

城市形态、交通能耗和环境影响集成的多智能体模型

龙瀛^{1,2}, 毛其智¹, 杨东峰³, 王静文⁴

(1. 清华大学建筑学院, 北京 100084; 2. 北京市城市规划设计研究院, 北京 100045;
3. 大连理工大学建筑系, 大连 116024; 4. 北京林业大学园林学院, 北京 100083)

摘要:城市能耗占全球能耗的比重随着城市化率的不断提高而增大,交通能耗作为城市能耗的重要组成部分,已有较多研究证明城市形态对其具有显著影响,这些研究多属于城市间层次,而少有城市内的研究对城市形态与交通能耗、环境影响的关系进行定量识别。本文拟建立城市形态、交通能耗和环境的集成模型,对单一城市内的不同空间组织(即城市形态),如土地使用方式、开发密度、就业中心的数量和分布等,对潜在的通勤交通能耗和环境影响的关系进行定量识别。该模型采用多智能体(multi-agent)方法,一方面针对同一假想空间采用蒙特卡洛方法根据约束条件生成多个城市形态,并采用就业地斑块数目、平均斑块分形指数、香农多样性和平均邻近距离等14个指标表征城市形态。另一方面,固定数量的居民agent在所生成的每个城市形态内,选择居住区位和就业区位,根据通勤距离和社会经济特征选择交通方式,进而计算通勤交通能耗和环境影响,在城市层面统计通勤交通能耗和环境影响总和。最后分析城市形态与通勤交通能耗和环境影响的定量关系,主要得到以下结论,①对于不同的城市空间布局和密度分布,通勤交通能耗的弹性范围约为3倍;②城市形态评价指数中,就业中心斑块的数量是对通勤交通能耗影响最大的变量;③多种城市形态所对应的通勤交通能耗基本呈正态分布。此外,还对城市形状对通勤交通能耗的影响进行了识别,并针对假想空间的多个典型城市形态(如紧凑与分散、单中心与多中心、TOD政策、绿隔政策),进行了通勤交通总量的计算,进而对典型规划理念进行了定量对比。本模型不仅可以用于识别城市形态与通勤交通能耗和环境影响的定量关系,定量对比典型的规划理念,还可以用于空间规划方案的能耗和环境影响评价。

关键词:土地使用;开发强度;交通能耗;环境影响;多智能体;蒙特卡洛

1 引言

随着全球化石能源的快速消耗,环境问题日益严峻,当前气候变暖有90%以上的可能性是由伴随能源消耗的人类活动造成的(IPCC, 2007)。据统计全球大城市消耗的能源占全球的75%,温室气体排放量占世界的80%^[1]。中国城市的能源问题和相应的温室气体减排在未来也将面临较大的挑战^[2-3]。低碳社会(low carbon society, LCS)在这一背景下已经成为当前国际学术界讨论的热点,中国也是其关注的重点^[4-6]。城市规划管理理念方面,土地混合使用、紧凑城市、精明增长等都被认为是通过合理的城市空间组织应对城市能源问题的有效手段。交通能耗作为城市能耗的重要组成部分,已有较多研究证明城市形态对其具有显著影响,既有研究多以整个城市作为研究对象,进行城市间的对比分析,而少有介于城市内的研究对城市形态与交通能耗、环境影响的关系进行定量识别。同时传统的土地利用与交通模型的构建较为严密^[7],要求的基础数据众多,运行时间较长,并不适合发现城市形态对交通能耗和环境影响的一般规律。本文拟针对这一情况,建立城市形态、交通能耗和环境集成的多智能体(multi-agent)模型,对单一城市内的不同空间组织(即城市形态),如土地使用方式、开发密度、就业中心的数量和分布等,对潜在的通勤交通能耗和环境影响的关系进行定量

收稿日期: 2010-04-27 修订日期: 2010-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078213) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.51078213]

作者简介: 龙瀛(1980-),男,博士,高级工程师,中国地理学会会员(S110007674M),主要研究方向为规划支持系统和城市系统微观模拟。E-mail: longying1980@gmail.com

1033-1044 页

识别。

在城市间尺度,影响交通能耗的因素主要有3个方面,城市形态(土地使用特征)、交通系统特征(交通网络可达性、便捷性和服务质量)和社会经济因素(个人与家庭的诸多特征)^[8]。城市形态是节能减排、低碳经济等理念的重要载体,其作为空间规划的重要成果,可以从源头保证城市系统的可持续发展。较早的宏观层面的实证研究就已经显示,城市形态与能源消耗具有较强的相关关系^[9-10],尤其是交通能源消耗(包括货运和客运交通),一般多中心、高密度、混合使用程度高的城市形态,其人均交通能耗如Newman和Kenworthy^[11]研究发现随着人口密度的提高,人均的交通能耗减少;Holden和Norland^[12]通过分析大Oslo区域的8个居住区,发现城市形态与居民生活和交通的能源消耗有显著关系,进而说明紧凑城市是一种可持续的城市形态;Shim等^[13]以每个城市作为样本,分析了城市大小、密度和中心分布模式对交通能耗的影响;Alford和Whiteman^[14]通过评估澳大利亚墨尔本地区内的不同区域的城市形态,分析了交通能源消耗与潜在的城市形态和交通基础设施选择之间的关系。

在微观层面,城市形态对交通出行行为选择、出行总量具有显著影响,进而影响交通能耗,但只是其中的一项因素,所采用的方法主要是基于行为模拟(activity-based modeling),利用的数据多为交通出行日志(travel diary),并将出行者根据出行和就业地的城市形态作为变量进行考虑,以进行定量的评价,在这方面开展的实证研究包括所有出行行为、机动车出行行为、儿童上学行为、步行出行行为、非工作出行等不同方面^[15-22]。Krizek^[23]的研究也显示,同样的家庭居住在不同的社区,其出行行为也会受到影响。

多智能体系统(Multi-agent Systems, MAS)作为基于复杂自适应系统(Complex Adaptive Systems, CAS)理论的自下而上的研究方法,可以用于单一城市内的城市形态和交通能耗关系的推导。MAS中的智能体是运行于动态环境的具有较高自治能力的实体,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,具有知识、信念、责任、承诺等精神状态方面的特征^[24-25]。已有学者基于MAS模拟居民的居住区位选择行为^[26-28]、真实城市的商业设施选址^[29]等。此外,Kii和Doi^[30]构建了基于MAS的土地利用与交通模型,结合空间经济学模型,对紧凑城市政策从生活质量(quality of life, QOL)角度进行评估;Zellner等^[31]在假想空间基于MAS开发了用于评估不同城市政策的模型,提出了6个情景,用于分析其对城市形态、开发密度以及空气质量的影响。本文将采用多智能体方法,但本文侧重评价不同类型城市形态的潜在通勤交通出行总量和能源消耗,进而识别城市形态与通勤交通能耗、环境影响的动态响应关系。

本文旨在回答以下几个问题:不同空间组织对城市通勤交通能耗的影响弹性范围;定量评价城市形态的不同指标对通勤交通能耗的影响程度;不同形状的城市形态对通勤交通能耗的影响;各典型规划理念的潜在交通能耗差异。

2 模型构建

2.1 概念模型

城市形态、交通能耗和环境影响的关系,可以认为是通过城市内的人类活动实现的。例如,城市居民因为各种活动需要,产生城市交通,进而产生交通能源消耗,以及相应的环境影响。本文所构建的集成模型,将侧重以城市居民的通勤交通能耗和相应的环境影响作为研究重点,而其他类别的能源消耗和环境影响将在未来研究中开展。为此,需要识别影响城市交通能耗的因素,总体上,其可以分为两个方面,居民的自身属性特征、偏好,以及城市的物理空间形态。根据王静文等^[8]识别的与通勤交通能耗相关的影响因素,主要分为3个方面:人口社会经济特征、城市形态与交通系统特征(图1)。通勤交通能耗与交通出行频率、出行距离、出行方式直接关联,其中出行频率主要受出行者的社会经济特征影响,出行距离则主

要依赖于土地使用特征,而出行方式的选择则依赖于人口社会经济特征和土地使用特征。因而在考虑城市形态与通勤交通能耗关系时,关注出行距离与出行方式具有非常积极意义。图1中的灰色高亮部分是本文予以考虑的内容。

2.2 模型假设

城市系统特别是交通系统较为复杂,一般利用专业交通模型进行交通出行方式选择、交通量预测等,本文提出的概念模型将对整个城市系统进行若干简化,以实现识别一般规律、测试理念的目的:① 城市为封闭的系统,与外界无交通联系,所有居民都在城市内就业;② 城市地块为统一大小的正方形,交通网络为均质的方格网形状的城市道路,不考虑轨道交通;③ 土地使用方式分为居住地(R)和就业地(C)两种;④ 1个单位容积率(floor-area ratio, FAR)对应1个居民agent居住在一个地块中;⑤ 居民的就业和出行比率均为100%;⑥ 仅考虑居民通勤交通的能耗,不考虑居民生活、娱乐等行为产生的能耗,以及工作期间产生的能耗;⑦ 每个就业地块的就业容量不受限制;⑧ 居民随机选择居住地,即居民进行居住区位选择的过程与居民的社会经济属性无关;⑨ 仅考虑3种出行方式,小汽车、公共汽车、自行车或步行,每种出行方式的单位距离能耗和环境影响固定不变;⑩ 暂时不考虑居民的社会经济属性的分异,用一套居民数据应用于所有形态,即所有形态对应同一组居民。

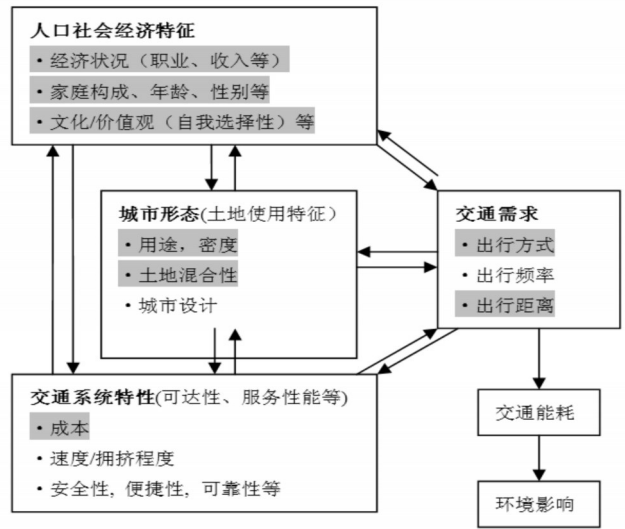


图1 通勤交通能耗的影响因素分析
Fig. 1 Related factors affecting commuting energy cost

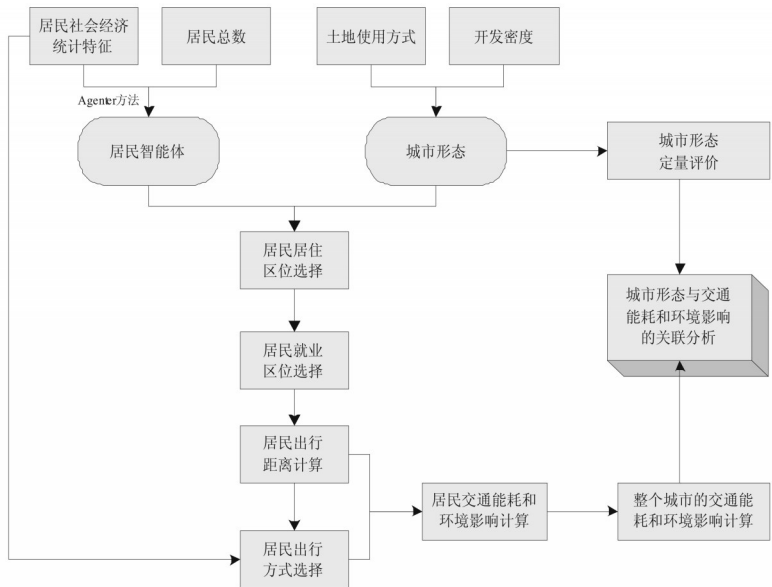


图2 FEE-MAS模型的模拟流程图
Fig. 2 The flow diagram of the FEE-MAS model

2.3 模型开发与模拟流程

本文所建立的城市形态—交通能耗—环境一体的MAS模型(Urban Form-Transportation Energy Consumption-Environment MAS model, FEE-MAS),是基于ESRI ArcGIS的Geoprocessing,利用Python语言开发的,主要包括两个部分,其一是居民agent,其二是应对城市形态的地块(GIS矢量图层)。具体模拟流程见图2。一方面通过设置土地使用方式和开发密度,生成城市形态,并采用定量指标评价所生成的城市形态;另一方面,根据

居民的社会经济统计特征和居民总数,生成居民 agent,其在所生成的城市形态中进行居住区位和就业区位的选择,并根据对应的出行距离,选择出行方式,进而产生交通能耗和环境影响,在整个城市形态层次计算总的交通能耗和环境影响。综合考虑以上两个方面,通过多次模拟,得到多组城市形态与交通能耗和环境影响的对应数据,用于关系分析。下面对模拟流程进行具体介绍。

2.3.1 生成居民 agent 样本 FEE-MAS 模型首先用于虚拟城市的分析,假设共有 2000 个居民在虚拟城市中居住,采用龙瀛等^[32]提出的微观样本反演的方法,基于北京市第五次人口普查的统计资料^[33],生成符合统计特征的居民 agent 样本,为在居民层次评估通勤交通量并计算交通能耗提供数据支持。生成的居民智能体的样本为 $A_{j,s}$ 表示居民的 ID,居民总数 J 为 2000,居民的社会经济属性(如年龄、受教育程度和收入)为 $A_{j,s}$, s 表示社会经济属性的 ID。

2.3.2 生成城市形态、居民选择居住区位 假设虚拟城市为 20×20 , 共计 400 个地块(图 3)。多个城市形态可以采用蒙特卡洛的方法生成。所生成的每个城市形态的居民总数相同,但土地使用方式的分布、开发强度以及就业中心数目不同。每个城市形态设为 F^i , i 表示城市形态的 ID, M 表示地块总数(400), $F^i_{m,FAR}$ 表示形态 i

的 m 地块的 FAR 值(对应居民 agent 数量), $F^i_{m,TYPE}$ 表示形态 i 的 m 地块的用地类型。用地类型分为居住(R)和就业(C)两类,其中 C 类用地网格的个数服从 10 到 40 个的均匀分布。2000 个居民参照 FAR 约束随机地选择 R 类地块居住,如某地块地 FAR 为 3,则会有随机选择的 3 个居民到该地块居住。 AC_m 表示居住在 m 地块的居民 agent 的数目, $\sum_{m=1}^M AC_m = 2000$ 。

2.3.3 居民选择就业区位 居民就业区位选择过程,不考虑居民的社会经济特征对其的影响,所考虑的两种极端情况是,对于完全理性的居民,选择最近的就业地就业;对于完全非理性的居民,随机选择就业地就业,不考虑就业距离大小。对于两种情形之间的居民,则属于有限理性的情况,以一定的概率进行最近就业或随机就业。因此针对居民群体引入理性程度 r 这一指标, $r = 1$ 则完全理性,就近选择就业地; $r = 0$ 则完全非理性,随机选择就业地;如果 $r = 0.3$,则有 30% 的概率进行就近选择就业地,70% 的概率随机选择就业地。本文假定 r 对于所有居民都相同,为了重点分析城市形态对通勤交通能耗的影响,这里统一取 $r = 1$ 。

2.3.4 居民选择出行方式 居民选择何种方式出行,一方面受自身的社会经济特征影响,一方面受出行距离影响,即 $COMM_TYPE = f(A_j, dist_j)$,其中 $COMM_TYPE$ 表示出行方式; A_j 表示居民 j 的社会经济属性集合; $dist_j$ 表示居民 j 的出行距离; f 表示居民根据自身社会经济特征和出行距离选择出行方式的函数。出行方式一般是离散变量,可以通过建立离散选择模型

11	4	2	3	3	1	9	11	4	3	6	19	4	1	40	6	5	2	3	5
7	5	6	4	62	0	4	8	5	7	4	4	5	3	7	5	8	4	8	4
7	5	5	84	7	5	4	10	4	3	12	4	5	17	50	6	2	4	5	7
80	5	6	5	4	3	8	8	8	4	51	3	7	9	8	6	45	2	6	7
5	10	7	4	1	2	4	4	5	4	3	4	4	2	3	5	5	8	6	111
4	6	4	3	8	4	6	4	8	5	5	4	10	13	2	5	4	5	9	1
6	1	6	7	8	6	4	3	4	6	89	3	3	8	5	4	3	5	4	6
6	10	4	9	4	4	5	3	4	2	8	8	4	6	2	8	3	36	7	5
7	82	8	6	3	12	4	5	7	8	16	52	6	4	7	7	8	55	9	6
6	3	10	5	4	46	7	3	32	2	7	16	5	5	6	9	9	10	3	4
4	5	9	20	6	5	7	2	3	13	4	4	10	150	4	11	5	7	14	3
6	6	6	1	6	8	3	4	4	7	5	2	6	11	3	5	4	2	7	6
6	5	8	15	58	7	3	7	7	2	125	9	4	1	8	5	3	8	5	8
7	7	7	6	12	4	8	39	3	4	4	4	7	4	8	8	3	9	3	4
4	5	5	6	2	12	4	2	4	4	5	3	6	6	4	7	5	31	156	4
3	4	10	5	3	8	7	5	5	3	200	6	8	4	7	7	6	17	7	3
5	6	3	3	4	8	9	5	3	1	4	2	3	4	6	5	6	4	7	5
8	2	3	6	8	4	5	9	6	9	10	6	5	7	4	11	5	2	6	9
3	3	9	3	3	7	4	5	6	2	4	7	8	4	2	5	5	6	3	8
2	3	4	5	5	9	3	6	77	2	6	3	7	1	5	4	5	66	8	5



注:图中的数字表示容积率 FAR:对于居住地的 FAR,对应居住人口;对于就业地的 FAR,对应就业人口

图 3 虚拟城市形态示意图

Fig. 3 An exemplified hypothetical urban form

(discrete choice model, DCM) 模拟居民的出行方式选择行为,其参数可以从已有研究中获取,或在利用真实城市数据进行数据挖掘获得。本文将这一过程简化为,基于决策树的形式进行出行方式选择,假定出行方式 (COMM_TYPE) 仅与收入 (INCOME, 单位:元) 和出行距离 (*dist*, 单位:km) 这两个变量有关系 (出行距离变量是基于居住区位选择和就业区位选择的结果确定的),具体如下 (Python语言形式):

```
if INCOME ≥ 5000 and dist ≥ 4:
    COMM_TYPE="Car" #私家车出行
elif dist ≥ 3:
    COMM_TYPE="Bus" #公交车出行
else:
    COMM_TYPE="Bike or Walk" #自
    行车或步行出行
```

表1 不同出行方式的能耗和环境影响指标
Tab. 1 Energy cost and environmental impact indicators for various commuting means

编号	出行方式	每人单位出行 距离的能耗	每人单位出行 距离的环境影响
1	小汽车 (Car)	10	10
2	公交 (Bus)	2	1
3	自行车或步行 (Bike or Walk)	0	0

2.3.5 城市形态对应的通勤交通能耗和

环境影响评价 基于居民的居住区位选择、就业区位选择以及出行方式选择,可以根据居住地和就业地的空间分布计算通勤出行距离。每个居民根据出行距离和出行方式,利用表1中所列的指标,计算通勤交通能耗 (E_i) 和环境影响 (C_i),如污染物和CO₂排放量。所有居民的能耗和环境影响之和,即为某城市形态对应的总能耗和环境影响。鉴于本文主要侧重于探讨城市形态与通勤交通出行距离的关系,因此表1中的指标非真实数值,主要用于表征不同出行方式对应的能耗和环境影响的相对关系。

2.3.6 城市形态的评价指标 针对每个城市形态,利用McGarigal等^[34]开发的用于景观生态格局评价的工具FRAGSTATS,选取14个指标评价生成的诸多城市形态。这14个指标分为两类,一类侧重评价土地使用方式的空间分布,共7个指标,另一类侧重评价开发强度的空间分布,共7个指标。评价结果记为 I_i^k ,其中 k 表示指标的ID, K 表示指标的总数目 ($K=14$), i 表示城市形态的ID。

- C类地块分布 (土地使用方式):
 - CLS_CA: Total Area, 表征就业用地总面积
 - CLS_NP: Number of Patches, 表征就业地斑块数目
 - CLS_LPI: Largest Patch Index, 表征主导就业中心所占的比例
 - CLS_ENN_MN: Euclidean Nearest Neighbor Distance, 平均近邻距离, 表征就业中心分布规律
 - 形状指数, 用于表征就业用地的形状
 - ★ CLS_SHAPE_MN: Shape Index, 平均斑块分形指数
 - ★ CLS_LSI: Landscape Shape Index, 景观形状指标
 - ★ CLS_PARA_MN: Perimeter-Area Ratio, 平均周长面积形状指数
- FAR分布 (开发强度):
 - 多样性指标, 用于表征开发强度的空间分布是否均一
 - ★ LD_SHDI: Shannon's Diversity index, 香农均匀度指标
 - ★ LD_SHEI: Shannon's Evenness Index, 香农多样性指标
 - LD_ENN_MN: Euclidean Nearest Neighbor Distance, 表征不同开发强度地块的分布规律
 - LD_COHESION: Patch Cohesion Index, 凝聚
 - Contagion-Interspersion 指标, 表征各级别开发强度地块的聚合程度
 - ★ LD_CONTAG: Contagion index, 蔓延度指标
 - ★ LD_DIVISION: Landscape Division Index, 分割

★ LD_AI: Aggregation Index, 聚合

2.3.7 城市形态与通勤交通能耗的响应关系识别 针对所有生成的城市形态的指标数值 (I_i^k) 及其对应的通勤交通总能耗 E_i 和环境影响 C_i , 进行定量分析, 识别城市形态对通勤交通能耗和环境影响的影响特征和一般规律, 进而识别低碳城市形态。具体如下: ① 对各个城市形态的评价指标进行相关性分析, 剔除相关性较强的变量 (小于-0.8 或大于 0.8); ② 采用全局敏感性分析 (global sensitivity analysis, GSA) 的方法, 考虑每个城市形态的剔除了高度相关变量后的评价指标, 以及每个形态对应的通勤交通能耗, 识别影响城市通勤交通能耗的主导因素, 即哪个评价指标对通勤交通能耗的影响最大; ③ 评价城市形状的改变对通勤交通能耗的影响。下面在“3 模型测试”部分给出响应关系识别的结果。

3 模型测试

将 FEE-MAS 模型运行 10000 次 (每次模拟耗时 30s, 总运行时间为 112 h), 最终达到收敛的效果 (图 4), 即城市形态对应的总通勤交通出行距离的平均累计值趋于稳定, 表明这 10000 个城市形态能够对应这个空间内的所有城市形态的可能, 即如果继续生成 10000 个城市形态, 其总体特征与这 10000 次应一致, 因此是一个收敛的过程。多次模拟的目的是为了保证得到的结果不是局部片面的, 是为了使模型的运行达到稳定状态, 即通过取得足够多的城市形态样本, 使得基于该样本得到的统计特征可以代表城市系统的基本特征。

10000 次模拟的统计性描述如表 2 所示 (样本为城市形态, $N = 10000$, 变量为城市形态对应的通勤交通出行总量 ($dist$)、总通勤交通能耗 (E) 和总污染物排放量 (C), 以及空间评价指标。

每个城市形态对应的出行距离 ($dist$) 是模拟结果的核心变量。根据 $dist$ 变量的分布, 可以看出同样的居民结构, 在空间组织不同的情况下, 通勤交通出行总量的变化情况, 从 9186 到 27848, 差异较大 (3.03 倍)。图 5 为 $dist$ 变量的概率密度曲线, 其中黑色实线为正态分布曲线, $dist$ 的直方图显示 $dist$ 的概率密度分布基本与正态分布基本一致 (均值 17267.77, 标准差 2931.722)。

这里示意性地给出生成的 1 个城市形态 (图 6), 及对应的出行总距离 (图 7), 进而示意读者这 10000 次模拟的基本情况。

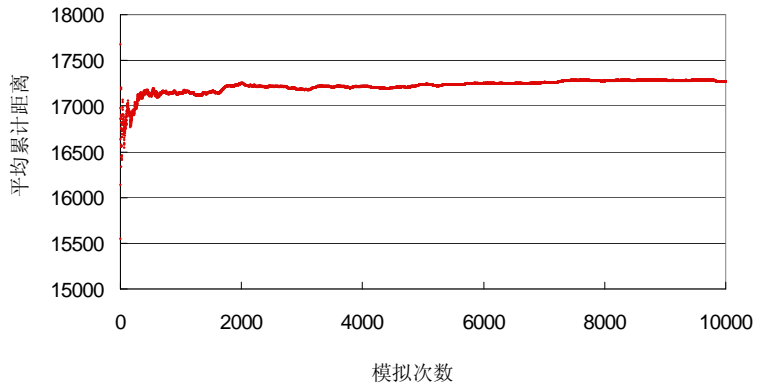


图 4 总通勤交通出行距离的平均累计值随模拟次数的变化曲线

Fig. 4 The accumulative average commuting distance for each iteration

表 2 模拟结果的统计性描述表
Tab. 2 The descriptive statistical information for simulation results

名称	最小值	最大值	平均值	标准差
dist	9186	27848	17300	2932
E	64092	238378	140500	27969
C	62236	233844	137500	27517
CLS_CA	0.0010	0.0040	0.0025	0.0009
CLS_NP	6	33	19.2	5.6
CLS_LPI	0.2500	3.7500	0.7624	0.3248
CLS_LSI	2.2857	6.0769	4.4267	0.7948
CLS_SHAPE_MN	1.0000	1.2375	1.0423	0.0326
CLS_PARA_MN	34000	40000	38741	877
CLS_ENN_MN	2.1554	6.2072	3.0421	0.5705
LD_ENN_MN	2.3301	5.6048	3.3062	0.3579
LD_CONTAG	24.4728	50.4032	39.2857	4.0672
LD_COHESION	82.6889	96.7945	93.1993	1.4731
LD_DIVISION	0.5431	0.9249	0.6957	0.0553
LD_SHDI	0.7929	1.0989	0.9778	0.0671
LD_SHEI	0.4978	0.7560	0.6090	0.0406
LD_AI	35.8211	54.1918	44.6079	3.0234

3.1 相关性分析

通过相关性分析,相关性大于0.8或小于-0.8的变量将被剔除,剔除的变量为CLS_CA、CLS_LSI、CLS_ENN_MN、LD_SHEI、LD_AI、LD_CONTAG 和 LD_COHESION。

3.2 全局敏感性分析

通过全局敏感性分析,可以识别空间变量与出行距离的关系。全局敏感性分析相比传统的局部敏感性分析(local sensitivity analysis, LSA),可以识别整个参数空间范围内的参数对结果的综合影响,而不是局部敏感性分析中一次改变一个变量(one-at-a-time, OAT)的形式。本文的全局敏感性分析工作中,将相关性较强的变量剔除后的其他空间变量作为分析的范围。线性回归是进行全局敏感性分析的一种常用、简便的方法,即将出行距离 *dist* 作为因变量(这里以 $\ln(dist)$ 作为因变量),空间变量作为自变量。采用 forward 线性回归的方法,LD_SHDI 因为不显著而被剔除,最终的回归结果见表3,表示各个空间变量与 *dist* 的关系。从该表可以看出,各个变量的显著水平都处于0.001水平,CLS_NP变量的系数为最小,且为负值,说明就业中心的数目这个变量对出行距离的影响最大,就业中心的数目越多,则出行距离越小。对于平均斑块分形指数(CLS_SHAPE_MN)的回归系数为负,表示城市形态中,就业用地的分布越复杂,形状越不规则,则通勤交通出行总量越低,主要在于居民就业区位选址的原则是最近就业的原因,即就业用地分布越不规则,则居民越容易找到最近的就业地块工作。

3.3 城市形状对通勤交通能耗的影响识别

以上实验结果均为基于 20×20 的方形城市开展。为了测算不同形状的城市形态对通勤交通能耗的影响,设定了如表4所示的5个形状。针对每种形状,基于FEE-MAS生成5000个城市形态(对应不同的布局 and 开发密度,其设定的方法同“2.3.2 生成城市形态、居民选择居住区位”),评估每种形状的多个城市形态的通勤交通总距离(*dist*) (表4),其中均值可以作为衡量城市形状对通勤交通能耗的影响,可以看出圆形城市的能耗最低,有绿隔

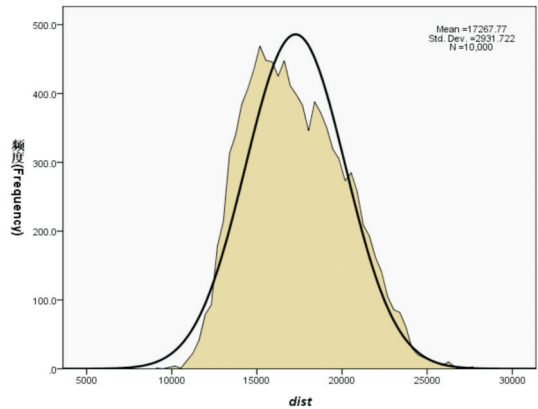


图5 *dist* 变量的概率密度分布及其与正态分布对比图
Fig. 5 The frequency density distribution of *dist* compared with the normal distribution

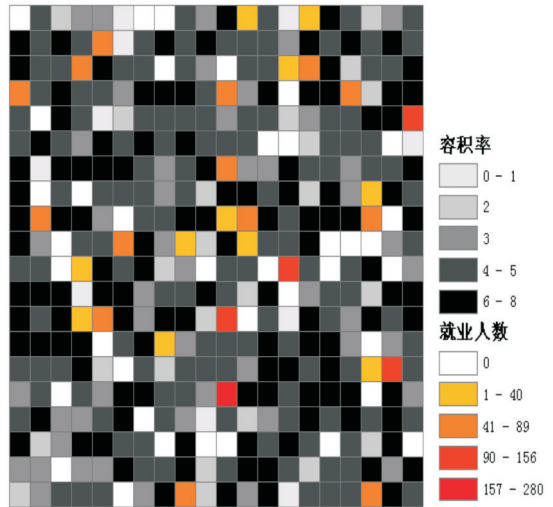


图6 某城市形态就业区位选择后的容积率分布
Fig. 6 FAR distributions for an exemplified urban form

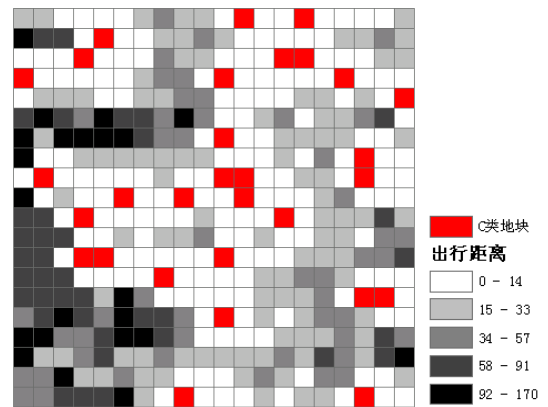


图7 某城市形态各地块的总出行距离分布图
Fig. 7 The commuting distance map for

的方形城市的能耗高于没有绿隔的方形城市,多个组团的城市形态的能耗低于单一组团的方形城市,这些都与常规的规划理念相符合。单长方形的城市的能耗略低于方形城市的能耗,这可能也是因为我们假设居民都是完全理性,选择最近就业地的原因,如果随机选择就业地,结果可能会有所差异,这将在下一阶段的研究中探讨。

4 典型城市形态对比

为了对目前讨论较多的规划理念,如绿隔、交通导向型土地开发模式 (transit oriented development, TOD)、多中心、紧凑城市等,进行验证和评估,考虑就业中心数目、开发密度等因素,生成图 8 所示的 6 个典型的城形态 (仅以 1 个地块示意就业中心的位置),每个城市形态对应的空间同“2.3.2 生成城市形态、居民选择居住区位”,即 20 × 20 的空间共计 400 个地块,总人口为 2000 人。针对每个典型城市形态,就业中心位置以及容积率分布为外生变量,由作者根据常规的规划理念设定,其中单就业中心仅考虑 1 个地块为 C 类 (就业),多就业中心选取 3 个地块为 C 类。对于分散开发 (对应低密度),每个地块的 FAR 多数为 5400 个地块均被开发;对于紧凑开发 (对应高密度),仅开发 400 个地块中的 100 个,每个地块的 FAR 约为 20,其余地块 (白色) 为未开发。对于 TOD 开发,则 FAR 沿就业中心向外衰减;对于绿隔,则中心和外围之间的一个环状地带保持未开发。

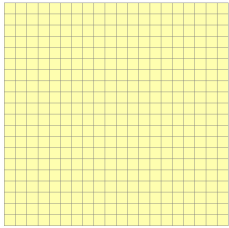
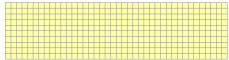
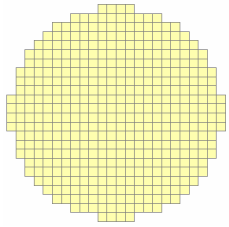
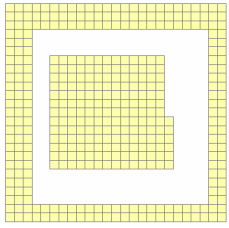
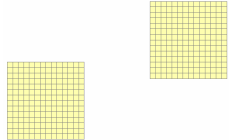
利用 FEE-MAS 模型,对以

上 6 种典型城市形态进行通勤交通总距离、能耗和环境影响的计算,结果如下 (表 5):① 无论是单就业中心还是多就业中心的城形态,分散布局 (A 和 E) 对应的出行总距离是紧凑布局 (B 和 F) 的 2 倍左右 (多中心的差距更大),主要在于城市尺度缩小为原来的一半;② 具有相同城市形状的单就业中心 TOD 模式 (C) 较单就业中心分散形态 (A) 也有大幅降低;③ 单

表 3 全局敏感性分析结果表
Tab. 3 Results of global sensitivity analysis

变量名称	标准化后的回归系数	t	Sg.
常数项		198.017	.000
CLS_NP	-.771	-121.363	.000
CLS_SHAPE_MN	-.114	-19.246	.000
CLS_PARA_MN	.076	14.449	.000
LD_ENN_MN	.040	7.359	.000
CLS_LPI	-.030	-4.451	.000
LD_DIVISION	-.026	-3.975	.000

表 4 不同形状的城市形态及其对应的通勤出行距离 dist 模拟结果
Tab. 4 Simulation results for urban forms with various shapes

形状	地图	最小值	最大值	均值	标准差
方形		9186	27848	17300	2932
长方形		6943	33187	16801	4904
圆形		7419	25750	13460	2906
绿隔		9608	31539	16558	3203
多中心		6583	47535	14948	4910

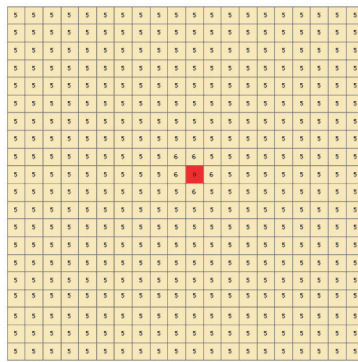
注:地图的比例尺不同,每个地块的实际大小相同。

就业中心条件下,绿隔政策引入(D)会提高非绿隔地区的开发密度,相比分散布局(A),会带来出行距离的小幅增加;④多就业中心紧凑模式的城市形态(F)对应最小的出行总距离,主要在于城市范围的缩小,进而就业地与居住地的距离普遍降低;⑤多就业中心分散的城市形态(E)则对应最大的出行总距离,与单就业中心绿隔形态相近。

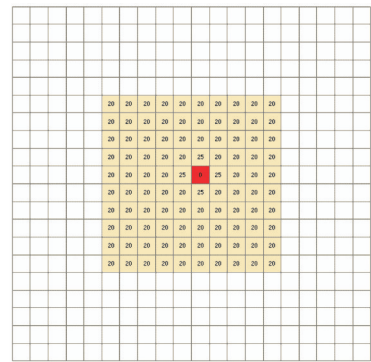
5 结论与讨论

本文通过建立基于多智能体的城市形态—交通能耗—环境集成的多智能体模型FEE-MAS,在虚拟城市中对三者的关系进行定量的探索。通过引入基于复杂自适应系统理论的MAS方法,以城市居民和地块分别作为城市社会空间和物理空间的微观样本,通过对居民居住区位选择、就业区位选择乃至交通方式选择的模拟,计算作为微观智能体的居民的通勤交通出行距离和能耗,进而得到所有居民,即城市层面的通勤交通出行和能耗总量。

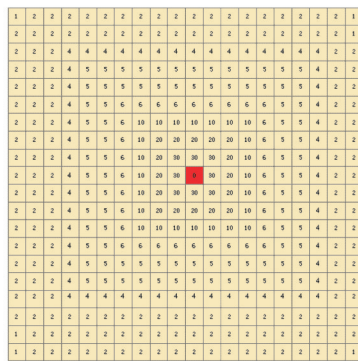
本文用于识别城市形态与交通能耗、环境影响关系是通过生成多个城市形态、多次运行FEE-MAS智能体



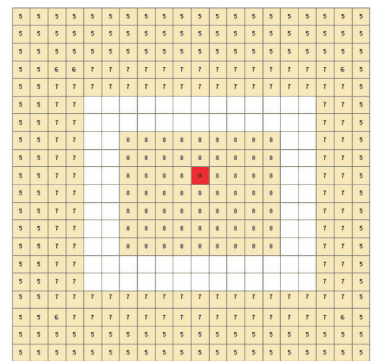
A 单就业中心分散



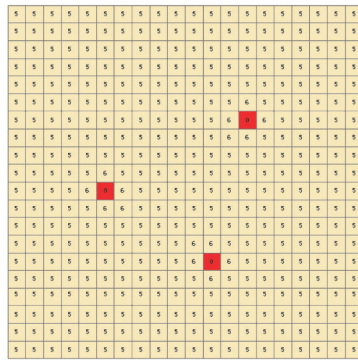
B 单就业中心紧凑



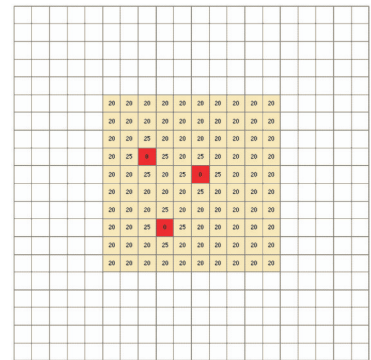
C 单就业中心 TOD



D 单就业中心绿隔



E 多就业中心分散



F 多就业中心紧凑

注:红色为C,黄色为R,白色为未开发,地块内数字为FAR

图8 虚拟空间内6个典型的城市形态

Fig. 8 Six typical urban forms in the hypothetical space

表5 典型城市形态的模拟结果表

Tab. 5 Simulation results for six typical urban forms

典型城市形态	总交通距离	能源消耗	环境影响	出行距离排序
A 单就业中心分散	20006	171792	168391	3
B 单就业中心紧凑	10020	78528	76344	5
C 单就业中心 TOD	14092	113456	110673	4
D 单就业中心绿隔	20026	170228	166674	2
E 多就业中心分散	22264	191168	187429	1
F 多就业中心紧凑	8860	64648	62879	6

模型实现的。参照景观生态学的评价指标,选取14个指标用于表征城市形态,如就业地斑块的数目、形状等,借助FRAGSTAS对这些指标进行计算。以这14个评价城市形态的指标作为解释变量,以每个形态对应的通勤交通能耗和环境影响作为被解释变量,识别城市形态与二者的定量关系。

本文得到了以下几点关于城市形态与交通能耗和环境影响的一般结论。①对于同样的城市范围,不同的空间布局和密度分布,通勤交通能耗的弹性在3倍左右,说明城市形态对通勤交通能耗具有显著影响;②众多的城市形态评价指数中,就业中心斑块的数量是影响最大的变量;③固定范围内的多种城市形态所对应的通勤交通能耗,基本呈正态分布;④14个城市形态的指标,多数之间存在相关性,最后选取7个参数用于全局敏感性分析。本文所得到的结论,可以辅助支持空间规划方案的制定,并作为对紧凑城市、低碳城市等理念的理论阐述。

目前较为成熟的土地利用与交通模型,一般都能够针对不同的城市形态评估相应的交通出行总量,如UrbanSim等^[35-36]。本文开发的FEE-MAS模型,是所谓的简化版的土地利用与交通模型,多次运行可以得到不同的城市形态的交通能耗响应。土地利用与交通模型比较综合,而本文开发的FEE-MAS模型相对比较单纯,便于多次反复运行,识别城市系统的基本规律。虽然有很多针对大城市地区的平均出行距离的统计,直接利用这些真实城市的数据进行统计可以找到规律,但本模型主要可用于城市内(inner-city)的形态与通勤交通动态响应的分析,发现城市间(inter-cities)的相关研究所不能够识别的城市系统的一般规律,比如通勤交通出行总距离的弹性范围、主导的城市形态指标等。

针对真实城市,也可以直接利用FEE-MAS这一空间动态模型,直接针对真实城市的多个空间规划方案(即土地使用方案和容积率),进行潜在通勤交通总距离、能源消耗和环境影响的评估,给出从潜在通勤交通角度低碳的规划方案,在规划层面保证低碳的城市布局。真实城市的能耗评估,作为规划方案评估的一个重要方面,是对目前以行业作为终端的能耗评估模型(空间静态)的必要补充。

下一个阶段,本模型除了拟应用于真实城市外,还将在以下几个方面进行深入研究,如①除了考虑居民的通勤交通,增加居民的居民家庭生活、娱乐休闲(通过考虑公共设施)等其他交通组成,以及城市的第二产业和第三产业的能源消耗;②通过建立居民的社会经济属性与理性程度指标之间的关系,如 $r = g(A_j)$,其中 A_j 表示居民 j 的社会经济属性集合, g 表示居民社会经济特征与理性程度的映射关系,将居民的社会经济特征引入居民就业区位选择过程;③考虑就业中心的就业容量限制,以使得就业区位选择的过程更趋近于现实情况;④通过引入交通结构即路网,替换文中的曼哈顿距离,提高交通能耗的真实性。

参考文献 (References)

- [1] Shen Qingji. Study on urban energy sustainable development: A view from urban planning. Urban Planning Forum, 2005, (6): 41-47. [沈清基. 中国城市能源可持续发展研究: 一种城市规划的视角. 城市规划学刊, 2005, (6): 41-47.]
- [2] Wang Z W, Chen J. Achieving low-carbon economy by disruptive innovation in China. 2008 IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology, 2008, (1-3): 687-692.
- [3] Zhuang G Y. How will China move towards becoming a low carbon economy? China & World Economy, 2008, 16: 93-105.
- [4] Hourcade J C, Crassous R. Low-carbon societies: A challenging transition for an attractive future. Climate Policy, 2008, (8): 607-612, doi: 10.3763/cpol.2008.0566.
- [5] Remme U, Blesl M. A global perspective to achieve a low-carbon society (LCS): Scenario analysis with the ETSAP-TIAM model. Climate Policy, 2008, 8: 60-75.
- [6] Shukla P R, Dhar S, Mahapatra D. Low-carbon society scenarios for India. Climate Policy, 2008, 8: 156-176.
- [7] Johnson R A, Mccoy M C. Assessment of integrated transportation/land use models. Information Center for the Environment, Department of Environmental Science & Policy, University of California, Davis, 2006.
- [8] Wang Jingwen, Mao Qizhi, Yang Dongfeng. Energy influences of urban planning: An urban transportation energy consumption model. China Planning Annual Conference (Dalian), 2008. [王静文, 毛其智, 杨东峰. 城市规划的能源影响]

探讨: 规划视角中的城市交通能耗模型. 中国城市规划年会(大连), 2008.]

- [9] Owens S. *Energy, Planning and Urban Form*. London: Pion, 1987
- [10] Anderson W P, Kanaroglou P S, Miller E J. Urban form, energy and the environment: A review of issues, evidence and policy. *Urban Studies*, 1996, 33: 7-35, doi: 10.1080/00420989650012095.
- [11] Newman P W G, Kenworthy J R. Gasoline consumption and cities: A comparison of US cities with a global survey. *Journal of American Planning Association*, 1989, 55: 24-37, doi: 10.1080/01944368908975398.
- [12] Holden E, Norland I T. Three challenges for the compact city as a sustainable urban form: Household consumption of energy and transport in eight residential areas in the greater Oslo region. *Urban Studies*, 2005, 42: 2145-2166, doi: 10.1080/00420980500332064.
- [13] Shim G E, Rhee S M, Ahn K H et al. The relationship between the characteristics of transportation energy consumption and urban form. *Annals of Regional Science*, 2006, 40: 351-367, doi: 10.1007/s00168-005-0051-5.
- [14] Alford G, Whiteman J. Macro-urban form and transport energy outcomes: Investigations for Melbourne. *Road & Transport Research*, 2009, 18: 53-67.
- [15] Dieleman F M, Dijst M, Burghouwt G. Urban form and travel behaviour: Micro-level household attributes and residential context. *Urban Studies*, 2002, 39: 507-527, doi: 10.1080/00420980220112801.
- [16] Giuliano G, Narayan D. Another look at travel patterns and urban form: The US and Great Britain. *Urban Studies*, 2003, 40: 2295-2312, doi: 10.1080/0042098032000123303.
- [17] Horner M W. A multi-scale analysis of urban form and commuting change in a small metropolitan area (1990-2000). *Annals of Regional Science*, 2007, 41: 315-332, doi: 10.1007/s00168-006-0098-y.
- [18] Maat K, Timmermans H J P. A causal model relating urban form with daily travel distance through activity/travel decisions. *Transportation Planning and Technology*, 2009, 32: 115-134.
- [19] McMillan T E. The relative influence of urban form on a child's travel mode to school. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2007, 41: 69-79, doi: 10.1016/j.tra.2006.05.011.
- [20] Pan H X, Shen Q, Zhang M. Influence of urban form on travel behaviour in four neighbourhoods of Shanghai. *Urban Studies*, 2009, 46: 275-294, doi: 10.1177/0042098008099355.
- [21] Schlossberg M, Greene J, Phillips P P et al. School trips: Effects of urban form and distance on travel mode. *Journal of the American Planning Association*, 2006, 72: 337-346, doi: 10.1080/01944360608976755.
- [22] Zhang M. Exploring the relationship between urban form and nonwork travel through time use analysis. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 73: 244-261, doi: 10.1016/j.landurbplan.2004.11.008.
- [23] Krizek K J. Residential relocation and changes in urban travel: Does neighborhood-scale urban form matter? *Journal of the American Planning Association*, 2003, 69: 265-281, doi: 10.1080/01944360308978019.
- [24] Zhang Honghui, Zeng Yongnian, Jin Xiaobin et al. Urban land expansion model based on multi-agent system and application. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(8): 869-881. [张鸿辉, 曾永年, 金晓斌等. 多智能体城市土地扩张模型及其应用. *地理学报*, 2008, 63(8): 869-881.]
- [25] Li Xia, Li Dan, Liu Xiaoping et al. Geographical simulation and optimization system (GeoSOS) and its cutting-edge researches. *Advances of Earth Science*, 2009, 24(8): 899-907. [黎夏, 李丹, 刘小平等. 地理模拟优化系统 GeoSOS 及前沿研究. *地球科学进展*, 2009, 24(8): 899-907.]
- [26] Benenson I, Omer I, Hatna E. "Agent-based modeling of householders' migration behavior and its consequences"//Billari F C P A. *Workshop on Agent based Computational Demography*. Rostock, Germany, 2001: 97-115.
- [27] Brown D G, Robinson D T. Effects of heterogeneity in residential preferences on an agent-based model of urban sprawl. *Ecology and Society*, 2006, 11(1), <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art46/>.
- [28] Tao Haiyan, Li Xia, Chen Xiaoxiang et al. Method exploration of geographical spatial differentiation based on multi-agent: A case study of urban residential simulations. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(6): 579-588. [陶海燕, 黎夏, 陈晓翔等. 基于多智能体的地理空间分异现象模拟: 以城市居住空间演变为例. *地理学报*, 2007, 62(6): 579-588.]
- [29] Yi C, Li Q, Zheng G. Commercial facility site selection simulating based on MAS//*Proceedings of the SPIE: The International Society for Optical Engineering*, 2008: 71431N (71438 pp.)
- [30] Kii M, Doi K. Multiagent land-use and transport model for the policy evaluation of a compact city. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2008, 32: 485-504, doi: 10.1068/b3081.
- [31] Zellner M L, Theis T L, Karunanithi A T et al. A new framework for urban sustainability assessments: Linking complexity, information and policy. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32: 474-488, doi: 10.1016/j.compenvurbysys.2008.08.003.
- [32] Long Ying, Shen Zhenjiang, Mao Qizhi. Retrieving individual attributes from aggregated dataset for urban micro-simulation: A preliminary exploration. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 416-426. [龙瀛, 沈振江, 毛其智. 城市系统微观模拟中的个体数据获取新方法. *地理学报*, 2011, 66(3): 416-426.]
- [33] Beijing Fifth Population Census Office, Beijing Statistical Bureau. *Beijing Population Census of 2000*. Beijing: Chinese Statistic Press, 2002. [北京市第五次人口普查办公室, 北京市统计局. 北京市2000年人口普查资料. 北京: 中国统计出版社, 2002.]
- [34] McGarigal K, Cushman S A, Neel M C et al. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps.

Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html, 2002.

- [35] Waddell P. Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning. *Journal of the American Planning Association*, 2002, 68: 297-314, doi: 10.1018/01944360208976274.
- [36] Putman S H. Urban landuse and transportation models: A state of the art summary. *Transportation Research*, 1975, 9: 187-202.

A Multi-agent Model for Urban Form, Transportation Energy Consumption and Environmental Impact Integrated Simulation

LONG Ying^{1,2}, MAO Qizhi¹, YANG Dongfeng³, WANG Jingwen⁴

(1. *School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Beijing Institute of City Planning, Beijing 100045, China;*

3. *Department of Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;*

4. *School of Landscape, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)*

Abstract: Cities are consuming more energy with increasing urbanization process. The urban transportation energy is the primary part of urban energy consumption. Extensive researches found that it has strong relationship with the urban form, which fall into intra-cities level. However, little attention was paid to the relationship between urban form, transportation energy consumption, and environmental impact in the inner-city level. This paper aims to investigate the impact of urban form, namely land use pattern, development density distribution, on the residential commuting energy consumption (RCEC). We developed a multi-agent model for the urban form, transportation energy consumption and environment interaction simulation (FEE-MAS). Numerous urban forms with distinguished urban land use pattern and development density distribution are generated using the Monte Carlo approach in the hypothetical space. On one hand, the RCEC for each urban form is calculated using the proposed FEE-MAS. On the other hand, we select 14 indicators (e.g. Shape Index, Shannon's Diversity Index, Euclidean Nearest Neighbor Distance) to evaluate each generated urban form using FRAGSTATS, which is loosely coupled with the FEE-MAS model. Then, the quantitative relationship between the urban form and RCEC is identified based on 14 indicators and RCEC of each urban form. Several conclusions are drawn from simulations conducted in the hypothetical space. (1) RCEC may vary three times for the same space with various spatial layouts and density distribution. (2) Among selected 14 indicators for evaluating the urban form, the patch number of job parcels is the most significant variable influencing the RCEC. (3) The RCECs of all urban forms generated obey a normal distribution. (4) The shape of urban form also exerts influences on the RCEC. In addition, we evaluated several typical urban forms, e.g. compact/sprawl, single center/multi-centers, traffic oriented development, green belt, in terms of the RCEC indicator using our proposed model to quantify those popular planning theories. The FEE-MAS model can also be applied for evaluating urban spatial alternatives in terms of energy consumption and environmental impact.

Key words: land use; development density; transportation energy consumption; environmental impact; multi-agent; Monte Carlo