

文章编号:1003-2398(2014)03-0007-07

大数据时代的精细化城市模拟:方法、数据和案例

龙瀛^{1,2} 茅明睿¹ 毛其智³ 沈振江⁴ 张永平^{5,6}

(1.北京市城市规划设计研究院,北京 100045; 2.剑桥大学 建筑系,剑桥 英国;
3.清华大学 建筑学院,北京 100084; 4.金泽大学 环境设计学院,金泽日本;
5.卡迪夫大学,卡迪夫 英国; 6.内梅亨大学,内梅亨 荷兰)

FINE-SCALE URBAN MODELING AND ITS OPPORTUNITIES IN THE "BIG DATA" ERA: METHODS, DATA AND EMPIRICAL STUDIES

LONG Ying^{1,2}, MAO Ming-rui¹, MAO Qi-zhi³, SHEN Zhen-jiang⁴, ZHANG Yong-ping^{5,6}

(1.Beijing Institute of City planning, Beijing 100045, China; 2.Department of Architecture, University of Cambridge, Cambridge, UK; 3.School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
4.College of Environment Design, Kanazawa University, Kanazawa, Japan; 5.Cardiff University, Cardiff, UK; 6.Radboud University Nijmegen, Nijmegen, The Netherlands)

Abstract: Fine-scale simulation, in which the parcel is the basic spatial unit and urban activity body is the simulation object, is an important research direction for the urban modeling in the future, and the arrival of big data era also provides an important development opportunity for it. In the paper, the mainstream modeling methods for fine-scale urban modeling are introduced mainly, including cellular automata (CA), agent-based modeling (ABM) and traditional Microsimulation (MSM), all of which are microscopic simulation from the bottom up. Then, according with the high-standard data requirements for the fine-scale urban modeling, the paper sums up the internationally acceptable methods for the fine-scale simulation data synthesis (population synthesis), and also gives a number of practical cases about the fine-scale urban modeling in recent years. Finally, the paper puts forward the framework and key technology, based on GIS platform and combined with CA/ABM/MSM method, to construct fine-scale urban modeling, to support the development and assessment of spatial policy in the metropolitan area.

Key words: urban modeling; big data; fine-scale; planning support systems (PSS); Beijing

提 要: 以地块作为基本空间单元并以城市活动主体作为模拟对象的精细化模拟是未来城市模型研究的重要方向,大数据(big data)时代的到来也为其提供了重要发展机遇。本文重点对精细化城市模型的主流建模方法进行了介绍,包括元胞自动机(Cellular Automata, CA)、基于主体建模(Agent-based Modeling, ABM)和传统的微观模拟(Microsimulation, MSM)这三种自下而上的微观模拟方法。之后结合精细化城市模型的高标准数据需求问题,对国际上通行

的用于精细化模拟数据合成(population synthesis)的方法进行了综述,并给出笔者近年来在精细化城市模拟方面的多项实践案例,最后提出了以GIS为平台,结合CA/ABM/MSM方法,构建我国精细化城市模型的框架体系和关键技术,以期支持我国大城市地区空间政策的制定和评估。

关键词: 城市模型; 大数据; 精细化; 规划支持系统(PSS); 北京

中图分类号: TU984 **文献标识码:** A

基金项目 国家自然科学基金(51078213 51278526)

作者简介 龙瀛(1980)男,博士,高级工程师,主要研究方向为城市模型等定量城市研究。E-mail: longying1980@gmail.com。

注:共同作者还有周江评,韩昊英,刘行健,王江浩,李苗裔,吴康,郑思齐,崔承印,吴运超。

收稿日期 2014-03-10 修订日期 2014-05-18

1 城市模型与精细化城市模拟

量化程度已经越来越成为衡量一个学科发展程度的标志，城市空间发展模型（urban spatial development model）是在对城市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。本文将城市空间发展模型简化为城市模型（urban model），下同。城市模型研究始于20世纪初，其发展主要经历了形态结构模型、静态模型和动态模型三个发展阶段^[1]。基于离散动力学的动态城市模型是目前的研究热点和未来的发展方向，这一方面，国际上典型的城市模型多为宏观尺度，以地理网格或小区作为基本研究单元，将城市活动主体进行分类。

随着研究尺度的需要和微观数据可获得性的增强，近年来国际上微观模型（精细化的城市模拟）发展迅速，在发展中国家如中国的需求也日益增多。目前，一方面我国的大城市正逐渐由空间扩张向内部改造（城市再开发、城市更新等）转变，小尺度的城市空间再开发将越来越多，为分析并预测城市空间的变化，更需要精细化的模型作支持；另一方面，城市作为复杂的自适应系统，是由作为城市空间的地块、作为城市活动主体的居民、企业等构成的，自下而上的模拟思路在以人、地和房作为基本研究对象预测城市空间变化的同时，与规划的公众参与、社会公平等理念的需求不谋而合。此外，目前我国各种精细化的城市空间数据和社会经济微观数据的可获得性正逐渐增强，因此开展精细化城市模型的探索，是具有理论价值和实践意义的。

精细化城市模型不同于以大尺度网格、行政区域或交通分析小区作为模拟尺度的模型，他们在空间要素和城市活动要素方面都不一样，因此将面临新的理论和实际问题。其中，精细化（fine scale）对应模拟尺度，一方面，在物理空间，分析和模拟的基本空间单元是地块，对应城市总体规划重点地区和城市详细规划的工作尺度。另一方面在社会空间，分析和模拟的基本单元是居民、家庭和企业个体等。精细化作为模拟尺度，是相对宏观模拟的研究尺度提出的，宏观模型一般以统计小区、交通分析小区、行政区、行业、共同特征的人群等作为基本研究对象。精细化城市模型是一种时空动态的微观模型，其以地块、居民、家庭、企业等微观个体作为基本模拟对象，主要用于研究城市的土地开发、居民的居住区位选择、企业的区位选址、城市活动的时空分布等空间问题，用于支持空间政策的制定和评估。目前我国城市空间发展模型的研究，鉴于数据的限制，多数模型都是大尺度的（如乡镇或交通分析小区等）。

精细化城市模型的数据要求较高，原有的模型较多采用不同技术方法来解决个体数据稀缺的情况。国际上人口数据合成（population synthesis）是一个专门的研究方向，

用于合成微观模拟（MSM）所需要的个体数据。Müller和Axhausen的研究综述中，评价了目前常用的几个人口数据合成器（population synthesizer），包括PopSynWin、ILUTE、FSUMTS、CEMDAP、ALBATROSS和PopGen（部分人口合成器如ILUTE和ALBATROSS以所在模型的名字命名）^[2]。ILUTE和PopGen所采用的迭代比例拟合（iterative proportional fitting, IPF）是目前最为广泛采用的人口数据合成的方法。IPF最早由Deming和Stephan提出，可用于利用新的宏观统计数据更新历史的普查数据^[3]。在国内，龙瀛等及Long和Shen提出了基于统计资料、小规模样本调查和常识性知识，利用合成个体样本的方法，初步合成了北京市全样本的居民个体数据，为开展精细化城市模拟提供了条件^[4,5]。

近年来计算机的软硬件水平达到了长足的发展，社会经济活动产生的数据突飞猛进，这样的大数据（big data）规模超大，以至于超过了传统的软件工具获取、存储、管理、共享、分析和可视化的能力，例如传感器网络（sensor networks）、社会化网络（social networks）、射频识别（RFID）和通话记录（call detail records）等，这些数据结合其他开放数据（如可获得的网页资源和OpenStreetMap等）为开展精细化的城市模拟城市模型提供了较好的机遇。下文将在第二部分重点介绍精细化城市模拟的三种常用方法，第三部分对笔者近年来在精细化城市模拟方面的若干案例进行简要回顾，最后提出对在我国进一步开展精细化城市模拟的简要设想。

2 精细化城市模拟的几种常用方法

多种微观模拟的研究方法都可以用于精细化城市模拟，下面对三种目前主流的方法进行详细介绍。

2.1 微观模拟

微观模拟（microsimulation model, MSM）是由美国经济数学家Orcutt首先提出的，其在研究城市问题时能够较好地弥补宏观分析模拟模型的不足^[6]。微观模拟是典型的自下而上的过程，它以企业、家庭乃至个人等微观个体作为描述、分析和模拟的基本对象，每个微观个体都具有独有的自身特性与丰富的内部认知结构^[7]。在已有典型的城市模型中，UrbanSim和ILUTE都属于基于MSM的城市模型。UrbanSim适用于多种研究尺度的城市系统模拟，对应宏观和微观的城市模型，但其已有研究多属于小区尺度，在美国加州侧重房地产市场的探索属于地块尺度的应用，属于精细化的城市模型研究的成功实践^[8]。在国内，清华大学的郑思齐研究组在基于UrbanSim平台建立北京的动态城市模型^[9]，北京大学的童昕研究组也在基于UrbanSim平台开展亦庄新城的城市模拟研究，但囿于数据限制，模拟深度属于小区尺度，并没有进行地块尺度的精细化建模。对于ILUTE模型，其已经在大多伦多区（Greater Toronto Area）进行了成功应用，属于微观尺度，其中考虑了家庭、企业等个体^[10]。Chinguanco和Miller利用ILUTE模型对地块尺度的能耗进行了评价^[11]。UrbanSim和ILUTE都声称属于基

于个体的微观模拟模型 (Agent-based Microsimulation Model), 即既属于 ABM 也属于 MSM。

2.2 元胞自动机

元胞自动机 (CA) 作为复杂科学的重要研究工具, 其特点是时间、空间、状态都离散, 其状态改变的规则在时间和空间上都是局部的, 因此 CA 适合模拟时空动态过程^[12,13]。常规的元胞基本是规则的网格, 但其并不能很好地表征真实的微观个体, 因此一些学者开始研究基于非规则多边形的矢量 CA 进行城市模拟。非规则多边形可以用于表达地块, 因此是可以在空间研究尺度上支持精细化城市模拟的。Stevens 和 Dragicevic 开发了以矢量地块作为 CA 的城市规划决策的工具 iCity, 能够进行城市空间增长的多情景模拟, 并对各情景进行评价, 该工具考虑了土地使用方式的模拟, 但对开发强度因素没有考虑^[14]; Shen 等所开发的地理模拟模型也是基于矢量 CA, 用于模拟日本的城市改造, 重点对土地使用方式进行了时空动态模拟^[15]; Moreno 等提出了可以改变几何形状的矢量 CA 模型, 主要侧重于 GIS 的技术方法探讨, 并不是面向规划应用的实证研究^[16]。

2.3 基于个体建模

ABM 中的 agent (主体) 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^[17]。国际上, ABM 在土地利用覆盖变化、城市扩张等方面已有较多研究, 一般都结合 CA 模型开展, 其中 CA 用于表达不可移动的物理空间 (即环境), 而 agent 对应可移动的决策主体^[18]。Torrens 和 Benenson 提出的地理元胞自动机系统 (geographic automata systems) 中, 集成了 CA 和 ABM 用于模拟地理系统, 但该研究更多的都是侧重于地理方面的模拟, 而不是城市系统内部的空间组织和功能结构^[19]。Jumba 和 Dragicevic 在 iCity 模型的基础上, 建立了 Agent iCity 模型, 用于模拟加拿大城市 Chilliwack 的地块尺度城市土地使用变化^[20]。

而在国内, 中山大学黎夏教授的研究组基于 CA、ABM 和多种人工智能 (artificial intelligence) 技术, 提出了地理模拟与优化系统的理念 GeoSOS (geographical simulation and optimization system, 网址: <http://www.geosimulation.cn>), 用于城市系统模拟和优化分析^[21]。沈振江基于 ABM 技术建立了 ShopSim-MAS 模型, 用于模拟的由于大商场的建立引起的商圈变化, 属于地块尺度的应用等^[22]; 而本文作者之一龙瀛等基于 CA 和 ABM 建立了轻量化的土地使用 交通 环境的集成模拟模型, 用于在虚拟空间探索城市的空间组织对交通出行和能耗的影响, 也属于地块尺度应用^[23]。

基于上述分析可以看出, 微观模拟 MSM、元胞自动机 CA 和基于个体建模 ABM 是目前精细化城市模拟的主流技术方法; 国际上已有少量精细化城市模型在真实城市的实践应用, 如 UrbanSim、ILUTE 和 Agent iCity; 国际国内的已有相关 ABM 研究一般都对应地块尺度, 也考虑了众多城市活动主体, 这些方法对精细化城市模型的建立和开发具有借鉴作用; 国内目前还没有精细化城市模型用于真实城市的报道。此外, 大数据可视化和数据挖掘技术, 也对精细化城市模拟具有重要意义, 本文篇幅有限不再赘述。

3 精细化城市模拟的若干案例

近年来笔者所在团队在精细化城市模拟方面进行了多方面的探索, 囊括微观模拟、大数据 挖掘和微观数据获取与合成等三个方面, 部分应用已经直接用于支持北京市的规划建设, 部分工作如大数据挖掘则属于探索性研究阶段。随着大数据的日趋广泛, 大数据挖掘的研究成果有望用于指导实践工作。

3.1 微观模拟

(1) BUDEM 模型(微观尺度)

2008 年笔者开发了北京城市空间发展模型 (Beijing urban spatial development model, BUDEM), 该模型基于 CA 和 logistic 回归 (logistic regression) 方法, 对北京市历史城市空间扩展进行分析, 并对未来的城市空间扩展进行情景分析^[1,24]。在此模型的基础上, 目前正在开展微观尺度的 BUDEM 模型研究, 研究框架如图 1 所示, 属于精细化城市模拟的综合实践, 其首先致力于利用多种方法获得全样本的微观数据, 包括居民、家庭、企业、居民活动、地块、房地产等, 其中包括利用 4.3 精细化城市模型的数据准备 部分的人口合成方法。基于所建立的全样本微观数据, 进行现状的城市评价, 如交通影响、环境影响、能耗影响和碳排放等多方面。最后在 UrbanSim 平台上侧重居住区位选择和企业区位选择两个方面对短期的城市发展 (既包括城市空间扩张也包括城市再开发) 进行预测 (如其中的北京市的保障房选址模型)。

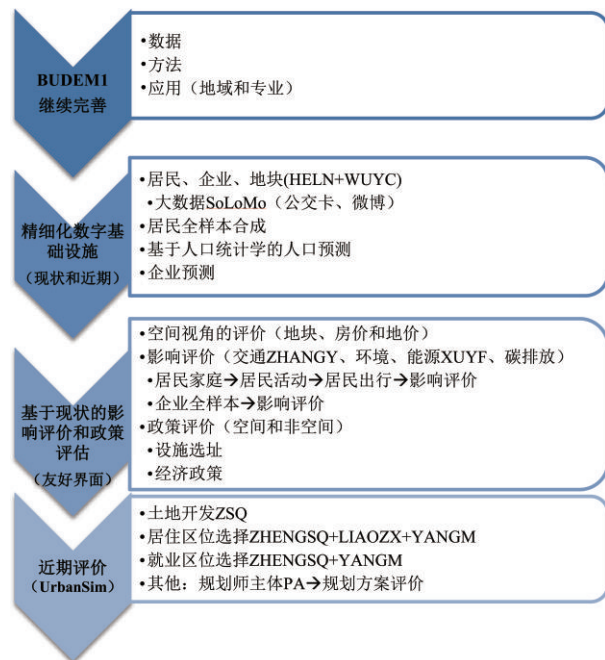


图 1 BUDEM 模型(微观尺度)的研究框架

Fig.1 Framework of Fine-scale BUDEM

(2) 城市形态 能耗 环境集成的多智能体模型

笔者于 2012 年建立了城市形态 能耗 环境集成的多智能体模型 (FEE-MAS), 在虚拟空间内, 实现地块尺度的城市形态对应的能耗和环境影响评价的模拟框架 (图 2),

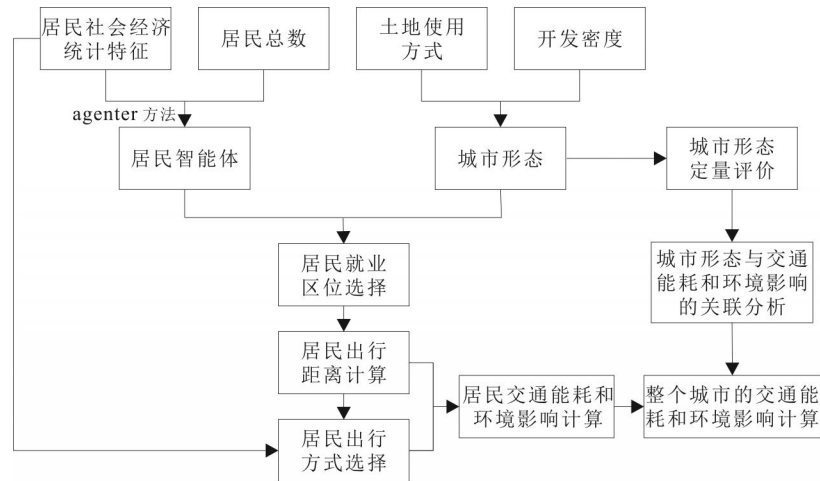


图2 FEE-MAS模型模拟流程图

Fig.2 Flowchart of the FEE-MAS Model

目前侧重于居民的通勤出行研究^[25,26]。该模型的基本出发点是每个居民进行居住地和就业地选择,之后进行通勤出行的交通方式选择,进而能够对居民通勤的能耗和环境影响进行评价,最后在地块尺度上对模拟结果进行汇总,识别规律,是典型的精细化城市模拟的研究思路。下阶段拟在所建立的模拟框架基础上,实现其他目的出行的评价,以及生活和生产方面的评价。

(3) 规划师主体

用地规划方案的制定是城市总体规划编制的核心内容之一,而有不同要求和偏好的政府、规划师和居民等主体是制定过程的主要参与者。笔者提出了利用规划师主体支持用地规划方案制定的理论和方法框架(图3),明确规划师、政府和居民主体的角色和相互作用,利用已有规划方案的数据挖掘和调查问卷方法识别规划师的规划规则,结合综合约束条件和专项规划制定和评价用地规划方案。在虚拟空间进行规划师主体理论的试验后,目前已完成该方法在北京市用地规划方案制定中的具体应用,是国际上较早对规划师制定用地规划方案的行为进行识别的研究。

(4) V-BUDEM

2008年开发的BUDEM是基于栅格元胞自动机的城市空间发展模型。在此基础上,目前笔者正进一步将其扩展至基于矢量CA的模型V-BUDEM(Vector-BUDEM),基本流程以及与已有工作的关系如图4所示。该模型中分析的元胞单元为城市地块,邻域以缓冲区来判断,即元胞周围的地块完全位于该元胞的特定缓冲区内时,则将这些地块作为该元胞的邻居。模型仍然考虑制度性约束、邻域约束和空间约束三大约束条件,并采用logistic方法实现北京市城市增长的动态模拟。在此基础上,笔者还考虑将地块自动划分(parcel subdivision)和V-BUDEM结合,实现城市增长和地块划分相结合的动态模型,最后结合规划师主体实现用地布局的规划^[27]。

3.2 大数据挖掘

(1) 公交刷卡数据挖掘

公交刷卡数据记录了每个持卡人的具有精细时空标签

的轨迹。笔者分别获得了2008、2010和2012年度的北京市公交和轨道交通刷卡数据,并利用2008年公交刷卡数据(854万持卡人连续一周共7797万次出行),对北京市通勤出行进行了识别,得到22万余人的居住地、就业地和通勤出行,进而对通勤形态的时空分布进行了评价,并对典型居住区和就业地的通勤出行进行了重点分析^[25]。此外,还基于识别的通勤出行,对北京市的通勤效率和职住平衡情况进行了评价,以及利用公交刷卡记录和兴趣点(points of interest, POI)数据进行北京市的城市功能区识别^[28]。

(2) 出租车轨迹挖掘

出租车轨迹记录了每个出租车个体的精确的时空信息。目前笔者正与微软亚洲研究院开展合作,利用北京市出租车轨迹数据和兴趣点(point of interest, POI)数据评价交通分析小区(TAZ)尺度的城市功能(初步结果见图5),并计划将公交刷卡数据与出租车轨迹数据整合,实现更为完整的城市功能的评价^[29]。预期的评价结果是,每个交通分析小区能够识别出各项城市功能的比例,如居住、就业、购物等,进而评价每个小区的混合使用程度,是对传统的基于土地使用数据评价土地混合使用程度的一种方法补充。

(3) 社会化网络数据挖掘

社会化网络(social network service, SNS)记录了每个用户的个人属性特征、发言、用户之间的关系,用户可以在这些网站上签到从而记录自己的地理位置信息,即签到数据(check-in data)。目前笔者利用新浪微博数据开展了两方面的研究工作,一方面针对微博的用户数据,笔者探索了一种根据聚类规则有针对性地抓取用户数据的方法,获得了数十万条与城市规划相关的用户数据,并基于关注已知的规划圈成员人数大于等于4的规则,识别了1.6万余名规划圈成员,分析了规划圈的规模、人脉关系、影响力核心、时空分布和变化趋势等特征^[30]。通过对微博数据的挖掘,首次比较完整地展现了规划行业的人脉图谱。另一方面,对微博上的签到数据进行抓取,进而评估不同城市活动(如访友、旅游、就餐、健身等)的时空分布特征和

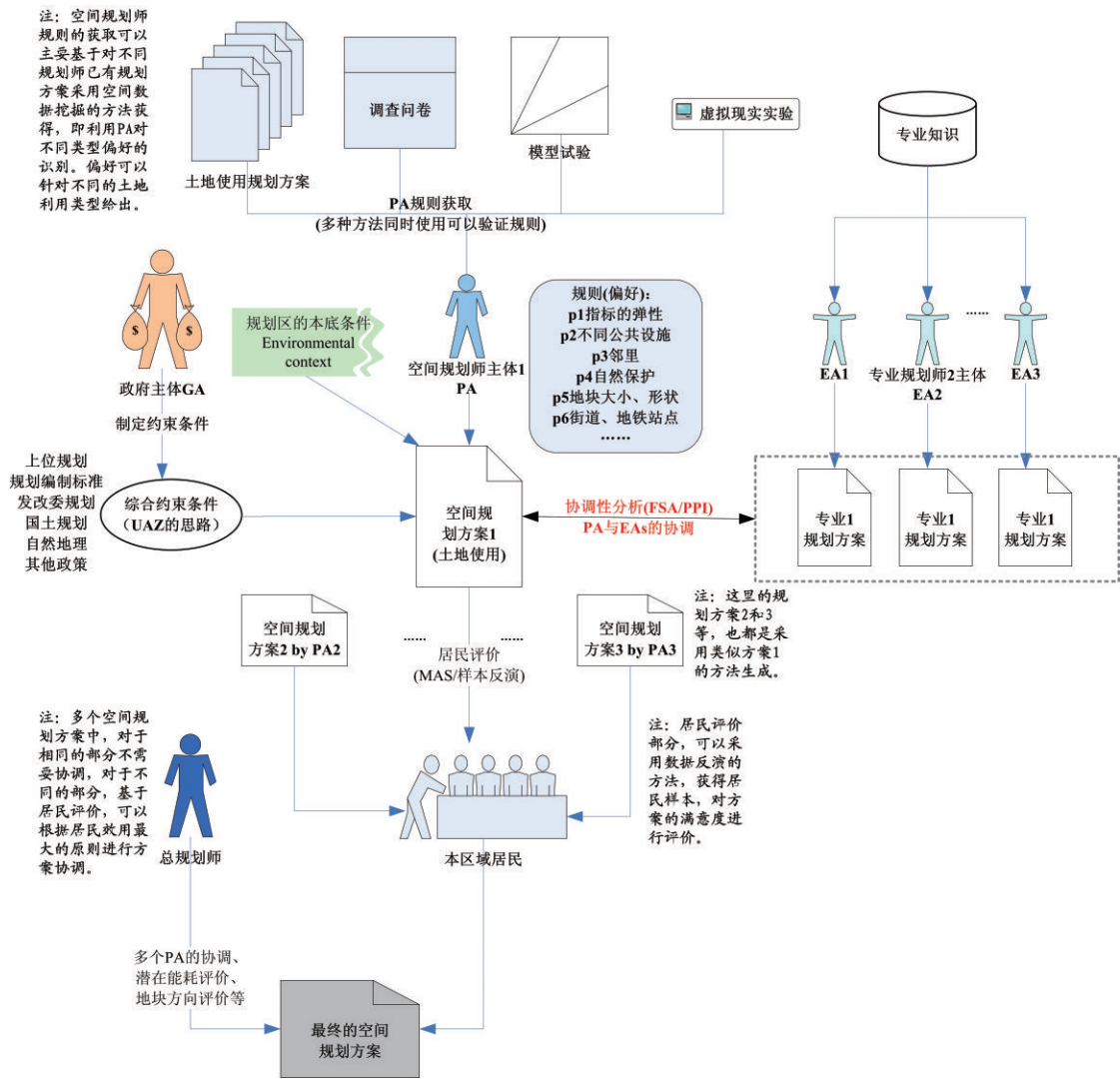


图3 利用规划师主体支持用地规划方案制定的流程

Fig.3 The Process of Using Planner Agents for Supporting Preparing Land Use Pattern

频率（一周或一个月），最后用于评价土地混合使用程度^[31]。

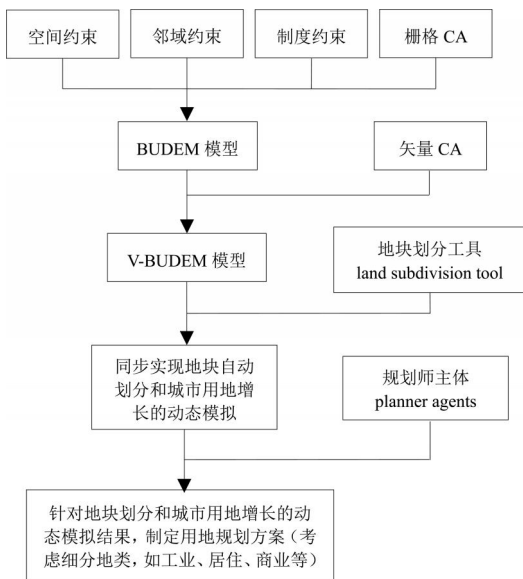


图4 V-BUDEM模型及相关工作

Fig.4 Flowchart of the V-BUDEM Model

3.3 微观数据获取与合成

(1) 网络数据抓取

笔者目前正在开展基于（移动）互联网和物联网的多源社会化数据的采集与处理研究，使之能够服务于城市规划，为规划工作打开新的视角。研究内容包括评估以互联网、移动互联网和传感器网络为载体的各类社会化数据资源在城乡规划中的应用价值；研究社会化数据的获取方法与技术，重点建立基于互联网的社会化数据智能获取工艺流程；研究社会化数据的同化处理技术，进一步提升数据的使用价值；获取的数据在规划中的典型应用。目前所抓取的数据已经在北京市实验室（Beijing City Lab, BCL）的网站公布，具体见 <http://longy.jimdo.com>。

(2) 人口数据合成

我国的人口方面的微观数据严重匮乏，因此人口微观样本的合成是在我国进行精细化城市模拟的重要工作环节。笔者于2012年建立了Agenter模型，其能够实现在没有微观样本的前提下，利用五普的统计报告、常识性知识合成北京市的人口微观全样本（图6）^[4,5]。目前，正在整合美

国亚利桑那州立大学开发的人口合成器 PopGen 和 Agenter 模型, 实现在有微观调查样本的情况下进行人口数据合成, 其中 PopGen 实现样本放大, 而 Agenter 实现合成样本中不包括的样本属性的合成。最后两个工具整合, 能够充分利用现有的统计数据、样本调查和常识性知识, 实现北京市人口全样本的合成, 该工作对应 BUDEM 模型 (微观尺度) 中的 BEIJING100%。

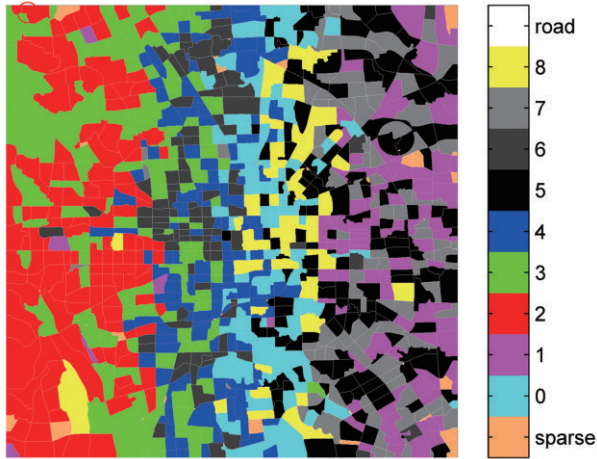


图5 北京市各交通分析小区的主导功能(初步结果)

Fig.5 Inferred Urban Function for Each Traffic Analysis Zone in Beijing

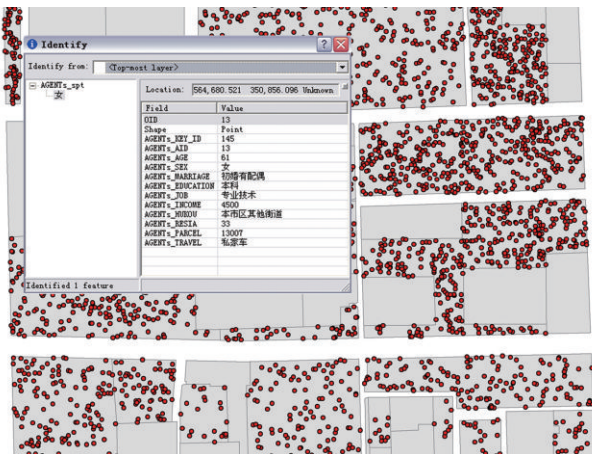


图6 北京市人口合成结果(部分)

Fig.6 Synthesized Population in Beijing

4 未来研究设想

根据城乡规划编制和评估的需求, 建立面向城乡规划的精细化城市模拟的框架体系, 提出相应的理论模型, 用于城市空间政策的评价, 起到规划决策支持的作用。可以基于复杂自适应系统和计量经济学理论, 采用 CA、ABM 和 MSM, 以及离散选择模型等技术方法, 开展精细化城市模拟的研究工作, 前期主要侧重于土地使用和交通两个方面。模拟的空间单元为地块, 考虑居民、家庭、企业等城市活动个体, 时间分辨率为 1 年 (即每步对应 1 年)。该研究框架主要用于城市空间政策的制定和评估, 应用的基本思路是, 宏观发展战略或发展目标为外生的情景条件, 从

微观的尺度对空间政策作用的效果进行评估, 即将宏观政策对微观的空间和社会个体的影响进行可视化反馈。该研究框架具有较好的可扩展性, 可以作为城市模拟的基础设施和政策评价实验室。

所建立的精细化城市模型在真实城市有望具有如下应用: 支持空间规划方案的评估: 不同于宏观模型的规划评估, 精细化城市模型可以从微观层面 (如地块和家庭) 识别城市活动主体对规划政策的反映, 进而评估规划方案, 如用地布局和开发强度的合理性, 规划方案的交通影响, 以及结合专业模型进行环境影响等方面的评估。此外, 在规划编制过程中, 通过对多方案的科学评价, 有望给出更为合理的规划方案。支持重大项目或基础设施的选址和评估: 对于城市改造、公共服务设施、市政基础设施或交通基础设施项目, 通过其对城市活动主体的影响 (如通过影响可达性改变居住和企业区位选择过程) 在地块空间尺度进行评价, 给出评估结论及项目选址建议。

注释:

也有将微观模拟模型翻译为 Microanalytic Simulation Model。Waddell 将对 UrbanSim 进行微观尺度应用的可行性和技术细节进行了详细探讨^[6]。

郑思齐, 张英杰, 张索迪, 等. 兼顾社会效益与土地机会成本的保障房选址适宜性评价方法[J]. 系统工程理论与实践, 2013. (待发表)

张永平, 龙瀛. 2013 利用规划师主体支持用地规划方案的制定[J]. 城市规划, 2013. (待发表)

Long Y, Zhang Y. Land-use pattern scenario analysis using planner agent[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2013. (Revision under review)

Long Y, Thill J-C. Combining smart card data, household travel survey and land use pattern for identifying housing-jobs relationships in Beijing[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2013. (Under review)

Zhou J, Long Y. Bus commuters' jobs-housing balance in Beijing: An exploration using large-scale synthesized smart card data[J]. Journal of Transport Geography, 2013. (Revision under review)

参考文献

- [1] 龙瀛, 毛其智, 沈振江, 等. 北京城市空间发展分析模型[J]. 城市与区域规划研究, 2010, 3(2): 180-212.
- [2] Müller K, Axhausen K W. Population synthesis for microsimulation: State of the art[C]. Proceedings of the 10th Swiss Transport Research Conference, 2010 (<http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:1623?q=microsimulation>).
- [3] Deming W E, Stephan F F. On least squares adjustment of a sampled frequency table when the expected marginal totals are known[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1940, 11(4): 427-444.
- [4] 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[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 416-426.
- [5] Long Y, Shen Z. Disaggregating heterogeneous agent attributes and location[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2013, 42(1): 14-25.
- [6] Orcutt G. A new type of socio-economic system[J]. The Review of

- Economics and Statistics, 1957,39(2):773-797.
- [7] Ballas D, Clarke G. GIS and microsimulation for local labour market analysis[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2000, 24(4):305-330.
- [8] Waddell P, Wang L, Charlton B, et al. Microsimulating parcel-level land use and activity-based travel: Development of a prototype application in San Francisco[J]. The Journal of Transport and Land Use, 2010,3(2):65-84.
- [9] 郑思齐,霍焱,张英杰,等.城市空间动态模型的研究进展与应用前景[J].城市问题,2010(9):25-30.
- [10] Miller E J, Hunt J D, Abraham J E, et al. Microsimulating urban systems[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2004,28(1-2):9-44.
- [11] Chingcuanco F, Miller E J. A microsimulation model of urban energy use: Modelling residential space heating demand in ILUTE[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2011,36(2):186-194.
- [12] 龙瀛,沈振江,杜立群,等.综合约束CA城市模型:规划控制约束及城市增长模拟[J].城市规划学刊, 2008 (6):83-91.
- [13] 龙瀛,韩昊英,毛其智.利用约束性CA制定城市增长边界[J].地理学报,2009,64(8):999-1008.
- [14] Stevens D, Dragicevic S. A GIS-based irregular cellular automata model of land-use change[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2007,34(4):708-724.
- [15] Shen Z, Kawakami M, Kawamura M. Geo-simulation model using geographic automata for simulating land use patterns in urban partitions[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2009, 36(5):802-823.
- [16] Moreno N, Menard A, Marceau D J. VecGCA: A vector-based geographic cellular automata model allowing geometric transformations of objects[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2008,35(4):647-665.
- [17] 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.
- [18] Evans T P, Kelley H. Multi-scale analysis of a household level agent-based model of landcover change[J]. Journal of Environmental Management, 2004, 72(1-2): 57-72.
- [19] Torrens P M, Benenson I. Geographic automata systems[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2005,19(4):385-412.
- [20] Jumba A, Dragicevic S. High resolution urban land-use change modeling: Agent city approach[J]. Applied Spatial Analysis and Policy, 2012,5(4):291-315.
- [21] Li X, Shi X, He J Q, et al. Coupling simulation and optimization to solve planning problems in a fast developing area[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2011,101(5):1032-1048.
- [22] Shen Z, Yao X, Kawakami M, et al. Simulating spatial market share patterns for impacts analysis of large-scale shopping centre on downtown revitalization[J]. Environment and Planning B, Planning and Design, 2011,38(1):142-162.
- [23] 龙瀛,毛其智,杨东峰,等.城市形态、交通能耗和环境影响集成的多智能体模型[J].地理学报,2011,66(8):1033-1044.
- [24] Long Y, Mao Q, Dang A. Beijing urban development model: Urban growth analysis and simulation[J]. Tsinghua Science and Technology, 2009,14(6):787-794.
- [25] 龙瀛,张宇,崔承印.利用公交卡刷卡数据分析北京职住关系和通勤交通形态[J].地理学报,2012,67(10):1339-1352.
- [26] Long Y, Mao Q, Shen Z. Urban form, transportation energy consumption, and environmental impact integrated simulation: A multi-agent model[M]//Zhenjiang Shen (ed.) Sustainable Development and Spatial Plan: How to achieve a sustainable urban form in Asian cities?Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [27] Zhang Y, Long Y. Urban growth simulation using V-BUDEM: A Vector-based Beijing urban development model[C]. Proceedings of Spatial Planning and Sustainable Development, Beijing, 2013.
- [28] Long Y, Han H Y, Yu X. Data and Points of Interest in Beijing[Z]. Beijing City Lab, 2013, Working paper#11 (<http://longy.jimdo.com/working-papers-1/wp-201>).
- [29] Yuan J, Zheng Y, Xie X. Discovering Regions of Different Functions in a City Using Human Mobility and POIs[C]//Proceedings of the 18th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2012, 186-194. Beijing, China: ACM.
- [30] 茅明睿,龙瀛.基于微博数据的规划圈识别初探[C].2013中国城市规划年会论文集,2013.
- [31] Long Y, Liu X. "How mixed is Beijing, China? A visual exploration of mixed land use"[J]. Environment and Planning A, 2013,45(12): 2797-798.

责任编辑 赵永宏