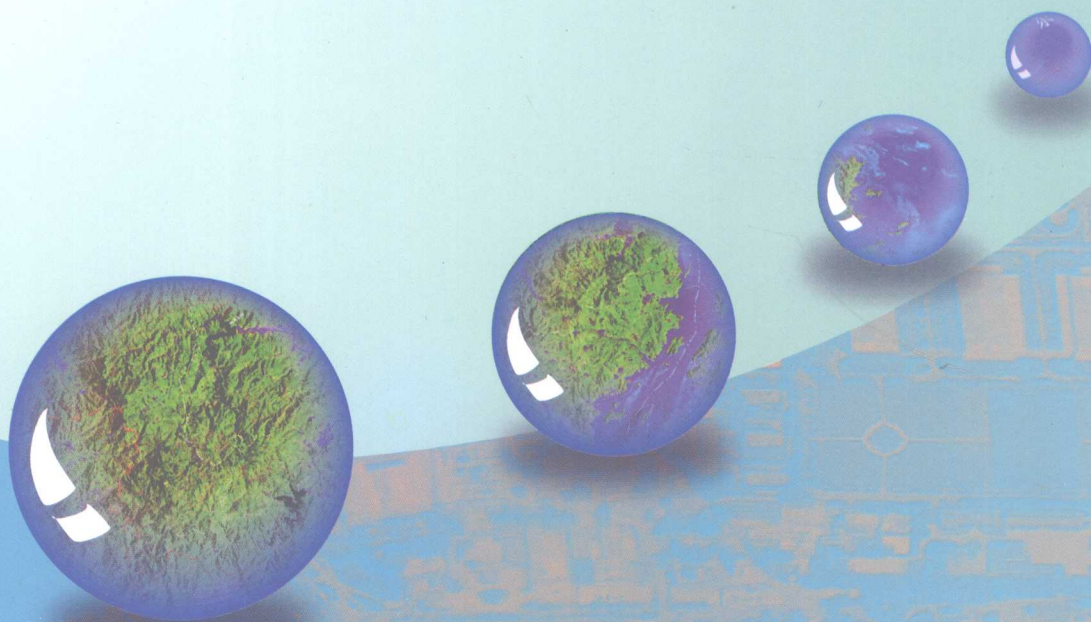


城市景观 动态时空模拟

SPATIO-TEMPORAL DYNAMIC AND
SIMULATION OF URBAN LANDSCAPE

郭 沅 著



中国环境科学出版社

中央民族大学“985”工程

高等学校学科创新引智计划（B08044）联合资助出版

国家民委重点项目（07ZY05）

城市景观动态时空模拟

Spatio-temporal dynamic and simulation of urban landscape

郭 烁 著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

城市景观动态时空模拟/郭砾著. —北京: 中国环境科学出版社, 2009

ISBN 978-7-5111-0033-7

I. 城… II. 郭… III. ①遥感技术—应用—城市环境: 生态环境②地理信息系统—应用—城市环境: 生态环境 IV. Q149 X321.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 114535 号

责任编辑 张维平

封面设计 龙文视觉

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2009 年 8 月第 1 版
印 次 2009 年 8 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 6.5
字 数 145 千字
定 价 22.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

景观生态系统由不同的生态系统以斑块镶嵌形式构成,在自然等级系统中处于一般生态系统之上,具有特定的结构和功能,在系统中诸因素之间有机地相关联和相互作用,并随时间受自然和人类干扰而动态变化或相对稳定,形成或组成有序的动态系列,最终向一定的目标方向演变。这些基本特征显示了系统的复杂多样性和不同层次的稳定性。同时,景观生态系统还是一个时空耦合系统,只有同时把时间及空间这两维纳入某种统一的系统中,才能真正揭示其复杂系统的本质规律。因此,在景观生态学研究中,必须把整体性、关联性、动态性、有序性和目的性的观点贯穿始终,站在景观生态学整体和全局高度去思考和研究问题,把景观生态系统作为一种不断运动、发展、变化的客观实体来研究,树立系统的综合性、整体性学科思想。然而,目前的景观生态学研究,尤其是景观生态建模中存在着时空分离的倾向,系统过程的动态模拟研究较为薄弱。本书旨在介绍如何采用有关复杂系统的最新理论和方法开展景观生态复杂系统的时空动态模拟研究。

现代系统科学、非线性科学和复杂性科学等一系列理论体系为复杂系统的研究提供了新的思维方法和现代化的技术。因此,应用复杂系统的现代理论方法,来研究和分析景观生态复杂系统的动态行为具有科学的必然性。而空间复杂系统研究的核心和关键问题是应用复杂系统的方法,建立空间复杂系统的科学模型,尤其是数理模型。本书主要介绍了如何利用时空离散的局部动力学模型,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系统。

本书以复杂系统理论研究为背景,以景观空间系统为研究对象,建立了研究空间复杂系统的 GeoCA 模型框架;在此基础上,以城市复杂系统为研究对象构建了城市动态演化模型,对城市的内部结构变化和空间扩展过程进行了分析研究,对城市动态发展的规律和特征进行了探索;最后,在 3S 技术系统的支持下,对珠江三角洲主要城市动态发展的过程进行了模拟和预测。在此基础上提出地学数据多维属性关联、时空分割聚类、空间对比分析、空间组合分析等地学数学模型,进行探索性的研究。

本书总结的研究案例包括以下几个方面:

1. 以珠江三角洲主要城市广州、深圳、珠海、中山、东莞 1985—2005 年多期 TM、ETM 遥感影像、地形图为主要信息源,在监督分类和综合分类的基础上,应用 GIS 的空间分析功能建立和编制景观类型影像图分类模块和相应的属性数据库,对景观类型斑块影像分类,构建适用于研究区的综合景观分类体系。

2. 在 3S 技术系统软件和景观格局分析软件的支持下,应用景观空间格局指数数量分析方法,研究了景观类型特征,景观格局分异特征与时空变化。

3. 以城市森林为研究对象,研究了不同立地条件下森林 meta 种群结构特征、群落物种多样性、群落结构复杂性,通过黄牛木 meta 种群及其亚种群斑块生境的形成说明城市森林在快速城市化过程中受到的影响,指出城市区域森林若任其发展将加剧阔叶林群落向次生灌木状群落逆向演变进程,为城市化过程中森林生态恢复提供依据。

4. 在综合前人研究的基础上,利用模拟城市景观动态发展变化的城市动态演化模型——城市 GeoCA,模拟城市范围的空间扩展,在空间数据库支持下,进行实际城市的动态模拟。作为一个层次性的空间模型与社会经济模型相结合的空间动力学模型,城市 GeoCA 模型将宏观规律与微观规律、整体指标与空间分布有机结合,增强了模型的实用性。

5. 在城市 GeoCA 的支持下,对虚拟城市的动态变化与发展进行了研究,对城市发展的规律和特征进行了深入探索。在 3S 技术系统的支持下,对深圳市的城市增长进行了有效的模拟和预测,取得了比较满意的结果。

本书以科学性、系统性、实用性与易读性为宗旨,结合城市景观生态研究数据的特点,从分析空间数据入手,以遥感、地理信息系统的原理为基础,介绍了时空离散的局部动力学模型的理论与方法、时空动态模型和空间分析方法。通过实例介绍了 CA 模型、遥感与 GIS 技术在不同区域景观格局时空变化中的应用。

参加研究工作和撰写本书的主要有郭烁、杜世宏、薛达元、江学顶、巩重峰、宋艳曦、刘蔚秋、王永繁、李丽、陈旭、许佐荣、蔡亮、赵松婷、成文娟、马剑、杨京彪、戴蓉、刘海鸥、卢之遥等,特别感谢他们为研究工作付出的辛苦努力。中山大学生命科学学院和环境科学与工程学院的老师和研究生为我们的研究提供了大量无私的帮助,在此一并致谢。

本书适合于生态学、环境科学、地理学、环境遥感、地理信息系统等不同专业的读者阅读,可作为高等院校有关专业研究生、高年级本科生的教材或教学参考书,亦可供从事城市景观生态学理论与方法研究、城市生态规划与区域可持续发展研究等领域的科研人员、管理人员及规划人员等参考。

郭 烁

2009 年 5 月 1 日于北京

Preface

Landscape ecology system is a complex system, which consists of physical, social and economic subsystems. The complexity is an essential characteristic of landscape spatial system because of complicated properties, such as non-equilibrium, multi-scale, indeterminacy, hierarchy, self-organizing, self-similarity, random city, and soon. At the same time, landscape spatial system is a spatiotemporal system. Thus, landscape spatial pattern can't be revealed until the concepts of time and space are integrated into one uniform framework. Wearers, to simulate the dynamic behaviors of the complex system, some new theories, methodologies and techniques concerning complex system were used to construct system models and to make simulation.

Landscape ecology has been used to be work frame of ecosystem researches on biological, physical, societal causes and consequences of spatial variation in landscapes. Landscape structure change could reveal the driving forces and interactions based on joint complex system with physical, biological, political, economic and social course. Most landscapes have been influenced by anthropogenic disturbances, and the landscape pattern is the results of subsystem even patches development under natural and human activities. The heterogeneity of landscape structure is distribution of species, energy and materials, made their function diversity in flow of species, energy and materials among the elements. Recent research in landscape ecology has focused on pattern change and the effect of disturbance to be quantified. The occurrence of disturbance by natural and human activities directly influence the structure, dynamics and ecological process of landscape pattern. By analyzing ecological patterns and function at different spatial and temporal scale, landscape ecology offers some of the most successful examples of the uptake of ecology in policy or management. Moreover, many studies on the dynamics of landscape pattern indices have been conducted for different patch types in artificial, binary landscapes, creating a need for additional assessments in natural landscapes. It has significant theoretical and practical value to study landscape pattern change by multi- subject cooperates.

Spatial tools such as geographic information systems (GIS) and remote sensing, which has simplified landscape pattern characterization by quantifying and capturing aspects of landscape structure included fragmentation indices, patch shape indices, or fractal dimension, have given ecologists unprecedented capacity to quantify landscape pattern and understand spatial heterogeneity and landscape structure change.

How to build the mathematical model of the landscape change is the key issue of this research. Cellular automata, a completely discrete and local grid dynamic system, is a representative model for simulating complex system, and especially suitable for complex system, to build cellular automata based and to make simulation are the main task in this dissertation.

The main aspects in this dissertation are listed as following.

1. Based on TM, ETM, terrain map and resources data, taking from field, vegetation type, disturbance and genesis feature, landscape types were divided in Pearl River Delta zone.

2. With the aid of the GIS software and landscape pattern analysis software, the landscape spatial pattern of the region was analyzed and assessed using landscape ecological principles. We calculated landscape indices, and quantified landscape transformation processes to determine the nature and magnitude of landscape structural changes within Pearl River Delta zone.

3. With the study object of urban forest, We analyzed the present status and characteristics of urban forest meta population structure in different habitat. By analyzing the species of *Cratogeomys cochinchinense* communities, effect of rapid urbanization on urban forest were studied. The research showed that regressive succession from subtropical evergreen broad-leaves forest to secondary shrub forest would speed up.

4. Therefore, inspired by the theories of complex system, The model for complex spatial system simulation, an extended cellular automata model with the name of GeoCA, is used. Furthermore, the dynamic complex behaviors of hypothetical cities are simulated through the GeoCA system.

5. Dynamic evolution behaviors of the Hypothetical cities are explored thoroughly using GeoCA system. And through the experiments, some principles and characteristics for urban growth are testified. At last, a case study for the simulation and prediction of explosive urban growth of Shenzhen, a city in Pearl River Delta, is conducted.

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 景观的空间信息研究	1
1.1.1 空间信息特征与处理	1
1.1.2 景观格局与过程研究	2
1.1.3 景观动态与空间模拟	2
1.1.4 景观分类与评价	3
1.1.5 空间信息分析方法	3
1.2 空间复杂系统的研究	4
1.2.1 系统科学的研究	4
1.2.2 复杂系统和复杂性科学	6
1.2.3 复杂系统理论分析	7
1.2.4 空间系统的复杂性分析	8
1.3 元胞自动机	10
1.3.1 元胞自动机的概念	10
1.3.2 元胞自动机的特征	11
1.3.3 元胞自动机的分类	13
1.3.4 典型元胞自动机模型	14
1.3.5 元胞自动机模型应用	18
第二章 地理元胞自动机 (GeoCA) 概念模型	19
2.1 CA 模型在地学中的研究概述	19
2.1.1 CA 模型的应用进展	19
2.1.2 CA 模型的应用可行性	20
2.2 地理元胞自动机 (GeoCA) 模型	21
2.2.1 扩展的 CA 模型: GeoCA	22
2.2.2 GeoCA 与 GIS 的集成	22
2.3 交通流模型 (GeoCA-Traffic)	23
2.3.1 一维基本模型	23
2.3.2 一维扩展模型	23

2.3.3 二维交通模型	24
2.4 林火模型 (GeoCA-Fire)	25
2.4.1 GeoCA-Fire 的基本模型	25
2.4.2 GeoCA-Fire 的扩展模型	26
2.5 城市动态演化模型 (GeoCA-Urban)	27
2.5.1 城市化及城市模型	28
2.5.2 模型的动力学机制	28
2.5.3 模型的结构复杂性	28
2.5.4 模型的特征分析	29
2.5.5 GeoCA-Urban 模型应用	30
第三章 城市化与城市景观格局变化	35
3.1 城市化与结构变化	35
3.1.1 城市化与产业结构变化	36
3.1.2 城市化与土地利用结构变化	36
3.1.3 城市化与城市空间结构变化	37
3.2 城市化与土地利用演化	37
3.2.1 城市化与再城市化	37
3.2.2 城市土地利用变化	37
3.3 城市景观格局时空变化	38
3.3.1 景观格局变化特征分析	38
3.3.2 空间特征样带分析	42
3.3.3 缓冲带梯度分析	44
3.3.4 景观结构时空变化的区域差异	44
3.3.5 区域样带空间自相关指数时空变化的方向特性	47
第四章 城市化与城市森林动态	50
4.1 城市森林空间格局动态变化	50
4.1.1 景观格局的变化趋势	50
4.1.2 驱动机制的分析	53
4.2 城市森林小群落的空间动态	55
4.2.1 森林小群落特征分析	56
4.2.2 群落多样性分析	61
4.3 城市森林 meta 种群结构特征	64
4.3.1 黄牛木 meta 种群落结构特征与多样性	64
4.3.2 黄牛木 meta 种群地位和作用	66

4.3.3 黄牛木 meta 种群形成机制.....	69
第五章 城市增长的动态模拟与预测	70
5.1 虚拟城市的探索	70
5.1.1 虚拟城市的概念	70
5.1.2 虚拟城市的模拟	70
5.2 城市增长动态模拟的探索	76
5.2.1 动态模拟的方法	77
5.2.2 数据准备与模型构建	77
5.2.3 模型模拟	81
5.2.4 结果分析	82
第六章 结 论	84
参考文献	86

第一章 绪 论

1.1 景观的空间信息研究

景观是一个由中等数量组分组成的非常复杂的系统,景观是生态系统组成的空间镶嵌体,斑块被视为组分,斑块构成景观,景观又构成区域,同样具有等级结构,也是由低一等级水平上的组分组成,每一组分又是在该等级水平上的整体,同样由更低一等级水平的组分所组成,具有结构和功能的双重等级性质和特征。等级理论最根本的作用在于将系统中繁多而又相互作用的组分按照一定的标准加以组合,赋之以层次结构,从而简化复杂系统。景观空间信息的研究包括了各种环境因子和生存在一定环境之中的生物及生物群体,包括社会、经济和人文因素等综合影响的复杂系统。其空间信息量大,具有一定的特征,来源复杂。因此需要从多层次上获取有关要素的相关信息进行处理和提取。而 GIS(地球信息系统)作为一种必不可少的工具在处理数据和获取景观生态信息等方面具有传统地面实验方法不可替代的作用(傅伯杰,2001)。

1.1.1 空间信息特征与处理

景观生态学把地理现象的空间相互作用(横向研究)和生态学对生态系统机能相互作用(纵向研究)融为一体,强调景观空间异质性的维持和发展、生态系统之间的相互作用、景观格局与生态过程的关系以及人类对景观及其组分的影响(邬建国,2000),形成以不同时空尺度下格局与过程、人类作用为主导的景观演化等概念为中心的理论框架。这决定了景观斑块、廊道、基质等组成要素在地理位置上具有定位特征,都有与其相对应的描述自然和社会经济特征的属性数据;在空间分布上具有多维结构和层次结构的特征;在等级和层次上,不同层次景观空间信息又构成空间信息的整体,使信息的整体性、关联性特征十分明显;在空间尺度上随时间而变化,使景观空间信息具有明显的动态特征和时序特征。地球空间信息技术的应用,要求研究和把握景观信息这种区域性、多层次和动态变化的特征,对于构建景观生态信息系统,尤其是空间信息的获取和处理具有非常重要的意义。

景观生态空间格局研究对象一般为中尺度异质地表区域,研究范围跨度大,景观组分数量大,时空格局和过程亦相当复杂,传统的生态学地面调查法获取景观生态信息的途径,受到多方面的限制。景观空间信息特征受时间尺度和空间尺度及系统约束,景观格局和过程、景观异质性又依景观空间信息源时空尺度变化而异。在一个尺度上定义的同质性景观可随观测尺度改变而转变为异质性景观,在不同时空尺度上占主导地位的格局和过程也各不相同,在景观生态系统内同一尺度或不同尺度上的组分之间的非线性

关系和反馈作用又极为普遍(邬建国, 2000), 因此, 空间景观格局研究必须在景观尺度这一组织层次上考虑尺度(Scale)问题。尺度选择在空间信息获取前需要定位, 尺度转换在信息获取中需要掌握, 要解决大尺度的问题必须将大尺度上的信息与其他尺度上的信息联系起来进行尺度推绎。尺度推绎问题已成为景观空间信息获取中必须研究和解决的核心问题。

景观空间信息获取依赖于大量空间数据的有效处理。如何将隐含的和具有生态学意义的景观信息表达成空间和时间上连续分布的综合信息, 决定于数据的有效处理, 这实际上是 GIS 本身应用功能的体现(边馥苓, 1996)。在 GIS 支持下各种专题图信息可采用矢量途径, 以点、线、多边形组合、图层叠加来表达和处理, 对于遥感信息还可采用栅格途径以离散化的空间单元来表达和处理(樊红, 2002)。目前, 从所生成的景观信息专题图中去提取那些具有生态学意义的隐含景观信息, 将是研究的重点。

1.1.2 景观格局与过程研究

景观空间格局(Landscape Spatial Pattern)是景观组分的空间分布和组合特征, 是由许多景观过程长期作用的产物, 其变化和发展是自然、生物和社会要素相互作用的结果。景观生态学研究的是大时空尺度特征和多变量的生态系统在空间上的动态演变, 这是一个相当复杂的过程。景观空间格局分析是景观功能和景观动态的基础(Turner, 1987; Forman, 1996)。景观空间格局是非生物的、生物的和人为因素(包括地貌、地形、气候、各种干扰和过程)共同作用的结果, 具有多层异质结构和空间缀块特征。格局影响过程且相互紧密联系, 关系复杂。不同因素在景观格局中所发挥的作用或影响随尺度而异, 其中地形、地貌及气候等环境特征表现为格局对过程大范围的制约, 在此基础上自然和人为干扰在各种尺度上的影响都十分明显。这表明景观的空间信息分析, 必须把格局与过程结合起来进行, 从格局到过程着重分析景观结构对生态过程的影响, 通过景观格局的变化来反映景观生态过程。格局与过程是景观信息分析的核心内容。它从看似无序的景观斑块镶嵌中发现潜在的有生态学意义的规律性(邬建国, 2000)。在确定景观空间构型时, 斑块密度、镶嵌度以及景观各要素类型的聚集点、聚集线或聚集体是空间信息分析的重要量度和内容, 在景观信息分析中, 诸多景观指数能够高度浓缩景观格局信息, 是重要的可供筛选的定量指标。线性法、网格法等信息论方法是除传统统计分析等方法之外的主要方法, 尤其是在 GIS 中采用栅格途径, 利用图像的网格像素信息可直接在二维空间中分析景观要素的分布。目前采用景观指标定量分析景观结构特征和变化的理论、方法和应用已相当普遍, 其新的趋势是把传统的计算程序集成于地理信息系统中, 能够分析不同景观单元之间的距离、邻接性、连通度以及边缘效应, 可以进行景观结构对景观生态过程的敏感性分析和模拟, 该技术在景观格局研究中的作用日益重要(曹燕丽, 2001; 卢远, 2002; 肖寒, 2001)。

1.1.3 景观动态与空间模拟

对于景观生态过程来说, 景观格局仅是一种瞬间表现。通过景观格局在时空上的动态变化去反映景观生态过程, 才能从生态过程复杂性和抽象性中找出其演变规律的特征。景观格局空间信息研究中, 研究景观动态的主要目的是发现、认识并运用景观变化规律,

保护自然环境、维持生态平衡。景观动态包括景观空间和景观过程变化两个方面,从景观变化的总趋势可以了解景观的稳定性、景观的抗逆性、景观恢复性及受干扰的程度。景观各主要要素中地貌要素是稳定的,气候和植被对景观变化则具有周期性和异常性影响,土壤对景观的变化可能相当剧烈,森林砍伐、山区开发、土地利用、旅游发展等人类活动和洪水、火灾及病虫害等自然影响可使景观改变。

在受到自然和人为干扰后,景观可能产生较大范围的变化。因此,景观动态监测和模拟方面的应用研究日益受到重视,而 RS(遥感)与 GPS(全球定位系统)的结合将为这一方面的研究提供了连续的空间信息分析手段,在此基础上进一步运用 GIS 建立各种空间模拟模型,进行空间统计分析、景观要素的时空转换、计算机制图等有效的数据分析及处理手段,将使地球空间信息技术的应用达到较高水平,近年来,这方面的研究越来越受到国内关注(岳文泽, 2002; 沙晋明, 2002; 汪爱华, 2003; 张世熔, 2003)。

由于景观的变化要求较为清楚地描绘景观空间位置的变化,景观变化的空间信息源又是多样的,模拟景观变化的模型研究越来越离不开 GIS 空间信息技术的应用。目前从景观整体变化、景观分布变化、景观空间变化等诸多方面研究建立了大量的模型,尤其景观空间变化模型预测景观中要素变化量和变化的景观构型,更需要采用遥感影像的矢量或栅格格式确定多种模型变量和各种复杂的空间信息分析及数学算法,使空间信息分析与模拟变化模型的拟合紧密结合。各种景观变化动态模型的交融和空间信息共享已成为景观动态的发展方向。

1.1.4 景观分类与评价

景观生态分类是景观格局与过程研究的基础和各种应用研究的前提,分类以人与景观的相互作用为着眼点,要求通过全球定位、遥感、地理信息系统、虚拟技术的有机结合,对景观特征进行综合分析,并强调景观的空间分析和空间模拟,要求全球定位和遥感技术提供覆盖范围广、实时性强的影像信息,经分析后可以解译不同的景观类型。3S 技术(GIS、RS、GPS)与其他计算机技术的综合应用,使得多属性、大范围的景观空间信息分析成为现实,零散的各类信息综合高效率的储存、调用,空间资料与特征资料的关联及可长期更有效的利用,以及研究和探讨空间信息的属性、潜能、尺度、时空等特征,尤其是信息源、信息处理、信息提取、尺度推绎以及空间信息与等级格局、过程、景观变化动态相关联系,用信息论的大尺度观点,组织和挖掘景观空间信息。分析的目的不是描述景观,而是要解释和理解其中出现的过程。因此,地球空间信息技术在景观分类方面的应用日趋广泛和重要(Bastian, 2000; Germino, 2001; 马荣华, 2001; Mary, 2002)。空间信息技术亦经常应用到景观生态评价诸多方面,在不同尺度上也有更专门的应用。近年来, GPS、RS、GIS 以及计算机网络的一体化技术为景观评价提供了技术支持,评价模型的应用相当广泛。

1.1.5 空间信息分析方法

目前遥感分析方法已普遍应用,数字遥感的多光谱特征,已经成为许多生物物理特征空间辨识、测定和度量的主要手段(Vaseoncelos, 2002),遥感分析作为定量的空间辨识方法其作用在于可以快速地形成不同时相、不同尺度要求的景观影像图和影像信息。

地理信息系统中的空间分析由应用统计的方法分析、线和面的空间分布模式逐渐过渡到空间决策过程和复杂空间系统的时空变化分析,在景观空间格局研究中是极为重要的空间分析方法。其中,叠加分析是最常用的提取空间隐含信息的手段之一,如视觉信息叠加、点与多边形叠加,线与多边形叠加、多边形的叠加、栅格图层叠加等;对地理网络进行地理分析和模型化是地理信息系统中网络分析功能的主要目的。当今景观生态学研究离不开地理信息系统的计算机制图手段。

空间统计分析主要用来比较景观空间结构中空间数据与统计分布概率的关系,如 PCA、DCA、CCA 等排序分析以确定空间相似性;相关、回归、波谱分析、空间自相关、克吕金插值分析空间合作和邻聚的关系;ANOVA 和 MANOVA 等方差分析和半方差分析测试空间差异,利用分维分析研究生态格局等。目前空间统计分析方法在景观生态学中的应用并不普遍,在景观空间格局研究中更为少见,原因不在于空间统计分析方法的本身,而在于对方法应用的理解和认知。景观空间格局指数分析具有普遍意义,可以覆盖空间格局分析的主要研究内容,其大部分指数被收集在由美国俄勒冈州立大学开发的著名景观格局分析的软件系统 FRAGSTATS 3.3 中,目前的应用十分广泛。

景观空间结构模拟的目的是为了定量地描述空间格局,预测空间格局沿着时间序列的变化和综合时空尺度上的特征。这种景观尺度上的模拟要考虑时间尺度、空间尺度和空间模拟分辨率以及模拟变量等因素;要求能够发现空间结构、解译空间并组合多种空间模型,能够协调许多时间与空间反馈关系,具有真实的物理与生物学过程,能够连接原因与结果,可以评价管理效果,能够进行景观和区域尺度的类型或斑块分布和景观动态模型。Botkin 提出的林窗(GAP)模型其空间尺度可拓展到景观或区域尺度,是研究系统动态变化的重要模型系统,预测空间格局的变化常采用随机的景观模拟,比较典型的基于过程的景观模拟模型是 LANDIS。景观生态学研究与综合信息分析技术紧密结合将从根本上改变传统分析论和方法论,大尺度和多尺度信息聚合和解聚,GIS 和模拟模型的耦合都将大幅度地增加景观空间信息动态分析能力和生态学实用价值。

1.2 空间复杂系统的研究

1.2.1 系统科学的研究

现代系统科学的发展体现在系统哲学、系统方法、系统技术和系统实践的各个层面上,系统思想已广泛应用于传统科学以及人们日常生活管理的一切领域,它正在以空前的广度和深度展现出当代科学技术整体化的发展趋势。可以毫不夸张地讲,系统科学的思想已经改变了人们观察世界的方法和角度,与传统科学一起极大地丰富了人们对自然和自身的认识(谭跃进,1996)。围绕“系统”的研究,从 20 世纪中到 70 年代,逐步形成了由一般系统论为代表的一系列理论构成的横断性学科。具体讲,这些理论包括贝塔朗菲(Bertalanffy L., 1945)创立的一般系统论(或称普通系统论,狭义上的系统论),美籍犹太人维纳(Wiener N.)创立的控制论,数学家香农(C. E. Shannon, 1948)建立的信息论,比利时的普利高津(Prigogine I., 1971, 1977)为首的布鲁塞尔学派创立的耗散结构理论,哈肯(Haken H., 1978)等的协同学,汤姆(Thom R., 1963)提出的

突变论,德国的艾根(M. Eigen, 1971)提出的超循环理论(Hypercycle Theory)等。这些理论互相联系、并行而不悖、相互支持、相互补充、相互促进,共同构成了对各种系统一般特征及其演化规律描述的理论体系,我们将这些理论统称为系统科学,或称广义上的系统论(狭义的系统科学和系统论只包括一般系统论、控制论和信息论)。

贝塔朗菲提出“系统可以定义为相互关联的元素的集合”。为了从数学上给出“系统”的定义,贝塔朗菲选择了联立的微分方程组的形式来表达。

如果假设元素 P_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的某个测度为 Q_i , 那么对于有限数目的元素和最简单的情况,这些测度有如下的形式:

$$\begin{aligned}\frac{dQ_1}{dt} &= f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ \frac{dQ_2}{dt} &= f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ &\dots \\ \frac{dQ_n}{dt} &= f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)\end{aligned}$$

以上“系统”的定义反映了系统的最基本的组成:元素和元素间的联系(对于开放系统,也包括元素与环境的相互作用)。同时,这个“系统”的描述和解释具有高度的抽象性,超越了物理的、化学的或生物的某个具体系统,包含了任何封闭系统和开放系统,具有高度的一般性。他认为,相比古典热力学的封闭系统,开放系统是更一般的系统,前者是后者的特例。

基于系统论的思想,很多学者给出了各种不同形式系统的定义。

克里尔和瓦拉克(1967)利用集合论作工具,给系统下了一个比较确切的数学定义。

- i) 包含在某个系统 S 中的对象可以表达为若干元素的集合 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 。
- ii) 对此我们还可以加上一个额外元素 a_0 代表环境。然后我们可以引入一个集合 $B = \{a_0\} \cup A$, 它包含了该系统中的所有元素,还加上一个代表环境的元素。
- iii) 考察这些元素间的相互作用和关系,如果令 r_{ij} 表示任两个元素 a_i 和 a_j 之间的关系,那么我们可以用 R 来表示所有 r_{ij} ($i, j=0, 1, 2, \dots, n$) 的集合。

基于以上的描述和定义,我们称 $S = \{A, R\}$ 为一个系统。

钱学森给出了对系统的描述性定义:系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的、具有特定功能的有机整体。这个定义与类似的许多定义一样,指出了作为系统构成的三个基本特性。第一,系统是由若干元素组成的;第二,这些元素相互作用、互相依赖;第三,由于元素间的相互作用,使系统作为一个整体具有特定的功能。虽然系统的定义形形色色,但都包含了这三个方面,即这三点是定义系统的基本出发点。

系统科学的建立和发展是一个对系统研究和认识逐步深入的过程。这些系统理论源于生物学、物理学、化学等不同的学科领域,建立的时间也参差不齐,并无明显的继承性。系统科学的发展是一个对问题域不断深入,方法域不断拓展的一个过程(乔非, 1996)。贝塔朗菲从理论生物学角度总结人类系统思想,运用类比同构的思想方法,建立了开放系统的一般系统论,提出了系统具有整体性、有序性和目的性。但他并没有对有序性和目的性作出满意的回答。普利高津创立的耗散结构理论则将经典热力学定律与生物进化

论相统一，进一步指出自然界和社会等开放系统都存在从无序走向有序的发展趋势，系统开放性、非线性是无序走向有序的主要原因。

1.2.2 复杂系统和复杂性科学

复杂系统是相对牛顿时代以来构成科学理论的简单系统相比而言的，二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。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。综上，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（约翰·L·卡斯蒂，1998）。

复杂系统的核心特点即中等大小数目的主体：这是一个复杂系统所必备的一个基本组织条件。信息论创始人之一的韦佛在 1958 年作出对自然系统的分类（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 1-1 来说明。图上的（a）为简单系统；（b）为无组织的复杂系统；（c）为有组织的复杂系统。简单系统元素数目很少，可用相应较少的变量数来描述，大都可以用牛顿力学去加以解析。无组织的复杂系统元素和变量很多，但其间的耦合是微弱的，或随机的，只能用统计的方法去分析。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）。

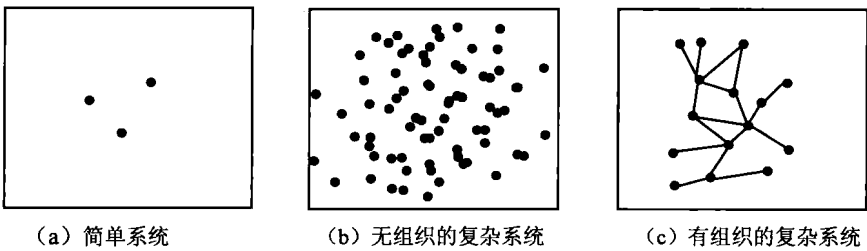


图 1-1 复杂性的系统分类

Fig.1-1 Classification of System Based on Complexity

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。复杂性科学是系统科学和非线性科学的进一步发展、充实和深化，是系统科学研究的最新前沿领域。如果说，系统科学是建立在系统的整体性、组织性、目的性研究的基础上的，非线性科学是建立对系统非线性、不确定性、随机性研究的基础上的，那么复杂性科学则是建立在系统“复杂性”、智能性和适应性的研究基础上的。

其实，这三者在实质上是相通的，系统论中的整体性、突现性恰恰是系统非线性的表现，自组织性是非线性相互作用的结果，智能性、适应性则是目的性的更高级的体现，目的性和适应性都是复杂系统不断进化的保证，而非线性和随机性又是造成复杂性的重要原因。总之，系统科学、非线性科学与复杂性科学在研究对象上基本一致，那就是相对于牛顿确定性简单系统而言的复杂系统。复杂性科学并不是凭空产生的一门独立于系统科学和非线性科学之外的理论体系，它的一些核心概念和研究方法就来源于以上两门科学，它是现代科学发展的最前沿理论大融合的产物，这些理论主要包括非线性系统动力学，耗散结构论，协同学，混沌理论，分形理论，以及最新发展的人工生命和复杂适应系统（Complexity Adaptive System，简称 CAS）等。然而，在另一方面，三者又从不同侧面，不同角度，步步深入地对系统的特征作了深入探讨，复杂性科学更加强调从智能性和自适应性等系统生命特征出发，对系统复杂性的形成原因、复杂性的特征以及系统的复杂行为等方面的研究。

1.2.3 复杂系统理论分析

复杂系统的理论包括现代系统学、非线性科学和复杂性科学等（图 1-2）。这三种理论体系彼此联系，相互融合，相互支持，又各有侧重，三者的划分并没有明确的界限。它们之间的联系通过两条主线有机地融合到了一起，一条主线是复杂系统理论中所共享的一系列核心概念，这些概念包括：系统性—整体性—突现性—不确定性—随机性—非线性—不稳定—非平衡态—自适应—自组织—控制—反馈—信息—信息复杂性—信息量—熵—有序—无序—混沌—吸引子—自相似—分形/分维—局部信息，其中非线性当仁不让地处于核心地位（图 1-3）。

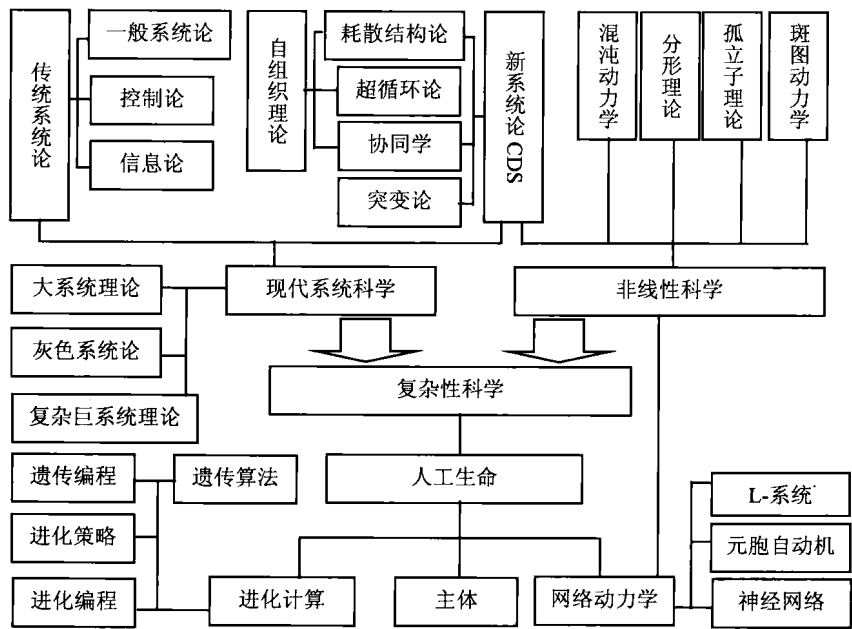


图 1-2 复杂系统理论的框架

Fig.1-2 The Scheme of the Theories of Complex System