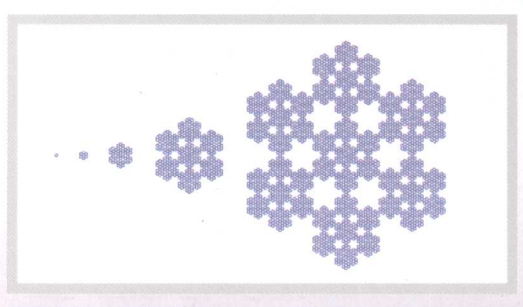
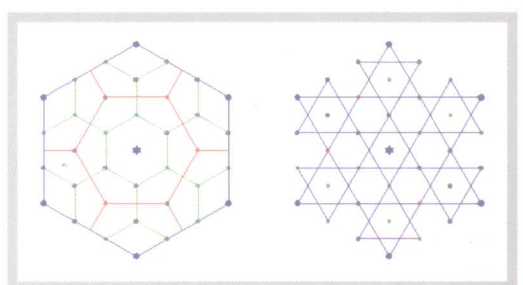
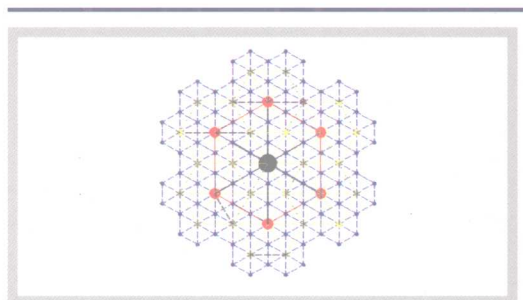




北京
学
地理科学丛书

■ 陈彦光 / 著

分形城市系统：标度·对称·空间复杂性



科学出版社
www.sciencep.com

北京大学地理科学丛书

分形城市系统： 标度 · 对称 · 空间复杂性

Fractal Urban Systems:
Scaling · Symmetry · Spatial Complexity

陈彦光 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书的主要内容是基于对称思想和标度概念建立城市系统的理论模型,以期反映城市演化及其时空结构的一般规律。根据维数与空间的对应性,从时间、空间和等级三个角度将地理空间分为三种类型。基于三类空间,从宏观城市层面发展了刻画城市系统的标度定律。揭示城市系统演化现象背后的简单与复杂的数学联系和物理本质。

城市和城市体系是复杂的空间系统,分形是探索复杂性的有效工具。运用分形思想探索城市系统的空间复杂性具有重要的理论意义和实践价值。

本书读者对象包括城市地理、城市规划、应用数学、社会物理、管理科学、分形理论、非线性科学、复杂性科学等领域的研究人员、教师和学生。

图书在版编目(CIP)数据

分形城市系统:标度·对称·空间复杂性/陈彦光著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-020571-1

I. 分… II. 陈… III. 分形理论-应用-城市地理-地理信息系统-研究 IV. P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 069039 号

责任编辑:韩 鹏 朱海燕 李久进 / 责任校对:宋玲玲

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>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008 年 7 月第一次印刷 印张:27 1/4

印数:1—2 000 字数:608 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

本书由国家自然科学基金项目“城市体系空间网络的分形结构及其演化机制”(项目批准号:40071035)及美国 SUNY-Albany 的 Urban China Research Network 基金项目“Changes of Spatial Structure in Cities of China Under the Condition of ExoUrbanization”(the Spring 2003 New Faculty Award)资助完成;由国家自然科学基金重点项目“中国的城市变化及其自组织的空间动力学”(项目批准号:40335051)和国家自然科学基金资助项目“人文地理系统的对称性研究”(项目批准号:40771061)资助出版。

《北京大学地理科学丛书》编委会

(按姓氏音序排列)

顾问编委：陈昌笃 陈静生 陈述彭 承继成 崔海亭

崔之久 侯仁之 胡兆量 刘昌明 陆大道

童庆禧 吴传钧 叶大年 郑 度

主 编：周一星

副 主 编：蔡运龙 方精云 陶 澍 周力平

编 委：陈秀万 冯长春 韩光辉 吕 斌 莫多闻

唐晓峰 王缉慈 王学军 王仰麟

学术秘书：曹广忠 李有利

《北京大学地理科学丛书》序

正如所有现象都在时间中存在而有其历史一样,所有现象也在空间中存在而有其地理,地理和历史是我们了解世界不可或缺的两个重要视角。以人类环境、人地关系和空间相互作用为主要研究对象的地理学,是一门包容自然科学、人文社会科学和工程技术科学的综合性学科,已建立了相当完整而独特的学科体系。钱学森院士倡导建立地理科学体系,认为地理科学是与自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、文艺理论、军事科学、行为科学相并列的科学部门,将地理学推向了一个新的境界。

地理学的研究与教学涉及从环境变化到社会矛盾的广阔领域,其价值源自地理学对地球表层特征、结构与演化的研究,对自然与人文现象在不同地方和区域空间相互作用的过程及其影响的研究。处理这些问题虽远远超出任何一门学科的能力与见识,但这些问题都包含着地理学的基本方面。

对认识 and 解决当今世界许多关键的问题,例如经济增长、环境退化、全球变化、城市和区域发展、民族矛盾、全球化与本土化、人类健康、全民教育等,地理学都做出了特殊的贡献。地理学对于科学发展观的树立,对于统筹人与自然、统筹城乡发展、统筹区域发展、统筹经济与社会发展、统筹全球化与中国特色思想的普及,起到了独特的作用。它在满足国家社会经济发展对科学技术的若干重大需求上,已经发挥并将继续发挥越来越重要的作用。

当前人类面临的许多重大问题还没有得到根本解决,这与我们认识上的缺陷有很大关系,其中包括地理认识的缺陷。无论在国际尺度、国家尺度、区域尺度,还是地方尺度和个体尺度,对许多问题的决策过程尚不能充分驾驭地理复杂性,存在一些“地理空白”,这使得在达到经济繁荣和环境可持续的双重目标方面,乃至在个人健康发展方面,都可能要付出高昂的代价。

因此,加强地理研究和教育,提高地理学者自身、决策者以至广大民众的地理学认识和能力,是摆在地理学界面前的一项崇高职责,任重道远。北京大学的地理学工作群体也义不容辞。

北京大学的地理学可以追溯到 19 世纪末京师大学堂设立的地理教学计划,可惜由于诸多原因,这个计划未能实施。1929 年清华大学成立地理学系,后因增加地质学研究而改名为地学系。抗日战争期间,北大、清华、南开三校合称西南联合大学,北大地质学系与清华地学系合并,并增设气象学研究,称地质地理气象学系。抗日战争胜利后,恢复了北京大学、清华大

学、南开大学。并在清华设地学系、气象学系,地学系下设地质组和地理组。1952年全国院系调整,由清华大学地学系地理组和燕京大学部分教员联合成立北京大学地质地理系。先设自然地理学专业,1955年、1956年、1994年、1997年相继设立地貌学、经济地理学、环境学、地图学与地理信息系统专业,成为国内地理专业 and 方向、硕士点、博士点和重点学科最多的地理系。1978年国家改革开放之始,北京大学撤消地质地理学系,分别成立地质学系和地理学系。1984年北京大学以地理系遥感教研室为基础成立了遥感技术与应用研究所(1994年易名遥感与地理信息系统研究所),1988年地理系为了充分体现为国家社会经济发展服务的工作实质和适应招生的需要,采用双名法,在国内称“城市与环境学系”,在国际上称 *Department of Geography*,并逐步形成了人文地理(人文地理、历史地理、城市规划、区域经济)—自然地理(综合自然地理、环境地学、地貌与第四纪)—地理信息科学“三足鼎立”的格局,发展欣欣向荣。

“北大是常为新的”,北大的地理学也是常为新的。顺应科学发展和社会需要,北大地理学在不同历史时期相继率先开拓出综合自然地理、城市规划、环境保护、遥感等重要方向。进入21世纪,北京大学进行院系调整,原地理系主体进入了环境学院,形成资源环境与地理学系、城市与区域规划系、生态学系、历史地理研究所四个研究和教学实体,遥感和地理信息系统进入了地球与空间科学学院。北大地理学科在新的组织框架下,以地理科学研究中心为纽带,继续高举地理学大旗,促进北京大学地理科学整体水平的提高,推动北大地理学与国内外同仁的学术交流与合作,为建成一流的地理学教学与科研基地而努力。

作为实现上述目标的一种途径,我们与科学出版社合作推出《北京大学地理科学丛书》,至今已陆续出版了多部著作,并且一再重印,表明它确实符合学界和社会的需求,并逐步形成了自己的品牌。我们将继续把这件很有意义的事情做得更大,做得更好。兼收并蓄是北大的传统,我们欢迎国内外同仁也能加盟。

北京大学地理科学研究中心

2004年6月5日

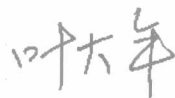
序 言

改革开放 20 多年来,中华大地发生了翻天覆地的变化,最令人瞩目的变化之一就是每年都有数以百万计的农村人口迁入城市,成为城市居民,这就是城镇化的过程。当今中国不论是干部,还是普通老百姓,不论是从国家利益出发,还是从个人的切身利益出发都在关注城镇化问题。全国人民上上下下取得了共识:城镇化是中国实现现代化的必由之路。中国内地的城镇化水平大约是 38%,专家们估计,到 2050 年中国实现现代化的第三阶段目标时,中国的城镇化水平应该达到 55%左右;也就是说,将会新增三四亿城镇人口。新增的城市人口应该如何分布,多少分布在北京、上海、天津、武汉、沈阳、西安等特大城市或超大城市,多少分布在人口 100 万至 200 万的大城市,多少分布在中小城市,多少分布在小城镇才算合理呢?各种等级大小的城市在数量上和空间上应该如何配置才算合理呢?才符合科学发展观的要求,才能和谐发展呢?这既是一个复杂的理论问题,又是一个迫切的实际问题。

城市是人们在生产、经济、文化、政治乃至军事等活动中长期形成的人口聚集形态,它是人与自然环境和资源状况以及人与社会长期相互作用的产物,因而城市是一个非常复杂的“巨系统”。我们姑且不全面说整个城市系统,就单单说上面提到的几个问题,就足够有“复杂性”了。鉴于城镇化问题的重要性和复杂性,近三十年来,城市地理学得到迅速的发展,国内许多大学都开设了城市地理学的课程,许多教材和专著相继问世,对中国城市地理学的发展以及中国城镇化建设都起到了积极的作用。这些教程和专著大多侧重于城市地理学的基本概念和知识论述,而专著多侧重城市的功能分析和具体的区域经济的研究或规划。虽然它们对城市的等级系统在数目上的分配以及在空间上的分布规律有所描述,但是大多限于简单介绍国外的经典结论,而缺少实际资料的论述和深入的理论分析。以致有些读者会问:“城市是个复杂的巨系统是不言自明的事实,真实的城市系统有规律可循吗?有定量的数学结构吗?在空间上有定量和规则形态的几何结构吗?如果有的话,这些规律是普遍的、放之四海皆准的吗?城市系统是长期历史发展的产物,那么它是永恒的吗?也就是说,用今天发现的规律能够预测未来吗?”如此等等,都是城市地理学最基本的理论问题。为了回答这些问题,一方面是要开展具体的城市系统的研究,不能局限于国外的经典模式和概念;另一方面是开展深入的、更深层次的理论分析。

十多年前,我出于全国政协常委“参政议政”的责任感,关注中国的城镇化问题,从而重新激发起中学时代对经济地理的兴趣,把自己的专业——结晶化学研究暂停下来,“反串”城市地理学,居然揭示出中国和世界城市有对称分布的特征。此间,我阅读了国内城市地理学专家的著作,结识了一批城市地理学的专家,认识了陈彦光先生。陈彦光先生的研究方向恰恰就是我上面所说的城市地理学的基本问题。几年前,我有幸在北京大学主持陈彦光先生的博士学位论文答辩,论文内容之丰富,理论阐述之深刻给我留下深深的印象。在答辩会上,我就建议他,把学位论文的内容加以补充,在条件成熟的时候,以专著的形式公开出版。现在这部专著《分形城市系统:标度、对称与空间复杂性》终于出版了,我相信它会受到城市地理学界的欢迎,特别是研究生和老师们的欢迎。我欣然承诺为它作序。

中国科学院院士



2007年1月8日

前 言

复杂性原本是 20 世纪的科学任务之一,但是,20 世纪的科学家没有完成这个“复杂”的研究课题,于是“探索复杂性”就自然而然成为新世纪重要的科学旗号。地理学意义的空间复杂性仅仅是“复杂性”领域中的一个分支。至于是否真的存在一个叫做“复杂性”的学科,学术界见仁见智,众说纷纭,也不可能形成不争的共识。复杂性要想成为一门严格意义的科学,复杂系统必须具备某些共性。正如凡是金属都能导电、凡是生命都具有 DNA 的双螺旋分子结构一样,是否凡是复杂系统都具有某种共同特征与结构?这是复杂性研究的基本理念之一,但目前没有人能够给出权威的判断。

对于复杂性研究本身而言,寻找共同的属性和规律当然重要,但对于科学探索来说,能否找到共同的复杂特性不是关键问题。当年系统科学兴起的时候,人们也是满怀信心地寻找系统——诸如交通网络之类的共性和普适定律。结果令人非常遗憾,人们并未找到系统的共同属性。尽管如此,许多学科却因为系统研究而发展起来,科学因而取得了长足的进步。科学探索固然要有明确的目标,但目标本身是否实现并不重要。毕竟科学研究倚重的是过程,最终的发现和成果可能完全出人意料。就像一个出门人的初衷是去淘金,结果没有找到黄金却意外地得到了钻石。我们既不能因为此人没有找到金子就否定金子的存在,也不能因为找到的不是金子就断言他所获得的钻石没有价值。

从某种意义上讲,当年的系统研究是今天复杂性探索的学术源流之一。与系统研究类似,复杂性探索是一个令人激动的课题,也是一种容易泛起学术泡沫的“复杂”领域。在真知灼见产生的同时,各种荒诞不经的奇谈怪论也甚嚣尘上。然而,我们不能因为作物不可避免地生虫而荒弃土地,也不能因为网络传递病毒而抛弃电脑。针对具体的实证对象、采用有效的数理方法是免于夸夸其谈的有效途径,为此作者借助分形等后现代数学工具,选择城市地理学系统的空间复杂性,开展具体而实在的研究工作。复杂系统研究的常见方法是数学建模和计算机模拟,西方地理界在模拟方面早已走在前列。元胞自动机(cellular automata, CA)和地理信息系统(geographic information system, GIS)是模拟空间复杂性的技术主角,有关工作方兴未艾,但前景不太明朗。CA 是与图灵(Turing)机等价的模型,模拟计算能力可以达到极致,用它模拟城市形态和结构,毫无疑问不成问题。但是,有关研究有三个不可忽视的重要缺陷,其一是模拟规则的任意性太大,其二是模拟过程的可重复性较差。模拟分析还有一个先天不足,就是在揭示概念这一更高层次的问题方面功能非常有限。

数学理论是探讨复杂系统的重要模式之一。只有与数学方法有效结合,计算机模拟分析才能发育健全。关于数学与模拟的有机结合,西方物理界为我们提供了良好的研究范例。本书主要倚重数学方法,旨在从借助模型描绘空间复杂系统的共同特征。分形是探索空间复杂性和奇异性的重要工具,本书着重采用分维刻画城市地理系统的时空演化规律。

全书分为 8 章,第 1 章具有综述性质,主要是论述空间复杂性问题的来龙去脉、研究

现状与今后的发展趋势,同时讨论了一些基本概念问题。首先从一般复杂性研究的概述出发,将问题逐步引入空间复杂性研究,然后重点讨论城市地理学意义的空间复杂性问题。这一章讲述了空间复杂性的本质、分维在刻画空间复杂性中的作用、空间复杂性的研究方法、文章计划探讨的主要内容,以及本书开展研究工作的几个准则。

第2章主要阐述文章的自然哲学基础,着重探讨对称概念和标度律。从“变换中的不变性和不变中的可公度性”思想出发,论证地理理论研究理当根据一定的对称准则寻找科学的普适法则。由于不同学者对普适定律有不同的理解,本章对易混和易谬问题进行了必要的澄清。利用地理学的引力模型与物理学的引力模型的对比分析,揭示地理尺度与经典物理尺度的对称性分歧,从而明确地理学规律应该是怎样一种科学规律,并在理论上将地理空间分为三个层次:实空间、相空间和序空间。作者将数学意义的可公度性概念发展为一个地理哲学概念,这个概念对我们理解分维的地理意义具有辅助作用。这一章的内容既是全书的总纲,也为最后的理论总结做出了必要的铺垫。

第3章进入全书的正题,主要探讨城市地理系统的异速生长定律及其广义分形性质。首先从一般城市地理系统的动力学方程出发,导出关于城市系统的异速生长方程,明确城市系统异速生长的“先验”性质;根据实际观测的变量特征将异速生长分为时间方向上的动态相似模型、空间上的几何测度模型以及等级上的弹性相似模型。借助三种异速生长模型,在经验上将地理空间分为三个层次,与前面的理论划分形成对照。接下来研究了城市-乡村人口演化的异速生长过程、城市人口-城区面积的异速生长特征,并且导出关于城市结构与功能的 Cobb-Douglas 函数。利用城市内部结构和城市体系的异速生长规律的相似性发展了一套关于城市系统分维比值的递阶分析方法。这一章的地理空间分类为后续三章的理论探讨和实证研究明确了思路。

第4章是时间方向的动态研究,即城市化过程的相空间分析。城市化过程本质上是一种相变过程,乡村人口分布状态逐步向着城市人口分布状态转化。当系统的相变达到自组织临界状态的时候,就会出现位序-规模分布,因此位序-规模分布可谓是城市化过程处于临界状态的一种幂律分布特征和宏观统计规律。从城乡人口迁移转换模型推导出城市化水平的 Logistic 方程,Logistic 方程是混沌研究的典型范例。借助城、乡人口非线性相互作用模型模拟出周期振荡、分叉和混沌图式,结果与基于 Logistic 方程的分叉-混沌演化过程完全一致。这一章提出了城乡人口分布的多分形模型,该模型从城市-乡村二状态的角度刻画了空间复杂性的基本特征。最后探讨了中国的城市化动力学,给出了关于城市化非线性过程的分析范例。

第5章是本书的重点之一,主要开展城市系统的空间结构研究,属于直观的地理空间即实空间分析范畴。本章的讨论从中心地理论出发,中心地是空间网络与等级体系交接的理论界面,从这里可以同时看到实空间和序空间两个层次。首先分析经典的中心地理论,将 Christaller 的模型抽象为一组指数式标度定律;然后将这组标度定律演绎为幂次分形模型,从而揭示了中心地系统的分形结构;并且借助 Christaller 的观测数据计算德国南部中心地的分维数值,给出了分形中心地系统分析范例。接下来提出城市体系空间结构的三角点阵模型,利用这个模型将中心地模式由确定型推广到随机分布格局,据此完成了中心地晶态结构的非晶化工作。在三角点阵模型的基础上建立关于城市体系的空间关联函数,利用河南省的城市体系从经验上验证了这个函数。初步提出了自组织城市网络的

概念,借助本章发展的空间关联函数证实了自组织城市网络的无标度性质,而无标度性是城市网络空间复杂性的重要判据之一。由于简单维数不足以全面描述城市系统的空间复杂性特征,本章提出了城市空间结构的多分形模型,并基于河南省城市系统给出了计算实例。考虑到城市体系依赖于空间相互作用,本章基于分形思想探讨了城市引力模型,借助时变函数和时滞参数将引力模型推广到全新的形式。由于时滞是非线性的原因之一,时滞的出现意味着空间复杂性。借助 Fourier 变换将城市引力的空间关系推广到完整的时空过程分析,为开展城市相互作用的功率谱分析和复杂性探索开拓了思路。最后运用中国的城市网络数据给出了计算与分析的典型范例。

第 6 章的关于城市等级体系分形递归研究,即序空间分析,是本书的关键内容。首先从城市等级体系出发,将基于中心地的 Beckmann 模型和关于城市等级体系的 Davis 二倍数规律推广到一般,得到关于城市等级体系的任意倍数规律;然后从这个任意倍数规律出发,基于离散变量推导出关于城市位序-规模分布的三参数 Zipf 定律,并且揭示了模型参数的分维性质。接下来修正关于城市等级体系的 Steindl 模型,将其转换为异速生长模型,从而得到以城市“年龄”为变量的标度定律,与前述广义 Beckmann-Davis 模型形成时空对应;然后基于连续变量形式导出三参数 Zipf 模型,与前面基于离散变量推导的结果形成对照。将城市人口-城区面积异速生长与三参数 Zipf 模型联立变换,得到关于城市等级体系的第三个指数型标度定律,至此完成了城市等级体系分形递归模型的理论建设。这一组标度定律与基于中心地网络的标度定律形式上完全一样,变量含义稍有区别。从这些标度定律出发可以导出幂次分布模型,据此给出了城市系统简单性与复杂性的内在联系。接下一步将三参数 Zipf 模型推广到多重 Zipf 维数谱,然后提出了关于城市等级体系的多分形模型,多分维谱在刻画空间复杂性方面显然更有优势。这一章借助世界城市数据和美国城市数据给出了关于标度模型和幂次定律的分析范例,基于美国城市数据给出了城市等级体系多分形的计算范例。最后将理论、模型与方法应用于中国城市规模数据,给出了关于中国城市等级体系的研究范例。

上述三章分别从城市系统的时间、空间和等级角度发展了关于城市系统的指数型标度律,这一组标度定律可以与一组具有分形性质的幂次定律相互转换。由于指数模型与简单、随机和有序有关,而幂次定律与复杂、结构和有序有关,两种定律的相互转换关系暗示着大自然的某种秘密。为了进一步揭示标度定律的理论基础,第 7 章分别借助效用最大化和熵最大化推导了贯穿全书的标度模型:效用最大化从微观层面支持标度定律,而熵最大化则从宏观层面支持标度定律。本章还根据标度定律的内在属性将空间复杂性分为外部复杂性和内部复杂性,分别用城市频率分布和城市规模分布的指数式标度模型进行表征。考虑到现实中的城市演化信息熵未必达到最大,本书提出熵最大化存在反动力量的理论猜想。根据猜想将指数分布推广到更为一般的 Weibull 分布,然后借助河南城市给出了分析范例,通过模型参数的变化规律进一步证实了城市等级体系熵与效用最大化的演化趋势。

第 8 章是全书正文的最后部分,重点探讨城市地理系统的对称性质,以期从理论上解析城市等级系统的标度定律,从对称破缺的角度揭示空间复杂性的数理本质。通过城市体系指数式标度定律以及与之有关的幂次定律的定性分析和数学变换,揭示了城市系统的内在对称性质,包括等级方向上的平移对称性、镜像对称性和时空结构上的伸缩对称

性;进而讨论广义对称包括时空对称性、人地对称性乃至城乡对称性。由于每一种对称性都与绝对不可观测量有关,而绝对不可观测量都意味着某种守恒律,作者循着这种思路探讨了地理系统的能量-信息相对守恒规则以及标度定律转换的宇称守恒特征,从而加深了前述各章有关内容的理论基础。地理模型的对称主要表现在宏观层面,微观层面更多地表现为对称破缺。通过对称破缺分析,发现空间复杂化主要源于微观层次的自组织行为。这一章将分形模型、混沌轨迹都抽象为一组标度定律,这组标度模型与本书描述城市系统的标度模型具有相同的形式。通过标度定律的类比,我们可以对混沌、分形和复杂性有一个更为清晰的认识。

最后一部分是对全书的简略总结。本书主要体现为一种探索的过程和一个分析框架,并在这个框架中展示了大量的模型、范例、证明、计算和各种推理。书中内容看来似乎零乱庞杂,但始终围绕标度律与幂次定律的转换关系为逻辑线索,将城市地理空间分析表征为标度、对称和维数等几个方面。有关复杂性研究的重要问题,本书大多从空间复杂性的角度进行了理论创新,这些开创性的工作包括简单与复杂(指数与幂律)、整体与局部(多分形模型)、宏观与微观(熵与效用、标度定律、对称与对称破缺)、有序与无序(熵与信息的转换、指数与幂律)、静态与动态(模型与参数)、对称与对称破缺(宏观对称与微观对称破缺)等理论关系的模型建立与规律的发现。由于空间复杂性暂时不可能形成某种定论,本书也不想给出任何确定的结论。只要本书对相关的研究具有启发意义和参考价值,笔者的劳动就算没有白费精力。

本书的不足之处是显然的,正如笔者研究的对象一样——宏观有序而微观无序:在全局性结构上逻辑层次是分明的,但各章各节的具体内容很难完全理清顺序。不论怎样,形式对于一部著作固然重要,但科学研究的根基在于实质。毕竟,历史上很多重要的科研成果都以极其普通甚至纷乱的方式表达出来。一棵树只要开花结果了,谁会追究这棵树的体态是否优美?对于笔者而言,全书的整理是一个较大的工程,纰漏和失误在所难免。笔者衷心欢迎读者批评指正。任何建设性的善意批评,笔者都会在本书再版和后续研究中诚恳地反映出来。

作 者

2007年7月

目 录

序言

前言

第 1 章 城市系统的空间复杂性引论	1
§ 1.1 复杂性研究概况	1
§ 1.2 认识空间复杂性	7
§ 1.3 空间复杂性的分维刻画	13
§ 1.4 空间复杂性的研究方法	17
§ 1.5 本书的框架与纲领	21
§ 1.6 结语	34
第 2 章 标度、对称与城市地理规律	36
§ 2.1 分形:变换中的不变性	36
§ 2.2 分维:不变中的可公度性	39
§ 2.3 广义地理空间及其分形维数	49
§ 2.4 引力模型的哲学思考	55
§ 2.5 本章小结	59
第 3 章 异速生长与城市地理空间	61
§ 3.1 异速生长隐含的标度关系	61
§ 3.2 异速关系的先验性质和模型分解	64
§ 3.3 异速生长关系的几个典型的应用	67
§ 3.4 异速生长与城市系统结构的 C-D 函数	76
§ 3.5 异速生长与城市系统维数比值分析	83
§ 3.6 本章小结	98
第 4 章 相空间分析:城市化的空间动力学	100
§ 4.1 城市化:一种复杂的相变过程	100
§ 4.2 城市化的 Logistic 过程	104
§ 4.3 城乡空间格局的多分形模型	121
§ 4.4 中国城市化过程的动力学分析	127
§ 4.5 本章小结	140
第 5 章 实空间分析:城市体系与自组织城市网络	143
§ 5.1 中心地的分形结构	143
§ 5.2 三角点阵模型与无标度网络	158
§ 5.3 城市空间体系的随机集聚分形	171
§ 5.4 城市空间体系的多分形结构	176
§ 5.5 城市空间相互作用及其功率谱特征	189

§ 5.6	自组织城市网络的时空演化图式	213
§ 5.7	中国城市的空间关联和无标度特征	217
§ 5.8	本章小结	227
第 6 章	序空间分析:城市等级体系的分形递归	229
§ 6.1	城市位序-规模法则的模型重构	229
§ 6.2	城市等级体系的时空对称性	243
§ 6.3	城市等级体系的标度律	258
§ 6.4	城市等级体系的多分维谱	263
§ 6.5	中国城市等级体系的标度分析	273
§ 6.6	本章小结	280
第 7 章	城市系统标度律的物理基础	281
§ 7.1	分形、混沌、标度律与复杂性	281
§ 7.2	效用最大化与标度定律	296
§ 7.3	熵最大化与标度定律	302
§ 7.4	效用与熵最大化的对偶转换模型	310
§ 7.5	效用的本质与最大熵的反动力量	318
§ 7.6	本章小结	329
第 8 章	城市系统奇异对称性的空间分析	331
§ 8.1	对称、秩序与城市地理规律	331
§ 8.2	城市地理系统的奇异对称性	340
§ 8.3	对称破缺与空间复杂化	351
§ 8.4	城市系统的对立统一法则	364
§ 8.5	本章小结	373
结束语		375
参考文献		379
主要数据来源		397
作者索引		398
主题索引		402
致谢		410

插图目录

图 1.1	空间充填的 Peano 曲线	17
图 1.2	空间复杂性研究的三重方法论	21
图 1.3	城市地理系统与空间复杂性的研究内容	24
图 1.4	英国城市规模分布图式(1981 年)	27
图 1.5	城市规模分布图式(2002 年)	28
图 1.6	城市系统空间复杂性研究的思路图	31
图 2.1	地理空间的分类体系	50
图 3.1	美国城市-乡村人口异速生长关系图式(1790~1960 年)	68
图 3.2	郑州城市人口规模与河南省城市总人口之间的双对数关系(1990~1999 年)	70
图 3.3	北京城市形态的自相似变化特征(1999 年)	74
图 3.4	基于位序-规模分布的中国城市人口-城区面积异速生长关系图式(2000 年) ...	75
图 3.5	基于等级结构的中国城市人口-城区面积异速生长关系图式(2000 年)	76
图 3.6	自相似的的生长分形图式(Vicsek, 1989)	79
图 3.7	自仿射的生长分形图式(Vicsek, 1989)	79
图 3.8	郑州市城市人口-城区面积及其要素-输出关系的双对数坐标图式	82
图 3.9	城市系统维数比值的递阶分析框架	86
图 3.10	研究区的范围及杭州城镇体系(局部)	88
图 3.11	杭州城镇体系年末总人口异速生长关系图式示例(1975~2000 年)	89
图 3.12	杭州城镇体系工业总产值异速生长关系图式示例(1975~2000 年)	90
图 3.13	城市年末总人口-城市工业总产值异速生长关系图式	92
图 3.14	杭州城镇体系基于不同测度的特征向量及其组合权重柱形图	93
图 3.15	杭州城市体系各种权重随着到中心市的距离的变化图式	94
图 3.16	杭州城市体系综合发展水平的距离衰减图式(2000 年)	96
图 3.17	杭州都市区的范围估算结果(2000 年)	97
图 4.1	SOC 的三种状态与三个标志	103
图 4.2	美国城乡人口比随时间变化的单对数坐标图	106
图 4.3	美国城市化水平的 Logistic 过程(1790~1960 年)	108
图 4.4	Logistic 过程与周期变化:从定态到混沌($x_0=0.01$)	109
图 4.5	帐篷映射:从定态到混沌($x_0=0.01$)	110
图 4.6	周期倍增分岔图式——一种对称破坏过程(局部)	111
图 4.7	借助城-乡相互作用模型模拟城市化水平的增长过程:从定态到混沌	115
图 4.8	城市化水平的 5 周期振荡:一种特殊的混沌状态	115
图 4.9	美国城市化水平的 Logistic 过程(1790~1960 年)	118

图 4.10	美国城市化过程中城、乡人口和总人口变化的数值模拟曲线(1790~2400 年)	120
图 4.11	美国城市化水平的数值模拟曲线(1790~2400 年)	120
图 4.12	美国城乡人口格局的多分形图式(1990 年)	124
图 4.13	美国城乡人口多分形结构的 $f(\alpha)$ 单峰图像(1990 年)	124
图 4.14	中国城乡人口格局的多分形图式(2000 年)	126
图 4.15	中国城乡人口多分形结构的 $f(\alpha)$ 单峰图像(2000 年)	127
图 4.16	中国城市化过程的相空间及其异速生长图式(1940~2000 年)	130
图 4.17	中国城市化过程的时间序列及其拟合曲线(1940~2000 年)	130
图 4.18	基于不同参数的中国城市化水平模拟曲线(1949~2100 年)	133
图 4.19	中国城市化水平的频谱图(1949~2000 年)	134
图 4.20	基于 Logistic 曲线的中国城市化水平的残差分布图(1949~2000 年)	135
图 4.21	中国城市化水平的残差频谱图(1949~2000 年)	135
图 4.22	中国城乡人口和总人口的观测值和模拟值变化曲线	138
图 4.23	中国城市化水平的观测值和模拟值变化曲线	139
图 4.24	城市、乡村之间的捕食-牺牲关系数值模拟图	140
图 5.1	中心地空间结构与等级体系($k=3$ 系统)	144
图 5.2	中心地与分形景观的等价变换	146
图 5.3	城市空间体系的 Koch 雪花模型(前三步)	147
图 5.4	中心地体系分布的三轴平面坐标系局部	150
图 5.5	南德中心地数目依等级而变化的单对数曲线	152
图 5.6	典型研究区中心地数目与市场区半径的双对数坐标图	153
图 5.7	美国不同等级城市规模和相应城市数目的双对数坐标图(包括异常点)	156
图 5.8	美国不同等级城市规模和相应城市数目的双对数坐标图(剔除异常点)	157
图 5.9	城市空间体系的三角点阵模型	159
图 5.10	城市空间关联与小盒覆盖的转换示意图	162
图 5.11	河南省 17 个主要城市的空间分布	164
图 5.12	河南省城市体系-交通网络空间关联的无标度特征	168
图 5.13	回转半径示意图	172
图 5.14	以郑州为中心的半径体系示意图	173
图 5.15	回转半径与城市数目的双对数坐标图	174
图 5.16	平面规则多分形的生成图式(前 3 步)	178
图 5.17	河南县城及其以上级别的城镇分布简图	181
图 5.18	河南省城市空间体系的容量维与信息维图式	183
图 5.19	河南省城镇体系的多分维和奇异谱曲线	185
图 5.20	$f(\alpha)$ 随 $\alpha(q)$ 变化的单峰曲线	186
图 5.21	河南水系分布的双对数曲线	188
图 5.22	京津沪杭四城市的地理位置	196
图 5.23	京津沪杭四城市的非农业人口增长曲线(1949~2004 年)	196