

吴 浩 陈晓玲 赵红梅 著

# 土地利用分形模拟的空间 尺度效应研究



科学出版社

# 土地利用分形模拟的空间 尺度效应研究

吴 浩 陈晓玲 赵红梅 著

科学出版社

北 京

7-088-00000

32

## 内 容 简 介

空间尺度效应是遥感影像与分形模型耦合模拟分析土地利用变化的关键问题,也是当前国内外学界对空间尺度研究的热点之一。本书首先对城市土地利用空间格局分形模型的发展进行了回顾,深入剖析了分形模型的构建和模拟过程所存在的空间尺度效应的两个核心问题。接着在阐述现有三种城市土地利用分形维数的基础上,引出了作者提出的一种新分形维数——间隙度维数,以此构建一个完整的、多视角的城市土地利用分形模型,并详细探讨各维数的特点、计算方法及相互之间的关系。本书系统论述了城市土地利用分形模拟过程中所存在的测量尺度的选择、作用尺度的识别和尺度转换模型三个无法回避的空间尺度效应问题,重点阐述了采用具有全方向搜索机制变异函数选择最优分辨率的遥感数据源和基于遗传算法识别分形维数有效作用范围的两种尺度效应模型与相应的算法,并在此基础上以分形维数作为“桥梁”进行尺度转换,推导出城市土地利用线状要素和面状要素的分形尺度转换模型,建立起地物目标空间要素特征与空间分辨率关系的定量表达关系式。最后以武汉市武昌区为例,对相关理论进行了模型验证和应用研究等相关工作。

本书可供从事自然地理学、土地利用变化、地理国情监测、地理信息系统、遥感科学等地球信息科学领域研究的科研人员使用,也可供高等院校有关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

土地利用分形模拟的空间尺度效应研究/吴浩,陈晓玲,赵红梅著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-037649-7

I. ①土… II. ①吴…②陈…③赵… III. ①城市土地-土地利用-分形理论-尺度效应-研究-中国 IV. ①F299.232

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 116189 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:李 影  
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

骏立印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

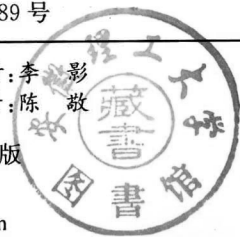
2013 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张:9

字数:166 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



# 前 言

土地利用空间格局是地球表层系统最重要的景观标志，是一种典型的复杂非线性地理空间现象。随着世界各国城市化进程的日益加快，土地利用空间格局发生了快速而显著的变化，由此而形成的土地配置方式也呈现出多样性。土地利用空间格局的形成不仅受自然因素影响，而且受社会经济因素的干扰，因而具有高维性、复杂性和综合性等非线性特征：在微观上它是土地图斑空间个体自然相互作用的结果，在宏观上它是人为土地利用配置方式造就的城市用地在整体空间上的必然。传统经验模型和统计分析模型对这种复杂地理现象的表达具有较强的局限性。以不规则自相似理论为核心的分形几何在揭示城市土地空间特征的规律性、层次性和标度不变性方面已经表现出很强的优势，迅速地成为土地利用空间格局建模的重要方向之一。特别是遥感对地观测技术的迅速发展，已经在光谱分辨率和时间分辨率方面都取得了极大的发展，使得遥感在土地利用空间格局分析中发挥着前所未有的重要作用。随着新一代全球土地计划的深入进行，进一步提高定量遥感的精度和多尺度遥感信息的综合应用程度，是利用遥感技术来开展土地利用空间格局分形模拟研究的必然要求和趋势。在利用分形几何来模拟土地利用空间格局的过程中，无论是用于提取土地利用信息的原始遥感影像，还是通过分形维数计算得到的结果，都在很大程度上受到空间尺度效应的影响，主要表现在以下三个方面：①采用不同空间分辨率的遥感影像提取土地利用信息，由于像元尺度差异，导致所提取的土地利用信息在数量和结构上都将发生变化，因此有必要从 MODIS、AVIRIS、TM/ETM+、SPOT 到 IKONOS、Quickbird 等多种不同空间分辨率的遥感影像中，选择合适的空间尺度数据来较准确地获取土地利用信息，确保土地利用空间格局建模的起点正确；②土地利

用空间格局作为一种复杂的地理空间现象,本身也具有较强的空间尺度依赖性,分形维数的结果所表达的空间分布规律及与其他因素的耦合关系,也只有在特定的空间尺度上才成立;③由于长时间跨度的同源(同一空间分辨率)遥感数据获取较困难,只能从非同源遥感数据中解译获取城市土地利用空间格局,但是不同空间尺度下的空间格局不具有直接的可比性,因此需要将不同空间尺度上反映的土地利用格局特征通过有效的尺度转换方法归一化到相同的尺度上,才能对这些跨尺度的结果进行对比分析。

本书集中于土地利用空间格局这一基础要素,针对其分形模拟过程中的空间尺度效应机理展开研究。通过对上述三个问题的深入研究,探索土地利用空间格局分形模拟过程中由于空间尺度效应引起的分析不确定性,从而提高模拟的精确性和有效性,对城市土地利用空间格局进行跨尺度的模拟和表达,在完善土地利用空间格局分析理论和客观地辅助土地资源优化配置等方面,都具有十分重要的科学意义和应用价值。

全书共7章。第1章绪论,对城市土地利用空间格局分形模型的研究进行回顾,深入剖析了分形模型的构建和模拟过程所存在的空间尺度效应的两个核心问题,介绍了本书的主要研究内容、研究方法和路线。第2章建立多视角城市土地利用空间格局分形模型,在简单介绍分形基本概念和计算方法的基础上,系统地总结了地理空间模拟常用的边界维数、半径维数、信息熵维数三种指标,并引出了一种新分形维数——间隙度维数,用于定量表达城市土地分布的自组织的聚簇特征。以此四个分形指标构建了一个完整而有机的多视角城市土地利用分形模型,并详细探讨各维数的特点、计算方法及相互之间的关系,实现对城市土地利用现状和空间格局全面的模拟和分析。第3章研究用于分形模型最优测量尺度遥感影像选择的基本理论与方法。在详细阐述目前常用的平均局部方差和变异函数两种最优测量尺度选择方法的基础上,对其原理、计算过程及适用性进行详细讨论,提出采用全方向搜索策略对变异函数进行加强改良,以球状模型回归计算过程中的最佳拟合度作为评价最佳

尺度的准则,并给出其详细的算法处理流程。第4章开展分形模型的最适合作用尺度研究,明确分形维数有效的作用尺度就是分形维数的无标度区间,然后重点阐述目前常用的人工判断法、相关系数检验法和强化系数法的基本原理,分析其优缺点,提出采用遗传算法来求解无标度区间的流程,对求解无标度区间的编码机制、初始群体的设计、适应度函数、选择、交叉和变异函数及限制条件进行分析。最后通过实验来进行对比验证,结果表明遗传算法较普通方法在效率和精度上具有较大优势。第5章构建基于分形维数的空间尺度转换模型,通过总结比较常规尺度转换机制和方法,提出基于不同尺度上分形维数保持恒定这一特点建立城市土地利用空间特征的线状和面状尺度转换模型,实现对地物目标空间特征与空间分辨率关系的定量表达。第6章以武汉市武昌区为例对相关理论进行模型验证和应用研究。基于平均局部方差和全方向搜索的变异函数所得到的对应空间分辨率,对原始遥感影像重采样后统一分类解译,分别从局部分类效果和整体分类精度上进行对比,然后从复杂性、向心性、均衡性和聚簇性四个方面对武昌区土地利用空间格局进行系统研究,并验证典型地物的线状和面状分形尺度转换模型。第7章对全书研究工作进行了系统总结,并指明今后土地利用空间尺度效应研究的发展方向。

本书在研究过程中先后得到了北京大学邬伦教授、南京大学李满春教授、香港理工大学史文中教授、南京师范大学朱长青教授、中国地质大学(武汉)薛重生教授、华中师范大学周勇教授、中国科学院测量与地球物理研究所杜耘研究员、湖北省测绘地理信息局何保国教授级高工及武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室、武汉理工大学资源与环境工程学院许多老师的热情指导,研究生付东杰、高丽萍、许剑辉、李清清、袁凌云、周璐、陶婧、李岩、孙钰蓉、黄创、程志萍、阮明浩、严冬也先后参与了相关文字材料的整理和统稿工作,在此一并表示衷心的感谢。

本书的出版得到了国家高技术研究发展计划(863计划)重点项目子课题(2012AA12A304)、国家自然科学基金委员会创新研究群体

科学基金项目 (41021061)、水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07105005)、香江学者计划 (XJ2012036)、中国博士后科学基金第五批特别资助项目 (2012T50691)、国家自然科学基金项目 (40901214、41071261、41101341)、中国博士后科学基金面上资助项目 (2013M531749)、国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流项目 (41191240373)、武汉市青年科技晨光计划项目 (201150431093) 和中央高校基本科研业务费专项基金 (2013-IV-040) 的联合资助。

由于作者水平所限, 书中难免存在疏漏和不足之处, 敬请读者批评指正。

作 者

2012 年 1 月



# 目 录

## 前言

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                 | 1  |
| 1.1 研究背景及意义 .....              | 1  |
| 1.2 土地利用分形模型的研究进展 .....        | 2  |
| 1.2.1 土地利用模型概述 .....           | 3  |
| 1.2.2 土地利用分形模型研究现状 .....       | 9  |
| 1.2.3 土地利用分形模型存在的建模问题 .....    | 12 |
| 1.3 土地利用分形模型中空间尺度的研究进展 .....   | 13 |
| 1.3.1 最优测量尺度的选择问题 .....        | 15 |
| 1.3.2 最适作用尺度的判断问题 .....        | 18 |
| 1.3.3 建立有效尺度转换模型问题 .....       | 20 |
| 1.4 研究内容和技术路线 .....            | 21 |
| 1.4.1 研究内容及关键问题 .....          | 21 |
| 1.4.2 研究方法及技术路线 .....          | 23 |
| 第 2 章 多视角城市土地利用空间格局分形模型 .....  | 25 |
| 2.1 分形概述 .....                 | 25 |
| 2.1.1 分形的概念 .....              | 25 |
| 2.1.2 分形的几何特征 .....            | 26 |
| 2.1.3 分形维数 .....               | 29 |
| 2.2 三种典型的城市土地利用空间格局分形维数 .....  | 31 |
| 2.2.1 边界维数 .....               | 31 |
| 2.2.2 半径维数 .....               | 33 |
| 2.2.3 信息熵维数 .....              | 34 |
| 2.3 面向土地利用空间聚簇特征表达的间隙度维数 ..... | 36 |
| 2.4 本章小结 .....                 | 39 |



|                              |    |
|------------------------------|----|
| <b>第 3 章 分形模型的最优测量尺度研究</b>   | 41 |
| 3.1 最优测量尺度概述                 | 41 |
| 3.2 平均局部方差法                  | 46 |
| 3.2.1 平均局部方差法的基本原理           | 46 |
| 3.2.2 基于平均局部方差法的尺度选择         | 47 |
| 3.3 普通变异函数法                  | 51 |
| 3.3.1 变异函数基本概念               | 51 |
| 3.3.2 基于变异函数的尺度选择            | 53 |
| 3.3.3 变异函数中的尺度参数估计           | 55 |
| 3.4 改进的变异函数法                 | 59 |
| 3.4.1 变异函数的方向性               | 59 |
| 3.4.2 带有全方向搜索的变异函数           | 59 |
| 3.5 本章小结                     | 62 |
| <b>第 4 章 分形模型的最适合作用尺度研究</b>  | 63 |
| 4.1 最适合作用尺度概述                | 63 |
| 4.1.1 最适合作用尺度定义              | 63 |
| 4.1.2 分形模型的最适合作用尺度——无标度区间    | 63 |
| 4.1.3 求最适合作用尺度的数学原理          | 66 |
| 4.2 最适合作用尺度的选择方法             | 67 |
| 4.2.1 人工判断法                  | 68 |
| 4.2.2 相关系数检验法                | 68 |
| 4.2.3 强化系数法                  | 69 |
| 4.2.4 遗传算法                   | 70 |
| 4.3 实验与讨论                    | 74 |
| 4.3.1 实验数据的来源与预处理            | 74 |
| 4.3.2 常规方法计算的最适合作用尺度         | 75 |
| 4.3.3 遗传算法计算的最适合作用尺度         | 77 |
| 4.4 本章小结                     | 78 |
| <b>第 5 章 基于分形维数的空间尺度转换模型</b> | 80 |
| 5.1 空间尺度转换机制研究               | 80 |

---

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 5.1.1 尺度转换定义 .....         | 80         |
| 5.1.2 常规的尺度转换机制 .....      | 81         |
| 5.1.3 基于分形维数的尺度转换机制 .....  | 83         |
| 5.2 线状分形尺度转换模型 .....       | 84         |
| 5.3 面状分形尺度转换模型 .....       | 86         |
| 5.4 本章小结 .....             | 88         |
| <b>第6章 实例研究 .....</b>      | <b>89</b>  |
| 6.1 研究区域概况 .....           | 89         |
| 6.2 最优测量尺度的选择 .....        | 90         |
| 6.2.1 实验数据来源 .....         | 90         |
| 6.2.2 平均局部方差法 .....        | 90         |
| 6.2.3 带有全方向搜索的变异函数法 .....  | 93         |
| 6.2.4 结果对比分析 .....         | 95         |
| 6.3 城市土地利用空间格局的分形分析 .....  | 99         |
| 6.3.1 数据预处理 .....          | 99         |
| 6.3.2 城市土地利用空间格局分形分析 ..... | 100        |
| 6.3.3 结果讨论 .....           | 108        |
| 6.4 典型地物尺度转换模型的验证 .....    | 110        |
| 6.4.1 线状和面状要素的提取 .....     | 110        |
| 6.4.2 线状地物尺度转换模型的验证 .....  | 112        |
| 6.4.3 面状地物尺度转换模型的验证 .....  | 115        |
| 6.5 本章小结 .....             | 118        |
| <b>第7章 结论与展望 .....</b>     | <b>119</b> |
| 7.1 结论 .....               | 119        |
| 7.2 研究展望 .....             | 121        |
| <b>参考文献 .....</b>          | <b>123</b> |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

随着全球性环境问题的加剧,全球变化研究引起了越来越多学者的关注,已成为近年来国际上最活跃的研究领域之一。而在众多的全球变化问题中,作为具有自然和人文双重属性的土地利用/土地覆盖变化(land use and land cover change, LUCC)研究显得尤为重要,是目前全球变化研究的核心问题之一<sup>[1]</sup>。土地利用是人类根据土地的自然特性,按照一定的经济和社会目的,采取一系列技术手段对土地进行长期或周期性的经营管理和治理改造活动<sup>[2]</sup>,是人类为实现特定目的而采取的作用于土地的各种安排、行动和投入。对土地利用的研究,既包括地球表面上的土地使用状况,即土地的利用方式,还包括隐藏在利用方式之后的土地利用意图和目的,这些都是土地管理和规划所关注的焦点问题。

随着世界各国城市化进程的日益加快,城市土地利用空间格局发生了明显而快速的变化,其配置方式也呈现出多样性,但一些无序、畸形的城市土地利用配置方式给以空间为依托的城市带来了严重问题,例如,松散的城市布局加重了对基础设施配置的需求;拥挤的交通格局加大了对能源的需求;城市的无序扩张对全球食物安全带来了影响。这就要求我们通过对城市土地形态及各要素的结构变化进行分析,深入了解城市土地利用在平面、立体结构上的空间表征,揭示城市土地利用变化的基本规律,为土地资源的合理配置和有效利用及城市规划提供科学的参考依据。同时,对城市土地利用空间格局模型进行综合研究,有利于深入了解土地利用变化的过程和机理,不仅能够增进人类对土地利用变化原因和机制的理解;而且可以支持政府职能部门预测未来土地利用变化的速率及方式,保证国家及时、准确地掌握土地利用变化情况,为制定国民经济发展规划、计划和宏观决策提

供科学依据,实现城市的可持续发展。

国内外地理空间信息科学技术经过多年的发展后,在土地利用信息的获取、处理和土地利用数据的分析等方面取得了积极进展,但由于土地利用问题本身的复杂性,在土地利用变化机制的认识和全球与区域综合模型的建立等方面尚无实质性进展,仍然需要巨大的努力。特别是随着为期 10 年的国际地圈生物圈计划(international geosphere-biosphere programme, IGBP)与国际全球环境变化人文因素计划(international human dimensions programme on global environmental change, IHDP)联合拟订的 LUCC 研究计划在 2005 年 10 月的结束,新一代的全球土地计划(global land project, GLP)已经开始,作为其核心构成的土地利用变化模型将更注重要求具有动态、准确和创新的特点,而不是固定变量的土地利用变化模型,这些无疑将提出新的挑战。

综上所述,深入开展土地利用模型研究,不仅有利于制定合理的土地利用规划,减缓全球变化所带来的影响,实现土地资源优化配置,具有重要的社会现实意义,而且在完善城市土地利用空间格局模型方面也具有重要的学术价值。

## 1.2 土地利用分形模型的研究进展

土地利用研究一直是伴随着人类社会历史和自然科学技术的发展而变化的。20 世纪 90 年代以前的土地利用研究主要围绕土地利用调查、土地资源评价和土地利用规划等开展<sup>[3]</sup>。随着全球变化研究的不断发展,许多国家和科研组织都对土地利用变化作了深入的研究,土地利用变化研究进入了一个新的阶段,自 90 年代以来,遥感技术和地理信息系统技术的发展与应用推广,为土地利用数据的获取、储存、处理和分析提供了有力的技术支持,使得对土地利用的研究手段与方法同过去相比发生了翻天覆地的变化。与此同时,土地利用变化研究成为全球变化研究领域的重要组成部分,并更侧重于研究土地利用的数量、状态与利用方式的变化对生态环境状况及全球变化的影响。更重要的是,通过地学建模方法,使土地利用研究由定性分析向定量分析

转变,已形成了从经验/统计模型到机理模型、从静态模型到时空动力模型、从单纯的状态描述模型到趋势预测模型等一套完整而有序的土地利用模型研究体系<sup>[4~6]</sup>。

### 1.2.1 土地利用模型概述

模型是进行土地利用变化研究的有效手段<sup>[7]</sup>。城市土地利用模型是城市空间现象与过程的数学表达,每一种模型总是与当时的科学技术发展水平和社会应用需求相联系,同时也受到使用条件的制约,具有难以克服的局限性。土地利用模型具有很多分类方式,根据模型的不同数学特征,可以分为经验模型、统计模型和机理模型<sup>[8]</sup>;根据是否具有时间维数可以分为静态模型和动态模型;根据作用域不同可以分为空间模型、时间模型和时空模型<sup>[9]</sup>;根据分析功能的侧重点差异,可以分为描述模型、预测模型和驱动模型<sup>[10]</sup>。表 1.1 是国内外具有代表性的土地利用模型。

表 1.1 国内外具有代表性的土地利用模型

| 模 型      | 数学特征 |      |      | 时间维  |      | 作用域  |      |      | 分析功能 |      |      |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          | 经验模型 | 统计模型 | 机理模型 | 静态模型 | 动态模型 | 空间模型 | 时间模型 | 时空模型 | 描述模型 | 预测模型 | 驱动模型 |
| 景观指数模型   | ✓    | ✓    | ×    | ✓    | ×    | ✓    | ×    | ×    | ✓    | ×    | ×    |
| 空间统计模型   | ×    | ✓    | ×    | ✓    | ×    | ✓    | ×    | ×    | ✓    | ×    | ×    |
| 分形模型     | ×    | ✓    | ✓    | ✓    | ×    | ×    | ×    | ✓    | ✓    | ×    | ×    |
| 人工神经网络模型 | ×    | ×    | ✓    | ✓    | ×    | ×    | ✓    | ×    | ×    | ✓    | ×    |
| 马尔可夫模型   | ×    | ✓    | ×    | ×    | ✓    | ×    | ✓    | ×    | ×    | ✓    | ×    |
| 多元统计模型   | ×    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ×    | ✓    | ×    | ×    | ✓    | ×    |
| 系统动力学模型  | ×    | ×    | ✓    | ×    | ✓    | ×    | ✓    | ×    | ×    | ×    | ✓    |
| CLUE 模型  | ✓    | ✓    | ×    | ×    | ✓    | ×    | ×    | ✓    | ×    | ×    | ✓    |
| 元胞自动机模型  | ×    | ×    | ✓    | ×    | ✓    | ×    | ×    | ✓    | ×    | ✓    | ✓    |

景观指数模型来自于生态学领域,它是对景观组成单元的形状、大小、数量和空间组合的模拟,主要用于空间上非连续的类型变量数据。景观格局是自然或人为形成的一系列大小、形状各异,排列不同的景观要素,是各种复杂物理、生物和社会因子相互作用的结果<sup>[11]</sup>。景观指数模型是用来度量景观格局和空间异质性的主要方法,能够高度浓缩景观格局信息,反映其结构组成和空间配置某方面特征的定量

指标<sup>[12]</sup>。由于景观指数模型能很好地表征地物图斑的分布特性,因而近年来在 LUCC 分析中被广泛采用。Fuller<sup>[13]</sup>利用景观学方法,分析了入侵物种白千层的图斑与其他木质植被及郊区的人工地物的空间分布关系,探讨了人为活动对入侵物种的分布与扩展的影响。Corry<sup>[14]</sup>利用不同景观指数分析了高破碎度景观,并探讨了不同景观指数的有效性。Sinha 等<sup>[15]</sup>在分析印度 Jharkhand 州 Daltonganj 南部森林区林地扰动状况时,通过引入新的景观指数和扰动梯度分析获得了该区域林地所遭受的自然扰动和人为扰动。Kamusoko 等<sup>[16]</sup>使用 1973~2000 年的 Landsat 数据,利用景观破碎度分析了津巴布韦 Bindura 地区的农业、混合草地、住宅用地、裸地、水体及林地景观的变化,并探寻了造成景观破碎程度提高及土地退化的主要原因。Uuemaa 等<sup>[17]</sup>根据爱沙尼亚 1:10000 的土地覆盖图所生成的景观指数,利用多元回归分析了景观指标和水质指标的关系。Weng 等<sup>[18]</sup>整合了剖面分析和时间趋势分析,通过对美国威斯康星州 Dane 县不同的景观指标的分析揭示了土地利用多样性的程度和景观破碎度与城市化程度的关系,并重点研究了住宅区斑块在城乡的不同发展模式。Sivrikaya 等<sup>[19]</sup>研究了土耳其 Camili 生物圈保护区 33 年的林相图,揭示了 LUCC 时空变化及其对景观模式影响的重要性及其对土地利用规划管理的意义。

空间统计学是近年来统计学发展的一个新领域,它在国土资源、农业、林业、海洋学、生态学和环境科学方面逐渐得到广泛应用。时间和空间上的相关性是自然界存在秩序、格局和多样性的根本原因之一<sup>[20]</sup>,这是空间统计学研究的出发点。同经典统计学相比,空间统计学最重要的两个特征是空间的多维特征和时空关联的假设。空间统计学模型通过空间自相关关系等实现对事物空间分布特征(如随机的、聚集的或有规则的)的描述,包括传统的地统计学研究范围。在土地利用模型中,主要涉及空间自相关模型和半变异函数模型。空间自相关模型主要反映某一景观要素的观测值是否显著地与其相邻空间观测值相关联,主要用于空间上连续的数值数据<sup>[21]</sup>。戴芹等<sup>[22]</sup>选择了北京市四个时相的 TM 数据,采用分类结果和变更信息,在计算北京市各种用地类型的频率指数和建设用地的 Moran 系数和 Geary 系数等参

数的基础上,分析了北京环线建设驱动的土地利用变化情况。朱士松等<sup>[23]</sup>以空间自相关为出发点,提出了一种测度名义尺度的空间自相关指数——自邻接指数,给出了基于名义尺度下全局空间自相关和局部空间自相关的测度方法。谢花林等<sup>[24]</sup>利用 Moran 系数自相关图来描述翁牛特旗生态区土地利用变化的空间自相关特性,并建立了既考虑回归又考虑空间自相关的混合回归——空间自相关回归模型(空间滞后模型)。邱炳文等<sup>[25]</sup>以福建省作为研究区域,采用 Moran 系数的自相关图描述土地利用及其影响因子的空间自相关特征,且建立了相应的空间自回归方程。半变异函数理论是空间统计学理论的另一个关键部分,由应用数学专家 Matheron 在 1962 年创立<sup>[26]</sup>。半变异函数模型主要是通过不同的变异指数,反映土地利用景观要素的空间变异,通过比较为特定滞后距离分隔的同一随机变量的不同值,可以在多个尺度上度量区域化随机变量的变异性。常用的半变异函数模型有指数模型、球状模型、高斯模型、纯块金效应模型、幂函数模型、对数模型、线性有基台值模型和线性无基台值模型等。通过对遥感影像半变异函数参数分析,可以探索影像中的信息随影像分辨率的变化。Biel-ski 等<sup>[27]</sup>提出了“S-Space”这一新的概念,用来表征从光谱影像数据中提取信息的光谱空间,并采用了半变异函数定量描述光谱依赖性,从尺度效应角度建立了相应的空间依赖模型,用以提取土地覆盖信息。谈文琦等<sup>[28]</sup>以上海市外环以内的城市中心区为研究区域,利用半变异函数对城市土地利用空间格局进行不同空间尺度的分析研究,对作用尺度做了初步的探讨性研究。沈国状等<sup>[26]</sup>将特定窗口下特定步长的半变异函数应用到地表淹没程度分析中,充分发挥了半变异函数能够反映影像数据的随机性和结构性,可以很好地体现地物在特定空间尺度下的自相关性特点。

人工神经网络是 20 世纪 80 年代中期迅速兴起的一门非线性科学,它力图模拟人脑的一些基本特征,如自适应性、自组织性、容错性等。人工神经网络因其具有自学习、自组织、较好的容错性和优良的非线性逼近能力,已在模式识别、数据处理及自动化控制等领域得到初步应用,并取得了较好的效果<sup>[29,30]</sup>。在模式分类和识别中使用最多



的人工神经网络模型是基于误差反向传播算法的 BP 神经网络模型,其在土地利用中的应用也日益增多。凌怡莹<sup>[31]</sup>建立的上海市中心城区土地利用变化的 SOM 神经网络,反映了该区域土地利用变化的状况。罗林<sup>[32]</sup>对贵州省毕节地区的 4 条山区河流水文站监测的年平均输沙模数与相应流域的土地利用结构,建立了相应的 BP 神经网络模型,以制定相关的水土保持调控措施。王增彬等<sup>[33]</sup>在总结济南市建设用地规模预测的研究现状基础上,建立了建设用地驱动因子 BP 神经网络模型,对济南市建设用地变化的驱动力进行了分析。此外,周忠学等<sup>[34]</sup>根据 1988~2004 年土地利用变化资料和相应的人工神经网络 SOM 模型对 16 年来陕北土地利用变化过程的空间差异进行了分析,确定了该区域土地利用变化主导驱动因素。从模型方法上看,如果将人工神经网络模型与遗传算法、元胞相结合,则可实现其在土地利用模拟中的综合集成,可望使新的模型系统在具有学习能力的同时,具有一定的进化能力,从而更加有效地模拟复杂的地理系统。

马尔可夫模型主要针对土地利用变化过程所具有的很强的复杂性,将其视为随机过程来进行模拟,是一种利用系统现在状况及其发展动向来预测未来发生某种状况概率大小的预测方法,常用于土地利用变化的一阶马尔可夫链过程就是只考虑系统转移到一次状态的概率,也就是仅取决于该系统前一个状态,而与再往前的状态无关。计算转移发生率是通过对过去土地利用转移数量的统计得出的,要求转移矩阵固定不变。实际上,人类影响和当地政策往往打乱了土地利用变化原本的自然演替规律,使之呈现复杂化和非线性化特点,各种土地利用类型之间的转入与转出概率会因时而改变,转移矩阵不可能保持不变。因此,目前一阶马尔可夫模型多应用于较小空间尺度短期的植被变化与土地利用变化等,如预测草原退化格局的变化<sup>[35]</sup>和模拟土壤侵蚀变化信息<sup>[36]</sup>等;而对于大空间尺度长期预测,其结果精度很差,目前应用还很少。

多元统计模型主要通过多元回归分析、主成分分析、聚类分析及典型相关等多元统计分析方法,建立土地利用变化和影响因素之间的关系,用于明确土地利用变化的主要原因或者判断其驱动力。其优点

主要体现在解释土地利用变化与其多变量驱动力之间的关系及关联程度,有利于定量解释土地利用变化的原因。例如,通过逐步回归模型分析城市土地利用变化与社会经济指标的关系<sup>[37]</sup>;利用典型相关分析法分析环渤海地区 58 个自然和社会经济变量与各县市土地利用结构的关系<sup>[38]</sup>;通过多元回归模型揭示土地利用结构空间分布及其变化与人文因子的定量关系<sup>[39]</sup>;利用主成分分析方法分析城市土地利用变化的驱动力,并对耕地利用变化的驱动力因子进行定量分析<sup>[40]</sup>。但是,多元统计模型只进行数量上的统计,并不进行空间分布统计;而且其驱动力影响因素一般采用行政区域为单元进行统计,其空间尺度不一致,在一些绝对值的影响因素上没有很强的可比性。

系统动力学模型是通过分析区域土地利用系统结构,选取适当因素建立它们之间的反馈关系,在此基础上建立一系列微分方程构建系统动力学方程,进而模拟和预测系统在不同参数和不同策略因素输入时的系统动力变化行为和趋势,实现区域土地系统的动力仿真,为决策者提供决策支持。系统动力学模型具有描述直观、参数物理意义明确等特点,所以,它适用于研究复杂系统的结构、功能与行为之间动态的辩证统一关系。研究者可以根据土地利用策略对系统动力学的输入变量进行控制、调整,实现政策模拟,所以在土地利用规划中得到广泛应用。例如,在分析深圳市土地利用变化与驱动力时,采用系统动力学模型将城镇用地细化为工业用地、居住用地和第三产业用地,并将它们与耕地和工业投资、人口增长、收入水平、水资源状况等主要驱动力纳入统一的总体结构中,定量描述它们的动态关系<sup>[41]</sup>;对温州市建立的耕地总量动态平衡模型,模拟该地区耕地总量动态平衡<sup>[42]</sup>;利用系统动力学的原理模拟中国北方 13 省未来 50 年在不同社会经济情景下的区域土地利用结构变化,并初步评价这些变化的可能生态影响<sup>[43]</sup>。

CLUE 模型由 LUCC 第三小组的荷兰 Wageningen 农业大学的 Verburg 等开发,属于一种动态的多尺度定量的土地利用变化空间分布模拟模型,常用来模拟较短时间内的土地利用变化(一般为 20 年)。该模型由四个主要的模块组成,即需求模块、人口模块、产量