

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 结合起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>

中国科学院印刷厂印刷

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—3 000 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) 可以寻找到适宜的位置。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 的耦合能获取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出出复杂的全局行为。

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, 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。美国地理学家舍弗尔发表了一篇题为“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——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, 也仅仅是只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

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

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

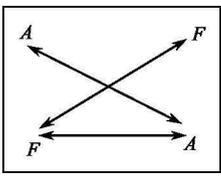


图 2-1 微观空间实体的交互作用类型

主要包括下面三类 (图 2-1):

- 固定空间实体与固定空间实体的交互作用 ($F \leftrightarrow F$)
- 固定空间实体与活动空间实体的交互作用 ($F \leftrightarrow A$)
- 活动空间实体与活动空间实体的交互作用 ($A \leftrightarrow A$)

3) 时间 (Time): 地理系统随着时间的推移而发生动态变化, 在不同的时间尺度上发生不同的地理现象。地理模拟系统处理时间的方法不是连续的, 而是离散的, 计算机也是建立在离散数学基础上的, 这使得地理模拟系统非常利于用计算机来构建模型。

根据前面的几个基本概念, 我们可以定义地理模拟系统的一般形式

$$GSS_{t+1} \sim \{MSE_t, SI_t, N_t\} \quad (2.2)$$

式中, MSE_t 代表 t 时刻地理模拟系统里面的微观空间实体, 由式 (2.1) 所定义; SI_t 代表 t 时刻微观空间实体之间的交互作用, 主要指前面所提及的 $F \leftrightarrow F$ 、 $F \leftrightarrow A$ 及 $A \leftrightarrow A$; N_t 代表 t 时刻微观空间实体的邻域, 不同类型的邻域影响作用是不一样的, 邻域类型包括以下四类:

- 固定空间实体的固定空间实体邻居 (N_{FF})
- 固定空间实体的活动空间实体邻居 (N_{FA})
- 活动空间实体的固定空间实体邻居 (N_{AF})
- 活动空间实体的活动空间实体邻居 (N_{AA})

在地理模拟系统的概念里面, 我们提到了应用复杂系统理论来研究地理空间系统。实际上, 早在 20 年前, 就有学者意识到传统的牛顿力学理论并不适合研究复杂的地理空间系统, 他们也试图用一些复杂性理论来解释地理现象和事物, 比如, Allen、Batty 就多次强调应该将地理空间系统作为一个开放的、复杂的和非均衡的系统看待, 应该用复杂性理论重新审视地理现象及事物的演变过程。但是这些研究都比较分散和凌乱, 尚缺乏从系统的角度出发来进行更一般的分析和论述地理空间系统演化的机制和过程。

地理模拟系统的核心是建立地理模型, 通过模拟实验的手段来对复杂地理现象进行模拟和预测。科学研究有两种最基本的方法: 理论方法和实验方法, 理论方法是从最基本的原理出发, 通过逻辑推理和数学推导, 得出可用于指导实践的规律。传统的地理学研究方法即属于这种方法。实验方法则是通过设计适当的实际系统, 从测量得到的结果中分析规律, 得出结论。实验方法又分两大类, 一种是直接在真实的系统上进行, 另一种是先建立模型, 通过对模型的实验来代替或部分代替对真实系统的实验, 即模拟实验。地理模拟系统正是采用模拟实验中数学模拟的方法, 来探索地理现象的格局、过程和演变, 主要基于以下几个原因:

1) 地理空间系统不可能在真实系统上进行实验, 因为许多地理现象都具有不可逆

的特性，并且，地理空间系统是一个自然-社会-经济相互作用的复合、开放的复杂巨系统，现实世界很难找到完全相同的地理空间系统。

2) 模拟实验过程是一个动态过程，通过数学模拟，可以再现地理现象或地理事物发展的历程，从而可以有效的表达地理空间系统的时间动态性。

3) 计算机技术及 GIS 的发展，使得地理空间系统的模拟实验能够在计算机上得以实现，并且，GIS 能够较好的表达地理系统的空间性，从而实现了地理空间系统的时空统一性及时空动态性。

4) 数学模拟能够对地理空间系统的未来发展进行有效的预测，为现实世界决策提供可靠的依据。譬如，对自然灾害现象的模拟，能够对灾害发生的时间和地点进行预测，达到防患于未然的目的。

5) 通过对实验条件或参数的改变，可以组合不同实验条件下，地理空间系统的发展和变化，分析不同的数学模拟结果，从中选择最优的地理发展模式，从而可以对现实的地理空间系统进行优化或调控。

但是，如何建立合理的模型来表达地理空间系统是一个十分棘手的问题，20 世纪 80 年代出现的复杂系统理论则为地理建模开垦了一片广阔的天地。复杂系统是指规模巨大，组分差异显著、层次多样、开放、组分之间相互作用、子系统或个体具有主动性、能够与外界进行交流、根据经验改变自身的系统。从复杂系统的定义来看，地理空间系统是一种典型的复杂系统，非常适合用复杂系统理论对它进行研究，因此，在地理模拟系统中，我们明确指出需要利用复杂系统理论建立地理模型。多智能体系统 (Multi-Agent Systems) 和元胞自动机是研究复杂系统非常有效的方法。近年来，CA 在对地理学的研究中取得了卓为成效的成果，多智能体系统的方法也逐渐引起了地理学家的重视。但目前的研究还比较凌乱和分散，缺乏系统性和一般性，需要建立一个统一的地理复杂空间系统研究框架，为更好的理解地理现象的演化过程及机制提供有效的分析工具。

2.3 地理模拟系统的发展历史

从广义上来讲，地理模拟系统可追溯到 20 世纪 50 年代末的计量地理学，只是由于受当时计算机技术落后及复杂理论缺乏等方面的限制，面对现实地理空间系统的特殊规模和复杂性，当时的地理模拟仅仅用了统计或其他数学方法，这是地理学首次引入计算科学的理论和方法。1994 年，Openshaw 提出了地理计算 (Geocomputation) 的概念 (Openshaw, 1994)，定义为：“利用不断发展中的高性能计算机和计算方法，为地理复杂问题求解。”1998 年，在“Geocomputation98”的会议公告中，则做出了进一步的定义 (Unwin, 1998; 刘妙龙等, 2000): “地理计算代表了计算科学、地理学、地理信息学、信息科学、数学和统计学的聚合和趋同。”地理计算学的出现与发展，对整个地理学的理论和应用产生了深远的影响，它强调利用计算机技术和计算科学来解决地理学所碰到的复杂性问题，这也为地理模拟系统的出现奠定了基础。但是，地理计算学并不能很好地解决地理空间系统的非线性复杂问题。首先，许多地理复杂问题并不能够通过计算科学或数学求得其解，甚至根本就没有解；其次，地理计算学并没有从复杂系统理论入手研究地理空间系统，这是它的一个缺陷。因为地理空间系统本身就是一个复合、开

放的复杂巨系统，这就决定了必须用复杂系统理论来解决地理复杂问题。

GIS 和遥感数据是地理模拟系统的信息源，面向对象编程思想和方法则为地理模拟系统的计算实现提供了保障。地理复杂系统的模拟实验，要求将客观世界尽可能逼真地映射到模拟系统上，映射过程相当复杂，传统的基于过程的编程技术难以满足要求。面向对象的思想和方法为地理复杂系统的模拟提供了简单有效的途径。面向对象它不应仅仅是一种程序设计技术，更为重要的是一种新的思维方式。面向对象的主要特点是对象与对象及外部的通信，接收消息的响应情况以及类和子类共享的继承性。面向对象把系统看作是由相互作用的对象组成，对象与现实世界中真实的实体相映射，从而提高了模拟模型的可理解性、可扩充性和模块性，并且便于实现模拟与计算机图形及人工智能的结合（薛领，2002）。

1948 年，数学家 Von Neumann 首次提出元胞自动机（CA）的概念，并利用 CA 模拟了系列复杂动态系统，譬如生物繁殖、晶体生长等。CA 是一种时间、空间、状态都离散，（空间上的）相互作用和（时间上的）因果关系皆局部的格网动力学模型。

Wolfram 的研究对 CA 的发展起到了极大的推动作用，他对初等元胞自动机模型进行了详细而深入的研究，他的研究表明，尽管初等元胞自动机非常简单，但能够表现出各种各样的高度复杂的空间形态，并且发现 CA 在自然系统建模方面有许多优点（Wolfram，1984）：

- 1) 在 CA 中，物理和计算过程之间的联系是非常清晰；
- 2) CA 能用比数学方程更为简单的局部规则产生更为复杂的结果；
- 3) 能用计算机对其进行建模，而无精度损失；
- 4) 它能模拟任何可能的自然系统行为；
- 5) CA 不能再约简（Itami，1994）。

元胞自动机是人工生命的重要研究工具和理论方法分支，也是研究复杂系统非常方便和有效的工具。它这种“自下而上”的研究思路，强大的复杂计算功能、固有的并行计算能力、高度动态特征以及具有空间概念等特征，使得它在模拟空间复杂系统的时空演变方面具有很强的能力，在地理学研究中具有天然优势（周成虎，1999）。Tobler 在 20 世纪 70 年代就认识到 CA 在模拟地理复杂现象方面的优势，首次正式采用 CA 来模拟当时美国五大湖区底特律城市的扩展（Tobler，1979）。Couclelis 在 80 年代的研究工作引起了人们对运用 CA 开展地理模拟的极大兴趣（Couclelis，1988）。随后在 90 年代，Batty、Clarke、White、Wu、Li 和 Yeh 等人先后开展了相关的城市 CA 研究（Batty，1994；Clarke，1994，1997；White，1993；Wu，1998；Li et al.，2000），并取得了许多有意义的成果。毫不夸张地说，CA 不仅为地理研究提供了模拟实验方法，也将启发全新的思维和分析方式。CA 应当属于第一个真正的地理模拟系统。CA 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。CA 最基本的思想是由极其简单的运算法则可以发展为异常复杂的模型。因此，从地理空间系统的模拟来看，元胞自动机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模拟系统的新视角与新途径。

20 世纪 90 年代美国圣塔菲研究所（SFI）提出了复杂适应系统理论，这一理论为研究复杂系统问题提供了一种新的视野。复杂适应系统理论提出了具有适应能力的、主

动的个体，可以根据环境的变化改变自己的行为规则，以求生存和发展。多智能体系统（Multi-Agent Systems）就是来源于复杂适应系统理论，是由多个可以相互交互的 Agent 计算单元所组成的系统。Agent 是指在虚拟环境中具有自主能力、可以进行有关决策的实体。Agent 之间可以与其他 Agent 进行交互，这种交互不是简单地交换数据，而是参与某种社会行为，就像我们在每天的生活中发生的那样：合作、协作和协商等。基于多智能体系统（MAS）的整体建模方法是在复杂适应系统（CAS）理论指导下，应用计算机仿真技术来研究复杂系统的一种有效方法。因此，多智能体系统（MAS）建模方法逐渐引起了地理学家的关注，目前国际上已经开展了多智能体系统在复杂空间系统模拟方面的研究。

多智能体在应用在地理研究中，就变为空间多智能体。多智能体系统方法根据微观的个体（Cell）或智能体（Agent）的相互作用来解析宏观空间格局的形成，这与现实地理世界非常接近，体现了复杂空间系统的突变性（Emergence）。智能体根据局部环境条件的不同及变化，采取一定的对策和行动，从而影响和改变自然环境条件，体现了复杂空间系统的进化性（Evolution）。这些特性都是复杂系统的重要特性，因此，多智能体系统方法特别适合于地理复杂系统的模拟。较之地理元胞自动机，地理多智能体系统在研究地理复杂空间系统的人文方面也许更具有优势，是地理模拟系统的重要组成部分。可以预测，在继 20 世纪 90 年代开始引起注意的地理元胞自动机后，具有进化性和适应性的地理多智能体系统将在 21 世纪也会同时成为地理模拟系统的主要工具之一。

2.4 地理模拟系统在地理研究中的重要性

在前面的分析中已经提到，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。基于方程式的传统地理学模型在研究地理空间复杂系统时受到了前所未有的挑战，这是因为基于方程式的模型存在以下几点不足：一是模型的空间尺度多从宏观出发，无法反映地理系统的微观结构特征和个体行为，而这也许恰恰是造成地理复杂系统动态性、自组织性、突变性、进化性等复杂特征的原因；二是运用传统的基于方程式的模型来分析模拟包括自然、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方程式，要么因方程式本身极其复杂难以求解。

此外，传统模型一般都是静态或线性模型，这并不适合于模拟复杂空间系统的演化。这些模型体现不出地理系统的时间动态性，并且难以与空间信息融合。因而经典基于方程式的传统地理学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，所以地理学需要一种新的理论和方法，帮助其开展地理复杂系统的研究。地理模拟系统则为对地理过程的研究提供了非常有用的探索工具。

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。时空动态模型对研究地理系统的复杂性具有非常重要的帮助。地理模拟系统则能够为地理研究提供十分有效的时空数据模型。在许多全球资源、环境和大气模拟和预测模型中，都涉及地理区域发展空间格局演变信息的输入。传统的地理模型由于缺乏时空动态信息，难以满足这些模拟和预测模型对地理空间动态信息的输入。地理模拟系统能够模拟和预测

地理空间系统的格局演变过程，具有较好的时空动态性，从而能够为资源、环境和大气等全球模型提供空间信息的输入。

地理模拟系统在自然资源管理方面有很好的应用前景，可以为自然资源的可持续利用提供决策依据。这是因为多智能体系统“与生俱来”的智能性、适应性、交互性、主动性特别适合模拟各种政策或者个人决策问题。这是地理多智能体系统应用较多的一个研究领域。例如，可运用多智能体系统来理解或者解决“公共池塘”（Common-pool）的资源管理问题。研究的焦点集中于何种政策会直接影响个体的决策行为并由此所导致的整体收益变化问题。L. R. Izquierdo 提出了一个基于多智能体系统的水资源管理模型，这个模型结合经济学博弈论和多智能体系统，探讨了政府制定何种政策才能使水资源的使用达到效益最大化，模型中牵涉到社会经济与各种角色扮演者（政府、水资源使用者等）的相互影响。

地理模拟系统可以模拟非线性复杂系统的突现、混沌、进化等特征，是模拟生态、环境、自然灾害等多种高度复杂的地理现象的有力工具，为现实世界决策提供了可靠的依据。譬如，对自然灾害现象的模拟，能够对灾害发生的时间和地点进行预测，达到防患于未然的目的。

地理模拟系统通过对实验条件或参数的改变，组合不同实验条件下，探索地理空间系统的可能发展和变化方向。并通过分析不同的模拟结果，从中选择最优的资源利用方式，从而可以对现实的地理空间系统进行优化。

地理模拟系统与传统的地理模型比较，则更为形象和直观，与现实世界更为相符。概念模型与现实世界有着直接的联系，客观世界尽可能逼真地映射到模拟系统上。此外，地理模拟系统比传统地理模型更简单，简单的规则能形成复杂的空间格局，体现了复杂系统的精髓。

地理模拟系统与传统的地理模型和社会经济理论模型等耦合，可以产生更为复杂的空间格局，能够模拟出与现实世界更为接近的模拟结果。譬如，城市 CA 和社会经济理论模型结合后，模型的转换规则变得更为复杂。城市 CA 除与传统 CA 的局部规则有关外，还与社会经济因子有关。运用该类复杂模型的一个案例就是在 CA 的转换规则中嵌入社会行为、劳利模型和系统动力学模型。在该类模型中，需要强调市场机制对城市土地利用转变的引导作用。这种复合模型既考虑了地理空间系统宏观驱动因素，又考虑了微观格局演化复杂性的特征，提高了地理模型模拟的可靠程度，为地理研究提供了新的思路。

2.5 地理模拟系统的研究内容与手段

地理模拟系统是地理信息系统的重要补充和扩展。作为具有时空特征的复杂动力学模型，地理模拟系统可以是分析和模拟地理动态现象的一次方法革命。其特别适合模拟具有时空动态变化特征的地理复杂现象及其演化过程。地理模拟系统的研究内容包括以下高度复杂的地理现象：

- 1) 城市系统演变、土地利用变化；
- 2) 城市和土地利用规划；

- 3) 人口迁移、居民点变化、动植物群体动态变化;
- 4) 传染病传播、火灾蔓延;
- 5) 沙漠化、水土流失;
- 6) 环境管理、生态安全;
- 7) 资源的可持续利用;
- 8) 交通控制、紧急事件的疏散;
- 9) 犯罪与公共安全;
- 10) 公共设施动态选址。

传统地理学方法难以解决这些复杂的空间动态问题。目前,地理模拟系统在研究复杂的地理现象方面取得了可喜的成绩,特别是元胞自动机模型(可以称之为第一代地理模拟系统),在城市扩展、土地利用变化、疾病扩散、火灾蔓延、沙漠化、洪水淹没等具有空间自组织性的地理现象方面取得了十分有意义的研究成果。元胞自动机与多智能体系统结合可以称为第二代地理模拟系统。把元胞自动机与多智能体系统结合起来,使其既具有元胞自动机空间自组织性又考虑了多智能体系统各主体的复杂空间决策行为,可为地理复杂空间系统的模拟提供一个全新的思路和方法。由于具有适应性、交互性、主动性,将在人口迁移、交通控制、紧急事件的地理疏散、环境资源管理、生态安全、公共设施动态选址、城市规划及可持续发展等涉及到决策、政策等方面更具有优势。

地理模拟系统的核心是应用复杂系统理论和方法,结合地理学的内在规律,采用适当的研究方法,建立地理空间系统的科学模型。如果只是将复杂的科学概念和名词引入到地理学中,而忽视利用复杂系统研究方法进行地理系统的科学建模工作,那么,复杂性科学的理论和方法只会停留在地理学的表面和外围,而不会触动地理学的核心(周成虎,1999)。因此,地理模拟系统需要结合复杂系统理论和地理学本质规律。在复杂系统理论里面,元胞自动机和多智能体系统是最适合用来研究地理复杂现象的。元胞自动机作为具有时空特征的离散动力学模型,不仅可以用来模拟和分析一般的复杂系统,而且对于具有空间特征的地理复杂系统更加具有优势,Tobler认为元胞自动机本身就是一种地理模型(Tobler,1979)。这是因为元胞自动机是一个天然的时空动力学系统,首先,元胞自动机在时间是一个离散的无限集,它不但能够模拟和预测系统的长期趋势,也能够模拟系统的动态行为过程,这恰恰就是传统地理模型所缺乏的;其次,元胞自动机的元胞空间可以看作是对现实地理空间的离散划分,与GIS里面的栅格数据结构是完全一致的,能够较好的表达地理空间。尽管元胞自动机在模拟复杂空间系统时具有很多优势,但元胞自动机主要是基于地理现象发展的过程和模式进行模拟,而对于地理现象发展的成因缺乏解释。

此外,越来越多的研究表明,地理空间系统作为一个典型的复杂系统,它的动态发展是空间个体相互作用的结果。CA只考虑周围的自然环境,并且这些元胞是不能移动的。CA几乎没有考虑到对地理空间系统变化起决定作用的动态社会环境及空间个体之间的相互作用。而多智能体系统方法则能够克服上述问题,多智能体系统方法根据微观的个体(Cell)或智能体(Agent)的相互作用来解析宏观格局的形成。智能体可以根据局部环境条件的不同及变化,采取一定的对策和行动,从而影响和改变自然环境条件。多智能体系统方法的特点是其具有一定智能的多智能体使得模拟更加具有灵活性,这些

智能体具有一定的目标，例如获得最大的效用（Utility），每个智能体能够对环境变化和其他智能体有反应能力，而后者则包括能移动的各种空间个体，他们的复杂空间决策行为是影响地理空间系统发展和变化最根本的因素。因此，同属于复杂系统理论的元胞自动机和多智能体系统是地理模拟系统研究的主要手段。

地理模拟系统要更好地表达和模拟地理空间系统，还必须与 GIS、遥感、计算科学及计算机技术结合起来。元胞自动机的元胞空间可以看作是二维地理空间，同样，多智能体系统的（Agent）也可以看作是在二维地理空间中移动的个体，都能当作是对现实地理空间的离散化划分。这种划分与遥感影像及地理信息系统的栅格数据结构在形式上是一致的。因此，地理模拟系统可以直接利用现有的遥感数据或栅格空间数据，模拟的结果也可以直接转入到空间数据库进行分析。此外，GIS 强大的图形显示功能能够帮助地理模拟系统把模拟结果很好的展现出来。

地理模拟系统采取的是离散个体模型，计算机也是建立在离散数学基础上的，这使得地理模拟系统非常容易利用计算机来构建模型。计算科学的发展保障了地理模拟系统得以实现。计算科学里面的面向对象思想和方法为地理复杂系统的模拟提供了简单有效的途径。面向对象把系统看作是由相互作用的对象组成，对象与现实世界中真实的实体相影射，提高了模拟模型的可理解性、可扩充性和模块性。

综合以上的分析，可以得出这样一个结论：地理模拟系统是综合地理学、复杂系统理论、地理信息科学、元胞自动机、多智能体系统、地理信息系统、遥感、计算科学及计算机为一体的复杂空间模拟系统（图 2-2），它用于地理复杂系统的研究不仅非常合理，而且还具备其他传统地理模型所不具有的优势。

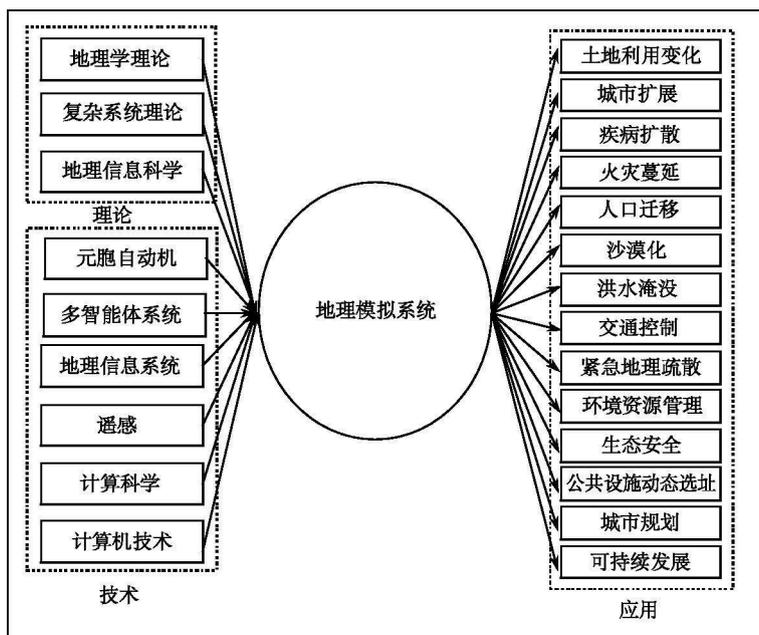


图 2-2 地理模拟系统架构图

2.6 地理模拟系统与 GIS 的关系

第一个地理信息系统——加拿大地理信息系统 (CGIS), 是 20 世纪 60 年代中期 Tomlinson 和他的同事们发展起来的。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。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。GIS 能够比较方便的获取数据。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, 而且更重要的是具有空间分析功能。如: 空间叠置 (Overlay)、缓冲区分析 (Buffer)、网络分析 (Network)、三维分析 (3D Alalysis) 等功能。

GIS 是现代地理学的一次重要革命, 使地理学由定性的描述转向定量的观测和分析。但是, 到目前为止, 地理信息系统仍沉溺于描述和处理静态的空间信息, 难以有效的表达时空动态数据, 更谈不上时空过程的分析能力, 对于动态时空信息的表达和分析显得力不从心。而地理复杂现象, 如土地利用变化、城市发展、疾病扩散、火灾蔓延、人口迁移、环境演变、沙漠化等都表现为复杂的时空动态过程, 这些地理现象的发展过程往往比其最终形成的空间格局更为重要。GIS 现有的空间分析功能受到了挑战, 需要寻求新的理论和方法来解决地理学经常遭遇到的时空动态问题。

目前解决 GIS 环境下缺乏时空分析问题的一个主要方法是将 GIS 和传统的地理模型 (如系统动力学模型、社会物理学模型等) 进行耦合。但是, 传统的地理模型缺乏对时间的表达, 通常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, 忽略了时空不可分割原则。此外, GIS 中对时空的表达都是离散的, 而传统的地理过程模拟模型大都是基于微分方程的连续模型, 因而很难将二者进行有效的耦合。地理模拟系统的及时出现消除了地理学这种尴尬的境况。地理模拟系统是建立于复杂系统理论基础上的, 复杂性科学一般都采用“自下而上”的研究方法, 即微观离散的模拟方法, 如元胞自动机、多智能体系统、神经网络等。复杂性科学认为复杂系统的形成是因为简单个体或元素的相互作用, “复杂来自于简单”是复杂性科学的精髓。这种微观离散的研究方法恰好能与 GIS 相匹配, 因为 GIS 对地理数据的时空表达也是离散的。

因此, 地理模拟系统能够很好地与 GIS 进行耦合, 并且这种耦合能够相互弥补各自的缺陷。一方面, GIS 能够为地理模拟系统提供丰富的空间信息, 并作为其空间数据处理的平台, 及时显示和反馈地理模拟系统在各种情景下的模拟效果。更为重要的是, GIS 还能对模拟结果进行有关空间分析; 另一方面。地理模拟系统则大大弥补了 GIS 较弱的过程模拟能力的不足。所以, 在很大程度上, 地理模拟系统是 GIS 的重要拓展。图 2-3 显示了地理模拟系统与地理信息系统的关系。

2.7 地理模拟系统与多智能体系统的关系

多智能体系统 (Multi-Agent Systems) 是复杂适应系统理论、人工生命以及分布式人工智能技术的融合, 目前已经成为进行复杂系统分析与模拟的重要手段。Agent 是指在虚拟环境中具有自主能力、可以进行有关决策的实体。这些实体可以代表动物、人

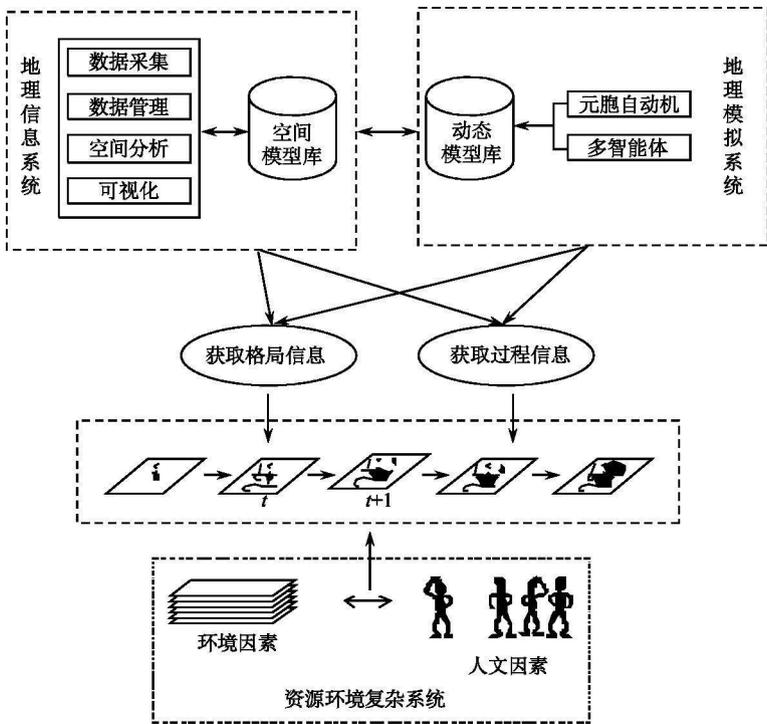


图 2-3 地理信息系统与地理模拟系统

类、机构等。一个实体并不仅仅限于代表某个个体，也可以代表一群个体。每个 Agent 可以与其他 Agent 进行交互，这种交互不是简单地交换数据，而是参与某种社会行为，就像我们在每天的生活中发生的那样：合作、协作和协商等。Agent 具有自主性、交互性、反应性、主动性。基于多智能体 (Agent) 的整体建模方法是在复杂适应系统 (CAS) 理论指导下，应用计算机仿真技术来研究复杂系统的一种有效方法。这是一种从底层自下而上的建模思想，与传统的从上而下的建模思路是完全不同的。

多智能体系统在经济学中得到了的广泛应用，但在地理学上的研究还只是处于初始阶段，非常有限，往往只限于理论上的探讨。这是因为多智能体系统往往缺乏空间信息，难以表达微观个体的空间相互作用，这需要地理模拟系统对其进行补充，从而使其能更好地为地理学研究服务。如果在地理模拟系统中融入多智能体，不但解决了多智能体系统缺乏空间信息的问题，而且也很好的解决了地理学中的人地关系。在基于多智能体的地理模拟系统中，除了自然、技术、经济和社会等客观条件影响地理事物的发展，具有决策能力的人也在影响着地理事物的形成与演变。即各式各样的人群（如决策人、劳动者、消费者等）对地理空间系统感知后，采取相应的决策行为，微观个体的决策行为和相互作用形成宏观的地理格局，并影响和改变周围的地理环境条件。同样，地理环境条件的改变，也影响着微观个体的决策行为，它们之间相互的反馈作用恰恰体现了地理学研究的核心内容——人-地关系。

从以上分析可知，多智能体系统为地理模拟系统提供了对地理现象进行研究的复杂科学方法，地理模拟系统则为多智能体系统赋予了空间概念。

2.8 地理模拟系统与系统动力学的关系

系统动力学 (System Dynamics) 是一门分析和研究反馈系统的学科, 其特点是引入了系统分析的概念, 强调信息的反馈作用, 是系统论、信息论、控制论及决策论的综合产物。系统动力学比较适于研究复杂系统的结构、功能与行为之间的关系, 而且也能够为决策者提供决策支持。因此, 它在社会、经济、生态等复杂系统研究中的应用非常广泛, 能够对实际复杂系统进行动态模拟。

系统动力学在地理学的研究中也具有较为广泛的实用性, 它能比较形象、直观地处理地理学中某些复杂的非线性问题。但是系统动力学缺乏对空间问题的处理能力, 难以刻画地理空间系统中各要素在空间上的相互作用和相互反馈关系 (张新生, 1997), 限制了它在地理学中的应用。此外, 系统动力学在地学建模时, 不同的建模者对地理系统的认识不一样, 造成模型具有个人主观性, 从而会影响模型的模拟结果。

地理模拟系统则弥补了系统动力学在地理学研究中的不足, 它不仅能较好反映地理系统的复杂性, 而且也能有效的表达地理现象的时空动态性。系统动力学和地理模拟系统都是研究复杂系统动态变化的有力工具, 但是, 二者有所区别: 首先, 系统动力学采用“自上而下”的研究思路, 地理模拟系统则采用“自下而上”的研究思路; 其次, 系统动力学模型表现为系列连续的微分方程, 地理模拟系统中的微观空间实体在时间、空间、状态上都表现为离散的, 非常适合计算机模拟; 最后, 系统动力学主要考虑要素指标属性的关联关系, 地理模拟系统则更多的考虑微观空间实体之间的空间相互作用。因此, 系统动力学比较适合社会经济系统的模拟和预测, 而地理模拟系统在研究空间系统的时空动态演化过程方面具有很大的优势。

2.9 地理模拟系统与空间信息网格的关系

空间信息网格 (SIG) 是一种汇集和共享空间信息资源, 进行一体化获取、组织与处理, 具有按需服务能力的空间信息基础设施。本质上, SIG 提供了一体化的空间信息获取、处理与应用服务的技术框架, 以及智能化的空间信息处理平台和基本应用环境。SIG 强调网络环境下空间信息系统的一体化有效应用, 是空间信息系统发展的高级阶段; 以 SIG 为技术总线, 才能系统地谋划空间信息获取、处理与应用体系的构建。

但是, 空间信息网格 (SIG) 目前尚缺乏一种有效的工具实现它的设想。地理模拟系统可以通过提供实验模拟的方法帮助其实现目标。可进一步将 CA 与空间信息网格技术相结合, 探讨多级空间信息网格下的模拟技术及知识挖掘方法。研究空间信息多级网格的划分、网格属性确定等对 CA 模拟结果的影响, 为建立适应于分析我国快速变化的资源环境的空间信息网格提供参考依据。

主要参考文献

- 刘妙龙, 李乔, 罗敏. 2000. 地理计算——数量地理学的新发展. *地球科学进展*, 15 (6): 679~683
- 刘盛佳. 1990. 地理学思想史. 武汉: 华中师范大学出版社
- 钱学森, 于录元, 戴汝为. 1990. 一个新的学科领域——开放的复杂巨系统及其方法论. *自然杂志*, 1: 3~10
- 徐建华. 2002. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社
- 薛颖. 2002. 基于主体 (multi-agent) 的城市空间演化模拟研究, 北京大学博士论文
- 杨开忠, 沈体雁. 1999. 试论地理信息科学. *地理研究*, 18 (3): 260~266
- 杨吾扬, 张超, 徐建华. 1996. 谈谈现代地理学中的数量方法与理论模式 (上). *地域研究与开发*, 15 (1): 4~7
- 张新生. 1997. 中国科学院地理所博士论文: 城市空间动力学模型研究及应用
- 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. 23~26
- Batty M. 1993. *Using Geographical Information Systems in Urban Planning and Policy Making. Geographical Information Systems: Spatial Modeling and Policy Evaluation.* Berlin: Springer-Verlag, 51~69
- Batty M, Longley P. 1996. Analytical GIS: the future. In: Longley P and Batty M. *Spatial Analysis: Modeling in a GIS Environment.* Cambridge: GeoInformation International, 345~352
- Batty M, Xie Y. 1994. From cells to cities. *Environment and Planning B*, 21: 531~548
- Clarke K C, Brass J A, Riggan P J. 1994. A cellular automata model of wildfire propagation and extinction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60: 1355~1367
- Clarke K C, Hoppen S, Gaydos L. 1997. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24: 247~261
- Couclelis H. 1988. Of mice and men; what rodent populations can teach us about complex spatial dynamics. *Environment and Planning A*, 20: 99~109
- Duckham M, Goodchild M F, Worboys M F. 2003. *Foundation of Geographical Information Science.* London: Taylor & Francis, 1~18
- Goodchild M F. 1992a. Geographical information science. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6: 31~47
- Goodchild M F. 1992b. Integrating GIS and spatial data analysis: problems and possibilities. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6 (5): 327~334
- Itami R M. 1994. Simulating spatial dynamics: cellular automata theory. *Landscape and Urban Planning*, 30: 24~47
- Izquierdo L R, Gotts N M. An agent-based model of river basin land use and water management. <http://www.macaulay.ac.uk/fearlus>
- Li X, Yeh A G O. 2000. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14 (2): 131~152
- Openshaw S. 1981. *The Modifiable Areal Unit Problems.* Norwich, GeoBooks
- Openshaw S. 1994. Computational human geography. *Leeds Review*, 37: 201~220
- Schaefer F K. 1953. Exceptionalism in Geography: A Methodological Examination. *Annals, Association of American Geographers*, 43: 226~249
- Tobler W R. 1979. Cellular geography. In: Gale S, Olsson G (Reidel D, Dordrecht). *Philosophy in Geography*, 279~386
- 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
- Torrens P M, Benenson I. 2005. Geographical automata systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 19 (4): 385~412
- Unwin D, Editorial. 1998. Computers, Geoscience and Geocomputation. *Computers and Geosciences*, 24: 297~298
- White R, Engelen G. 1993. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of

urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 25; 1175~1199

Wilson A G. 1981. *Geography and the Environment Systems Analytical Methods*. Chichester; John Wiley & Sons, Ltd.

Wolfram S. 1984. Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 31 (4); 419~424

Wu F. 1998. SimLand; a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. *International Journal of Geographical Information Science*, 12 (1); 63~82

第 3 章 地理模拟系统的空间数据获取

3.1 空间数据采集的一般方法

地理模拟系统的数据主要来自 GIS 的空间数据。对于 GIS 应用来说，最基本的 GIS 数据是根据研究目标的性质不同而收集的，包括野外调查及测量数据、人口普查数据、社会经济调查数据和各种统计资料等，还包括地图（国家行政区划地图），区域的社会、经济等专题图和已有的一些与应用相关的数据资料。这些数据可分为第一手的原始数据和处理过的数据，也可以分为数字化的数据和非数字化的数据（表 3-1）。数据是 GIS 的基础和核心，通常情况下，一个 GIS 项目的资金分配为硬件、软件、数据各占 10%、20%、70%。

表 3-1 GIS 包含的数据

分类	原始数据	转换数据
数字化数据	遥感数字图像、数字化仪器实测数据等	已建的各种数据库、现有的 GIS 数据
非数字化数据	野外文本记录、统计数据报表、社会经济、人口调查报告等	纸制地图、专题图、统计图表

一般需要采集的 GIS 空间数据有以下几种：

- 1) 各类统计调查数据；
- 2) 野外调查测量数据，包括调查记录文本、GPS、全站仪等仪器所测得的数字化数据资料；
- 3) 已有地图（专题图）数字化；
- 4) 遥感数字图像；
- 5) 修改或转换已有数据库资料。

GIS 数据采集工作的主要任务有将现有的地图、外业观测成果、航空像片、遥感图片数据、文本资料等转换成 GIS 可以识别和处理的数字形式；数据添加到数据库之前进行验证、修改、编辑等处理，保证数据在内容和逻辑上的一致性；不同的数据来源需要进行数据转换和处理，便于 GIS 的分析和处理工作的进行，数据转换需要使用到不同的软件、设备和方法，数据处理包括生成拓扑关系、几何纠正、图像镶嵌和裁剪等。

图像数据是 GIS 空间数据的重要组成部分，图像数据的收集实际上就是数字化的过程。一般有扫描数字化和手扶跟踪数字化两种数字化方法。扫描数字化是使用扫描仪直接把图形（地形图、专题图等）和图像（航空像片、卫星像片等）扫描输入到计算机中，以像元信息进行存储表示，然后采用矢量化软件从栅格图像上自动或半自动生成矢量数据；手扶跟踪数字化是使用手扶跟踪数字化仪，将已有图件作为底图，对某些需要的信息进行跟踪数字化。一般来讲，扫描数字化因其输入速度快、不受人为因素的影响

响、操作简单而越来越受到大家的欢迎，且随着计算机硬件的发展，计算机运算速度、存储容量的提高，使得扫描输入已成为图形数据输入的主要方法。

属性数据是记录和描述空间实体对象特征的数据。属性数据一般包括名称、等级、数量、代码等多种形式。属性数据有时单独存储在空间数据库中，形成专门的属性数据文件，有时则直接记录在空间数据文件中。往往需对属性数据进行编码处理，将各种属性数据变为计算机能有效存储和处理的形式。属性数据的编码一般需要基于以下三个原则：编码的系统性和科学性，编码方式必须满足科学的分类方法，以体现该类属性本身的自然性，容易识别和区分；编码的一致性，编码必须前后一致，所定义的专业属于必须是唯一的；编码的标准化和通用性，为便于信息交流和共享，所建立的编码系统必须尽可能的遵循标准方式。

3.2 利用各种 GIS 空间分析方法获取进一步数据

GIS 数据库存储基础的空间数据，在具体的应用中往需要利用各种 GIS 空间分析功能来获取进一步的空间数据。GIS 空间分析的一般方法下面介绍。

(1) 空间查询和检索

用来查询、检索和定位空间对象，包括图形数据的查询和属性数据的查询以及空间关系的查询几种方式，空间查询和检索是 GIS 的基本功能之一，也是进行其他空间分析的基础操作。

(2) 空间量算

空间量算主要是用一些简单的量测值来初步描述复杂的地理实体和地理现象，这些量测值包括点、线、面等空间实体对象的重心、长度、面积、体积、距离和形状等指标。

(3) 空间插值

空间插值用于将离散的测量数据值，按照某种数学关系转换为连续变化的数学曲面，以便与空间实体的实际分布模式进行比较，并可以推求出未知点和未知区域的数据值。

(4) 叠置分析

叠置分析是 GIS 空间分析中重要的分析方法之一。GIS 中使用分层方式来管理数据文件，叠置分析是将同一研究区的多个数据层集合为一个整体，对多个数据层进行交、并、差等逻辑运算，得到不同层空间数据的空间关系。叠置分析又包括矢量数据的叠置分析和栅格数据的叠置分析两种。

(5) 缓冲区分析

缓冲区分析是 GIS 空间分析中使用较多的分析方法之一。缓冲区分析就是对一个、