

多主体系统在城市发展模拟中的应用

陈 蔚^{1,2,3}, 高晓路^{1,2}, 沈振江⁴

(1. 中国科学院区域可持续发展分析和模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 日本金泽大学环境设计学院, 日本金泽 920-1192)

摘 要:多主体系统(Multi-Agent System, MAS)是由多个主体(Agent)组成的松散的网络, 每个主体根据其属性和行为规则互相交流、协作甚至竞争。MAS通过模拟和观察大量主体的微观行为来研究系统整体的宏观规律, 对复杂系统的演化机理具有更合理、更准确的解释力, 因此, MAS在城市发展模拟中有很大的应用前景。本文介绍了多主体系统的基本框架及模拟思路, 综述了国内外城市模拟研究中MAS理论的应用现状。重点分析了MAS理论在城市模拟应用中的五个关键课题: 即微观个体数据的获取、微观主体的合理选择、主体行为规则的提取和设定、主体之间相互作用的描述与表达、环境变量的提取与导入等, 并对相关研究进展进行了综述。研究表明, 城市发展预测与政策评价是MAS应用的重点突破方向之一。

关 键 词:多主体系统; 城市发展; 微观模拟

1 引言

自20世纪60年代开始, 国外已经开始运用模型模拟的方法来研究城市问题, 开发过许多有影响的规划模型, 如劳利(Lowry)模型、威尔逊(Wilson)模型、韦格勒(Wegener)的Dortmund模型等^[1]。本世纪初, 在Michael Batty教授、叶嘉安教授等的倡导下, 元胞自动机和多主体决策理论等人工智能理论在城市和区域发展模拟的研究中取得较大突破, 并由此产生了新一代的城市和区域土地利用模拟模型、城市交通和综合性城市发展模型等。国际上有些学者对城市空间发展的模拟展开了更为深入的研究^[2-9]。考虑到动态性、交互性、便于可视化等优势, 将模拟的方法引入到对城市问题的解决之中, 已经成为研究城市问题的重要思路之一。

在城市发展的模拟中, 尤其是对城市空间结构演化和城市扩张发展的模拟中, 主要有元胞自动机(Cellular Automata, CA)和多主体系统(Multi-Agent System, MAS)两大基本方法。CA常用于自组织系统演变过程的研究, 是一种时间、空间、状态都离散, 空间相互作用和时间因果关系都为局部的网格动力学模型, 具有模拟复杂系统时空演化过程的能力^[10]。CA模型是许多城市模拟模型的基础, 但当

系统对象不以CA内在方式分布时则不能反映真实的空间关系, 此外, 它也不能表示由地表上自治、异质、去中心化的人类决策所带来的影响^[11]。而MAS通过模拟和观察大量个体的微观行为来研究系统整体的宏观规律, 在把握微观个体行为规律的基础上, 在细致的空间尺度上对人们的行为加以整合, 从而对城市和区域发展进行动态模拟和预测, 能够较好地解决宏观尺度的决策过程和微观尺度分析过程的整合问题。

在全球化背景下, 中国的城市化发展迅速, 城市化进程中的问题日益复杂, 成为政策研究的焦点。如随着城镇化率的提高, 新增和原有就业如何在空间上重新分配, 基础设施和公共服务设施的需求会发生哪些改变, 新增人口的住房需求如何得到满足, 会给城市房价带来什么改变, 现有交通基础设施能否满足需求, 资源和能源需求会有什么变化, 另外, 土地利用规划、新区和新城建设对于带动城镇化和满足新的需求有什么作用, 等等。

由于上述问题的高度复杂性, 城市规划决策存在高度不确定性, 特别是人文经济因素的微小变化就会对整个系统产生很大的作用。因此, 在实践中, 各种调控政策的影响和作用前瞻性不足成为亟待破解的难题。运用传统的系统动力学方法来解

收稿日期: 2011-11; 修订日期: 2012-01。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171138)。

作者简介: 陈蔚, 硕士生, 主要从事城市地理、城市发展政策研究。E-mail: moysta2010@gmail.com

通讯作者: 高晓路(1969-), 研究员, 博士生导师。主要从事城市环境评价、城市空间分析研究。E-mail: gaoxl@igsrr.ac.cn

决城市发展问题局限于宏观机制的探索,而对人或企业主体的行为的微观动力机制及其动态性和不确定性考虑不足,因此政策效果的预测经常存在可信度不足的问题。

可见,多主体模拟在城市发展政策研究方面是一个很有前景的工具。为此,本文对现状进行了综述,并分析了多主体模拟应用中的瓶颈及其对策,展望了多主体模拟在城市发展研究领域的前景。

2 多主体系统框架及模拟思路

2.1 多主体系统框架

多主体系统(MAS)是由多个主体(Agent)组成的松散网络,这里的“多个”不仅表示数量的巨大,还表示种类上的丰富。比如在一个社会经济系统中,主体可能包括大量的个人,同时也可能包括大量的运营企业、投资者、开发商,甚至是城市基础设施等等。在多主体系统中,每个主体有其自身的属性和行为规则,并根据其属性和行为规则互相交流、协作甚至竞争^[12]。抽象而言,它是由多个主体共同作用下的系统,是一组同时发生的计算机过程所组成的系统,其目标是探讨这些相互独立的主体过程如何被协调。因此,协调是多主体系统的核心问题^[13]。

主体(Agent)是多主体系统中最重要概念之一。从人工智能(Artificial Intelligence)的观点来说,主体是一种在异质的协同环境中能够持续完成自治的、面向目标行为的软件体^[14]。主体有自己的知识结构、行为逻辑以及期待实现的目标。主体具有独立性、自治性和交互性。独立性指的是对于单个主体,它只关注自身的需求和目标,其设计和实现可以独立于其他主体;自治性指主体不仅能够作用于自身,而且可以能动于环境,并能够接受环境的反馈信息,重新评估自己的行为;交互性指主体与其他主体协同工作、共同完成目标任务。

一般来说,多主体系统模拟的框架包含以下5个部分^[15]:

(1) 主体(Agents),主要指各种实体 Agent,根据具体的仿真需要,它们具有不同的特性。所有的 Agent 组成一个 Agent 社会。

(2) 环境(Environment),是指实体 Agent 的赖以生存的空间或环境基础。

(3) 规则和参数(Parameters),这里既包含一些

模拟参数,也包含预先定义的模拟规则和要求,如环境的设定、Agent 的通信规则等。

(4) 交互界面(Interface),是指模拟系统和用户的接口,是用户控制模拟过程和观察模拟结果的唯一通道,一般是通过辅助 Agent 来实现。

(5) 模拟平台(Platform),即实现 MAS 计算机模拟的技术平台。

2.2 多主体系统模拟思路

多主体模拟是多主体系统理论与模拟方法的融合,用多主体模拟方法研究复杂系统与一般模拟研究的基本过程类似,但增加了对模拟过程进行调整和细化的功能。一些学者提出用多主体模拟方法进行复杂系统研究的基本过程通常分为问题分析、主体建模和 MAS 构建 3 个步骤^[16]。在此基础上,通常还需要设计一些反馈环节,用于对模型进行校核和验证,通过模拟运行结果与实际数据的对比分析,对概念模型或模拟模型进行改进,直至满足相似性的要求。沈体雁^[17]对多主体模拟的步骤进行了总结,提出了建立城市模拟信息工程的“七步法”,即“问题定义”、“概念化”、“数据规范化”、“模型校准”、“系统设定”、“模型运算”和“结果表达与分析”等 7 个相互联系的步骤。

MAS 模拟的主要流程,可以概括如下:首先,分析实际系统,抽出要解决的关键问题;其次建立针对该问题的多主体系统,明确主体的选择、属性配置及其行为规则;然后,在一定的环境规则设定下进行主体行为模拟,从大量主体行为模拟中观测一般规律;最后,根据模拟结果解决问题。在此过程中还有一些反馈环节,主要的反馈环节是校核、验证,这些反馈将模拟运行结果与实际系统数据对比分析,促使对概念模型或模拟模型的改进,直到满足相似性要求。

由上可见,多主体系统关注的是大量微观个体之间的相互作用及其协调。这些行为可以是不同个体之间的直接关系,也可以是许多个体在相同环境作用下的间接关系。多主体系统不是以一个或一组方程的形式来体现系统中变量之间的因果关系,而是为各类不同的主体设定相互的关联方式及强度。在对城市系统的模拟中,它抛弃了完美经济人假设,通过学习算法来模拟主体的有限理性行为,强调进化和适应行为。这一特点使得我们能够为个别主体建立微观行为模型,并能够通过观察这些数量众多的微观主体的相互作用来研究整个区

域的宏观演化过程^[11]。

3 多主体系统在城市模拟中应用现状

目前,MAS方法广泛应用于人工智能、工业过程监控、无线电通信、网络和机器人的研究。越来越多经济、社会科学家将MAS方法用于社会多主体仿真,从事计算机、生态学和社会科学研究学者,正试图用MAS方法对分布式系统进行建模^[18]。在城市这个复杂的系统中,各种自治的、互相作用的主体(如个人、家庭、企业、政府等等)是造成城市不断发展演化的能动因素。因此,与城市发展相关的模型模拟成为了MAS方法应用的热点领域之一。

国外已经有很多基于MAS的城市模拟应用的研究,根据Web of Science搜索显示,以“multi-agent & urban”为主题可检索到243篇文献,近10年来相关文献数量增长了10倍多,可见国际上MAS方法在城市模拟中应用的增长趋势显著。另外,根据搜索显示,MAS相关研究按学科分类主要集中于计算机科学、人工智能、工程规划等领域。MAS在城市模拟中的应用尚处于新兴阶段。

国际上对于MAS方法的理论框架及其优势的研究已经比较成熟。如Crooks等提出了MAS应用的7个关键环节:建立模型的目标、模型在多大程度上立足独立理论、可否被复制应用、模型校准与认证方法、模型动态性如何通过主体间相互作用来表达、模型可操作性以及模型如何交流和共享^[2]。Ligtenberg等概述了MAS概念框架,并以荷兰东部地区土地利用总体规划为例,详细阐述了如何构建MAS系统来模拟基于多主体决策(multi-actor decision-making)的空间/土地演化过程,并讨论了MAS在空间情景分析中的优势与局限性^[3]。

国外对于MAS方法的具体应用,主要集中在土地利用演化、城市居住形态、城市商业形态等领域。如Loibl和Toetzer提出了一个MAS模型来模拟郊区系统的多中心发展^[4],模拟了在区域和地方多因素吸引/约束下的郊区人口迁移及商业形成。模型把家庭主体根据社会经济属性和行为逻辑规则划分为6个群体(agent classes),使得对迁移行为主体的模拟更贴近现实。该研究还首次开发了一个基于多空间因素影响的迁移决策模拟系统,软件融合了GIS、元胞自动机和自治主体的基本功能。

该平台已经应用于奥地利维也纳郊区的土地利用转化研究。Fontaine等针对未来多中心地区的住宅需求提出了一个模拟的框架,并基于MAS理论构建了HI-LIFE(Household Interactions through LIFE cycle stages)模型^[5],模拟了区域尺度的土地利用演化,从研究尺度上拓展了MAS理论在城市模拟中的应用。Benenson利用MAS和CA方法模拟了城市居民住宅位置的动态变化^[6]。在模型中,居民作为MAS中的主体,拥有自身的经济和文化属性;同时他们的邻居又是以CA中元胞领域的概念来模拟。Benenson把MAS和CA方法结合在一起来模拟城市某一组件(住宅)的动态变化的思路,对后续城市模拟研究,尤其是和土地利用转换相关的模拟起到了十分重要的借鉴作用。Shen开发了Shop-sim-MAS模型^[7],用以模拟和研究大型购物中心市场份额的空间动态演化过程。Shen的模型充分考虑了主体之间的相互作用,并将其归纳为两大类:家庭主体之间的对等影响和商店主体向家庭主体传递信息,并由此建立了一个相互作用效用函数,使MAS模拟更为精确可信。

国际上也有许多学者对MAS相关的软件与公用平台进行了改进或拓展。Moulin等开发了一个MAGS(Multi-Agent Geo-Simulations)系统^[8],该系统可以使几千个拥有空间认知能力的主体在2D和3D的虚拟地理环境中交互。该模型现在被用来研究城市环境中的群体行为。Lombardo等通过VBA语言将MAS系统集成到GIS中,开拓了MAS在模拟城市零售业动态选址中的应用^[9]。此外,英国伦敦大学利用的Repast (<http://www.casa.ucl.ac.uk/repast/>),美国Arizona大学Paul Torrent(<http://geosimulation.org/>)等的研究奠定了多主体城市模拟研究的理论基础,并提供了多个体模拟的平台,给世界各地的城市模拟研究者开创新的研究领域提供了可能性。英国伦敦大学应用Secondlife (<http://www.casa.ucl.ac.uk/abm/secondlife/>)的三维多主体模拟研究,把多个体城市模拟的理论深化到街区 and 建筑的层次。

国内MAS在城市模拟中应用最广泛的是在交通系统领域。这是因为多主体模型“自下而上”的建模思路能够很好的反映交通系统演化的“过程相关性”。如王立娟^[19]把北京西直门桥作为一个复杂系统来研究,通过使用基于多主体模拟的计算机建

模技术对其交通情况进行了模拟,证实了MAS在分析交通拥堵问题中的科学性和应用价值。国内MAS应用还涉足于经济系统的模拟。傅星等^[20]在仿照美国经济模型ASPEN的基础上,根据中国经济的特点扩展开发了多主体模拟系统CASPEN,模拟了在转型时期背景下,不同的财政政策与货币政策对微观经济主体及经济总量的影响。CASPEN为国家宏观经济政策的制定提供了一个政策模拟的平台,体现了MAS理论在政策建议与政策支持方面的巨大潜力。

城市空间发展的模拟是国内MAS应用的一个重要领域。林波等^[18]利用MAS方法及机制对城市空间演化进行建模。他的模型选取了城市空间中的家庭、工业企业和商业企业三典型主体,对其影响城市空间演化的迁移、消亡、繁衍等具体行为进行了详细的模型设计,以此实现了城市空间中各类主体及主体与环境间的交互作用。薛领、杨开忠^[11]的城市演化模拟模型,则进一步探讨了城市中居民、企业等大量微观主体非线性互作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,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,使MAS的应用从对城市结构演化的描述拓展到对城市结构的评价和分析。晁怡等^[21]则探讨了基于MAS的城市商业区位建模方法。他的模型由相互作用的环境层和多主体层组成,旨在探索商业区位过程中消费者、商业设施、政府等多主体之间以及多主体与环境之间的微观相互作用而导致的宏观商业布局过程。该研究为商业选址提供有用的决策依据,并在一个虚拟的城市空间中模拟了销售商在不同选址策略下的选址决策,开发了MAS理论的商业应用价值。龙瀛等^[22]则开发了城市形态——交通能耗——环境一体的MAS模型(Urban Form-Transportation Energy Consumption-Environment MAS model, FEE-MAS),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,探索了MAS用于空间规划方案的能耗和环境影响评价的可行性。

4 MAS在城市模拟应用中的关键技术

城市是一个复杂的综合体,城市的发展是经济、社会、科技、文化等多方面共同作用的综合。MAS提供了一种自下而上的,从微观模拟到宏观归纳的城市发展研究方法,有其思维方法上的优势,但是在实际应用中仍存在着一系列关键问题。

4.1 微观个体数据稀缺的制约

微观个体数据稀缺是制约MAS应用的一个技术瓶颈。MAS模拟需要大量的微观个体数据的支持,如居民的年龄、性别、婚姻、教育、工作等。而这些原始数据的获取往往需要投入大量的人力、物力和财力进行调查、整理和录入。目前,我国绝大多数部门只公开宏观的、统计层次上的数据,而这类数据仅适合用于宏观分析,对微观模拟的支持不够。即使在国外,通常也很难采集到现时、可立刻使用的个体样本数据^[2]。因此,个体样本数据稀缺的制约,是微观模拟中的一个普遍性难题。

针对微观个体数据不足的问题,部分学者进行了探索和尝试。龙瀛通过挖掘已知统计数据的内在隐含规律,并结合微观个体的通用规则,推导出不可证伪的个体样本的属性信息和空间分布,进而可以以GIS图层的形式直接作为微观模拟的数据基础^[23]。该方法获取的样本,符合已有的统计资料,并可以通过加入约束条件进一步优化样本数据精度。同时该方法的应用简单,统计意义上的准确度高,适合我国统计制度下的微观模拟模型的构建。未来的研究可以在龙瀛数据反演研究的基础上进一步深入,重点对实际统计数据和个体属性之间的概率关系或函数关系、个体的自身属性和所对应的空间对象的空间属性的关系等进行充分挖掘,进而提高个体样本反演的精度。

4.2 微观主体(Agent)的合理选择

在研究高度复杂的城市问题时,不可能把所有相关主体都提取出来作为模型的主体,必须对问题进行凝练,对主体进行筛选。主体的行为是MAS模拟的对象,选择不同的主体意味着模拟不同的对象。例如同样是关于零售业态的研究,如果以家庭为主体模拟购物行为,则侧重于反映不同的零售业布局和交通基础设施条件下居民生活方式和人口分布的演化特征;如果以零售业态为主体模拟选址行为,则可以更好地反映不同的人口和居住区分布下零售业态结构的演化特征;如果以城市规划师为

主体模拟政府规划行为,则更直观地反映不同的规划情景下人口分布和零售业态的演化特征。主体的选择是灵活的,选择不同的主体可以在同一个课题下给研究提供不同的视角。因此也有许多学者在研究中采取了多种主体同时模拟的方法。如Shen的Shopsim模型^[7]就考虑了家庭、超市、零售店三类主体,使该模型的模拟更加贴近现实。当然,选择的主体越多,模型的构建和模拟运算相对而言也就越复杂。

另外,即便是同一类主体,也存在着进一步细分的可能。例如选择家庭或者选择个人作为主体必然导致结果的不同,即便是同一类主体,行为模式也可能存在显著差异,如收入差异、文化差异、年龄差异、工作差异等等都会对个人主体的行为产生影响。如果要力求准确模拟,则必须细分主体,赋予他们不同的属性和行为逻辑。而其分类和行为规则,如果仅仅是基于粗略的统计就会失去科学依据。

目前对于主体的选择还没有成熟的讨论,大多数研究对主体的选择都是基于经验判断。未来的研究应该在大量模拟实践的基础上总结主体选择的一般原则,重点探讨主体细分程度对研究精度的影响,尝试建立一套标准化的衡量体系。

4.3 主体的行为规则的提取

主体的行为规则是微观模拟模型的核心。比如在林波等人的城市空间演化MAS模型中^[18],家庭主体有3大类行为:迁移、繁衍、消亡,而主体的这些行为将在什么条件下发生是由建模者根据现实情况提取规则加以设定的。不同的建模者根据自己的知识构成不同,要达成的研究目标不同,他们所设定的行为逻辑也不同。往往一个主体的决策是综合了多个行为逻辑的结果。一个比较常见的思路是参考大量的关于该方面研究的成果和既有模型,把各个领域的行为规则研究融合在一起,针对自己的研究做一些修改和改进,借助决策树理论流程,设定出最终的主体行为规则。当多个模型融合在一起,尤其是当行为逻辑涉及到心理学、社会学、经济学等跨学科综合的情况时,彼此之间是否会产生科学性上的矛盾和冲突,是目前研究容易忽视的一个问题。

未来的研究一方面应该完善城市发展中最基本的一些逻辑行为规则设定的标准化框架,如家庭

的迁徙、繁衍、消亡行为,个人的居住、通勤、购物、娱乐行为,企业的选址,土地利用的转化等等,这样有助于各类模拟研究的横向对比参照。另一方面则应该在积累大量跨学科综合的逻辑行为设定的经验基础上,探索学科间规则融合的接口和框架。

4.4 主体之间相互作用的描述与表达

主体的交互(Interaction)是MAS能够模拟城市发展的主要特色和优势。在主体交互关系的表达中一个重要的问题就是循环套嵌。例如,家庭和企业两大主体,家庭的居住区位选择会影响企业的区位选择;同时,企业的区位属性又会影响家庭的居住区位选择。这种相互作用往往是同时发生,在模型中很难处理。通常采取的解决办法是固定一个主体,观察另一主体的反馈。如在薛领、杨开忠的城市演化的多主体模型中^[11],就固定了道路交通和企业的数量和布局,来研究人口的分布规律。显然,这种处理仅仅刻画了主体之间相互作用的一个侧面,还没有实现完全的模拟。只能借助它来反映城市某方面的发展规律,而较难准确反映城市发展的真实情况。而Shen的Shopsim模型^[7]基于他需要研究解决的问题而主要考虑了两类相互作用:家庭主体之间的对等影响和商店主体向家庭主体传递信息。Shen建立了一个相互作用效用函数作为总效用函数的一部分,从而把相互作用很好的纳入到模型模拟中。这种表达相互作用的思路值得未来研究的借鉴和进一步发展。

4.5 环境变量的量化设置

环境变量的量化设置也是MAS建模的一大难点。主体是在特定的城市空间中进行各种行为。而环境变量的职责就是尽可能准确地描绘主体所处的城市空间。环境变量可以包括经济、社会、自然、科技、文化、政策法律等各大方面,不同的环境变量设置意味着对模拟设定了不同的情景。控制环境变量是控制模拟输出的主要手段。例如要模拟某一项城市政策,我们就需要为城市政策设置几套参数来描述几种政策情景,通过环境变量接口(interface)来模拟不同政策情景下的城市形态演化。当城市政策是一些难以量化的指标(如鼓励扶持政策、限制发展政策等)时,我们需要将其转化为可输入的变量,实现环境变量和接口的无缝对接。目前大多是基于大量的理论分析和经验来对环境变量做一套假设的数值,对得出的模拟结果做一些相对的分析,而缺乏绝对意义上的说服力。环境变

量的绝对量化导入将是未来MAS理论应用研究的重点。

5 MAS在城市发展模拟中应用的展望

综上所述,MAS较好解决了传统城市模拟模型中缺少动态演化、表达与处理细节能力薄弱、模型可变性差等问题,提供了一种自下而上、从微观到宏观的模拟思路。这种特点使得它在处理城市发展演化问题上具有先天优势。尤其是通过结合可视化输出,MAS能够对未来城市发展提供许多不同政策实施效果的输出,使城市模拟不再停留于解释问题或者描述问题的层面,而上升到解决问题的高度。

尽管MAS的理论框架已经比较成熟,但是从现有应用来看,在如何获取微观个体数据、如何挖掘MAS在各个领域问题研究中的描述力和解释力、如何校准模型以提高模拟精度、以及如何利用模型的预测能力来提高问题解决方案的前瞻性等方面还面临很多问题。要想解决这些问题,不但需要不断学习和借鉴MAS技术方法方面的最新研究成果,更需要基于人文经济地理学的理论,对城市发展的微观机制,特别是各类型主体的行为和相互作用,以及人文活动对资源环境的影响和响应机制进行深入的理论分析和实证研究,为MAS模拟提供客观的依据。

此外,城市的模拟涉及内容庞大而复杂,未来的MAS城市发展模拟研究,应该首先从人口分布、企业布局等城市的某个系统入手,然后集成整合各项研究成果,实现整个城市的综合模拟。在MAS城市模拟理论发展的同时,应该致力形成一批相关应用软件和模拟平台。未来,MAS城市模拟理论和应用研究的成果不但会对城市发展政策的制定提供强有力的技术支持,对MAS技术的完善也将是一个有力的促进。

西方国家的城市发展已经达到一定的水平,可以根据历史经验建立基础理论,但另一方面带来的问题是缺乏预测与评价应用研究的条件。而中国城市正处于快速发展时期,城市化问题日益凸显,并随着发展推进而充满了不确定性。这对城市规划和城市政策制定的前瞻性提出了更高的要求。在此背景下,中国学者有可能在城市发展预测与政策评价领域取得突出成绩。

参考文献

- [1] 陈干, 闫国年, 王红. 城市模型的发展及其存在问题. 经济地理, 2000, 20(5): 59-62, 71.
- [2] 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.
- [3] Ligtenberg A. A design and application of a multi-agent system for simulation of multi-actor spatial planning. Journal Environmental Management, 2004, 72(1-2): 43-55.
- [4] Loibl W, Toetzer T. Modeling growth and densification processes in suburban regions: Simulation of landscape transition with spatial agents. Environmental Modelling & Software, 2003, 18(6): 553-563.
- [5] Fontaine C M, Rounsevell M D A. An agent-based approach to model future residential pressure on a regional landscape. Landscape Ecology, 2009, 24(9): 1237-1254.
- [6] Benenson I. Multi-agent simulations of residential dynamics in the city. Computers, Environment and Urban Systems, 1998, 22(1): 25-42.
- [7] Shen Z J, Yao X B, Kawakami M, et al. Simulating spatial market share patterns for impacts analysis of large-scale shopping centers on downtown revitalization. Environment and Planning B, 2011, 38(1): 142-162.
- [8] Moulin B, Chaker W, Perron J, et al. MAGS project: Multi-agent GeoSimulation and crowd simulation//Kuhn W, Worboys M. Spatial Information Theory, Proceedings foundations of Geographic Information Science Book: Lecture Notes In Computer Science, 2003: 151-168.
- [9] Lombardo S, Petri M, Zotta D. Intelligent Gis and retail location dynamics: A multi agent system integrated with ArcGis/Gavrilova M L, Kumar V, Mun Y. Computational science and its applications: ICCSA 2004, PT 2 Book: Lecture Notes In Computer Science, 2004: 1046-1056.
- [10] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] 薛领, 杨开忠. 城市演化的多主体(multi-agent)模型研究. 系统工程理论与实践, 2003(12): 1-9, 17.
- [12] Wooldridge M. Intelligent agents: Theory and practice. Knowledge Engineering Review, 1995, 10(2): 115-152.
- [13] 刘志刚. 智能主体主要理论的综述与分析. 计算机应用研究, 2002(7): 1-5.
- [14] 彭成. 基于MAS的城市应急中心系统设计. 计算机仿真, 2005(12): 127-131.
- [15] 倪建军, 李建, 范新南. 基于多Agent复杂系统仿真平台

- 研究. 计算机仿真, 2007, 24(12): 283-286.
- [16] Park S, Sugumaran V. Designing multiagent systems: A framework and application. *Expert Systems with Applications*, 2005, 28: 259-271.
- [17] 沈体雁, 李迅. 基于多主体的城市微模拟平台 GridAB-GIS 研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2007(4): 502-508.
- [18] 林波, 薛惠锋, 蔡琳. 城市空间演化 MAS 建模. 微计算机应用, 2007(10): 1092-1097.
- [19] 王立娟. 基于多主体仿真的西直门立交桥拥塞分析. 计算机仿真, 2007(10): 225-228, 232.
- [20] 傅星, 林寅. 基于多主体的中国转型经济模型研究. 经济与管理研究, 2005(3): 20-23.
- [21] 晁怡, 李清泉, 陈顺清. 基于多主体系统的区位建模. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007(7): 646-649.
- [22] Long Y, Mao Q, Dang A. Beijing urban development model: Urban growth analysis and simulation. *Tsinghua Science and Technology*, 2009, 14(6): 787-794.
- [23] 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.

Application of Multi-agent System in Simulation of Urban Development: A Review

CHEN Wei^{1,2,3}, GAO Xiaolu^{1,2}, SHEN Zhenjiang⁴

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of Environment Design, Kanazawa University, Kanazawa University, Kanazawa 920-1192, Japan)

Abstract: The multi-agent system (MAS) is a loose network composed of mass Agents, each agent communicates and cooperates with each other based on its own properties and behavior rules. MAS studies the macro regularity of the whole system through simulating and observing a large number of agents' micro behaviors. The evolution of complex system mechanism has developed to a more reasonable and more accurate extent, therefore, MAS has a large application prospect in urban development simulation. This paper introduced the basic framework of multi-agent system, reviewed present research progress of the application of MAS theory, and analyze the five key topics of MAS in urban development simulation: acquisition of micro individual data, selection of agents, extraction and set of behavior rules, expression of interactions between agents, extraction and import of environment variables. Research shows that the prediction and evaluation of urban development policy is the key breakthrough in the application of MAS.

Key words: multi-agent system; urban development; micro simulation

本文引用格式:

陈蔚, 高晓路, 沈振江. 多主体系统在城市发展模拟中的应用. 地理科学进展, 2012, 31(6): 761-767.