

DOI: 10.5846/stxb201205070659

陈利顶^{1,*}, 孙然好¹, 刘海莲². 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. 生态学报 2013, 33(4): 1042–1050.

Chen L D, Sun R H, Liu H L. Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: progresses, problems, and perspectives. Acta Ecologica Sinica 2013, 33(4): 1042–1050.

城市景观格局演变的生态环境效应研究进展

陈利顶^{1,*}, 孙然好¹, 刘海莲²

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 北京市永定河管理处, 北京 100165)

摘要: 快速城市化过程剧烈影响着下垫面变化, 直接带来了交通拥挤、资源短缺、环境污染、生态恶化等诸多问题, 所有这些问题的出现均与景观格局演变密切相关。研究城市景观格局演变及其生态环境效应正在成为全社会关注的热点。系统总结了城市化过程对景观格局演变的影响, 分析了城市景观格局演变的热环境效应、水环境效应、生态服务效应, 以及城市生态用地与生态安全格局设计等方面的研究进展。指出了目前城市景观演变与生态环境效应研究中存在的问题与不足: (1) 现有研究侧重于景观格局演变的量化分析和景观格局指数的计算, 较少关注景观格局演变对生态环境及其区域生态安全的影响; (2) 城市景观格局演变与热岛效应研究多局限于两者数理统计关系的分析, 对于城市热环境形成的机理缺乏深入研究; (3) 城市景观格局演变与大气环境效应方面更多研究关注绿地及其空间布局在吸收和降解大气污染物、固体颗粒物方面的作用, 对城市景观格局演变的大气环境综合效应以及大气灰霾效应影响机理重视不够; (4) 如何通过合理设置生态用地, 有效提高城市生态服务功能和保障城市生态安全, 目前仍缺乏深入而又系统的研究。下一步的研究中, 需要综合多尺度的景观信息来揭示城市景观的演变机理和环境效应, 构建基于城市空间扩展和生态服务效应评价的城市生态空间优化决策模型, 探讨城市生态空间优化模式与安全格局。

关键词: 城市景观; 格局演变; 环境效应; 热岛效应; 生态用地

Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: progresses, problems, and perspectives

CHEN Liding^{1,*}, SUN Ranhao¹, LIU Hailian²

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Beijing Yongdinghe Water Resources Administrative Bureau, Beijing 100165, China

Abstract: Urbanization refers to a process in which an increasing proportion of an entire population lives in cities and the suburbs of cities. A primary goal of urbanization is to develop a harmonious region between natural landscapes and human habitation. However, urbanized ecosystems and urban human populations are expanding around the world, causing many negative environmental effects, such as traffic jams, resource shortage, environmental pollution, and ecological degradation. Therefore, urban landscape changes and their eco-environmental effects have been received lots of attentions from researchers, managers, and the public. This paper presents a comprehensive review of researches on urban landscape changes and their eco-environmental effects. These eco-environmental effects identified in this study include urban heat island effect, air pollution, water issues, destruction of habitats, ecosystem service changes, and so on. The paper points out problems in current studies of urban landscape patterns: (1) Current studies are mainly implemented on the development and application of quantitative indices to quantify landscape pattern changes, whereas few has focused on the

基金项目: 国家自然科学基金项目(41230633); 城市与区域生态国家重点实验室自主项目(SKLURE2008-1-02)

收稿日期: 2012-05-07; 修订日期: 2012-10-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liding@rcees.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

impacts of landscape pattern changes on the regional ecological security; (2) Although more recent efforts have been attempted to study the relationship between urban heat island effect and landscape pattern changes, relatively less results is available to explain the thermal mechanism of urban heat island effects; (3) Most studies focus on the effect of urban green landscape on air pollutant absorption, air particle retard, the comprehensive effects of urban landscape change on atmospheric quality and dust haze effect, are however less studied; (4) Attempts have been made to study urban ecological land uses to improve regional ecological security, but quantitative guidelines in relation to the landscape planning is also needed more integrated efforts among different disciplines. We suggest that more efforts should be implemented on integrating spatial data in multiple scales to reveal the environmental effects of landscape changes and their physical mechanisms. Moreover, multi-objective spatial optimization model for ecological land-use allocation should be developed by integrating the models of urban sprawl and ecosystem service evaluation.

Key Words: urban landscape; landscape change; environmental effect; urban heat island; ecological land-use

城市是随着人类社会的发展而逐步发展起来的地理空间,是人类在改造和适应自然环境的过程中,建立起来的“自然-经济-社会”复合生态系统。城市化是一个社会的全面发展过程,除了促进社会经济发展,还可以促进社会文明的进步,然而在城市化高速发展阶段,随着经济高速发展、人口急剧增长和城市快速扩张,环境污染、资源短缺、交通拥挤、洪涝灾害等问题却相继出现,从而给城市发展带来了严重的负面影响,城市人居环境质量下降,所有这些问题的出现已经成为制约城市健康发展的重要因素^[1-4],也将成为我国今后建设小康社会、实现区域可持续发展所面临的重大挑战^[5-6]。城市化进程中所出现的各种生态环境问题,实质上与城市景观格局的人为干扰密切相关,城市化过程中将原本适宜区域生态环境的自然、半自然景观改造为不透水面景观,其结果是不仅影响了城市地表的热环境与热通量特征,也造成城市地表和地下水文过程被阻隔,导致城市生态系统功能的退化。随着人口增长、经济发展和城市化扩张,人类对建设用地的需求还将持续增长,城市景观格局还将受到日以增强的干扰,系统研究城市化发展对景观格局及其生态环境的影响,评价城市生态用地的服务功效^[7-10]将景观格局演变与城市热岛效应、面源污染和城市洪涝灾害的形成机理相联系,探讨不同城市功能区生态空间优化模式,对于城市健康发展与区域生态安全具有重要意义。

1 国内外研究现状与特点

城市人口大量增加和工业生产规模化集中,直接导致城市景观格局发生变化。城市景观格局演变的生态环境效应涉及到多个方面,如城市热岛效应、大气环境效应、水环境效应、生态服务效应、生态用地流失和区域生态安全^[4-5,11-17]。

1.1 城市化过程对景观格局演变的影响

城市化进程突出表现在不透水地面增加、绿地和水体景观减少、景观破碎和离散化等^[10,18-19],由此引起了景观格局的变化。现有研究主要集中在三个方面:(1)利用样带分析和景观格局指数定量研究城市化过程对景观格局演变的影响^[20-23]。此类研究多在城市区域选择典型样带,基于遥感影像解译与景观制图分析,利用Fragstats景观统计模型,比较不同时期景观格局指数的差异,并基于统计方法分析城市景观格局变化的影响因子,从而重构城市化发展的空间递推性和时间延续性的过程。(2)城市景观格局演变与城市形态扩展研究^[24-25]。城市空间形态扩展必然引起景观格局的演变,这一方面国内外已经开展了许多研究,并将城市景观格局演变与城市空间扩展模式相结合,根据城市扩展和道路、建设用地的邻接关系,可以将城市扩展归纳为填充型、外延型和独立型三种发展模式^[26]。也有学者给出了其他的城市景观演变模式,如刘珍环等^[18]研究认为深圳地表景观格局1990—2005年经历了分散—单中心聚集—多中心分散—多中心聚集的演变过程。(3)城市空间扩展的约束因素与空间胁迫机制研究^[3,26-28]。城市化过程中,人类活动对土地资源的干扰往往表现为从低缓平原向高海拔陡峻山地递减的趋势^[29],并且不同用地类型在城市化过程中所受到的空间胁迫不同,城市扩张既受到了空间可达性的约束,也受到社会经济因素的影响,如人口、经济、土地政策等^[30]。随着城市

土地资源日益趋紧和社会经济水平提高,城市景观格局演变将更加复杂化,由此带来的生态环境影响将会更为突出。

1.2 城市景观格局演变的热岛效应

城市热岛效应是城市人口聚集和景观格局演变的最直接的结果,是绝大多数城市共有的微气候特征,将会影响到城市生态系统功能和人居环境健康^[31-33]。国内外学者运用地表温度,开展了许多缓解城市热岛、改善城市热环境的研究。一般认为,反映城市绿地覆盖程度的 NDVI 指数与反映热岛效应的地表辐射温度 LST 之间存在着明显的负相关关系^[34-35]。城市绿地和水面具有明显的“恒温效应”和“绿洲效应”,在热量和水分方面对周边小气候环境进行调节,城市绿地覆盖率越高,降温效应越明显,不透水面比例提高会增强城市热岛效应^[36-37]。近年来,除了探讨城市景观类型和比例的影响外,城市景观格局与地表热环境的定量关系研究逐渐得到重视,并成为指导城市景观设计和规划的重要依据。研究表明,在绿地覆盖率相当情况下,大斑块绿地降温效应明显高于小斑块绿地^[16,38],但是绿地和水面对气温的调节作用往往存在一个阈值,只有在该阈值范围内的景观才能发挥出最大的气温调节功能^[19,39],而且绿地和水面斑块的形状也会影响热岛效应的强弱^[40-41]。一些研究也发现城市景观的空间位置及其空间邻接关系也会对热岛效应产生显著影响^[6,33]。

1.3 城市景观格局演变的大气环境效应

除了热岛效应外,城市化也是造成大气污染的重要原因,而城市景观格局与大气污染有着密切的联系。严格意义上,城市大气污染主要是由于城市内厂矿废气排放、汽车尾气排放、建筑工地扬尘等引起,也与城市景观格局的演变紧密相关,尤其是城市建设用地和绿地公园的空间布局对城市大气污染具有重要影响。目前许多工作研究了城市绿地在缓解城市大气污染和城市固体颗粒物方面的作用。研究表明,城市景观中绿地斑块平均面积越大、破碎度指数越低,则其对大气污染净化的作用越大^[42]。大气污染削减率因人口密度、产业分布、景观格局(水平结构、异质性、连通性等特征)的不同而有所差异^[43]。城市中绿地的空间分布对改善城市大气污染,尤其是城市固体颗粒物浓度、空气环境质量方面均具有较好的效果。概括起来有以下特点:(1)城市绿地及其空间布局对城市大气污染物的吸收与降解作用;(2)城市绿地在滞尘方面的作用;(3)城市绿地及其空间布局对城市大气环境微生物的调节作用。但是对于城市景观格局演变与大气灰霾效应之间的关系研究的不多。

1.4 城市景观格局演变的水环境效应

城市景观格局演变的水环境效应主要表现在两个方面。

(1) 水文效应,即城市土地利用/覆被变化对径流量、径流历时及最大洪峰等水文指标的影响^[17,44]。城市不透水面的增加成为影响城市水文过程的重要因素,不仅能够隔离地表水下渗,还将切断城市地表水与地下水之间的水文联系^[4]。此外,城市化过程还会通过改变地表覆被状况,对城市水文循环产生间接影响,主要表现为水文循环过程中对竖向的蒸散发与下渗以及横向的地表径流与壤中流等水文过程的影响。不透水表面增加的水文效应主要表现为短时间内增大降雨的径流量,长时间内增加洪水频率和径流总量^[15],由此导致城市地表渍水与洪涝灾害的发生。土地利用/土地覆被格局对城市暴雨洪水过程的影响得到了较多关注^[4,45],研究发现降雨本身并不是洪涝灾害日趋严重的主要原因,而以城镇用地的大量增加、生态用地和农业用地的大面积减少为主要特征的快速城市化过程成为城市洪涝灾害爆发的主因^[45]。

(2) 面源污染效应,指城市不同土地利用/覆被类型的污染物输出效应^[15,46-47]。城市化过程导致城市面源污染的加剧受到学者们的关注^[48-49],一般认为,农村居民地、城市居民地、商业用地和工业用地等用地类型是城市湖泊非点源污染的主要源区^[50],而街尘是城市面源污染的一个重要来源^[51],同时道路地表径流污染程度与交通流量也呈正相关关系。非点源污染模型是近年来发展比较快的技术手段,比较著名的模型包括 AGNPS、ANSWERS、MIKE-SHE、SWAT、HSPF、SPARROW 等^[52-53]。然而,现有模型的结构、适用尺度、侧重的水文过程具有差异,模型精度很大程度上取决于数据质量,在一些缺乏数据的流域模拟中受到很大限制。景观格局时空特征与非点源污染具有密切的联系,利用景观格局指数评价非点源污染也是一个重要的技术手

段。此外,探索无资料和不完整信息下城市非点源污染的模拟和预测,加强城市非点源污染随机性模型的研究正逐渐得到重视。

1.5 城市景观格局演变的生态服务效应

随着城市化快速发展和居民生活水平的不断提高,改善人居环境成为迫切需求,城市景观格局演变的生态服务效应逐渐引起关注,尤其是城市生态用地的服务价值^[7-9-10]。李锋等^[7]评估了常州市区 15 年来城市景观格局和生态用地改变的演变特征,发现城市景观格局演变与生态系统服务之间存在着密切相关性;城市化过程会导致生态系统服务功能下降,使得建成区成为生态系统服务功能密度的低值区^[8]。城市绿地景观在改善城市环境质量、提高人居环境舒适度方面起到了重要作用^[10,33],但如何通过合理设置生态用地,有效提高城市生态服务功能和保障城市生态安全,目前仍缺乏深入而又系统的研究。生物多样性维持是生态服务的重要内容,随着全球特别是发展中国家城市化水平的提高,城市化对生物多样性的影响引起了人们的重视^[54],但认识尚不统一。譬如,有学者认为,城市化过程中生物多样性受到了严重影响,主要表现在人工外来物种的增加和自然物种的减少。在空间分布上,城市化常使城区本土植物多样性沿着远郊农区-城郊-城区梯度性下降;但由于大量外来物种引入,总体植物多样性反而升高^[55]。而另有研究则认为,尽管城市化会对城市生物多样性带来影响,但不会改变地带性物种的群落特征^[54],在一定程度上会导致植物群落季相的变化^[57]。因而,如何更为科学合理地评估城市景观格局演变对生物多样性的影响,以及城市植物群落结构和季相变化对城市生态功能的影响,成为当前需要重视的课题。

1.6 城市生态用地与城市生态安全

随着社会经济发展、人口急剧增长和城市扩张,生态用地在不断流失,如何通过城市生态用地的合理规划与设置,探讨控制城市环境灾害发生,实现城市生态安全是目前大家关注的热点^[11,13]。在城市化水平不断提高背景下,以城镇用地大面积增加、生态用地和农业用地大面积流失为特点的城市化过程,对暴雨径流和洪水过程产生了显著影响,使得最大洪峰流量和洪量加大,汇流时间缩短。在土地资源有限而城市扩张迅猛、面临发展与保护双重压力下,科学判别和界定城市扩张背后的生态用地底线并给予合理保护,最终建立科学合理的生态空间,对于城市生态系统健康和可持续发展具有重要的理论和现实意义^[12]。城市生态用地集成了多种生态功能,也是生态系统稳定和区域生态安全的重要保障^[5]。俞孔坚等^[13]从土地的地表属性和空间属性两个方面,界定了生态用地的内涵,并以北京市为例,模拟了北京城镇格局扩张的生态环境效应,指出了北京基于“低水平生态安全格局”的城镇发展格局,以及所需要的生态用地底线^[57]。

利用景观空间模型对景观格局进行优化并实现生态用地科学管理是近年来一个重要的发展趋势。除了利用元胞自动机等模型外,已开发的景观优化模型还有很多,比如 PLM(Patuxent Landscape Model)景观模型,能够阐明不同管理和气候情景下流域的生态效应^[58]; InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)用于计算生态系统服务的生物物理量 and 价值量,可为生态系统服务的建模和决策提供支持; GUMBO(Global Unified Metamodel of the Biosphere)模型是第一个包括动态地球系统内部人类技术、经济生产和福利以及生态系统物品和服务之间动态反馈的全球模型^[59]。模型研究的优势是可以融合多源空间信息,并结合生态系统服务评估,为生态用地规划、管理与生态空间优化提供决策支持。

2 现有研究中存在的问题与不足

纵观目前在城市景观格局演变及其环境效应方面的研究,还存在以下问题和不足。

(1) 重视城市化过程影响景观格局演变的量化研究,缺乏对格局演变的生态学意义解释。现有研究中,城市化对景观格局演变的影响得到了广泛的关注,并已经开展了大量的工作,但所有这些研究均将重点放在城市化过程中景观格局演变的定量化方面,常常是基于不同时期遥感影像的土地利用解译结果,通过选取一些景观格局指数,定量分析城市景观格局的演变特征以及与城市化过程的关系,如此的研究结果常常与选择的遥感影像时段及季相密切相关,景观格局演变对生态环境及其区域生态安全的影响到底如何^[11-12,60],往往缺乏深入探讨;与此同时,对于不同地区城市发展过程中景观空间扩展的最佳布局重视不够。

(2) 重视城市景观格局演变与热岛效应的定量关系研究,但缺乏对于景观格局影响热岛效应的机理研究。城市景观格局演变与热岛效应虽然得到了广泛的关注,但许多工作多局限于两者之间定量关系的数理统计分析,尤其是重视城市不透水面/绿地景观所占比例与城市热岛效应之间的关系,对于景观格局影响城市热环境的机理缺乏深入研究。如,不同景观类型的斑块大小、形状、空间邻接关系如何影响城市地表的显热、潜热、蒸散发过程,以及对地表反照率的影响等等,缺乏深入的探讨^[33],导致无法给出较为系统和定量的结论,这也使得现有研究难以直接指导城市规划与景观设计,从而减缓城市热岛效应。

(3) 重视对城市景观格局演变的环境影响的单方面研究,缺乏从生态安全角度开展综合性研究。城市景观格局演变的生态环境效应除了热岛效应外,还包括多个方面,如城市景观格局演变对水文、水环境、大气环境、土壤质量、生物多样性等方面,由此会带来大气灰霾效应、城市面源污染和洪涝灾害效应,从而导致城市生态系统功能和人居环境质量的下降。目前对于城市景观格局演变的生态环境影响从不同方面开展了大量的研究,但将所有生态环境效应综合在一起开展研究相对较少。城市绿地景观在改善城市环境质量、提高人居环境舒适度方面起到了重要作用^[10, 33, 52],但如何通过合理设置生态用地,有效提高城市生态服务功能和保障城市生态安全,目前仍缺乏深入而又系统的研究。为此,一些学者建议通过提高城市雨水利用效率来降低城市洪水发生概率,进而规避可能出现的洪涝风险^[61],但如何通过城市景观优化布局,既不影响城市的空间发展,也可以提高降水利用效率,同时可以控制城市面源污染和洪涝灾害发生,目前尚缺乏成熟的模式和方法。这也就需要从城市绿地景观规划到城市生态景观规划的转变,需要重点解决区域整体的生态系统服务价值的最大化,不能为了达到某种视觉效果或艺术追求,甚至特定生态功能,而损害城市生态系统的其它服务价值,让整体生态系统发挥最大的生态价值是城市生态景观规划设计的关键技术^[62]。

3 研究展望

城市化将成为我国未来相当长一段时间内发展的必然趋势,其对城市景观格局演变的影响,以及由此带来的城市热岛效应、大气灰霾效应、水环境效应、生态服务效应、生态用地流失和区域生态安全等将成为学术界、管理者和公众关注的热点问题。如何及时解决城市景观格局演变带来的生态环境问题迫在眉睫。

(1) 综合类型、结构和格局多层次景观信息,研究城市景观格局演变的生态环境效应,探讨城市未来的研究重点将包括三个方面。环境问题形成的机理。城市化发展过程中出现的所有问题均与城市土地利用结构的改变和景观格局演变密切相关。为了解决问题,首先需要解剖清楚城市景观格局演变对各种生态环境的影响,找到城市生态环境问题形成的根源;与此同时,随着国民经济发展和人类生活水平提高,人们对居住环境的要求愈来愈高,如何提高城市生态系统的质量也成为广大民众关注的课题。阐明景观格局演变的环境效应将是解决城市环境问题、提高人居环境质量的基础。因此,基于景观类型,定量研究斑块类型、形状、大小与地表气温、地表径流、水环境、大气环境和生物多样性之间的关系;从景观结构,定量研究不同功能区景观类型空间邻接关系和配置对地表热环境、水环境、大气环境等的影响;从景观格局角度,定量研究城市景观格局在减缓城市热岛效应、洪涝灾害、面源污染、大气灰霾效应等方面的作用,将是未来的一个发展方向。

(2) 集成景观斑块和城市功能区等多尺度信息,研究城市景观格局演变的生态环境效应的尺度差异。由于景观格局和生态过程涉及到不同的研究尺度,并且随着尺度的变化而变化,使得定量描述景观格局与生态过程之间的关系,成为目前景观生态学研究的一个热点和难点。不同尺度的研究需要从观测技术、数据资料、分析方法等方面进行设计和保障。景观斑块尺度研究可以揭示景观类型、结构等特征对环境效应的影响,而城市功能区则包含了多种景观要素,形成具有特定社会经济功能的区域,对其格局和环境效应的研究能反映不同景观要素的综合影响,并可以更好的为城市管理和规划服务。

(3) 融合城市空间扩展与生态服务评估模型,建立基于城市生态空间扩展与优化决策模型,探讨城市生态空间优化模式与安全格局。随着城市化发展对土地资源需求的持续增加,可用于城市生态服务的土地资源越来越少,但为了实现城市生态系统的健康和区域生态安全,必须保障最基本的城市生态用地,来满足城市生态服务的需求。这不仅涉及到生态用地的数量,也涉及到生态用地的空间分布及其配置关系,因此,开展城市

景观格局演变的环境效应研究,探讨城市生态空间扩展与优化的模式和方法,将成为实现城市快速发展与生态安全双赢的重要保障。基于城市空间扩展模型可以系统分析城市景观格局演变的趋势,基于生态服务模型可以揭示生态用地流失和景观格局演变对区域生态服务和安全格局的影响,通过构建城市生态空间优化决策模型,探讨不同类型城市功能区生态用地适宜模式与城市生态安全格局,基于模型模拟结果的直观显示可以更好地指导城市景观规划与可持续发展,避免城市发展过程的盲目性。

References:

- [1] Tratalos J, Fuller R A, Warren P, Davies R G, Gaston K J. Urban form, biodiversity potential and ecosystem services. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 83(4): 308–317.
- [2] Grim N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of Cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756–760.
- [3] Kong F H, Yin H, Nakagoshi N, James P. Simulating urban growth processes incorporating a potential model with spatial metrics. *Ecological Indicators*, 2012, 20: 82–91.
- [4] Suriya S, Mudgal B V. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam subwatershed — A case study. *Journal of Hydrology*, 2012, 412–413: 210–219.
- [5] Lovell S T, Johnston D M. Creating multifunctional landscapes: How can the field of ecology inform the design of the landscape? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(4): 212–220.
- [6] Li J X, Song C H, Cao L, Zhu F G, Meng X L, Wu J G. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands — A case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115: 3249–3263.
- [7] Li F, Ye Y P, Song B W, Wang R S. Spatial structure of urban ecological land and its dynamic development of ecosystem services — A case study in Changzhou City, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5623–5631.
- [8] Zhou Z X, Qiu L H. Experimental study on effect of urbanization on service functions of ecosystems — A case study in southern suburbs of Xi'an City. *Arid Zone Research*, 2011, 28(6): 674–679.
- [9] Strohbach M W, Haase D. Above-ground carbon storage by urban trees in Leipzig, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 104(1): 95–104.
- [10] Kadish J, Netusil N R. Valuing vegetation in an urban watershed. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 104(1): 59–65.
- [11] Pauleit S, Ennos R, Golding Y. Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change: A study in Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 71(2/4): 295–310.
- [12] Nuissl H, Haase D, Lanzendorf M, Wittmer H. Environmental impact assessment of urban land use transitions: A context-sensitive approach. *Land Use Policy*, 2009, 26(2): 414–424.
- [13] Yu K J, Qiao Q, Li D H, Yuan H, Wang S S. Ecological land use in there towns of eastern Beijing: A case study based on landscape security pattern analysis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1932–1939.
- [14] Chen L D, Qi X, Li F, Yang L R. Disturbances of urbanization to river course system and related ecological restoration principles and approaches. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4): 805–811.
- [15] Liu Z H, Li Y, Peng J. Progress and perspective of the research on hydrological effects of urban impervious surface on water environment. *Progress in Geography*, 2011, 30(3): 275–281.
- [16] Xie M M, Wang Y L, Fu M C. An overview and perspective about causative factors of surface urban heat island effects. *Progress in Geography*, 2011, 30(1): 35–41.
- [17] Nagase A, Dunnett N. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 104(3/4): 356–363.
- [18] Liu Z H, Wang Y L, Peng J, Xie M M, Li Y. Using ISA to analyze the spatial pattern of urban land cover change: A case study in Shenzhen. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 961–971.
- [19] Sun R H, Chen A L, Chen L D, Lü Y H. Cooling effects of wetlands in urban region: The case of Beijing. *Ecological Indicators*, 2012, 20: 57–64.
- [20] Li R, Li J X, Li C, Qin H, Xu M C, Zhang T. Spatiotemporal dynamics of coastal landscape pattern of Shanghai during its rapid urbanization. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11): 2353–2359.
- [21] Liu J, Cui S H, Qiu Q Y, Zhang G Q, Huang Y F. Evolvement of landscape pattern in coastal peri-urban area: A case study of Jimei District,

- Xiamen City. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4): 856–862.
- [22] Aguilera F, Valenzuela L M, Botequilha-Leitao A. Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 99(3/4): 226–238.
- [23] Yu L S, Fu Y F, Yu H Y, Li Z Q. Landscape pattern gradient dynamics and desakota features in rapid urbanization area: A case study in Panyu of Guangzhou. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 171–180.
- [24] Wu X Q, Hu Y M, He H S, Bu R C, Xi F M. Research for scenarios simulation of future urban growth and land use change in Shenyang City. *Geographical Research*, 2009, 128(15): 1264–1275.
- [25] Salvati L, Munafo M, Morellic V G, Sabbi A. Low-density settlements and land use changes in a Mediterranean urban region. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105(1/2): 43–52.
- [26] Sun C, Wu Z F, Lü Z Q, Yao N, Wei J B. Quantifying different types of urban growth and the change dynamic in Guangzhou using multi-temporal remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, doi: 10.1016/j.jag.2011.12.012
- [27] Chen L D, Yang S, Feng X M. Land use change characteristics along the terrain gradient and the spatial expanding analysis: A case study of Haidian District and Yanqing County, Beijing. *Geographical Research*, 2008, 27(6): 1225–1234.
- [28] Bohnet I C, Pert P L. Patterns, drivers and impacts of urban growth: A study from Cairns, Queensland, Australia from 1952 to 2031. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 97(4): 239–248.
- [29] Bu X G, Wang Y L, Wu J S. The effect of landform on landscape pattern vertical differentiation in rapidly urbanized Shenzhen City. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 75–82.
- [30] Yang Y T, Gong J Y, Zhou Q M, Wang Y Y. Impacts of landscape pattern on urban expansion: A case study of Beijing City. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(12): 320–329.
- [31] Jusuf S K, Wong N H, Hagen E, Anggoro R, Hong Y. The influence of land use on the urban heat island in Singapore. *Habitat International*, 2007, 31: 232–242.
- [32] Li J J, Wang X R, Wang X J, Ma W C, Zhang H. Remote sensing evaluation of urban heat island and its spatial pattern of the Shanghai metropolitan area, China. *Ecological Complexity*, 2009, 6(4): 413–420.
- [33] Sun R H, Chen L D. How can urban water bodies be designed for climate adaptation? *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105(1/2): 27–33.
- [34] Onishi A, Cao X, Ito T, Shi F, Lmura H. Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2010, 9(4): 323–332.
- [35] Papangelis G, Tombrou M, Dandou A, Kontos T. An urban “green planning” approach utilizing the Weather Research and Forecasting (WRF) modeling system. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105(1/2): 174–183.
- [36] Xiao R B, Ouyang Z Y, Zheng H, Li W F, Schienke E W, Wang X K. Spatial pattern of impervious surfaces and their impacts on land surface temperature in Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(2): 250–256.
- [37] Imhoff M L, Zhang P, Wolfe R E, Bounoua L. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 504–513.
- [38] Chen H, Gu L, Li Y Q, Mu C L. Analysis on relations between the pattern of urban forests and heat island effect in Chengdu. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4865–4874.
- [39] Zhu C Y, Li S H, Ji P, Ren B B, Li X Y. Effects of the different width of urban green belts on the temperature and humidity. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 383–394.
- [40] Cao X, Onishi A, Chen J, Imura H. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(4): 224–231.
- [41] Chang C R, Li M H, Chang S. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei City parks. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(4): 386–395.
- [42] Shao T Y, Zhou Z X, Wang P C, Tang W P, Liu X Q, Hu X Y. Relationship between urban green-land landscape patterns and air pollution in the central district of Yichang City. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 691–696.
- [43] Ding Y, Li G C, Lu X, Gao M. Spatial Heterogeneity and Air Pollution Removal by Green Space in Greater Pearl River Delta. *Progress in Geography*, 2011, 30(11): 1415–1421.
- [44] Caradot N, Granger D, Chappier J, Cherqui F, Chocat B. Urban flood risk assessment using sewer flooding databases. *Water Science & Technology*, 2011, 64(4): 832–40.
- [45] Yuan Y, Shi P J, Liu Y H, Zou M. Impact of land use change on urban flood disaster. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 6–13.
- [46] Shepherd K A, Ellis P A, Rivett M O. Integrated understanding of urban land, groundwater, baseflow and surface-water quality, UK. *Science of the Total Environment*, 2006, 360(1/3): 180–195.

- [47] Rivett M O , Ellis P A , Mackay R. Urban groundwater baseflow influence upon inorganic river-water quality: The River Tame headwaters catchment in the City of Birmingham , UK. *Journal of Hydrology* , 2011 , 400(1/2) : 206–222.
- [48] He H M , Zhou J , Wu Y J , Zhang W C , Xie X P. Modeling the response of surface water quality to the urbanization in Xi'an , China. *Journal of Environmental Management* , 2010 , 86(4) : 731–749.
- [49] Wang L , Huang Y F , Wang G Q. Review of urban nonpoint source pollution models. *Environmental Science* , 2010 , 31(10) : 2532–2540.
- [50] Guo Q H , Ma K M , Yang L. Main sources of urban non-point source pollution and control measures for classified catchments. *Environmental Science* , 2006 , 27(11) : 2170–2175.
- [51] Zhao H T , Li X Y , Wang X M. Heavy metal contents of road-deposited sediment along the urban-rural gradient around Beijing and its potential contribution to runoff pollution. *Environmental Science and Technology* , 2011 , 45(17) : 7120–7127.
- [52] Diaz-Ramirez J , Duan Z Y , McAnally W , Martin J. Sensitivity of the HSPE model to land use / land cover datasets. *Journal of Coastal Research* , 2005 , 52: 89–94.
- [53] Hoos A B , McMahon G. Spatial analysis of instream nitrogen loads and factors controlling nitrogen delivery to streams in the southeastern United States using spatially referenced regression on watershed attributes (SPARROW) and regional classification frameworks. *Hydrological Processes* , 2009 , 23(16) : 2275–2294.
- [54] Tian Z H , Cai B M , Da L J. Diversity , spatial pattern and dynamics of vegetation under urbanization in Shanghai (VIII) : Distribution of native terrestrial wild plants and their applications to urban greening in Shanghai. *Journal of East China Normal University (Natural Science)* , 2011 , (4) : 24–34.
- [55] Song Y T , Shi Z H , Yu S X , Hao R. Influence of urbanization on the characters of plants composition in urban greenspace in Shenzhen , China. *Ecology and Environmental Sciences* , 2010 , 19(3) : 615–620.
- [56] Buyantuyev A , Wu J. Urbanization diversifies land surface phenology in arid environments: Interactions among vegetation , climatic variation , and land use pattern in the Phoenix metropolitan region , USA. *Landscape and Urban Planning* , 2012 , 105(1/2) : 149–159.
- [57] Yu K J , Wang S S , Li D H , Qiao Q. Ecological baseline for Beijing's urban sprawl: Basic ecosystem services and their security patterns. *Planning Review* , 2010 , 34(2) : 19–24.
- [58] Voinov A , Costanza R , Fitz C , Maxwell T. Patuxent landscape model: Hydrological model development. *Water Resources* , 2007 , 34(2) : 163–170.
- [59] Boumans R , Costanza R , Farley J , Wilson M A , Portela R , Rotmans J , Villa F , Grasso M. Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the GUMBO model. *Ecological Economics* , 2002 , 41(3) : 529–560.
- [60] Chen L D , Liu Y , Lü Y H , Feng X M , Fu B J. Landscape pattern analysis in landscape ecology: Current , challenges and future. *Acta Ecologica Sinica* , 2008 , 28(11) : 5521–5531.
- [61] Zhao Y W , Yang Z F. Discussion on the ecological utilization of the urban rainfall. *Soil and Water Conservation in China* , 2005 , 7: 3–5.
- [62] Sun R H , Xu Z L , Chen L D , Li F. Theoretical framework and key techniques of urban ecological landscape research. *Acta Ecologica Sinica* , 2012 , 32(7) : 1979–1986.

参考文献:

- [7] 李锋, 叶亚平, 宋博文, 王如松. 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变——以常州市为例. *生态学报* , 2011 , 31(19) : 5623–5631
- [8] 周忠学, 仇立慧. 城市化对生态系统服务功能影响的实证研究——以西安市南郊为例. *干旱区研究* , 2011 , 28(6) : 674–679.
- [13] 俞孔坚, 乔青, 李迪华, 袁弘, 王思思. 基于景观安全格局分析的生态用地研究——以北京市东三乡为例. *应用生态学报* , 2009 , 20(8) : 1932–1939.
- [14] 陈利顶, 齐鑫, 李芬, 杨丽蓉. 城市化过程对河道系统的干扰与生态修复原则和方法. *生态学杂志* , 2010 , 29(4) : 805–811.
- [15] 刘珍环, 李猷, 彭建. 城市不透水表面的水环境效应研究进展. *地理科学进展* , 2011 , 30(3) : 275–281
- [16] 谢苗苗, 王仰麟, 付梅臣. 城市地表温度热岛影响因素研究进展. *地理科学进展* , 2011 , 30(1) : 35–41.
- [18] 刘珍环, 王仰麟, 彭建, 谢苗苗, 李猷. 基于不透水表面指数的城市地表覆被格局特征——以深圳市为例. *地理学报* , 2011 , 66(7) : 961–971.
- [20] 李蓉, 李俊祥, 李铨, 秦海, 徐明策, 张挺. 快速城市化阶段上海海岸带景观格局的时空动态. *生态学杂志* , 2009 , 28(11) : 2353–2359.
- [21] 刘江, 崔胜辉, 邱全毅, 张国钦, 黄云凤. 滨海半城市化地区景观格局演变——以厦门市集美区为例. *应用生态学报* , 2010 , 21(4) : 856–862.
- [23] 俞龙生, 符以福, 喻怀义, 李志琴. 快速城市化地区景观格局梯度动态及其城乡融合区特征. *应用生态学报* , 2011 , 22(1) : 171–180.
- [24] 吴晓青, 胡远满, 贺红士, 布仁仓, 郝凤明. 沈阳市城市扩展与土地利用变化多情景模拟. *地理研究* , 2009 , 28(15) : 1264–1275.

- [27] 陈利顶, 杨爽, 冯晓明. 土地利用变化的地形梯度特征与空间扩展——以北京市海淀区和延庆县为例. 地理研究, 2008, 27(6): 1225-1234.
- [29] 卜心国, 王仰麟, 吴健生. 深圳快速城市化中地形对景观垂直格局的影响. 地理学报, 2008, 63(1): 75-82.
- [30] 杨叶涛, 龚建雅, 周启鸣, 王迎迎. 土地利用景观格局对城市扩张影响研究. 自然资源学报, 2010, 25(12): 320-329.
- [38] 陈辉, 古琳, 黎燕琼, 慕长龙. 成都市城市森林格局与热岛效应的关系. 生态学报, 2009, 29(9): 4865-4874.
- [39] 朱春阳, 李树华, 纪鹏, 任斌斌, 李晓艳. 城市带状绿地宽度与温湿效益的关系. 生态学报, 2011, 31(2): 383-394.
- [42] 邵天一, 周志翔, 王鹏程, 唐万鹏, 刘学全, 胡兴宜. 宜昌城区绿地景观格局与大气污染的关系. 应用生态学报, 2004, 15(4): 691-696.
- [43] 丁宇, 李贵才, 路旭, 高梅. 空间异质性及绿色空间对大气污染的削减效应——以大珠江三角洲为例. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1415-1421.
- [45] 袁艺, 史培军, 刘颖慧, 邹铭. 土地利用变化对城市洪涝灾害的影响. 自然资源学报, 2003, 12(3): 6-13.
- [49] 王龙, 黄跃飞, 王光谦. 城市非点源污染模型研究进展. 环境科学, 2010, 31(10): 2532-2540.
- [50] 郭青海, 马克明, 杨柳. 城市非点源污染的主要来源及分类控制对策. 环境科学, 2006, 27(11): 2170-2175.
- [54] 田志慧, 蔡北溟, 达良俊. 城市化进程中上海植被的多样性、空间格局和动态响应(Ⅷ): 上海乡土陆生草本植物分布特征及其在城市绿化中的应用前景. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011, (4): 24-34.
- [55] 宋艳敏, 史志华, 余世孝, 郝蓉. 城市化对绿地植物组成特征的影响——以深圳为例. 生态环境学报, 2010, 19(3): 615-620.
- [57] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 乔青. 北京城市扩张的生态底线——基本生态系统服务及其安全格局. 城市规划, 2010, 34(2): 19-24.
- [60] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. 生态学报, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [61] 赵彦伟, 杨志峰. 城市雨水生态化利用探讨. 中国水土保持, 2005, 7: 3-5.
- [62] 孙然好, 许忠良, 陈利顶, 李芬. 城市生态景观研究的基础理论框架与技术构架. 生态学报, 2012, 32(7): 1979-1986.