



地理信息系统理论与应用丛书

地理模拟系统： 元胞自动机与多智能体

● 黎夏 叶嘉安 刘小平 杨青生 著



科学出版社
www.sciencep.com

地理信息系统理论与应用丛书

地理模拟系统： 元胞自动机与多智能体

黎 夏 叶嘉安 刘小平 杨青生 著

国家杰出青年基金项目 (40525002) 资助
国家自然科学基金项目 (40471105)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书提出并阐述了基于元胞自动机、多智能体系统和 GIS 的地理模拟系统 (Geographical Simulation Systems) 的新概念。地理模拟系统的核心技术是元胞自动机 (CA) 与多智能体系统 (MAS)。本书首先对元胞自动机的发展历史进行了回顾,介绍了 CA 与 GIS 结合来对复杂资源环境系统进行模拟的一般原理和方法,以及对模型有效性进行验证的方法。接着根据作者近年来的研究成果,对 CA 最核心的内容,即转换规则,进行了深入分析。还对 MAS 与 CA 的结合进行了探讨,以处理地理模拟中所涉及复杂的人-地关系。并介绍了多智能体系统在地理模拟中的一些应用例子,包括城市形态模拟与优化、土地利用变化模拟、土地利用规划、传染病的模拟和交通模拟等。

读者对象包括从事 GIS 的高校教师和科研院所研究人员、GIS 专业的本科和研究生以及地理学其他专业的研究生、计算机科学的有关学生、参加 GIS 研究生入学考试的学生等。

图书在版编目 (CIP) 数据

地理模拟系统:元胞自动机与多智能体/黎夏等著. —北京:科学出版社, 2007

(地理信息系统理论与应用丛书)

ISBN 978-7-03-018815-1

I. 元… II. 黎… III. 地理信息系统-自动机-环境模拟
IV. P208 TP23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 046916 号

责任编辑:韩 鹏 朱海燕 王新玉/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 5 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007 年 5 月第一次印刷 印张:20

印数:1—2 500 字数:462 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

1948年, 数学家和“现代计算机之父” Von Neumann 和 Ulam 首次提出元胞自动机 (CA) 的概念, 其目的主要是从计算的角度来设计出一种可自我复制的自动机。CA 具备构建通用计算机的潜力, 与计算机的起源有密切的关系。由于 CA 有很强的模拟复杂系统的自组织现象的能力, 其很快被应用于物理和化学中复杂动态系统的模拟中, 包括生物繁殖、晶体生长等自然现象的模拟。CA 的特点, 后来也引起了地理学、环境学、生物学、景观学等诸多地学学科的重视。目前 CA 已成功地应用到生物演化、环境变化、景观更替、交通流、林火扩散和城市系统等模拟研究中, 取得了许多有意义的研究成果。

许多复杂动态系统的演变不仅仅涉及自然因素, 还受到各种社会和人为因素的影响。微观空间个体相互作用在这些复杂系统的演变中扮演了重要的角色。如果我们从系统内部微观的层次出发, 以一种进化的、涌现的角度来理解地理复杂系统的演化过程, 也许能够为地理学的研究提供一个全新的视角。近年在计算机领域发展起来的多智能体技术正是解决这些问题的重要工具。多智能体理论和技术是在复杂适应系统理论及分布式人工智能 (DAI) 技术的基础之上发展起来的, 自 20 世纪 70 年代末出现以来发展迅速, 目前已经成为一种进行复杂系统分析与模拟的思想方法与工具。多智能体系统思想的核心就是微观个体的相互作用能够产生宏观的全局格局。

自 20 世纪 60 年代第一个地理信息系统——加拿大地理信息系统 (CGIS) 提出以来, 在过去几十年中, GIS 对与空间信息相关的各个学科产生了深刻的影响。GIS 能够比较方便地获取数据, 但是, 如何把数据转化成实际应用中所需要的知识则是一大难题。GIS 作为一种计算平台, 不仅能够完成数据输入、存储、管理、显示输出等功能, 更重要的是具有空间分析功能。GIS 是现代地理学的一次重要革命, 使地理学由定性描述转向定量地观测和分析。

利用计算机对空间信息进行分析已经成为地理学的一种重要虚拟实验手段。本书在元胞自动机、多智能体系统和 GIS 的发展基础上, 提出了地理模拟系统 (Geographical Simulation Systems) 的新概念, 并对其所涉及的研究内容、原理和方法进行了探讨。地理模拟系统是指在计算机软、硬件支持下, 通过自下而上的虚拟模拟实验, 对复杂系统 (例如各种地理现象) 进行模拟、预测、优化和显示的技术。它是探索和分析地理现象的格局形成和演变过程以及进行知识发现的有效工具。地理模拟系统试图从微观入手, 探索地理微观空间实体之间相互作用形成宏观地理格局的动态过程, 是对目前 GIS 在过程模型功能不足的重要拓展。通过对复杂地理现象进行模拟、预测、优化, 为探索地理现象的格局、过程和演变提供了重要的虚拟实验手段。

本书总结了如何利用启发式方法来定义 CA 的转换规则, 包括介绍了多准则判断方法、SLEUTH 模型和主成分分析等。对 CA 的纠正和参数自动获取进行了研究, 例如

采用神经网络、遗传算法和数据挖掘等技术来改善 CA 的模拟效果。并尝试探讨 CA 的动态转换规则换取方法,以使得模型能适应快速变化的复杂资源环境的特点。并将一些最新发展的计算科学技术,如支持向量机和核学习机等,引进 CA 非线性转换规则的获取中。

本书共由 14 章组成,涵盖了地理模拟系统的理论和方法,所介绍的内容主要来自我们以往的研究成果。它们可以分为两大部分:第一部分是关于元胞自动机;第二部分是多智能体系统。希望通过有关研究,使得地理模拟系统可以作为地理信息系统的重要补充,逐步发展成一个较成熟的体系。

在本书中,导论首先简单介绍了元胞自动机和多智能体系统在地理模拟中的研究意义;第 2 章提出了基于元胞自动机和多智能体系统的地理模拟系统,阐述了它在地理研究中的重要性及所包含的研究内容和技术手段;第 3 章介绍了地理模拟系统的数据获取的数据源及获取方法;第 4 章对元胞自动机在地理模拟中的基本原理进行了介绍,并列出了国际上地理元胞自动机的常用模型;第 5 章着重介绍 CA 转换规则获取的一些具体方法,包括采用基于多准则判断、Logistic 回归、SLEUTH 模型、基于“灰度”的转换规则、基于主成分分析,以及基于神经网络等方法;第 6 章进一步讨论了转换规则获取的智能式方法,包括采用数据挖掘、遗传算法、核 Fisher 判别函数、支持向量机、粗集、案例推理等。这些方法有助于从自然界复杂的关系中找出规律,获取模型所需要的转换规则,从而改善模拟的效果;第 7 章以城市复杂系统的模拟为例,显示了地理模拟系统在演变规律的探索、过程优化等方面的应用,它可以作为过程模拟与知识发现的工具,例如进行城市形态的“基因”分析等;第 8 章进一步将元胞自动机应用到城市与区域规划中,作为辅助规划的有效工具;第 9 章对地理元胞自动机的不确定性进行了研究。第 10 章主要是介绍元胞自动机在其他地学领域的应用。

本书的第二部分介绍了多智能体系统的原理及在地理模拟中的应用。其中第 11 章首先介绍了多智能体的基本原理;第 12 章讨论了基于多智能体系统的空间决策行为及土地利用格局演变的模拟;第 13 章建立了基于多智能体和元胞自动机的城市土地利用的微观规划模型;第 14 章还讨论了利用多智能体系统对城市工业及基本就业空间增长过程进行微观模拟的方法。

本书的部分工作来自与我的博士和博士后导师香港大学叶嘉安院士多年合作研究的结果,其顺利出版要感谢我在中山大学地理学院的多位学生,包括博士后、博士生和硕士生。刘小平对本书的格式和编排做了大量的工作。其中第 5 章 5.2 节(基于 Logistic 回归的 CA)和第 8 章 8.7 节(基于城市扩张的动态选址模型——以深圳垃圾转运站选址为例)部分由伍少坤撰写;第 10 章(元胞自动机在其他地学领域的应用)由卓莉、伍少坤、刘涛等整理和撰写。另外,王海仙也参与了本书部分资料的收集和整理工作。

黎 夏

2006 年 7 月于中山大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 地理元胞自动机	1
1.2 空间多智能体系统	5
主要参考文献.....	5
第 2 章 地理模拟系统	7
2.1 地理学研究方法的回顾	7
2.2 地理模拟系统的提出及定义	8
2.3 地理模拟系统的发展历史.....	11
2.4 地理模拟系统在地理研究中的重要性.....	13
2.5 地理模拟系统的研究内容与手段.....	14
2.6 地理模拟系统与 GIS 的关系	17
2.7 地理模拟系统与多智能体系统的关系.....	17
2.8 地理模拟系统与系统动力学的关系.....	19
2.9 地理模拟系统与空间信息网格的关系.....	19
主要参考文献	19
第 3 章 地理模拟系统的空间数据获取	22
3.1 空间数据采集的一般方法.....	22
3.2 利用各种 GIS 空间分析方法获取进一步数据	23
3.3 利用 GIS 获取城市模拟的输入数据	24
3.4 利用遥感获取地理模拟的输入数据.....	29
主要参考文献	34
第 4 章 元胞自动机在地理模拟中的基本原理	36
4.1 元胞自动机的发展历史.....	36
4.2 元胞自动机进行地理模拟的原理及方法.....	39
4.3 常用的 CA 模拟软件.....	46
主要参考文献	47
第 5 章 转换规则获取的一般方法	50
5.1 基于多准则判断的方法.....	50
5.2 基于 Logistic 回归的 CA	51
5.3 基于 5 个因子的 SLEUTH 模型	53
5.4 基于“灰度”的转换规则.....	56
5.5 基于主成分分析的元胞自动机.....	56

5.6	基于神经网络的元胞自动机	58
	主要参考文献	60
第6章	转换规则获取的智能式方法	62
6.1	数据挖掘及转换规则	62
6.2	遗传算法与CA的参数选择	64
6.3	基于Fisher判别和离散选择的CA	66
6.4	基于非线性核学习机自动提取地理元胞自动机的转换规则	70
6.5	基于支持向量机的元胞自动机	73
6.6	基于粗集的知识发现与地理模拟	78
6.7	基于案例(Case-Based)的地理元胞自动机	82
	主要参考文献	87
第7章	元胞自动机:过程模拟与知识发现的工具	89
7.1	利用逻辑回归模型进行城市模拟	89
7.2	基于主成分分析的CA与城市模拟	93
7.3	利用基于神经网络的CA模拟土地利用变化	97
7.4	基于数据挖掘的CA及城市模拟	101
7.5	城市形态演变“基因”的知识挖掘及优化模拟	107
7.6	Fisher判别及元胞自动机转换规则的自动获取	116
7.7	从高维特征空间中获取元胞自动机的非线性转换规则	120
7.8	基于支持向量机的元胞自动机及土地利用变化模拟	124
7.9	基于粗集的知识发现与地理模拟	130
7.10	基于案例推理的CA动态转换规则及大区域城市演变模拟	137
	主要参考文献	146
第8章	元胞自动机:城市与区域规划的工具	148
8.1	引言	148
8.2	约束性CA及可持续城市发展形态的模拟	150
8.3	基于元胞自动机的城市发展密度模拟	154
8.4	利用CA和GIS自动生成农田保护区	163
8.5	基于神经网络的CA及真实和优化的城市模拟	169
8.6	约束性CA在城市规划中的应用:以广东省东莞市为例	174
8.7	基于城市扩张的动态选址模型——以深圳垃圾转运站选址为例	188
	主要参考文献	198
第9章	地理元胞自动机的不确定性研究	201
9.1	引言	201
9.2	城市CA的不确定性	202
9.3	城市CA中的不确定性评价	205
9.4	结论	212
	主要参考文献	213
第10章	元胞自动机在其他地学领域的应用	215

10.1	CA 在交通领域的应用	215
10.2	CA 在森林火灾模拟中的应用	221
10.3	CA 在景观模拟中的应用	223
10.4	CA 在地表流模拟中的应用	225
10.5	元胞模型在岩石断裂演化模拟中的应用	236
10.6	CA 在传染病传播研究中的应用	237
10.7	结论与展望	244
	主要参考文献	244
第 11 章	多智能体的基本原理	250
11.1	多智能体的历史根源与基本概念	250
11.2	多智能体系统 (MAS) 的原理	254
11.3	基于计算机的多智能体	255
11.4	基于地理空间的多智能体	256
11.5	多智能体在经济、资源环境中的应用	257
11.6	多智能体与 CA 及 GIS 的集成	258
11.7	多智能体系统的公共建模平台	259
	主要参考文献	261
第 12 章	基于多智能体系统的空间决策行为及土地利用格局演变的模拟	262
12.1	引言	262
12.2	基于多智能体的城市土地利用变化模拟模型	263
12.3	模型的应用	267
12.4	模型的检验	273
12.5	结论	273
	主要参考文献	274
第 13 章	多智能体和元胞自动机: 城市土地利用的微观规划模型	276
13.1	可持续发展与城市土地资源规划	276
13.2	城市发展预测的微观模型	276
13.3	基于 MAS 和 CA 的城市土地资源可持续发展及规划模型	277
13.4	模型的应用	283
13.5	结论和讨论	288
	主要参考文献	288
第 14 章	基于多智能体系统的城市工业及基本就业空间增长过程的微观模拟	290
14.1	引言	290
14.2	工业企业及基本就业空间增长的 CA-MAS 微观模型	291
14.3	应用	297
14.4	结论	301
	主要参考文献	301
附录:	利用 ArcObject 9.0 控件设计地理元胞自动机的例子	303

第 1 章 绪 论

1.1 地理元胞自动机

元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 具有强大的空间运算能力, 常用于自组织系统演变过程的研究。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 (周成虎等, 1999)。它这种“自下而上”的研究思路, 充分体现了复杂系统局部的个体行为产生全局、有秩序模式的理念。近年来, 越来越多的学者利用元胞自动机来模拟城市系统 (Batty et al., 1994; White et al., 1993; Wu et al., 1998; Li et al., 2000), 并且取得了许多有意义的研究成果。这些研究表明, 通过简单的局部转换规则可以模拟出复杂的城市空间结构。体现了“复杂系统来自简单子系统的相互作用”这一复杂性科学的精髓, 为地理学等理论研究提供了可靠依据。

许多地理现象属于典型的动态复杂系统, 具有开放性、动态性、自组织性、非平衡性等耗散结构特征。例如, 城市系统的发展变化受到自然、社会、经济、文化、政治、法律等多种因素的影响, 因而其行为过程具有高度的复杂性。正是由于这种复杂性, 城市 CA 必须考虑各种复杂因素的影响。CA 虽然可以模拟复杂城市系统的某些特征, 但是单个的 CA 很难准确模拟复杂城市系统的所有特征, 这就出现了许多学者提出了一系列 CA 来模拟城市系统不同方面的特性。为更好地认识和了解 CA, 可以将复杂的城市系统进行分解, 用不同的 CA 模拟城市系统的不同特征。

CA 的一个主要特征是 CA 与 GIS 的耦合。CA 和 GIS 的耦合能使 CA 模拟出与实际情况更为接近的模拟结果。例如, GIS 在城市模拟中发挥着相当重要的作用, 它为 CA 城市模拟提供了大量的空间信息和强有力的空间数据处理平台。过去几十年中, GIS 对与空间信息相关的各个学科产生了深刻的影响。譬如在土地利用、资源调查与评估等领域, GIS 在空间数据获取、存储、处理和分析中发挥了巨大的作用。世界上公认的第一个实用 GIS 系统是加拿大地理信息系统 (CGIS)。该系统是由 Tomlinson 1982 年为加拿大农业部所设计的, 1964 年正式投入使用。计算机技术的快速发展 (CPU 运算速度得到极大的提高、内外存迅速扩大、软件技术不断发展) 使现代 GIS 的功能更为强大, 以前很难处理的海量空间数据的储存、运算和分析现在能得以方便地进行处理 (Openshaw, 1994)。

GIS 往往被用来解决传统模型中的复杂空间问题。这些模型的执行主要通过 GIS 操作来实现, 如: 基于多要素的区位选址能方便地用 GIS 空间分析来完成。GIS 通过大量的空间运算 (布尔运算等) 可以找到适宜的位置。传统 GIS 模型能很好地解决部分空间相关问题, 但对复杂的时空动态变化地理现象却难以模拟。GIS 在空间建模方面具有一定的局限性, 它只是简单提供了支持建模的计算环境 (Batty et al., 1996)。毫无

疑问, GIS 能够满足我们在空间格局方面分析的需要, 但是, 许多地理现象的时空动态发展过程往往比其最终形成的空间格局更为重要, 譬如城市扩展、疾病扩散、火灾蔓延、人口迁移、经济发展等。时空动态模型对研究地理系统的复杂性具有非常重要的作用, GIS 与时空动态模型的耦合将会极大地增强现有 GIS 分析复杂自然现象的能力。动态系统的建模具有下列一些特征:

- 计算邻域的动态影响
- 大量的迭代运算
- 确定与空间位置相关的具有指示性的因素
- 多层叠加要素信息的提取
- 通达性的动态变化
- 迭代过程中空间变量的更新
- 动态变化过程的可视化
- 模型的校正

时空动态模型面临的主要问题是多时态海量数据的获取和管理。GIS 能解决海量数据的获取、储存、更新等问题。如: 居民地、道路、土地利用等信息可方便地从 GIS 中获取和储存。处理复杂的空间关系时, 现有 GIS 的功能有一定局限性, 为更好地研究地理系统复杂的时空动态变化特征, 需要在 GIS 中耦合动态模型, 如 CA 或 Multi-Agent 模型。此外, 在动态模型与 GIS 耦合的系统中需要开发专门的算法。

元胞自动机 (CA) 具有强大的空间建模能力和运算能力, 能模拟具有时空特征的复杂动态系统。CA 在物理、化学、生物学中成功模拟了复杂系统的繁殖、自组织、进化等过程。与传统精确的数学模型相比, CA 能更清楚、准确、完整地模拟复杂的自然现象 (Itami, 1994)。CA 起源于计算科学, 已经在许多领域得到了应用, 主要模拟自然现象的发展变化规律。CA 的起源可追溯到 Von Neumann 对自繁殖现象的研究。他用 CA 演示了机器能够模拟自身的现象, 并得到了这样的结论: 如果机器能模拟出自身的动作, 说明存在自繁殖的规律 (Batty et al., 1994)。CA 模拟中最有名的案例是“生命游戏”, 它用最简单的局部规则模拟出全局的模式。CA 能够模拟出复杂系统中不可预测的行为, 而这对于传统的基于方程式的模型来说, 是无能为力的。

城市地理学家在 20 世纪中后期发展了许多城市模型, 这些模型主要源于社会经济理论, 如输入、输出理论和空间相互作用理论 (Wilson, 1974)。这些传统的城市模型在模拟城市系统时具有一定的局限性, 因为此类模型是静态、解析性的模型, 无法反映城市系统的动态变化及复杂性特征。同时, 传统城市模型由于以较大的单元 (如行政区等) 作为研究对象, 缺乏详细的真实空间资料, 模型的建立无法运用高分辨率的空间信息, 也无法反映城市的微观结构特征和个体行为, 而这恰恰是造成城市动态性、自组织性、突变性等复杂特征的原因。另外, 传统的基于方程式的城市模型因涉及的参数太多而往往难以求解。

CA 通过运用高分辨率空间信息能够克服传统城市模型的局限。CA 的基本研究对象是元胞, 元胞可以定义为高分辨率的格网, 因此能十分方便地与高分辨率的遥感图像结合起来。城市 CA 的基本原理是通过局部规则模拟出全局的、复杂的城市发展模式。CA 具有强大的建模能力, 能模拟出与实际非常接近的结果, 已被越来越多的学者运用

到城市模拟中。许多学者表明 CA 能用简单的局部规则模拟复杂系统。通过运用一般的 CA 结构,城市可以分解为各种可计算的模型。从严格的决定论到完全的随机性、从完全的可预测性到不可预见,CA 能模拟出城市各种不同的形态结构 (Batty et al., 1994; Batty, 1997)。

城市 CA 主要是通过扩展 Von Neumann、Ulam、Conway 和 Wolfram 等学者的标准 CA 来形成的 (O'Sullivan et al., 2001)。标准 CA 主要考虑邻域的作用。邻域包括 Von Neumann 邻域和 Moore 邻域: Von Neumann 邻域是由中心元胞相连的周围 4 个元胞组成, Moore 邻域则是由中心元胞周围相邻的 8 个元胞组成。标准 CA 的转换规则常在均质空间的元胞上定义的,由邻域元胞的状态决定,但元胞本身的自然属性不包含在转换规则中。转换规则是固定的,与空间位置无关 (White et al., 1997)。在模拟过程中,标准 CA 几乎不使用空间数据。

如果对标准 CA 的限制条件适当地放宽,则可以更好地模拟出真实的城市发展。如:引入各种距离变量因子,可使模拟结果比传统 CA 的模拟结果更接近实际,外在因子的引入也能影响城市发展的形态。White 和 Engelen 的研究表明,不同城市用地的需求总量会影响 CA 模拟的结果 (White et al., 1997)。黎夏和叶嘉安研究了全局的、区域的、局部的约束条件对模拟过程的影响 (黎夏等, 1999)。White 和 Engelen 将随机变量引入模型中 (White et al., 1993),模拟出具有随机特征的城市形态。引入随机变量后,使得城市 CA 的模拟结果具有不确定性,并能模拟出城市分形等特征,这与真实的城市演变更接近。

CA 能模拟虚拟城市,同样也适合模拟真实城市的发展。Couclelis 通过对虚拟城市的模拟,得出了简单的局部规则能够形成复杂的空间格局的结论,她研究的目的并不是模拟真实城市的扩张过程,而是通过虚拟城市的模拟来说明简单的局部规则能够产生复杂的宏观格局 (Couclelis, 1985)。White 和 Engelen 提出的 CA 也是用虚拟城市来研究城市分形结构特征和城市演化过程。Clarke 和 Gaydos 则以旧金山和华盛顿城市作为研究区,利用 CA 模拟了真实城市的发展过程,模型的参数校正正是通过历史地图数据来实现的 (Clarke et al., 1998)。

CA 还能够为城市规划提供科学依据,在 CA 中嵌入不同的约束条件可以模拟出不同规划情况下城市的发展格局 (黎夏等, 2006)。通过引入约束条件和影响因素,利用不同的转换规则可模拟出各种城市发展形态 (Yeh et al., 2001)。CA 也可用来解决社会经济环境中的应用问题。如黎夏和叶嘉安研究了如何利用 CA 来自动形成农田保护区 (Li et al., 2001)。Clarke 等 (1995) 研究了如何用 CA 模拟火灾的扩散和消失。Couclelis (1988) 则提出了基于人口动态流动的 CA,来模拟不同的人口平衡模式下不同的人口时空分布和结构情况。

CA 模型可方便地回答 what-if 的问题,即按不同的假设条件模拟出不同的结果。在模型中嵌入不同假设条件,能形成相异的城市发展模式 (Couclelis, 1997)。将这些条件同时嵌入模型中,就可形成交替的城市发展模式。城市的自组织模式可通过不同要素的集聚作用形成。CA 的多次迭代运算能反映城市系统复杂的时空变化特征。因此,与传统城市模型相比,CA 能模拟出与实际更为接近的结果。在城市规划中,CA 也能比传统模型提供更科学的依据。

CA 和 GIS 的耦合使二者在时空建模方面相互补充。首先, CA 能增强 GIS 空间动态建模的功能, 可作为 GIS 空间分析的引擎。尽管, 在空间分析和空间决策方面 GIS 得到了很好的应用, 但 GIS 在动态空间建模和操作方面有很大的局限性 (Wagner, 1997)。CA 由于具有强大的时间建模能力, 从而能够丰富 GIS 现有的时空分析功能, 当前 GIS 软件则较难实现时空动态建模功能 (Batty et al., 1999)。城市系统的模拟需要嵌入不确定的因素或者用户期望的因素, 从而模拟出不确定性的城市系统或者用户所预期的城市形态。传统 GIS 在处理地理现象的时间过程上存在一定的局限性, 而许多研究表明, CA 能更容易地模拟各种现象随时空变化的动态性, 这是因为 CA 非常适合于复杂系统的模拟。因此, 为了更好地模拟真实城市的发展, 提高 CA 的模拟精度, 许多学者把 CA 跟 GIS 结合起来, 用来模拟城市的发展 (Wu et al., 1998; Batty et al., 1999; Li et al., 2000)。

其次, GIS 能够为 CA 提供详细的空间信息, 包括各种资源环境约束条件。GIS 提供的大量空间信息可以作为 CA 的主要输入 (如各类空间变量和约束条件), 资源环境约束条件数据可从 GIS 中获取, 并可方便地导入到 CA 中。CA 和 GIS 的耦合能获得空间变量与城市增长之间关系的信息。可操作的城市模型常常与土地利用、交通和其他经济、环境因素有关, GIS 适合提供这些变量的丰富空间数据。

在过去的几十年里, 卫星遥感为许多地理研究提供了海量的地表信息。最近, 学者们也开始从遥感图像上获取 CA 建模的重要的训练和检验数据 (Li et al., 2004)。例如, 卫星遥感图像可为 CA 提供模拟的初始土地利用信息。模拟的结果一般需要与实际情况进行对比。卫星遥感影像又是提供实际土地利用数据的主要来源。这些土地利用数据往往是通过遥感图像进行分类来获得的。由于遥感数据属于栅格结构, 它们可以很方便地作为 CA 的输入数据之一。

许多学者提出了各种 CA 用来模拟城市复杂系统, 由于城市系统具有自身的特殊性, 城市 CA 需要对传统的标准 CA 进行一些改变, 以达到模拟结果与真实情况更为接近的目的。城市系统受到社会因素和人类干预影响很大, 很多城市现象通过简单的局部规则无法解释, 如: 交通的改变和政府决策可以改变城市发展的方向, 这些外力或外部因素可作为模型的约束条件反映在转换规则中。城市 CA 用来模拟真实城市发展时将变得复杂, 尤其是模拟不同土地利用类型变化时, 变得尤为复杂, 需要考虑更多的外部因素作为模型的约束条件。

传统 CA 的转换规则只考虑局部范围的相互作用。然而, 最近的研究表明, 在城市 CA 模拟中不同尺度的交互作用可产生更为理想的模拟结果 (Wu et al., 1998; Li et al., 2000)。CA 模拟中, 引入全局变量, 运用区域空间变量和局部邻域的交互作用可以模拟出更复杂的空间模式。这些变量又受到社会、经济、政治等因素的影响。如: 区域总人口数和城市可利用资源在城市发展中起着重要的作用, 这些影响无法作为局部的交互作用嵌入模型中。如果在 CA 中嵌入这些变量, 则能形成全局动态模式。GIS 获取的空间变量在 CA 中可以反映不同变量对城市发展的影响。越来越多的学者致力于研究 CA 和 GIS 的相互耦合, 以产生与实际情况更为接近的模拟结果。

CA 还可以模拟多种土地利用类型间的转变以及进行土地利用规划。区位竞争选址问题也可以通过相应的 CA 来解决。在每一次迭代过程中, 土地利用的转变是通过所有

转换函数共同作用决定的。通过将规划目标嵌入转换函数中来控制土地利用的变化,如:在 CA 中可以把保护区作为模型的约束条件嵌入。在某限定区约束条件可以约束、限制或放宽某种土地利用类型的转变,自动形成保护区。将规划目标嵌入模型中,研究城市可能的发展模式,从而可以评估规划政策对土地利用变化的影响。

1.2 空间多智能体系统

多智能体系统 (Multi-Agent Systems) 是在计算机学科里发展起来的一种全新的分布式计算技术。它自 20 世纪 70 年代末出现以来发展迅速 (Weiss, 1999), 目前已经成为一种进行复杂系统分析与模拟的思想方法与工具。虽然单个 Agent 具备一定的功能,但对于现实中复杂的、大规模的问题,只靠单个 Agent 往往无法描述和解决。因此,一个应用系统往往包括多个 Agent。多个 Agent 之间具有主动性、交互性、反应性、自主性等特点。它们能够相互协作,来达到共同的整体目标。这样,多智能体系统就定义为由多个可以相互交互的 Agent 计算单元所组成的系统。

多智能体系统特别适合于在面向动态不可预测环境中的问题求解,目前已经在多智能体决策、规划、合作、对抗和学习技术的研究中显示出优势。多智能体系统采用自下而上的建模思想,与传统的从上而下的建模思路是不相同的。它的核心是通过反应个体结构功能的局部细节模型与全局表现之间的循环反馈和校正,来研究局部的细节变化如何突现出复杂的全局行为。

地理空间系统是一个典型的复杂系统,它的动态发展是基于微观空间个体相互作用的结果。传统的方法难以解释和描述地理空间系统的复杂性,如果我们从系统内部微观的层次出发,以一种进化的、涌现的角度来理解地理复杂系统的演化过程,也许能够为地理学的研究提供一个全新的视角。多智能体系统思想的核心就是微观个体的相互作用能够产生宏观全局的格局。当把多智能体系统引进地理模拟时,多智能体就带有空间属性和空间位置,其空间位置往往是变化的,这与传统的多智能体有明显的不同。

虽然元胞自动机也是采用自下而上的建模思想,但它在模拟过程中侧重的是自然环境要素,无法考虑复杂的空间决策行为及人文因素。处理复杂的人-地关系是地理学中最重要的一点,传统的 CA 在这方面局限性很大。因此,需要将元胞自动机与多智能体系统结合起来,通过将社会经济及行为等属性赋给多智能体,使模型可以反映影响土地利用格局演变的人文因素。不同类型的多智能体之间存在相互影响、信息交流、合作和竞争的关系,以达到共同理解及采取一定的行动影响其所处环境。而环境层的变化也反馈于多智能体层,多智能体层根据环境层的变化采取相应的措施和行动,以谋求双方关系达到平衡,这与人-地关系论不谋而合。利用 GIS 产生虚拟的地理环境,探讨不同情形下多智能体之间的合作行为所产生的效果。在模拟过程中,可以调整策略,以找到最佳的模拟效果。多智能体在相互作用过程中“学习”和“积累经验”,并根据经验改变自身的结构和行为。从而探讨微观个体的决策行为如何形成复杂的宏观空间格局。

主要参考文献

黎夏,叶嘉安. 1999. 约束性单元自动演化 CA 模型及可持续城市发展形态的模拟. 地理学报, 54 (4): 289~298

- 黎夏, 叶嘉安, 刘小平. 2006. 地理模拟系统在城市规划中的应用. 城市规划. 30 (6): 69~74
- 周成虎, 孙战利, 谢一春. 1999. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社
- Batty M. 1997. Cellular automata and urban form; a primer. *Journal of the American Planning Association*, 63 (2): 266~274
- Batty M, Xie Y. 1994. From cells to cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21: 531~548
- Batty M, Longley P. 1996. Analytical GIS: the future. In: Longley P, Batty M. *Spatial Analysis: Modeling in a GIS Environment*. Cambridge: GeoInformation International. 345~352
- Batty M, Xie Y, Sun Z. 1999. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23 (3): 205~233
- Clarke K C, Riggan P, Brass J A. 1995. A cellular automata model for wildfire propagation and extinction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60: 1355~1367
- Clarke K C, Gaydos L J. 1998. Loose-coupling a cellular automata model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington /Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 12 (7): 699~714
- Couclelis H. 1985. *Cellular Worlds: A Framework for Modelling Micro-Macro Dynamics*. *Environment and Planning A*, 17: 585~596
- Couclelis H. 1988. Of mice and men; what rodent populations can teach us about complex spatial dynamics. *Environment and Planning A*, 20: 99~109
- Couclelis H. 1997. From Cellular Automata to Urban Models: New Principles for Model Development and Implementation, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24: 165~174
- Itami R M. 1994. Simulating spatial dynamics; cellular automata theory. *Landscape and Urban Planning*, 30: 24~47
- Li X, Yeh A G O. 2000. Modeling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14 (2): 131~152
- Li X, Yeh A G O. 2001. Zoning for agricultural land protection by the integration of remote sensing, gis and cellular automata. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67 (4): 471~477
- Li X, Yeh A G O. 2004. Data mining of cellular automata's transition rules. *International Journal of Geographical Information Science*. 18 (8): 723~744
- Openshaw S. 1994. Computational human geography; toward a research agenda. *Environment and Planning A*, 4: 499~505
- O'Sullivan D, Torrens P M. 2001. Cellular models of urban systems. In: Bandini S, Worsch T. *Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata*. Berlin: Springer-Verlag. 108~116
- Tomlinson R F. 1982. Panel discussion; technology alternatives and technology transfer. In: Douglas, Boyle. *Computer Assisted Cartography and Geographic Information Processing, Hope, Realism*. Canadian Cartographic Association, Dept. of Geography, University of Ottawa, 65~71
- Wagner D F. 1997. Cellular automata and geographic information systems. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24: 219~234
- Weiss G. 1999. *Multiagent systems; a modern approach to distributed artificial intelligence*, The MIT Press, Cambridge Mass
- White R, Engelen G. 1993. Cellular automata and fractal urban form; a cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 25: 1175~1199
- White R, Engelen G. 1997. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modeling. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24: 235~246
- Wilson, A G. 1974. *Urban and regional models in geography and planning*. London: Wiley, 418
- Wu F, Webster C J. 1998. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation. *Environment and Planning B*, 25: 103~126
- Yeh A G O, Li X. 2001. A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS, *Environment and Planning B: Planning and Design* 28: 733~753

第 2 章 地理模拟系统

2.1 地理学研究方法的回顾

长期以来,许多地理学家一直渴望提高地理研究的科学性,试图像许多具有坚实理论基础学科一样,对地理学的一些理论及现象进行精密的实验、严谨的分析和推理,从而获得逻辑性较强的结论。然而,地理研究的对象——地理系统是一个自然、社会、经济相互作用的复合和开放的复杂巨系统。这就决定了难以用数学方程式来解释自然界的复杂地理现象。由于缺乏有效的数学工具和系统的实验手段,将地理学变为像物理、化学等具有坚实的理论体系的学科就显得困难重重。

古代地理学起源于农牧业社会,在大航海时代得到了发展,其中哥伦布的地理大发现对地理学的发展起到了至关重要的推动作用。这个时期地理学主要以描述的形式向人们介绍外部世界,对当时科学的启蒙发展起了重要作用,故有人认为地理学是最古老的科学(刘盛佳,1990)。

19世纪的近代地理学主要以洪堡、李特尔为代表,他们分别在自然地理和人文地理两大方面为地理学开创了新局面(刘盛佳,1990)。他们均重视对区域的分析,但前者研究重点为地表自然要素,后者则认为人文是地理研究的重点。近代地理学主要以解释世界的形式启发人们对外部世界的理性认识。但是,近代地理学及古代地理学的研究方法属于个性记述的科学,在研究方法上主要以记录和描述的方式来表现地理空间的差异性(杨吾扬等,1996)。对于具体问题的分析,也基本上按照归纳的思维方式进行研究。因此,在近代地理学及古代地理学中几乎没有关于规律、模型、定理等科学性和逻辑性强的理论产生。

20世纪50年代,许多学者开始对地理学的传统思维方式进行反思和批判,认为地理学也应该是研究共性规律的科学。美国地理学家舍费尔发表了一篇题为“地理学中的例外论”的文章,标榜地理学是关于空间秩序法则和命题的科学,认为地理学应该是解释现象,而不应该仅仅罗列现象(Schaefer,1953)。解释现象就必须有法则和规律,应该把地理现象视为法则或者规律的实例。也就是说,地理学的研究目的与其他学科类似,都是追求法则、探索规律(徐建华,2002)。这个时期,地理学引入了数学和统计方法,地理学经历了激烈的计量革命,即计量地理学。但计量地理学只不过以更为精确的数学语言或定量模型描述地表现象的形态法则,并没有从根本上改变经典地理学的认知模式和透视力度,它所刻画的地表模型仍然只是一个具有总体分布特征和简单相互关系的地理对象集合(杨开忠等,1999)。

计算机的发明拉开了人类进入空间时代与信息社会的序幕,而地理信息则成为地理学研究的最重要对象之一。20世纪60年代中期,Tomlinson和他的同事们,为了应用计算机技术对自然资源进行管理和规划(Tomlinson,1982),发展了第一个地理信息系

统一——加拿大地理信息系统 (CGIS)。此后,随着计算机技术的不断拓展和 GIS 本身的发展, GIS 进入复杂的空间分析阶段,能用来解决地理学传统模型中的复杂空间分析问题。地理信息系统的提出和发展是现代地理学的一次重要革命,是计算机技术和地理学方法相结合的产物,从而使地理学由定性的描述转向定量的观测和分析。

20 世纪 90 年代,美国的 Goodchild 教授提出地理信息科学的概念 (Goodchild, 1992a)。认为与地理信息系统相比较,地理信息科学更加侧重于将地理信息视为一门科学,而不仅仅是一门技术实现。研究在应用计算机技术对地理信息进行处理、存储、提取以及管理和分析过程中所提出的一系列基本理论问题和技术问题 (Duckham et al., 2003)。

尽管 GIS 具有强大的空间分析功能,但这些功能主要集中在缓冲区分析、叠置分析、网络分析等。目前 GIS 在空间分析模型方面匮乏,在复杂空间系统建模和模拟时往往显得无能为力。现有的功能已经不能满足当前地理研究和应用的需要。地理学研究的对象——地理空间系统是一个时空动态变化的复杂巨系统, GIS 虽然能较好地解决部分空间分析问题,但它往往只能提供静态的分析工具,对复杂的地理现象难以模拟和解释,较难完整地分析地理对象之间的相互影响。由于 GIS 主要是提供支持建模的计算环境 (Batty, 1996),在过程建模方面具有较大的局限性,因此,地理学需要寻求一种新的理论和技术来开展对地理复杂空间系统的过程研究。

2.2 地理模拟系统的提出及定义

地理空间系统是一个由多要素共同作用的,自然、社会和经济复合的,整体开放的复杂巨系统。许多地理现象都具有非平衡性、多尺度性、不确定性、自相似性、层次性、随机性和交互性等复杂性现象的特征 (Wilson, 1981; 陈述彭, 1998; 钱学森等, 1990)。传统的地理学研究方法和技术手段已经不能有效地解释这些复杂现象,因为传统的地理学理论基本上以线性的静态理论作为根本,关注的只是静态或比较静态的空间均衡问题,这与地理复杂现象是相悖的。此外,传统的地理学研究方法往往从宏观入手,强调地域性及综合性,极少从系统内部微观的层次出发,以一种进化的、涌现的角度来理解地理复杂系统的演化过程,而微观个体的行为可能恰好是造成整个空间系统复杂性的根源。

同时,地理空间系统作为一个时空动态复杂系统,地理现象既包含了在空间上的性质,又包括了时间上的特征。只有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本质规律 (周成虎等, 1999)。但在传统的地理学研究中,往往两者不能兼顾。即强调了地理空间系统的时间内涵,却常常忽视其空间内涵。譬如,系统动力学模型并没有空间上的概念,只是将地理空间系统视为均质实体,研究实体各个属性在时间轴上的协调、反馈等相互作用,它从宏观动态性出发,将时间仅仅作为一个变量纳入到方程中,忽略了时空的不可分割原则,这种模型实质上并不能算作真正的地理模型;另一方面,如果考虑了地理系统的空间内涵,强调地理现象的空间分异和空间结构时,却忽视了地理现象发展的过程研究。譬如古典的“杜能模型”及近代的中心地理论均属于这种模型,该类模型主要考察系统稳定的状况,即静态的空间均衡问题,而不着重研究系统达到这种状态的动态非平衡过程。这种在时间上静态的研究方法成为传统地理学研究的一个主要缺陷。正如乔莱在 1978 年所指出的:只有在地理过程研究的

基础上, 地理学才可能继续做出其特殊的贡献。因此, 需要新的理论与技术来支撑和开展时空地理系统的研究 (周成虎等, 1999)。

20 世纪 60 年代中期提出和发展起来的地理信息系统是现代地理学的一次重要革命, 从而使地理学由定性的描述转向定量的观测和分析。但是, 地理信息系统到目前为止, 也仅仅是能够以数字化方式描述地理实体和地理现象的空间分布关系, 这种描述是静态的, 不能完整地表示地理实体的时态信息和时空关系, 它们在过程分析方面的能力非常弱 (Goodchild, 1992b; Batty, 1993)。当然, GIS 能够用来解决传统地理模型所不能解决的复杂空间分析问题, 譬如: 基于多要素的区位选址能方便地通过 GIS 空间分析来完成, 以寻求最适宜的空间位置。GIS 模型虽然能较好地解决部分空间相关及分析问题, 但对复杂的时空动态变化的地理现象却难以模拟。因此, 如何建立有效的时空动态分析模拟理论及方法是目前地理学亟待解决的一个问题。

越来越多的研究表明, 传统的地理学研究方法在复杂空间系统面前往往显得束手无策, 难以揭示地理复杂现象及事物的演化规律。随着地理学的发展, 对地理空间系统的研究不再仅仅局限于简单和静态的描述, 更应该侧重于地理事物构成或地理现象产生的原因及演化过程。基于前面的分析及讨论, 我们提出地理模拟系统的概念, 以解决当前 GIS 对地理空间系统过程分析能力较弱的问题, 帮助预测地理现象和事物的发展方向及演化过程。

地理模拟系统 (Geographical Simulation Systems, GSS) 是指在计算机软、硬件支持下, 通过自下而上的虚拟模拟实验, 对复杂系统 (例如各种地理现象) 进行模拟、预测、优化和显示的技术。它是探索和分析地理现象的格局形成和演变过程和进行知识发现的有效工具。地理模拟系统试图从微观入手, 探索地理微观空间实体之间相互作用形成宏观地理格局的动态过程。

下面定义地理模拟系统的几个基本概念:

1) 微观空间实体 MSE (Micro-Spatial-Entities): 微观空间实体是地理模拟系统的一个最基本的概念, 也是地理模拟系统的最基本组成单元。传统地理模型的研究单元往往是宏观的区域, 这些区域存在空间可分性, 能通过不同的途径进行地理划分 (Openshaw, 1981; Torrens, 2005)。而在地理模拟系统中, 有些微观空间实体, 如家庭、汽车等却不能再分。微观空间实体对应于现实世界的空间个体或地理对象。它可以分为两类, 一类是可以自由移动的活动空间实体, 如车辆、居民等, 用 ASE (Activated-Spatial-Entities) 表示, 另一类是不可移动的固定空间实体, 如道路、学校、公园等, 用 FSE (Fixed-Spatial-Entities) 表示。微观空间实体可以用以下公式描述

$$\text{MSE} = \begin{cases} x, y, \text{Env}, S, f & \text{if Type} = \text{FSE} \\ x, y, \text{Env}, S, f, M & \text{if Type} = \text{ASE} \end{cases} \quad (2.1)$$

式中, x, y 表示微观实体的空间位置; Type 是微观实体的类型; Env 表示微观实体所处的周边环境; S 代表它目前的状态; f 代表微观实体的转换规则; M 代表活动空间实体的移动规则。

2) 空间关系 (Spatial Relation): 我们认为地理模拟系统的空间关系主要是指微观空间实体的交互作用, 而传统的地理学模型中却缺乏这种交互作用。重力模型就是一个很典型的例子, 地理区域之间只通过牛顿力学这种简单的相互影响产生交互作用, 并且