂的模型和绘图工具之间处于一种完全松散的集成状态，接口为手工方式或文本文件。

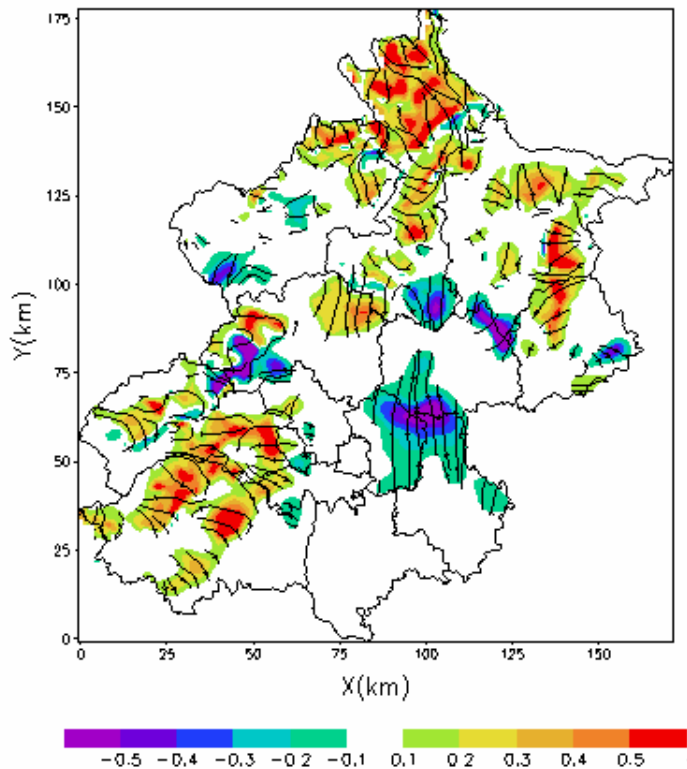


图 137 地面风速变化分布图（规划与现状对比，单位 m/s）

5.1.3 地理信息系统和遥感

采用 AutoCAD 和 Photoshop 等软件绘制规划图，在精确定位和表现等方面具有较大的优势。但图纸的绘制和规划成果的表达，往往只占规划工作的一小部分，更多的工作是对现状的分析、对未来的预测和对方案的模拟与选择，这些工作往往需要大量的专业知识和数据的计算。本次总规中，生态规划主要采用地理信息系统和遥感进行图纸的生成工作。因为该专业的图纸，一般不是依靠要素绘制生成，而是根据复杂的基础地理、地形数据和多专业的图层综合计算生成。如图 138 市域限制性分区图，是在 ESRI ArcGIS 中，综合 20 多个专业

图层，结合限制性分区准则计算而成，这种方法相比 AutoCAD，大大提高了该图纸的生成效率，在规划过程中，各专业图层不断调整变动，利用 GIS 可以灵活生成最终的分区图，同样的工作如果在仅具有图形绘制功能的 AutoCAD 平台进行，往往需要数十倍的时间。

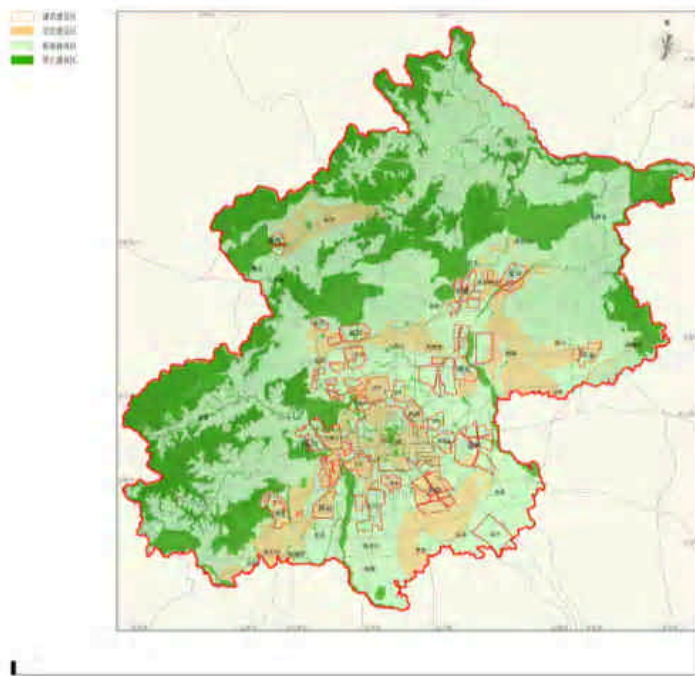


图 138 市域限制性分区图

图 139 中的市域高程分布，在这次总规中是作为各规划图纸的地貌底图供其他专业使用，是在 ArcGIS 平台上利用北京平原区 2m 等高距的等高线和山区 50m 等高距的等高线，在其 3D Spatial 模块支持下处理而成，大大提高了市域地貌的可视性，丰富了各专业规划的底图内容。

图 139 中的市域山前生态保护区，是指市域范围内高程在 100m - 300m 的区域，这一地区是北京重要的果粮生产区，是山前地下水的重要保护地带，也使连接山前生境和平原生境的过渡地区，规划应当加以保护。其范围的界定是在市域高程分析的基础上，利用 ArcGIS 的 GRID 模块通过属性分析生成，实现了市域山前生态保护区的精准定位，如果同样的工作在 AutoCAD 中进行，界定范围的工作则完全是手工参照地形图来描绘，该种模式不仅工作时间要大大增加，同时也不能够完全保证范围的精确性。利用同样的方法，在此基础上，山区、平原区和市域的面积也得以精确统计。

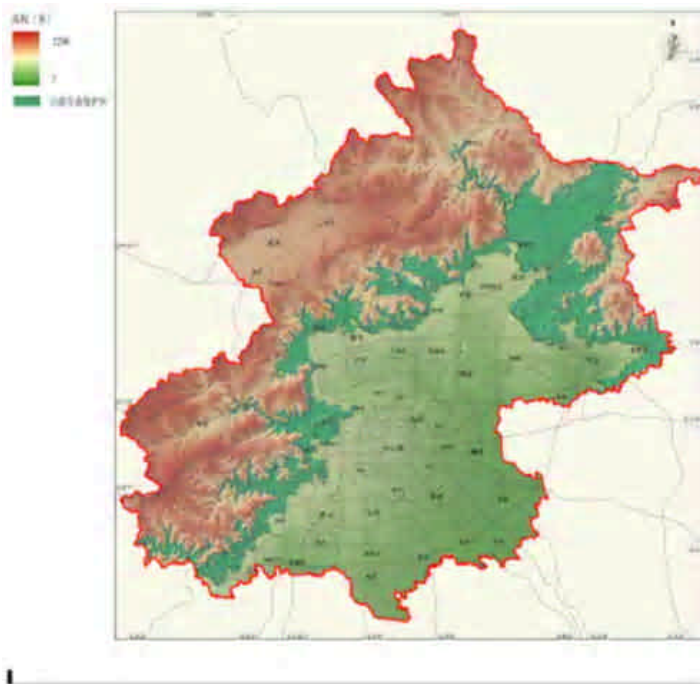


图 139 市域高程分析及山前生态保护区范围图

本次总规中，部分规划基础数据采用了遥感影像作为数据源，如“市域植被生长状况（NDVI 指数）示意图”（图 140）和“市域用地现状图”（图 141），主要采用的遥感影像处理软件为 Leica 公司的 Erdas Imagine。其中图 140 是利用 2001 年的 TM 卫星影像的红外波段和近红外波段，根据 NDVI 指数计算模型识别市域 NDVI 指数的分布，以表征市域的植被覆盖情况，主要在 Erdas Imagine 的 Date Interpreter 模块的支持下完成。

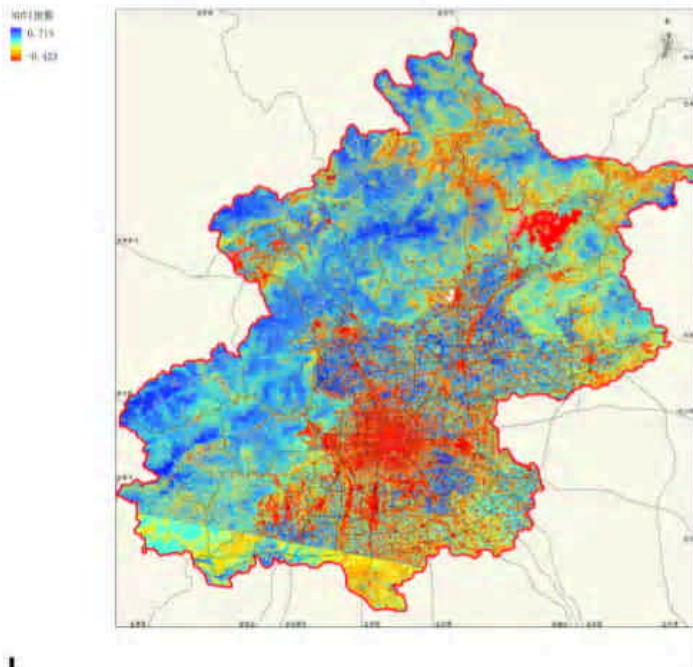


图 140 市域植被生长状况（NDVI 指数）示意图

而图 141 是在对 TM 卫星影像进行监督分类的基础上，结合原有掌握的部分现状数据

综合而成，主要采用了 Erdas Imagine 的 Classifier 模块。一般在 Erdas Imagine 中生成的规划图，都需要在 Photoshop 中进行后期处理，包括色彩调整、模版套用等。

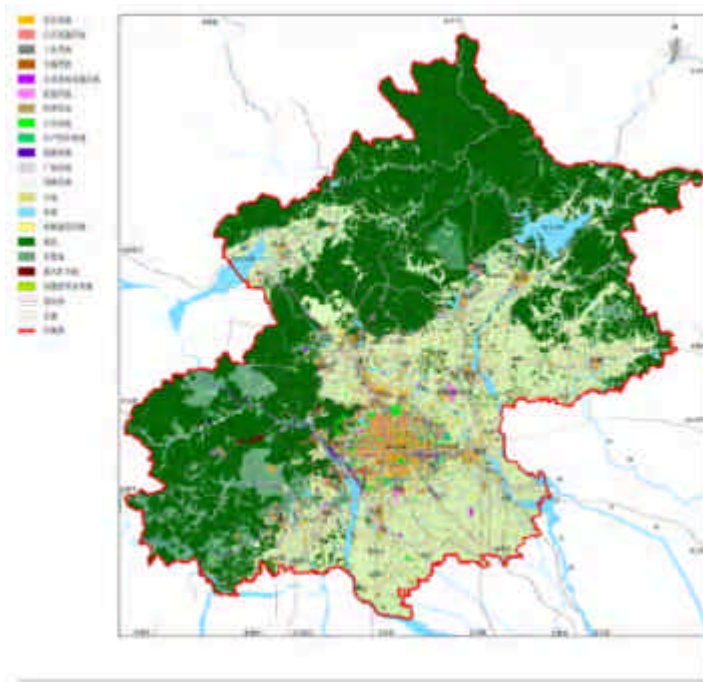


图 141 市域用地现状图

5.1.4 办公自动化系统及其他

在规划的不同阶段，还有其他的软件充当着规划支持系统的角色，如栅格地形图矢量化 R2V 软件，前期调查和数据整理的 Microsoft Excel，基本数据管理的 Microsoft Access，以及规划文本编制和排版的 Microsoft Word 和 Adobe PageMaker，社会经济数据分析的 SPSS，以及规划成果演示的 Microsoft PowerPoint，等等。这些工具在不同的方面，都在支持着规划工作的进行，无论在提高规划精确度，还是提高规划效率方面，都起到了举足轻重的作用。

5.1.5 应用总结

总结本次规划中规划支持系统的应用，可以看出在规划图绘制方面出现了 CAD、Photoshop 和 GIS 三足鼎立的局面，在规划方案生成、模拟和评价等方面，专业模型有了较为初步的应用。该规划支持系统在提高规划效率和精确度的前提下，不难发现其在辅助实现城市规划的同时，还存在一定的问题，主要如下：

- (1) 辅助功能单一：作为主要规划平台的 CAD 系统，具有强大的绘图功能，但空间分析、模型计算和数据管理、查询等方面的功能非常薄弱，GIS 虽然在本次规划中有所应用，但其应用范围还有待扩大；
- (2) 规划支持系统构成过于分散：本次规划中的规划支持系统，完全由各种工具松散集成而成，相互之间接口不具备自动化程度，通过提高系统的集成度，规划效率的

提高还具有较大的潜力；

- (3) 专业模型与规划平台结合松散：在实际的工作中，模型与规划平台松散集成，往往需要大部分的时间来进行模型的数据准备和转移，不利于规划效率的提高；
- (4) 系统还不具备智能化功能：城市规划涉及众多领域的知识，单凭规划人员所掌握的知识一般较难胜任，本次规划辅助系统并没有涉及到专家库的内容，在辅助规划人员决策方面还有所欠缺。

下面针对上面存在的问题，提出下一步的发展建议，以更好地辅助总体规划后期的分区规划、控制性详细规划以及各专项规划的开展。

- (1) 重视基础数据：为了开展现状分析、评价以及规划预测等方面的工作，系统应具备较强的数据管理和数据处理、一体化、标准化功能；
- (2) 重视三维空间尺度的扩展：国际上计算机技术在规划中的应用已经逐渐深入到三维领域，将目前城市规划的数据由二维扩展为三维，可以提高规划的可视性，也可以据此扩展系统的功能，如城市工程规划空间拓扑关系分析（龙瀛，2004）；^[284]
- (3) 便于各专业的配合：在实际工作中，各主要专业的配合占用了规划工作者较多的时间和精力，如市政与空间、交通与空间、生态与空间、交通与环境、环境与空间，以及市政与环境之间的配合，在数据模型设计和应用模块设计方面应便于多专业的相互配合，改善整体的规划工作效率；
- (4) 绘图与地理数据处理、管理的集成：大量的规划图纸的素材都来自地理数据处理、查询以及专业知识，仅具有绘图功能的系统只具有系统的“表面”，而不具有系统的“灵魂”，它们的集成可以促进绘图工作的有序开展；
- (5) 模型与系统的紧密集成：便于实现模型的自动输入和结果输出的可视化；可以便于规划方案的模拟和规划方案的修正，提高规划效率（Robert and Tomas，2000；A.L.Brown and J. K. Affum，2002；Christiane Weber，2000）；^{[285] [286] [287]}
- (6) 体现一定的智能化：系统应具有一定的智能性，有一定的推理能力，集成众多规划专家的知识，提高规划工作者的规划视野，扩大其知识领域，可以保证规划方案的合理性，并促进其向最优方向发展。

5.2 城市污水处理系统规划支持系统

城市污水处理系统规划是一个涉及面很广的问题。规划方案的选择，直接影响污水处理厂的投资、运行及养护的经济性，以及城市环境保护、污水和污泥资源再利用等诸多方面（戴慎志，陈践，1993）^[288]。北京市最近的一次污水处理与排除规划制定于1992年。由于产业结构调整、水价上涨、节水和污水回用等因素的影响，急需对原有污水处理厂规划作全面验证和修订，笔者参与了北京市新一轮污水处理系统规划工作中，并承担开发一套基于Geodatabase的城市污水处理系统规划支持系统。

5.2.1 系统构建

本规划支持系统的构建流程包括需求分析、系统设计、数据预处理、建立 Geodatabase 和系统运行与维护五个阶段。在需求分析阶段，主要确定原始资料需求、系统功能、平台以及数据模型等；在系统设计阶段，主要进行本规划支持系统的原型概念化设计、逻辑结构设计和物理结构设计；在资料预处理阶段，主要是对原始资料进行预处理，同时标准化数据格式并定义其空间引用；在建立 Geodatabase 阶段，主要任务是进行 Geodatabase 的模式设计、模式建立、定义关系并加载数据^[2]，从而完成该系统的初步设计。在系统运行与维护阶段，根据用户需求不断完善该系统，使其更好地辅助城市污水系统的规划。

本系统的数据图层主要分为四类——基础图层集、污水规划图层集、中水规划图层集和属性表集。具体每个图层集包括的图层参见图 142。

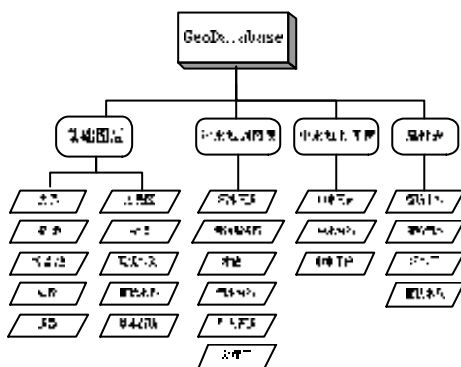
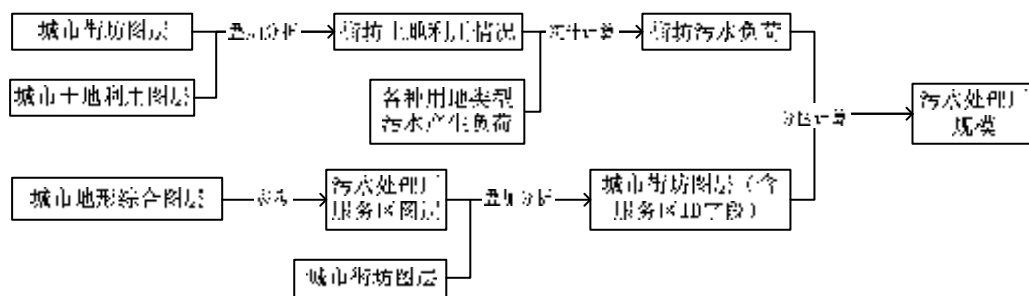
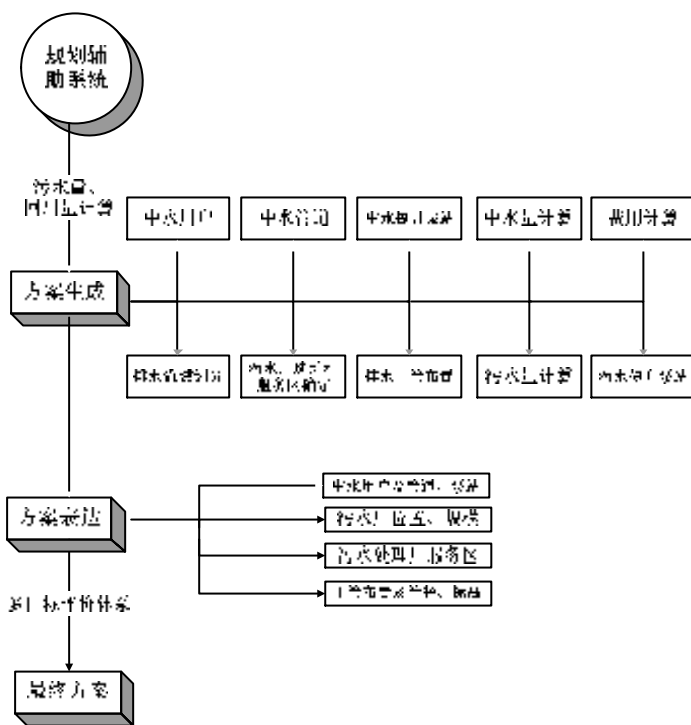


图 142 Geodatabase 结构框图

该系统的开发，采用美国环境系统研究所开发的 GIS 专业软件 ArcInfo 8.1 作为 Geodatabase 应用平台，利用 Microsoft Access XP 作为存储 Geodatabase 数据的关系数据库。

5.2.2 系统功能

利用本规划支持系统，可以对城市污水量和回用量进行计算、可以辅助污水处理厂厂址选择、辅助确定污水处理厂服务区并计算其规模、辅助污水管道和中水管道布置、对系统经济因素进行计算、对各规划方案进行表达。系统功能框图如图 143 所示。



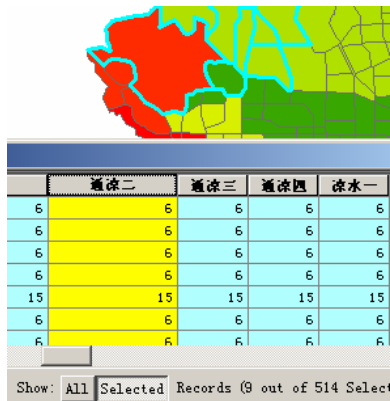


图 145 系统前台 Arcinfo 设定街坊图层服务区从属字段

(3) 后台通过属性查询分析功能计算水量。在获得每个街坊单元污水产生量的基础上，在后台基于 Geodatabase 数据模型的 Access 数据库中利用关系查询功能获得每个污水处理厂服务区的污水负荷即为相应污水处理厂的规模；以北京市污水处理厂布局规划方案中的为通凉（通惠河 - 凉水河）流域方案一为例，其 Access 数据库查询模块为：

```

SELECT Trim(WW_PLANT.Name) AS 污水厂名称, Sum(BLOCK.Q)/10000 AS 总水量,
Sum(BLOCK.Shape_Area)/1000000 AS 服务区面积, Sum(P_WW_BLOCK.居住建筑量) AS 居住建筑量,
Sum(P_WW_BLOCK.公建建筑量) AS 公建建筑量, Sum(P_WW_BLOCK.工业面积) AS 工业面积,
Sum(P_WW_BLOCK.居住水量)/10000 AS 居住水量, Sum(P_WW_BLOCK.公建水量)/10000 AS 公建
水量, Sum(P_WW_BLOCK.工业水量)/10000 AS 工业水量, 2158.42*(Sum(BLOCK.Q)/10000)^0.86 AS
基建费用, 361.9*(Sum(BLOCK.Q)/10000)^0.72 AS 运行费用
FROM WW_PLANT, BLOCK INNER JOIN P_WW_BLOCK ON BLOCK.TEXT_ =
P_WW_BLOCK.BLOCKid
WHERE (((BLOCK.通凉一)=[ww_plant].[ID]) AND ((WW_PLANT.通凉一)=1))
GROUP BY WW_PLANT.Name
ORDER BY Sum(BLOCK.Q)/10000 DESC;

```

相应的数据查询结果如表 24 所示，其中给出了通凉流域第一个规划方案的不同污水处理厂规模及其相应的基建费用和运行费用。

表 24 通凉流域方案一查询结果

污水厂	总水量	服务区面积	居住建筑量	公建建筑量	工业面积	居住水量	公建水量	工业水量	基建费用	运行费用
	(万 m ³ /d)	(km ²)	(10km ²)	(km ²)	(km ²)	(万 m ³ /d)	(万 m ³ /d)	(万 m ³ /d)	(万 m ³ /d)	(万元)
高碑店	95.6	244.8	7595.2	4953.3	15.6	33.7	46.8	10.5	109006	9652.1
小红门	90.2	254.3	9290.6	4485	9.2	41.2	42.4	6.2	103627	9251.7

(5) 规划管道及泵站 在获得合乎要求的污水处理厂服务区规划的基础上，规划该方案的管道和泵站图层；

(6) 依照第 1 - 5 步完成其他规划方案。在本项目中，北京市区每个流域一般初步给出 2 - 4 个规划方案。图 146 给出了通凉流域的两个规划方案对比图。

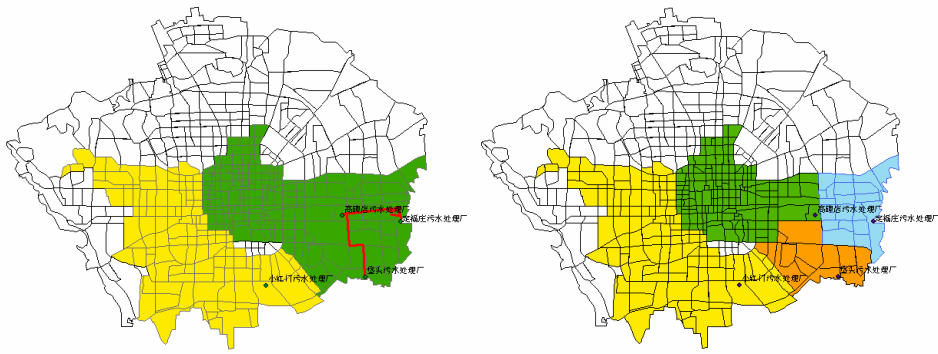


图 146 通凉流域污水处理厂规划方案对比图（左为方案一、右为方案二）

(7) 方案经济计算。把费用函数集成到 Geodatabase 数据库，直接对管道、泵站、污水处理厂的固定投资和运行费用进行计算（在表 1 中已有所体现）；

(8) 方案综合评估。在进行其他目标的属性分析基础上，利用 SMART 方法进行多目标决策并对各个方案进行综合评估，给出最优规划方案。

5.2.4 应用总结

本系统尝试应用规划支持系统辅助实现城市污水系统规划方案的提出、分析和表达，并达到了很好的效果，较原有规划平台 CAD 系统有了一定的突破，同时采用 Geodatabase 这种数据模型，可以充分利用关系数据库强大的关系查询功能、更接近现实世界来建模、提高规划工作效率，进而改善规划成果的准确性和合理性。在我国现阶段，城市排水管网、污水处理厂和中水系统的兴建与改造工作正在逐步开展，这种城市污水处理系统规划的计算机解决方案将有广阔的应用前景。

5.3 节约用水系统分析模型

北京目前的生产、生活方式已经无法支撑水资源的良性循环使用，长期以来北京城市的发展是靠牺牲生态环境为代价的。水资源紧缺已成为影响首都现代化建设的突出矛盾，北京同全国各大中城市一样，都先后开展了几轮节约用水规划（北京市城市规划局市政规划处，1984；北京市节约用水办公室，1996）^{[289][290]}，目前在承办 2008 年夏季奥运会的带动下，北京已经进入了新的重要发展阶段。如何以有限的水资源支撑首都经济社会的持续快速发展，是必须要面对和解决的问题。北京市节约用水规划再次被提到日程上来。

北京区域范围内，由水资源、供水、用水、排水和再生水等构成的节水规划的研究对象涉及数据众多，之间关系复杂，对该复杂系统进行规划进而给出优化方案，传统的分析方法已经显示出其局限性。因此在本次规划中，提出了节水系统分析模型（亦为规划支持系统的一种形式）的概念，对其进行系统建模，以辅助规划的开展。

5.3.1 模型基本情况

节水系统分析模型将节水工作系统化，从水资源量现状分析、供水系统分析、用水系统

分析、排水及再生水系统分析等方面,对整个节水系统进行建模,进行节水规划的研究工作,从水资源现状分析、用水分析、节水水平评价和节水目标的制定,以及后续的节水对策筛选、分析、评价与优选,都由该模型在支持。同时该模型实现了节水方案与节水量、水资源预测需求量在终端用水层次的关联计算,可以更有效地指导节水规划工作的开展。

(1) 模型基本框架

对于节水系统,主要可以分为水资源子系统、供水子系统和用水子系统。本研究所开发的节水系统分析模型的基本框架如图 147 所示,其中水资源子系统终端分析深度为一级分类,供水子系统终端分析深度为二级分类,而用水子系统终端分析深度为三级分类。在三个子系统终端分析的基础上,可以进行供水子系统的最底层分类——二级分类与用水子系统的最底层分类——三级分类的交叉分析,建立供水子系统与用水子系统之间的联系;而水资源子系统与供水子系统的一级分类也可以进行交叉分析。基于节水系统的三个子系统之间的关联,可以实现节水系统的系统分析与模拟。

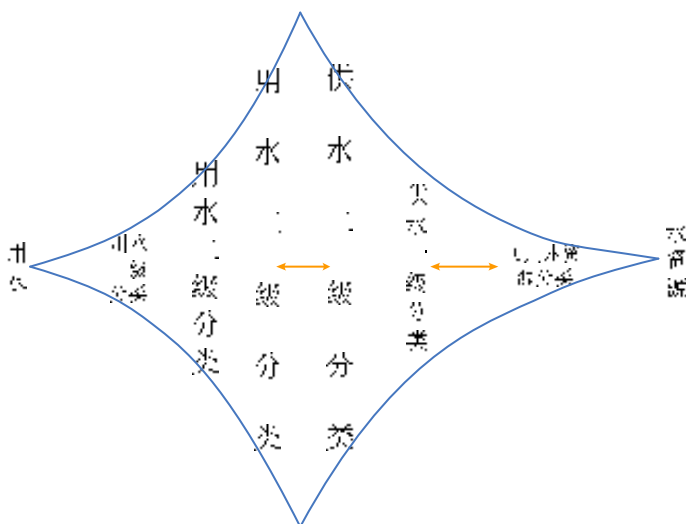


图 147 节水系统分析模型基本框架

(2) 模型终端分类

该模型在每个子系统,都严格采用终端分析的方法,即将不同子系统根据资料可获取程度、研究要求等因素,分为若干个层次,并以最底层作为分析的基础。其中对于水资源子系统和供水子系统,具体分类如图 148 所示。

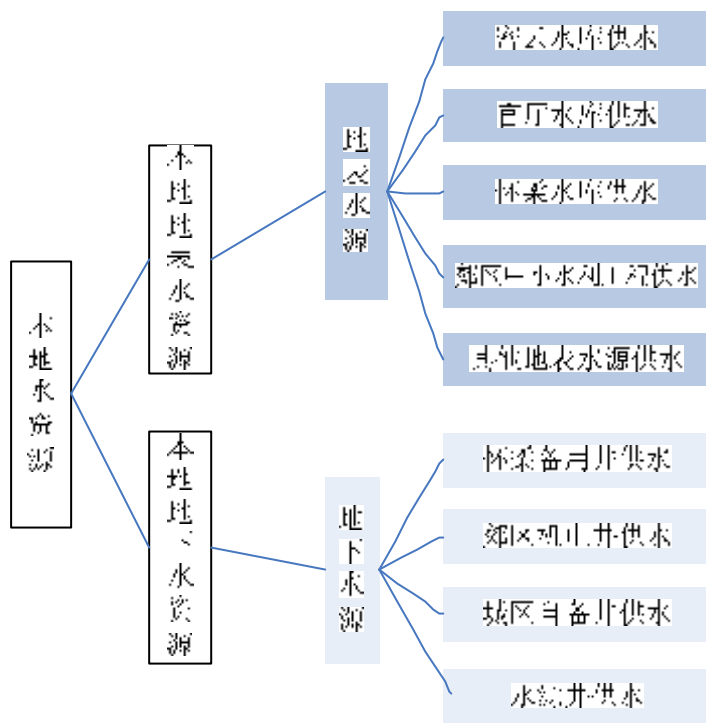


图 148 水资源及供水子系统终端分类图

而对于用水子系统，主要划定了三个分类层次，一级分类分别是生活用水、工业用水、农业用水、生态环境用水和漏损水；在一级分类的基础上依次进行二级分类，如生活用水分为城市居民家庭用水、农村生活用水和公建用水；对于部分二级分类的用水，还进行了三级分类，如城市居民家庭用水分为饮用/炊事用水、厕所用水、淋浴用水、个人洗漱用水、衣物洗涤用水、餐具洗涤用水、刷车/花园用水和其他用水等。具体的用水分类如图 149 所示。

- (3) 现状规模：是指现状（2003 年）各终端用水对应的基础数据，主要根据掌握的相关基础资料确定；
- (4) 预测规模：是指 2020 年各终端用水对应的基础数据，主要根据北京城市总体规划（2004~2020 年）北京市农业节水规划纲要等相关基础资料确定，其中预测规模（调整前）对应现状的产业比例和各产业内部的行业比例，而预测规模（调整后）对应经过产业结构调整和行业结构调整之后的数据；
- (5) 现状定额：是指现状（2003 年）各终端用水单位规模的水量，主要根据现状水量和现状规模之商确定；
- (6) 正常定额：是指按照现状（2003 年）节水措施下的节水水平，2020 年各终端用水单位规模的水量，其数值的确定是在现状定额分析的基础上，根据现状的节水水平确定；
- (7) 强化定额：是指在现有节水水平的基础上，采取强化节水措施的情况下，2020 年各终端用水单位规模的水量，其数值的确定是在现状定额和正常定额分析的基础上，通过国外、国内的相关资料调研并结合北京的实际进行确定。

除了以上的基础参数，针对每一项终端用水还设置了与供水相关的参数，用于供水子系统与用水子系统的关联，同时，在模型中还针对每一项供水子系统的终端分类，设置了与水资源相关的参数，用于水资源子系统与供水子系统之间的关联。

(4) 模块设置

本模型主要包括的模块主要有水资源与供水系统模块、用水系统分析模块、节水对策评价模块、结构调整模块和规划方案综合分析模块等，每个模块具体的功能如下所示：

- (1) 水资源与供水系统模块：主要实现水资源现状分析、本地水资源量预测、水资源空间分析、水资源空间分配，用水子系统现状分析、建设规模预测，以及水资源子系统与供水子系统的集成分析；
- (2) 用水系统分析模块：主要实现各终端用水的现状用水情况分析、现状节水水平分析，并基于此结合其他模块进行需水量预测和节水潜力分析，以及各对策节水潜力的计算等功能；
- (3) 节水对策评价模块：主要实现各节水对策的费用效益分析，经济、技术定性指标的专家调查数据处理，节水度计算以及对策推荐程度排序等功能；
- (4) 结构调整模块：主要实现第一产业、第二产业和第三产业的现状分析，并根据《北京城市总体规划（2004-2020 年）》进行三大产业的预测等功能，以及针对第二产业的行业结构现状分析与预测功能；
- (5) 规划方案综合分析模块：主要实现各节水规划方案的指标计算功能，并根据计算的结果对规划方案进行排序，给出推荐规划方案。

5.3.2 模型应用

在规划中，节水系统分析模型应用的主要技术路线如图 150 所示：

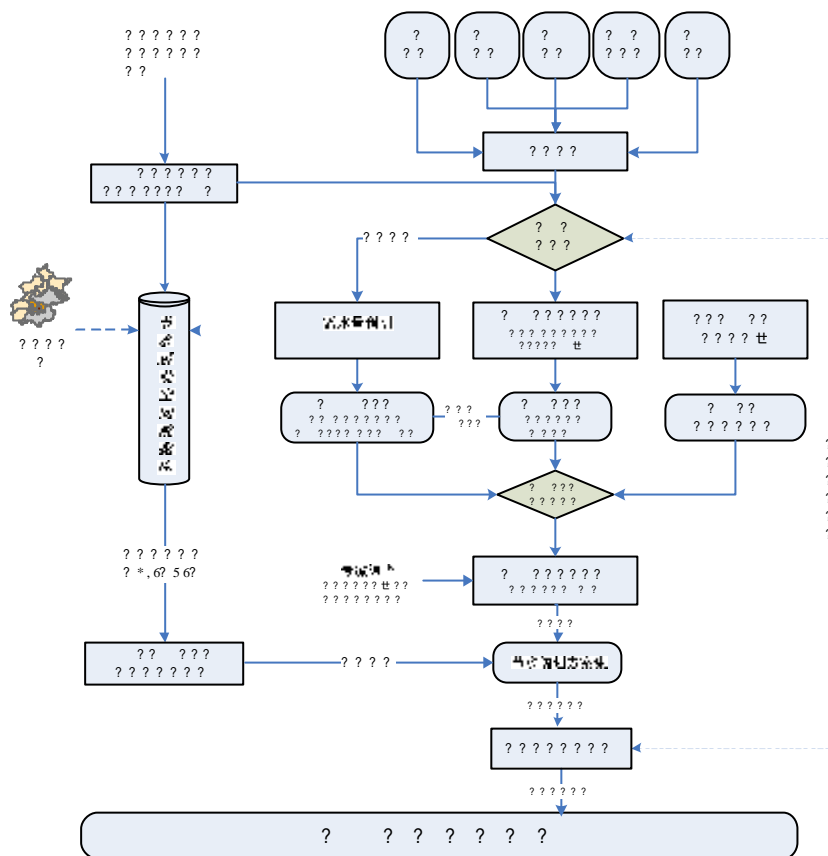


图 150 节水系统分析模型应用技术路线

(1) 现状分析

通过一系列的现状分析工作，可以识别目前北京水资源利用开发存在的主要问题，如水资源进一步开发的潜力有限、节水水平不高等，同时通过本部分的分析，确定了各终端用水的现状定额、现状规模和强化定额等参数。

(2) 节水目标制定

在节水系统现状分析的基础上，结合《北京城市总体规划（2004-2020年）》以及其他相关政府文件对北京的发展定位及人口规模、经济规模、三产比例等的规定，采用需求管理的思想，根据北京水资源具体情况，以“量水发展”为具体导向制定节水目标（2010年、2020年），作为本研究的具体规划目标。其中，节水目标主要分为三个层次，即核心指标、评价指标和考核指标。核心指标用于表示北京市总体经济的用水情况和用水效率，仅包括万元GDP用水量指标；评价指标用于表示各种用水水平和节水管理的状态，如人均城市居民家庭用水量；考核指标则针对本市节水工作的管理范畴选取一些易于反映其工作成效的指标，如城市节水器具普及率。

(3) 需水量预测

需水量预测主要是基于节水系统分析模型的用水系统分析模块开展，基于模型的基础数据对2020年北京市域的水资源需求量进行预测，可以对2004年至2020年之间每一年的需水量进行动态预测。具体是采用情景分析的方法，从产业、行业结构调整，强化节水措施，再生水利用等几个方面给出四种水资源预测方案，各预测方案的具体意义见表25所示，相

应的 2020 年预测结果如表 26 所示。

表 25 水资源需求预测方案示意表

	现状规模	预测规模 (调整前)	预测规模 (调整后)
现状定额	现状用水量		
正常定额		预测方案一	预测方案三
强化定额		预测方案二	预测方案四

表 26 北京市域 2020 年水资源需求预测结果表

单位：亿立方米/年

预测方案	生活用水	工业用水	农业用水	生态环境用水	漏损水	总计
预测方案一	37.56	20.55	17.44	12.00	2.66	90.22
预测方案二	14.63	14.45	14.73	12.00	2.19	58.01
预测方案三	38.57	12.36	17.41	12.54	2.66	83.54
预测方案四	16.31	8.88	14.82	12.00	2.19	54.20
最终方案	14.25	8.28	12.82	7.14	2.19	44.68

从预测结果可以看出：

- (1) 预测方案一：如果不进行产业、行业结构调整，并不采取节水强化措施，则 2020 年水资源需求量将达到 90.22 亿立方米，在四个方案中本方案预测结果最大；
- (2) 预测方案二：如果不进行产业、行业结构调整，但采取节水强化措施，则 2020 年水资源需求量为 58.01 亿立方米/年，水资源需求量趋于合理；
- (3) 预测方案三：如果进行产业、行业结构调整，但不采取节水强化措施，而保持现状的节水规模，则 2020 年水资源需求量将达到 83.54 亿立方米/年，相比方案一有少许下降；
- (4) 预测方案四：如果既进行产业、行业结构调整，又采取节水强化措施，则 2020 年水资源需求量为 54.20 亿立方米/年，在四个方案中本方案预测结果最小。

目前北京市偏枯年 (P=75%) 可供水资源量为 32.2 亿立方米/年，从水资源需求角度，方案四的预测结果和用水结构最为可行，扣除其中 9.52 亿立方米/年的再生水利用，确定了最终方案 2020 年需水量为 44.68 亿立方米/年。从预测结果可以看出，要满足 2020 年北京的水资源需求，必须 2020 年之前在实现南水北调引水 12 亿立方米/年的基础上，既进行产业和行业结构调整，又要强化节水措施，并开展必要的再生水利用工程。

(4) 节水潜力分析

本研究所分析的节水潜力 P_w 主要包括产业结构调整节水潜力 P_e 、行业结构调整节水潜力 P_{ia} 、节水措施强化节水潜力 P_d (还可细分为技术潜力、经济潜力和管理潜力) 和再生水利用潜力 P_g ，关系如下：

$$P_w = P_e + P_{ia} + P_d + P_g$$

总节水潜力为以上四个分项潜力之和，为 48.86 亿立方米，平均每年节水量为 2.87 亿立方米。

(5) 节水对策筛选

导致北京城市用水短缺的因素不只一个，因而在问题解决中也不能仅仅从单一角度、单

一节水对策出发。本研究在节水对策现状评价的基础上，经过对各终端用水节水相关因素的分析，确定了如表 27 所示的节水对策集，包括 5 项经济对策、7 项管理对策、10 项技术对策和 3 项开源对策。本部分分析了与每项节水对策相关的终端用水，以便于下一步分析每一项对策的节水潜力。如阶梯水价对策 E1 只对生活用水的节水起作用，而产业结构调整对策 M1 对公建、工业和农业的节水都起作用。

表 27 节水对策集及其作用域分析

类型	对策内容	编号	生活	公建	工业	农业	环境	漏损
经济 对策	阶梯水价	E1	■					
	定额用水	E2		■	■	■		
	对浪费用水的处罚措施	E3	■	■	■	■	■	
	特种行业水价政策	E4	■	■	■			
	分质水价	E5	■	■	■	■	■	
管理 对策	产业结构调整	M1		■	■	■		
	行业结构调整	M2		■	■	■		
	节水宣传教育	M3	■	■	■	■	■	■
	用水总量控制	M4		■	■	■		
	降低公共供水管网漏失率	M5						■
	加强用水计量管理	M6	■	■	■	■	■	■
	推广生态产业园区建设	M7			■			
技术 对策	节水器具研发、推广与非节水器具淘汰	T1	■	■	■			
	节水规划、计划制定	T2	■	■	■	■	■	■
	节水工艺(冷却水循环、锅炉水利用、废水回用等)	T3			■			
	公共建筑节水技术(空调循环冷却技术、锅炉蒸汽冷凝水回用等)	T4		■	■			
	推广非工程农艺节水	T5				■		
	续建配套农业节水工程	T6				■		
	林牧渔畜业节水技术	T7				■		
	发展绿化节水技术	T8					■	
	降低公共供水管网漏失率	T9						■
	节水信息技术的应用及深入科研	T10	■	■	■	■	■	■
开源 对策	雨洪利用	S1				■	■	
	小中水(居民、公建)	S2	■	■				
	大中水(市政杂用、园林绿化、洗车、环境景观等)	S3	■	■	■	■	■	

(6) 节水对策评价

在进行节水对策筛选的基础上，针对生成的节水对策集，需要进行综合评价，作为节水规划方案制定的基础。对于节水对策的评价涉及多方面的比选问题，如经济、管理、技术等多方面因素，是一项多目标决策的问题。本研究建立了节水对策评价指标体系如图 151 所示。在此框架下分别进行节水潜力指标、经济指标、管理指标和技术指标的属性分析工作。

其中节水潜力指标可以在各终端用水节水潜力计算和节水对策作用域分析基础上进行量化分析经济指标主要从各节水对策的建设费用和运行费用两个方面进行量化分析(王富康,王曙光,1992;邵玉林,1999),而管理、技术指标则采用专家调查的方法进行定性评价。

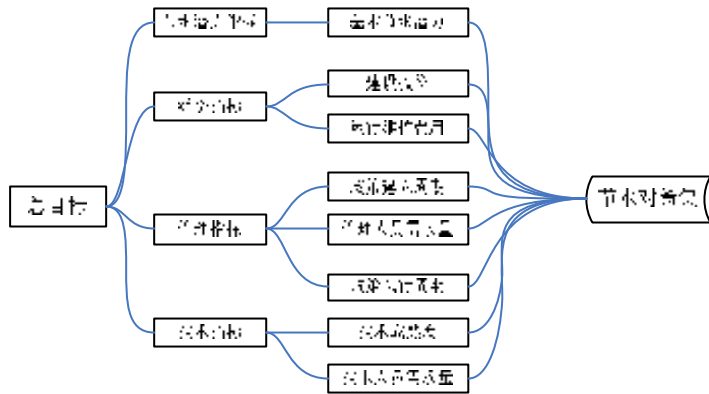


图 151 节水对策评价指标体系

在对节水对策各项评价指标分析的基础上，采用 SMART (Simple Multi-attribute Rating Technique) 方法(程声通,高朗,2000;高朗,程声通,1997)对所确定的节水对策集进行决策分析。通过对节水对策权重与属性的分析，确定节水对策的总价值，从而确定节水对策的优劣。本研究用节水度作为节水对策的综合评价指标，它是在四个基本指标的基础上通过计算获得，如下式所示：

$$I_c = A / (T_b * R_b + T_c * R_c + T_d * R_d)$$

式中，

- I_c 节水度；
- A 对策节水潜力，亿立方米；
- T_b 经济指标归一化结果；
- R_b 经济指标权重；
- T_c 管理指标归一化结果；
- R_c 管理指标权重；
- T_d 技术指标归一化结果；
- R_d 技术指标权重。

从各节水对策的节水度 I_c 的计算结果可以看出，对策 M1、T1 和 S3 最值得推荐，而对策 E4、M5 和 T9 最不值得推荐。

(7) 节水规划方案生成

对于需水量预测、节水潜力分析和对策综合评价等部分的数据，都是基于“基本方案”确定的。所谓的“基本方案”，是指各节水对策按正常强度实施时所对应的相应水量数据。但纵观上节节水对策的综合评价结果，可以看出各节水对策的推荐程度有较大的差异，这就需要节水对策的实施组合进行调整，以确定最优的节水规划方案。

本研究从不同的节水侧重点,提出了五个节水规划方案,分别对应不同的节水对策的实施强度的组合,其建立的一个原则是这五个节水规划方案的万元 GDP 用水量相同这一目标。为了便于对比不同节水对策的实施强度,将基本方案中各节水对策的实施强度定为 1。五个节水规划方案具体如下:

- (1) 规划方案一:强化经济对策,经济类型节水对策实施强度为 1.6,其他类型节水对策实施强度为 0.9;
- (2) 规划方案二:强化管理对策,管理类型节水对策实施强度为 1.4,其他类型节水对策实施强度为 0.9;
- (3) 规划方案三:强化技术对策,技术类型节水对策实施强度为 1.2,其他类型节水对策实施强度为 0.8;
- (4) 规划方案四:强化开源对策,开源类型节水对策实施强度为 1.5,其他类型节水对策实施强度为 0.9;
- (5) 规划方案五:各节水对策的实施强度正比于相应的节水度。

在基于不同节水对策的实施强度组合的节水规划方案建立的基础上,采用“目标-对策耦合模型”分析不同节水对策的实施强度对各主要节水指标的影响。其中管理难度和技术难度指标的计算主要基于各节水对策的管理指标和技术指标,而实施难度指标综合了单方水投资、管理难度和技术难度三项指标,可以说是规划方案层次的节水度指标,用于表征节水规划方案的实施难度,实施难度越大,表明该规划方案单方水节水投资较高、管理难度较大且技术难度较大,即越不值得推荐。

综合五个规划方案,鉴于实施难度指标可以表征规划方案的推荐程度,可以看出方案五的实施难度显著低于其他方案。最终确定方案五为经过对策优化的规划方案,即方案五中的节水对策实施强度系数为最优的实施强度组合,推荐作为节水管理部门对策实施的主要参考。

5.3.3 应用总结

国内的节水规划以及北京市以往几次节水规划,一般研究方法都是基本的供需平衡、费用~效益分析等,国外采用终端分析等方法开展节水规划有了一定的基础,在模型应用方面有了初步的实践。而本次规划,根据北京市水资源的实际情况和数据支持情况,以节水系统分析模型这种规划支持系统为主线,集成了需求管理、终端分析、目标导向等规划理念,来解决北京的特定水资源利用情况。本次规划的研究成果,已经取得了北京市节水管理中心的高度重视和评价,将作为北京市节水管理部门业务工作的重要参考。

5.4 生态环境规划管理空间决策支持系统

目前国内外区域生态环境规划方兴未艾,完善的区域生态环境规划需要有先进且系统的规划及规划后期的区域生态环境管理。区域生态环境管理多为结构化程度不高的决策问题,同时涉及到大量的空间数据,基于 GIS 和模型库技术的空间决策支持系统在解决这方面的问题上较管理信息系统更具优势(孙占山等,1997)^[29]。

区域生态环境管理涉及多方面的工作,需要不同方面的专业数学模型支持,模型的管理及维护就显得至为重要,模型库系统是区域生态环境管理空间决策支持系统(REEM-SDSS)设计的重点。近年来空间决策支持系统得到了较快的发展,但模型库技术的发展较为缓慢,出现了很多技术上和理论上发展的瓶颈,国内这方面的研究一般仍停留在模型的一般化管理即模型的查询、修改、删除、模型字典的简单建立、模型文件/数据存储这一层次,同时不同语言开发的模型不能很好地融合。

在 REEM-SDSS 的设计中,笔者提出了一种基于组件的模型库系统,把方法库也融入模型库,可以更好地在 REEM-SDSS 中得以应用,实现模型的有序化管理。同时,给出了基于关系数据库的知识库系统和基于 Geodatabase 的空间数据库系统的解决方案,实现了空间数据、属性数据和知识的集成存储,提高了区域生态环境管理 SDSS 的底层集成机制。

5.4.1 区域生态环境管理

区域生态环境管理主要涉及生态环境基础数据管理、生态环境的评估与诊断、生态环境的恢复与重建、城市布局与经济结构管理等几方面的工作:

- (1) 生态环境基础数据管理主要包括社会经济基础数据、各类环境监测数据、污染治理设施数据、生态工业园数据、自然生态数据以及自然资源数据等的采集、处理与管理,这部分是区域生态环境管理的数据基础;
- (2) 生态环境的评估与诊断主要包括生态足迹/生态健康/生态风险的分析、生态环境系统承载力分析与管理、生态环境质量评价和污染源评价等;
- (3) 生态环境恢复、重建主要包括自然生态保护、生态景观建设和环境污染控制等;
- (4) 城市布局与经济结构管理主要包括生态功能区划、土地利用适宜度与城市布局分析、资源利用与保护管理、开发区建设管理、生态产业管理等。

区域生态环境管理不同层次的管理部门在区域生态环境管理中分别起着不同的作用,通过建立 REEM-SDSS,采集各部门生态环境管理相关的基础数据及专业数据,自动进行分析处理,用于区域生态环境保护的管理决策,同时反馈给各相关单位用于标准数据上报,提高其办公自动化程度。同时,REEM-SDSS 可作为向上级部分如市政府汇报及向公众展示生态环境现状、参与生态环境保护工作的平台。

5.4.2 空间决策支持系统设计

(1) 功能设计

REEM-SDSS 服务于生态环境管理部门,主要是环保局(厅),辅助其生态环境管理的决策;同时利用 WebGIS 技术进行公众发布和公众参与;部分功能服务于生态规划以及未来的修订规划的技术人员。REEM-SDSS 的决策目标是辅助解决区域生态环境管理中涉及到的结构化程度不高的决策问题,提高生态环境管理的效率及其科学性。REEM-SDSS 拟实现如下的功能:

- (1) 信息服务:生态环境基础数据采集与处理、生态环境(动态)监测数据采集、基于 WebGIS 技术的信息发布模块(面向公众的和面向各个管理单位的)、相关部门办

公自动化

- (2) 科学计算：生态环境监测数据处理的自动化、上报数据标准化处理的自动化、A 市生态环境评价
- (3) 决策支持：生态环境利用的决策支持、应急事件决策支持的职能化、专家咨询系统、治理规划系统、GIS 空间分析系统

(2) 结构设计

REEM-SDSS 的总体框架如图 152 所示，本系统采用标准的四库结构模型（胡金柱，1989）：模型库、方法库、数据库及知识库。由于采用同一种开发模式，REEM-SDSS 中模型库包括了方法库。

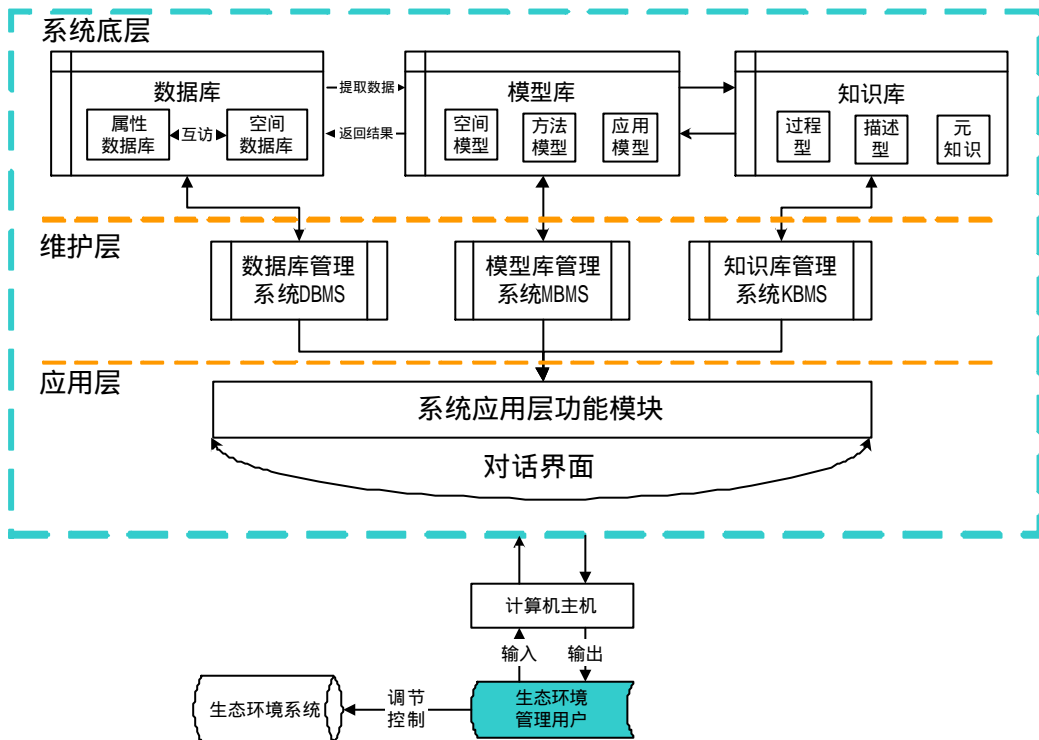


图 152 REEM-SDSS 的总体框架结构

(3) 技术要点

1) 数据库及其管理系统

区域生态环境管理的数据主要包括属性数据、空间数据以及遥感影像等图像数据。采用 Geodatabase 数据模型可以实现空间数据和属性数据的集成存储。采用 Microsoft Access 作为 Geodatabase 这种数据模型的存储平台，同时遥感影像、图片等资料也可以集中存储于 Access 的 MDB 数据库中，降低数据库文件系统的复杂性（Andy MacDonald，2001）。

数据库管理系统可以采用 Visual C++ 语言通过 ADO 数据库连接组件的方式进行开发，实现数据库的查询、修改、删除、插入等操作。如果采用松散集成方式，亦可以采用 Access 作为空间和属性数据库的管理系统。REEM-SDSS 的数据库系统如图 153 所示。

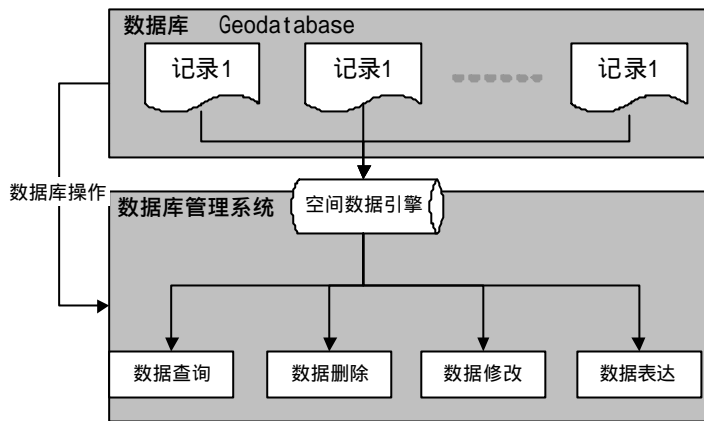


图 153REEM-SDSS 的数据库系统框图

2) 模型库及其管理系统

区域生态环境管理涉及到的模型众多,根据区域生态环境管理的框架体系,可以确定区域生态环境管理的工作中一般需要如下几方面的模型:核心模型(环境模型、生态模型)、应用模型(计量经济模型、城市与人口模型、管理与决策模型)和底层模型(空间模型、方法模型)。

模型库系统由模型文件库、模型字典库和模型库管理系统(MBMS)构成。本模型库系统中的数学模型基于 COM 技术进行开发。基于这种组件式数学模型的模型库系统,其模型文件库即为多个 DLL 文件,这样的文件系统较传统的模型文件库简单,便于管理。

对于模型字典库,由于作为 COM 数学模型载体的 DLL 文件中保存有该 DLL 文件的入口信息以及内部组件的信息,同时每个组件的类厂也具有该组件的接口信息(潘爱民,1999)^[292],提取这些信息可以作为模型子字典库的索引,即可实现模型库系统中数学模型的索引字典,即模型字典库。

在模型库管理系统中,利用 COM 的注册表注册与卸载功能,可以实现模型的添加、删除功能;采用生成的模型字典库,可以方便地实现模型的查询;同时 COM 的聚合与包容特性,使得模型的组合、生成等功能可以更方便地实现。

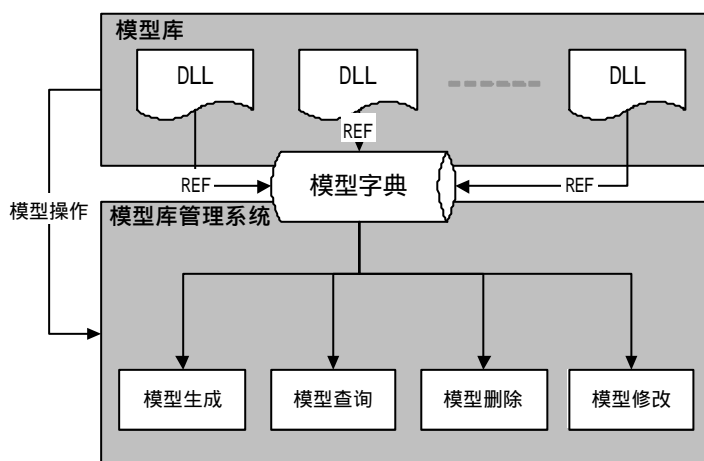


图 154REEM-SDSS 的模型库系统框图

组件式数学模型在的优势主要在于这种模型可以应用于专业软件的开发,可以直接经过查询被调用;COM 技术聚合和包容便于实现数学模型的组合和重生成;模型可以更容易地

被调用，只需组件在 WINDOWS 注册表中被注册；可以实现模型库与数据库之间的无缝连接；便于 COM GIS 与数学模型的紧密结合，促进 GIS 的专业应用。

3) 知识库及其管理系统

REEM-SDSS 中知识的存储和管理采用关系数据库技术来实现。为了集成空间数据、属性数据和知识的存储，利用关系数据库 Microsoft Access 作为空间数据 (Geodatabase 数据模型) 属性数据和知识的集成存储环境。知识库管理系统基于组件技术进行开发，实现知识的增加、删除、修改和检验等基本功能。

将知识库建立在关系数据库之上，可以充分利用数据库系统的强大管理功能和快捷的开发环境 (吴海桥等，2001)^[293]。同时可以方便地实现知识的增加、删除、修改、浏览等操作，增强了知识对技术人员的透明度，可极大简化系统设计和维护人员对已有知识的访问过程、管理和维护难度。

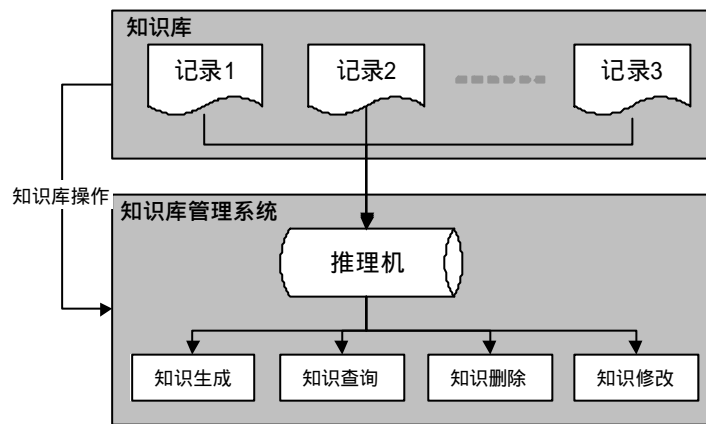


图 155 REEM-SDSS 的知识库系统框图

4) REEM-SDSS 应用层模块

根据生态环境管理的要求，REEM-SDSS 的应用层 (即用户对话界面) 主要分为四个子模块，分别实现不同的功能。这四个子模块分别是“生态环境基础数据采集子模块”、“生态环境现状评价子模块”、“生态环境决策支持子模块”和“环保局办公自动化子模块”。各个子模块的主要功能如图 156 所示。

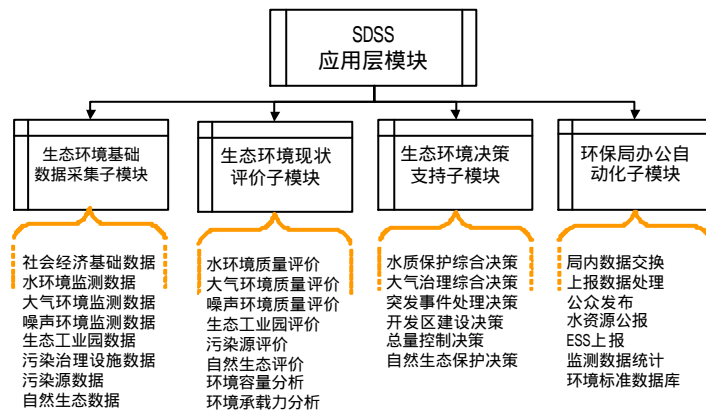


图 156 REEM-SDSS 应用层模块框图

5.4.3 应用总结

区域生态环境管理空间决策支持系统的优势主要在于:基于组件的数学模型,具有良好的可移植性和代码复制性,可以用于其他专业平台的开发;基于关系数据库的知识库和基于 Geodatabase 的数据库系统,实现了数据、知识的集中存储,便于管理;基于组件的数学模型和 GIS 组件可以更紧密地集成,为 GIS 与数学模型结合这一问题的解决提供了先决条件。

随着生态环境规划工作的开展,生态环境管理空间决策支持系统将具有更为广阔的应用前景,区域生态环境管理横向一般具有可比性,管理的内容和方法具有一定的可移植性,某一区域成功的管理案例可以为其他的区域生态环境管理研究提供技术储备和支持。这种基于组件式数学模型的空间决策支持系统,可以更好地移植到其他区域生态管理决策支持系统中。

5.5 限建区规划支持系统

在北京城市快速发展的进程中,建设项目开发遍地开花,城市无序蔓延的趋势并没有得到有效遏制,非建设用地向建设用地的非科学演变仍呈上升之势。同时,北京城市的发展布局要受到诸多建设限制性要素的制约,如果在城市规划层次不对这些建设限制性要素进行综合考虑,一方面会带来对自然资源的破坏,一方面还会带来严重的环境灾难。

为了提高城市建设用地的科学合理性,并为了保证城市建设的有序发展,开展针对城市无序蔓延的限建区规划就显得尤为重要,通过此类规划可以保留一定的未开发土地,为未来留有弹性发展空间,促进城市及区域生态环境向可持续生态系统演变。在北京市限建区规划中,涉及大量的空间数据处理工作,同时各主要工作环节需要专业分析模型的支持,为此开发了北京市限建区规划支持系统,用以辅助本规划各主要技术环节的研究工作。

5.5.1 系统需求分析

限建区规划的总体过程是在通过专题研究、专家调查和公众参与等方式进行单一限建要素分析的基础上,结合限建单元模型进行生成限建单元,并给出限建单元的限建导则。基于限建单元进行建设限制性综合分区和指定区域建设条件分析的工作,最后形成规划图则,作为指导城市规划管理和城市建设的依据。具体技术路线如图 157 所示,其中关键技术主要是规划支持系统、限建要素分析、限建单元分析、限建分区和限建导则等。

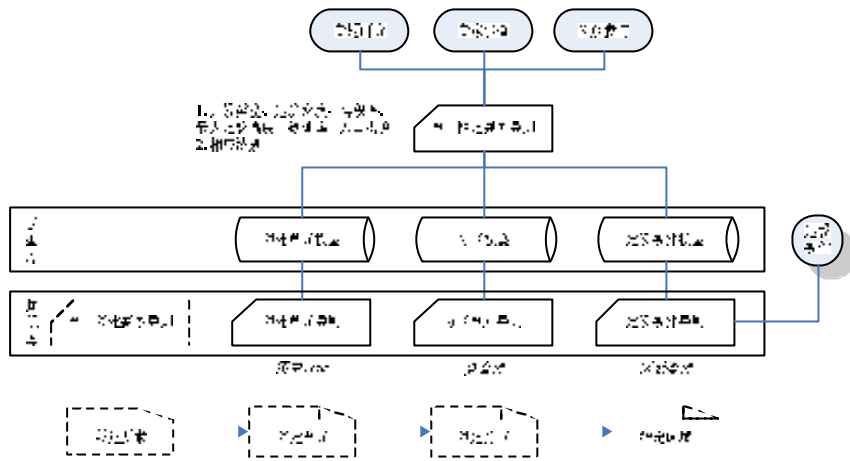


图 157 限建区规划技术路线图

规划涉及了 110 个限建要素，从限建要素分析、限建单元生成、限建分区和限建导则计算，都需要规划支持系统辅助规划的开展，以上的相关技术环节的技术实现即为规划支持系统的功能需求分析。总体上分为以下几个方面的功能需求：

- (1) 空间数据显示：基本地理底图以及与限建区规划相关的限建要素空间数据的显示；
- (2) 空间信息查询：针对与限建规划相关的限建要素空间数据进行空间及属性查询；
- (3) 科学计算：根据所提供的专业规划模型实现相应的计算功能，如限建单元生成、限建分区划定、建设条件分析等；
- (4) 决策支持：生成各限建单元的限建导则，生成指定区域的限建导则，从而为规划提供有力支持；
- (5) 成果输出：规划图则的生成、输出与打印。

而在系统开发形式方面，需要为用户提供简单、高效、直观的地理信息系统功能，同时，因为限建区规划涉及的限建要素、基础数据、边界数据等都处于不断变化之中，需要该系统能够适应数据的变化，而不需要对系统进行代码层次的修改；由于专业规划模型的引入，系统应具有通用的模型接口，以适应专业规划模型的变化；由于规划对成果有严格的美观要求，系统的界面设计和成果输出应具有较好的可视性。

5.5.2 系统数据流程分析

限建区规划中设计的数据比较复杂，进行深入的规划支持系统的数据流程分析是极为必要的，是进行下一步系统设计和开发的基础。开展本规划所需的基础数据主要包括地形数据、边界数据和限建要素数据等，其中：

- (1) 地形数据主要包括：1:25000 地形图，1m 分辨率航拍图，数字高程模型，现状道路，现状水系，土地利用现状图（2004 年），城市总体规划图（2020 年）；
- (2) 边界数据主要包括：市域边界、平原区/山区边界，规划市区边界，区（县）边界、行政镇（乡、街道办事处）边界，行政村边界，水系流域划分边界，生态区划边界，二~六环路；
- (3) 限建要素数据是本次规划得以开展的重要基础，整体上可以分为 16 个类别，总计

110 个。

上述基础资料需要经过标准化后导入规划支持系统的空间数据库,以实现辅助规划的功能。而在实际的工作中,原始数据的质量各异,需要对它们进行处理与加工,使之满足系统运行的需要并满足限建区计算与分析所需的精度,这些处理与加工包括:

- (1) 数据格式统一:原始数据的格式根据其数据采集方法的不同而不同,为了便于数据的加工与处理,需要将这些数据转换为一个统一的格式,然后进行其他工作。本次工作拟采用 ESRI Shape 文件作为统一数据格式;
- (2) 地图坐标系转换:规定系统所采用的地图坐标系,将不处于该坐标系下的地图数据通过投影变换使之转换到该坐标系下;
- (3) 地图坐标纠正:由于不同的原始数据具有不同的来源,其中可能存在局部或整体的坐标偏移或变形,因此需要对这部分数据进行坐标纠正,纠正所使用的方法和参数要视地图坐标的变形种类而定;
- (4) 地图内容检查与修改:主要针对地图当中的逻辑错误进行检查和修改,修改时需要参考其他资料以验证地图内容的正确性。

该系统的数据流程如图 158 所示。

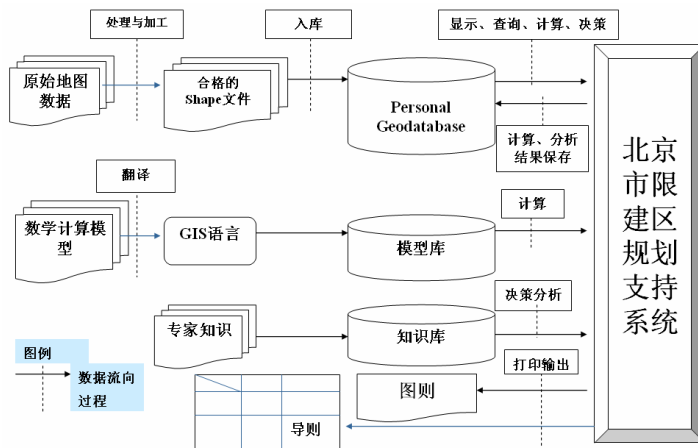


图 158 限建区规划支持系统数据流程图

5.5.3 系统设计及开发

规划支持系统的基本结构如图 159 所示,系统底层为 ESRI ArcGIS Engine 和 COM 技术,基于此进行本系统数据库、模型库和知识库的开发,实现系统的相应功能模块 数据显示模块、信息查询模块、限建分区计算模块、决策支持模块和规划图则生成模块。

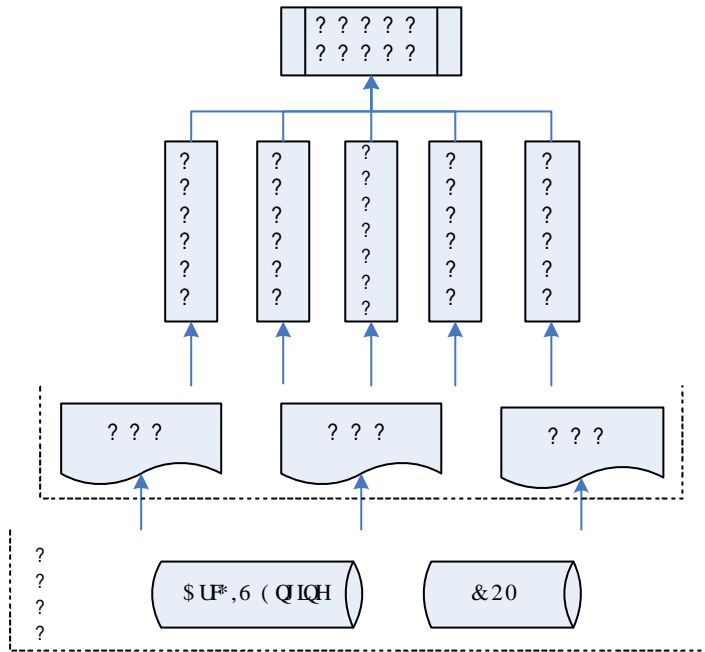


图 159 限建区规划支持系统基本框架图

系统开发中，主程序采用 Visual Basic 进行开发，而模型库采用 Visual C++ 进行开发，选用的数据库平台为基于 Microsoft Access XP 的 Personal Geodatabase，组件采用 ESRI 公司的 ArcGIS Engine 9.1（开发和使用界面如图 160 所示）。

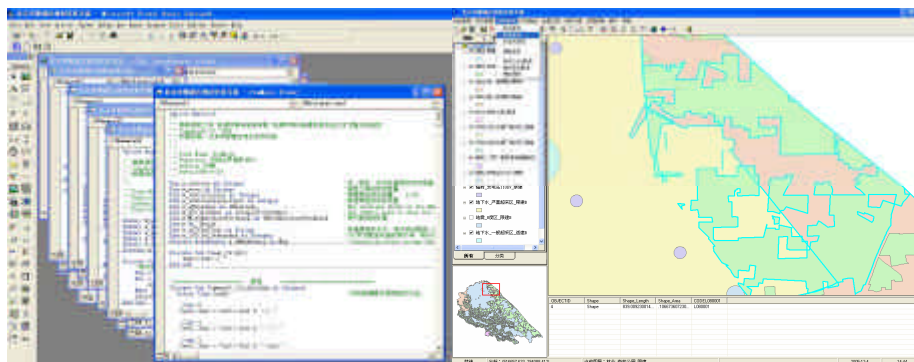


图 160 限建区规划支持系统开发截图

总体上，该系统的设计及开发的流程如图 161 所示，

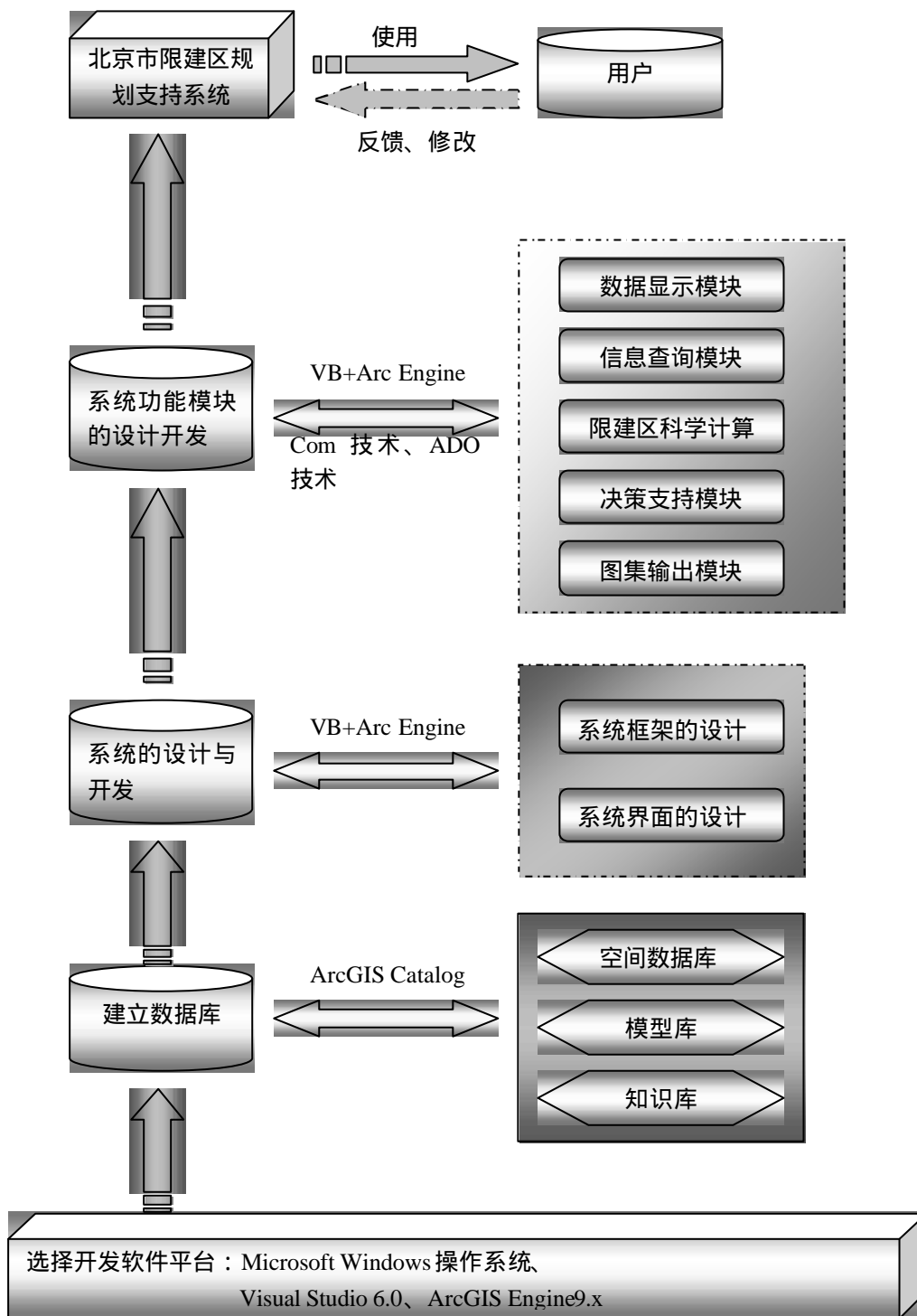


图 161 限建区规划支持系统设计及开发流程图

5.5.4 系统应用

系统的运行主要分为四个部分：系统及数据源的管理、项目管理及空间数据的输入显示管理、空间数据的查询分析及科学计算和产品的输出打印。整个系统运行的过程中，从用户

登录界面到项目中加载图层、从图层的显示查询到对图层进行科学计算得出要素的导则结果，从地图的分幅输出到计算后导则图的输出，都参考了系统的需求分析。具体的系统应用流程如图 162 所示。

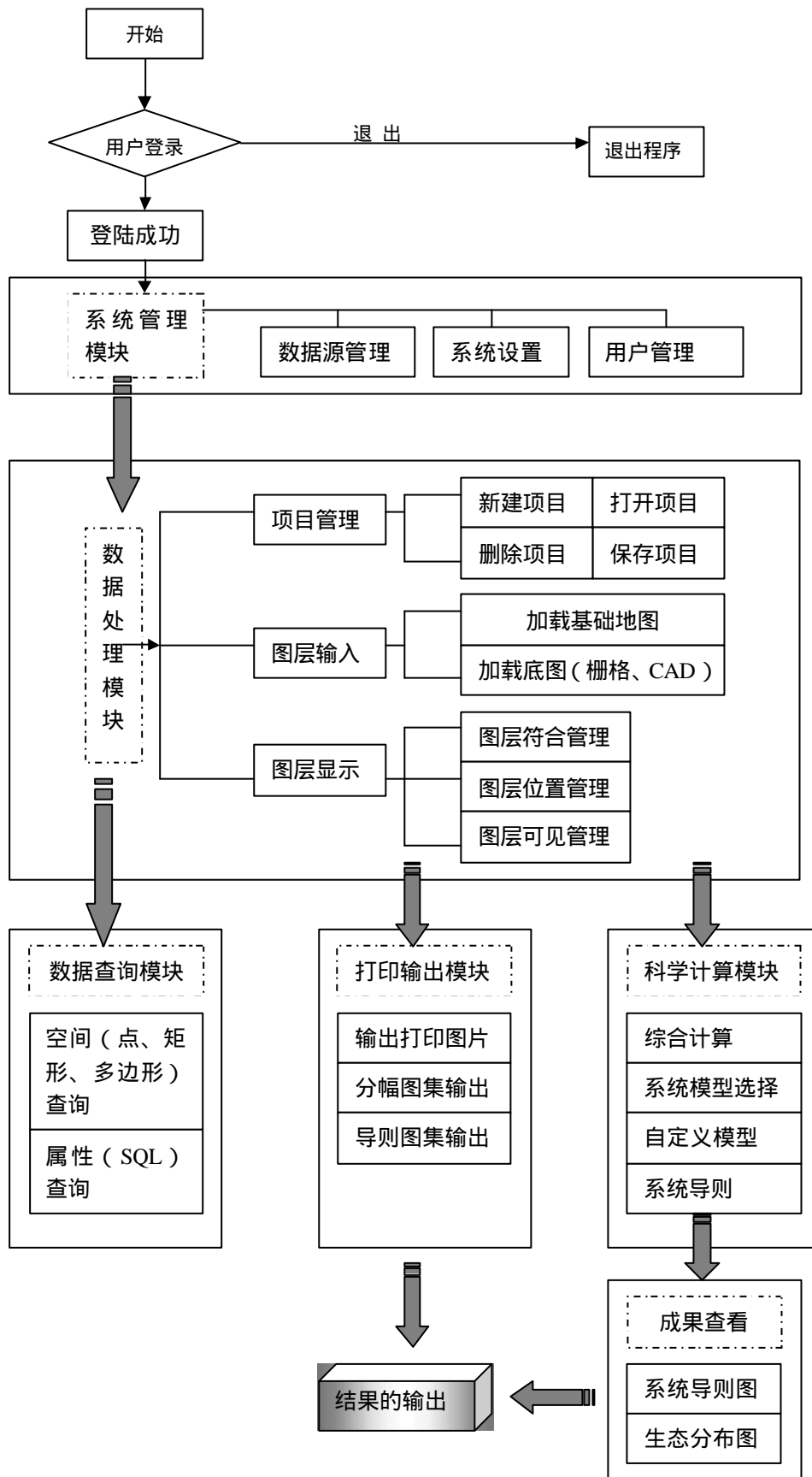


图 162 限建区规划支持系统应用流程图

本规划的最终成果主要体现在规划图则上,在规划支持系统中实现了规划图则自动生成的功能,可以生成全市域或指定区域的 1:25000、1:10000、1:2000 或任意行列分幅的规划图则。规划图则的内容主要包括区位分析图、基本地形、行政边界、现状地形图、航拍图、土地利用现状图、城市规划图,以及限建要素、限建单元、限建分区、限建导则、限建指数空间分布等。

规划图则所表达的内容可以根据实际的工作需要进行较为灵活的调整,部分规划图则的效果如下图所示。规划图则是本规划成果的重要载体,可以作为规划管理部门的重要工作参考。

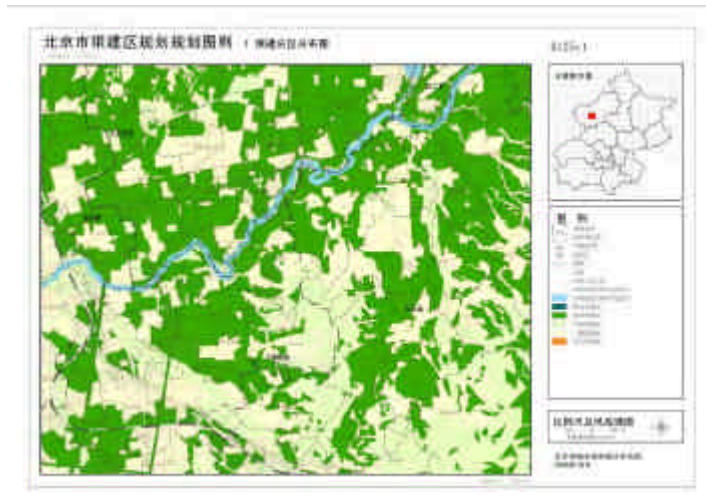


图 163 某图幅限建分区分布图



图 164 某图幅限建要素分布图



图 165 某图幅限建单元、分区图及导则表

5.5.5 应用总结

北京市限建区规划支持系统构建了完善的限建区规划相关的空间数据库,利用开发的多个专业规划模型实现定制的规划辅助功能,如通过限建单元计算模型生成海量限建单元,通过限建导则计算模型实现对指定区域限建导则的计算。该系统具有较好的可视化功能,可以生成布局完善的规划图则和专题图纸,同时系统可以根据方案的调整动态给出反馈结果,具有较好的可交互性。可以说该规划支持系统是目前我国该领域的典范,该系统的设计开发模式可以作为其他系统的参考。

后 记

2004 年早春，在清华，我写硕士毕业论文的过程中，我的导师贾海峰博士通过 email 发给我一个很短的材料，是关于 PSS 的介绍，这是我第一次接触国外目前很为流行的 PSS 这一概念，导师发来的文献引导我走进了规划支持系统这一领域。由于以前有了很多计算机辅助规划系统方面的理论、技术基础，所以经过几个月的深入调研，最后形成了我的硕士论文《区域水污染控制规划支持模型研究》，算是研究生期间对 PSS 的一项综述性研究成果。

完成硕士论文几个月后，2004 年 7 月，我踏上了现在的工作岗位，来到北京市城市规划设计院就职，主要从事区域与城市生态环境规划、水系统规划和规划支持系统方面的规划、设计和研究工作，对 PSS 方面的探索一直没有停止，后来在全院作了题为《THINKING IN GIS & MODEL》的学术报告，取得了一定的反响，当时就有想法在自己研究经历的基础上，对其进行总结，并结合在规划院的工作经历和在 PSS 方面的实践，形成一本国内规划支持系统方面的拙著，以改善我国该领域当前比较薄弱的局面。后来中国化工出版社与我约稿，最终于 2006 年初将这件事情确定下来。近几个月，国内的公开出版物中已经能够看到个别的 PSS 方面的研究工作，让我有了更大的写作动力，因为有一批人同样关注着国内 PSS 这个领域。

在本书的编撰过程中，单位领导何永主任在工作方面给予了积极的理解；清华大学的王坚同学，配合我进行了地理系统分析部分的文献整理工作；北京师范大学的宁超乔同学，配合我进行了国际已有系统部分的文献整理工作；中国环境科学院的郭飞同学，配合我进行了规划专业模型部分的文献整理工作；北京市水利规划设计研究院的魏炜，为我提供了给水管网平差等方面软件的详细资料；以及我的老同学，中国化工出版社的左晨燕编辑对本书给予了密切的关注与配合。在此向他们表示深深的感谢。本书得到了中国化工出版社的大力支持，在这里唯有希望本书能够得到读者的认可，以回馈中国化工出版社。

最后，要感谢我的女友，即将成为我未婚妻的刘艳，是她给了我很多工作和生活上的鼓励，带给我很大的写作灵感和创作的幸福，使得此书能够以更好的质量得以及时与读者面世。也要感谢我的在千里冰封的北国的父母，希望此书能够带给二老健康的晚年。

龙瀛，2006 年底，于北京西城

longying0522@sina.com

参考文献

1. A.L.Brown, J.K.Affum. A GIS-based environmental modeling system for transportation planners[J]. Computers, Environment, and Urban systems, 2002, (26): 577-590
2. Aerts J CJH. , Heuvelink G B M. Using simulated annealing for resource allocation[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16(6): 571-587
3. Andy MacDonald. Building a Geodatabase[M]. ESRI Press, 2001
4. Armstrong Tom, Patton Ron 著, 董梁, 丁杰, 李长业, 等译. ATL 开发指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001
5. Batty M. Planning support systems and the new logic of computation[C]. Regional Development Dialogue, 1995, 16: 1-17
6. Bishop, I. Planning support: hardware and software in search of a system[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1998, 22(3): 189-202
7. Boggs, Michael 著, 邱仲潘译. UML 与 Rational Rose 2002 从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002
8. Burton I. The quantitative revolution and theoretical geography[M]. Canadian Geographer, 1963
9. Christiane Weber. Interaction model application for urban planning[J]. Landscape and Urban Planning. 2000, (63): 49-60
10. Clark, K.C. and Gaydos, L.J. Loose-Coupling a Cellular Automation Model and Gis: Long-Term Urban Growth Prediction For San Francisco and Washingto/Baltimore [J]. Geographical Information Sciences, 1998, 12(7): 699-714
11. Clarke, K.C. Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2002, 26(6): 525-552
12. Couclelis H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, (24): 165-174
13. Daniel B. Botkin. Forest Dynamics——An Ecological Model[M], 1993
14. Elisabete AlvesdaSilve, 朱玮. 区域 DNA——区域规划中的人工智能[J]. 国外城市规划, 2003, (5): 3-8
15. Harris B, Batty M. Locational models, geographic information, and planning support systems[J]. Journal of Planning Education and Research, 1993, (12): 184-98
16. Harris B. Beyond geographic information systems: computers and the planning professional[J]. Journal of the American Planning Association, 1989, 55: 85-92
17. Harris, B. Plan or Projection: An Examination of the Use of Models in Planning[J]. Journal of the American Institute of Planners, 1960, 26(4): 365-272
18. Hopkins, Lewis D. Structure of a Planning Support System for Urban Development[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1999, (26): 333-343
19. Jeff Carmichael, James Tansey, John Robinson. An integrated assessment modeling tool[J]. Global Environmental Change, 2004, (14): 171-183
20. Kim, T.J. Integrated Urban System modeling: Theory and Practice[M]. Martinus Nijhoff, Norwell, assachusetts, 1989
21. Klosterman R E. Planning support systems[C]. In Wyatt R, Hossain H (eds) Proceedings, Fourth International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management. Melbourne, 1995, July, (1): 19-35
22. Klosterman, Richard E. Planning support systems: A new perspective on computer-aided planning[J]. Journal

- of Planning Education and Research, 1997, 17(1)
23. Landis. The California Urban Futures Model: a new generation of metropolitan simulation models[J]. Environment and Planning B, 1994, (21): 399-420
 24. Lee, D.B. Requiem for Large-Scale Models [J]. Journal of the American Institute of Planners, 1973, 39(3): 163-178
 25. Li Xia. Constrained CA-Model for the Simulation and Planning of Sustainable Urban forms by Using GIS [J]. Environment and Planning B, 2001, (28): 733-753
 26. Martin Fowler, Kendall Scott 著, 徐家福译. UML精粹 - 标准对象建模语言简明指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000
 27. P. Rizze. Computers in urban planning and urban management at the turn of the millennium[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1999, (23): 147-150.
 28. Putman, S.H.. Urban Landuse and Transportation Models: a state of the art summary[J]. Transportation Research, 1975, (9): 187-202
 29. Qian X S, Yu J Y, Dai R W. A new discipline of science-the study of open complex giant system and its methodology[J]. Nature Journal, 1990, 13(1): 3-10
 30. Richard E Klosterman. Large-Scale Urban Models Retrospect and Prospect[J]. APA Journal winter, 1994, (60): 3-6
 31. Robert A. Johnston, Tomas de la Barra. Comprehensive regional modeling for long-range planning: linking integrated urban models and geographic information systems[J]. Transportation Research Part A, 2000, 34(2): 125-136
 32. S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M.P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. Science, 1983, 220: 671-680
 33. Stan Geertman, John Stillwell. Planning support systems an inventory of current practice[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2004, (28): 291-310
 34. Stillwell, J. Planning Support Systems in Practice (Advances in Spatial Science)[M]. Springer, 2002.
 35. Wu F. An Empirical Model of Intra-metropolitan Land Use Change in a Chinese City [J]. Environment and Planning B. 1998, (25): 245-263
 36. Yun Zhang. Detection of urban housing development by fusing multisensor satellite data and performing spatial feature post-classification [J]. Int. J. Remote Sensing, 2001, 22 (17): 3339-3355
 37. 艾丽双. 可视化 GIS 在城市规划中的应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2004
 38. 安虎森. 空间经济学原理[M]. 北京: 经济科学出版社, 2005
 39. 北京市城市规划局市政规划处. 北京城市用水的节水研究[R], 1984
 40. 北京市节约用水办公室, 北京市规划设计研究院. 北京市城市节水 2010 年规划研究[R], 1996
 41. 曹玫、林小涵. 基于遗传算法的城市轨道交通接运公交线网规划[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(4): 568-570
 42. 曹瑜, 胡光道. 地理信息系统在国内外应用现状[J]. 计算机与现代化, 1999, (3): 1-4
 43. 陈春云, 余学春, 郑彤. 环境系统数学模型[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003
 44. 陈干, 闫国年, 王红. 城市模型的发展及其存在问题[J]. 经济地理, 2000, 20(5): 59-71
 45. 陈国良. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996
 46. 陈启明, 冯立平, 丁蓊羽. 灰色局势决策法在城市污水处理厂布局规划中的应用[J]. 上海环境科学, 2000, 19(12): 553-556
 47. 陈森发. 复杂系统建模理论与方法[M]. 南京: 东南大学出版社, 2005
 48. 陈绍杰. 计算机技术与 GIS 关系的新进展[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2002, 1(2): 26-29
 49. 陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998

50. 陈顺清. 城市增长与土地增值[D]. 北京: 中国科学院, 1999: 23-122
51. 陈顺清. 试论城市规划信息系统(UPIS) [J]. 城市规划, 1998, 22(6)
52. 陈涛, 陈森发. 涨落后的城市道路交通拥挤蒙特卡洛预测[J]. 系统工程理论与实践, 2004, (12): 123-127
53. 陈晓勇, 丁松庆. 3 维虚拟现实系统在城市规划中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2006, 29(5): 94-96
54. 陈学刚. 基于元胞自动机元胞自动机的城市增长模拟研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2005
55. 陈彦光. 城市人口密度衰减的分形模型及其异化形式[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 1999, 12(1): 60-64
56. 陈彦光. 地理数学方法: 从计量地理到地理计算[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2005, 39(1): 113-120
57. 陈禹, 钟佳桂. 系统科学与方法概论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2006
58. 成伟光, 李军. 论地理系统结构[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 1999, 23(2): 278-281
59. 程声通, 高朗. 工程方案选择的权重-属性决策分析方法[J]. 环境科学, 2000, (5): 31-35
60. 戴昌达, 姜小光, 唐伶俐. 遥感图像应用处理与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
61. 戴慎志, 陈践. 城市给水排水工程规划[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1999
62. 党安荣, 贾海峰, 易善楨, 等. ArcGIS 8 Desktop 地理信息系统应用指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003
63. 邓聚龙. 多维灰色规划[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1989
64. 丁浩, 杨小平. SWARM—一个支持人工生命建模的面向对象模拟平台[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(5): 569-572
65. 丁建伟, 谢明, 黄伟. 城市规划信息系统的可持续发展[J]. 城市规划, 2001, 25(8)
66. 杜宁睿, 李渊. 规划支持系统 (PSS) 及其在城市空间规划决策中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版). 2005, 38(1): 137-142
67. 段瑞兰, 郑新奇. 城市仿真模拟(UrbanSim)及其应用[J]. 现代城市研究, 2004, (1): 65-68
68. 樊京春, 梁亚娟, 许德平, 等. 城市能源规划中的能源数据处理[J]. 能源工程, 2003, (1): 15-18
69. 樊立萍, 于海斌, 袁德成. 城市排污系统对河流水质影响的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2005b, 22(5): 251-255
70. 樊立萍, 于海斌, 袁德成. 以河流水质为目标的排污量控制的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005a, 17(3): 728-731
71. 范英英, 刘永, 郭怀成. 北京市水资源供需平衡趋势预测及分析[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(1): 116-120
72. 冯涛, 吴国玺, 秦耀辰, 等. 基于分形理论的河南省城市规模分布研究[J]. 许昌学院学报, 2006, 25(2): 52-56
73. 符国基. 海南岛综合环境功能区划研究[J]. 海南大学学报(人文社会科学版), 2001, 19(1): 37-40
74. 符曦. 系统最优化及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995
75. 高红建, 蔡锦忠, 潘焕祥. 灰色理论在城市总体规划中的应用研究[J]. 基建优化, 2005, 26(5): 106-109
76. 高朗, 程声通. AHP 与 SMART 方法在环境工程方案评比中的应用[J]. 辽宁城乡环境科技, 1997, 17(4): 1-3
77. 耿红, 王泽民. 基于灰色线性规划的土地利用结构优化研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(2): 167-175
78. 顾珊珊, 陈禹. 复杂适应性系统的仿真与研究——基于 CAS 理论的交通模拟[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 82-86
79. 郭晋平, 张芸香. 森林景观恢复过程中景观要素空间分布格局及其动态研究[J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2021-2029
80. 郭砾, 夏北成, 江学顶. 基于 GIS 与人工神经网络的广州森林景观生态规划[J]. 中山大学学报(自然科

- 学版), 2005, 44(5): 121-123
81. 郭鹏, 薛惠锋, 赵宁, 等. 基于复杂适应系统理论与 CA 模型的城市增长仿真[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6): 69-63
 82. 郭鹏, 薛惠锋, 赵宁, 等. 遗传算法在土地利用优化中的应用[J]. 计算机仿真, 2005, 22(11): 127-129
 83. 郭齐胜, 杨秀月, 王杏林, 等. 系统建模[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006
 84. 郭庆旺编著. 现代经济增长模型比较研究[M]. 沈阳: 东北财经大学出版社, 1995
 85. 郭艳桃. 我国 34 个城市土地资源利用效益的聚类分析[J]. 特区经济, 2006, (7): 135-136
 86. 韩长福, 赵纪新. 效用理论在物业管理系统评价中的作用[J]. 集团经济研究, 2006, (10): 113-114
 87. 韩洁平, 王欣. 用层次分析法评测联想、海尔、戴尔(中国)三家企业网站[J]. 情报科学, 2003, 21(12): 1289-1301
 88. 郝力. 城市地理信息系统及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002
 89. 郝丽莎, 赵媛. 长江三角洲区域可持续发展系统的构建[J]. 人文地理, 2006, (1): 84-87
 90. 何萍, 李宏波, 束炯, 等. 楚雄市城市气候特征分析——兼谈中国主要城市热岛强度对比分析[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 712-720
 91. 何瑞珍, 闫东峰, 张敬东, 等. 基于马尔可夫模型的郑州市土地利用动态变化预测[J]. 中国农学通报, 2006, 22(9): 435-437
 92. 何新华. 应用计量经济学[C]. 世界经济与政治研究所工作论文系列——学科发展综述, 2001, (2)
 93. 胡金柱. 模糊决策与决策支持系统[M]. 武汉: 华中师大出版社, 1989
 94. 胡静, 陈银蓉. 城市规模灰色系统动力分析及预测[J]. 城市管理与科技, 2005, 7(5): 186-188
 95. 胡奇英, 刘建庸. 马尔可夫决策过程引论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000
 96. 胡启洲, 常玉林. 城市公交线网多目标优化的建模及其求解[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2003, 24(6): 88-90
 97. 胡庆国, 张可能, 何忠明, 等. 灰色预测模型在基坑变形中的应用[J]. 矿冶工程, 2006, 26(4): 13-15
 98. 胡志斌, 何兴元等. 基于 CITYgreen 模型的城市森林管理信息系统的构建与应用[J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 181-185
 99. 黄明华, 孙立, 陈洋, 等. 城市动态规划的理论、方法与实践——兼谈榆林城市总体规划[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2002, 22(2): 23-26
 100. 黄小青. 城市协调发展动力学模型[J]. 计算机仿真, 2005, 22(8): 65-68
 101. 黄杏元, 马劲松, 汤勤. 地理信息系统概论(第 2 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001
 102. 黄振中, 王艳, 李思一, 等. 中国可持续发展系统动力学仿真模型[J]. 计算机仿真, 1997, 14(4): 3-7
 103. 季红蕾. 港口规划的贝叶斯决策分析[J]. 江苏经贸职业技术学院学报, 1999, (4): 58-61
 104. 江静, 钱永甫. 南海地区降水的时空特征[J]. 气象学报, 2000, 58(1): 60-69
 105. 姜昌华, 韩伟, 胡幼华. REPAST——一个多 Agent 仿真平台[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8): 2319-2322
 106. 姜桂艳, 江龙晖, 王江锋. 城市快速路交通拥挤识别方法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 87-91
 107. 蒋恒恒, 罗玉军. GIS 技术在城市建设决策支持系统中的应用初探[J]. 电脑与信息技术, 2002, 3
 108. 焦瑞峰, 吴昊, 师洋. 基于灰色关联分析的蒙特卡罗法建立水库出库水质预测模型[J]. 环境工程, 2006, 24(4): 63-66
 109. 焦叶芬. 重庆市城市土地经济效益评价研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2006, 23(1): 76-80
 110. 金鑫. 农业非点源污染模型研究进展及发展方向[J]. 山西水利科技, 2005, (1): 15-18
 111. 靳文忠, 左鲁梅, 黄心渊. 城市仿真中地形的快速构建方法[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1732-1734
 112. 景方. 城市发展模型的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2003
 113. 孔凡娥, 周春山. 广州城市腹地划分及变化研究[J]. 城市发展研究, 2006, 13(4): 7-12
 114. 赖红松, 董品杰. 基于灰色预测和神经网络的城市建设用地量预测[J]. 测绘信息与工程, 2003, 28(6): 36-39

115. 赖红松, 祝国瑞, 董品杰. 基于灰色预测和神经网络的人口预测[J]. 经济地理, 2004, 24(2): 197-201
116. 赖力, 黄贤金, 刘伟良, 等. 基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析——以 2002 年江苏省经济为例[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1285-1292
117. 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 19-27
118. 李春光. 城市景观三维重建与可视化表达[D]. 武汉: 武汉大学, 2004
119. 李存军, 杨儒贵, 靳蕃. 基于神经网络的交通信息融合预测方法[J]. 系统工程, 2004, 22(3): 80-83
120. 李德庆, 张悟移. 云南省产业发展方向预测研究[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2002, 27(4): 143-147
121. 李红, 杨小凯. 利用层次分析法确定水库选址问题[J]. 海河水利, 2004, (4): 54-56
122. 李建新. 遥感与地理信息系统[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006
123. 李军, 徐玖平. 运筹学—非线性系统优化[M]. 北京: 科学出版社, 2003
124. 李俊莉, 王慧, 曹明明. 开发区对中国城市影响贡献度的灰色关联分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2005, 35(4): 457-460
125. 李利军, 孙利华. 城市道路网可视化仿真的实现[J]. 计算机与数字工程, 2006, 34(10): 136-138
126. 李清泉, 杨必胜, 史文中, 等. 三维空间数据的实时获取、建模与可视化[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003
127. 李伟, 何东之, 李润梅. 基于 Multi-Agent 的多车道交通流的分布式仿真研究[J]. 计算机仿真, 2005, 22(2): 191-194
128. 李小建. 经济地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004
129. 李新延, 李德仁. 应用多主体系统预测和分析城市用地变化[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(5): 109-113
130. 李亚军, 杨忠振. 城市交通规划中的交通方式结构[J]. 大连海事大学学报(社会科学版), 2005, 4(4): 38-41
131. 李英, 马寿峰. 基于 agent 的仿真系统建模[J]. 系统工程学报, 2006, 21(3): 225-231
132. 梁祺, 王慧敏, 张显清. 江苏区域经济发展水平差距成因的实证分析[J]. 江苏商论, 2004, (1): 126-127
133. 林宗坚, 张永红. 遥感与地理信息系统数据的信息量及不确定性[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(7): 569-572
134. 刘丹, 郑坤, 彭黎辉. 组件技术在 GIS 系统中的研究与应用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(3): 263-266
135. 刘烽, 吴增茂. 城市大气质量模式研究进展[J]. 科学进展, 1999, 7(2): 22-29
136. 刘俊, 田崇新, 张小燕, 等. 马尔可夫链在地价预测模型中的应用研究[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2005, 28(3): 121-126
137. 刘楷 译. 与计算机技术创造性结合的规划支持系统[J]. 国外城市规划建设, 2003, 18(5): 15-20
138. 刘敏, 王倩, 陈莲华. 用系统分析法进行区域分析[J]. 聊城师院学报(自然科学版), 2001, 14(1): 79-81
139. 刘守芳, 刘沙, 李铁松. 城市垃圾产生量预测研究[J]. 云南环境科学, 2006, 25(1): 28-30
140. 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用(第 2 版)[M]. 北京: 科学出版社, 1999
141. 刘卫东. 日照港铁矿石运输枢纽发展战略规划决策[J]. 物流技术, 2005, (5): 91-93
142. 刘运通等. 交通系统仿真技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002
143. 刘兆金. 论水环境综合整治规划——以浦东运河为例[J]. 给水排水, 1996, 22(12): 54-58
144. 刘志学, 张宝洲, 邹安全, 等. 城市物流战略规划环境分析方法及其应用[J]. 系统工程, 2005, 23(3): 47-50
145. 龙瀛, 贾海峰. 城市公用事业设施管理 AF-FM-SS-RM 解决方案初步研究[J]. 测绘通报, 2004, 12
146. 龙瀛. 建筑给排水 CAD 系统空间相容性分析模块的开发[J]. 中国给水排水, 2004, 20(2)
147. 陆宁, 陆路, 霍小平, 等. 生态城市规划方案的综合评价[J]. 城市问题, 2006, (4): 22-26
148. 鹿成, 王仲奇. 蒙特卡罗方法及其应用[M]. 北京: 海洋出版社, 1998

149. 吕志慧. 地理信息可视化系统应用研究[D]. 硕士学位论文. 河南: 郑州大学, 2002
150. 栾维新, 王茂军. 农村建设用地的区域类型与调控措施研究——以大连市城乡建设用地调控研究为例[J]. 资源科学, 2000, 22(2): 45-49
151. 罗积玉, 刑瑛. 经济统计分析方法及预测[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.
152. 罗细芳, 姚小华. 水土流失机理与模型研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(5): 513-817
153. 马勇等. GIS 在城市给水排水中的应用[J], 城市环境与城市生态, 2003, 16(5): 10-12
154. 孟志勇, 等. 工程建设用地评价及管理科学化[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003
155. 宓瑞红, 王文新. 马尔可夫链在贫困县农村劳动力流动趋势预测中的应用[J]. 数理统计与管理, 2005, 25(4): 42-45
156. 倪金生, 李琦, 曹学军. 遥感与地理信息系统基本理论和实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004
157. 聂庆华. 地理信息系统及其在环境科学中的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
158. 牛文元. 现代应用地理[M]. 北京: 科学出版社, 1987
159. 钮心毅. 地理信息系统在城市设计中的应用[J]. 城市规划汇刊, 2002, (4): 41-46
160. 欧海涛, 张卫东, 许晓鸣. 基于 RMM 和贝叶斯学习的城市交通多智能体系统[J]. 控制与决策, 2001, 16(3): 291-295
161. 潘爱民. COM 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999
162. 潘海啸. 城市空间的解构——物质性战略规划中的城市模型[J]. 城市规划汇刊, 1999, (4): 18-26
163. 裴玉龙. 道路交通系统仿真[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004
164. 朴庆日, 吕斌, 赵鹏军. 城市功能区划的数量化方法研究及其在应用——以深圳市南山区物流中心选址为例[J]. 地域研究与开发, 2003, 22(1): 5-9
165. 乔相飞, 周宏伟, 刘文新. 城市规划中的 GIS 应用分析[J]. 测绘工程, 2005, 14(4): 69-71
166. 秦小虎, 刘利, 张颖. 一种基于贝叶斯网络模型的交通事故预测方法[J]. 计算机仿真, 2005, 22(11): 230-232
167. 全为民, 严力蛟, 虞左明, 焦荔. 湖泊富营养化模型研究进展[J]. 生物多样性, 2001, 9(2): 168-175
168. 饶群, 芮孝芳. 富营养化机理及数学模拟研究进展[J]. 水文, 2001, 21(2): 15-18
169. 任剑, 王坚强. 区域产业的非均衡协调发展研究[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(8): 118-120
170. 邵玉林. 天津市工业污染治理费用函数研究[J]. 城市环境与城市生态, 1999, 12(1)
171. 申维. 自组织理论和耗散结构理论及其地学应用[J]. 地质地球化学, 2001, 29(3): 1-7
172. 沈琪, 马金辉. 高分辨率遥感数据在现代城市规划中的应用[J]. 甘肃科学学报, 2006, 18(1): 44-48
173. 石英, 朱德举, 程锋, 等. 属性层次模型在乡级基本农田保护区布局优化中的应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 27-31
174. 宋关福, 钟耳顺. 组件式地理信息系统研究与开发[J]. 中国图像图形学报, 1998, 3(4): 313-317
175. 宋巍, 齐智敏. 应用蒙特卡洛法(Monte Carlo)计算城市公交线路的覆盖率[J]. 辽东学院学报(自然科学版), 2005, 12(4): 22-24
176. 宋小冬. 城市规划管理信息系统建设的一般途径[J]. 城市规划, 2006, 30(1)
177. 苏小康, 曾光明, 秦肖生, 等. 湘江水质随机模拟与风险分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33(2): 106-109
178. 隋玉正, 李淑娟, 陈戈. 基于 GIS 的青岛旅游交通网络空间分析[J]. 青岛理工大学学报, 2006, 27(2): 103-106
179. 孙汉青, 卢明山. 城市规划信息系统初探[J]. 测绘软科学研究, 2002, 8(4)
180. 孙培德, 楼菊青. 环境系统模型及数值模拟[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005
181. 孙文, 周芳红. 渭南市城市水资源优化调度研究[J]. 甘肃科技, 2006, 22(5): 18-31
182. 孙秀锋, 刁承泰, 何丹. 我国城市人口、建设用地规模预测[J]. 现代城市研究, 2005, (10): 48-51
183. 孙颖, 陈肇和, 范晓娜, 李志群. 河流及水库水质模型与通用软件综述[J]. 水资源保护, 2001, (2): 7-11

184. 孙占山, 方美琪, 陈禹. 决策支持系统及其应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 1997
185. 孙战利. 基于元胞自动机的地理时空动态模拟研究[D]. 北京: 中国科学院, 1999: 23-45
186. 汤洁, 余孝云, 林年丰. 吉林省大安市生态环境规划系统动力学仿真模型[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1178-1183
187. 滕玮峰. 旅游安全因素重要权值分析——AHP 及计算机分析软件的运用[J]. 浙江万里学院学报, 2004, 17(5): 49-52
188. 田继敏, 赵纯均, 黄京炜, 等. 城市土地利用规划的交通影响评价建模研究[J]. 中国管理科学, 1998, (3): 16-26
189. 董祯恭. 供水管网水质建模研究[J]. 华东交通大学学报, 2006, 23(5): 51-54
190. 万剑华, 李桂苓, 张纪松. 基于 OpenGL 的三维城市景观模型的建立[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(1): 102-106
191. 汪东川, 卢玉东. 国外土壤侵蚀模型发展概述[J]. 水土保持科学, 2004, 2(2): 35-40
192. 汪家权, 陈众, 武君. 河流水质模型及其发展趋势[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2004, 27(3): 242-247
193. 汪树玉, 刘国华. 系统分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002
194. 王爱萍, 郑新奇. 基于 SD 的土地利用总体规划—以无棣县为例[J]. 山东师大学报(自然科学版), 2001, 16(4): 437-442
195. 王安麟. 复杂系统的分析与建模[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004
196. 王丹. GIS 技术在城市供水管网中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(2): 92-94
197. 王栋. 杭州生态规划决策支持系统的可视化技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2004
198. 王富康, 王曙光等. 工业废水和城市污水处理技术经济手册[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992
199. 王海燕. 循环经济理论下的城市固体废物物流系统优化模型[J]. 物流技术, 2005, (10): 287-289
200. 王海珍, 张利权. 基于 GIS、景观格局和网络分析法的厦门本岛生态网络规划[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 144-152
201. 王皓, 光洁, 孙云峰. 城市交通管理中的出租车规划[J]. 数学的实践与认识, 2006, (7)
202. 王红, 赵红蕊, 高劲松. 遥感图像成图尺度问题初探[J]. 地矿测绘, 2004, 20(3): 8-10
203. 王宏伟. 城市空间结构增长的分析决策方法研究——以玉溪市为例[J]. 地域研究与开发, 2004, 23(5): 1-5
204. 王家辉. 空间信息系统原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001
205. 王磊. 可视化在城市规划辅助设计管理中的应用[J]. 智能建筑与城市信息, 2003, (5): 66-71
206. 王明文, 关宏志, 刘兰辉, 等. 港口城市规划中港口的功能定位——以温州港为例[J]. 北京工业大学学报, 2003, 29(1): 43-46
207. 王圃, 江志贤, 石长恩. 城市供水系统的节能与优化[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(4): 53-59
208. 王强, 高继建. 营区规划的最优灰色决策[J]. 重庆工业高等专科学校学报, 2002, 17(1): 50-53
209. 王秋平, 谭学龙, 张生瑞. 城市单点交叉口信号配时优化[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(2): 60-64
210. 王晓春, 李辉等. 7 种乔木对 SO₂ 清除能力的定量评价[J]. 中国城市林业, 2005, 3(2): 57-60
211. 王新生, 姜友华. 模拟退火算法用于产生城市土地空间布局方案[J]. 地理研究, 2004, 23(6): 727-736
212. 王兴菊, 赵然杭. 马尔可夫动态规划及其应用研究[J]. 西北水电, 2002, (1): 12-16
213. 王秀峰, 卢桂章. 系统建模与辨识[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004
214. 王铮, 等. 理论经济地理学[M]. 北京: 科学出版社, 2002
215. 王正林, 刘明. 精通 MATLAB 7[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006
216. 位欣, 陈翠芳, 陈华. 城市土地利用变化及其驱动力分析[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(4): 482-486
217. 魏国孝, 马金珠, 赵华, 等. 甘肃省生态环境综合评价指标体系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(8): 7-11

218. 郭建国. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
219. 郭伦, 刘瑜, 张晶等. 地理信息系统——原理、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001
220. 吴健平, 张立. 卫星遥感技术在城市规划中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(1): 52-56
221. 吴时强. 城市暴雨雨水水质管理模型简介[J]. 水利水运科学研究, 1996, (4): 364-369
222. 武志峰, 李红, 李冰. 基于投入产出理论的资源环境综合核算[J]. 煤炭经济研究, 2006, (7): 34-36
223. 谢金星, 薛毅. 优化建模与LINDO/LINGO软件[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
224. 谢莹莹, 刘遂庆, 信昆仑. 城市暴雨模型发展现状与趋势[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(5): 136-139
225. 熊云波, 吴玉鸣. GIS支持下土地利用空间演变过程的马尔可夫模拟研究——以上海市中心城区为例[J]. 南阳师范学院学报, 2002, 1(6): 87-92
226. 徐建华. 现代地理学中的数学方法(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002
227. 徐乐昌. 地下水模拟常用软件介绍[J]. 铀矿冶, 2002, 21(1): 34-38
228. 徐敏, 曾光明, 谢更新, 等. 混沌优化方法在灰色非线性水环境规划中的应用[J]. 水电能源科学, 2003, 21(3): 21-23
229. 徐振华, 李挺. 3S技术在城市规划中的最新应用前景[J]. 信息技术, 2005, (9): 64-67
230. 许冬焱. 论复合种群的理论与模型在保护生物学中的应用[J]. 肇庆学院学报, 2003, 24(5): 48-51
231. 许刚, 洪赟, 吕谋, 等. 城市给水管网状态模拟方法探讨[J]. 水利水电技术, 2005, 36(7): 129-131
232. 许国志. 系统科学[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000
233. 许仕荣, 周永潮, 张伟. 基于Monte Carlo法的城市雨水径流污染负荷模拟[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(5): 57-62
234. 许学强, 朱剑如. 现代城市地理学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988
235. 薛领, 杨开忠, 沈体雁. 基于agent的建模——地理计算的新发展[J]. 地球科学进展, 2004, 19(2): 305-311
236. 薛领, 杨开忠. 城市演化的多主体(multi-agent)模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003, (12): 1-10
237. 薛小杰, 谭克龙. 元胞自动机模型在地学中的研究进展[J]. 中国煤田地质, 2005, 17(3): 12-14
238. 严荣华, 王良发, 等. 城市规划管理信息系统的开发与实践[J]. 测绘通报, 2001, 8
239. 严艳. 新疆旅游业发展规划布局的方案选择[J]. 西安联合大学学报, 1999, 2(2): 95-98
240. 颜景暘. 城市规划设计中的计算机仿真技术及其应用[J]. 金陵科技学院学报, 2006, 22(3): 38-41
241. 杨必胜, 李清泉, 梅宝燕. 3维城市模型的可视化研究[J]. 测绘学报, 2000, 29(2): 149-154
242. 杨长保, 丁继红. 面向对象的遥感图像分类方法研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(4): 642-646
243. 杨龙海, 李丽兰, 陈洪仁. 城市信号控制交叉口交通微观仿真研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1139-1142
244. 杨文建, 侯晓明. 移民安置点优化选择中多属性效用理论的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2002, 23(3): 69-71
245. 叶嘉安, 宋小东, 钮心毅, 等. 地理信息与规划支持系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006
246. 叶俊, 陈秉钊. 分形理论在城市研究中的应用[J]. 城市规划汇刊, 2001, (4): 38-43
247. 叶义成, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006
248. 叶玉玲, 季令. 城际轨道交通线网规划综合评价研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(5): 24-30
249. 尤红建, 苏林. 基于机载激光扫描数据提取建筑物的研究现状[J]. 测绘科学, 2005, 30(5): 114-118
250. 游文霞, 王先甲. StarLogo在基于agent复杂系统建模与仿真中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(3): 91-96
251. 喻良, 伊武军. 层次分析法在城市生态环境质量评价中的应用[J]. 四川环境, 2002, 21(4): 38-40
252. 岳琪, 沈冰. 模拟退火算法在单目标规划问题中的应用[J]. 信息技术, 2006, (5): 27-29
253. 臧鸿晓. 系统仿真方法在环境规划预测中的应用[J]. 污染防治技术, 2006, 19(4): 29-31

254. 曾光. 基于人工神经网络的高新区建设与城市发展关系研究[J]. 世界经济情况, 2006, (9): 30-34
255. 张奔, 何大愚. 电源规划与数学模型[M]. 北京: 能源出版社, 1989
256. 张波. 湖北省人均 GDP 时间序列模型及预测[J]. 中南财经政法大学研究生学报, 2006, (2): 95-100
257. 张超, 沈建法. 地理系统工程[M]. 北京: 科学出版社, 1993
258. 张帆, 史琼芳. 达汉桥. Creator 应用于虚拟城市三维建模的关键技术与实践[J]. 测绘工程, 2005, 14(4): 55-57
259. 张凡, 吴晓军, 郭鹏. CAS 理论在城市地价建模仿真中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2006, 23(1): 222-225
260. 张金牡, 吴波, 沈体雁. 基于 Agent 模型的北京市土地利用变化动态模拟研究[J]. 东华理工学院学报(自然科学版), 2004, 27(1): 80-86
261. 张卡, 盛业华, 张书毕. 遥感新技术的若干进展及其应用[J]. 遥感信息, 2004, (2): 58-62
262. 张林峰, 范炳全, 严广乐, 等. 交通影响下的城市中心演化系统动力学模型及仿真研究[J]. 系统工程, 2004, 22(5): 61-65
263. 张明, 王体健, 金龙山, 等. 城市街渠大气湍流结构的小波分析[J]. 气象科学, 2003, 23(2): 224-230
264. 张树安. 民族地区人口与经济可持续发展论[M]. 北京: 民族出版社, 2005
265. 张渭军, 王文科, 孔金玲, 等. 基于移动趋势面的降水雨量分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 95-97
266. 张小林, 继生, 冯春萍. 人文地理学导论[M]. 北京: 测绘出版社, 1995: 179-183
267. 张晓萍. 物流系统仿真原理与应用[M]. 北京: 中国物资出版社, 2005
268. 张效令. 贝叶斯动态模型及其预测[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1992
269. 张新生. 城市空间动力学模型研究及应用[D]. 北京: 中国科学院地理所, 1997: 32-58
270. 张雪飞, 程水源, 郭秀锐, 等. 多目标优化方法在区域水资源优化配置中的应用——以唐山市为例[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(4): 73-77
271. 张妍, 尚金城. 开发区环境规划决策支持系统的研制与应用[J]. 科学学与科学技术管理, 2002, 5
272. 张译, 张毅, 胡坚明. 城市公共交通网络的拓扑性质分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(4): 57-63
273. 张瑛, 阮晓红. 农业非点源模型——AGNPS 概述[J]. 四川环境, 2003, 22(5): 63-66
274. 张正栋. 地理信息系统原理、应用与工程[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005
275. 张志涌, 徐彦琴. MATLAB 教程——基于 6.x 版本[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001
276. 赵凛, 张星臣. 基于 Repast 平台的城市交通系统仿真建模研究[J]. 物流技术, 2006, (7): 117-120
277. 赵强, 胡连生. 略论城市模型研究的发展趋势及展望[J]. 现代城市研究, 2006, (2): 30-32
278. 赵童. 国外城市土地利用——交通系统一体化模型[J]. 经济地理, 2000, (6): 79-83
279. 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999
280. 周春山, 陈素素, 罗彦. 广州市建成区住房空间结构及其成因[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 77-88
281. 周德群. 系统工程概论[M]. 北京: 科学出版社, 2005
282. 周国华, 邓新忠, 贺艳华. 基于地价指数的城市地价走势预测研究——以湖南省湘潭市为例[J]. 中国土地科学, 2006, 20(3): 38-43
283. 周均扬. 贝叶斯动态线性模型介绍及常量模型分析[D]. 广州: 中山大学, 2003
284. 周天勇. 托达罗模型的缺陷及其相反的政策含义——中国剩余劳动力转移和就业空量扩张的思路[J]. 经济研究, 2001, (3): 75-82
285. 周伟林, 严冀, 等. 城市经济学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2004
286. 周溪召, 应伟恒. 城市综合交通规划的组合模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(7): 824-828
287. 朱庆杰, 陈静, 卢时林, 等. 贝叶斯预测模型在气温变化预测中的应用[J]. 河北理工学院学报, 2002, 24(4): 91-98
288. 朱述龙, 朱宝山, 王红卫. 遥感图像处理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006

289. 朱玮, 王德. 大尺度城市模型与城市规划[J]. 城市规划, 2003, (5): 47-54
290. 朱卫军, 邹峥嵘, 邹杰. 虚拟现实技术在城市规划中的应用研究与实践[J]. 测绘与空间地理信息, 2006, 29(2): 125-127
291. 朱文明, 陶康华. 长江三角洲城镇空间格局与区域经济相关分析[J]. 现代城市研究, 2000, (1): 12-16
292. 左文喆, 姜国虎, 刘善军. 基于组件式 GIS 的唐山市区环境地质评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2006, 17(3): 1-4

-
- [1] 胡金柱. 模糊决策与决策支持系统[M]. 武汉: 华中师大出版社, 1989
- [2] Harris, B. Plan or Projection: An Examination of the Use of Models in Planning[J]. Journal of the American Institute of Planners, 1960, 26(4): 365-272
- [3] 刘楷 译. 与计算机技术创造性结合的规划支持系统[J]. 国外城市规划建设, 2003, 18(5): 15-20
- [4] Harris B, Batty M. Locational models, geographic information, and planning support systems[J]. Journal of Planning Education and Research, 1993, (12): 184-98
- [5] Klosterman, Richard E. Planning support systems: A new perspective on computer-aided planning[J]. Journal of Planning Education and Research, 1997, 17(1)
- [6] Bishop, I. Planning support: hardware and software in search of a system[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1998, 22(3): 189-202
- [7] Hopkins, Lewis D. Structure of a Planning Support System for Urban Development[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1999, (26): 333-343
- [8] Stan Geertman, John Stillwell. Planning support systems an inventory of current practice[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2004, (28): 291-310
- [9] Stillwell, J. Planning Support Systems in Practice (Advances in Spatial Science)[M]. Springer, 2002.
- [10] P. Rizze. Computers in urban planning and urban management at the turn of the millennium[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1999, (23): 147-150.
- [11] Harris B. Beyond geographic information systems: computers and the planning professional[J]. Journal of the American Planning Association, 1989, 55: 85-92
- [12] Batty M. Planning support systems and the new logic of computation[C]. Regional Development Dialogue, 1995, 16: 1-17
- [13] Klosterman R E. Planning support systems[C]. In Wyatt R, Hossain H (eds) Proceedings, Fourth International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management. Melbourne, 1995, July, (1): 19-35
- [14] 龙瀛, 贾海峰. 城市公用事业设施管理 AF-FM-SS-RM 解决方案初步研究[J]. 测绘通报, 2004, 12
- [15] 杜宁睿, 李渊. 规划支持系统 (PSS) 及其在城市空间规划决策中的应用[J]. 武汉大学学报 (工学版). 2005, 38(1): 137-142
- [16] 宋小冬. 城市规划管理信息系统建设的一般途径[J]. 城市规划, 2006, 30(1)
- [17] 严荣华, 王良发, 等. 城市规划管理信息系统的开发与实践[J]. 测绘通报, 2001, 8
- [18] 孙汉青, 卢明山. 城市规划信息系统初探[J]. 测绘软科学研究, 2002, 8(4)
- [19] 丁建伟, 谢明, 黄伟. 城市规划信息系统的可持续发展[J]. 城市规划, 2001, 25(8)
- [20] 陈顺清. 试论城市规划信息系统(UPIS) [J]. 城市规划, 1998, 22(6)
- [21] 蒋恒恒, 罗玉军. GIS 技术在城市建设决策支持系统中的应用初探[J]. 电脑与信息技术, 2002, 3
- [22] 张妍, 尚金城. 开发区环境规划决策支持系统的研制与应用[J]. 科学与科学技术管理, 2002, 5
- [23] 汪树玉, 刘国华. 系统分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002
- [24] Qian X S, Yu J Y, Dai R W. A new discipline of science-the study of open complex giant system and its methodology[J]. Nature Journal, 1990, 13(1): 3-10
- [25] 成伟光, 李军. 论地理系统结构[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 1999, 23(2): 278-281
- [26] Burton I. The quantitative revolution and theoretical geography[M]. Canadian Geographer, 1963
- [27] 陈彦光. 地理数学方法: 从计量地理到地理计算[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2005, 39(1):

- [28] 徐建华. 现代地理学中的数学方法(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002
- [29] 张超, 沈建法. 地理系统工程[M]. 北京: 科学出版社, 1993
- [30] 李德庆, 张悟移. 云南省产业发展方向预测研究[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2002, 27(4): 143-147
- [31] 魏国孝, 马金珠, 赵华, 等. 甘肃省生态环境综合评价指标体系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(8): 7-11
- [32] 刘志学, 张宝洲, 邹安全, 等. 城市物流战略规划环境分析方法及其应用[J]. 系统工程, 2005, 23(3): 47-50
- [33] 孙秀锋, 刁承泰, 何丹. 我国城市人口、建设用地规模预测[J]. 现代城市研究, 2005, (10): 48-51
- [34] 刘守芳, 刘沙, 李铁松. 城市垃圾产生量预测研究[J]. 云南环境科学, 2006, 25(1): 28-30
- [35] 王秀峰, 卢桂章. 系统建模与辨识[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004
- [36] 郭齐胜, 杨秀月, 王杏林, 等. 系统建模[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006
- [37] 王安麟. 复杂系统的分析与建模[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004
- [38] 赖红松, 董品杰. 基于灰色预测和神经网络的城市建设用地量预测[J]. 测绘信息与工程, 2003, 28(6): 36-39
- [39] 李存军, 杨儒贵, 靳蕃. 基于神经网络的交通信息融合预测方法[J]. 系统工程, 2004, 22(3): 80-83
- [40] 曾光. 基于人工神经网络的高新区建设与城市发展关系研究[J]. 世界经济情况, 2006, (9): 30-34
- [41] 王明文, 关宏志, 刘兰辉, 等. 港口城市规划中港口的功能定位——以温州港为例[J]. 北京工业大学学报, 2003, 29(1): 43-46
- [42] 张波. 湖北省人均 GDP 时间序列模型及预测[J]. 中南财经政法大学研究生学报, 2006, (2): 95-100
- [43] 周均扬. 贝叶斯动态线性模型介绍及常量模型分析[D]. 广州: 中山大学, 2003
- [44] 张效令. 贝叶斯动态模型及其预测[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1992
- [45] 朱庆杰, 陈静, 卢时林, 等. 贝叶斯预测模型在气温变化预测中的应用[J]. 河北理工学院学报, 2002, 24(4): 91-98
- [46] 周国华, 邓新忠, 贺艳华. 基于地价指数的城市地价走势预测研究——以湖南省湘潭市为例[J]. 中国土地科学, 2006, 20(3): 38-43
- [47] 秦小虎, 刘利, 张颖. 一种基于贝叶斯网络模型的交通事故预测方法[J]. 计算机仿真, 2005, 22(11): 230-232
- [48] 胡庆国, 张可能, 何忠明, 等. 灰色预测模型在基坑变形中的应用[J]. 矿冶工程, 2006, 26(4): 13-15
- [49] 赖红松, 祝国瑞, 董品杰. 基于灰色预测和神经网络的人口预测[J]. 经济地理, 2004, 24(2): 197-201
- [50] 高红建, 蔡锦忠, 潘焕祥. 灰色理论在城市总体规划中的应用研究[J]. 基建优化, 2005, 26(5): 106-109
- [51] 胡静, 陈银蓉. 城市规模灰色系统动力分析及预测[J]. 城市管理与科技, 2005, 7(5): 186-188
- [52] 鹿成, 王仲奇. 蒙特卡罗方法及其应用[M]. 北京: 海洋出版社, 1998
- [53] 陈涛, 陈森发. 涨落后的城市道路交通拥挤蒙特卡罗预测[J]. 系统工程理论与实践, 2004, (12): 123-127
- [54] 焦瑞峰, 吴昊, 师洋. 基于灰色关联分析的蒙特卡罗法建立水库出库水质预测模型[J]. 环境工程, 2006, 24(4): 63-66
- [55] 刘俊, 田崇新, 张小燕, 等. 马尔可夫链在地价预测模型中的应用研究[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2005, 28(3): 121-126
- [56] 何瑞珍, 闫东峰, 张敬东, 等. 基于马尔可夫模型的郑州市土地利用动态变化预测[J]. 中国农学通报, 2006, 22(9): 435-437
- [57] 陈禹, 钟佳桂. 系统科学与方法概论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2006
- [58] 周德群. 系统工程概论[M]. 北京: 科学出版社, 2005
- [59] 李利军, 孙利华. 城市道路网可视化仿真的实现[J]. 计算机与数字工程, 2006, 34(10): 136-138

- [60] 杨龙海, 李丽兰, 陈洪仁. 城市信号控制交叉口交通微观仿真研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1139-1142
- [61] 樊立萍, 于海斌, 袁德成. 以河流水质为目标的排污量控制的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005a, 17(3): 728-731
- [62] 颜景昶. 城市规划设计中的计算机仿真技术及其应用[J]. 金陵科技学院学报, 2006, 22(3): 38-41
- [63] 臧鸿晓. 系统仿真方法在环境规划预测中的应用[J]. 污染防治技术, 2006, 19(4): 29-31
- [64] 王爱萍, 郑新奇. 基于 SD 的土地利用总体规划—以无棣县为例[J]. 山东师大学报(自然科学版), 2001, 16(4): 437-442
- [65] 汤洁, 余孝云, 林年丰. 吉林省大安市生态环境规划系统动力学仿真模型[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1178-1183
- [66] 苏小康, 曾光明, 秦肖生, 等. 湘江水质随机模拟与风险分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33(2): 106-109
- [67] 许仕荣, 周永潮, 张伟. 基于 Monte Carlo 法的城市雨水径流污染负荷模拟[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(5): 57-62
- [68] 王皓, 光洁, 孙云峰. 城市交通管理中的出租车规划[J]. 数学的实践与认识, 2006, (7)
- [69] 宋巍, 齐智敏. 应用蒙特卡洛法(Monte Carlo)计算城市公交线路的覆盖率[J]. 辽东学院学报(自然科学版), 2005, 12(4): 22-24
- [70] 郭冻, 夏北成, 江学顶. 基于 GIS 与人工神经网络的广州森林景观生态规划[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005, 44(5): 121-123
- [71] 姜桂艳, 江龙晖, 王江锋. 城市快速路交通拥挤识别方法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 87-91
- [72] 许刚, 洪赟, 吕谋, 等. 城市给水管网状态模拟方法探讨[J]. 水利水电技术, 2005, 36(7): 129-131
- [73] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 19-27
- [74] 许国志. 系统科学[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000
- [75] 申维. 自组织理论和耗散结构理论及其地学应用[J]. 地质地球化学, 2001, 29(3): 1-7
- [76] 薛小杰, 谭克龙. 元胞自动机模型在地学中的研究进展[J]. 中国煤田地质, 2005, 17(3): 12-14
- [77] 郭鹏, 薛惠锋, 赵宁, 等. 基于复杂适应系统理论与 CA 模型的城市增长仿真[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6): 69-63
- [78] 陈森发. 复杂系统建模理论与方法[M]. 南京: 东南大学出版社, 2005
- [79] 薛领, 杨开忠, 沈体雁. 基于 agent 的建模——地理计算的新发展[J]. 地球科学进展, 2004, 19(2): 305-311
- [80] 李英, 马寿峰. 基于 agent 的仿真系统建模[J]. 系统工程学报, 2006, 21(3): 225-231
- [81] 张金牡, 吴波, 沈体雁. 基于 Agent 模型的北京市土地利用变化动态模拟研究[J]. 东华理工学院学报(自然科学版), 2004, 27(1): 80-86
- [82] 薛领, 杨开忠. 城市演化的多主体(multi-agent)模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003, (12): 1-10
- [83] 李新延, 李德仁. 应用多主体系统预测和分析城市用地变化[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(5): 109-113
- [84] 顾珊珊, 陈禹. 复杂适应性系统的仿真与研究——基于 CAS 理论的交通模拟[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 82-86
- [85] 张凡, 吴晓军, 郭鹏. CAS 理论在城市地价建模仿真中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2006, 23(1): 222-225
- [86] 刘敏, 王倩, 陈莲华. 用系统分析法进行区域分析[J]. 聊城师院学报(自然科学版), 2001, 14(1): 79-81
- [87] 郝丽莎, 赵媛. 长江三角洲区域可持续发展系统的构建[J]. 人文地理, 2006, (1): 84-87
- [88] 符国基. 海南岛综合环境功能区划研究[J]. 海南大学学报(人文社会科学版), 2001, 19(1): 37-40
- [89] 陆宁, 陆路, 霍小平, 等. 生态城市规划方案的综合评价[J]. 城市问题, 2006, (4): 22-26

- [90] 左文喆, 姜国虎, 刘善军. 基于组件式 GIS 的唐山市区环境地质评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2006, 17(3): 1-4
- [91] 喻良, 伊武军. 层次分析法在城市生态环境质量评价中的应用[J]. 四川环境, 2002, 21(4): 38-40
- [92] 焦叶芬. 重庆市城市土地经济效益评价研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2006, 23(1): 76-80
- [93] 朱文明, 陶康华. 长江三角洲城镇空间格局与区域经济相关分析[J]. 现代城市研究, 2000, (1): 12-16
- [94] 罗积玉, 刑瑛. 经济统计分析方法及预测[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.
- [95] 栾维新, 王茂军. 农村建设用地的区域类型与调控措施研究——以大连市城乡建设用地调控研究为例[J]. 资源科学, 2000, 22(2): 45-49
- [96] 周春山, 陈素素, 罗彦. 广州市建成区住房空间结构及其成因[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 77-88
- [97] 郭艳桃. 我国 34 个城市土地资源利用效益的聚类分析[J]. 特区经济, 2006, (7): 135-136
- [98] 位欣, 陈翠芳, 陈华. 城市土地利用变化及其驱动力分析[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(4): 482-486
- [99] 孔凡娥, 周春山. 广州城市腹地划分及变化研究[J]. 城市发展研究, 2006, 13(4): 7-12
- [100] 赖力, 黄贤金, 刘伟良, 等. 基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析——以 2002 年江苏省经济为例[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1285-1292
- [101] 武志峰, 李红, 李冰. 基于投入产出理论的资源环境综合核算[J]. 煤炭经济研究, 2006, (7): 34-36
- [102] 张明, 王体健, 金龙山, 等. 城市街渠大气湍流结构的小波分析[J]. 气象科学, 2003, 23(2): 224-230
- [103] 江静, 钱永甫. 南海地区降水的时空特征[J]. 气象学报, 2000, 58(1): 60-69
- [104] 何萍, 李宏波, 束炯, 等. 楚雄市城市气候特征分析——兼谈中国主要城市热岛强度对比分析[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 712-720
- [105] 叶俊, 陈秉钊. 分形理论在城市研究中的应用[J]. 城市规划汇刊, 2001, (4): 38-43
- [106] 冯涛, 吴国玺, 秦耀辰, 等. 基于分形理论的河南省城市规模分布研究[J]. 许昌学院学报, 2006, 25(2): 52-56
- [107] 梁祺, 王慧敏, 张显清. 江苏区域经济发展水平差距成因的实证分析[J]. 江苏商论, 2004, (1): 126-127
- [108] 李俊莉, 王慧, 曹明明. 开发区对中国城市影响贡献度的灰色关联分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2005, 35(4): 457-460
- [109] 张渭军, 王文科, 孔金玲, 等. 基于移动趋势面的降水雨量分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 95-97
- [110] 郭晋平, 张芸香. 森林景观恢复过程中景观要素空间分布格局及其动态研究[J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2021-2029
- [111] 符曦. 系统最优化及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995
- [112] 李亚军, 杨忠振. 城市交通规划中的交通方式结构[J]. 大连海事大学学报(社会科学版), 2005, 4(4): 38-41
- [113] 樊京春, 梁亚娟, 许德平, 等. 城市能源规划中的能源数据处理[J]. 能源工程, 2003, (1): 15-18
- [114] 刘兆金. 论水环境综合整治规划——以浦东运河为例[J]. 给水排水, 1996, 22(12): 54-58
- [115] 王海燕. 循环经济理论下的城市固体废物物流系统优化模型[J]. 物流技术, 2005, (10): 287-289
- [116] 石英, 朱德举, 程锋, 等. 属性层次模型在乡级基本农田保护区布局优化中的应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 27-31
- [117] 李军, 徐玖平. 运筹学—非线性系统优化[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [118] 王圃, 江志贤, 石长恩. 城市供水系统的节能与优化[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(4): 53-59
- [119] 田继敏, 赵纯均, 黄京炜, 等. 城市土地利用规划的交通影响评价建模研究[J]. 中国管理科学, 1998, (3): 16-26
- [120] 胡启洲, 常玉林. 城市公交线网多目标优化的建模及其求解[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2003, 24(6): 88-90

- [121] 张雪飞, 程水源, 郭秀锐, 等. 多目标优化方法在区域水资源优化配置中的应用——以唐山市为例[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(4): 73-77
- [122] 邓聚龙. 多维灰色规划[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1989
- [123] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用(第2版)[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [124] 徐敏, 曾光明, 谢更新, 等. 混沌优化方法在灰色非线性水环境规划中的应用[J]. 水电能源科学, 2003, 21(3): 21-23
- [125] 耿红, 王泽民. 基于灰色线性规划的土地利用结构优化研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(2): 167-175
- [126] 孙文, 周芳红. 渭南市城市水资源优化调度研究[J]. 甘肃科技, 2006, 22(5): 18-31
- [127] 黄明华, 孙立, 陈洋, 等. 城市动态规划的理论、方法与实践——兼谈榆林城市总体规划[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2002, 22(2): 23-26
- [128] 陈国良. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996
- [129] 郭鹏, 薛惠锋, 赵宁, 等. 遗传算法在土地利用优化中的应用[J]. 计算机仿真, 2005, 22(11): 127-129
- [130] 曹玫, 林小涵. 基于遗传算法的城市轨道交通接运公交线网规划[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(4): 568-570
- [131] 王新生, 姜友华. 模拟退火算法用于产生城市土地空间布局方案[J]. 地理研究, 2004, 23(6): 727-736
- [132] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M.P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. Science, 1983, 220: 671-680
- [133] 岳琪, 沈冰. 模拟退火算法在单目标规划问题中的应用[J]. 信息技术, 2006, (5): 27-29
- [134] Aerts J CJH. , Heuvelink G B M. Using simulated annealing for resource allocation[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16(6): 571-587
- [135] 王秋平, 谭学龙, 张生瑞. 城市单点交叉口信号配时优化[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(2): 60-64
- [136] 牛文元. 现代应用地理[M]. 北京: 科学出版社, 1987
- [137] 王海珍, 张利权. 基于 GIS、景观格局和网络分析法的厦门本岛生态网络规划[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 144-152
- [138] 隋玉正, 李淑娟, 陈戈. 基于 GIS 的青岛旅游交通网络空间分析[J]. 青岛理工大学学报, 2006, 27(2): 103-106
- [139] 张译, 张毅, 胡坚明. 城市公共交通网络的拓扑性质分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(4): 57-63
- [140] 严艳. 新疆旅游业发展规划布局的方案选择[J]. 西安联合大学学报, 1999, 2(2): 95-98
- [141] 韩长福, 赵纪新. 效用理论在物业管理信息系统评价中的作用[J]. 集团经济研究, 2006, (10): 113-114
- [142] 周溪召, 应伟恒. 城市综合交通规划的组合模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(7): 824-828
- [143] 杨文建, 侯晓明. 移民安置点优化选择中多属性效用理论的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2002, 23(3): 69-71
- [144] 朴庆日, 吕斌, 赵鹏军. 城市功能区划的数量化方法研究及其应用——以深圳市南山区物流中心选址为例[J]. 地域研究与开发, 2003, 22(1): 5-9
- [145] 叶义成, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006
- [146] 任剑, 王坚强. 区域产业的非均衡协调发展研究[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(8): 118-120
- [147] 王宏伟. 城市空间结构增长的分析决策方法研究——以玉溪市为例[J]. 地域研究与开发, 2004, 23(5): 1-5
- [148] 李红, 杨小凯. 利用层次分析法确定水库选址问题[J]. 海河水利, 2004, (4): 54-56
- [149] 刘卫东. 日照港铁矿石运输枢纽发展战略规划决策[J]. 物流技术, 2005, (5): 91-93
- [150] 叶嘉安, 宋小东, 钮心毅, 等. 地理信息与规划支持系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [151] 欧海涛, 张卫东, 许晓鸣. 基于 RMM 和贝叶斯学习的城市交通多智能体系统[J]. 控制与决策, 2001,

- 16(3): 291-295
- [152] 季红蕾. 港口规划的贝叶斯决策分析[J]. 江苏经贸职业技术学院学报, 1999, (4): 58-61
- [153] 胡奇英, 刘建庸. 马尔可夫决策过程引论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000
- [154] 王兴菊, 赵然杭. 马尔可夫动态规划及其应用研究[J]. 西北水电, 2002, (1): 12-16
- [155] 宓瑞红, 王文新. 马尔可夫链在贫困县农村劳动力流动趋势预测中的应用[J]. 数理统计与管理, 2005, 25(4): 42-45
- [156] 熊云波, 吴玉鸣. GIS 支持下土地利用空间演变过程的马尔可夫模拟研究——以上海市中心城区为例[J]. 南阳师范学院学报, 2002, 1(6): 87-92
- [157] 王强, 高继建. 营区规划的最优灰色决策[J]. 重庆工业高等专科学校学报, 2002, 17(1): 50-53
- [158] 陈启明, 冯立平, 丁翊羽. 灰色局势决策法在城市污水处理厂布局规划中的应用[J]. 上海环境科学, 2000, 19(12): 553-556
- [159] 叶玉玲, 季令. 城际轨道交通线网规划综合评价研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(5): 24-30
- [160] 张志涌, 徐彦琴. MATLAB 教程——基于 6.x 版本[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001
- [161] 谢金星, 薛毅. 优化建模与 LINDO/LINGO 软件[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [162] 丁浩, 杨小平. SWARM——一个支持人工生命建模的面向对象模拟平台[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(5): 569-572
- [163] 姜昌华, 韩伟, 胡幼华. REPAST——一个多 Agent 仿真平台[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8): 2319-2322
- [164] 赵凜, 张星臣. 基于 Repast 平台的城市交通系统仿真建模研究[J]. 物流技术, 2006, (7): 117-120
- [165] 游文霞, 王先甲. StarLogo 在基于 agent 复杂系统建模与仿真中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(3): 91-96
- [166] 李伟, 何东之, 李润梅. 基于 Multi-Agent 的多车道交通流的分布式仿真研究[J]. 计算机仿真, 2005, 22(2): 191-194
- [167] 王正林, 刘明. 精通 MATLAB 7[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006
- [168] 黄小青. 城市协调发展动力学模型[J]. 计算机仿真, 2005, 22(8): 65-68
- [169] 樊立萍, 于海斌, 袁德成. 城市排污系统对河流水质影响的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2005b, 22(5): 251-255
- [170] 黄振中, 王艳, 李思一, 等. 中国可持续发展系统动力学仿真模型[J]. 计算机仿真, 1997, 14(4): 3-7
- [171] 范英英, 刘永, 郭怀成. 北京市水资源供需平衡趋势预测及分析[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(1): 116-120
- [172] 张林峰, 范炳全, 严广乐, 等. 交通影响下的城市中心演化系统动力学模型及仿真研究[J]. 系统工程, 2004, 22(5): 61-65
- [173] 马勇等. GIS 在城市给水排水中的应用[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(5): 10-12
- [174] 王丹. GIS 技术在水管管网中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(2): 92-94
- [175] 曹瑜, 胡光道. 地理信息系统在国内外应用现状[J]. 计算机与现代化, 1999, (3): 1-4
- [176] 黄杏元, 马劲松, 汤勤. 地理信息系统概论(第 2 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001
- [177] 聂庆华. 地理信息系统及其在环境科学中的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- [178] 张正栋. 地理信息系统原理、应用与工程[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005
- [179] 乔相飞, 周宏伟, 刘文新. 城市规划中的 GIS 应用分析[J]. 测绘工程, 2005, 14(4): 69-71
- [180] 陈绍杰. 计算机技术与 GIS 关系的新进展[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2002, 1(2): 26-29
- [181] 郝力. 城市地理信息系统及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002
- [182] 邬伦, 刘瑜, 张晶等. 地理信息系统——原理, 方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [183] 李建新. 遥感与地理信息系统[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006

- [184] 戴昌达, 姜小光, 唐伶俐. 遥感图像应用处理与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [185] 朱述龙, 朱宝山, 王红卫. 遥感图像处理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [186] 杨长保, 丁继红. 面向对象的遥感图像分类方法研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(4): 642-646
- [187] 林宗坚, 张永红. 遥感与地理信息系统数据的信息量及不确定性[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(7): 569-572
- [188] 王红, 赵红蕊, 高劲松. 遥感图像成图尺度问题初探[J]. 地矿测绘, 2004, 20(3): 8-10
- [189] 沈琪, 马金辉. 高分辨率遥感数据在现代城市规划中的应用[J]. 甘肃科学学报, 2006, 18(1): 44-48
- [190] 吴健平, 张立. 卫星遥感技术在城市规划中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(1): 52-56
- [191] 徐振华, 李挺. 3S 技术在城市规划中的最新应用前景[J]. 信息技术, 2005, (9): 64-67
- [192] Yun Zhang. Detection of urban housing development by fusing multisensor satellite data and performing spatial feature post-classification [J]. Int. J. Remote Sensing, 2001, 22 (17): 3339-3355
- [193] 陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [194] 张卡, 盛业华, 张书毕. 遥感新技术的若干进展及其应用[J]. 遥感信息, 2004, (2): 58-62
- [195] 倪金生, 李琦, 曹学军. 遥感与地理信息系统基本理论和实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004
- [196] Richard E Klosterman. Large-Scale Urban Models Retrospect and Prospect[J]. APA Journal winter, 1994, (60): 3-6
- [197] Lee, D.B. Requiem for Large-Scale Models [J]. Journal of the American Institute of Planners, 1973, 39(3): 163-178
- [198] 朱玮, 王德. 大尺度城市模型与城市规划[J]. 城市规划, 2003, (5): 47-54
- [199] Elisabete AlvesdaSilve, 朱玮. 区域 DNA——区域规划中的人工智能[J]. 国外城市规划, 2003, (5): 3-8
- [200] 赵强, 胡连生. 略论城市模型研究的发展趋势及展望[J]. 现代城市研究, 2006, (2): 30-32
- [201] 张小林, 继生, 冯春萍. 人文地理学导论[M]. 北京: 测绘出版社, 1995: 179-183
- [202] 孙战利. 基于元胞自动机的地理时空动态模拟研究[D]. 北京: 中国科学院, 1999: 23-45
- [203] 陈干, 闫国年, 王红. 城市模型的发展及其存在问题[J]. 经济地理, 2000, 20(5): 59-71
- [204] 陈顺清. 城市增长与土地增值[D]. 北京: 中国科学院, 1999: 23-122
- [205] 景方. 城市发展模型的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2003
- [206] 张新生. 城市空间动力学模型研究及应用[D]. 北京: 中国科学院地理所, 1997: 32-58
- [207] Couclelis H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, (24): 165-174
- [208] Clark, K.C. and Gaydos, L.J. Loose-Coupling a Cellular Automation Model and Gis: Long-Term Urban Growth Preiction For San Francisco and Washingto/Baltimore [J]. Geographical Information Sciences, 1998, 12(7): 699-714
- [209] Wu F. An Empirical Model of Intra-metropolitan Land Use Change in a Chinese City [J]. Environment and Planning B. 1998, (25): 245-263
- [210] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [211] Li Xia. Constrained CA-Model for the Simulation and Planning of Sustainable Urban forms by Using GIS [J]. Environment and Planning B, 2001, (28): 733-753
- [212] Putman, S.H.. Urban Landuse and Transportation Models: a state of the art summary[J]. Transportation Research, 1975, (9): 187-202
- [213] 潘海啸. 城市空间的解构——物质性战略规划中的城市模型[J]. 城市规划汇刊, 1999, (4): 18-26
- [214] Landis. The California Urban Futures Model: a new generation of metropolitan simulation models[J]. Environment and Planning B, 1994, (21): 399-420
- [215] 段瑞兰, 郑新奇. 城市仿真模拟(UrbanSim)及其应用[J]. 现代城市研究, 2004, (1): 65-68

- [216] Clarke, K.C. Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2002, 26(6): 525-552
- [217] 陈学刚. 基于元胞自动机元胞自动机的城市增长模拟研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2005
- [218] 赵童. 国外城市土地利用——交通系统一体化模型[J]. 经济地理, 2000, (6): 79-83
- [219] Kim, T.J. Integrated Urban System modeling: Theory and Practice[M]. Martinus Nijhoff, Norwell, Massachusetts, 1989
- [220] 王铮, 等. 理论经济地理学[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [221] 陈彦光. 城市人口密度衰减的分形模型及其异化形式[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 1999, 12(1): 60-64
- [222] 李小建, 经济地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004
- [223] 孟志勇, 等. 工程建设用地评价及管理科学化[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003
- [224] 许学强, 朱剑如. 现代城市地理学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988
- [225] 张瑛, 阮晓红. 农业非点源模型——AGNPS 概述[J]. 四川环境, 2003, 22(5): 63-66
- [226] 金鑫. 农业非点源污染模型研究进展及发展方向[J]. 山西水利科技, 2005, (1): 15-18
- [227] 罗细芳, 姚小华. 水土流失机理与模型研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(5): 513-817
- [228] 汪东川, 卢玉东. 国外土壤侵蚀模型发展概述[J]. 水土保持科学, 2004, 2(2): 35-40
- [229] 汪家权, 陈众, 武君. 河流水质模型及其发展趋势[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2004, 27(3): 242-247
- [230] 孙颖, 陈肇和, 范晓娜, 李志群. 河流及水库水质模型与通用软件综述[J]. 水资源保护, 2001, (2): 7-11
- [231] 饶群, 芮孝芳. 富营养化机理及数学模拟研究进展[J]. 水文, 2001, 21(2): 15-18
- [232] 全为民, 严力蛟, 虞左明, 焦荔. 湖泊富营养化模型研究进展[J]. 生物多样性, 2001, 9(2): 168-175
- [233] 徐乐昌. 地下水模拟常用软件介绍[J]. 铀矿冶, 2002, 21(1): 34-38
- [234] 邬建国. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- [235] 许冬焱. 论复合种群的理论与模型在保护生物学中的应用[J]. 肇庆学院学报. 2003, 24(5): 48-51
- [236] Daniel B. Botkin. Forest Dynamics ——An Ecological Model[M], 1993
- [237] 陈春云, 余学春, 郑彤. 环境系统数学模型[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003
- [238] 刘烽, 吴增茂. 城市大气质量模式研究进展[J]. 科学进展, 1999, 7(2): 22-29
- [239] 孙培德, 楼菊青. 环境系统模型及数值模拟[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005
- [240] 郭庆旺编著. 现代经济增长模型比较研究[M]. 沈阳: 东北财经大学出版社, 1995
- [241] 周伟林, 严冀, 等. 城市经济学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2004
- [242] 安虎森. 空间经济学原理[M]. 北京: 经济科学出版社, 2005
- [243] 何新华. 应用计量经济学[C]. 世界经济与政治研究所工作论文系列——学科发展综述, 2001, (2)
- [244] 张树安. 民族地区人口与经济可持续发展论[M]. 北京: 民族出版社, 2005
- [245] 周天勇. 托达罗模型的缺陷及其相反的政策含义——中国剩余劳动力转移和就业空量扩张的思路[J]. 经济研究, 2001, (3): 75-82
- [246] 刘运通等. 交通系统仿真技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002
- [247] 裴玉龙. 道路交通系统仿真[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004
- [248] 张晓萍. 物流系统仿真原理与应用[M]. 北京: 中国物资出版社, 2005
- [249] 童祯恭. 供水管网水质建模研究[J]. 华东交通大学学报. 2006, 23(5): 51-54
- [250] 吴时强. 城市暴雨雨水水质管理模型简介[J]. 水利水运科学研究. 1996, (4): 364-369

- [251] 谢莹莹, 刘遂庆, 信昆仑. 城市暴雨模型发展现状与趋势[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(5): 136-139
- [252] 张奔, 何大愚. 电源规划与数学模型[M]. 北京: 能源出版社, 1989
- [253] 杨必胜, 李清泉, 梅宝燕. 3 维城市模型的可视化研究[J]. 测绘学报, 2000, 29(2): 149-154
- [254] 朱卫军, 邹峥嵘, 邹杰. 虚拟现实技术在城市规划中的应用研究与实践[J]. 测绘与空间地理信息, 2006, 29(2): 125-127
- [255] 陈晓勇, 丁松庆. 3 维虚拟现实系统在城市规划中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2006, 29(5): 94-96
- [256] 王栋. 杭州生态规划决策支持系统的可视化技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2004
- [257] 尤红建, 苏林. 基于机载激光扫描数据提取建筑物的研究现状[J]. 测绘科学, 2005, 30(5): 114-118
- [258] 王家辉. 空间信息系统原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [259] 李春光. 城市景观三维重建与可视化表达[D]. 武汉: 武汉大学, 2004
- [260] 艾丽双. 可视化 GIS 在城市规划中的应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2004
- [261] 王磊. 可视化在城市规划辅助设计管理中的应用[J]. 智能建筑与城市信息, 2003, (5): 66-71
- [262] 李清泉, 杨必胜, 史文中, 等. 三维空间数据的实时获取、建模与可视化[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003
- [263] 万剑华, 李桂苓, 张纪松. 基于 OpenGL 的三维城市景观模型的建立[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(1): 102-106
- [264] 钮心毅. 地理信息系统在城市设计中的应用[J]. 城市规划汇刊, 2002, (4): 41-46
- [265] 张帆, 史琼芳, 达汉桥. Creator 应用于虚拟城市三维建模的关键技术与实践[J]. 测绘工程, 2005, 14(4): 55-57
- [266] 靳文忠, 左鲁梅, 黄心渊. 城市仿真中地形的快速构建方法[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1732-1734
- [267] 吕志慧. 地理信息可视化系统应用研究[D]. 硕士学位论文. 河南: 郑州大学, 2002
- [268] 宋关福, 钟耳顺. 组件式地理信息系统研究与开发[J]. 中国图像图形学报, 1998, 3(4): 313-317
- [269] 刘丹, 郑坤, 彭黎辉. 组件技术在 GIS 系统中的研究与应用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(3): 263-266
- [270] (美)Boggs, Michael 著, 邱仲潘译. UML 与 Rational Rose 2002 从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002
- [271] Armstrong Tom, Patton Ron 著, 董梁, 丁杰, 李长业, 等译. ATL 开发指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001
- [272] Andy MacDonald. Building a Geodatabase[M]. ESRI Press, 2001
- [273] (美)Martin Fowler, Kendall Scott 著, 徐家福译. UML 精粹 - 标准对象建模语言简明指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000
- [274] 党安荣, 贾海峰, 易善桢, 等. ArcGIS 8 Desktop 地理信息系统应用指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [275] 高朗, 程声通. AHP 与 SMART 方法在环境工程方案评比中的应用[J]. 辽宁城乡环境科技, 1997, 17(4): 1-3
- [276] 程声通, 高朗. 工程方案选择的权重-属性决策分析方法[J]. 环境科学, 2000, (5): 31-35
- [277] 王富康, 王曙光等. 工业废水和城市污水处理技术经济手册[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992
- [278] 邵玉林. 天津市工业污染治理费用函数研究[J]. 城市环境与城市生态, 1999, 12(1)
- [279] 胡志斌, 何兴元等. 基于 CITYgreen 模型的城市森林管理信息系统的构建与应用[J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 181-185
- [280] 王晓春, 李辉等. 7 种乔木对 SO₂ 清除能力的定量评价[J]. 中国城市林业, 2005, 3(2): 57-60
- [281] Jeff Carmichael, James Tansey, John Robinson. An integrated assessment modeling tool[J]. Global Environmental Change, 2004, (14): 171-183

- [282] 韩洁平, 王欣. 用层次分析法评测联想、海尔、戴尔(中国)三家企业网站[J]. 情报科学, 2003, 21(12): 1289-1301
- [283] 滕玮峰. 旅游安全因素重要权值分析——AHP 及计算机软件的分析运用[J]. 浙江万里学院学报, 2004, 17(5): 49-52
- [284] 龙瀛. 建筑给排水 CAD 系统空间相容性分析模块的开发[J]. 中国给水排水, 2004, 20(2)
- [285] Robert A. Johnston, Tomas de la Barra. Comprehensive regional modeling for long-range planning: linking integrated urban models and geographic information systems[J]. Transportation Research Part A, 2000, 34(2): 125-136
- [286] A.L.Brown, J.K.Affum. A GIS-based environmental modeling system for transportation planners[J]. Computers, Environment, and Urban systems, 2002, (26): 577-590
- [287] Christiane Weber. Interaction model application for urban planning[J]. Landscape and Urban Planning, 2000, (63): 49-60
- [288] 戴慎志, 陈践. 城市给排水工程规划[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1999
- [289] 北京市城市规划局市政规划处. 北京城市用水的节水研究[R], 1984
- [290] 北京市节约用水办公室, 北京市规划设计研究院. 北京市城市节水 2010 年规划研究[R], 1996
- [291] 孙占山, 方美琪, 陈禹. 决策支持系统及其应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 1997
- [292] 潘爱民. COM 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [293] 吴海桥, 刘毅, 等. 基于关系数据库的知识库的建立[J]. 微型电脑应用. 2001, 17(11): 52-55