

赵莉, 杨俊, 李闯, 等. 地理元胞自动机模型研究进展[J]. 地理科学, 2016, 36(8): 1190-1196. [Zhao Li, Yang Jun, Li Chuang et al. Geographic Cellular Automata Model Research Progress. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(8): 1190-1196.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.08.009

地理元胞自动机模型研究进展

赵莉¹, 杨俊^{1,2}, 李闯³, 葛雨婷¹, 韩增林¹

(1. 辽宁师范大学自然地理与空间信息科学辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116029; 2. 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室/中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中图地图出版社, 北京 100054)

摘要:元胞自动机(Cellular Automata, 简称CA)是一种基于微观个体的相互作用空间离散动态模型, 其强大的计算功能、固有的平行计算能力、高度动态及空间概念等特征, 使它在模拟空间复杂系统的时空动态演变研究具有较强的优势。文章回顾了元胞自动机的发展历程, 阐述了CA在地理学中的主要应用领域和研究进展, 在此基础上, 以现实世界地理实体及现代城市扩张特征为视角, 分析目前CA研究所面临的问题, 并对其未来的研究趋势进行了初步探讨, 认为以下3个方面将是未来CA研究的热点: ① 利用不规则元胞及可控邻域的CA模型, 对不同规则或不同邻域地理实体的模拟研究; ② 采用三维元胞自动机对现代城市扩张进行立体化模拟, 以克服二维CA模型的缺陷; ③ 将矢量元胞自动机模型应用于地理实体的模拟研究, 进一步提高模拟精度。

关键词:元胞自动机; 研究进展; 不规则邻域; 三维元胞自动机

中图分类号:P285.2+3

文献标识码:A

文章编号:1000-0690(2016)08-1190-07

元胞自动机(Cellular Automata, CA)于20世纪40年代末由S.Ulan和J.von Neumann提出, 它是一种时间、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^[1]。从20世纪70年代, 英国数学家Conway的“生命游戏”概念在《Scientific American》杂志中的提出^[2], 到数学家、物理学家、计算机科学家Wolfram著名书籍《A New Kind of Science》的出版^[3], 都证明了元胞自动机用于复杂系统模拟的巨大潜力, 也因此逐渐引起各领域相关学者对元胞自动机的广泛关注。元胞自动机不同于一般的数学模型, 其构成方式繁多, 变化多样, 行为复杂, 一系列模型的构造规则使其具有了强大的计算功能、平行的计算能力、高度动态以及空间概念等特征。自元胞自动机产生以来, 其“自下而上”的模型构造思想就被广泛的应用于社会、经济、军事和科学研究等各个领域。在地理学中, 最早可追溯到1965年, Hagerstrand首先将类似于元胞自动机的思想应用于空间扩散模型^[4],

1968年美国北卡罗来纳州大学的Chapin和Weiss采用离散动力学模型成功模拟了土地利用类型间的转化过程^[5], 1970年美国密西根大学的Waldo Tobler首先采用了元胞自动机的概念对当时美国五大湖底底特律地区的城市发展变化进行了模拟。20世纪80年代中后期, 美国加利福尼亚大学——圣巴巴拉地理系的Helen Couclelis先后发表在《Environment and Planning》(A&B)上的文章对元胞自动机理论在城市动态模拟研究中的应用潜力作了充分阐述, 因此奠定了元胞自动机在地理学应用的理论框架^[6]。从20世纪90年代开始, 元胞自动机被广泛的应用于土地利用及地貌演化、城市增长及扩散等地理学的诸多领域, 在国外, 加拿大学者White与荷兰学者Engelen利用元胞自动机模型对美国俄亥俄州的辛辛那提、得克萨斯州的休斯敦、威斯康星州密歇根湖西岸的密尔沃基等城市土地利用变化进行了模拟, 并提出了高分辨率St.Lucia元胞自动机模型^[7], 英国地理学家Batty和Xie提出了城市发展动态模型(Dynamic

收稿日期:2015-10-16; **修订日期:**2016-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41471140, 41171137), 辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划(LJQ2015058)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China(41471140, 41171137), Outstanding Youth Program of Liaoning Province (LJQ2015058).]

作者简介:赵莉(1978-), 女, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 主要从事区域发展规划与情景模拟研究。E-mail: 122599861@qq.com

通讯作者:杨俊, 副教授。E-mail: yangjun@lnnu.edu.cn

Urban Evolution Model, 简称 DUEM), 对美国纽约州西部伊利湖东岸的港口城市布法罗的城市扩张过程进行了系统、有效的模拟^[8], 此外, Clarke 等提出的 SLEUTH 模型、Wu 结合多层次分析法(AHP)与元胞自动机构建的 SimLand 模型^[9]、Waddell 结合多主体模型(MAM)提出的城市仿真模型(Urban-Sim)^[10]、Torren 提出的 SprawlSim 模型^[11]等都是具有代表性的城市 CA 模型, 在理论与实际应用方面都取得了突破性进展。20 世纪 90 年代末期, 受国外研究的推动, 国内越来越多的学者投身于元胞自动机的相关研究, 1999 年, 周成虎提出了地理元胞自动机(GeoCA)的概念, 在 DUEM 模型的基础上, 构建了 GeoCA-Urban 模型^[1], 张显峰等在总结前人研究的基础上提出了土地利用演化模拟与预测 ((Landuse Evolution Simulation and prediction Model, 简称 LESP)模型^[12], 黎夏等人结合神经网络设计了 ANN-CA 模型^[13], 肖洪等将多智能体、元胞自动机、人口密度 3 种模型结合, 成功模拟了长沙市人口的动态分布。另外, 罗平、何春阳^[14]等也分别基于不同的视角对城市 CA 模型进行了扩展, 丰富的研究成果, 不仅为政府决策、城市规划等提供科学的参考依据, 同时, 对城市的生态健康、长期的可持续发展建设也有着理论性、实践性的指导意义。

基于元胞自动机独特的空间结构, “自下而上”的研究思想, 强大的空间集成以及并行计算能力, 使其在复杂系统的模拟与预测研究中具备了较大的优势和潜力, 本文回顾了 CA 的发展进程, 较详细的介绍了 CA 在交通、自然灾害及土地利用等主要应用领域的研究现状, 针对目前存在的问题和不足, 对 CA 在元胞邻域、多维扩展等方面的研究趋势进行初步探讨和展望。

1 元胞自动机的主要应用及研究现状

元胞自动机是一种具有时空计算特征的模型框架, 从局部到整体的建模思想被广泛的应用于空间上离散、时间上也离散的复杂性系统模拟。标准的元胞自动机是由一系列离散且具有有限状态的元胞散落在规则格网中, 并遵循同样的作用准则, 按照确定的局部规则作同步更新, 通过大量元胞在局部空间中的相互作用构成复杂的动态演化系统。

1.1 交通仿真模型

随着经济的全球化发展, 人员和货物流动空前

活跃, 随之带来的交通事故、交通拥堵等问题也越来越严重。为了有效减少或避免交通问题的产生, 交通仿真模拟问题逐渐成为国内外相关学者关注的热点问题。交通是一个复杂系统, 涉及到的车辆、行人等因素从本质上是离散的, 因此, 作为一个离散系统动力学模型的元胞自动机对交通模拟具有非常明显的优势。20 世纪 80 年代, Cremer 和 Ludwig 首先提出了基于元胞自动机的交通模型^[15], 1986 年, Stephen Wolfram 提出了最基本的一维元胞自动机交通模型, 即 Wolfram 184 号 CA, 用于模拟高速公路或城市交通环线上的一维交通流^[16]; 1992 年德国学者 Nagel 等^[17]对 184 号 CA 模型加以改进, 提出了 NaSch(简称为 N-S)模型, 该模型主要在 184 号 CA 模型的基础上将车辆的行进速度加以考虑; 1996 年日本学者将 NaSch 模型简化, 提出了 F-I 模型^[18]; 此外, 美国学者 Middleton 等人基于纵横交错的二维交通网络提出了二维元胞自动机交通模型, 即 BML 模型, 利用该模型成功模拟了城市交通阻塞等现象^[19]。在国内, 汪秉宏提出了一种介于 N-S 模型和 F-I 模型之间的 WWH 模型^[20], 薛郁等也对 N-S 模型进行了改进^[21]。

1.2 森林火灾模拟

众所周知, 森林是生物赖以生存的家园, 是水土保持、防治污染、维持生态平衡等不可或缺的重要自然资源。然而, 随着经济的发展, 人类对林木的需求和影响逐渐加强, 森林也遭受到了各个方面灾害。20 世纪 80 年代开始, 全球气候变暖, 森林火灾次数有明显的上升趋势, 严重威胁到了森林生态和人类的生命财产安全, 因此, 准确认识林火发展规律, 模拟火势扩散趋势, 对火灾的扑救和有效防治具有重要意义。1992 年国外学者 Drossel 等人^[22]将 Monte Carlo 模拟方法与元胞自动机模型结合, 二维格网的结点代表一棵独立的树木, 状态值记为“1”, 树木着火则状态值记为“0”, 根据某棵树木冯·诺依曼型邻域内所有树木的状态值计算该棵树木下一时刻的状态转换概率, 进而模拟复杂火灾的蔓延趋势, 该模型被称为最经典的 CA 林火模拟模型。

1.3 其他自然灾害模拟

山体滑坡、泥石流、火山熔岩流以及地震等自然灾害对人类的生命财产安全有着非常严重的威胁, 因而已经逐渐引起世界各国政府和科技工作者的高度关注, 这些自然灾害的发生和演变过程

极为复杂,不仅具有时空的动态性,空间的分异性,同时受到自然、社会、经济等各方面不确定性因素的影响,所以,一般的统计经验模型和微分方程等数学模型很难准确并有效的预测和防治自然灾害,从而降低灾害损失。20世纪80年代,CRISCI等^[23]将元胞自动机应用于自然灾害模拟,90年代初,Nakanishi提出将元胞自动机应用于地震的动态演化过程^[24],Smith等基于CA理论简单设计了模拟地形侵蚀过程的模型^[25],Barca利用CA模型模拟了火山熔岩流的流动演变过程^[26],这些都足以说明CA模型在模拟自然灾害研究中的可行性,Gregorio等^[27]也利用CA模型对泥石流、滑坡等复杂自然灾害系统的演变过程进行了深入研究,并对前人的研究方法进行了完善和总结,国内学者张文婷^[28]等也基于CA模型在水土流失领域进行了相关研究。此外,CA模型也被广泛的应用于岩石断裂演化的模拟中,越来越多的研究成果都证明了元胞自动机更广阔的研究领域和重要实践意义。

1.4 土地利用与城市扩张模拟

土地资源是人类生产生活中最基本、最重要的资源,它不仅是社会经济生活中工农业生产和各类贸易往来、衣食住行等活动的主要场所和载体,同时,土地利用与土地覆被变化也时刻影响着全球的生态环境与气候变化^[29],因此,研究土地利用格局演变,揭示土地利用变化的驱动机制,不仅可以指导区域土地利用调控和土地规划决策,促进全球的生态环境朝着有利于人类健康的方向发展,而且,对于当前土地利用空间格局中存在的现实问题的解决具有重要的指导意义。Arsanjani-Jokar等人将马尔科夫链、逻辑回归等思想应用于元胞自动机模型,较准确的实现了城市用地的扩展模拟^[30],Jamal等人在元胞自动机模型中引入智能体思想,采用影响城市增长的房地产开发商、政府和居民等作为智能体,成功的模拟了伊朗首都德黑兰的城市扩张过程^[31],Kheder以多时相遥感影像为数据基础,将模糊理论与元胞自动机相结合,较高精度的完成了美国印第安纳州最大城市——印第安纳波利斯的扩展模拟^[32],Cláudia等人对元胞的状态转变方向作了重点研究,实现了向多个目标地类转变的转化概率计算方法,大大提高了元胞自动机在土地利用演变过程的模拟精度^[33],国内学者将案例推理^[34]、智能体^[35]、神经网络^[13]以及

主成分分析^[36]等应用于元胞自动机模型,杨俊等基于CA模型对河北省旅游小镇——三坡镇的时空增长过程进行了模拟^[37],郭欢欢等将多主体与元胞自动机结合,初步探讨并分析了该模型的应用优势及存在问题^[38],吴浩等人基于CA模型提出了土地利用变化模拟的尺度分析方法^[39],但以上研究多集中在元胞的单目标模拟。

另外,直观的元胞自动机空间模型也被广泛的应用于景观格局模拟和空间生态学的研究中,将马尔科夫链等生态学模型结合到元胞自动机模型的邻域规则中,不仅可以反映景观格局演变的结果,也可以反映出其演变的过程。1994年,墨尔本大学学者Robert M. Itami利用CA模型模拟了城市景观演化过程^[40],Syphard等人基于CA模型,模拟并预测了加利福尼亚南部地区的景观格局变化情况^[41],Balzter等人基于物种竞争、共存、继承等行为理论,将马尔科夫链与CA结合,成功模拟了植被景观的动态演变过程^[42],Sprott^[43]等人也基于CA模型模拟了森林景观的动态变化,足以说明CA模型在土地利用/覆被变化研究中广阔的应用前景。

1.5 当前研究所面临的问题

作为CA研究的核心,元胞转换规则的定义一直是国内外学者们关注的焦点,而针对于复杂的自然系统,需要根据不同的应用分别转换规则来控制元胞状态的转变。随着CA研究的不断深入,其应用领域也在不断的拓宽,元胞转换规则的获取方法也越来越多,从Wolfam经典的110规则、184规则到近年来国内通过多准则、Logistic回归、数据挖掘等方法获取的转换规则,一次又一次的将CA研究推向新的高潮,新的领域,伴随而来的则是其趋向于瓶颈的研究趋势。转换规则固然重要,然而,面对现实世界中邻域范围并不规则的地理实体以及越来越立体化的城市空间扩展趋势,基于二维的规则元胞自动机也逐渐曝露出明显的缺陷和不足,国内外学者逐渐将研究重点转移到元胞邻域扩展、元胞维度以及矢量元胞自动机,为元胞自动机的进一步研究提供了新的思路。

2 元胞自动机的研究趋势

2.1 基于元胞及邻域的扩展研究

标准元胞自动机模型的元胞一般是具备相同转变规则的几何形状,如正三角形、正方形、正六边形等规律地排列在元胞空间中,其邻域空间的

定义也比较严格,在一维CA模型中,通常认为距离某元胞内的所有元胞规定为该元胞的邻域范围,在二维CA模型中,以Von.Neumann型、Moore型等方法规定元胞邻域范围,而现实生活中,同时具备相同规则且严格定义邻域范围的地理实体相对较少,因此,标准元胞自动机对真实世界的模拟也存在着一定的缺陷,有必要对其元胞空间和邻域范围进行相应的扩展研究。Nuno Norte Pinto等人基于遥感影像的像素点,以不规则元胞代替常规元胞构建元胞自动机模型,成功的模拟并预测了Condeixa-a-Nova自治区的城市变迁过程^[44],Daniel Stevens等人基于不规则元胞自动机模型,对加拿大萨斯喀彻温省南萨斯喀彻温河中南部城市萨斯卡通的土地利用格局演变过程进行了相关研究^[45],Ivan在标准元胞自动机的基础上,对元胞的邻域范围进行了扩展,设计了一种不规则邻域元胞自动机模型^[46],国内学者刘兴权等人利用二分Logistic回归方法,引入邻域因子,并建立了可控邻域元胞自动机模型,成功模拟并预测了长沙市区及其周边地区的城市扩张过程^[47]。

2.2 基于三维元胞自动机模型研究

目前,基于元胞自动机的复杂系统模拟研究不论是在结构上、逻辑上还是在表现形式上,大多数还都局限于二维空间,然而,在城市横向蔓延和纵向拓展并举的当代,城市的发展日渐体现出高效立体的空间组合形式,因此,基于二维空间的动态发展模拟并不能准确描述当今高楼林立的城市空间发展趋势,许多学者相继开展了基于三维元胞自动机模型的城市扩张模拟^[48]。Semboloni将White的二维CA模型向三维扩展,改进了二维CA不能使用离散参数表达的缺陷^[49],Bengguigui等人提出城市3DCA模型,采用不同参数模拟城市发展的不同阶段并作出合理解释,但该模型在研究的过程中忽略了区域异性的特点,缺少三维可视化展示^[50],张乐珊采用VR-GIS技术对Bengguigui模型进行了三维显示,并结合多主体模型对沿海小镇进行了城市三维空间增长模拟,秦静等人借鉴经典的城市空间增长模拟方法,以城市发展的自组织性为理论依据,扩充了Bengguigui等的城市空间增长三维元胞自动机(3DCA)模型,在原模型的基础上分别加入中心距离及交通距离评价因子构建出新的模型,并使用NetLogo 3D建模工具进行城市三维空间增长仿真模拟实验,通过对比实

验结果进一步探讨了三维城市空间增长的规律^[51]。

2.3 基于矢量元胞自动机的研究

栅格数据将二维空间划分为具有相同规则的网格,其特有的数据结构不仅易于匹配遥感数据,方便数学模拟,而且与元胞自动机模型的构成单元相互耦合,相比于通过离散的坐标点来描述地理要素的矢量数据,在模型的建立、数据的计算等方面,栅格数据更优势,因此,以往的研究中,多数以栅格数据建立元胞自动机模型,以栅格数据的像元作为元胞,像元值即为元胞状态,但是,现实世界中的大部分地理实体都是不规则的多边形形状,基于栅格数据建立的元胞自动机模型,元胞形状统一,大小一致,元胞大小及邻域的确定都将对模拟结果造成影响,在反映地理实体的精度上存在着一定缺陷。21世纪初,国外学者Andreas Flache等人利用平面上的随机点构建泰森多边形,每个泰森多边形代表一个元胞空间,但是并不能准确的确定每个多边形内的土地类型,即元胞状态存在着不确定性^[52],2001年O'Sullivan利用实际地物代表每个元胞,基于图论和地图代数建立了矢量元胞自动机模型^[53],随后,Niandry Moreno等人在矢量元胞自动机的邻域定义上进行了相关研究,指出矢量元胞的邻域范围可以有缓冲区分析和动态转移矩阵两种确定方式^[54],国内学者陈健等人对矢量元胞自动机模型的转换规则作了扩展研究^[55]。元胞自动机的提出、发展以及未来研究趋势如图1所示。

3 结束语

元胞自动机不仅仅是模拟复杂系统行为的动力学模型,同时也作为认识和理解客观世界的一种新科学被人们所接受,“自下而上”的研究思想,高性能的并行计算能力,使其被广泛的应用于交通、林火以及土地利用等各个邻域,随着研究的不断深入,元胞自动机作为模拟地理实体的微观个体模型所面临的问题和质疑也越来越多,首先,体现在标准的元胞结构将复杂地理实体形状规则化,元胞大小的确定缺少更有力的科学依据,导致模拟结果存在许多不确定性,另外,经济不断提高,科技不断发展,人口结构逐渐复杂化,土地利用和城市变迁呈现立体化,简单的二维CA模型并不能完全准确的反映这些复杂的演变过程,不规则元胞、可变邻域以及矢量元胞自动机更能真实

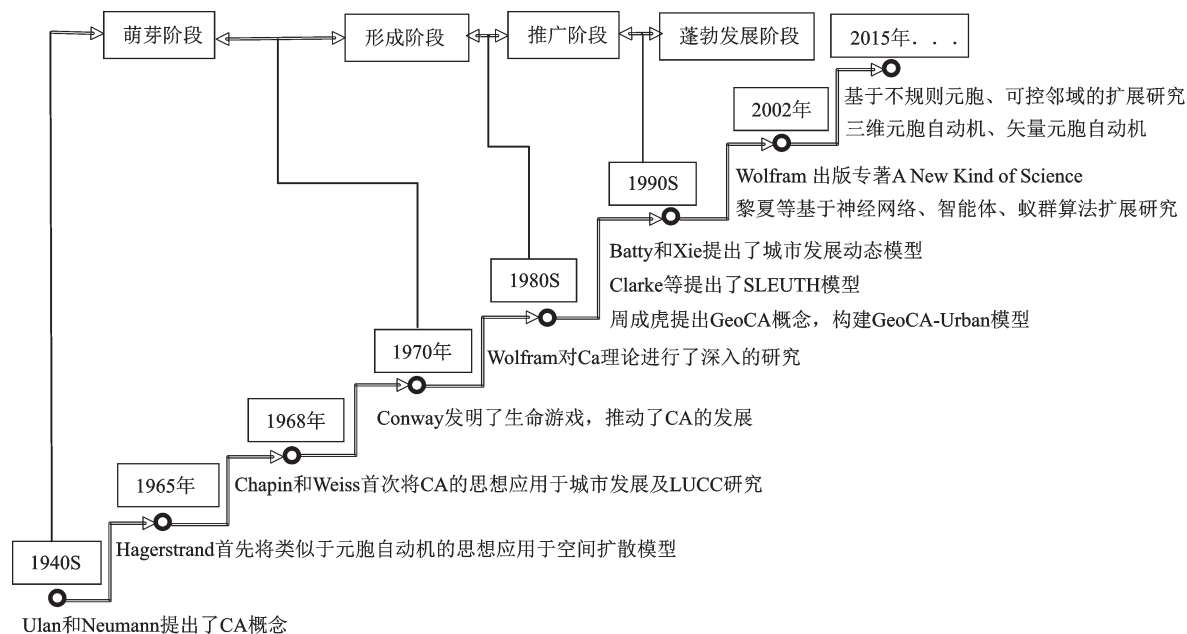


图1 地理元胞自动机的发展趋势

Fig.1 The development trend of geography cellular automaton

的反映地理实体,而三维元胞自动机的发展将更形象、更准确的展示并预测城市扩张过程。因此,分析元胞及其邻域的扩展、三维元胞自动机、矢量元胞自动机将很有可能成为未来的研究热点。

参考文献(References):

- [1] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机[M]. 北京: 科学出版社, 1999. [Zhou Chenghu, Sun Zhanli, Xie Yichun. Geographical Cellular Automata. Beijing, China: Science Press, 1999.]
- [2] Gardner M. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life"[J]. Sci Am, 1970, 223: 120-123.
- [3] S. Wolfram. A New Kind of Science[M]. Champaign Illinois: Wolfram Media, 2002.
- [4] Torsten H. A Monte Carlo approach to diffusion[J]. European Journal of Sociology, 1965, 6: 43-67.
- [5] Chapin F S, Weiss S F. A probabilistic model for residential growth[J]. Transportation Research, 1968, 2(4): 375-390.
- [6] Couclelis H. Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics[J]. Environment and Planning A, 1985, 17(5): 585-596.
- [7] White R., Engelen G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24(2): 235-246.
- [8] Batty M, Xie Y. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. Computers[J], Environment and Urban Systems, 1999, 23: 205-233.
- [9] Wu F. Simulating urban encroachment on rural land with fuzzy-logic-controlled cellular automata in a geographical information system[J]. Environ Manage, 1998, 53(4): 293-308.
- [10] Waddell P. UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation, and Environmental Planning[J]. Journal of the American Planning Association, 2002, 68(3): 297.
- [11] Torrens P. Geosimulation and its Application to Urban Growth Modeling[J]. 2006: 119-136.
- [12] 张显峰, 崔伟宏. 集成GIS和细胞自动机模型进行地理时空过程模拟与预测的新方法. 测绘学报[J], 2001, 30(2): 148-155. [Zhang Xianfeng, Cui Hongwei. Integrating GIS with Cellular Automaton Model to Establish a New Approach for Spatio-temporal Process Simulation and Prediction. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(2): 148-155.]
- [13] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 19-27. [Li Xia, Yeh A G-O. Cellular automata for simulating complex landuse systems using neural networks. Geographical Research, 2005, 24(1): 19-27.]
- [14] 何春阳, 陈晋, 史培军, 等. 大都市区城市扩展模型——以北京城市扩展模拟为例[J]. 地理学报, 2003, 58(02): 294-304. [He Chunyang, Chen Jin, Shi Peijun et al. City Expansion Model of Metropolitan Area in China: a Case Study of Beijing. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(02): 294-304.]
- [15] Cremer M, Ludwig J. A fast simulation model for traffic flow on the basis of boolean operations[J]. Math Comput Simulat, 1986, 28(4): 297-303.
- [16] Wolfram S. Theory and applications of cellular automata: includes selected papers 1983 - 1986[M]. World scientific, 1986.
- [17] Nagel K, Schreckenberg M. A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic[J]. J. Phys. I France, 1992, 2221-2229.
- [18] Fukui M, Yoshihiro I. Traffic Flow in 1D Cellular Automaton

- Model Including Cars Moving with High Speed[J]. J Phys Soc Jpn,1996,65(6): 1868-1870.
- [19] Middleton A, Biham O. Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models[J]. Phys Rev A,1992,46(10): R6124-R6127.
- [20] Lei W, Binghong W, Bambi H. Cellular automaton traffic flow model between the Fukui-Ishibashi and Nagel-Schreckenberg models[J]. Phys. Rev. E, 2001, 63(5-2).
- [21] 薛郁,董力耘,戴世强. 一种改进的一维元胞自动机交通流模型及减速概率的影响[J]. 物理学报,2001,50(3): 445-449. [Xue Yu, Dong Liyun, Dai Shiqiang. An improved one-dimensional cellular automaton model of traffic flow and the effect of deceleration probability. Acta Physica Sinica, 2001, 50(3): 445-449.]
- [22] Drossel B, Mobner W K, Schwabl F. Computer simulation of fire-fire model[J]. Physica A,1992,190: 205-217.
- [23] Cirisci M G, Di Gregorio. Lava flow simulation by a discrete cellular model: first implementation[J]. International journal of modelling & simulation, 1986, 6(4): 137-140.
- [24] Nakanishi H. Cellular-automaton model of earthquakes with deterministic dynamics[J]. Phys Rev A, 1990, 41(12): 7086-7089.
- [25] Smith R. The application of cellular automata to the erosion of landforms[J]. Earth Surf Proc Land, 1991,16(3): 273-281.
- [26] Barca D, Crisci G M, Gregorio S D et al. Cellular automata for simulating lava flows: A method and examples of the Etna eruptions[J]. Transport Theor Stat,1994,23(1-3): 195-232.
- [27] Di Gregorio S, Rongo R, Spataro W et al. High performance scientific computing by a parallel cellular environment[J]. Future Gener Comp Sy,1997,12(5): 357-369.
- [28] 张文婷,王海军,吴志江,等. 基于元胞自动机的流域水土流失时空动态变化研究[J]. 水力发电学报,2013,32(1): 96-100. [Zhang Wenting, Wang Haijun, Wu Zhijiang et al. Spatial-temporal evolution of soil water erosion in Donghu watershed based on cellular automata. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 96-100.]
- [29] 史培军,宫鹏,李晓兵. 土地利用/覆被变化研究的方法与实践[M]. 北京: 科学出版社,2000. [Shi Peijun, Gong Peng, Li Xiaobing. Land use/cover change research methods and practices. Beijing: Science Press,2000.]
- [30] Jokar Arsanjani J, Helbich M, Kainz W et al. Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2013,21(0): 265-275.
- [31] Jokar Arsanjani J, Helbich M, de Noronha Vaz E. Spatiotemporal simulation of urban growth patterns using agent-based modeling: The case of Tehran[J]. Cities, 2013, 32(0): 33-42.
- [32] Al Kheder S, Wang J, Shan J. Fuzzy inference guided cellular automata urban-growth modelling using multi-temporal satellite images[J]. Int J Geogr InfSci, 2008, 22(11): 1271-1293.
- [33] Maria De Almeida C, Batty M, Vieira Monteiro A M et al. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. Computers[J], Environment and Urban Systems,2003,27(5): 481-509.
- [34] 黎夏,刘小平. 基于案例推理的元胞自动机及大区域城市演变模拟[J]. 地理学报, 2007, 62(10): 1097-1109. [Li Xia, Liu Xiaoping. Case-based Cellular Automaton for Simulating Urban Development in a Large Complex Region. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(10): 1097-1109.]
- [35] 杨青生,黎夏. 多智能体与元胞自动机结合及城市用地扩张模拟[J]. 地理科学, 2007, 27(4): 542-548. [Yang Qingsheng, Li Xia. Integration of Multi-agent System with Cellular Automata for Simulating Urban Land Expansion. Scientia Geographica Sinica,2007,27(4): 542-548.]
- [36] 黎夏,叶嘉安. 基于元胞自动机的城市发展密度模拟[J]. 地理科学, 2006, 26(2): 2165-2172. [Li Xia, Ye Jia'an. Simulating urban development density using cellular automata. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(2): 2165-2172.]
- [37] Yang J, Xie P, Xi J et al. Spatiotemporal simulation of tourist town growth based on the cellular automata model: the case of Sanpo Town in Hebei Province[J]. Abstract and Applied Analysis,2013,2013: 1-7.
- [38] 郭欢欢,李波,侯鹰,等. 元胞自动机和多主体模型在土地利用变化模拟中的应用[J]. 地理科学进展,2011,30(11): 1336-1344. [Guo Huanhuan, Li Bo, Hou Ying et al. Cellular automata model and multi-agent model for the simulation of land use change: a review. Progress in Geography, 2011, 30(11): 1336-1344.]
- [39] 吴浩,周璐,史文中,等. 基于正交试验设计的土地利用变化元胞自动机模拟过程的尺度敏感性分析[J]. 地理科学, 2013, 33(10): 1252-1258. [Wu Hao, Zhou Lu, Shi Wenzhon et al. Scale sensitive of cellular automata model for the simulation of land use change based on orthogonal experiment. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(10): 1252-1258.]
- [40] Itami R M. Simulating spatial dynamics: cellular automata theory[J]. Landscape Urban Plan,1994, 30(1-2): 27-47.
- [41] Syphard A D, Clarke K C, Franklin J. Using a cellular automaton model to forecast the effects of urban growth on habitat pattern in southern California[J]. Ecological Complexity, 2005, 2(2): 185-203.
- [42] Balzter H, Braun P W, Köhler W. Cellular automata models for vegetation dynamics[J]. Ecol Model,1998,107(2-3): 113-125.
- [43] Sprott J C, Bolliger J, Mladenoff D J. Self-organized criticality in forest-landscape evolution[J]. Phys Lett A, 2002, 297(3-4): 267-271.
- [44] Norte Pinto N, Pais Antunes A. A cellular automata model based on irregular cells: application to small urban areas[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2010, 37(6): 1095-1114.
- [45] Stevens D, Dragičević 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.
- [46] Blečić I, Cecchini A, Trunfio G A. Urban cellular automata with irregular space of proximities: a case study[J]. Cellular Au-

- tomata, 2012, 7495: 319-329.
- [47] 刘兴权, 吴涛, 甘喜庆. 基于可控邻域作用CA的城市扩张研究[J]. 国土资源遥感, 2011(2): 110-114. [Liu Xingquan, Wu Tao, Gan Xiqing. An urban growth study based on controllable neighbor-effect CA. Remote Sensing for Land & Resources, 2011(2): 110-114.]
- [48] Marques R, Feijo B, Breitman K et al. A cloud computing based framework for general 2D and 3D cellular automata simulation [J]. Adv Eng Softw, 2013, 65(0): 78-89.
- [49] Semboloni F. The dynamic of an urban cellular automata in a 3-D spatial pattern Ferdinando Semboloni[J]. XXI National Conference Aisre: Regional and Urban Growth in a Global Market, 2000.
- [50] Benguigui L, Czamanski D, Roth R. Modeling cities in 3D: a cellular automaton approach[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2008, 35(3): 413-430.
- [51] 秦静, 方创琳, 王洋. 基于元胞自动机的城市三维空间增长仿真模拟[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(5): 662-671. [Qin Jing, Fang Chuanglin, Wang Yang. The three-dimensional urban growth simulating based on cellular automata. Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(5): 662-671.]
- [52] Flach A, Hegselmann R. Do irregular grids make a difference? Relaxing the spatial regularity assumption in cellular models of social dynamics[J]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2001, 4(4): 1-27.
- [53] O'Sullivan D. Graph-cellular automata: a generalised discrete urban and regional model[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2001, 28(5): 687-705.
- [54] Moreno N, Wang F, Marceau DJ. Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata model. [J], Environment and Urban Systems, 2009, 33(1): 44-54.
- [55] 陈健, 吴群, 郑明媚, 等. 矢量CA支持下的耕地补偿空间决策模型研究[J]. 中国土地科学, 2007, 21(5): 20-26. [Chen Jian, Wu Qun, Zheng Mingmei et al. Study on CA decision-making models in cultivated land compensating based on vector datasets. China Land Science, 2007, 21(5): 20-26.]

Progress on Geographic Cellular Automata Model

Zhao Li¹, Yang Jun^{1,2}, Li Chuang³, Ge Yuting¹, Han Zenglin¹

(1. Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China;

2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Sino Maps Press, Beijing 100054, China)

Abstract: Cellular Automata (CA) is a kind of spatial discrete dynamic model based on the interaction of micro individual, the inherent parallel computing ability, highly dynamic and spatial concepts and other features, the CA has outstanding advantages in the study of simulated the temporal and spatial dynamics evolution of complex spatial system. To put it simply, CA is not only a discrete system in time, space and state, but also a local grid dynamics model of both spatial interaction and consequence in time, its "bottom-up" research method being applied in various fields such as society, economy and scientific research. constantly. The paper reviewed the development process of cellular automata briefly, expounds the main application fields and study progress of CA in geography, on this basis, from the perspective of the real world geographic entities and the modern urban expansion, analysis the existing problems in the study of CA at present, then for the study trends of CA has carried on the preliminary discussion, The results of the analysis is that the following three aspects will be the focus of future CA research: 1) Use CA model which has irregular cell or controllable neighborhood to simulate the geographic entities of different rules or different neighborhood; 2) In order to overcome the defects of the two dimensional CA model, use three dimensional cellular automata to simulate the three-dimensional expansion of modern urban; 3) For the sake of improve the accuracy of simulation, use the vector cellular automaton model to simulate the geographic entities.

Key words: cellular automata; research progress; irregular neighborhood; three dimensional cellular automata