

地理系统模拟的 CA 模型理论探讨

周成虎, 欧阳, 马 廷, 覃 彪

(中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘 要:在系统认识和理解地理元胞自动机(CA)模型的基本性质基础上,重点从自然与人文综合的复杂地理系统模拟研究角度,对地理元胞模型所涉及的基本理论与方法问题进行了进一步的探讨。研究表明:从地理系统的模拟看,CA模型的研究和应用提供了一种从地理系统的微观出发、将自然与人文统一的地理系统模拟的新视角与新途径。在此基础上,提出了地理系统模拟的CA模型需要解决的三队基本关系和三个基本科学方法问题。

关 键 词:地理系统模拟;CA模型;三队基本关系

1 引 言

众所周知,微分方程乃是几个世纪以来数学、物理学等学科用以求解科学问题的基本工具,这种方法在地理系统的模拟中,也得到广泛的应用。例如,较为成熟的大气模式(如GCM、MM5、AGCM)^[1-3]、海洋模式(如POM)、生态模式(如TEM、BIOME-BGC等)^[4-5]、陆面过程模式(如BATS、LSM等)^[6-7]以及基于这些模式的土地利用/覆盖变化^[8-9]、海—地—气耦合模式等等。通过这些模拟,地理学家实现了对地球系统的时空变化及其相互作用的模拟,促进了地理研究从状态与格局研究发展到过程模拟与系统预测研究。这些为理解和解释地理系统的特征、预测和控制地理系统的行为提供了科学的方法,形成了以方程为基础的算式计算模型(给定系统演化的主导方程、初始条件和边界条件研究系统随时间的演化),因而也进一步促进了地理研究的科学水平。

然而,在运用基于微分方程式的模型来分析、模拟既包括自然也包括人文要素的复杂地理现象时,要么因涉及的参数太多而根本无法得到合适的微分方程式,要么因微分方程式本身极其复杂难以求解,经典的算式模型受到严重的挑战,地理学家无法从系统演化服从的基本物理规律推求出系统的宏观行为。例如,几十年来,科学家们已发展了描

述大气运动的数万个方程,并可借助于高性能计算机进行计算,但中长期的天气预报进展甚微。所以地理学需要一种新的理论和方法,帮助开展地理系统的模拟。

非线性科学的研究为解决复杂系统的问题开辟了一个新的思路。例如,统计力学通过对系统的微观运动的分析,利用统计学的方法,找出系统的微观运动与宏观性质间的关系;钱学森先生所创立的物理力学确定了一套完整的理论,将系统的微观分析与宏观性质结合在一起;分形几何学的研究揭示了系统的局部和整体间的相似性,纷繁复杂的世界有可能利用几个简单的规则来表达;混沌学研究表明几个简单的原因可能产生及其复杂的结果。

作为复杂系统模拟的一类模型,元胞自动机(Cellular Automaton,简称CA)模型在系统的微观描述水平上,保留了系统演化的微观物理法则的主要观点,形成了一套基于系统演化微观规则、适合复杂系统模拟的概念框架以及以算法为核心的数值模拟工具。与经典的流体方程模拟相比,CA模型模拟不仅获得了服从Navier-Stokes方程描述的基本特性^[10-11],而且在孔隙介质中渗流、微观乳胶液侵蚀和迁移等传统方法不适用的问题模拟中,也获得了成功。因此,从地理系统的模拟看,CA模型的研究和应用提供了一种从地理系统的微观出发,将自然与人文相统一的地理系统模拟的新视角与新途径。

收稿日期:2009-07;修订日期:2009-10。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40830529)。

作者简介:周成虎(1964-),男,研究员,博士生导师,主要从事遥感和地理信息系统地应用基础研究。

E-mail:zhouch@reis.ac.cn

2 地理系统的 CA 模拟研究现状

CA 模型是一种时间、空间和状态都离散的动力学模型,是描述、认识和模拟复杂系统行为的强有力方法,并逐步演化为认识和理解客观世界的一种新的科学。CA 模型的研究始于 20 世纪 40 年代 John Von Neumann 的数字计算机设计工作;Codd (1968)、Gardner(1970)、Langton(1989)和 Bgl(1988)等学者的继续研究^[12-15],进一步推进了 CA 模型研究;特别是 20 世纪 80 年代 S. Wolfram 的工作,证明了 CA 模型是统计力学研究的重大课题。Wolfram 最近出版的《一种新科学》引起广泛关注,对其评价褒贬不一,赞同者称它为“与牛顿发现的万有引力基本原理相媲美的科学金字塔”。

CA 模型在地理研究中的应用,也已有较长的历史。根据目前的研究,可以将其分为 3 个方面。

(1)一般理论与方法的研究。Tobler 院士在 20 世纪 70 年代首先将 CA 方法引入地理研究^[16-17]。他指出:地理模型的核心特征是要包含地理“邻居”(环境)因子,而 CA 模型的邻居概念和对时空动态变化的模拟能力正好满足了地理模型的这一要求。之后,Couclelis 对 CA 模型在地理系统模拟中的应用潜力作了系统的理论分析^[18-20];Phipps 对 CA 模拟地理系统的能力和局部规则与邻居构型对全局构型的影响进行了实验研究和分析^[21-22];周成虎等探讨了不同演化规则所导致的城市演化的形态特征,进而提出虚拟城市的概念^[23]。总体看来,这方面的研究还处于 CA 模型方法一般性讨论与相应方法的“地理化”,尚未能够从地理系统演化的机理上实现突破。

(2)CA 在城市和区域土地利用变化模拟中的应用。早期的城市 CA 模型主要用来检验城市的发展理论和假设,这些模型大多探讨城市的增长机制,研究城市形态和演化的有关问题,主要关心局部行为如何影响全局过程,而对具体的细节并不关注。近些年来,许多学者将 CA 模型更多地应用到真实城市的发展模拟中,这方面典型的工作包括:Batty 和 Xie 等利用 CA 模拟了纽约 Buffalo 市阿姆赫斯特镇地郊区扩张过程^[24-25],White 等模拟了 Cincinnati 市的土地利用变化^[26-27],Clarke 等人使用 CA 模型结合 GIS 先后对美国西海岸的 San Francisco 市和东部的 Washington-Baltimore 都市区的城

市发展进行了成功的模拟和长期发展的预测工作^[28]。在另一些研究中,研究者们则借助 CA 进行辅助城市规划研究,如 Ward 等人利用一个带有随机限制条件的 CA 模型来模拟城市的发展^[29],从而为规划提供参考依据,Yeh 和 Li 等利用 CA 模型和 GIS 相结合^[30-31],研究如何为城市规划者提出最佳的城市可持续发展的规划模式。在模型的设计方面,研究者们对转化规则作出了很大的改进和发展,如在转化规则中引入 Bayes 准则、权重证据理论和模糊控制原理等、神经网络、基于多主体地综合动态城市演化模拟(IDUEM)、非集总消费选择模型与常规规划与交通模型等^[32-34]。其目的是为了使通过 CA 模型模拟的结果能够更加接近城市实际发展的情况,使此类模型更具有实用性。

(3)CA 在地理研究其他领域的应用。CA 模型同样被广泛应用于研究承载城市人流、物流和能流的交通领域。交通 CA 模型中最具代表性的工作是用描述高速公路交通流的一维随机 CA 模型,即 NS 模型和 FI 模型^[35-36]。我国学者汪秉宏等人成功地给出了 FI 模型的解析解,并对其系统行为进行了深入的探讨^[37],Dietrich(1999)则从统计物理学的角度对利用 CA 模拟交通问题的可行性和适用性进行了分析^[38]。Rickert(1996)Wagner 等(1997)则对双车道和多车道的 CA 交通模型进行了研究^[39-40]。目前,利用 CA 模拟交通问题已经成为许多非线性研究机构的重要课题之一。

由于广泛的适用性、简单性、易于实现性和并行计算性等特点,CA 模型在对环境变化和生态系统建模方面同样有着广泛应用,如对森林火灾^[41-44]、城市热岛效应^[45]、周期性潮汛^[46]、火山喷发时熔岩流的漫流过程^[47-48]、土壤中水份的吸收和释放过程^[49]、蚌类在海滩上空间分布模式^[50]、植被覆盖时空动态变化、半干旱苔原地的灌木丛的时空动态变化^[51]以及种群规模依赖性、竞争共存原理和栖息地破坏的影响的模拟研究。

这些工作的对象包括了从微观系统到宏观系统,从单一因素作用的系统到复杂的多元系统,充分展示了 CA 模型巨大的潜力和应用价值。这些工作也极大推进了地理 CA 发展,为复杂地理系统的模拟开辟了一个新的方向。正如 Tobler 院士所指出的,采用 CA 的思想模拟地理系统的变化是一次方法上的革命。

3 地理系统的 CA 模拟面临的问题与挑战

作为具有时空特征的离散动力学模型,地理 CA 不仅可以用来模拟和分析一般的复杂系统,而且对具有空间特征的地理复杂系统的模拟更具有优势,例如它的“自下而上”的构模方式、强大的复杂系统计算能力、时空离散与并行计算等。可以认为地理 CA 模型是分析模拟地理动态现象的革命性方法^[16]。正如 Batty 教授所指出的:自上而下的宏观城市模型正逐渐被那些基于局部个体相互作用来模拟城市自组织宏观行为的模型所替代^[25]。

但是,目前地理系统的 CA 模型研究更多是停留在 CA 方法的一般性使用,离解决真实的地理问题尚有一段距离,现实系统的复杂性与 CA 的简单性之间的矛盾使 CA 模型的真实性和可靠性受到质疑,系统演化的宏观性与 CA 演化的局部原则之间的差异性导致对 CA 模型可靠性的质疑,规则的元胞空间与不规则几何空间边界的不吻合性导致对 CA 模型实用性的质疑,等等。因此,进一步认识和理解复杂地理系统演化的机理和规律,探索和建立基于系统演化机理与规则的综合演化原理,建立在微观描述水平上的模拟系统宏观行为的 CA 动力学模型是 CA 模型方法研究的瓶颈和前沿问题与难点。

3.1 三队基本关系

本研究拟从地理复杂系统的微观结构的分析出发,运用物理力学、统计力学、微分几何学等学科的理论和方法,突破传统的基于微分方程的系统模拟的瓶颈,建立一套基于系统演化的微观规则的地理系统的 CA 模拟的方法,通过分析研究和数值计算,实现从微观机理水平上理解和解释复杂地理系统的行为和演化规律。项目的具体研究内容包括以下 3 个方面:

(1) 地理系统的空间结构特征与地理 CA 的空间构型

在对地理系统的空间结构深入分析的基础上,研究和构建具有多种网格形式的地理元胞空间,如正六边形、不规则三角形、基本的地理与生态目标单元的地理元胞空间,突破目前 CA 模型单一正方形格网的限制;通过对地理特征的分析,结合地理信息系统、人工智能主体(Agent)和面向对象等技术,发展具有自我调控能力和多种属性特征的地理元胞,突破目前 CA 描述单一化的限制,进而构建

新一代具有记忆能力与自我调控能力的地理元胞模型。

(2) 地理系统演化的微观法则与地理 CA 规则

针对地理系统演化过程的具体问题,结合同物理力学和系统动力学的原理与方法,分析和总结地理系统演化的一般微观机理和规则,探索分析复杂地理系统的微观行为的宏观效应,在理论上突破从微观机理理解复杂地理系统的瓶颈;比较和评价基于运动方程和有限规则的地理系统的演化,结合空间相互作用和传统的局部结构理论,研究和发展基于系统运动变化基本规律和局部空间相互作用原理的地理 CA 演化的规则,突破目前 CA 模型基于单一演化规则的限制;研究基于海量空间数据挖掘的地理系统演化规则方法,建立随空间变化而变化的系统演化规则,突破目前 CA 模型演化规则的空间单一性;研究和建立高效的地理 CA 的并行算法。

(3) 地理系统的微观作用机理与宏观现象关系的研究

在建立具体的地理系统演化的微观法则的基础上,运用统计物理的方法,对微观变化如何影响和产生宏观行为的过程进行分析和研究,用统计力学的理论方法导出地理系统那相关要素的统计描述,从而揭示地理系统的微观作用机理和宏观变化的关系,建立地理系统宏观性质及其变化规律的统计力学关系,进而利用微观作用机理来解释宏观现象的本质;模拟不同微观规则控制下,地理系统演化所表现出的宏观规律与行为特征。

3.2 需要解决的基本科学问题

无论从对真实地理空间的非连续性认识,还是对复杂系统行为的可计算性分析,地理系统的 CA 都形成了一种新的科学方法,从而可以撇开繁杂的微分方程式以及基于微分方程式的模拟计算。但是,地理 CA 模拟本身也只是模拟复杂地理系统的一种模型方法,仍有一系列的科学理论与方法问题有待解决。

(1) 地理系统的离散化元胞形式表达

问题的关键在于建立真实时空连续的地理系统与时空离散的元胞空间之间的联系,并采用形式化语言表达。从地理几何空间和实体空间出发,以微观时空离散哲学为基础,在遵循基于微分方程式的系统建模程式的基础上,改变目前元胞建模的方法。在元胞格网空间的划分中,以现代几何学为基础,建立最佳拟合地理空间的元胞网格,并能处理

好地理系统各种内边界和外边界;在地理元胞的表述上,结合人工智能主体和信息编码技术,建立具有多种内在属性和自我调节能力的地理元胞单元。

(2)复杂地理系统演化微观机理的规则化表达

以往的地理系统分析和模拟大多数或从宏观到宏观,或从宏观到微观,或从微观到微观,而地理CA则建立在时空离散的哲学基础上,充分运用现代物理和数学的成就,建立起复杂地理系统宏观行为与规律分析的微观理论,推进复杂地理系统分析理论的进一步发展。问题的关键在于建立地理系统的微观布尔动力学与宏观连续场之间的联系,以认识微观状态参量扩大后物体的宏观性质和变化规律。结合传统的局部结构理论和物质运动变化的基本规律(主要是各种守恒定律),在分析地理元胞间相互作用方式和作用强度的基础上,确定元胞作用健的类型和表达规则;在分析系统的宏观控制原理的基础上,结合海量空间数据的分析,确定系统的元胞并行演化规则。

(3)高性能的地理元胞并行计算

问题的关键在于建立适合处理多维、具有显著空间特征的高效算法,特别是并行计算的应用。地理CA模拟不仅需要大量空间数据进行预处理,而且需要利用各种空间统计方法协助发现元胞演化规则;不仅需要同步地对大型元胞矩阵进行状态更新计算,而且需要不断地进行时域上的迭代运算。以现代高性能计算为支撑,设计和开发高效率的运算方法,特别是地理空间并行计算,以期在地理问题原则性求解的基础上,获得更彻底的计算结果,推进地理空间分析与系统模拟的定量化水平。

参考文献

- [1] Brawswell B H, et al. The response of global terrestrial ecosystem of interannual temperature variability. *Science*, 1997, 278:870-873.
- [2] Liang X Z, Kunkel K E, et al. Development of a regional climate model for US Midwest applications Part I: Sensitivity to buffer zone treatment. *J Climate*, 2001, 14: 4363-4378.
- [3] Ji Jingjun. A climate-vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface. *J Biogeography*, 1995, 22: 445-451.
- [4] Schimel D, Mellio J, et al. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystem in the United States. *Science*, 2000, 287:2004-2006.
- [5] Houghton R H, et al. The US carbon budget: Contribution from land use change. *Science*, 1999, 285: 574-578.
- [6] Sellers P J, et al. A revised land surface model parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs: Model formulation. *J. Climate*, 1996, 9(4): 676-705.
- [7] Verseghy D L. CLASS: A Canadian land surface process model for GCMs: I soil model. *Int. J. Climate*, 1991, 11: 111-133.
- [8] Dickson R E, Sellers A H. Modelling tropical deforestation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1998, 144(B): 439-462.
- [9] 季劲均, 余莉. 地表物理过程余生物化学过程耦合机理的模拟研究. *大气科学*, 1999, 23(4): 439-448.
- [10] Frisch U, et al. Lattice-gas automata for Navier-Stokes equation. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 56:1505.
- [11] Wolfram S. *A New Science*. 2000.
- [12] Codd E F. *Cellular Automata*. Academic Press, 1968.
- [13] Gardner M. The Fantastic Combinations of John Conway's New Solitaire Game Life. *Scientific American*, 1970, 220 (4): 120-123.
- [14] Langton G G. Self-reproduction in Cellular Automata. *Physica D*, 1989, 34: 259-299.
- [15] Bgl J. Self-reproduction in small cellular automata. *Physica D*, 1989, 10:135-144.
- [16] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 1970, 46:234-240.
- [17] Tobler W R. Cellular geography//Gale S, Olsson G. *Philosophy in Geography(D)*. Reidel Publishing Company, 1979, 379-386.
- [18] Couclelis H. Cellular works: A framework for modeling micro-marco dynamics. *Environment and Planning A*, 1985, 17:585-596.
- [19] Couclelis H. Of mice and men: What rodent populations can teach us about complex spatial dynamics. *Environment and Planning A*, 1988, 20:99-109.
- [20] Couclelis H. From cellular automata to urban models: New principles for model development and implementation. *Environment and Planning B*, 1997, 24:165-174.
- [21] Phipps M. Dynamic behavior of cellular automata under the constraint of neighborhood coherence. *Geographical Analysis*, 1989, 21(3):197-215.
- [22] Phipps M. From local to global: The lesson of cellular automata//DeAngelis L, Gross L J. *Individual-based Models and Approaching in Ecology*. New York: Chamman & Hall, 1990, 165-187.
- [23] 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.
- [24] Batty M, Xie Y. From cells to cities. *Environment and*

- Planning B, 1994, 21: 531–548.
- [25] Batty M, Xie Y. Possible urban automata. *Environment and Planning B*, 1997, 24: 175–192.
- [26] White R, Engelen G. Cellular automata and fractal urban form: A cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 1993, 25: 1175–1199.
- [27] White R, Engelen G, et al. The use of constrained cellular automata for high-resolution modeling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B*, 1997, 24: 323–343.
- [28] Clarke K C, Gaydos L J. Loose-coupling a cellular automata model and GIS: Long-term growth prediction for San Francisco and Washington-Baltimore. *Int. J. Geographical Information Science*, 1998, 12(7): 699–714.
- [29] Ward D P, Murray A T, et al. A stochastically constrained cellular automata of urban growth. *Computer, Environment and Urban System*, 2000, 24: 539–558.
- [30] Yeh A G O, Li X. A Constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS. *Environment and Planning B*, 2001, 28: 733–753.
- [31] LI X, YEH A G O. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *Int. J. Geographical Information Science*, 2002, 16: 323–343.
- [32] Wu F. Simulating urban encroachment on rural land with fuzzy-logic-controlled cellular automata in a geographical information system. *J. Environmental Management*, 1998, 53, 293–308.
- [33] Li X, Yeh A G O. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *Int. J. Geographical Information Science*, 2000, 14(2): 131–152.
- [34] Xie Y, Batty M. *Integrated Urban Evolutionary Modeling*// Atkinson P, Foody G, Darby S, et al. *GeoDynamics*. London: Taylor & Francis, 2004.
- [35] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic. *J. Phys. France*, 1992, 2:2221–2229.
- [36] Fukui M, Ishibashi Y. Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed. *J. Phys. Soc. Japan*, 1996, 65 (6): 1868–1870.
- [37] 汪秉宏, 邝乐琪, 许伯铭. 高速公路交通流元胞自动机模型的一种统计平均解耦处理. *物理学报*, 1998, 47(6): 906–915.
- [38] Dietrich E. Wolf. Cellular automata for traffic simulations. *Physica A*, 1999, 263: 438–451.
- [39] Rickert M, Nagel K, et al. Two lane traffic simulations using cellular automata. *Physica A*, 1996, 231 (4): 534–550.
- [40] Wagner P, Nagel K, et al. Realistic multi-lane traffic rules for cellular automata. *Physica A*, 1997, 234(3–4):687–698.
- [41] Green D G, Tridgeel A. Interactive simulation of bushfire in heterogeneous fuels. *Mathematical Computation and Modeling*, 1990, 13(12):57–66.
- [42] Chen K, Bak P, et al. A Forest-fire model and some thoughts on Turbulence. *Phys. Let. A*, 1990, 147–297.
- [43] Drossel B, Schwabl F. Self-organized critical forest-fire model. *Phys. Rev. Let.*, 1992, 69:1629.
- [44] Karafyllidis I, Thanailakis A. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, 1997, 99(1): 87–97.
- [45] Embutsu I, Goodechild M, et al. A cellular automaton modeling for urban heat island mitigation. *Proc. GIS/LIS'94*.
- [46] Bonfatti F, et al. Cellular automata for modeling lagoon dynamics. *Proc.15th European Conference and Exhibition on GIS*, 1994.
- [47] Young P, Wagde G. Flowfront: Simulation of a lava flow. *Computer & Geosciences*, 1990, 16:1171–1191.
- [48] Miyamoto H, Sasaki S. Simulating lava flows by an improved cellular automata method. *Computers & Geosciences*, 1994, 23(3): 283–292.
- [49] Aitkenhead M J, Foster A R. Modeling water release and absorption in soils using cellular automata. *J Hydrology*, 1999, 220:104–112.
- [50] Wootton J T. Local interactions predict large-scale pattern in empirically derived cellular automata. *Nature*, 2001, 413(25):841–844.
- [51] Heiko B, Paul W B, et al. Cellular automata models for vegetation dynamics. *Ecological Modeling*, 1998, 107: 113–125.

Theoretical Perspectives of CA-based Geographical System Modeling

ZHOU Chenghu, OU Yang, MA Ting, QIN Biao

(State Key Laboratory of Resources and Environment Information System,
Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: As a fundamental method, cellular automaton has found its unique function in complex geographical system which is characterized by the complicated interaction between natural sub-system and human sub-system. Although different equation-based models have achieved their brilliant successes, it is difficult to apply these models to simulate the whole processes embedded in the complicated geographical systems. Therefore it is ideal to integrate these CA with different equations. The article was aimed to probe into basic concepts and theories related CA model. The recent progresses and achievements were firstly reviewed in the second paragraph, and it is believed that CA is a very innovative method to deal with the complicated processes of natural-human system. Three basic relationships, which are key to develop a new Geo-CA model based on physical law and system evolution rules, are spatial structure of geographical system and configuration of automaton, macro-phenomena and micro-mechanism, and geo-system evolution rule and CA rules. It is necessary to make more efforts to study the formation expression of discrete geo-cellular, micro-mechanism based rules for complex geo-system, and parallel computation of Geo-CA models.

Key words: geographical system simulation; CA model; three basic relationships