

空间复杂性与地理元胞自动机模拟研究

孙战利

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

摘要:面对具有非线性、非平衡、自相似、自组织等复杂性特征的空间复杂现象,基于传统的牛顿力学和微分方程数学的地理模型显得力不从心,非线性科学作为解决地理复杂现象的有效工具成为地理学研究的前沿。基于对地理复杂性的分析,作者提出了一种基于元胞自动机(Cellular Automata)的地理模型框架,并在地理信息系统集成的基础上,对美国安阿伯波市的城市增长与扩散进行了生动地模拟和预测。

关键词 复杂系统 非线性科学 元胞自动机 地理信息系统 城市增长

1 引言

钱学森多次指出,地理学的研究对象——地球表层是一个自然、社会、经济复合的、开放的复杂巨系统。其诸地理现象的非平衡性、多尺度性、层次性、不确定性、自相似性、随机性、交互性等特点决定了地理空间系统是一个复杂性问题^[1-3]。

50年代兴起的数量化革命,是地理学方法的次革新。地理学家试图以数学或计量方法,对确定或不确定性空间结构或过程进行定量地、精确地表述和研究。基于统计学、牛顿力学、微分及偏微分方程的数理模型,可以对地理现象中的某些现象在特定时间、特定区域条件下,进行精细地刻画。然而,这些模型普遍的缺点是缺乏时空上外推的能力。而且,这类模型对土地利用变化、区域持续发展、城市增长等,显得力不从心。另外,计量革命的不足还在于缺乏对空间信息的系统化研究,忽略了模型与数据结构的配合^[4]。

数量革命后,地理信息系统是地理学研究方法的第二次革新。地理信息的分析是其核心^[5]。但是,目前GIS系统只具有缓冲区分析、叠置分析、网络分析等已经不够满足地理研究和地理应用需要。

因此,基于GIS研究具有描述、模拟空间复杂现象的新一代空间分析模型,也是地理学界面临的首要课题之一。

2 地理复杂系统的研究方法探索

地理复杂系统是一个时空四维动态系统,只有同时把时间及空间这两大范畴纳入某种统一的基础之中,才能真正认识地理学的基础规律,才可完整

地体现地理学的“复杂性”^[1,6]。

显然,靠牛顿力学等确定性数理模型的“移植”来建立的地理模型,是难以描述和模拟如此复杂的地理现象的。非线性是造成地理现象复杂性的主要原因,因而,模拟和揭示具有非线性、自组织性、开放性等特征的地理复杂系统及其规律就迫切需要非线性理论和方法的应用。

其中,系统动态学模型在地球复杂系统研究中应用较为广泛。但是,系统动态学也有“先天不足”,即缺乏空间因素的处理功能,这使得系统动态学可以较好地描述某个因素变量在时间上的动态变化(如人口在1985—1990年间的变化),但无法描述和反映某个因素在空间分布上的变化(如人口在区域内分布变化),然而这正是地理学研究的关键。

复杂现象是从极为简单的元素群中通过相互作用而涌现出来的(Langton, 1990)^[10]。基于这种思想,一种被称为元胞自动机的时空动力学模型逐渐受到包括地理学家在内的各界的重视。这种处于人工智能和人工生命交叉领域的元胞自动机是建立在离散空间上的动态模型,它在模拟复杂空间现象的时空动态演变方面是其它模型和方法,如系统动态学、神经网络、模糊集和模糊推理、分形理论、线性规划以及其它基于微分和偏微分方程等数理模型,所不能比拟的。

3 元胞自动机及其在地理学中的应用的可行性

元胞自动机(Cellular Automata,简称CA),又称细胞自动机或单元自动机,是由号称“现代计算机之父”的冯·诺依曼(Von Neumann)在本世纪

40 年代首先提出的一种离散模型,它往往可以看作描述连续现象的微分方程的对立体^[8]。

3.1 元胞自动机的概念

元胞自动机是定义在一个由具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上的,按照一定局部规则,在离散的时间维上演化的动力学系统^[9]。元胞自动机的部件被称为“元胞 (cell)”,每个元胞具有一个状态,这个状态只能取某个有限状态集中的一个,例如或“生”或“死”,或者是 256 种颜色中的一种等等;这些元胞规则地排列在被称为“元胞空间”的空间格网上。

元胞自动机的最基本的组成单元就是元胞 (cell)、元胞空间 (lattice)、邻居 (neighbor) 及规则 (rule)。元胞自动机可以视为由一个元胞空间和定义于该空间的变换函数所组成。标准的元胞自动机是一个四元组^[8],其可表示为:

$$A = (d, S, N, f)$$

这里 A 代表一个元胞自动机系统; d 是一正整数,表示元胞自动机的维数; S 是元胞的有限的、离散的状态集合; N 表示一个所有邻域内元胞的组合 (包括中心元胞),即包含 n 个不同元胞状态的一个空间矢量,记为:

$$N = (s_1, s_2, s_3, \dots, s_n),$$

n 是元胞的邻居个数, $s_i \in Z$ (整数集合), $i \in (1, \dots, n)$; f 表示将 S^n 映射到 S 上的一个局部转换函数。所有的元胞位于 d 维空间上,其位置可用一个 d 元的整数矢量 Z^d 来确定。

元胞自动机可用来模拟研究很多一般现象,包括信息传递、计算、构造、生长、复制、竞争与进化等,同时,它为动力学系统理论中有关秩序、紊动、混沌、非对称、分形等系统整体行为与现象的研究提供了一个有效的模型工具。因而,它被广泛应用于各有关领域。

3.2 元胞自动机用于地理复杂系统研究的必然性和可行性

利用这样一个时空动态模型模拟地理现象和地理过程,是地理复杂系统研究的一个前沿领域。同时,元胞自动机模型用来模拟地理现象有其必然性和可行性:

(1) 元胞自动机模拟空间现象的时空动态性: 元胞自动机在模拟空间现象在时间和空间上的动态变化的直观、生动、简洁、高效、实时等特征是其它模型所难以媲美的。

(2) 元胞自动机模拟复杂现象的能力: 元胞自动机模型“令人尴尬”的简单性,并没有限制它在模拟复杂现象的能力。相反,元胞自动机具有计算的完备性特征,可以模拟非线性复杂系统的突现、混沌等特征,是模拟生态、环境、灾害等多种高度复杂的地理现象的有力工具。

(3) 元胞自动机数据结构的相容性: 元胞自动机模型在二维空间上,所采用的离散的格网模型易于与遥感影像和栅格型地理信息系统在数据结构上相一致,因此,元胞自动机模型在与 GIS/RS 技术系统在数据和分析模型集成上以及图形结果的显示上有其天然的优势。

(4) 元胞自动机模型的灵活性和开放性: 元胞自动模型远不是一个简单的数理的方程,应当说,元胞自动机模型是一种方法论,或者说是一个方法框架。一方面,各领域的专家可对模型的各个组成进行灵活的扩展,提出和建立适合模拟各种专题现象的扩展模型,这也正是元胞自动机模型能够广泛应用在社会、经济、环境、地学、生物等几乎所有领域研究的原因;同时,元胞自动机模型允许建模者在模型的框架下,灵活地集成已有的各种专业模型,这使得元胞自动机模型更具有应用的广泛性、针对性、可靠性和有效性。

4 元胞自动机在地理学中的应用

元胞自动机在地理学中的应用最早可追溯到本世纪 60 年代。Tobler 在 70 年代,认识到元胞自动机在模拟地理复杂现象的优势,首先正式采用了元胞自动机的概念来模拟当时美国五大湖边底特律地区城市的迅速扩展。进入 80 年代,美国加利福尼亚大学一圣巴巴拉地理系的 Helen Couclelis 对元胞自动机在地理学中的应用潜力从理论上作了充分的阐述。Philipps (1989, 1992) 对地理元胞自动机模拟地理复杂现象的能力进行了实验研究,从侧面证明了简单的元胞自动机模型模拟复杂地理现象的可行性。

P. Deadman (1990) 在他的硕士论文中采用元胞自动机模型研究了农村地区的居住分布格局。Simth (1991) 设计了一个简单地元胞自动机模型模拟了地形侵蚀的过程,并把结果同其它模型作了对比,展示了其强大的模拟功能。Roger White 和 G. Engelen (1994) 尝试着采用元胞自动机模型,模拟了全球气候变化影响下的土地利用变化^[12]。

基于元胞自动机模型的林火模型能动态、简洁地模拟和预测林火的动态行为,是元胞自动机模型应用的一个热点。美国的 Keith Clarke (1995) 和他的同事采用元胞自动机模型对森林大火的扩散和熄灭机制进行了模拟研究。

城市动态发展模拟研究是元胞自动机在地理学中应用的重要领域。而 Helen Couclelis 正是元胞自动机在城市发展研究的奠基人。目前,她就元胞自动机在城市发展中的应用理论及其模型与地理信息系统的集成进行了进一步的深入研究^[14]。

1994 年,纽约州立大学的 Y. Xie 提出了城市发展动态模型,并且,还借助地理信息系统技术和元胞自动机模型对布法罗市 (Buffalo) 城市土地利用变化进行了有效地模拟,这是元胞自动机在城市扩展研究中的第一次系统性的应用^[11]。

元胞自动机模型已经成为目前地理学界对复杂适应系统研究的前沿和热点课题。然而,其模型在地理学中的应用尚未系统化,与地理信息系统的集成研究依然是这一领域的迫切需求。因此,结合元胞自动机理论发展及其在地理研究中的特点,作者提出了地理元胞自动机的地理模型框架,试图以元胞自动机为理论核心,结合传统的地理模型,在统一的框架下集成专家系统、分形分维、神经网络、模糊推理以及智能体等理论方法,利用面向对象的分析和编程技术,在地理信息系统平台上构建解决地理复杂现象的实施方案。

5 地理元胞自动机 (GeoCA)

地理元胞自动机 (GeoCA) 实质上是对标准二维元胞自动机的扩展。在标准的元胞自动机中,元胞空间内的所有元胞具有相同的局部规则,状态有限,规则简单,很难描述地理复杂的现象和过程。由于元胞自动机本身就是一个定义在离散时间,离散空间上的动力学系统,元胞自动机向地理元胞自动机的扩展是一个比较自然的过程,参照图 1。

地理元胞自动机的构建过程包括以下几个方面:

(1) 元胞状态的扩展: 标准元胞的状态是一个离散的整数集合,为使其能够表达地理复杂现象,可以将地理元胞自动机的状态集合定义为某种地理现象的分类指标或代码的集合,例如土地利用类型,气候类型等。进而,可以引入智能体 (Agent) 的概念,在面向对象技术的支持下,将元胞个体封装成不仅

具有离散状态,还具有感知周围环境能力的地理抽象智能体。

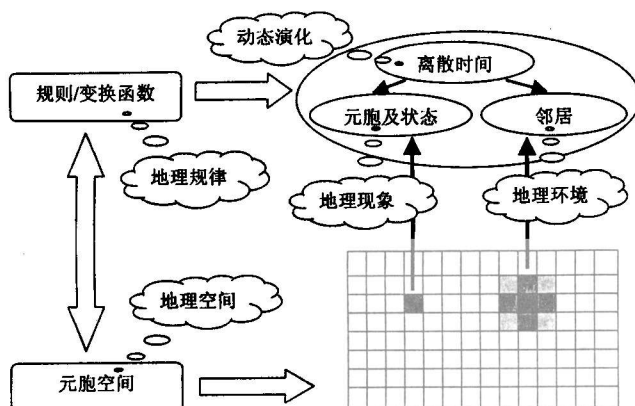


图 1 扩展的元胞自动机——地理元胞自动机模型

Fig. 1 The framework of geographical model based on extended cellular automata

(2) 元胞空间的扩展: 由统一的规则元胞构成的元胞自动机空间,可以扩展为栅格数据模型表示下的地理空间。为表达地理的区域性的特点,可以将元胞空间划分为多个不同质的,即由不同性质的地理智能体构成的子空间,从而模拟地理区域差异和区域的相互影响和作用。

(3) 转换规则的扩展: 元胞自动机规则是一种局部的、由空间排列决定的映射函数。我们参照环境决定论的思想,建立空间相互作用模型,使元胞自动机按照反映地理规律的转换规则进行动态模拟。其中,我们尽可嵌入传统的空间模型,如重力模型等。为使它更具有现实性,引入概率推理模型,如 Monte Carlo 模型。规则模型中的参数与模型结果具有非线性、不确定性关系,二者之间的相互关系可以用神经网络的方法进行研究,进而优化模型。再者,基于人工智能、专家系统技术,这些规则可以由地理专家系统来控制。

(4) 时间的扩展: 地理元胞自动机的时间将是一种与空间尺度密切相关的抽象概念,它不具体地表示一年、一月或是一天。它与实际的时间的对应通过空间总量,如模型中某个循环后的城市模拟面积与某年的城市实际面积相等,则认为二者相互对应。

(5) 地理信息系统的支持: 地理信息系统的支持是地理元胞自动机模型实现的必要条件。首先,地理信息系统可以为地理元胞自动机模型提供数据输

入、转换、管理, 提供模型所需要的特定格式的数据; 再者, 地理信息可以将模型结果可视化; 最后, 地理信息系统提供了元胞自动机模型模拟和预测结果与其它应用的接口。目前, 地理信息系统与地理元胞自动机的集成可以采用三种模式: ①二者并行, 通过文本文件等中间文件、或相互提供读写标准实现相互通信; ②松散耦合, 以地理信息系统为集成平台, 用 C 语言、地理信息系统的二次开发语言, 如 Mapbasic 和 Avenue 将地理元胞自动机作为一个分析模块与地理信息接口, 提供统一的用户界面; ③紧密集成, 以地理元胞自动机模型为核心, 利用 DLL, OCX/ActiveX 技术, 借助高级编程语言如

C++ 开发必要的地理信息系统功能, 支持地理元胞自动机的运行。

6 地理元胞自动机的实现与城市动态模拟

6.1 城市动态发展模型

城市是一个“自然—社会—经济”复合的自组织复杂系统, 影响城市增长的因素复杂多样, 城市的动态增长过程和动力学机制一直是地理学研究的一个难题。作者尝试着用地理元胞自动机来模拟城市的生长过程 (图 2)。

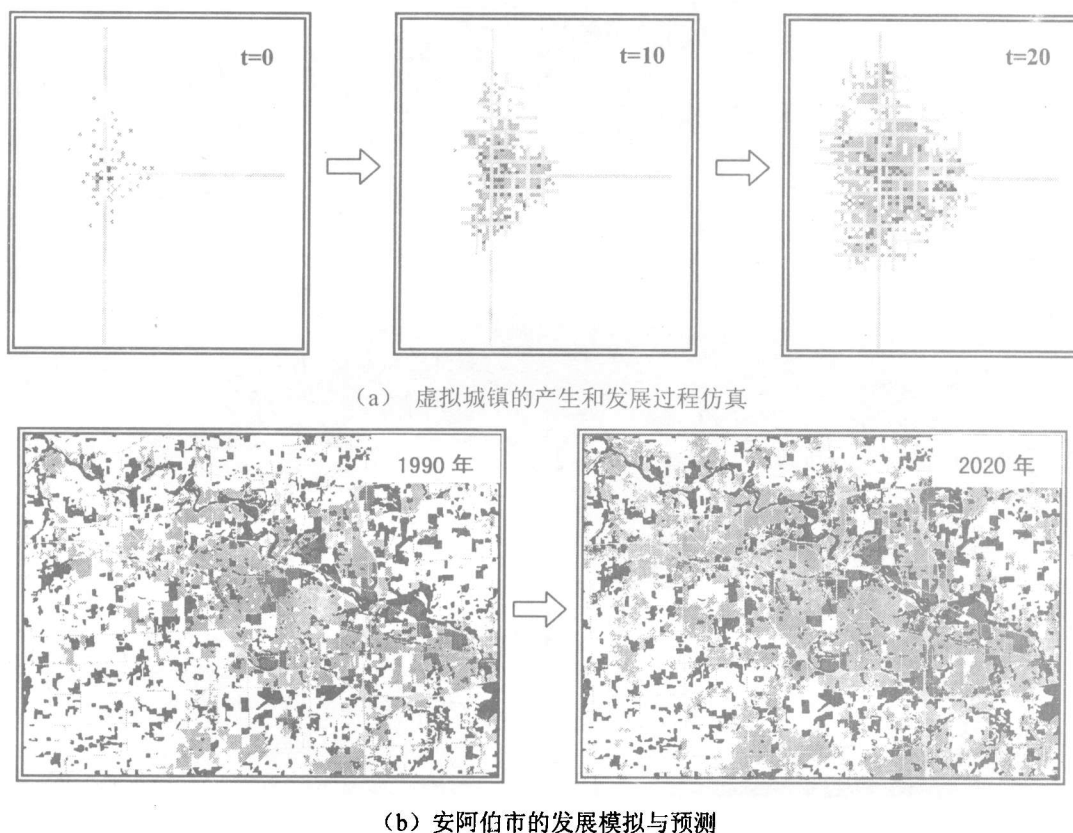


图 2 地理元胞自动机模拟城市增长与发展

Fig. 2 Simulation of urban growth using geographical model based on cellular automata

在一个二维空间上, 对城市空间进行规则的网格化, 对各个网格单元赋予相应的土地利用类型, 同时引入控制层数据, 在此基础上定义其演化规则:

$$S_{ij}^{t+1} = f(S_{ij}^t, E_{ij}^t, \alpha_{ij}^t, P_{ij}^t, T)$$

这里, S_{ij}^t , S_{ij}^{t+1} 表示在位置 $[i, j]$, 时刻 t 和 $t+1$ 的土地利用类型, $S \in L$, L 为土地利用类型集合。 E_{ij}^t

表示在位置 $[i, j]$ 处的环境参数, 它是该位置处的地理环境的综合指标, 它可以是人为的强制指标 (城市规划、土地政策等)、或是自然环境因子 (如坡度、地质条件)、或是其它地理相关因素 (如道路网密度), 通常它是一个静态指标, 但不排除是动态

的可能性,例如土地政策的变化。 Ω_i 表示该网格的邻居状态集合。 P_i 反映在城市发展过程中,土地利用变化的随机性指标。 T 表示局部演化规则,规定不同土地利用类型间的相互作用特征,例如,居民用地对商业的吸引和对工业的排斥等,在模型中通常采用距离衰减函数等牛顿力学模型。

6.2 模型与地理信息系统的集成

在与地理信息系统的集成方法上采用了第三种方案,这种方案工作量最大,但由于目前地理信息系统软件尚不能有效地处理、显示动态时空数据,而且元胞自动机的数据模型与现有的空间数据模型有较大差距,利用地理信息系统的二次开发工具,很难作到紧密集成,且运行效率较低,影响实时动态效果。因而前两种集成方案满足不了动态模拟的要求。

作者在以上思想的指导下,实现了元胞自动机及其与地理信息系统的集成,开发完成 GeoCA 系统平台。该系统利用 Visual C++ 为主要开发工具,采用 DLL、ActiveX 技术,独立开发研制,运行于 Win95、98/NT 等 32 位微软视窗平台。该软件平台可以灵活地模拟城市发展的各种动态模式和机制,是一个城市增长研究的实验室。

6.3 实例研究与结论

在 GeoCA 系统的支持下,可以通过调整规则参数,状态定义实现多种地理现象的模拟。模拟结果表明,地理元胞自动机既可以生成具有城市发育特征的虚拟城市(Virtual City),还可以导入实际空间数据,在分析历史发展数据系列的基础上,推演适当的模型参数,来动态模拟和预测城市的土地变化和城市扩展。

作者利用该系统,成功地模拟了美国安阿伯(Ann Arbor)城市的土地利用变化和城市的生长过程。通过对该市 1985—1990 年间的城市增长分析,确定了模型的相关参数及初始状态,据此对城市的生长进行了模拟和预测。以 1995 年的实际数据为标准,与模型预测结果进行了空间相关分析,得到相关系数约为 0.6 的较为满意结果。进而,利用该模型预测了安阿伯在 2000、2020 年时的城市扩散情况。试验表明,该模型不仅可以对城市的生长进行模拟,而且可以对城市在自然条件和城市规划等人文干预作用下的生长作出预测,从而为城市规划和决策提供参考。

通过以上实验研究,我们可以看到地理元胞自

动机模型有以下几个特点:

1. 可生动形象地模拟城市的发育和增长过程,对于我们理解城市发育、增长机理提供了一个有效的试验平台。

2. 由于地理模型的嵌入和对社会、经济、自然因素的综合,在一定程度上克服了这类模型的生动但不真实的缺陷。

3. 在与地理信息系统功能机密集成的基础上,实现了地理复杂过程的动态实时计算与显示。

但是,地理规律在不同空间尺度上的表现特征,地理现象演化的驱动规律以及时空相关规律是影响模型建立和模拟结果的重要因素,这些特征规律尚有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 钱学森. 谈地理科学的内容及研究方法. 地理学报, 1991, 46 (3).
- [2] 陈述彭主编. 地球系统科学. 北京: 中国科学技术出版社, 1998.
- [3] 仪垂祥. 非线性科学及其在地学中的应用. 北京: 气象出版社, 1995.
- [4] 梁怡. 人工智能、空间分析与空间决策. 地理学报, 1997, 52 (增刊): 104~112.
- [5] Goodchild, F. Michael. Geographical information science. Int. J. Geographical Information System, 1992, 6 (1): 699~714.
- [6] 牛文元. 理论地理学. 北京: 商务印书馆, 1992.
- [7] 陈述彭. 地学的探索. 第四卷, 地理信息系统. 北京: 科学出版社, 1992.
- [8] S. Wolfram. Cellular automata as models of complexity. Nature, October 1984, 311: 419~424.
- [9] 谢惠民. 非线性科学丛书: 复杂性与动力系统. 上海科技教育出版社, 1994.
- [10] Longton, C. G. Artificial Life, I, II, III, Addison Wesley Pub, 1987, 1990, 1992.
- [11] Xie, Y. C., A generalized model for cellular urban dynamics. Geographical Analysis, 1996, 28 (4).
- [12] White, R. W. and Engelen, G. Cellular Dynamics and GIS: Modeling Spatial Complexity. Geographical Systems, 1994, 1: 237~253.
- [13] Goncalves, P. P., Diogo, P. M.. Geographic Information Systems and Cellular Automata: A new approach to forest fire simulation. Proceedings of the Fifth European

- Conference and Exhibition on Geographical Information Systems, 1994.
- [14] Couclelis, H. Cellular worlds: a framework for modeling micro—macro dynamics. *Environment and Planning A*, 1985, 17; 585~596.
- [15] Batty, M. and Longley, P. A. *Fractal Cities*, London: Academic Press, 1994.
- [16] Clarke, K. C., Gaydos, L. J. Loose—coupling a cellular automaton model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *Int. J. Geographical Information Science*, 1998, 12 (7); 699~714.
- [17] Wu, Fulong. SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. *Int. J. Geographical Information Science*, 1998, 12 (1); 63~82.

Spatial Complexity Analysis and a Geographical Model Based on Cellular Automata (GEOCA)

Sun Zhanli

(*Institute of Geography, CAS, Beijing 100101*)

Abstract

The geographic phenomena, including global change, urban growth, land-use change etc., have been recognized as complex system. Considering the weakness of the traditional model based on the Newton mechanical model and differential equation, a new approach of applying the nonlinear methods, particularly cellular automata, has become the frontier field of geographical research. Here we bring forth a theory related to geographical model based on cellular automata (GeoCA) and try to simulate the complex geographical behavior dynamically. The advantages and the framework of the GeoCA model are described. Lastly, the growth of Ann Arbor, a city of Michigan in USA, which is witnessing dramatical growth recently, is simulated and forecasted using GeoCA model integrated with geographical information system.

Key words: Complex system Non-linear science Cellular automata Geographical information system Urban growth