

Beijing City Lab

Long Y, 2013, Urban Spatial Development Model: A review. Beijing City Lab.
Working paper # 12

城市空间发展模型研究进展

龙 瀛

（北京市城市规划设计研究院，北京，100045）

Urban Spatial Development Model: A review

Ying Long

Beijing Institute of City Planning, Beijing 100045, China

城市空间发展模型研究进展

摘要: 对城市空间发展模型（简称“城市模型”）的发展历程、分类和典型模型进行了详细综述，显示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。对精细化城市模型的主流建模方法进行了综述，包括元胞自动机（Cellular Automata, CA）、基于主体建模（Agent-based Modelling, 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。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的方法进行了综述。最后结合工作开展必要性，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: 城市模拟；土地与交通；规划支持系统；微观模拟

Abstract: This article reviewed the development history, classification and typical models of urban spatial development models (hereafter urban models). The results indicate that fine-scale urban models in the parcel and urban actor (e.g. a household and firm) scale will be the future direction of urban models. We further reviewed dominating modelling approaches for fine-scale urban models, including bottom-up approaches like cellular automata (CA), agent-based modelling (ABM) and microsimulation (MSM). We also reviewed worldwide micro-data synthetic approaches, which are essential for building fine-scale urban models. Lastly, we proposed the framework and key techniques based on GIS incorporating CA/ABM/MSM approaches for establishing a fine-scale urban model in Beijing, China. The model is expected to promote both the theory of planning support systems and the quantitative analysis level in planning practices in China.

Key words: urban simulation; land use and transportation; planning support system (PSS); microsimulation

1 城市空间发展模型

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，也有学者将城市空间发展模型称为“城市空间动态模型”、“城市模型”或“土地模型”。

1.1 城市模型发展历程

城市模型研究始于 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；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；60 年代掀起城市模型研究的高潮，哈佛大学出现了以区位理论为基础的城市生长模型，和以空间相互作用为理论基础的劳瑞（Lowry）模型(赵强和胡连生, 2006)。但是，当时也有不

同意见, 如 Lee(1973)对大尺度的综合城市模型提出质疑。从 90 年代开始, 随着计算机硬件技术和 GIS 技术的日益成熟, GIS 在城市模型研究中的应用及其与城市模型的集成已经成为城市模型发展的重要趋势。总体上来说, 城市模型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(龙瀛等, 2010), 如图 1 所示:

(1) 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, 如 E. W. Burgess 提出的城市土地利用的同心圆模式 (Concentric Ring Model)、W. Christaller 提出的中心地理论 (Central Place Theory)、H. Hoyt 提出的土地利用的扇形理论 (Sector Model), 以及 C. D. Harris 和 E. L. Ullman 提出的多核心土地利用模式。

(2) 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。静态城市模型不考虑时间维, 主要分为两类, 一是城市统计模型, 二是空间相互作用模型 (如劳瑞模型)。

(3) 动态城市模型是考虑时间维的城市模型, 是目前城市模型研究的主要方向, 主要分为两个方面: 以系统动力学 (System Dynamics) 为代表的城市模型和以离散动力学 (Discrete Dynamics) 如元胞自动机 (Cellular Automata, CA)、分形理论 (Fractal) 和自组织理论 (Self-organization) 等为代表的城市模型。前者一般是基于微分方程的形式, 往往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及其相互作用, 或区位选择, 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的个体行为。随着以 GIS 为代表的信息技术和复杂科学的发展, 离散动力学城市模型如 CA 城市模型将是城市模型未来的重要发展方向之一, 例如近年来基于 CA 进行了诸多城市空间增长方面的模拟研究(黎夏等, 2006; 龙瀛等, 2010)。

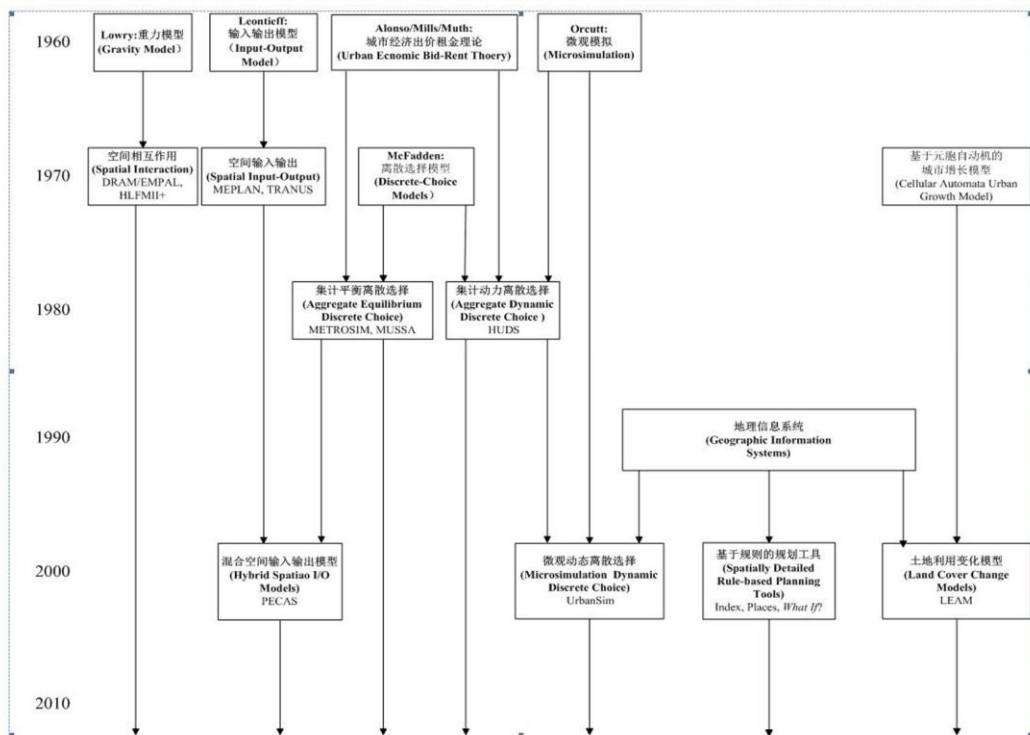


图 1 城市模型发展历程一览¹

Fig 1 Timelines of urban models based on various approaches

¹ 本图参考了 Paul Waddell 关于 UrbanSim 的介绍材料 (Dynamic Microsimulation: UrbanSim, Webinar 5 of 8-part TMIP, Webinar series on land use forecasting methods)。

1.2 城市模型分类

动态城市模型从不同角度可以有不同的分类。

从建模的方法看，常用的方法有基于空间相互作用理论（Spatial Interaction）的重力模型²（Gravity Model）、最大熵理论模型（Entropy Maximizing），来自经济学的 Alonso/Mills/Muth 地租理论（Rent Models）、离散选择模型（Discrete Choice Model）、空间投入产出模型（Spatial Input-output Model）、回归分析（Regression），来自复杂科学的元胞自动机（CA）、基于个体建模（Agent-based Modelling, ABM）³，以及微观模拟（Microsimulation Model, MSM）和地理信息系统（GIS）等技术（Pagliara 和 Wilson, 2010）。

从模型应用的具体领域看，有区域模型、城市土地模型、土地使用与交通模型、土地使用—交通—环境模型等（郑思齐等, 2010）。值得一提的是土地使用与交通模型，它是从城市交通模型发展而来的，在大城市遇到交通导致的严重的城市问题背景下，研究者开始着手研究交通对土地使用的反作用机理，从而开始了土地使用与交通模型的研究（如 Cube Land），基于传统的交通模型新增的土地模型研究内容一般包括居住区位选择、企业选址、房地产开发和土地开发等。目前，土地使用与交通模型是动态城市模型的主要存在形式之一，近几年，部分西方国家的代表城市或区域完成了一些用于实践的土地使用与交通整合模型。

从模型的空间尺度上看，又可分为宏观模型⁴和微观模型，宏观模型（或分区模型）的研究尺度是地理网格⁵（Grid）或小区（Zone），一般小区可以是交通分析小区（Traffic Analysis Zone, TAZ），也可以是统计小区（Census Tract），在这种情况下，城市活动主体一般选用小区内的居民、家庭或企业的统计特征，即以一类活动主体作为分析对象，而不是个体。而微观模型，一般基本空间单元较小，如街区、地块或建筑，相应的，城市活动主体一般对应居民、家庭和企业的个体，其原理与方法更加清晰直观。

1.3 典型城市模型

目前典型的城市模型基本信息如表 1 所示。这些模型研究城市土地使用为主，部分结合了交通模块形成了土地使用与交通模型（“名称”列中粗体的）。模拟的基本空间单元多为小区和网格，仅有 UrbanSim、ILUTE 和 Agent iCity 属于微观模型，其中 UrbanSim 可以用于多尺度的模拟。据项目组了解，目前 Alex Anas 的研究组正在洛杉矶区域使用 Relu-Tran 建立公共政策分析的虚拟实验室（Virtual Co-Laboratory for Policy Analysis in the Greater L.A. Region），属于分区尺度。MEPLAN 模型目前由英国 WSP 公司在很多城市开展了实践应用。

表 1 典型城市模型一览

Tab.1 The inventory of typical urban models

序号	名称 ⁶	所在国家	研究尺度 ⁷	开发年份	代表性开发人员/机构	主要方法	时间基础	代表性文献
1	POLIS	美国	小区	1960 年代	旧金山湾区政府协会	空间相互作用、离散选择	静态	Association of Bay Area Governments. 2009
2	DRAM/EMPAL	美国	小区	1970 年代	Stephen H.Putman	空间相互作用、	静态平衡	Putman, 1995

² 或劳瑞模型。

³ 也有研究将 ABM 模型称为多主体系统或多智能体系统（Multi-agent System, MAS），本文沿用 ABM 的说法。

⁴ 或集计模型（Aggregated Models）。

⁵ 或元胞（Cell）。

⁶ 粗体表示该模型也属于土地使用与交通模型。

⁷ 该表统一以小区（Discrete Zone）代表分区模型的研究尺度。

序号	名称 ⁶	所在国家	研究尺度 ⁷	开发年份	代表性开发人员/机构	主要方法	时间基础	代表性文献
						离散选择		
3	TRANUS	委内瑞拉	小区	1982年	Modelistica	空间投入产出	动态平衡	Modelistica, 1995
4	MEPLAN	英国	小区	1984年	Marcial Echenique	空间投入产出	动态平衡	Echenique 等, 1990
5	TLUMIP ⁸	美国	小区	1990年代	Tara Weidner	空间投入产出	动态平衡	Weidner 等, 2007
6	IRPUD	德国	小区	1994年	Michael Wegener	离散选择	动态	Wegener, 1996
7	CUF	美国	DLU ⁹	1994年	John Landis	基于规则建模	动态	Landis, 1994
8	DELTA	英国	小区	1995年	David Simmonds Consultancy	离散选择	动态	Simmonds, 1996
9	Metrosim	美国	小区	1995年	Alex Anas	离散选择	动态平衡	Anas, 1994
10	UrbanSim	美国	多尺度 ¹⁰	1996年	Paul Waddell	离散选择、微观模拟、基于个体建模	动态	Waddell, 2002
11	SLEUTH	美国	网格	1997年	Keith C. Clarke	元胞自动机	动态	Clark 等, 1997
12	CUF-2	美国	网格	1998年	John Landis 和 Ming Zhang	基于规则建模	动态	Landis 和 Zhang, 1998ab
13	ILUTE	加拿大	地块、居民、家庭	2004年	Eric J. Miller	微观模拟、基于个体建模	动态	Miller 等, 2004
14	Relu-Tran	美国	小区	2007年	Alex Anas	离散选择	动态平衡	Anas 和 Liu, 2007
15	PECAS	加拿大	小区	2005年	John Douglas Hunt 和 John E. Abraham	空间相互作用、空间投入产出	动态	Hunt 和 Abraham, 2005
16	BUDEM	中国	500m 网格	2009年	龙瀛	元胞自动机	动态	Long 等, 2009
17	MUSSA II ¹¹	智利	小区	1996年	Francisco Martinez	离散选择	动态平衡	Martinez, 1996
18	GeoSOS	中国	多尺度	2011年	黎夏	元胞自动机、基于个体建模	动态	Li 等, 2011
19	Agent iCity	加拿大	地块、居民、家庭	2012年	Suzana Dragicevic	基于个体建模	动态	Jjumba 和 Dragicevic, 2012
20	BLUTI ¹²	中国	小区	2012	张宇	离散选择	静态平衡	张宇等, 2012

2 精细化城市模拟

基于上述对城市模型发展历程的分析可以看出, 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; 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, 这方面理论和实证都有较多研究; 随着研究尺

⁸ 该模型是在 TRANUS 和 UrbanSim 基础上实现的。

⁹ DLU (Developable Land Unit), 可开发用地单元, 为非规则多边形, 类似地块 (矢量格式)。

¹⁰ 空间单元可以是小区、网格或地块, 城市活动主体可以是类别 (Categorical) 层次, 也可以是个体 (Individual) 层次。

¹¹ 目前称为 Cube Land。

¹² 使用 Cube 软件基于北京市宏观交通模型 BMI Model 基础上开发。

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发展迅速,但在真实城市中全面应用的案例仍然有限;在国内,土地使用和交通模型和侧重于城市扩张模拟的城市模型都有一定研究,都属于宏观模型范畴,微观模型的研究较少。

根据上述对城市模型发展趋势和已有典型模型的分析,精细化的城市模拟(动态的、基于离散动力学的、微观的城市空间模型)将成为未来的研究热点。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。多种微观模拟的研究方法都可以用于精细化城市模拟,如微观模拟、元胞自动机和基于个体建模,下面从这三个方面介绍精细化的城市模拟的相关研究进展。

2.1 微观模拟

微观模拟¹³(Microsimulation Model, MSM)是由美国经济数学家 Orcutt(1957)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。与传统的自上而下的宏观分析模拟不同,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(Ballas 和 Clarke, 2000)。随着 GIS 的发展和研究的需要,也有学者提出空间化的微观模拟模型(Spatial Microsimulation)(Hanaoka 和 Clarke, 2007; Wu 等, 2008)。MSM 和 ABM 是有区别的,一般而言,前者更强调基于完整的微观个体属性数据进行政策评估(不限于空间政策,如税收、保险等),微观个体一般不可移动,而在 ABM 中,agent 一般可以移动,通过 agent 之间及 agent 与所处环境(Environment)之间的相互作用产生的宏观层次的涌现(emergence)现象来对系统进行探索。ABM 中个体的属性数据一般不一定丰富,基于 agent 简单的行为规则(Behavior Rule)观察系统层次的涌现行为是 ABM 的一个主要特征。Wu 等(2008)也呼吁 ABM 与 MSM 进行互补,同时用于精细化模拟**错误! 未定义书签。**

表 1 中的典型城市模型中, UrbanSim 和 ILUTE 都属于基于 MSM 的城市模型。其中 UrbanSim (<http://urbansim.org>) 提供了开放式城市模拟平台(The Open Platform for Urban Simulation, OPUS),可以在其基础上方便地进行模型应用。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¹⁴,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(Waddell 等, 2010)。据项目申请人了解,国内 UrbanSim 模型有一定应用,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(郑思齐等, 2010),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(Miller 等, 2004)。Chingcuanco 和 Miller(2011)利用 ILUTE 模型对地块尺度的能耗进行了评价。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,即在 MSM 中考虑了 agent 之间及 agent 与环境的相互作用。

¹³ 也有将微观模拟模型翻译为“Microanalytic Simulation Model”。

¹⁴ Waddell(2009)对将 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。

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(龙瀛等, 2008, 2009)。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(2007)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; Shen 等(2009)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, 重点从土地使用方式进行了时空动态模拟, Shen 作为本申请的主要成员, 将在已有研究基础上进行深入, 参与土地开发模块的理论研究和实证应用; Moreno 等(2008)提出了可以改变几何形状的矢量 CA 模型, 主要侧重于从 GIS 的技术方法进行探讨, 并不是面向规划应用的实证研究。矢量 CA 可以较好地表达精细化城市模型中的位置不可移动的地块空间, 但还不能对城市活动主体的行为进行建模并模拟, 为此需要结合基于个体建模技术进行城市模拟。

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(薛领等, 2004)。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(Ligtenberg 等, 2001; Evans 和 Kelley, 2004)。Torrens 和 Benenson(2005)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。Jjumba 和 Dragicevic(2012)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。

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(Li 等, 2011)。项目组成员沈振江基于 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(Shen 等(2011)); 而项目申请人龙瀛等(2011a)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, 也属于地块尺度的应用。

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。

3 精细化城市模型的数据准备

鉴于统计部门的数据不公开或源于保护隐私的作用, 多数研究者都很难获得全样本的个体数据。MSM 和 ABM 两种微观模型的数据情况有一定差别, 一般侧重于识别规律的 ABM 模型中, 一般不用 1 个 agent 对应 1 个微观个体, 如: Li 和 Liu (2008)、陶海燕等(2009)在居住区位选择的 ABM 中, 1 个网格对应 1 个居民 agent, 并不是网格空间所对应的实际居民数目; Shen 等(2009)分别尝试将 1、2、3、5 和 10 个居民作为 1 个 agent, 发现不同的比例对

模拟结果具有较大的不确定性；Zhang 等(2010)将 30m*30m 的网格内的平均居民数量作为 1 个 agent。可以看出，因为数据稀缺问题，多数 ABM 都不能实现 1 个 agent 对应真实城市的 1 个居民，同时对居民的集聚会带来模拟结果的不确定性，如果过于集聚也失去了微观模拟的精髓。Brown 和 Robinson(2006)的研究也表明 ABM 中居民偏好的异质程度对模拟的土地使用形态具有较大的影响，因此个体样本信息对于 ABM 至关重要。大多数的研究者都只能获得有限的个体信息，Crooks 等(2008)也曾提及，“个体信息的缺失是一个常见问题，在可以预见的未来，将继续影响这一类模型的发展”。在这里，Benenson 等(2002)所建立的 ABM 则属于一个例外，可以有较好的数据支持。

而基于 MSM 方法的微观模型，一般都用于真实城市支持政策制定和评价，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(2010)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)。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(1940)提出，可用于利用新的宏观统计数据更新历史的普查数据。Fienberg (1977)采用该方法将多个普查表格合成为一个。Birkin 等(2006)利用 IPF 开发了人口重建模型 (Population Reconstruction Model)，基于英国的 1% 居民调查数据，重新生成了 6000 万居民个体数据，Wu 等(2008)则利用人口重建模型合成的人口样本，基于微观模型和 ABM 模拟出了英国利兹的学生动态。Smith 等(2009)提出了改进人口样本数据合成的方法。

在国内，也有少数学者开始探讨个体数据合成的方法。Li 和 Liu(2007)初步地指出了利用统计数据定义居民 agent 属性的可能性，其根据统计数据将所有城市居民根据有无子女、收入两个属性分为六类，每类具有不同的环境变量偏好，但其仅考虑两个自身属性并基于这两个自身属性将个体样本分为四类，并没有给出每个样本的反演的具体属性数值，也没有考虑样本属性间的关系。项目申请人龙瀛等(2011b)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。

基于上述分析可以看出，国际上的精细化城市模型也不能获得全样本的微观数据，已有部分城市模型采用了数据合成的方法 (如 IPF) 建立居民或家庭全样本，被证明是可行的；鉴于国内的精细化城市模型研究刚刚起步，也同样面临数据稀缺的问题，还没有到具体探讨解决微观层面模型数据准备的方法阶段。

4 研究展望

4.1 开展精细化城市模型研究的必要性

国际、国内的研究现状显示，精细化将是未来城市模型研究的重要方向，MSM、CA 和 ABM 是主要技术方法，国际上已有少量基于地块和城市活动主体的城市模型在真实城市应用的尝试 (UrbanSim、ILUTE 和 Agent iCity)，但总体上还处于探索阶段。而国内还没有精细化城市模型用于真实城市的报道。在数据层面，国际上的精细化城市模型也不能获得全样本的微观数据，一般采用数据合成的方法 (如 IPF) 合成居民或家庭全样本。鉴于国内的精细化城市模型研究刚刚起步，也同样面临数据稀缺的问题，除笔者外少有研究探索数据合成问题。

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)。而目前，一方面我国的大城市正逐渐由空间扩张向内部改造转变，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，对规划的公众参与、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，可以指导后续类似工作的开展。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。

4.2 精细化城市模拟的框架体系

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。精细化城市模拟的理论框架涵盖空间数据调查及获取、模型建立、GIS 系统开发及其实证应用。基本架构如图 2 所示，先从两个方面入手，数据的完善和 GIS 系统开发技术的建立。空间数据库建立方面，将基于目前所掌握的各个层面的空间数据和社会经济数据，通过微观样本合成这一关键技术，反演¹⁵（Disaggregate）得到地块或居民家庭尺度的微观数据；之后，基于 GIS 平台开发城市模型，并整合其他宏观模型（如社会经济发展规模预测模型、宏观土地利用模型）和各个专业的微观模型（交通模型和环境影响评价模型）。

¹⁵ 或称为合成（Synthesize）。

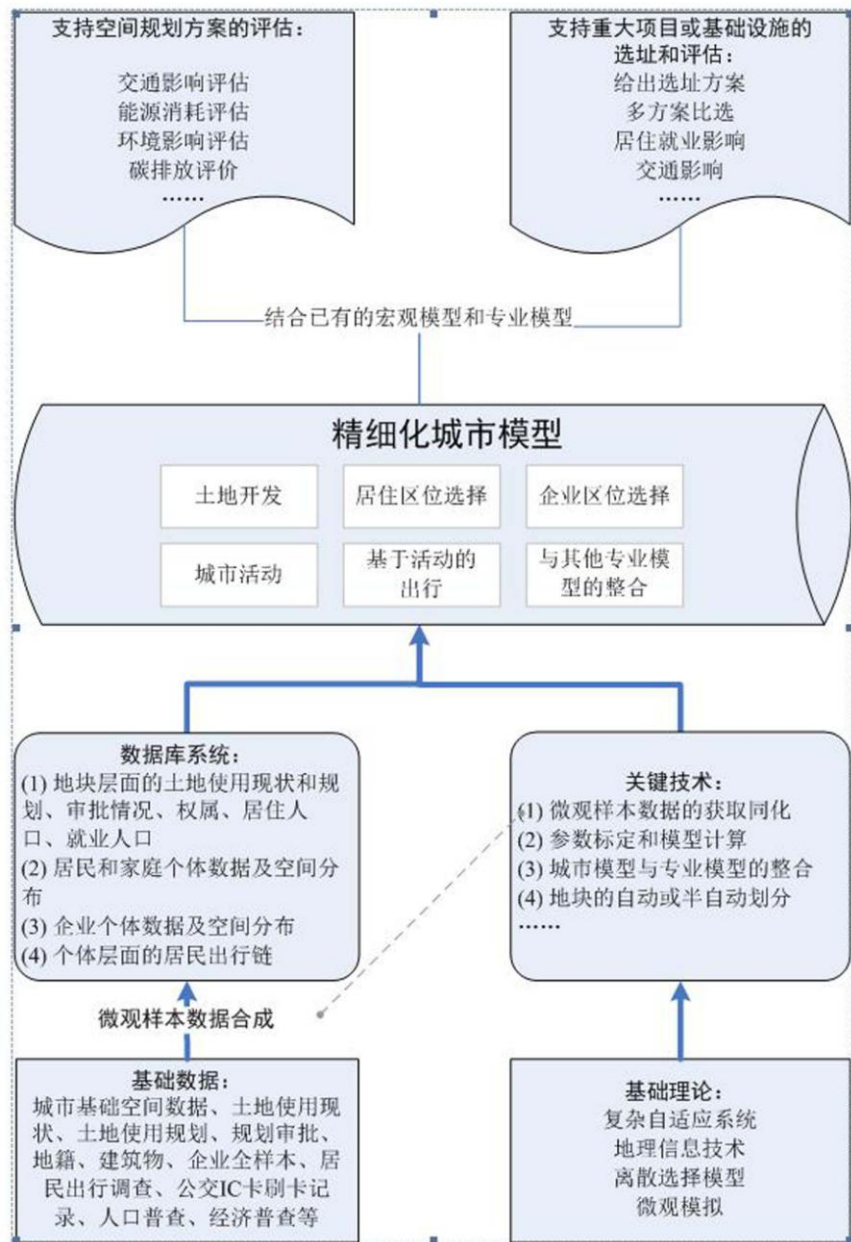


图 2 精细化城市空间发展模型研究框架

Fig 2 The research framework of fine-scale urban spatial development model

建议采用动态的微观模型的形式，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评价政策实验室。

4.3 精细化城市模拟的关键技术

理论研究方面将建立五个模块，土地开发、居住区位选择、企业区位选择、城市活动和基于活动的出行。用于提供宏观情景条件的宏观指标，如宏观经济预测（GDP、房价和地价等）、城市发展预测、机动车发展规模预测等，在北京模型建立过程中，将由已经完成的北京城市空间发展模型（Beijing Urban Spatial Development Model, BUDEM）（Long 等, 2009）和北京市土地使用与交通整合模型（Beijing Land Use and Transportation Integrated Model, BLUTI）（张宇等, 2012）这两个宏观模型提供。

各模块之间的关系如图 3 所示：外部宏观模型为各模块提供外生变量条件，外接的人口统计学模型（Demographic Model），用于反映居民和家庭的状态和变动过程等，如居民的出生、年龄增长和死亡等，家庭的生成、合并和拆分等，是城市活动和交通两个系统的重要数据，可不单独开发该模型，而是借用已有模型（如 PopSyn）。精细化城市模型主要包括精细化的城市活动系统¹⁶和基于活动的（Activity-based Travel）城市交通系统，二者之间存在紧密的反馈关系，是城市模拟的重要基础和核心内容。城市活动系统部分主要包括土地市场行为（开发商的投资开发）、房地产市场行为（居民的居住区位选择和企业的择址行为）和城市活动（主要表现为以自然人为媒介表达出来的基于生活需求及个人属性表现出来的特定活动，如基于就业地的上班、基于就学地的上学、基于商场等零售业的购物等）。而上述各类行为都将导致交通需求，但主要表现为城市活动的交通需求，将个人的一日城市活动链接起来即组成出行链，出行链中需进行出行目的地选择、出行时段选择、出行方式选择等，最终将交通需求所构成的交通量分配到交通网络上，进而完成交通分配模型。交通分配的结果计算得出的交通可达性反馈影响居民的区位选择和企业的选址等行为，进而可达性还将影响区域房价及地价。

¹⁶ 对应土地模型。

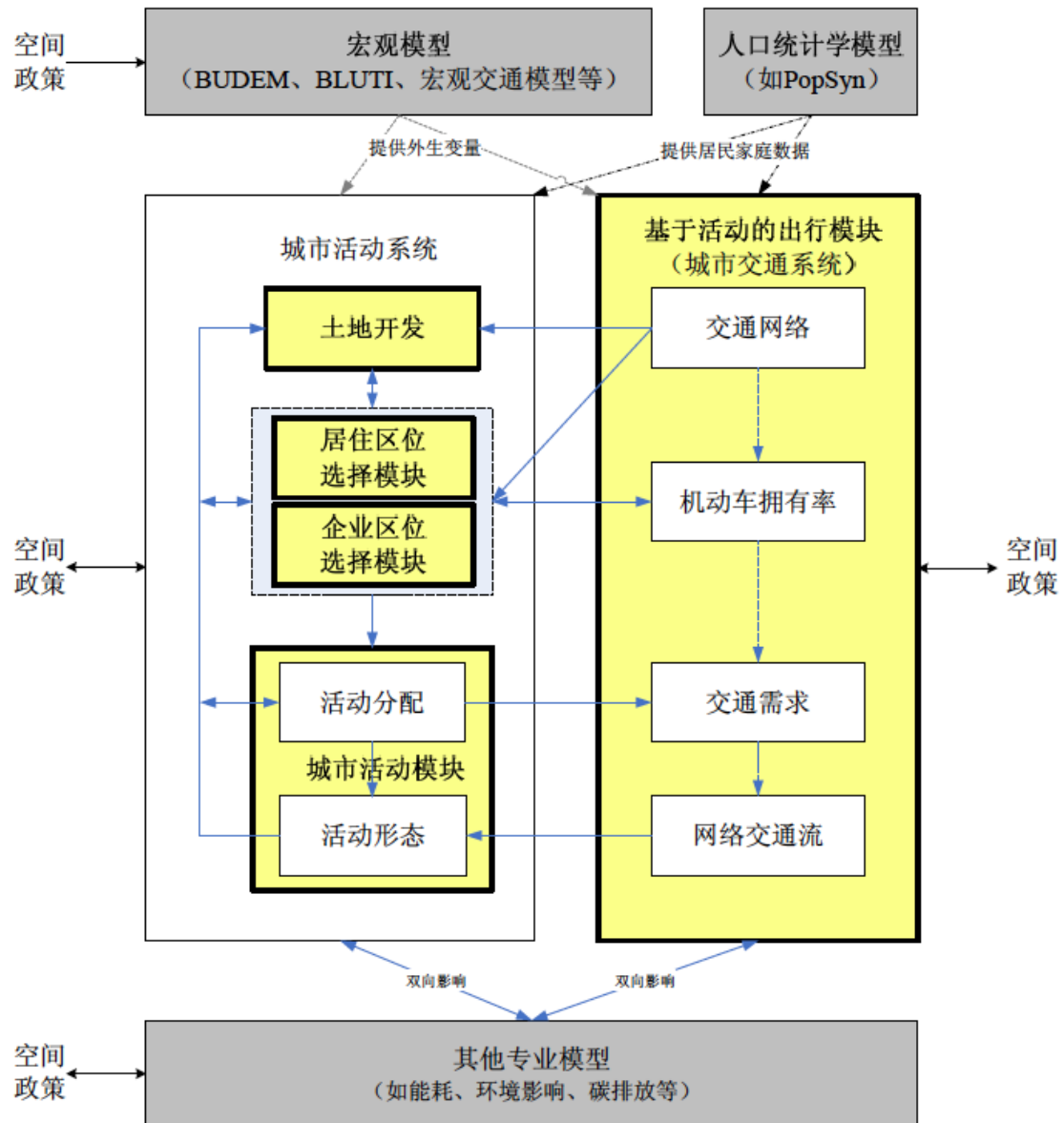


图3 精细化城市模型中各模块之间的关系（粗框表示待研究的模块）

Fig 3 Relationship among modules of fine-scale urban model

所建立的精细化城市模型在真实城市有望具有如下应用：（1）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。（2）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。

参考文献

1. Anas A. METROSIM: A Unified Economic Model of Transportation and Land-Use. Williamsville, Alex Anas & Associates, 1994.
2. Anas A, Liu Y. A Regional economy, land use, and transportation model (Relu-Tran©): formulation, algorithm design, and testing. *Journal of Regional Science*, 2007, 47(3): 415-455.
3. Association of Bay Area Governments, 2009, Available online at: <http://www.abag.ca.gov/planning/currentfcst/modeling6.html>
4. Ballas D, Clarke G. GIS and microsimulation for local labour market analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24(4): 305-330.
5. Benenson I, Omer I, HatnaE. Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2002, 29: 491-512.
6. Birkin M, Turner A, Wu B. A synthetic demographic model of the UK population: Methods, progress and problems. Manchester, Proceedings of the second international conference on e-social science National Centre for ESocial Science, 2006. <http://www.ncess.ac.uk/events/conference/2006/papers>
7. Brown D G, Robinson D T. Effects of heterogeneity in residential preferences on an agent-based model of urban sprawl. *Ecology and Society*, 2006, 11-46. <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art46/>
8. Chingcuanco F, Miller E J. A microsimulation model of urban energy use: Modelling residential space heating demand in ILUTE. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2011, 36(2):186-194.
9. Clarke K C, Gaydos L, Hoppen S. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B*, 1997, 24: 247-261.
10. Crooks A, Castle C, Batty M. Key challenges in agent-based modeling for geo-spatial simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32(6): 417-430 .
11. Deming W E, Stephan F F. On least squares adjustment of a sampled frequency table when the expected marginal totals are known. *Annals of Mathematical Statistics*, 1940, 11(4): 427-444.
12. Echenique M H, Flowerdew A D J, Hunt J D, et al. The MEPLAN models of Bilbao, Leeds and Dortmund. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, 1990, 10(4): 309-322.
13. Evans T P, Kelley H. Multi-scale analysis of a household level agent-based model of landcover change. *Journal of Environmental Management*, 2004, 72(1-2): 57-72.
14. Fienberg S E. *The analysis of cross-classified categorical data*. Cambridge, The MIT Press, 1977.
15. Hanaoka K, Clarke G P. Spatial microsimulation modelling for retail market analysis at the small-area level. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2007, 31(2): 162-187.
16. Hunt J D, Abraham J E. Design and implementation of PECAS: A generalized system for the allocation of economic production, exchange and consumption quantities. London, *Foundations of Integrated Land-Use And Transportation Models: Assumptions and New Conceptual Frameworks* (Lee Gosselin and Doherty, eds.), Elsevier, 2005: 217-238.
17. Jjumba A, Dragicevic S. High resolution urban land-use change modeling: Agent City approach *Applied Spatial Analysis and Policy* (in press). 2012.
18. Landis J D. *The California urban futures model: A new generation of metropolitan*

- simulation models. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1994, 21: 399-420.
19. Landis J D. The second generation of the california urban futures model: part 1: model logic and theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1998a, 25(5): 657-666.
 20. Landis J D. The second generation of the california urban futures model: part 2: specification and calibration results of the land-use change submodel. *Environment and Planning, B: Planning and Design*, 1998b, 25(6): 795-824.
 21. Lee D B. Requiem for large-scale models. *Journal of the American Institute of Planners*, 1973, 39(3): 163-178.
 22. Li X, Liu X. Defining agents behaviors to simulate complex residential development using multicriteria evaluation. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(4): 1063-1075.
 23. Li X, Liu X. Embedding sustainable development strategies in agent-based models for use as a planning tool. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(1): 21-45.
 24. Li X, Shi X, He J Q, Liu X. Coupling simulation and optimization to solve planning problems in a fast developing area. *Annals of the Association of American Geographers*, 2011, 101(5): 1032-1048.
 25. Long Y, Mao Q, Dang A. Beijing urban development model: urban growth analysis and simulation. *Tsinghua Science and Technology*, 2009, 14(6): 787-794.
 26. Martinez F J. MUSSA: a land use model for Santiago City. *Transportation Research Record*, 1996, 1552:126-134.
 27. Miller E J, Hunt, J D, Abraham, J E, et al. Microsimulating urban systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2004, 28(1-2): 9-44.
 28. Modelistica. TRANUS Integrated Land Use and Transport Modeling System Version 5.0. 1995. (Modelistica, Caracas, Venezuela)
 29. Moreno N, Menard A, Marceau D J. VecGCA: a vector-based geographic cellular automata model allowing geometric transformations of objects. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2008, 35: 647-665.
 30. Müller K, Axhausen K W. Population synthesis for microsimulation: State of the art Proceedings of the 10th Swiss Transport Research Conference. 2010
<<http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:1623?q=microsimulation>>
 31. Orcutt G. A New Type of Socio-Economic System. *Review of Economics and Statistics*, 1957, 58: 773-797.
 32. Pagliara F & Wilson A. The state-of-the-art in building residential location models, in F. Pagliara et al. (eds.), residential location choice: models and applications, advances in Spatial Science Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
 33. Putman S H. EMPAL and DRAM location and land use models: A technical over- view. urban simulation laboratory, department of city and regional planning, University of Pennsylvania, Land Use Modeling Conference Proceedings, Dallas, TX, 1995
 34. Shen Z, Kawakami M, Kawamura M. Geo-simulation model using geographic automata for simulating land use patterns in urban partitions. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2009, 36(5): 802-823.
 35. Shen Z, Yao X, Kawakami M, Chen P. Simulating spatial market share patterns for impacts analysis of large-scale shopping centre on downtown revitalization. *Environment and Planning B, Planning and Design*, 2011, 38(1): 142-162.
 36. Simmonds D C. DELTA Model Design. David Simmonds Consultancy, Cambridge, UK

- 1996.
37. Smith D M, Clarke G P, Harland K. Improving the synthetic data generation process in spatial microsimulation models. *Environment and Planning A*, 2009, 41: 1251-1268.
 38. Stevens D, Dragicevic S. A GIS-based irregular cellular automata model of land-use change. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2007, 34(4): 708-724.
 39. Torrens P M, Benenson I. Geographic automata systems. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2005, 19(4): 385-412.
 40. Waddell P. UrbanSim: Modeling urban development for land use, transportation and environmental planning. *Journal of the American Planning Association*, 2002, 68(3): 297-314.
 41. Waddell P. Parcel-Level microsimulation of land use and transportation: The walking scale of urban sustainability. Resource Paper for the 2009 IATBR Workshop on Computational Algorithms and Procedures for Integrated Microsimulation Models, 2009.
 42. Waddell P, Wang L, Charlton B, Olsen A. Microsimulating parcel-level land use and activity-based travel: Development of a prototype application in San Francisco. *The Journal of Transport and Land Use*, 2010, 3(2): 65-84.
 43. Wegener M. Reduction of CO2 emissions of transport by reorganisation of urban activities. Hayashi, Y., Roy, J. (eds.): *Land Use, Transport and the Environment*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1996, 103-124.
 44. Weidner T J, Donnelly R, Freedman J, et al. A Summary of the Oregon TLUMIP model microsimulation modules. Washington D.C, 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2007.
 45. Wu B M, Birkin M H, Rees P H. A spatial microsimulation model with student agents. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32(6): 440-453.
 46. Zhang H, Zeng Y, Bian L, Yu X. Modelling urban expansion using a multi agent-based model in the city of Changsha. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20: 540-556.
 47. 黎夏, 叶嘉安, 刘小平. 地理模拟系统在城市规划中的应用. *城市规划*, 2006, 30(6): 69-74.
 48. 龙瀛, 韩昊英, 毛其智. 利用约束性 CA 制定城市增长边界. *地理学报*, 2009, 64(8): 999-1008.
 49. 龙瀛, 毛其智, 沈振江, 等. 北京城市空间发展分析模型. *城市与区域规划研究*, 2010, 3(2): 180-212.
 50. 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. *地理学报*, 2011a, 66(8): 1033-1044.
 51. 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. *城市规划学刊*, 2008, 6:83-91.
 52. 陶海燕, 黎夏, 陈晓翔. 基于多智能体的居住空间格局演变的真实场景模拟. *地理学报*, 2009, 64(6): 665-676.
 53. 薛领, 杨开忠, 沈体雁. 基于 agent 的建模——地理计算的新发展. *地球科学进展*, 2004, 19(2): 305-311.
 54. 赵强, 胡连生. 略论城市模型研究的发展趋势. *现代城市研究*, 2006, 6: 30-32.
 55. 郑思齐, 霍焱焱, 张英杰, 等. 城市空间动态模型的研究进展与应用前景. *城市问题*, 2010, (9): 25-30.
 56. 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*, 2011b, 66(3): 416-426.

57. 张宇, 郑猛, 张晓东, 等. 北京市交通与土地使用整合模型开发与应用. 城市发展研究, 2012, 12(2): 108-115.