

李鲁奇, 孔翔. 国外城市系统智能体模型的科学计量分析 [J]. 地理科学, 2021, 41(5): 797-803. [Li Luqi, Kong Xiang. A scientometric analysis on the agent-based modelling of cities as complex systems. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(5): 797-803.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2021.05.007

国外城市系统智能体模型的科学计量分析

李鲁奇^{1,2}, 孔翔²

(1. 浙江工业大学中国住房和房地产研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 华东师范大学中国现代城市
研究中心/华东师范大学城市与区域科学学院, 上海 200062)

摘要: 智能体模型用于自下而上模拟城市系统。当前综述性研究多关注其原理和缺陷等, 而对研究内容演化的梳理尚不够细致。故运用主路径和冲积图分析, 基于文献引用网络和关键词共现网络, 梳理了国外城市系统智能体模型的研究脉络。结果表明, 土地利用是核心研究领域, 居住隔离、城市增长和交通等亦是重要应用主题; 元胞自动机、网络分析等方法在 2008 年前即与该模型结合, 遗传算法、大数据分析等在 2016—2019 年亦得到较多关注。未来可结合韧性城市、收缩城市等热点问题, 以及开发区、城中村等中国特色城市问题扩展应用领域, 并深化与人工智能算法和各学科传统方法的结合。

关键词: 智能体模型; 科学计量; 城市; 复杂系统; 土地利用

中图分类号: K902 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2021)05-0797-07

基于智能体的建模方法 (Agent-based modelling, ABM) 在 20 世纪 90 年代后被广泛用于城市复杂系统研究。不同于元胞自动机 (CA)、复杂网络等^[1,2], ABM 基于有自主性和社会交往能力^[3] 的智能体模拟城市宏观结构的涌现过程。这对认识城市中的人类行为及其宏观效应有重要价值, 被广泛用于土地开发、社会空间分异等领域。

国外对 ABM 研究的梳理多关注土地利用和土地覆被变化^[4]、城市和建筑研究^[5] 等领域, 国内学者则涉及土地利用^[6]、城市规划^[6]、城市发展^[7] 等。这些研究侧重介绍和分析 ABM 的原理、问题等, 但对研究内容的总结多基于定性把握, 难以更细致地反映研究脉络的演化。故需借助科学计量定量地刻画其研究脉络, 以深入认识其发展趋势。科学计量 (Scientometrics) 兴起于 20 世纪 70 年代, 涉及文献计量、网络计量等领域。它已有较多应用^[8,9], 但部分研究趋于程式化、重点不突出, 多依次分析发文量、作者、机构等, 而非重点关注研究内容。同时指标和工具较单一, 多借助条形图或

CiteSpace 软件等, 这对数据的挖掘可能受限制。

在此背景下, 本文从文献引用和关键词共现网络入手, 结合冲积图等刻画国外城市系统 ABM 研究的演化脉络。在此仅对研究内容和方法进行定量梳理, 以同当前综述性研究形成互补, 并为扩展和深化 ABM 在城市系统中的应用提供一定借鉴。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

1) 基于 SPC 的主路径分析。文献引用网络节点较多, 需裁剪后保留主路径以挖掘重点信息。本文使用搜索路径计数 (Search patch count, SPC) 算法^[10] 计算连接权重, 随后设定断点值 0.03 以保留权重较高的连接, 并提取其中的最大弱组元。

2) 关键词评价与双标图分析。考虑各指标在含义和结果上的差异, 拟选取以下指标对其进行评价: 词频, 指关键词出现的频数; 中介中心度, 指一个关键词在多大程度上作为其它关键词的中介; PageRank, 由谷歌用于网页排名, 基于网页间的链

收稿日期: 2020-02-16; 修订日期: 2020-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771156)、中央高校基本科研业务费项目——华东师范大学共享交叉基金 (人文社会科学) 项目 (2019ECNU-GXJC002) 资助。 [Foundation: National Natural Science Foundation of China (41771156), Shared Cross Fund of the Fundamental Research Funds for the Central Universities and East China Normal University (Humanities and Social Sciences) (2019ECNU-GXJC002).]

作者简介: 李鲁奇 (1991-), 男, 山东宁阳人, 博士, 主要从事城市网络与空间模拟研究。E-mail: liluqi@outlook.com

通讯作者: 孔翔。E-mail: xkong@bs.ecnu.edu.cn

接评估网页重要性,亦可用于关键词评价。随后,采用双标图对评价结果降维^[11]。双标图中,点为关键词,点间距离为相似程度,点在指标轴上的投影近似表示其指标值;轴间夹角表示指标间相关性;纵横坐标为前2个主成分。

3) 网络聚类与冲积图分析。为划分研究领域并分析其演变,对关键词聚类后绘制冲积图^[12]。图中为反映各关键词或聚类重要性的变化,使用PageRank 指标计算其权重。

1.2 数据搜集

数据来自 Web of Science(<https://apps.webof-knowledge.com/>)核心合集,检索式为:TS=(agent-based OR “agent based” OR multi-agent OR “multi agent”)AND TS=(urban OR city OR metropolitan OR municipal)。语种为英语,文献类型为期刊文章,时间范围为1999—2019年,检索时间为2019年6月。在地理学、区域与城市规划、城市研究等6个方向内得到318篇文献,据此可建立文献引用网络。进行同义词替换或近义词合并后,可建立关键词共现网络。由于时间跨度大,故以4 a为一个阶段(1999—2003年,5 a为一个阶段)进行分析。

2 文献引用脉络分析

主路径中的文献以土地利用为核心关注点,其脉络大致可分为3阶段(图1)。

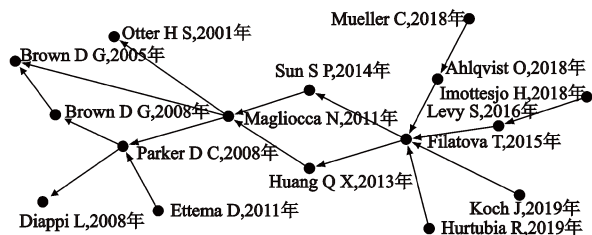


图1 文献引用网络的主路径
Fig.1 The main path of citation network

1) 土地利用模型初步探索。该阶段为“Parker D C, 2008年”之前的研究,共4个节点。此时建模思路较为多样、智能体行为规则相对简单。最早的模型是Otter等开发的ABLOoM,通过家庭和企业的区位选择模拟城市土地利用^[13]。“Brown D G, 2005年”及其引证文献“Brown D G, 2008年”间的SPC值居主路径首位,前者探讨了侧重结果和过程的2种模型有效性问题^[14],后者针对市中

心和郊县模拟了其土地利用^[15]。此外Diappi等对租隙理论进行了模拟,涵盖住宅所有者、土地所有者和租户等智能体^[16]。

2) 土地市场机制深化模拟。该阶段为“Parker D C, 2008年”至“Filatova T, 2015年”的研究,共6个节点,更聚焦于对土地市场机制的细致模拟。如“Parker D C, 2008年”构建了包含供给和需求侧的双边土地市场模型,涉及买卖双方的联系、谈判、交易等活动^[17]。Ettema模拟了住房市场中家庭的住房搜寻、迁居、出售等行为^[18]。“Magliocca N, 2011年”进一步将住房和土地市场进行整合,涵盖从农地转用到住房交易的整个过程^[19]。在此基础上,Huang等^[20]以及Sun等^[21]基于“LUXE”模型深入分析了土地市场中智能体的异质性问题。最后,Filatova对土地市场进行了更细致的模拟,包含评估、出价、交易等一系列活动^[22]。

3) 多元化拓展研究。该阶段为“Filatova T, 2015年”之后的研究,共包含6个节点,主题重新趋于多样化。首先是关注土地市场中的特定理论问题,而限于市场整体建模。如Koch等分析了异质化偏好和同行行为对土地出售决策的影响^[23],Hurtubia等探讨了土地市场中准均衡状态的实现^[24]。其次是对ABM的反思,如Levy等讨论了针对ABM的批评并提倡重视多方主体间的协商^[25]。最后是开发面向规划者或公众的模拟系统,以作为ABM的补充或替代方案^[26-28]。

3 研究领域和方法的演化脉络分析

该部分基于关键词共现网络,以2016—2019年为出发点回溯演化脉络。此阶段关键词(图2)“land use”的频数和PageRank值均较高,是近年

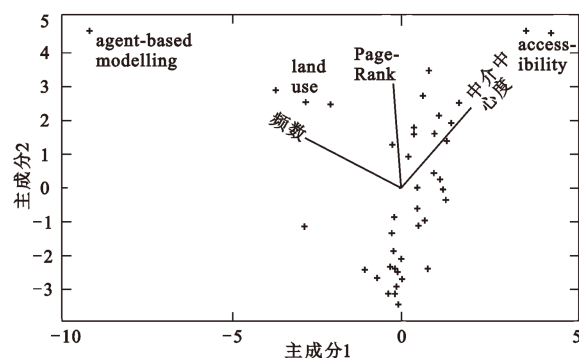


图2 2016—2019年主要关键词双标图

Fig.2 Biplot of major keywords between 2016 and 2019

研究的重要主题,与前文基本吻合。第一象限关键词频次较低,但中介中心度和 PageRank 值较高,起到衔接各组团作用。如“accessibility”频数仅为 5,但中介中心度居首位(0.03),衔接交通、土地利用、工作通勤等主题。后文从研究领域聚类、重点应用主题和主要研究方法 3 方面回顾演化过程。

3.1 研究领域聚类的演化

图 3 中,高度为 PageRank 值(括号内数字为 2016—2019 年百分比),彩色横条为同一关键词的变化,灰色部分为 2016—2019 年未出现的其他关键词。根据 PageRank 值最高的 2 个关键词,可将 2016—2019 年聚类命名为:规划与产业、土地利用与城市增长、复杂性与交通、CA 与居住空间、灾害与网络、其它研究领域(包含与“agent-based modelling”有较强联系的大量低频关键词)。

首先,从各聚类的形成上看,“CA 与居住空间”“灾害与网络”“其它研究领域”可追溯至 1999—2003 年。“土地利用与城市增长”和“复杂性与交

通”主要在 2004—2007 年得到关注。其中土地利用在随后各阶段均为重要研究主题。复杂性作为 ABM 的重要理论基础,早期得到较多探讨^[14],但此后重要性下降。“规划与产业”中的研究主题主要在 2008 年后受到关注。其次,从聚类间关系上看,各聚类呈现持续的交叉、重组特征。如 2004—2007 年 ABM、CA 与地理信息系统(GIS)相结合,但随后逐渐分离。这表明城市系统 ABM 的研究较为灵活,各领域间相互兼容性而非明确分割。由于聚类涵盖内容众多,故后文分别基于具体应用主题和方法进行分析。

3.2 重点应用主题的演化

剔除 2016—2019 年针对性较弱的关键词后,提取该阶段 PageRank 值(图 4 括号内百分比)大于 0.50% 的关键词绘制冲积图(图 4)。根据出现和演化过程,可划分早期、传统和新兴应用主题。

1) 早期应用主题为居住隔离和土地利用,在 1999—2007 年即受到广泛关注。居住隔离是重要

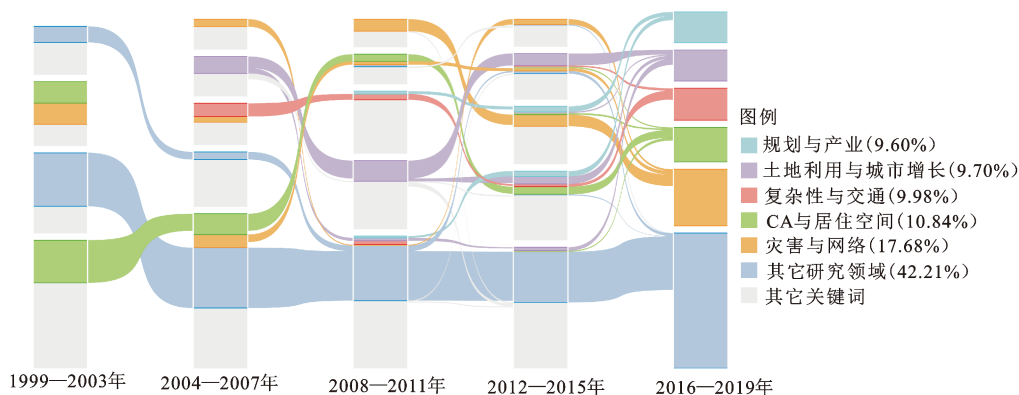


图 3 研究聚类的演化趋势

Fig.3 The changing patterns of research clusters

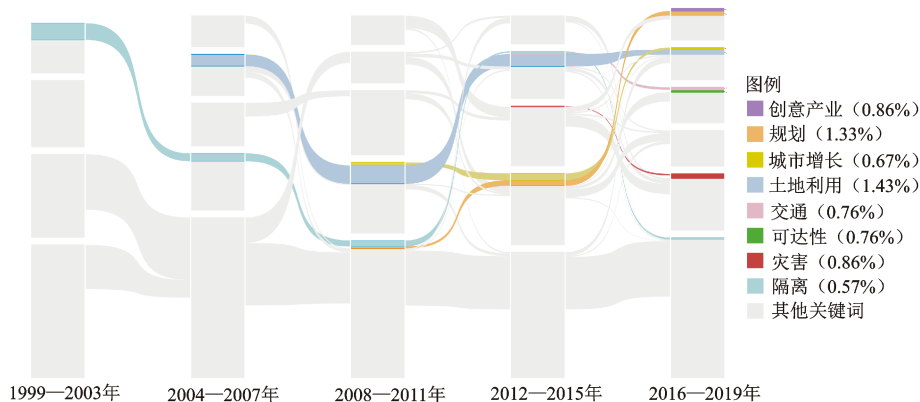


图 4 重点应用主题的演化趋势

Fig.4 The changing patterns of major application fields

的城市社会现象,且便于建模,故很早受到关注^[29]。此后,该主题从不同视角得到研究,如 Guo 等通过模拟分析了城市蔓延与收入隔离之间的关系^[30]。土地利用中的区位选择、市场交易等行为亦便于建模,故也较早被研究,且 PageRank 值在 2004 年后各阶段均居所在聚类首位。不过,各阶段侧重点存在一定差异,如早期侧重于企业区位选择等,后期则与居住偏好、城市增长以及交通、幸福感等主题相结合。

2) 传统应用主题为城市增长、规划、交通和灾害,在 2008—2015 年开始受到较多关注。首先,城市增长与土地利用结合较紧密,二者在第三、四阶段均在同一聚类,其研究思路也基本一致,但城市增长更侧重城市用地扩张及其影响等。其次,ABM 也被用于不同规划情景下的仿真模拟。早期文献探讨了它作为城市规划工具的潜力^[31],后续研究则结合交通规划^[32]、产业规划^[33]等进行分析。再次,城市交通在 2012 年后得到广泛关注。早期亦与土地利用结合,将可达性和通勤成本纳入土地利用模型^[34],此后则涉及停车规划^[32]等更多样的城市交通问题。最后,城市灾害研究在 2012 年也多见于文献,主要通过模拟人在不同灾害情景下的行为来分析避难所空间布局规划^[35]等问题。

3) 新兴应用主题为创意产业和可达性,在 2016 年后受到较多关注。其中, Liu 等较早模拟了创意产业的发展对城市空间结构的影响^[33]。可达性与交通研究较相似,但更强调同医疗服务^[36]等场所联通的便利性。

3.3 研究方法的演化

ABM 多与 CA 等其它方法(图 5)结合,以获得更好的模拟和预测能力。根据研究兴起的时间,

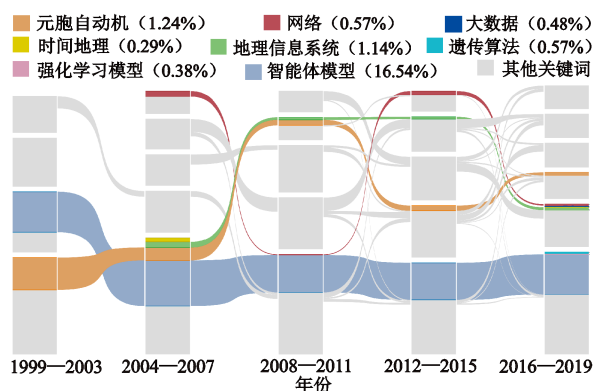


图 5 研究方法的演化脉络

Fig.5 The changing pattern of methods

可将 2016—2019 年 PageRank 值(图 5 括号内百分比)大于 0.25% 的方法划为传统和新兴 2 类。

1) 传统研究方法为 CA、GIS 和网络分析,在 2008 年前即开始与 ABM 相结合。首先,CA 在早期得到很多应用,它也是关注微观个体(元胞)的建模方法,被视为 ABM 的渊源^[3]。但元胞不可移动且转换规则较简单,更适合模拟地块;而智能体可移动且具有较强的感知、学习能力,更适合模拟居民、企业等。因此二者的结合在土地利用等研究中很有价值^[37]。此后由于研究对象和方法的扩展,CA 的 PageRank 逐渐减小,但仍有对 ABM-CA 模型的进一步研究^[31]。其次,GIS、CA 与 ABM 三者的结合在 2004—2007 年相当明显。GIS 尽管并非具体研究方法,但可在数据搜集、可视化、信息检索中为 ABM 提供支撑^[37],如将 GIS 图层作为环境数据输入模型^[33]。再次,网络分析方法在 2004—2007 年也受到关注,被应用于模拟知识扩散^[38]等现象。最后,少量文献也将时间地理与 ABM 结合,并应用于城市共享出行研究中^[39]。

2) 新兴研究方法为遗传算法(GA)、强化学习模型(RL)和大数据技术等,主要在 2016—2019 年得到较多应用。首先,ABM 源于人工智能领域,故早在 2010 年就有学者探讨了它与 GA 等人工智能方法在土地利用中的应用^[40],但 2016 年后才出现较多实证研究^[41]。其次,RL 在提高智能体信息处理和决策能力中也很有价值,被应用于模拟家庭和企业的区位选择^[42]。最后,大数据技术在城市系统 ABM 模拟中的潜力也得到探讨^[43],但仍需进一步的实证研究。

4 结论与讨论

本文基于文献引用网络和关键词共现网络,借助主路径分析、冲积图分析等科学计量方法,梳理了城市系统 ABM 研究的发展脉络。主要结论如下:

1) 文献引用网络的主路径以土地利用研究为主体,通过模拟家庭等智能体的微观决策分析城市宏观的土地利用变化。初期建模思路较为多样、智能体行为规则相对简单,此后集中于对土地和住房市场机制的深入模拟,最后扩展到更为多元的研究主题。

2) 根据关键词共现网络,2016—2019 年主要研究领域为规划与产业、土地利用与城市增长、复

杂性与交通、CA 与居住空间、灾害与网络等。各领域中研究主题的形成和发展时间存在明显差异,同时各聚类之间存在持续的交叉和重组。

3) ABM 的重点应用主题大致可分为 3 类: 早期应用主题包括居住隔离和土地利用, 传统应用主题包括城市增长、规划、交通和灾害, 新兴应用主题包括创意产业和可达性等。

4) 与 ABM 相结合的研究方法大致可分为传统研究方法(CA、GIS 和网络分析)和新兴研究方法(GA、RL 和大数据技术等)。早期与 CA 的结合很明显, GIS 技术在模型环境等方面为 ABM 提供支撑平台, 而 RL 等人工智能算法在提高智能体决策能力中有很好的应用前景。

根据以上结果, 城市系统 ABM 研究在内容和方法上主要有以下发展趋势, 这可为未来研究提供一定借鉴。

1) 在研究内容上将进一步趋于多样化。尽管土地利用、居住隔离、城市增长等主题受到大量关注, 但从文献引用网络的主路径和重点应用主题的演化中, 均可发现研究内容的多样化趋势。除创意产业、可达性等主题外, 城市环境问题、智慧城市和居民幸福感等均已在研究中有涉及。根据这一趋势, 未来可进一步将 ABM 应用于对韧性城市、收缩城市、存量规划等城市热点问题的分析中。例如, ABM 在模拟城市收缩以及公共卫生事件对城市发展格局的影响等方面有很大潜力。此外, 开发区建设、城中村问题等具有中国特色的城市发展问题亦可借助 ABM 进行深入模拟。

2) 在研究方法上, ABM 对其它方法有很强兼容性, 因此与新方法的结合也是未来方向。首先是各类人工智能算法, 这在当前研究中已得到较多关注, 在提高智能体反应决策能力中有很好的效果。其次是城市地理学、城市社会学等学科的传统方法。由于 ABM 主要来自复杂性科学, 因此与城市科学传统方法的结合, 可提高对城市问题研究的深度和对城市科学的嵌入性。一个典型例子是 ABM 与时间地理学的结合^[39]。未来可进一步探索或深化与城市意象地图、空间统计、质性研究方法(如访谈)的融合, 以提高对居民的感知和决策、城市空间结构变化等过程的模拟或预测能力。

3) ABM 在模型验证、主体及其行为规则的确定等方面存在缺陷^[4-7]。对这些理论和方法问题继续进行反思和改进, 也下一步研究的重点方向。

参考文献(References):

- [1] 焦利民, 杨璐迪, 刘稼丰, 等. 顾及城市空间结构信息的元胞自动机模型构建及其应用[J]. 地理科学, 2019, 39(8): 1276-1283. [Jiao Limin, Yang Ludi, Liu Jiafeng et al. Construction and application of cellular automata model based on urban spatial structure information. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(8): 1276-1283.]
- [2] 焦美琪, 杜德斌, 桂钦昌, 等. 全球城市技术合作网络的拓扑结构特征与空间格局[J]. 地理科学, 2019, 39(10): 1546-1552. [Jiao Meiqi, Du Debin, Gui Qinchang et al. The topology structure and spatial pattern of global city technical cooperation network. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(10): 1546-1552.]
- [3] Chen L. Agent-based modeling in urban and architectural research: A brief literature review[J]. *Frontiers of Architectural Research*, 2012, 1(2): 166-177.
- [4] Parker D C, Manson S M, Janssen M A et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003, 93(2): 314-337.
- [5] 吴文斌, 杨鹏, 柴崎亮介, 等. 基于Agent的土地利用/土地覆盖变化模型的研究进展[J]. 地理科学, 2007, 27(4): 573-578. [Wu Wenbin, Yang Peng, Caiqi Liangjie et al. Agent-based model for land-use/cover change: A review. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(4): 573-578.]
- [6] 刘润姣, 蒋涤非, 石磊. 主体建模技术在城市规划中的应用研究评述[J]. 城市规划, 2016, 40(5): 105-112. [Liu Runjiao, Jiang Difei, Shi Lei. Literature review on agent-based modeling in urban planning. *City Planning Review*, 2016, 40(5): 105-112.]
- [7] 陈蔚, 高晓路, 沈振江. 多主体系统在城市发展模拟中的应用[J]. 地理科学进展, 2012, 31(6): 761-767. [Chen Wei, Gao Xiaolu, Shen Zhenjiang. Application of multi-agent system in simulation of urban development: A review. *Progress in Geography*, 2012, 31(6): 761-767.]
- [8] 曹永强, 肖春柳, 袁立婷. 基于文献计量的新世纪中国自然地理学国际影响力分析[J]. 地理科学, 2019, 39(5): 807-816. [Cao Yongqiang, Xiao Chunliu, Yuan Liting. Bibliometric analysis of international impact of Chinese physical geography in the new century. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(5): 807-816.]
- [9] 郭文. 空间认同: 城市空间研究转向中的知识前沿、趋势与启发[J]. 地理科学, 2019, 39(4): 587-595. [Guo Wen. Spatial identity: Knowledge frontiers, trends and enlightenment of urban space research. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(4): 587-595.]
- [10] Batagelj V, Doreian P, Ferligoj A et al. Understanding large temporal networks and spatial networks[M]. Chichester: Wiley, 2014.
- [11] Torres-Salinas D, Robinson-García N, Jiménez-Contreras E et al. On the use of biplot analysis for multivariate bibliometric and scientific indicators[J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2013, 64(7): 1468-1479.
- [12] Rosvall M, Bergstrom C T. Mapping change in large networks[J]. *Plos One*, 2010, 5(1): 1-7.

- [13] Otter H, van der Veen A, de Vriend H J. Abloom: Location behaviour, spatial patterns, and agent-based modelling[J]. *The Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2001, 4(4): 1-21.
- [14] Brown D G, Page S, Riolo R et al. Path dependence and the validation of agent-based spatial models of land use[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2005, 19(2): 153-174.
- [15] Brown D G, Robinson D T, An L et al. Exurbia from the bottom-up: Confronting empirical challenges to characterizing a complex system[J]. *Geoforum*, 2008, 39(2): 805-818.
- [16] Diappi L, Bolchi P. Smith's rent gap theory and local real estate dynamics: A multi-agent model[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2008, 32(1): 6-18.
- [17] Parker D C, Filatova T. A conceptual design for a bilateral agent-based land market with heterogeneous economic agents[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2008, 32(6): 454-463.
- [18] Ettema D. A multi-agent model of urban processes: Modelling relocation processes and price setting in housing markets[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2011, 35(1): 1-11.
- [19] Magliocca N, Safirova E, McConnell V et al. An economic agent-based model of coupled housing and land markets (CHALMS)[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2011, 35(3): 183-191.
- [20] Huang Q X, Parker D C, Sun S P et al. Effects of agent heterogeneity in the presence of a land-market: A systematic test in an agent-based laboratory[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2013, 41: 188-203.
- [21] Sun S P, Parker D C, Huang Q X et al. Market impacts on land-use change: An agent-based experiment[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2014, 104(3): 460-484.
- [22] Filatova T. Empirical agent-based land market: Integrating adaptive economic behavior in urban land-use models[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2015, 54: 397-413.
- [23] Koch J, Dorning M A, Van Berkel D B et al. Modeling landowner interactions and development patterns at the urban fringe[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182: 101-113.
- [24] Hurtubia R, Martinez F J, Bierlaire M. A quasi-equilibrium approach for market clearing in land use microsimulations[J]. *Environment and Planning B*, 2019, 46(3): 445-468.
- [25] Levy S, Martens K, van der Heijden R. Agent-based models and self-organisation: Addressing common criticisms and the role of agent-based modelling in urban planning[J]. *Town Planning Review*, 2016, 87(3): 321-338.
- [26] Ahlqvist O, Khodke N, Ramnath R. GeoGame analytics-a cyber-enabled petri dish for geographic modeling and simulation[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2018, 67: 1-8.
- [27] Mueller C, Klein U, Hof A. An easy-to-use spatial simulation for urban planning in smaller municipalities[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2018, 71: 109-119.
- [28] Imottesjo H, Kain J H. The urban cobuilder-a mobile augmented reality tool for crowd-sourced simulation of emergent urban development patterns: Requirements, prototyping and assessment[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2018, 71: 120-130.
- [29] Omer I. Demographic processes and ethnic residential segregation[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 1999, 3(2): 171.
- [30] Guo C, Buchmann C M, Schwarz N. Linking urban sprawl and income segregation—Findings from a stylized agent-based model[J]. *Environment and Planning B*, 2019, 46(3): 469-489.
- [31] Li X, Liu X P. Embedding sustainable development strategies in agent-based models for use as a planning tool[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(1): 21-45.
- [32] Levy N, Benenson I. GIS-based method for assessing city parking patterns[J]. *Journal of Transport Geography*, 2015, 46: 220-231.
- [33] Liu H, Silva E A, Wang Q. Incorporating GIS data into an agent-based model to support planning policy making for the development of creative industries[J]. *Journal of Geographical Systems*, 2016, 18(3): 205-228.
- [34] Zhao L Y, Peng Z R. Land sys: An agent-based Cellular Automata model of land use change developed for transportation analysis[J]. *Journal of Transport Geography*, 2012, 25: 35-49.
- [35] Yu J, Zhang C R, Wen J H et al. Integrating multi-agent evacuation simulation and multi-criteria evaluation for spatial allocation of urban emergency shelters[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2018, 32(9): 1884-1910.
- [36] Jin Z, Northridge M E, Metcalf S S. Modeling the influence of social ties and transportation choice on access to oral health-care for older adults[J]. *Applied Geography*, 2018, 96: 66-76.
- [37] Torrens P M, Benenson I. Geographic automata systems[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2005, 19(4): 385-412.
- [38] Morone P, Taylor R. Small world dynamics and the process of knowledge diffusion: The case of the metropolitan area of Greater Santiago de Chile[J]. *Jasss-The Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2004, 7(2): 1304-1309.
- [39] Wang Y L, Winter S, Tomko M. Collaborative activity-based ridesharing[J]. *Journal of Transport Geography*, 2018, 72: 131-138.
- [40] Wu N, Silva E A. Artificial intelligence solutions for urban land dynamics: A review[J]. *Journal of Planning Literature*, 2010, 24(3): 246-265.
- [41] Shafiee M E, Berglund E Z. Agent-based modeling and evolutionary computation for disseminating public advisories about hazardous material emergencies[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2016, 57: 12-25.
- [42] Bone C, Dragicevic S, White R. Modeling-in-the-middle: Bridging the gap between agent-based modeling and multi-objective decision-making for land use change[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(5): 717-737.
- [43] Heppenstall A, Malleson N, Crooks A. 'Space, the final frontier': How good are agent-based models at simulating individuals and space in cities?[J]. *Systems*, 2016, 4(1): 1-18.

A Scientometric Analysis on the Agent-based Modelling of Cities as Complex Systems

Li Luqi^{1,2}, Kong Xiang²

(1. *China Academy of Housing and Real Estate, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;*

2. *The Centre for Modern Chinese City Studies/School of Urban and Regional Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China*)

Abstract: Agent-based modelling is a method for simulating urban systems from the bottom up. It allows for the simulation of human behaviours in certain urban environments, as well as the change of the urban environment caused by these behaviours. In this context, it has been widely used to investigate various problems pertaining to urban systems, such as urban land development, socio-spatial differentiation, and new town construction. A few literature reviews can be found, but they focus more on the principles, techniques, and deficiencies of ABM in studying urban systems, rather than a detailed and quantitative description of the research trajectories. Consequently, the application prospects of this method in urban systems are difficult to be further revealed. Against this backdrop, this study uses scientometric methods such as main path analysis and alluvial diagram analysis, as well as the data of literature citation network and keyword co-occurrence network to depict the research trajectories of agent-based modelling of urban systems. The result shows that land use is the primary focus of these studies. This research field consists of three stages: preliminary simulation of land use, the detailed simulation of the land market mechanism, and diversified applications. In the first stage, scholars began to use agent-based modelling to analyse urban land use, but the modelling approach was diverse and the rules for the agents' behaviours were relatively simple. At the same time, they have yet not focused on the mechanism behind the land market. In the second stage, researchers focused more on the in-depth analysis and detailed simulation of the mechanism of the land markets. In the third stage, the studies have been becoming diversified again, focusing on the simulation of the land market, the reflection of agent-based modelling and the development of simulation systems for planners and the public. As for the research fields of agent-based modelling, recent literature from 2016 to 2019 focuses primarily on the following categories: Planning and industries, land use and urban growth, complexity and transportation, cellular automate and residential space, disaster and network, and others. These research fields are by no means fixed. Rather, they are highly flexible, intersecting with each other and having been undergoing continuous reconstruction. Among them, segregation and land use have received attention in early studies; urban growth, planning, transportation and disaster were studied in subsequent research; creative industries, accessibility, etc. are emerging research fields that received attention in recent years. In terms of the methods that have been combined with agent-based modelling, cellular automata, GIS and network analysis were combined with agent-based modelling in earlier studies. Besides, genetic algorithms, reinforcement learning models, and big data have also been used in agent-based simulation recently. In future research, studies on problems such as resilience city and the shrinking city can be integrated with agent-based modelling; some phenomenon specific to China, such as development zones and urban villages, can also be studied using this method. At the same time, future research can further focus on the combination of agent-based modelling with various artificial intelligence algorithms and traditional methods from pertinent subjects.

Key words: agent-based modelling; scientometrics; cities; complex system; land use