

徐新良, 赵美艳, 闵稀碧. 城市扩展研究的主要进展与展望[J]. 生态科学, 2014, 33(3): 619–624.

XU Xinliang, ZHAO Meiyang, MIN Xibi. Main progress and prospect of Urban expansion study[J]. Ecological Science, 2014, 33(3): 619–624.

# 城市扩展研究的主要进展与展望

徐新良<sup>1,\*</sup>, 赵美艳<sup>1,2</sup>, 闵稀碧<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

2. 中国科学院大学, 北京 100049

**【摘要】**城市扩展是现阶段多个学科的研究热点, 国内外学者对它的时空特征、驱动机制、模拟和预测方法以及环境效益等问题做了大量研究和探索。文章对城市扩展的研究体系、研究方法和尺度问题进行了总结和分析, 并对未来城市扩展的研究方向进行了展望。研究发现: (1)目前城市扩展的研究已经形成多学科的交叉研究局面, 各学科为城市扩展的研究提供了丰富的方法支撑, 但理论探索相对缺乏; (2)目前元胞自动机和分形理论在城市扩展的研究中应用较多, 引入其他有效的数理方法深化城市扩展研究非常必要; (3)尺度在城市扩展研究中非常重要, 慎重选择时空粒度能更好的反映和揭示城市扩展的特征和规律; (4)我国对城市扩展的研究在理论上和方法上借鉴国外的居多, 结合中国城市化实际进行理论探索, 并深入对全国范围城市扩展特征和规律的全面认识, 是中国未来城市扩展研究的重要方向。

**关键词:** 城市扩展; 研究体系; 研究方法; 研究尺度

doi:10.3969/j.issn. 1008-8873.2014.03.034 中图分类号: F301.2 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2014)03-619-06

## Main progress and prospect of urban expansion study

XU Xinliang<sup>1,\*</sup>, ZHAO Meiyang<sup>1,2</sup>, MIN Xibi<sup>1,2</sup>

1. *Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, Beijing 100101, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract:** Urban expansion becomes a multi-disciplinary hot spot at present. Scholars at home and abroad have done a great deal of research work on many aspects of urban expansion, such as temporal and spatial features, simulation and prediction methods, driving mechanism and environmental benefit. The progress of urban expansion study on research system, methods and scale issues in recent years are summarized and analyzed in this paper, and the future research direction is discussed and proposed. The following results are obtained. (1) The interdisciplinary research for multi-disciplinary on urban expansion study is formed. Different disciplines have provided abundant technical supports, but the study of theoretical exploration is relative deficiency. (2) Cellular automata and fractal theory have been widely used in urban expansion study, and it's necessary to introduce other effective mathematical methods to expand the deepen study of urban expansion. (3) Scale issues are very important, and the selection of temporal size should be more cautious in order to reflect and reveal characteristics and rules of urban expansion better. (4) In urban expansion study, while absorbing and drawing foreign theories and methods, we need to study and develop the theories with Chinese actual situation and deeply realize characteristics and rules of urban expansion on a national scale. It's an important direction of China's future urban expansion study.

**Key words:** urban expansion; research system; research method; research scale

收稿日期: 2012-09-07; 修订日期: 2013-05-06

基金项目: 国家科技支撑计划“陆地生态系统遥感监测技术研究与应用”(编号: 2013BAC03B01); 高分辨率对地观测系统重大专项(编号: 05-Y30B02-9001-13/15-10)

作者简介: 徐新良(1972—), 男, 山东青岛人, 副研究员, 主要从事土地利用/土地覆被变化及其环境生态效应研究, E-mail: xuxl@lreis.ac.cn

## 1 前言

自 20 世纪 90 年代以来, IGBP 和 IHDP 国际组织先后启动了“土地利用/土地覆被变化科学研究计划(LUCC)”和“全球陆地计划(GLP)”,使得土地利用/土地覆被变化及其驱动机制研究成为目前全球变化研究的前沿和热点<sup>[1-2]</sup>。21 世纪是全球城市化快速发展的时代,城市化已经成为全球变化最明显的特征之一,而城市扩展日益成为现在乃至将来土地利用变化的主要特征<sup>[3]</sup>。2008 年,全球城镇人口首次超过非城镇人口,并且到 2050 年全球预计将有 70% 的人口居住在城市<sup>[4]</sup>。城市扩展是城市化最直接的表现之一,是随着城市化进程的加快而出现的一种建成区不断向外延伸、面积逐渐增加的现象。在城市快速扩展的进程中产生了一系列生态环境和土地利用问题,如耕地减少<sup>[5-6]</sup>、湿地退化<sup>[6-7]</sup>、动植物栖息地破坏<sup>[8-9]</sup>、大气和水污染严重<sup>[10]</sup>、城市热岛效应<sup>[11-12]</sup>等,同时显著影响着城市景观格局<sup>[13]</sup>。因此,对城市扩展的时空特征及其生态环境效应进行研究对于促进土地资源集约化利用、维护生态安全和促进城市可持续发展具有重要意义。近年来,国内外学者对城市扩展的时空特征、驱动机制、模拟和预测方法以及生态环境效益等问题做了大量研究和探索。本文通过对相关文献的梳理和分析,总结当前城市扩展研究的进展,指出当前研究中存在的一系列主要问题,以期为相关研究提供参考。

## 2 城市扩展的研究体系

城市扩展属于城市地域结构研究,而城市地域结构研究是城市地理学研究的主要内容<sup>[14]</sup>。城市地理学是研究在不同地理环境下,城市形成发展、组合分布和空间结构变化规律的科学,既是人文地理学的重要分支,又是城市科学群的重要组成部分<sup>[15]</sup>。刘云刚学者<sup>[16]</sup>对中国城市地理学研究的统计分析发现,三大地理学主流期刊自创刊至 2009 年底所刊载的城市地理学相关论文共 523 篇,其中于 2000 年发表在地理学报上关于城市扩展研究的《基于 GIS 的北京城市土地利用扩展模式》被引频率达到 391 次,居第一位。而且他还发现城市空间结构研究是城市地理学持久不衰的研究主题。由此可以看出,城市扩展是城市地理学的研究热点。

城市是经济社会物质要素的空间聚集体。伴随

着城市的持续发展,国内外学者对城市扩展问题进行了热烈探讨,新的研究视点不断涌现。从研究体系来看,对于城市扩展的研究已经不再局限于传统的城市地理学单学科的单一研究阶段,而是形成了与生态学、经济学等多学科的交叉研究的局面。这使人们对城市扩展的特征、驱动机制和研究手段都有了新的认识。

从景观生态学的角度来说,城市扩展是一种景观扩张,是重要的生态过程。近年来,在遥感与 GIS 技术的支持下,许多国内外学者应用景观生态学的方法对城市扩展进行了定量与定性分析,其中以应用景观指数对城市格局的量化分析最多<sup>[17-21]</sup>,并取得了一些富有成效的结果。如郭建国等学者<sup>[22]</sup>的研究认为一小部分的景观指数就能识别出城市扩展的主要时空特征。全泉等<sup>[23]</sup>利用景观格局指数对南京、苏州、无锡和常州 4 市 10 年来的城市扩张规律和动态格局变化模式进行了定量研究,并在时间和空间维度上进行比较,结果表明这 4 个城市在 1990-2000 年的快速城市化过程中既有相似的发展规律又各自表现出不同的特点。郭涿等<sup>[24]</sup>采用景观格局指数对广州市 1985—2005 年期间景观空间格局的时空变化特征进行了研究,结果表明随着城市化的加速,广州市在这一期间景观空间格局的复杂性总体上不断增加,但变化速率、强度和发展态势在全市范围和不同的行政区域内表现出一定的分异特征。

景观指数是在信息理论、几何分形、渗透理论的基础上发展起来的,大部分景观格局指数还是在景观生态学发展初期创立起来的,发展和应用新的具有生态学意义的景观指数来揭示土地利用景观格局变化显得非常重要。在这方面,部分国内外学者做出了新的尝试。如 Jag<sup>[25]</sup>2000 年提出来的有效网格大小(Effective mesh size)是用于度量景观破碎化的指数。Li 等人<sup>[26]</sup>运用修正后的 Effective mesh size 对由道路、铁路及城市区域造成的中国景观破碎化程度进行了第一次评估。评估结果显示,由主要交通系统和城市区域造成的景观破碎化在中国的各个区域有较大的差异,西部的影响最小,南部和东部影响最大,其中中国东部省份跻身于世界最严重的景观破碎化水平。研究表明 Effective mesh size 指数能够很好地揭示由城市化造成的景观破碎化程度。刘小平等国内学者<sup>[27]</sup>提出了一种新的景观指数—景观扩张指数,对东莞市 1988—2006 年期间的城市景

观扩张过程进行研究, 结果表明该指数能够很好地识别出城市扩张的三种类型, 即填充式、边缘式以及飞地式。

从经济学的角度来说, 城市扩展主要是有序的和可预见的经济因素产生的结果<sup>[28-29]</sup>。在城市经济理论中由阿郎索(ALonso)、米尔斯(Mills)、穆特(Muth)建立和发展起来的单中心城市空间结构模型现已用于城市扩展的分析中<sup>[30]</sup>。McGrath<sup>[29]</sup>使用 1950-1990 年的数据利用单中心城市空间结构模型对美国 33 个最大的城市空间大小进行了实证估计, 解释了近 80% 的城市用地规模差异, 得出了城市空间扩展是一种有序的经济进程的结果。邓祥征等国内学者<sup>[31]</sup>利用该模型并结合 GIS 和遥感技术, 对中国 1995-2000 年超过 2000 个县的城市扩展进行了分析, 结果发现收入的增长强烈影响着中国城市的扩展, 而城市人口、农地租价和交通成本的影响也较为重要。

计量经济学是将经济理论、数学和统计推断等工具应用于经济现象定量分析的经济学分支。随着地理信息系统的发展, 学者将其与计量经济学相结合, 用来解决应用经济学和政策分析中的问题。黄季焜等<sup>[32]</sup>利用土地利用数据和社会经济数据建立了计量经济模型, 定量分析了1996—2000年间中国不同区域建设用地扩展的主要影响因素。结果发现经济增长带来的建设用地扩张和耕地减少可能在中西部地区会面临更严峻的挑战。

### 3 城市扩展的研究方法

从研究方法来看, 城市扩展研究与新技术的结合越来越紧密。遥感与 GIS 的应用成为城市扩展研究的主要手段, 而数理科学为城市扩展的研究提供了新的理论和技术方法。以数理科学为基础的模型分析因其对城市发展变化中的动态特征进行了有效的描述、模拟与预测而成为现阶段的研究热点。元胞自动机(CA)在城市增长、扩散和土地利用演化模拟方面研究最早、最为深入<sup>[33]</sup>, 但 CA 模型本身存在建模的不确定因素, 这对城市空间扩展的模拟结果有一定影响<sup>[34]</sup>。近年来, 许多学者对 CA 模型进行了改进或与其他模型相结合应用, 提高了城市空间扩展模型模拟的精度。

冯永玖等国内学者利用粒子群智能算法(PSO)对 CA 参数进行了快速搜索和寻优, 建立了一种基于粒子群优化算法的地理元胞模型(PSO-CA), 并利

用该模型对上海市嘉定区和奉贤区进行了实证研究<sup>[35-36]</sup>。该模型的创新点是采用 PSO 对转换规则进行随机优化, 从而减少模拟的不确定性和提高模型模拟的精度。

全泉等国内学者<sup>[37]</sup>利用CA模型和多智能体模型相结合的方法, 在GIS技术手段的支持下构建了一个能够兼顾两种模型优点的城市扩展动态模型, 并以上海市为研究对象, 模拟了上海市1995—2005年的城市扩展动态过程, 并在此基础上预测了2010年和2020年上海城市扩展的动态演化结果, 通过对模型模拟的上海2005年土地利用状态和实际土地利用状态进行验证, Kappa系数的平均值达到0.75以上, 说明模型具有较高的可信度。

Jokar Arsanjani 等国外学者<sup>[38]</sup>建立了一个包括logistic 回归模型、马尔可夫链和 CA 模型的混合模型。该混合模型与一些 CA 模型(如 SLUETH)相比, 具有能够将自然环境因素和社会经济因素集成的优点, 通过对伊朗德黑兰大都市区的实证研究表明该模型的模拟精度较高, 2006 年的模拟正确率达到 89%。

分形理论在城市扩展中应用最早是由美国数学家Mandelbrot<sup>[39]</sup>于1967年在《科学》杂志上提出的。分形理论在解释自然界中不规则、不稳定和具有高度复杂结构的现象方面有着显著效果。城市有着复杂的、非线性的空间形态, 这种空间形态具有分形特征。分形理论为城市扩展研究提供了有效的数学描述手段。Batty<sup>[40]</sup>于1995年在《自然》杂志上发表的《分形: 看待城市的新方式》和Makse等人<sup>[41]</sup>的《模拟城市生长图式》推动了分形理论在城市扩展研究中的应用。2008年Batty<sup>[42]</sup>在《科学》杂志上发表文章, 认为正是在不同空间尺度上观测到的城市自相似性驱动着小城市集聚的进程与大城市相似。而对印度12个最大城市群的实证研究证实了Batty的观点, 印度12个最大城市群在时空城市化进程中具有相似性, 基于特大城市可以对大城市未来的初期形态进行预测<sup>[43]</sup>。近年来, 国内一些学者也运用分形理论对城市的结构和形态进行了研究。赵晶等学者<sup>[44]</sup>利用分形理论中的边界维数和半径维数对上海中心城区土地利用形态进行了定量判断, 揭示了城市土地利用结构与形态演变特征。姜世国等学者<sup>[45]</sup>利用多期遥感影像, 根据分形理论, 用半径法研究了北京城市形态。车前进等学者<sup>[46]</sup>基于迭代

原理的城市形态分形研究方法,运用分形维数和标度曲线定量分析了徐州城市空间结构演变规律。

在研究方法上,还有一些学者创新性的引入数理方法对城市扩展进行研究。刘纪远等学者<sup>[47]</sup>针对目前缺乏定量方法确定城市用地扩展类型的问题,首次提出了利用计算几何中凸壳原理识别城市用地扩展类型的新方法,区分出城市用地扩展的两种类型。Wang 等学者<sup>[48]</sup>提出一个新的参照系:城市群演化树,以中国城市群为实验对象,将 253 个城市多元统计数据分别按城市类型和发展阶段先后聚类,顺序地安排在一颗“树”的干、支和叶上,组成一颗城市群演化树,可视化地揭示出我国城市群的演化规律和变异。该演化树解释了城市化占地规律,以此预测城市扩张,精度较高。

#### 4 城市扩展研究的尺度问题

尺度是个关键问题。在景观生态学中,尺度往往用粒度和幅度来表达<sup>[49]</sup>。幅度是指研究对象在空间或时间上的持续范围或长度<sup>[50]</sup>,一般来说,研究区域的总面积决定了空间幅度,而研究的时间跨度决定了时间幅度。而粒度包括空间粒度和时间粒度,这是尺度分析中的重点。空间粒度是最小可辨识单元所代表的特征长度、面积或体积,城市扩展研究中主要指栅格数据中的格网大小,而时间粒度是某一现象或事件发生的频率或时间间隔<sup>[49]</sup>。

就目前国内外的研究来看,城市扩展研究更多关注的是时空幅度,而对粒度及其效应关注较小。从时空幅度来看,国内外由对单一城市化区域逐渐发展到对城市群的研究,由小时空幅度向大时空幅度转变。王新生等<sup>[51]</sup>对 1990—2000 年中国 31 个特大城市扩展的类型进行了研究,结果表明,扩展类型以填充类型为主,外延类型相对较少且主要发生在发展限制较小的平原地区。车前进等<sup>[52]</sup>利用间隙度指数、分形维数、扩展强度指数、扩展速度指数和空间关联模型等多种模型测度了 1980—2007 年长江三角洲地区 15 个城市城镇用地空间扩展的过程与格局,并在此基础上揭示了影响城镇扩展的驱动机制。最近两年,还有少数国内学者<sup>[53-54]</sup>基于遥感影像数据建立了中国城市扩展数据库,对全国城市扩展特征进行了研究,研究结果对国土资源利用以及城市规划与管理政策发挥重要作用。

Angel 等国外学者<sup>[55]</sup>对 1990—2000 年全球 120 个

城市的城镇人口和城镇用地的增长速度进行了研究。城镇人口的平均年增长率为 1.60%,而城镇用地的平均年增长率为 3.66%。随后又探索了全球 30 个城市从 1800 年到 2000 年的城市扩展和城镇人口密度变化情况<sup>[55]</sup>,其中有 28 个城市在 20 世纪期间城市面积扩展超过 16 倍。在最新的研究中,该研究团队又建立了一个包括全球 3646 个城市(在 2000 年人口超过 10 万)的数据集对全球各国家在 2000—2050 的城市扩展进行预测<sup>[56]</sup>,根据中等发展水平的预测结果,发展中国家的城镇用地将从 2000 年的 30 万 km<sup>2</sup> 扩展到 2030 年的 77 万 km<sup>2</sup>,到 2050 年达到 120 万 km<sup>2</sup>。

在实际的城市扩展研究中学者对粒度问题研究较少。但城市景观格局因具有明显的空间自相关性而对尺度具有显著的依赖性<sup>[57]</sup>,因此在城市扩展研究中必须要重视粒度对于城市扩展的影响。在空间粒度方面,Berling-Wolff 等学者<sup>[58]</sup>采用城市增长模型对美国凤凰城城市增长进行模拟预测,并采用不同的方法来评估城市增长模型在不同空间分辨率下的表现情况,结果表明模型在空间分辨率为 120—480 m 时表现良好,原因在于精度越高的数据其噪声和不确定性以及对计算机性能的高要求大大降低了模型的有用性和准确性,而粗精度数据下的模拟在区域尺度上没有多大用处。在时间粒度方面,杨叶涛等人<sup>[59]</sup>研究发现,比较长的时间间隔( $\geq 6$  年)能够更好地对景观格局与城市扩张进行研究,因为城市景观结构对于城镇用地扩展的响应具有时间滞后性,需要一定的时间间隔才能探测到这种响应。

#### 5 城市扩展研究的前景展望

城市是社会、经济、政治、文化等各个方面组成的有机系统,而城市扩展是一个复杂的过程,对它的研究需要综合多个学科的理论和方法。在学科交叉研究理念和多视角思维的引导下,城市扩展研究从 20 世纪后期至今已有长足发展,但仍存在如下问题:

(1) 尽管对于城市扩展的研究已经形成了多个学科的交叉研究局面,但是多学科的交叉研究还不够深入。各学科为城市扩展的研究提供了丰富的方法支撑,但理论探索相对缺乏。

(2) 数理方法是研究城市扩展有效的工具,目前元胞自动机和分型理论在城市扩展的研究中应用最多,引入其他有效的数理方法对城市扩展进行研

究非常必要, 而且一定能推动城市扩展研究取得新进展。

(3) 尺度在城市扩展研究中非常重要。在实际的城市扩展研究中, 应重视尺度对城市扩展的影响。慎重选择时空粒度能更好的反映和揭示城市扩展的特征和规律。

(4) 我国对于城市扩展的研究在理论上以引用国外的研究理论居多, 缺乏结合中国城市化实际的理论探索。在实践研究中, 我国针对单个城市或城市群的研究较多, 以全国范围内城市为对象的研究较少, 缺乏对全国范围内城市扩展特征和规律的全面、深刻认识。

## 参考文献

- [1] 刘纪远, 张增祥, 庄大方, 等. 20 世纪 90 年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析[J]. 地理研究, 2003, 22(1): 1-12.
- [2] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1411-1420.
- [3] 何剑锋, 庄大方. 长江三角洲地区城镇时空动态格局及其环境效应[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 388-396.
- [4] UNITED NATIONS. World Urbanization Prospects: The 2007 Revision[M]. New York: United Nations, 2007.
- [5] TAN Minghong, LI Xiubin, XIE Hui, et al. Urban land expansion and arable land loss in China—a case study of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Land Use Policy, 2005, 22: 187-196.
- [6] MUSTAFA B, BAHAR T, YUSUF K. Determination of Impact of Urbanization on Agricultural Land and Wetland Land Use in Balçovas' Delta by Remote Sensing and GIS Technique[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 131: 409-419.
- [7] LI Yangfan, ZHU Xiaodong, SUN Xiang, et al. Landscape effects of environmental impact on bay-area wetlands under rapid urban expansion and development policy: A case study of Lianyungang, China[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 94: 218-227.
- [8] 张淑萍, 郑光美, 徐基良. 城市化对城市麻雀栖息地利用的影响: 以北京市为例[J]. 生物多样性, 2006, 14(5): 372-381.
- [9] CHRISTIAN W. Towards a Mechanistic Understanding of Urbanization's Impacts on Fish[M]. Urban Ecology, Springer US Press, 2008: 425-436.
- [10] CHE X, SHANG J. Strategic environmental assessment for sustainable development in urbanization process in China[J]. Chinese Geographical Science, 2004, 14(2): 148-152.
- [11] FENG J, PETZOLD D. Temperature Through Urbanization in Metropolitan Washington, D.C., 1945-1979[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 1988, 38: 195-201.
- [12] 李文亮, 张丽娟, 陈红, 等. 哈尔滨市城市扩展与地表热环境变化关系研究[J]. 地域研究与开发, 2010, 29(2): 49-52.
- [13] Xiao J, Shen Y, Ge J, et al. Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing[J]. Landscape and urban planning, 2006, 75(1): 69-80.
- [14] 沈道齐, 崔功豪. 中国城市地理学近期进展[J]. 地理学报, 1990, 45(2): 163-171.
- [15] 许学强, 周一星, 宁越敏. 城市地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [16] 刘云刚. 中国城市地理学研究的统计分析[J]. 地理科学进展, 2011, 30(6): 681-690.
- [17] SUDHIRA H S, RAMACHANDRA T V, JAGADISH K S. Urban sprawl: metrics, dynamics and modelling using GIS[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2004, 5(1): 29-39.
- [18] JI Wei, MA Jia, TWIBELL R W, et al. Characterizing urban sprawl using multi-stage remote sensing images and landscape metrics[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2006, 30: 861-879.
- [19] WENG Y. Spatiotemporal changes of landscape pattern in response to urbanization[J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 81: 341-353.
- [20] TIAN Guangjin, JIANG Jing, YANG Zhifeng, et al. The urban growth, size distribution and spatio-temporal dynamic pattern of the Yangtze River Delta megalopolis region, China[J]. Ecological Modelling, 2011, 222: 865-878.
- [21] SUN Chen, WU Zhifeng, LV Zhiqiang, et al. Quantifying different types of urban growth and the change dynamic in Guangzhou using multi-temporal remote sensing data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 21: 409-417.
- [22] WU Jianguo, JENERETTE G D, BUYANTUYEV A, et al. Quantifying spatiotemporal patterns of urbanization: The case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States[J]. Ecological Complexity, 2011, 8: 1-8.
- [23] 全泉, 田光进, 王健. 长江三角洲四城市城镇化过程景观动态变化格局比较[J]. 生态学杂志, 2009, 28(4): 721-727.
- [24] 郭源, 杜世宏, 薛达元, 等. 快速城市化进程中广州市景观格局时空分异特征的研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(1): 129-136.
- [25] JAG J. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation[J]. Landscape Ecology, 2000, 15(2): 115-130.
- [26] LI Taian, SHILLING F, THORNE J. Fragmentation of China's landscape by roads and urban areas[J]. Landscape Ecology, 2010, 25: 839-853.

- [27] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1430–1438.
- [28] BRUECKNER J K, FANSLER D. The economics of urban sprawl: Theory and evidence on the spatial size of cities[J]. *Review of Economics and Statistics*, 1983, 55: 479–482.
- [29] MCGRATH D T. More evidence on the spatial scale of cities [J]. *Journal of Urban Economics*, 2005, 58: 1–10.
- [30] 李治, 李国平. 单中心城市空间结构模型的实证研究进展[J]. 地域研究与开发, 2009, 28(4): 5–8.
- [31] DENG Xiangzheng, HUANG Jikun, ROZELLE S, et al. Growth, population and industrialization, and urban land expansion of China[J]. *Journal of Urban Economics*, 2008, 63: 96–115.
- [32] 黄季焜, 朱莉芬, 邓祥征. 中国建设用地扩张的区域差异及其影响因素[J]. 中国科学: D辑, 2007, 37(9): 1235–1241.
- [33] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 34–38.
- [34] YEH A G, LI Xia. Errors and uncertainties in urban cellular automata[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2006, 30: 10–28.
- [35] 冯永玖, 童小华, 刘妙龙. 城市形态演化的粒子群智能随机元胞模型与应用—以上海市嘉定区为例[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(1): 17–25.
- [36] FENG Yongjiu, LIU Yuan, TONG Xiaohua, et al. Modeling dynamic urban growth using cellular automata and particle swarm optimization rules[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102: 188–196.
- [37] 全泉, 田光进, 沙默泉. 基于多智能体与元胞自动机的上海城市扩展动态模拟[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2875–2887.
- [38] JOKAR ARSANJANI, J, HELBICH M, et al. Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 65–275.
- [39] MANDELBROT B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. *Science*, 1967, 156: 636–638.
- [40] BATTY M. Fractals: New ways of looking at cities[J]. *Nature*, 1995, 377: 574.
- [41] MAKSE H., HAVLIN S., STANLEY H E. Modelling urban growth patterns[J]. *Nature*, 1995, 377: 608–612.
- [42] BATTY M. The Size, Scale, and Shape of Cities[J]. *Science*, 2008, 319: 769–771.
- [43] TAUBENBOCK H, WEGMANN M, ROTH A, et al. Urbanization in India – Spatiotemporal analysis using remote sensing data[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2009, 33: 179–188.
- [44] 赵晶, 徐建华, 梅安新, 等. 上海市土地利用结构和形态演变的信息熵与分维分析[J]. 地理研究, 2004, 23(2): 137–146.
- [45] 姜世国, 周一星. 北京城市形态的分形集聚特征及其实践意义[J]. 地理研究, 2006, 25(2): 204–212.
- [46] 车前进, 曹有挥, 马晓冬, 等. 基于分形理论的徐州城市空间结构演变研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(8): 859–866.
- [47] 刘纪远, 王新生, 庄大方, 等. 凸壳原理用于城市用地空间扩展类型识别[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 885–892.
- [48] WANG Jinfeng, LIU Xuhua, PENG Ling, et al. Cities evolution tree and applications to predicting urban growth[J]. *Population & Environment*, 2011, 33(2/3): 186–201.
- [49] 张娜. 生态学中的尺度问题: 内涵与分析方法[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2340–2355.
- [50] TURNER M G, GARDNER R H, O'NEILL R V. *Landscape Ecology: In Theory and Practice*[M]. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [51] 王新生, 刘纪远, 庄大方, 等. 中国特大城市空间形态变化的时空特征[J]. 地理学报, 2005, 60(3): 392–400.
- [52] 车前进, 段学军, 郭焱, 等. 长江三角洲地区城镇空间扩展特征及机[J]. 地理学报, 2011, 66(4): 446–456.
- [53] LIU Jiyuan, ZHANG Qian, HU Yunfeng. Regional Differences of China's Urban Expansion from Late 20th to Early 21st Century Based on Remote Sensing Information[J]. *Chinese Geographical Science*, 2012, 22(1): 1–14.
- [54] WANG Lei, LI Congcong, YING Qing, et al. China's urban expansion from 1990 to 2010 determined with satellite remote sensing[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57, doi: 10.1007/s 1434-012-5235-7.
- [55] ANGEL, SHLOMO, JASON P, et al. The persistent decline of urban densities: Global and historical evidence of sprawl. Lincoln Institute Working Paper. Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy. Online at: [http://www.lincolninst.edu/pubs/1834\\_The-Persistent-Dcline-in-Urban-Densities](http://www.lincolninst.edu/pubs/1834_The-Persistent-Dcline-in-Urban-Densities), 2010.
- [56] ANGEL, SHLOMO, JASON P, et al. The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000–2050[J]. *Progress in Planning*, 2011, 75: 53–107.
- [57] 徐建华, 岳文泽, 谈文琦. 城市景观格局尺度效应的空间统计规律—以上海中心城区为例[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 1058–1067.
- [58] BERLING-WOLFF S, WU Jianguo. Modeling urban landscape dynamics: A case study in Phoenix, USA[J]. *Urban Ecosystems*, 2004, 7: 215–240.
- [59] 杨叶涛, 龚建雅, 周启鸣, 等. 土地利用景观格局对城市扩张影响研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 320–329.