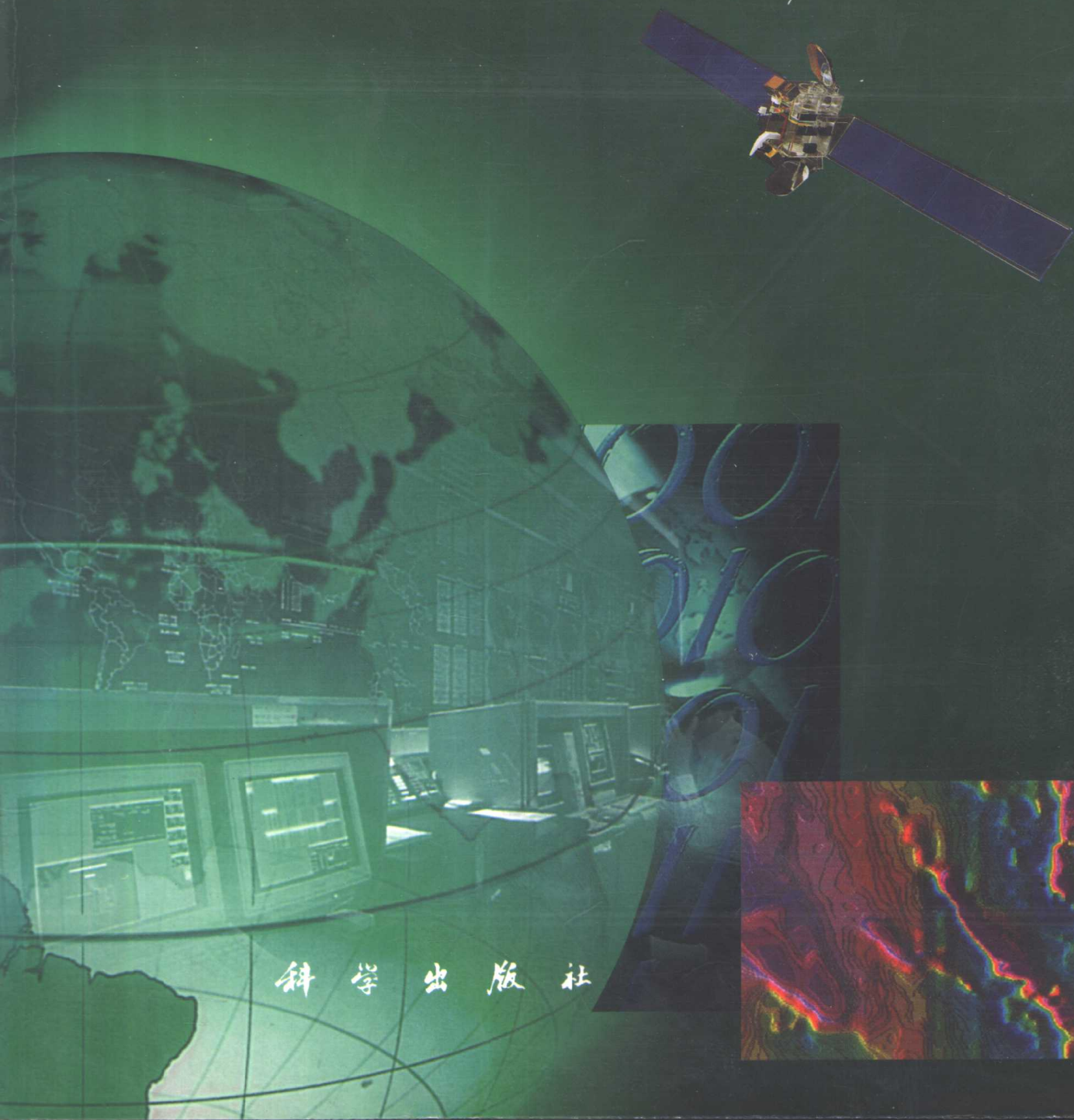


地球信息科学基础丛书

# 地理元胞自动机研究

周成虎 孙战利 谢一春 著



科学出版社

地球信息科学基础丛书

# 地理元胞自动机研究

周成虎 孙战利 谢一春 著

科学出版社

1999

00381

## 内 容 简 介

元胞自动机是一种时空离散的局部动力学模型,是复杂系统研究的一个典型方法,特别适合用于空间复杂系统的时空动态模拟研究。

本书共分五章。前三章对地理空间系统模拟、元胞自动机理论基础和地理元胞自动机模型作了概述,在对CA模型进行较为系统的深入研究基础上,结合地理复杂系统的特征,提出地理元胞自动机(GeoCA)模型框架;第四章以城市为例,基于GeoCA模型框架,构造用于模拟城市土地利用动态发展变化的城市动态演化模型GeoCA-Urban,并采用面向对象的设计和编程方法,开发了相应的GeoCA-Urban软件系统,为城市复杂系统动态变化的探索提供了一个“虚拟实验室(Virtual Laboratory)”;最后一章在GeoCA-Urban系统的支持下,对虚拟城市的动态变化与发展进行了广泛的试验,并配合GIS系统,用GeoCA-Urban系统以实例对有关的城市增长进行了有效的模拟和预测。

本书从理论到应用全面,尤其是在揭示地理复杂系统本质规律的时空构模和地理过程的时空动态模拟和预测方面有独到的见解。可供从事复杂系统理论、时空动态建模、城市信息系统等地球信息科学领域的科研人员、高校教师和研究生参考。

地球信息科学基础丛书

### 地理元胞自动机研究

周成虎 孙战利 谢一春 著

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号  
邮政编码:100717

源海印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1999年12月第一版 开本:787×1092 1/16

1999年12月第一次印刷 印张:10 3/4 插页:8

印数:1-2500 字数:280000

ISBN 7-03-008120-X/P·1201

定 价: 25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

## 序

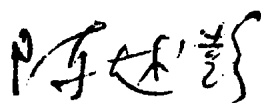
地理信息系统必须要有许多及时更新的数据库组成数据仓库，拥有海量的数据应用于查询和检索；同时还要设计许多地理模型，建成知识库，将这些数据加以咀嚼和消化，提取其中的有效信息，形成创新知识，产生经济价值和社会效益。进入 21 世纪，遥感卫星数据极大丰富，“IKONOS” 遥感卫星和“奋飞号” 载人飞船所获取的地面 1 米高分辨率影像，覆盖了陆地面积的 70%，对地观测台站和社会经济统计也实现了网络化。地理信息系统的应用日益广泛地扩展到国民经济、国防安全的许多领域。当务之急，亟须大力开发通用和专用的地理模型，把数据转化为信息和知识。这是资源与环境信息系统国家重点实验室责无旁贷的知识创新任务。

“地理元胞自动机”(Geo-Cellular Automata)是地理科学的一种具有时空计算特征的动力学模型。或者说是一种时间、空间、状态都离散，空间的相互作用及其时间上的因果关系皆局部的网络模型。这种全新概念的模型，主要用来描述、表达复杂的地理系统，来模拟和预测地理过程。应用于城市化、交通流与火灾等诸多方面，曾在美国底特律市的卫星城 Ann Arbor 所做应用实验，取得了可喜的成功。

周成虎教授、孙战利博士与美国东密歇根大学谢一春教授合作出版的这部专著，是地理信息系统应用基础研究的一项重要的创新成果，也是地理模型设计与开发的重大前沿突破。它为环境虚拟和规划决策开拓了又一条新的途径。我有缘先睹为快，谨此表示最热烈的祝贺。

科学、技术的表达离不开术语，通俗地说，少不了行话。就像文学家笔下的北京俚语一样。北京人听来京腔京韵，备觉亲切；更重要的是入骨三分，一针见血。术语或者“行话”，对于科学同行也是浓缩的语言，言简意赅，一听心里就能明白；而隔行如隔山，旁听者则难免如坠五里雾中，丈二和尚摸不着头脑。特别是像地理信息系统这样的新兴学科，不能不借助于其他学科的词条加以组装，用来表达全新的概念；再加上中文翻译的一词多义，就更增加了读者理解的困

难。例如本书一再提到的“空间”是泛指三维地理坐标系,是从 Spatial 译来的;航天专家别称“太空”,是从 Space 译来的。这部专著所介绍的“元胞”、“自动机”也是借用生命科学和机械工程学的术语。在科学专著中如何采用深入浅出、雅俗共赏的表达方式,促进学科交叉,在再版或今后的著作中我们将进一步努力改进,适当增加一些术语检索和诠释。



1999年12月于北京

# 前 言

科学正处于重大变革的时代，学科之间的相互渗透和融合，正在推动着许多交叉和综合性科学的产生。20世纪60年代建立在一般系统论、信息论和控制论基础上的现代系统科学无疑是20世纪科学界最为亮丽的风景线之一。70年代以来，耗散结构论、协同学、突变论和超循环论等理论又进一步充实和发展了现代系统科学；与此同时，以混沌、分形、孤立子、斑图为核心的非线性科学迅速兴起，在科学界掀起轩然大波；进入80年代，现代系统科学和非线性科学以及计算机人工智能、人工生命、模糊理论等逐渐融合，相互联系，相互支持，于是，一门以复杂系统为研究对象的、具有高度综合性和交叉性的崭新科学——复杂性科学在世纪之末诞生了，并成为当前科学界引人瞩目的前沿领域。

地理系统是一个时空耦合系统，一切地理事实、地理现象、地理过程、地理表现，既包含了在空间上的性质，又包括了时间上的性质。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本质规律。正如乔莱在1978年所指出的：只有在地理过程研究的基础上，地理学才可能继续作出其特殊的贡献。但在日常研究中，常常强调了地理系统的时间内涵而忽视了空间内涵，将地理系统视为均质实体，而研究这个实体各个属性在时间轴上的协调、反馈等相互作用，其中的代表模型是系统动态学模型。由于忽视了空间特征，这种模型在实质上并不能算作地理模型；另一方面，重视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，而忽视了地理现象发展的过程研究，这种静态研究方法是传统地理学研究的一个特征。因此，需要新的理论与技术的支持来开展时空地理系统的研究。

20世纪中叶，哈特向、乔莱、哈维等地理学家将系统科学的理论方法引入地理学研究，创建了系统地理学，以崭新的哲学思维方法和高度现代化的技术系统为支撑的科学体系。陈述彭先生将这一发展形象地比喻为青虫蜕变为蝴蝶，是一种思维的升华或状态的飞跃。当深入探讨和分析地理系统的空间行为及其空间演化时，则发现地理系统具有非平衡性、多尺度性、层次性、不确定性、非线性、突变性、自组织性、自相似性、随机性、有序与无序的交互性等复杂系统的特征，从而启示地理学家去采用复杂系统的理论方法对地理空间复杂系统的动态行为特征进行探索研究。因此，空间复杂系统的研究成为现代地理学研究的前沿领域。

空间复杂系统研究的核心和关键性问题是应用复杂系统的理论方法，结合地理学的本质规律，采用适当的研究方法，建立空间复杂系统的科学模型，尤其是数理模型。如果我们只是将现代系统科学、非线性科学、复杂性科学的有关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，系统地理学的蜕变也就无从谈起。

为此，地理学家们将系统动力学、神经网络、模糊集和模糊推理、分形理论、智能体理论、遗传算法等引入地理学研究之中。其中，具有时空计算特征的动力学模型——元胞自动机（Cellular Automata，简称CA）模型也日益受到广泛重视。

元胞自动机是一种时间、空间、状态都离散, (空间的) 相互作用及 (时间上) 因果关系皆局部的网格动力学模型。它是一个数学、物理学、计算机科学、生物学和系统科学等多学科的交叉和边缘领域, 是复杂系统的重要研究方法之一。元胞自动机产生于 20 世纪 40 年代, 由冯·诺伊曼首先提出。随着人工生命等复杂性科学的发展, 80 年代以来, 元胞自动机日益受到国际学术界的广泛重视, 应用领域又扩及物理学、化学、计算机、生物学、军事学、社会学、医学、地理学等各个领域, 是当前复杂性科学研究中一个相当活跃的前沿领域。

元胞自动机模型“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动态演变方面具有很强的能力。目前, 利用 CA 模型研究地理过程的复杂行为是地理建模研究的一个方兴未艾的领域, 以 M. Batty、K. Clarke 等人为代表的地理学家在这方面作出了许多有益的工作。我国在 CA 模型的研究和应用方面尚处于起步阶段, 需要更多的地学工作者投入必要的关注。

本书的核心就是利用元胞自动机模型, 结合地理系统的复杂性特征, 构建时空动态模型, 来模拟和预测地理过程。首先, 我们在分析地理空间复杂系统特性的基础上, 提出了地理空间复杂系统模拟研究的几个原则, 并以此为指导思想, 在深入研究元胞自动机模型和前人工作的基础上, 构建了基于扩展的元胞自动机的概念模型——地理元胞自动机 (GeoCA)。在这个通用的模型框架基础上, 尝试性地构建了交通流模型 (GeoCA-Traffic)、林火模型 (GeoCA-Fire) 和城市动态演化模型 (GeoCA-Urban)。

城市动态演化模型 GeoCA-Urban 是本书的研究重点。GeoCA-Urban 模型是一个层次性的、宏观与微观相结合、空间模型与社会经济模型相结合的空间动力学模型。在相应的软件系统支持下, GeoCA-Urban 模型可以对高度复杂的城市增长现象进行生动地模拟和预测, 实现了“可计算城市 (Computable City)”的研究环境。它不仅可以对假想的虚拟城市的复杂动态进行仿真模拟, 揭示城市动态扩展的规律, 还可以在地理信息系统的配合下, 对实际的城市发展过程进行有效地模拟和预测, 为城市规划和管理提供有益的参考。最后作为实例研究, 我们利用 GeoCA-Urban 模型对美国底特律市的卫星城 Ann Arbor 的城市动态增长作了成功地模拟和预测。

本书具有很强的综合性和交叉性, 研究领域涉及现代系统科学、非线性科学、复杂性科学等复杂系统的最新理论和方法, 涉及到理论地理学、系统地理学、区域地理学、城市地理学等地理学的基本理论, 以及空间分析与地理信息系统等方法和技术系统。

本书在出版过程中得到了科学出版社的大力支持, 对于责任编辑姚岁寒编审和彭胜潮副编审的辛勤工作, 在此深表谢意。同时参加整理、编辑工作的还有: 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的杜云艳博士、石朗燕小姐、李海进先生, 在此一并致以衷心的感谢。

由于元胞自动机是一个国际前沿的研究领域, 关于 CA 模型在空间复杂系统研究中的应用正处于探索阶段, 加之时间有限, 本书研究的一些方面尚不成熟。仅冀能够“抛砖引玉”, 如此作者将无比欣慰; 倘若引来“板儿砖”——批评, 作者更是欢迎, 且不胜感激!

著者

1999 年 12 月

# 目 录

<b>第一章 地理空间系统模拟</b> .....	(1)
1.1 地理空间系统及其复杂性 .....	(1)
1.1.1 地理空间系统 .....	(1)
1.1.2 地理空间系统的复杂性 .....	(2)
1.2 复杂系统研究理论和方法 .....	(6)
1.2.1 复杂系统和复杂性科学 .....	(6)
1.2.2 复杂系统理论 .....	(14)
1.3 地理空间系统模拟.....	(17)
1.3.1 地理空间分析的基本方法 .....	(17)
1.3.2 地理空间系统动力学模型 .....	(21)
参考文献 .....	(24)
<b>第二章 元胞自动机理论基础</b> .....	(26)
2.1 自动机.....	(26)
2.2 元胞自动机.....	(27)
2.2.1 典型的元胞自动机 .....	(27)
2.2.2 元胞自动机的定义与特征 .....	(33)
2.2.3 元胞自动机的构成 .....	(34)
2.2.4 元胞自动机的一般特征 .....	(38)
2.2.5 元胞自动机的分类 .....	(39)
2.3 元胞自动机研究的相关理论方法.....	(42)
2.4 元胞自动机的应用.....	(49)
参考文献 .....	(50)
<b>第三章 地理元胞自动机概念模型</b> .....	(52)
3.1 CA 模型在地理学中的应用研究概述 .....	(52)
3.1.1 CA 模型在地理学中应用的进展.....	(52)
3.1.2 CA 模型在地理学研究中的可应用性 .....	(55)
3.1.3 CA 模型在地理学研究中应用的局限性 .....	(57)
3.2 地理元胞自动机 (GeoCA) 模型 .....	(59)
3.2.1 扩展的 CA 模型: GeoCA .....	(59)
3.2.2 GeoCA 与地理信息系统的集成 .....	(64)
3.3 专题模型一: 交通流模型 (GeoCA-Traffic) .....	(67)
3.3.1 一维基本模型 .....	(68)
3.3.2 一维扩展模型 .....	(69)
3.3.3 二维交通模型 .....	(70)
3.4 专题模型二: 林火模型 (GeoCA-Fire) .....	(70)
3.4.1 GeoCA-Fire 的基本模型 .....	(71)



3.4.2 GeoCA-Fire 的扩展模型 .....	(72)
参考文献 .....	(74)
<b>第四章 城市动态演化模拟的 CA 模型 .....</b>	<b>(78)</b>
4.1 城市化及城市模型研究 .....	(78)
4.1.1 城市及城市化 .....	(79)
4.1.2 城市模型研究的发展 .....	(79)
4.2 GeoCA-Urban 模型概述 .....	(82)
4.2.1 模型的动力学机制 .....	(82)
4.2.2 构模方法论 .....	(83)
4.2.3 模型结构 .....	(84)
4.2.4 模型特征 .....	(85)
4.2.5 GeoCA-Urban 模型表述 .....	(87)
4.3 土地利用类 .....	(87)
4.3.1 居民地、工业、商业单元的行为规则 .....	(88)
4.3.2 交通类 .....	(99)
4.3.3 土地利用层与交通层的叠加 .....	(102)
4.3.4 GeoCA-Urban 的总体分析 .....	(102)
4.4 GeoCA-Urban 软件系统 .....	(104)
4.4.1 GeoCA-Urban 软件系统的设计 .....	(105)
4.4.2 系统功能 .....	(106)
4.4.3 系统界面 .....	(116)
参考文献 .....	(118)
<b>第五章 城市增长动态模拟与虚拟城市探索 .....</b>	<b>(121)</b>
5.1 城市增长动态模拟的原则与方案 .....	(121)
5.1.1 城市增长模拟的指导原则 .....	(121)
5.1.2 动态模拟的方法框架 .....	(123)
5.2 试验区概况 .....	(123)
5.2.1 Ann Arbor 地理概要 .....	(123)
5.2.2 Ann Arbor 发展特征 .....	(124)
5.3 Ann Arbor 城市增长的动态模拟与预测 .....	(127)
5.3.1 数据准备 .....	(127)
5.3.2 模型构建 .....	(130)
5.3.3 模型运行与结果 .....	(133)
5.3.4 结果分析 .....	(134)
5.4 虚拟城市的探索 .....	(135)
5.4.1 虚拟城市的概念 .....	(135)
5.4.2 虚拟城市的模拟试验 .....	(136)
5.4.3 模拟结果的讨论 .....	(160)
5.5 小结 .....	(162)
参考文献 .....	(163)
附录：彩色图版	

# 第一章 地理空间系统模拟

地理空间系统是地理学研究的基本对象，是一自然-社会-经济因素相互作用的复合系统，同时，地理系统的开放性、非线性等特征决定了复杂性是其本质属性。因此，应用复杂系统的理论方法，研究和分析地理系统的复杂动态行为具有时代的必然性，是当前地理学研究的前沿课题。

## 1.1 地理空间系统及其复杂性

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，它又由一系列层次化的复杂子系统相互作用、相互联系构成的。这些地理现象的非平衡性、多尺度性、层次性、不确定性、非线性、突变性、自组织性、自相似性、随机性、有序与无序的交互性等特点决定了地理空间系统是一个复杂性问题(左大康,1990; 陈述彭, 1998; Wilson, A.G, 1997)。在本节中，我们集中对地理空间系统的复杂性进行深入的探讨。

### 1.1.1 地理空间系统

#### 1. 地理空间及其特征

空间的概念在不同的学科有着不同的解释。从物理学的角度看，空间就是指宇宙在三个相互垂直的方向上所具有的广延性。从天文学的角度看，空间就是指时空连续统的一部分。而地理学中的地理空间是指物质、能量、信息的存在形式在形态、结构过程、功能关系上的分布方式和格局及其在时间上的延续。地理空间涵盖上至大气电离层、下至地幔莫霍面的范围，是行星地球上大气圈、水圈、生物圈、岩石圈和土壤圈交互作用的区域，地球上最复杂的物理过程、化学过程、生物过程和生物地球化学过程就发生在地理空间中。

地理空间可被定义为绝对空间和相对空间两种形式。绝对空间是具有属性描述的空间位置的集合，它由一系列不同位置的空间坐标值组成；相对空间是具有空间属性特征的实体的集合，它是由不同实体之间的空间关系构成。

地理空间特征包括：整体性、层次性、差异性和可变性。整体性是指地理空间内部各组成部分之间的内在联系，这些内在联系之间相互渗透、融合，从而形成了一个不可分割的统一整体。层次性是指地理空间是有等级差别的，地球表层任何区域上的某一地理空间都可与同等级的其他若干区域上的地理空间一起组成更高级的地理空间，而每个地理空间又都可以进一步划分出低一级的地理空间。差异性是指在同等级地理空间之间存在这差异。可变性是指地理空间边界的模糊性、空间内部组成成分随划分方案的变化以及各组成成分相关指标数值随时间的变化。由此看见，地理空间具有复杂性。

## 2. 地理空间系统

地理空间系统 (Geo-Spatial System) 是地理学研究的基本对象, 通常被简称为地理系统 (Geographic System)。地理系统又是广义空间系统的一种, 特指位于地球表层“人-地”相互作用的界面, 空间范围上至对流层的上层, 下至岩石圈上部, 因此, 钱学森先生又称之为地球表层系统。地理系统具有层次性结构, 在不同空间尺度上有不同规模的地理系统。在一定的空间尺度上, 在特定地理边界约束下, 一组在空间上展布、具有地域特征、结构有序和功能互补的要素在空间上相互作用形成的一个空间集合, 实际上就是一个地理系统的子集, 通常也被称为地理系统。地理学研究中的区域系统、城市系统就是典型的地理系统。

地理系统具有复合系统结构, 一个完整的地理系统包含了非生物、生物和人三个部分, 以及相应的各种不同地理要素。这些要素自身之间或与其周围环境之间, 不断进行物质、能量和信息的交换和传输, 且以“流”的形式 (如物质流、能量流、信息流、人口流、货币流、经济流等) 贯穿其间, 既维持系统与环境的联系, 又维持系统内部各要素的关系, 形成一个动态的、成等级的、有层次的、可实行反馈的开放系统。因此可以说, 地理系统是一个“自然-社会-经济”的复合体系, 由自然子系统、社会子系统、经济子系统之间的联系与藕合, 共同构成的复杂系统 (左大康, 1990)。

### 1.1.2 地理空间系统的复杂性

#### 1. 地理系统的综合性、层次性和高维性

地理系统是自然要素、社会要素和经济要素共同作用的综合体, 自然要素按自然规律运动, 社会要素按社会规律运动, 经济要素按经济规律运动。但作为地理系统的子系统, 自然、社会和经济系统又都是开放的系统, 它们存在于同一地域, 互相进行物质、能量、信息地交换, 相互作用, 共同形成自我调节、自我进化的地理系统整体, 保持自身动态稳定。因此, 地理系统是一个整体, 决非自然、社会和经济子系统的简单叠加, 而是三者相互联系, 共同作用形成的整体, 地理系统的运动规律既涉及自然要素, 又要涉及社会经济要素, 具有鲜明的整体性和综合性 (见图 1-1)。

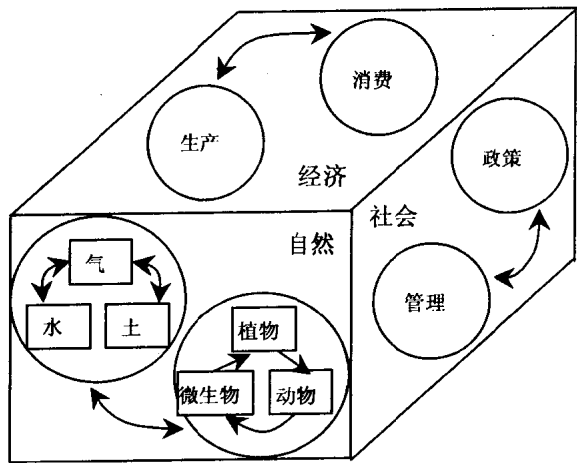


图 1-1 复杂的地理系统图示

地理系统是由一系列的子系统以及子系统的子系统所构成的层次性系统。一方面, 依照要素的分类, 我们可以得到自然、社会、经济子系统, 进而得到自然子系统的气候、地形地貌、土壤、植被等自然孙系统, 社

会子系统的人口、政策、福利、治安等社会子系统，经济子系统的交通、化工、机械、电子、纺织等经济子系统……从而形成层次性的地理系统；另一方面，从空间地域的划分出发，我们可以得到从整个地球表层到国家、大的区域系统，一直到更小的生态系统单元等一系列等级性系统。比耳(S. Beer)的空间分辨率等级圆锥直观形象地描述了地理系统在空间分辨率上的等级性。各个子系统都是一个开放的系统，内部进行着物质、能量和信息的交流，同时参与高层次系统的外部循环。

地理系统的综合性和层次性决定了地理系统运动所涉及要素的多样性，众多的系统要素又决定了地理系统是一个多变量的动力学系统。在动力学方程中，系统变量的多少决定了系统的维数，因此，多变量的地理系统具有高维性。一个具有多于三个系统变量的非线性动力学系统就表现出分岔、突变、混沌等复杂行为，更何况具有几十、甚至是成百上千个变量的地理系统呢？因此，地理系统的高维性或称多维性也决定了地理系统运动的复杂性。

## 2. 地理系统的多尺度性与自相似性

地理系统的多尺度性包括时间的多尺度，空间的多尺度性。一方面，地理系统具有很大的时空跨度，从空间上，地理系统可以大到整个地球表层，小到一个居民小区；从时间上讲，地理系统的演化运动有可能是几万年甚至是几十万年。例如，地表的地质运动；可能是几十年、几年或几个月；城市的增长变化；也可能是几个小时或几分几秒；交通流的变化。另一方面，地理系统内部的元素和子系统往往具有时空尺度的差异性，如城市系统中的自然、社会和经济各要素具有明显不同的时空尺度。地理系统的多时空尺度性使得空间模型的时空比例尺选取上的困难，在客观上造成了地理系统的复杂性。

地理系统中充满了支离破碎、没有规则的地理现象及对其不可积分的非线性过程，这些过程在空间上、时间上或在相空间上常常表现出自相似性。尽管这种自相似性，往往是近似的或是统计意义上，然而它又是确实确实存在的。传统的欧氏几何对于这种复杂的地理现象的描述无能为力，而基于地理系统自相似性的分形分维研究为地理系统的分析和描述提供了一个全新的探索工具，分形几何被誉为“第四代地理学语言”而日益受到地理学家的关注。

## 3. 地理系统的开放性与非平衡性

地理系统首先是一个开放系统，它与外界环境不断发生着物质、能量、信息等方面的交换，这是地理系统复杂性的基本条件。地球是一个开放系统，它体现在地球接受太阳和恒星的光或电磁能量辐射，同时地球通过大气层的顶端向宇宙冷区辐射热量，有时，地球还会迎来自宇宙中的“不速之客”——陨石和流星，因此地球处在一个开放的环境中。地理学中的区域系统，如城市系统则更是一个典型的开放系统。耗散系统论的创始人普利高津就曾经以城市为例来阐述开放系统，它的同事英国教授 Peter Allen 则系统地从事耗散系统论的角度对城市和区域作了深入地探讨(Allen, P. M., 1996, 1997)。城市通过汽车、轮船、火车以及飞机等交通方式与外界进行物质、人员的交流；通过输电网等成为电力网络系统的一个节点与外界进行能量的交环；通过电信网、卫星通讯、微波通讯等与外界保持着密切的信息交流；城市同时还处于一个经济体系中，与外界时时刻刻进行着资金方面的交流；城市几乎天天在接受着阳光或者雨雪等各种天气现象带来的能量和物质；城市散发的热气、

废气又飘散到空中；在地下，城市还有可能接受来自地层中的“不友好”能量——地震，当然，也有可能是友好的地热……城市是一个全方位的开放系统，它与外界环境存在着物质、能量、信息、资金以及人员等各方面的交流。城市的结构组织和运动都受到外界的巨大影响，因此，在城市的研究中，切不可忽视外界因素的影响，而把城市视为一个封闭系统。

地理系统的开放性是地理系统复杂性的必要和基础条件。由于系统的开放性，我们很多时候不能用牛顿力学的分析方法来分析地理系统的运动规律，企图用机械论的方法去认识它们，是注定要失败的，我们必须采用开放系统的理论，即耗散结构论等复杂系统理论去深入分析；系统的开放性必然造成影响系统运动的因素的增加，系统运动变量的增加也客观上形成了系统的复杂性；任何封闭的系统必将走向无序平衡态，而地理系统是一个开放系统，这使得地理系统必然处于一个非平衡状态下，这是地理系统动态性和自组织性的必要条件。总之，地理系统的开放性是地理系统的固有特征，又是形成空间复杂性的基本条件。

地理系统的非平衡性体现在自然、社会、经济等方面在时间和空间上的不均匀性，因此，非平衡性又可理解为差异性。地理系统的这种差异性系统是不断运动的动力，任何平衡态的系统将失去做功的能力，而变成一个静态的“死”系统，因此，非平衡性与系统的动态性在一定程度上是等价的。地理系统的非平衡性是普遍的，且是永远存在的，因此地理系统的稳定性是暂时的，不稳定性是永远的。地理系统不仅与环境之间存在差异，更重要的是系统内部也存在非平衡性。以城市为例，城市与其周围农村在经济上的差异性造成了我国城乡人口的大流动——民工潮；在城市结构内部，由于交通通达能力等条件的不同，进一步形成了工商业及人口密度的不平衡，在空间上形成一种有序结构，例如北京市形成了以三环路、京通路、京昌路等交通干线为轴线的几个大的居民新区，三环路和四环路上分

布了北京市大多数大型家具商场，形成了环带状结构，中关村形成了以清华大学、北京大学、中国科学院为核心的高科技产业园区。从耗散系统结构的理论讲，地理系统是一个开放的远离平衡态的耗散系统，耗散系统具有自组织能力而不断地形成非平衡有序结构——耗散结构。当然，在远离平衡态下，没有非线性的相互作用，同样无法形成耗散结构，非线性是耗散结构形成的前提条件。

#### 4. 地理系统的非线性与突变性

非线性是地理系统的核心特征，也是造成地理系统复杂性的根本原因。地理系统是一个典型的复杂非线性动力学系统，地理系统中各个要素或子系统中存在着非线性的相互作用，它们之间的函数关系大多是非线性的。例如，城市人口的增加会影响城市的扩展，然



图 1-2 城市是一个复杂的开放系统

而,人口变化与城市市区面积的变化之间的关系是非线性的;城市经济增长率与城市就业率是相关的,但其间的关系也是非线性的;交通通达性与地价的关系也不是线性的;车辆的数目与道路的长度之间的关系也并不是线性的;降雨量与雨伞的销售量同样也不是线性的;人类的工业、农业活动与大气中 $\text{CO}_2$ 的含量关系是非线性的,大气中 $\text{CO}_2$ 的含量与全球温度的变化也不是线性的……。总之,地理系统的非线性是普遍存在的,非线性一方面使远离平衡态的系统形成有序结构,同时,非线性的作用也使得系统的演化具有多样性和不确定性,非线性特征决定了地理系统是一个复杂系统。

虽然,对于一个特定的地理系统,我们往往无法,确定它的运动方程,甚至系统方程中应包含哪些变量都难以确定,但是,我们仍不能否认地理系统是一个多变量的非线性动力学系统。在这个复杂的动力系统中,某个变量的微变均有可能导致整个系统的剧变。自然界中,地震、火山、滑坡、泥石流、厄尔尼诺气候;在社会运动中,政权的更迭;在经济运动中,经济危机、股市的暴涨暴跌等都是典型的突变,而在自然-社会-经济复合的地理系统中,其突变特征往往更为复杂。例如,本世纪美国著名的汽车工业城市底特律的兴衰就是地理系统突变的一个典型。在二战后美国总统艾森豪威尔大力修建高速公路,大大推动了汽车工业的发展,底特律借助汽车产业的发展而迅速增长,大量的资金、科技涌进该地区,而其中大量黑人劳动力的涌入,在客观上促进了汽车工业的发展,因此该地区得到突飞猛进的发展,成为世界城市发展的一个奇迹;然而,进入80年代,随着黑人居民的不断增多,社会治安等条件逐渐恶化,到80年代末,大量居民开始外迁,资金抽空,底特律市又迅速地衰落。在不到50年中,底特律经历了大起大落,成为地理学家研究地理系统运动突变性的典型区域。

### 5. 地理系统的有序性和自组织性

地理系统的自组织特性是建立在地理系统的开放性、非平衡性和非线性的基础上的,是一个开放的非线性耗散系统所具有的基本特征。自地球产生以来,地理系统在不停地演化,不停地形成着秩序,而不像热力学第二定律所说的最终归于无序,这充分证明了地理系统是一个远离平衡态,存在非线性相互作用的开放系统——耗散系统,这种有序就是其自组织性的表现。自组织性是耗散结构所特有的非平衡有序,一种宏观的尺度上的关联协同。然而,并非所有的有序都是自组织造成的,一方面封闭系统在平衡态时有可能形成平衡有序,如冰的晶体结构。另一方面,由于法规政策等人为所导致的强制性有序,如我国在解放后进行的三线建设,形成重工业的产业分布就是一种强制有序。以上两种有序性都不是系统自组织造成的。但在自然界和目前实行“开放搞活”的市场经济下,地理系统中的有序性大多是系统自组织所造成的。例如,地球上氨基酸等大分子在原始场中自组织成为有机体,进而产生生命;土壤、植被在空间平面和海拔高程上都存在地带性;人类聚集产生的部落、村庄乃至城市,城市中又形成不同的产业园区都是典型的自组织行为。解释和分析自组织性就需要用耗散结构论和协同学来分析,地理系统的有序度可以用地理熵的概念来度量、分析和描述。另外,地理系统不仅在空间上表现出有序性,而且在时间上也表现出周期性、节律性等时间有序性。地理系统的有序性,同时也说明了地理系统有其固有的规律性。

总之,上述地理系统的特征相互联系、相互支持,从不同侧面说明了地理系统的复杂性,可以说,复杂性是地理系统的本质属性。

空间系统的复杂性特征决定了空间系统的研究必须采用复杂系统的理论方法,空间系统复杂性的研究是地理学面临的迫切课题。可以说,基于现代系统科学的思想,在复杂性科学的理论框架下,应用非线性理论和方法来描述、分析、模拟和预测空间系统的复杂动态行为,并构建新一代的高级分析模型将是本世纪地理学研究的第三次革命。

而空间系统的复杂性研究的核心和关键性问题是应用复杂系统的理论方法,建立空间复杂系统的科学模型,尤其是数理模型。如果我们只是将现代系统科学、非线性科学、复杂性科学的有关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,系统地理学的蜕变也就无从谈起。因此,结合地理学的本质规律,采用复杂系统的研究方法,建立空间复杂系统的科学模型是空间复杂性研究的关键。为此,我们必须对复杂系统的理论和方法进行必要的讨论。

## 1.2 复杂系统研究理论和方法

### 1.2.1 复杂系统和复杂性科学

#### 1. 复杂系统

什么是复杂系统?从直观意义上讲,具有复杂性的系统,就是复杂系统;复杂系统不是简单系统。然而问题远未得到回答,让我们试着回答一下如下问题:

为什么苏联对东欧的统治会在1989年的几个月内轰然坍塌?为什么冷战结束,世界反倒硝烟四起?为何中美关系能够长期维持既对抗又对立的局面?

人类是如何组织产生人类社会的?飞鸟是如何聚集成群的?蚂蚁是如何形成王国的?

为什么股票市场会在1987年10月的一个星期一这一天狂跌五百多个百分点?为什么在1998年爆发了亚洲经济风暴,进而导致全球经济波动?

生命是什么?难道生命无非是一种特殊而复杂的碳水化合物?计算机病毒具有生命吗?生命是如何起源的?如果不是上帝的话,哪原始的液态氨基酸和其他简单分子式如何在40亿年前转化为最初的活细胞的?

大脑是什么?感情、思想、目的和意识这样不可言喻的特征是如何产生的?眼睛这样复杂精妙的结构是单纯的随机进化和自然选择的结果吗?

这些问题只有唯一一个共同点,那就是,它们都有一个共同的答案:“无人知晓”,至少是一切常规科学所无法解释的。它们也许看上去甚至不是什么科学问题,然而这些系统都属于一个系统,即复杂系统(Waldrop, M., 1997)。

首先,复杂系统是相对牛顿时代以来构成科学事业焦点的简单系统相比而言的,两者具有根本性的不同。简单系统通常或者是少量的个体对象,它们之间的相互作用比较弱;或者是封闭的气体或遥远的星系,其中包含的对象数目是如此之大,以至于我们可以采用,似乎也只能采用统计平均方法来研究它们的行为。正如我们在后面讨论复杂性问题时提到的那样,复杂并不一定与系统的规模成正比,复杂系统要有一定规模,但也不是越大越复杂。也就是说,我们所研究的复杂系统往往具有中等数目的元素(或叫主体):组织中的细胞、

股市中的股民、城市交通系统中的司机、生态系统中的动植物……。

不仅如此，在复杂系统中主体通常具有一定的智能性与自适应性，即它们可以按照各种规则作出决策，随时准备根据接收到的新信息修改自身的行为规则。在这些复杂系统中，主体往往知道其周围一部分主体的行为，但无法知道系统中全部主体的行为，因此复杂系统的主体根据局部信息而非全局信息作出决策并修改其行为规则。

根据以上的描述，我们可以得到复杂性科学中对复杂系统的描述性定义：复杂系统是具有中等数目基于局部信息作出行动的智能性、自适应性主体的系统。

由以上定义，我们可以看到复杂系统有以下几个核心的特点：

(1) 中等大小数目的主体：通俗地讲，就是“元素不能少，也不能太多”，这是一个复杂系统所必备的一个基本组织条件。其实，这个思想最早源于信息论创始人之一 W. Weaver 在 1958 年，总结自然科学在 25 年内的进展中，作出的对自然系统的分类 (Weaver, W., 1958)。这是一个基于系统自身机构复杂性的状况所作出的分类。其分类的基本思路，可以由图 1-3 来说明。

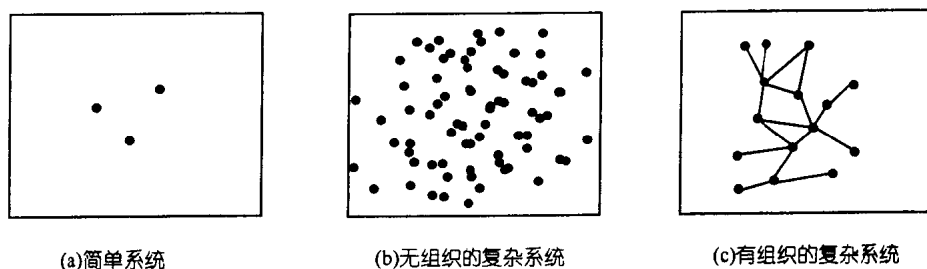


图 1-3 韦佛基于复杂性的系统分类

(a) 简单系统：特点是元素数目很少，因此，可用相应较少的变量数来描述，因此复杂度不会太大。这种简单系统大都可以用牛顿力学去加以解析。

(b) 无组织的“复杂系统”：其特征是元素和变量很多，但其间的耦合是微弱的，或随机的，即只能用统计的方法去分析。这些系统大多可以用热力学中的熵以及量子力学等统计方法去分析计算。在复杂性科学中，这种“复杂系统”同样被认为是简单系统的一种形式。

(c) 有组织的复杂系统：其特征是系统的元素数目很多，且元素间存在着强烈的耦合作用，使得系统具有高度的组织性 (Wilson, A. G., 1997; 牛文元, 1987)。

复杂性科学继承并发展了这一分类，认为简单系统以及无组织的“复杂系统”都是简单系统的不同形式。而对于元素数目多，藕荷强烈的有组织的复杂系统，如果元素数目太多，必然致使元素其间的耦合“失去”个性，无法利用现有的数学方法和计算机工具来一一描述和计算，从而只能用统计方法去研究，成为一种简单系统。因此，复杂性科学的研究表明，数目多并不是复杂，只有一个具有中等数目大小的系统才是一个有趣的系统，也才是一个复杂的系统。

(2) 智能性和自适应性：这意味着系统内的元素或主体的行为遵循一定的规则，根据“环境”和接受信息来调整自身的状态和行为，并且主体通常有能力来根据各种信息调整规则，产生以前从未有过的新规则。通过系统主体的相对低等的智能行为，系统在整体上显



现出更高层次、更加复杂、更加协调智能的有序性。这是对系统科学中层次性、反馈、突现、自组织、目的性等概念的进一步发展。最新发展的神经网络、遗传算法、进化计算、元胞自动机等人工智能、人工生命理论是对这一特征有力地支持。

(3) 局部信息, 没有中央控制: 在复杂系统中, 没有哪个主体能够知道其他所有主体的状态和行为, 每个主体只可以从主体集合的一个相对较小的子集中获取信息, 处理“局部信息”, 作出相应的决策。系统的整体行为, 出自于这些主体间的竞争、协作等局部的相互作用。这是复杂性研究中的一个非常重要的理论, 许多生态学、动物群体学的研究证实了这一理论。最新研究表明, 在一个蚂蚁王国中, 每一个蚂蚁并不是根据“国王”的命令来统一行动, 而是根据周围同伴的行为以及环境调整自身行为, 而实现一个有机的群体行为。另外, 迁移中的大雁群, 湖泊中游弋的鸭群等所表现的有趣的排列, 也并非出自于首领的信号和命令, 而是动物个体根据邻居个体的行为作出适当行为调整所导致的群体行为。

以上是复杂系统的几个主要特点, 除此之外, 系统突现性、不稳性、非线性、不确定性、不可预测性等特征都是复杂系统的特征。在这些特征的共同作用下, 复杂系统常常表现为一种违反直觉的有趣系统。虽然我们可以列举一大堆复杂系统的特点, 但关于什么是复杂系统, 目前有各式各样的说法, 并无统一的、公认的科学定义, 上面我们给出的定义代表了圣塔菲学派的观点。同时, 钱学森、戴汝为等人对此也进行了探讨(钱学森, 1990)。

基于以上对复杂系统的分析, 我们可以得到复杂性科学的大体概念。复杂性科学就是要研究这些复杂系统的复杂行为和特征, 就是要试图回答哪些“无人知晓”的问题。简言之, 复杂性科学就是要研究复杂系统中的共性问题——复杂性的问题。复杂性科学是建立在系统科学的基础上的, 是对系统科学的发展和深化。而非线性科学中的许多理论方法是研究复杂性问题的有力工具, 复杂性科学是对非线性科学的凝聚和升华。

复杂性科学将一些风马牛不相及的问题统统归到它的研究范围内, 研究对象涉及政治、社会经济、科学、军事等各个领域, 遍布我们日常生活的每个角落, 但它并不具体地研究各个领域。下面我们将就复杂性科学中的核心概念——复杂性和复杂性科学的重要组成——人工生命进行讨论。

## 2. 复杂性

简单性和复杂性是复杂性科学的研究的基础, 因此, 简单性和复杂性的讨论也一直是复杂性科学首先面对的一个重要课题。

### 1) 复杂性的概念和度量

什么是简单性和复杂性呢? 如何度量一个系统的复杂程度, 即有没有一个物理量来标定系统的复杂程度? 我们何以说人类是这个地球上纷繁复杂的生态系统中最为复杂的生物? 在形式上相当简单的爱因斯坦广义相对论引力理论揭示了宇宙的物质运动规律, 它对于我们当中的大多数人来讲, 是如此抽象, “高深莫测”, 再复杂不过了, 那么这个规律是简单的, 还是复杂的? 另外, 我们又何以说地理现象, 如城市的扩展是高度复杂的呢? 要回答这些问题显然不是一个“简单”的问题, 而这恰恰是复杂性科学(Complexity Sciences)的