

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第1期 Vol.34 No.1 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 1 期 2014 年 1 月 (半月刊)

目次

卷首语: 复杂与永续..... (I)

前沿理论与学科综述

城市复合生态及生态空间管理 王如松, 李 锋, 韩宝龙, 等 (1)

海洋生态系统固碳能力估算方法研究进展 石洪华, 王晓丽, 郑 伟, 等 (12)

城市生态系统灵敏度模型评述 姚 亮, 王如松, 尹 科, 等 (23)

城市生活垃圾代谢的研究进展..... 周传斌, 徐琬莹, 曹爱新 (33)

个体与基础生态

胶州湾生物-物理耦合模型参数灵敏度分析 石洪华, 沈程程, 李 芬, 等 (41)

渤海湾大型底栖动物调查及与环境因子的相关性 周 然, 覃雪波, 彭士涛, 等 (50)

生物扰动对沉积物中污染物环境行为的影响研究进展 覃雪波, 孙红文, 彭士涛, 等 (59)

种群、群落和生态系统

密云水库上游流域生态系统服务功能空间特征及其与居民福祉的关系 ... 王大尚, 李屹峰, 郑 华, 等 (70)

长岛自然保护区生态系统维护的条件价值评估 郑 伟, 沈程程, 乔明阳, 等 (82)

海岛陆地生态系统固碳估算方法 王晓丽, 王 媛, 石洪华, 等 (88)

景观、区域和全球生态

区域生态文明建设水平综合评估指标 刘某承, 苏 宁, 伦 飞, 等 (97)

基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价 杨建强, 朱永贵, 宋文鹏, 等 (105)

1985 年以来黄河三角洲孤东海岸演变与生态损益分析 刘大海, 陈小英, 徐 伟, 等 (115)

基于复合生态系统理论的海洋生态监控区区划指标框架研究 徐惠民, 丁德文, 石洪华, 等 (122)

我国环境功能评价与区划方案 王金南, 许开鹏, 迟妍妍, 等 (129)

资源与产业生态

生态产业园的复合生态效率及评价指标体系 刘晶茹, 吕 彬, 张 娜, 等 (136)

我国农业生态效率的时空差异..... 程翠云, 任景明, 王如松 (142)

内蒙古半干旱生态脆弱矿区生态修复耦合机理与产业模式 陈玉碧, 黄锦楼, 徐华清, 等 (149)

基于物质流分析方法的生态海岛建设研究——以长海县为例 陈东景, 郑 伟, 郭惠丽, 等 (154)

再生(污)水灌溉生态风险与可持续利用 陈卫平, 吕斯丹, 张炜铃, 等 (163)

基于流域单元的海湾农业非点源污染负荷估算——以莱州湾为例..... 麻德明, 石洪华, 丰爱平 (173)

集约用海对海洋生态环境影响的评价方法 罗先香,朱永贵,张龙军,等 (182)

城乡与社会生态

基于生态系统服务的城市生态基础设施:现状、问题与展望..... 李 锋,王如松,赵 丹 (190)

北京城区道路系统路网空间特征及其与 LST 和 NDVI 的相关性 郭 振,胡 聃,李元征,等 (201)

基于复合生态功能的城市土地共轭生态管理 尹 科,王如松,姚 亮,等 (210)

重庆市森林生态系统服务功能价值评估 肖 强,肖 洋,欧阳志云,等 (216)

渤海湾港口生态风险评估 彭士涛,覃雪波,周 然,等 (224)

达标污水离岸排海末端处置技术研究综述 彭士涛,王心海 (231)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 238 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 28 * 2014-01



封面图说: 北京奥林匹克公园——在高楼林立的大城市中,办公楼、居民区、学校、路网系统、公园以及各种水泥、沥青硬路面和树木、绿草地、土面、水面等等组成了复杂多样的城市生态景观,居住着密集的人口并由于人们不断的、强烈的干预,使这个城市生态系统显得尤其复杂而又多变。因此,系统复杂性及灵敏度是困扰城市生态系统研究和管理的重要因素,建立灵敏度模型是致力于解决城市规划管理中的复杂性问题的有效方法,网状思维与生物控制论观是其核心,也是灵敏度模型的思想基础。图为北京中轴线北端被高楼簇拥着的奥林匹克公园的仰山和龙型水系。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201307181908

李锋,王如松,赵丹.基于生态系统服务的城市生态基础设施:现状、问题与展望.生态学报,2014,34(1):190-200.

Li F, Wang R S, Zhao D. Urban ecological infrastructure based on ecosystem services: status, problems and perspectives. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (1): 190-200.

基于生态系统服务的城市生态基础设施: 现状、问题与展望

李 锋*, 王如松, 赵 丹

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:城市生态基础设施是城市可持续发展的重要基础,也是建设生态城市的重要保证。生态系统服务是城市生态基础设施建设的核心与关键。在快速城市化的背景下,保障生态基础设施的结构完整性和功能完善性尤为重要。在阐述生态系统服务的基础上,对生态基础设施的概念与类型进行了概述;从城市湿地生态基础设施、绿地生态基础设施以及城市地表硬化的生态工程改造 3 个方面对城市生态基础设施研究现状进行综述;对生态基础设施结构与功能评估方法进行了总结,对基于生态系统服务的城市生态基础设施研究进行了综合评述,首次提出了城市表面生态学的概念与研究展望,为城市生态系统服务的强化与调控提供了方法论指导。城市生态基础设施与表面生态学的整合研究将对城市水文效应(内涝)、灰霾效应(PM_{2.5})、热岛效应、水体污染与富营养化等备受关注的重大问题提供新的解决思路与科学方法。

关键词:城市;生态基础设施;表面生态学;生态系统服务;地表硬化

Urban ecological infrastructure based on ecosystem services: status, problems and perspectives

LI Feng*, WANG Rusong, ZHAO Dan

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

Abstract: Cities are complex socio-economic-natural ecosystems dominated by human activities, which define land use patterns. Urban ecological infrastructure is the important foundation of urban sustainable development and also the substantial guarantee of eco-city development. Ecosystem service is the core and key of urban ecological infrastructure construction. Ecosystem services provided by ecological infrastructure in urban areas include air purification, climate regulation, noise reduction, waste treatment, food supply, water flow regulation and runoff mitigation, urban temperature regulation, moderation of environmental extremes, pollination and seed dispersal, recreation and cognitive development, animal sighting and ecosystem disservices. With rapid urbanization, it is of great importance to ensure the structural integrity and functional perfection of the ecological infrastructure. The paper began with brief description about the concept and types of the ecological infrastructure based on ecosystem services; then reviewed the research status of ecological infrastructure from three aspects: 1) urban wetland ecological infrastructure; 2) urban green space ecological infrastructure; 3) ecological engineering and reconstruction of urban impervious surface; The influences of urbanization on urban wetlands and green space were analyzed. The complex ecological effect and its evaluation methods of urban impervious surface, including urban flooding, heat island effect, atmospheric haze, noise, water and soil pollution, habitat loss and biodiversity

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(71273254)

收稿日期:2013-07-18; 修订日期:2013-09-29

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

reduction, and biogeochemical cycle change, were also comprehensively summarized in this paper. At last it reviewed the evaluation methods of structure and function of ecological infrastructure and comprehensively put forward the research emphasis and perspectives of urban ecological infrastructure based on ecosystem services. The current problems of research contents, viewpoint, methods and evaluation indicator system were point out. Finally, the concept and perspective of urban surface ecology was advanced for the first time in this article which can provide methodology for enhancement and regulation of urban ecosystem services. The integrated research of urban ecological infrastructure and surface ecology will provide new resolving ideas and scientific methods for urban significant problems such as hydrologic effect (waterlogging), atmospheric haze effect (PM_{2.5}), heat island effect, water pollution and eutrophication. For future study, six perspectives on ecological infrastructure were put forward in this article as follows: 1) Strengthening the quantitative evaluation of urban ecological infrastructure to provide useful references for urban decision-making and management. 2) Enhancing the study on evaluation model of functions of urban ecological infrastructure. 3) Emphasizing the intersecting and application of different majors and subjects. 4) Paying more attention to the integration and system of urban ecological infrastructure. 5) Synthesizing urban ecological infrastructure and municipal infrastructure as a organic whole at the city level. 6) Reinforcing and deepening the study of urban surface ecology related to urban impervious surface to offer scientific approaches for urban environmental issues, such as urban flooding, atmospheric haze effect (PM_{2.5}), heat island effect, water pollution and eutrophication.

Key Words: urban; ecological infrastructure; surface ecology; ecosystem services; impervious surface

城市是一类以人类活动为中心的社会-经济-自然复合生态系统^[1]。城市生态基础设施是提升城市生态系统健康水平和城市人居环境的关键环节,是社会赖以生存发展的基本物质条件。然而随着经济的高速发展与人口增长,城市扩张迅速,土地硬化面积扩大,使得城市生态基础设施的结构和服务功能发生了明显改变,原来以植被为主的自然景观逐渐被众多的人工建筑物质所取代^[2]。沥青、混凝土等不透水地面的增加,导致城市绿地和湿地生态基础设施的面积大幅减少,生境破碎化严重,并进一步加剧了城市热岛效应、灰霾效应、雨洪雨污效应及水体富营养化等生态环境问题,直接影响了城市生态系统服务和人居环境。据住房和城乡建设部 2010 年对 351 个城市进行的专项调研结果显示,2008—2010 年间,全国 62% 的城市发生过城市内涝,内涝灾害超过 3 次以上的城市有 137 个。“去武汉看海”、“到杭州观水漫金山”、“坐北京地铁赏水帘洞景”……频发的城市内涝使得越来越多的人认识到:城市除了有市政设施以外,还需要有“生态基础设施”^[3-4]。保障生态基础设施的结构完整性和功能完善性,对于维持城市生态平衡和改善城市环境具有无可替代的重要作用,成为目前国内外学者们关注的热点^[5-8]。

1 城市生态基础设施的概念与类型

1.1 城市生态基础设施的概念及内涵

生态基础设施(Ecological Infrastructure, EI)一词最早见于联合国教科文组织的“人与生物圈计划”(MAB)1984 年发布的生态城市规划报告中,提出了生态城市规划的五项原则:①生态保护战略;②生态基础设施;③居民生活标准;④文化历史的保护;⑤将自然引入城市。这里生态基础设施主要指自然景观和腹地对城市的持久支持能力^[9]。我国学者^[10]于 2002 年引入了“生态基础设施”(EI)名词并将其应用于城市规划工作中,认为城市生态基础设施是城市所依赖的自然系统,是城市及其居民持续获得自然生态服务的保障,也是城市及其居民能持续地获得自然服务的基础,这些生态服务包括提供新鲜空气、食物、体育、休闲娱乐、安全庇护以及审美和教育等^[10]。它不仅包括传统的城市绿地系统的概念,还更广泛地包含一切能提供上述自然服务的城市绿地系统、林业及农业系统、自然保护地系统^[11-12]。其他学者研究提出了与 EI 概念相关的栖息地网络、生态廊道、绿色通道、生境网络、环境廊道、生态网络、框架景观、生态结构等^[13-14]。作者认为城市生态基础设施是指为人类生产和生活提供生态服务的自然与人工设施,保证自然和人文生态功能正常运行的

公共服务系统,它是社会赖以生存发展的基本物质条件,具有重要的生态系统服务,是城市及其居民持续获得生态系统服务的保障。它是具有净化、绿化、活化、美化综合功能的湿地(肾)、绿地(肺)、地表和建筑物表层(皮)、废弃物排放、处置、调节和缓冲带(口),以及城市的山形水系、生态交通网络(脉)等在生态系统尺度的整合,生态系统服务完善生态基础设施,强化土地、水文、大气、生物、矿物五大生态要素的支撑能力,维持湿地和绿地生态系统结构功能的完整性及生态服务功能,是城市可持续发展的重要基础,也是建设生态城市的重要保证。

1.2 生态基础设施与绿色基础设施的区别与联系

绿色基础设施始于 20 世纪 90 年代的美国马里兰州绿道运动,1999 年美国保护基金会(Conservation Fund)与农业部联合组建了由政府机构和非政府组织成立了“GI 工作小组”(Green Infrastructure Work Group),将绿色基础设施定义为:“GI 是我们国家的自然生命支持系统(nation's natural life support system)——一个由水道、湿地、森林、野生动物栖息地和其他自然区域,绿道、公园和其他保护区域,农场、牧场和森林,荒野和其他维持原生物种、自然生态过程和保护空气和水资源以及提高美国社区和人民生活质量的荒野和开敞空间所组成的相互连接的网络。”2001 年,马里兰州推行了绿图计划(Maryland's Green Print Program),发展了功能健全的庞大绿色基础设施系统,并于 2005 年形成了相应的绿色基础设施评价体系^[15]。

随后,绿色基础设施传到西欧并得到进一步延伸,2005 年英国的简·赫顿联合会(Jane Heaton Associates)在其文章《可持续社区绿色基础设施》(Green Infrastructure for Sustainable Communities)中指出:“GI 是一个多功能的绿色空间网络,对于现有及将来的可持续社区的高质量自然环境和已建环境有一定贡献。”2006 年,英国西北绿色基础设施小组(The North West Green Infrastructure Think-Tank)提出 GI 是一种由自然环境和绿色空间组成的系统,具有类型学、功能性、脉络、尺度与连通性五大特征,并指出了绿色基础设施的规划程序。与美国不同,西欧的绿色基础设施更侧重于城市内外绿色空间的质量^[16],维持生物多样性、野生动物栖息地之间的联系^[17]等方面的意义。然而,绿色基础设施更多强调

绿地、湿地等生态用地与生态廊道的结合和网络化,忽略了绿色空间网络与城市市政基础设施以及城市工程建设的耦合。城市是一类以人类为中心的社会-经济-自然复合生态系统,城市自然子系统必须与经济和社会子系统相结合,并进行系统整合,通过生态系统自组织、自适应、自循环和自恢复的能力保证整个城市生态系统的稳定性,进而实现城市的健康、可持续发展。

因此,尽管“绿色基础设施”弥补了传统“灰色基础设施”的诸多不足,对于提高城市生态系统服务和生态品质具有一定的作用,但城市生态系统需要更具复杂性的“生态基础设施”,将无生命的“灰色基础设施”与有生命的“绿色基础设施”有机整合,形成协同共生、循环再生的基础设施支撑体系,以维持城市生态服务功能的完整性及生命活力。

1.3 城市生态基础设施的类型与主导功能

城市湿地和绿地生态系统是城市生态基础设施的主要组成部分,提供着重要的生态系统服务。城市生态基础设施的类型及其主导服务功能如表 1 所示^[18-20]。

2 城市生态基础设施服务功能研究现状

2.1 城市湿地生态基础设施及其服务功能

2.1.1 湿地生态基础设施的服务功能

湿地被喻为“地球之肾”,是城市生态基础设施的重要组成部分,不但具有丰富的资源,还具有重要的生态系统服务^[21-22],如调节水温 and 径流,防止或减缓洪、涝、渍、旱和改善环境,调节水量在时间、空间上的不均匀分布;为工农业生态和饮水等生活用水提供水源;接纳排水,并通过水体自净与净化,促进营养盐和有机质的流动和循环;供养生物、活化生境、繁衍水生动植物,保障生物物质的生产,维护生物多样性;调节气候,特别是小气候;沟通航运,水力发电;缓冲干扰,吸尘、减噪,防止或减少热岛效应;美化景观和净化环境;以及为居民提供教育、美学、艺术、陶冶情操、游憩及休闲娱乐^[23-24];保障水及其中的一些物质的迁移、转化和循环,维持水生态系统的健康发展。

2.1.2 城市化对湿地生态基础设施及其服务功能的影响

随着城市化水平的不断提高,带来了人口的急

表 1 城市生态基础设施的服务功能
Table 1 Service Functions of Urban Ecological Infrastructure

主要生态基础设施类型 Types of main ecological infrastructure	生态系统服务 Ecosystem services	功能特征 Function characteristics	主要存在问题 Main problems
湿地、森林公园、自然保护区、生态缓冲带 Wetlands, forest parks, natural preserves, ecological buffer belts	调节气候、维持生物多样性和景观完整性与娱乐文化	缓解热岛效应、维持生物多样性、涵养水源,控制城市无序膨胀	城市开发使湿地面积锐减,废水无节制排放破坏湿地生态系统净化能力,城市建设用地侵占损害其连续性,从而使生物栖息地受到威胁
河流、湖泊、交通绿化带、园林绿地、公园 Rivers, lakes, traffic green belt, green space, parks	改善环境质量	减轻噪声、减少悬浮颗粒物、净化水质	长期人工经营,自我演替能力弱,植被生物多样性水平低、需要长期损耗维护费用,河流、湖泊等湿地受到不同程度的污染,功能减弱
小游园、街心绿地、居民区绿地、单位绿地 Small parks, street green land, residential green land, institutional green land	维持社会稳定和谐	提供日常休闲游憩的场所;缓解疲劳,减轻压力;提供交流机会促进并维持社会完整性	长期人工经营,自我演替能力弱,植被生物多样性水平低、需要长期损耗维护费用
农田 Agriculture land	生产原材料、生态缓冲和娱乐文化	生产粮食,和森林公园、生态保护区一起作为城市郊区的绿色开敞空间的一部分,对城市的生态环境进行调节和缓冲,为城市居民提供接触自然、体验农业以及观光休闲的场所,促进城乡生态文化的交流	建设用地侵占,且其生态系统服务被人忽视,现代农业多功能经营方式没有普及

剧增加和聚集、工业化及经济发展、城市规模不断增大,这些都对城市湿地及水生态环境产生了巨大的影响,导致湿地的萎缩以及功能的丧失。城市化带来的植被减少、不透水面积增加、温室气体的排放、水域面积减少、污水的任意排放和水资源的不合理利用等导致自然水循环生态系统遭到破坏,水资源呈现总量上的缺乏与质量上的退化甚至恶化,水环境承载能力超过其自身的极限,水环境结构被破坏,水的时空分布、水分循环及水的理化性质发生改变,水生态服务功能丧失^[25-26]。我国南方多水地区已经呈现水质型缺水的趋势,一些城市面临“有水难用”的困境。如湖北省的武汉、黄石、鄂州、荆州、襄樊、十堰和荆门等城市的 7 个内湖和 11 条纳污河渠水质绝大部分为劣 V 类,武汉市抽查的 65 个湖泊中有 38 个富营养化,占 58.5%。贺晓慧等^[27]以黄河流域郑州段为例,利用 2002、2009 两期遥感影像分析城市化进程下流域景观的变化发现城市用水的增加导致上游水量的减少,流域面积以及部分湿地数量的减少。

与此同时,国内外一些学者开始对如何保护湿地水体等自然景观进行积极研究,并开展了一些运动。1997 年,美国马里兰州发起了名为“Smart

Growth and Neighborhood Conservation”的运动,目的在于通过保护湿地水体、农田、森林等在内的自然开放空间来恢复社区活力,其中的措施有为社区居民兴建必要的公共设施如开放空间、道路等,同时禁止城市建设对一些特定区域的侵占,如大型流域湖泊、农田等^[28]。Weber 等^[29]对美国马里兰州的绿色基础设施进行了评价,通过分析网络中心和连接廊道在地形区域内的各种生态参数和发展过程中的风险因素,测定区域内的生态价值和脆弱性等级,提出湿地水体等的保护优先次序及保护目标。

可见,合理规划城市湿地生态系统,恢复城市湿地,有机地将湿地水景、湿地动植物景观、湿地小气候、湿地文化等与城市功能融为一体将会大大改善城市环境,提高城市环境容量与生态安全水平,充分发挥湿地作为城市基础生态设施的重要生态服务功能。

2.2 城市绿地生态基础设施及其服务功能

2.2.1 城市绿地生态基础设施的服务功能

绿地作为城市的“肺”,是城市生态基础设施中不可或缺的重要组成部分,具有改善城市空气质量、调节小气候、美化城市景观等多种生态功能。随着城市化进程的加速和城市环境问题的加剧,人们越

来越认识到城市绿地生态服务功能的重要性,在城市绿化建设中不仅关心绿地美化、观赏、休憩等功能,更加注重绿地生态系统服务^[30-32],城市绿地已成为衡量城市生态可持续的重要标准^[33-34]。在国内外城市规划和城市生态研究中,关于绿地最常见的4个专业术语就是城市绿地、城市绿色空间、城市开敞空间和城市绿地系统^[35]。在城市绿地系统概念及分类方面,虽然不同行业和学科有不同的认识,但随着人们对城市绿地生态服务功能认识的不断深化,城市绿地的概念也在发展变化。目前,人们对城市绿地的概念和内涵有了更全面的认识,即城市绿地系统不同于传统的园林绿地概念,它是包括城市园林、城市森林、都市农业和滨水绿地以及立体空间绿化在内的绿色网络系统。城市绿地系统是城市绿色空间中以植被为主体,以土壤为基质,以自然和人为因素干扰为特征,在生物和非生物因子协同作用下所形成的有序整体。其结构包括乔木、灌木、草本植物、动物、微生物以及土壤、水文、微气候等物理环境^[36]。

城市绿地基础设施的生态服务功能是指绿地系统为维持城市人类活动和居民身心健康提供物态和心态产品、环境资源和生态公益的能力。它在一定的时空范围内为人类社会提供的产出构成生态服务功效,主要包括:(1)净化环境:净化空气、水体、土壤、固碳释氧、吸收 CO₂ 生产 O₂、杀死细菌、阻滞尘土、降低噪声等;(2)调节小气候:调节空气的温度和湿度,改变风速风向;(3)涵养水源:雨水渗透、保持水土等;(4)土壤活化和养分循环;(5)维持生物多样性;(6)景观功能:组织城市的空间格局;(7)休闲、文化和教育功能;(8)社会功能:维护人们的身心健康,加强人们的沟通,稳定人际关系;(9)防护和减灾功能:抵御大风、地震等自然灾害^[22,31-32,37]。城市绿色空间生态服务功能的强弱取决于绿地的数量、组成结构、镶嵌格局、分布特征、与周边人工景观的联系以及管理水平等。

2.2.2 城市化对绿地生态基础设施及其服务功能的影响

随着我国城市化进程的加快,城市规模在不断扩大。城市中大量高楼大厦的拔地而起与建筑密度的不断增大使得城市绿地和建筑物的竞争异常激烈,城市绿地面积大为减少。城市森林作为城市生

态系统中具有自净功能的重要组分受到了城市化的强烈干扰,以森林为主的自然生态系统不断被支解和蚕食^[38],不仅表现在景观水平上的生境破碎化,更重要的是在小尺度的物种组成结构的明显反映^[39],生态系统面临功能退化、生物多样性丧失的危险^[40]。现在发展中国家的城市化速度每年大约以7%的速度增长^[41],城市数量的增加和城市的外延式发展造成了大量的土地资源,尤其是耕地资源被征用^[42],导致林地、农地面积减少,农产品减产^[43-44]。

目前城市绿地生态基础设施普遍存在以下问题:(1)面积不断减少;(2)市内和郊区分布极不均匀;(3)结构层次单一,多样性差;(4)生态系统服务无法满足人们的需求。城市绿地系统是城市生态系统中非常重要的生态基础设施,是维护和恢复城市生态环境及提高景观活力的最有效措施,快速城市化对于城市绿地生态系统的影响已受到社会的普遍关注,迫切需要人们对城市生态基础设施进行科学的评估和管理。

2.3 城市地表硬化的生态工程改造

城市地表硬化是城市发展和扩张的重要特征之一,也是人类对城市生态基础设施的干扰和破坏的集中表现^[45]。城市以水泥、沥青、混凝土等为主的硬化铺装,大多数为不透水层,严重阻碍土壤和大气之间的物质和能量的交换,改变了能量平衡、水分利用、养分循环、气体交换等典型的生态过程,进而对城市生态系统服务和人居环境造成不同程度的影响^[46]。

2.3.1 城市地表硬化的复合生态效应

由于城市建设过程中大量采用水泥、柏油、混凝土等材质覆盖土壤表面,形成封闭地表,在造成大片田野、耕地、水域等自然生态基础设施消失的同时,也使得我们生存依赖的大地环境彻底“硬化”,从而堵塞了大地的“呼吸”,割裂了人与自然的直接联系,给城市生态和环境带来了显著的不利影响。

(1) 城市水分失衡和内涝

不透水的硬化覆盖使土地失去蓄水功能,下渗能力降低,而洪峰流量显著增加,不仅造成极大的水资源浪费,而且还使城市地面形成有雨就涝、无雨就旱的恶性循环^[47-48]。同时,暴雨条件下地表径流的加剧将增加城市排水的压力,加剧洪涝灾害,阻断雨

水对地下水的补充。

(2) 城市热岛和干岛效应

城市硬化面积的不断扩大,使得下垫面粗糙度增大,反射率减小,地面长波辐射损失减少,致使在同样天气条件下吸收和储存更多的太阳辐射,从而改变了城市下垫面的热力属性,是引发城市热岛效应的重要原因之一^[49-51]。另外,城市自然蒸发、蒸腾量比郊区小,空气含水汽量少,近地面有限的水汽通过湍流不断上传扩散,使城区的绝对湿度比郊区小,形成“城市干岛”。

(3) 灰霾效应和噪声污染

随着硬化地表面积的不断扩张,城市植被覆盖率逐渐减少,加之城市热岛效应的加重,悬浮颗粒物沉降难,空气质量难以改善。同时,硬化了的表面会反射噪音,进而加重城市的噪音污染。

(4) 城市水体的污染加重

城市的硬质下垫面占大多数,径流系数较大,形成径流的时间短,地下入渗量小,对污染物的冲刷强烈。城市暴雨径流的形成冲刷屋面建筑材料、建筑工地、路面垃圾和城区雨水口的垃圾和污水、汽车产生的污染物、大气干湿沉降等,将这些污染物快速地带入了城市河道,造成水体污染和水环境恶化。

(5) 影响土壤质量和生境

城市硬化的地面,阻断了地下与地面以上空气的交流,使水、肥、气、热等条件不能满足植物的正常生长与发育,直接影响城市植被的健康。城市硬化后的地面还会减少土地中动物和微生物生存的机会,从而毁灭地表生态、减少地面土层有机质的补充,加重城市土地的退化,进而降低土壤功能,影响生物的生境^[52]。

(6) 改变生物地球化学循环

城市土地利用的变化,特别是地表硬化及各种生产活动对生态系统生物化学循环,尤其是温室效应、水体富营养化等生态环境问题有着显著的影响^[53]。城市暴雨径流污染和面源污染已成为当今世界上主要的污染问题。而生物地球化学循环又是一个连锁反应的过程,因此,地表硬化对其中某一环节或转化过程的影响,将导致整个循环的失衡和改变。

2.3.2 城市地表硬化的生态效应评估

(1) 城市不透水面的提取

城市硬化地表指数(Impervious Surface Index, 简称为 ISI) 是指单位面积硬化地表的面积比例。ISI 一般通过以下方法提取:1) 对航片或者高分辨率的卫片目视解译,该方法精度很高,但需要巨大的人力、物力,成本高^[54];2) 直接从现有的土地利用/覆盖图转化,该方法便捷快速,但依赖于研究区是否有土地利用/覆盖数据,而且其空间分辨率受限于原数据精度^[55];3) 均一象元估测,利用计算机自动分类获取,该方法假设象元完全被一种地物类型所覆盖,忽视象元内部的异质性^[56];4) 混和象元估测,即通常所说的亚象元分类法^[57-58]。

(2) 城市地表硬化生态效应的评估方法

目前对于城市地表硬化的生态效应的研究主要集中于城市地表硬化对城市热岛效应和城市洪峰径流的影响,对硬化下土壤质量、碳氮循环及微生物性质的研究鲜见报道。在城市不透水面引起城市雨洪效应方面,应用的模型主要包括:美国环保局的暴雨雨水管理模型(SWMM),美国陆军工程兵团的蓄水、处理与溢流模型(STORM),水文计算模型(HSP)等^[59-60]。在城市不透水面与热岛效应的研究方面,则主要通过遥感提取定量分析城市不透水面与城市热岛之间的关系^[61-62]。对于城市地表硬化对土壤质量及碳氮循环的研究,主要采用实地采样测定的方法,如 Steve 等^[63]对美国纽约硬化下土壤与绿地中碳氮含量对比分析表明:城市硬化下 0—15 cm 的土壤碳氮含量分别减少 66%和 95%。

3 生态基础设施结构与功能评估方法

3.1 生态系统服务

生态系统服务研究是当今自然与城市生态系统研究的热点之一^[22,64-65]。生态系统服务可以定义为“自然生态系统及其构成物种支持和实现人类生命活动的条件和过程”^[22],它表现为一些物质能量和信息流,这些流来源于自然资本储量同人造资本和人类资本服务的结合,以产生人类福利^[20]。Daily 等^[22]根据现已掌握的研究材料对生态系统服务的内涵进行了归纳,总结出如下几个方面:生态系统产品的产出、生物多样性的发生和维持、气候和生命的维护、洪水和干旱的缓减、生物地化循环、生物生长所需各种养分的供给、生物传粉、自然害虫控制、种子传播或散布以及对人的美学和精神调节作用。

Costanza 等 13 人 1997 年 5 月在 *Nature* 杂志上发表的有关全球生态系统服务价值的估计^[20], 他们将生态服务功能分为气体调节、气候调节、扰动调节、水调节、水供给、控制侵蚀和保持沉积物、土壤形成、养分循环、废物处理、传粉、生物控制、避难所、食物生产、原材料、基因资源、休闲、文化等 17 个类型, 按 16 种主要生境类型分类, 估计出每年全球生态服务功能价值的下限约 33 万亿美元, 说明自然生态系统对人类提供了巨大的生态服务功能, 而目前快速城市化和不科学、不合理的管理方法造成了自然生态系统服务的明显降低和退化。因此, 需要将生态系统服务理论与方法应用于人类的决策管理之中, 特别是在人类密集活动的城市区域^[20,22]。

3.2 生态基础设施景观结构评估方法和模型

分析生态基础设施的空间结构的差异对于评估生态服务功能具有重要意义。城市生态服务与机理的研究需要一些新的方法来定量景观空间格局, 以比较不同景观、分辨具有特殊意义的景观结构差异, 以及确定格局和功能过程的相互关系等。景观格局数量研究方法分三类: (1) 用于景观组分特征分析的景观空间格局指数; 如斑块面积、斑块数、单位周长的斑块数、边界密度等。(2) 用于景观整体分析的空间格局模型分析; 如空间自相关分析和一些统计学方法。(3) 用于模拟景观格局动态变化的景观模拟模型, 如 CITYgreen 模型、地理加权回归模型、次序 Logit 回归模型、逻辑斯蒂回归模型等。而最小累积阻力模型 (Minimal Cumulative Resistance) 被认为是景观水平上进行景观连接度评价最好的工具之一^[68]。它通过单元最小累积阻力的大小可判断该单元与源单元的“连通性”和“相似性”, 通常“源斑块”对于生态过程是最适宜的, 近年该模型已经应用到城市生态安全格局、城市生态规划及城市适宜生态用地的核算中。

3.3 生态基础设施服务功能评估方法和模型

针对生态基础设施及其服务功能的类型和特点, 学者们采用了不同的服务功能价值的评估方法^[20,22,69-70]。总体可分为物质量和价值量两种评估方法。其中, 物质量评价能够比较客观地评价不同的生态系统所提供的同一项服务能力的大小, 但是各种服务功能之间难以统一用一个综合指标来表示, 而价值量方法对给世人敲响警钟是非常有效的,

但是估算出的价值由于估算方法本身在理论上还有待完善, 而且结果存在主观性与随机性, 所以不是非常准确, 但其有利于决策者进行评价和判断。常见的价值量评价方法有: 费用支出法、市场价值法、机会成本法、影子工程法、恢复与保护费用法、旅行费用法、享乐价格法等。目前, 国内外学者们应用了更多的模型和方法用于生态系统服务的评估, 如美国斯坦福大学“Natural Capital”项目组开发的 InVEST 软件, 把握了较好的总体格局, 并用可视化表达直观地体现了人类活动对生境的威胁程度和影响范围; 生态足迹模型客观反映人类对生态系统 (生态基础设施) 的需求与供给之间的矛盾, 指示自然资源的压力状态; VER 模型 (Ecological Value at Risk) 将生态服务价值的定量化与生态风险分析的数学模型相结合, 可以进行基于生态服务价值的生态风险分析研究。

总体而言, 国外已发展了一些关于生态系统服务及价值评估方法, 目前, 国内多数相关研究仅限于某区域的生态系统服务的概述式评估, 多数套用现成公式计算服务功能, 少数以地理信息系统为技术支撑对区域生态服务功能进行了定量评估, 如索安宁基于遥感技术对于辽河三角洲生态系统服务进行评估研究^[71]。可见新技术与方法正逐渐被用于区域生态系统服务评估, 评估越来越定量化、精细化、模型化, 并且将生态系统服务评估与决策相结合已成为生态系统服务的总体发展方向。准确、有效的定量评估城市生态基础设施的生态服务价值, 利于规划者和政府对湿地和绿地生态效益的经济价值有更直观的、新的认识 and 了解, 为其提供一些辅助决策的参考信息, 成为当地城市及区域规划部门的重要决策工具。

4 结论与讨论

湿地 (肾) 和绿地 (肺) 生态系统是城市重要的生态基础设施, 能促进城市居民身心健康和社会经济的发展, 为人类社会提供着重要的生态系统服务, 如净化环境、涵养水源、保持水土、调节气候、固碳释氧、维持生物多样性等, 是城市生态系统健康、可持续发展的保障。然而, 城市化带来的植被减少、水域面积减少、不透水面积增加、温室气体的排放、污水的任意排放和不合理用水等导致城市生态基础

设施的结构和功能遭到破坏,生态服务功能显著下降,直接影响着城市生态环境和人居生活品质。

目前国内外关于城市生态基础设施及其服务功能已有部分研究,但还不成体系,仍存在一些问题和不足:

(1)在研究内容上,我国缺乏城市生态基础设施的基础理论、技术体系与管理方法的研究,对城市生态基础设施结构与功能的生态耦合关系与调控机理尚不明确,缺乏对其综合的功能评估模型和格局优化方法。

(2)在研究角度上,目前国内外大多学者只关注生态基础设施中湿地或绿地某一方面的内容,重数量轻质量,同时缺乏对城市地表硬化的生态效应研究,缺乏整体性和系统性的综合考虑以及城市生态基础设施的综合管理模式与系统调控方法

(3)在研究方法方面,大多停留在概念与定性分析阶段,定量的研究较少。对于生态基础设施服务功能的评估,国内外大多数学者采用直接套用生态服务价值系数来分析不同用地类型的生态服务功能,由于研究不够深入,方法不统一导致结果有差异,同时缺乏可视化、直观化的模型,对 InVEST 等模型应用较少,特别缺乏在城市生态管理领域的应用;

(4)在评价指标体系方面,针对城市湿地及绿地基础设施的生态服务功能,在不同时间及空间尺度上仍未建立功能全面、系统的评价指标体系。

因此,研究城市生态基础设施的服务功能评估模型、网络格局优化方法以及综合管理模式,并进行系统调控,对于改善城市环境、提高城市生态服务功能和维护城市生态安全具有重要的理论和现实意义,可为城市生态基础设施的结构优化、功能强化与生态管理提供科学依据。

5 研究展望

城市生态基础设施是社会赖以生存发展的基本物质条件,具有重要的生态系统服务,是城市及其居民持续获得生态系统服务的保障。在快速城市化的进程中,保障生态基础设施的健康与完整迫在眉睫。目前国内外关于城市生态基础设施及其服务功能的研究仍存在问题与不足,基于以上综合分析提出今后的研究展望:

(1)加强对于城市生态基础设施服务功能的定

量研究,在此基础上建立不同时间及空间尺度上功能全面、系统的评价指标体系,准确、有效地定量评估城市生态基础设施的生态服务价值,供城市决策管理参考。

(2)加强城市基础设施功能评估模型方面的研究。应当推广 InVEST 等模型在国内的应用,并且结合实际情况对模型进行改进,加强模型在城市生态管理领域的应用。

(3)注重不同学科之间的交叉与应用。生态基础设施及其生态服务功能的研究涉及到生态学、社会学、经济学等多个学科,结合多学科的研究方法有助于从多个角度对生态基础设施进行深入探讨及综合管理,建立系统的调控方法。

(4)必须重视城市生态基础设施的整体性与系统性,加强对城市生态基础设施结构与功能的生态耦合关系的研究。应当将肾(湿地)、肺(绿地)、皮(地表)、口(污染排放)、脉(生态廊道)五大要素整合为一体,将城镇与乡村基础设施整合,同时注重不同空间尺度生态服务功能的差别与衔接,从而形成一个健康高效的生态网络。

(5)必须整合城市生态基础设施与市政基础设施网络。在未来应将生态与市政基础设施有机地结合起来,即把城市湿地、绿地、软化地表、生态廊道与城市给排水系统、道路、交通以及各种污染物排放口等联系起来,形成一个有机的城市基础设施工程网络,以有效缓减和应对城市灾害的发生(如城市雨洪和内涝问题),提高城市安全与健康的生态品质。

(6)加强和深化城市表面生态学研究。作者认为城市表面生态学是研究城市建筑物、构筑物等人工表面结构、形态、过程的物理、化学、生物相互作用机理及其与生态系统服务之间关系的一门城市生态学科。它研究地皮、墙皮、路面、屋顶、河床、堤坝等硬化地表的复合生态效应,以及生态工程的规划、设计与管理方法,旨在优化城市地表结构,整合城市生态基础设施,强化城市生态服务功能。城市生态基础设施与表面生态学的整合研究将对城市水文效应(内涝)、灰霾效应(PM_{2.5})、热岛效应、水体污染与富营养化等备受关注的重大问题提供新的解决思路与科学方法。

References:

- [1] Ma S J, Wang R S. The social-economic-natural complex

- ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(1): 1-9.
- [2] Scalenghe R, Marsan F A. The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 90(1/2): 1-10.
- [3] Yu K J, Han X L, Zhu Q. Ecological infrastructure as a synthetic solution to urban environmental problems. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(5): 808-816.
- [4] Qing Q, Feng W B, Su W C, Peng L. Study of evaluation characteristics of ecological infrastructure and countermeasure in pivot cities of three gorges reservoir region. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2009, 26(3): 40-44.
- [5] Yu K J, Li D H, Chao L M. The landscape strategies to build urban ecological infrastructure. *Planners*, 2011, 17(6): 9-13, 17-17.
- [6] Du S Q, Yu D Y. Urban ecological infrastructure and its construction principles. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(8): 1646-1654.
- [7] Hering J G, Hoehn E, Klinke A, Maurer M, Peter A, Reichert P, Robinson C, Schirmer K, Schirmer M, Stamm C, Wehrli B. Moving targets, long-lived infrastructure, and increasing needs for integration and adaptation in water management: an illustration from Switzerland. *Environment Science and Technology*, 2012, 46(1): 112-118.
- [8] Cameron R W F, Blanus T, Taylor J E, Salisbury A, Halstead A J, Henricot B, Thompson K. The domestic garden-its contribution to urban green infrastructure. *Urban Forestry and Urban Greening*, 11(2): 129-137.
- [9] Liu H L, Li D H, Han X L. Review of ecological infrastructure: concept and development. *City Planning Review*, 2005, 29(9): 70-75.
- [10] Yu K J, Li D H. On anti-planning and ecological infrastructure // Symposium of Hangzhou City Green Forum. Beijing: China Academy of Art Press, 2002: 55-68.
- [11] Yu K J, Li D H, Li W. On establishing the great canal regional ecological infrastructure: strategy and approaches. *Progress in Geography*, 2004, 23(1): 1-12.
- [12] 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. *City Planning Review*, 2010, (2): 19-24.
- [13] Ahern J. Greenways as a planning strategy. *Landscape and Urban Planning*, 1995, 33(1/3): 131-155.
- [14] Cook E, Van Lier H N. Landscape planning and ecological networks: an introduction // *Landscape Planning and Ecological Network*. Amsterdam: Elsevier, 1994: 1-4.
- [15] Maryland Department of Natural Resources. Maryland's Green Infrastructure Assessment[EB/OL]. 2003. <http://www.dnr.state.md.us/greenways/gi/gi.html>.
- [16] Turner T. *City as Landscape: A Post-postmodern View of Design and Planning*. London: Taylor & Francis, 1995.
- [17] Williamson K S. Growing with green infrastructure. Heritage Conservancy, <http://www.heritageconservancy.org>, 2003.
- [18] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D R, Chan K M A, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M R. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [19] Nelson E, Daily G C. Modeling ecosystem services in terrestrial systems. *Biology Reports*, 2010, 2: 53-53.
- [20] Van Oudenhoven A P E, Petz K, Alkemade R, Hein L, de Groot R S. Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services. *Ecological Indicators*, 21: 110-112.
- [21] Constanza R, D'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [22] Wardrop D H, Glasmeier A K, Peterson-Smith J, Eckles D, Ingram H, Brooks R P. Wetland ecosystem services and coupled socioeconomic benefits through conservation practices in the Appalachian Region. *Ecological Applications*, 2011, 21(3) Supplement: S93-S115.
- [23] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington: Island Press, 1997: 18-20.
- [24] Weber T. Ecosystem Services in Cecil County's Green Infrastructure. Technical Report for the Cecil County Green Infrastructure Plan. Cecil County, Maryland. 2007.
- [25] Tang J. The study of ecological problems of water under urbanization progress. *Anhui Architecture*, 2005, 12(5): 29-30.
- [26] Bai Y L, Wang R S, Jin J S. Water eco-service assessment and compensation in a coal mining region — A case study in the Mentougou District in Beijing. *Ecological Complexity*, 2011, 8: 144-152.
- [27] He X H, Gao Y J, Niu J X, Zhao Y F. Landscape pattern changes under the impacts of urbanization in the Yellow river wetland-taking Zhengzhou as an example. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 2165-2169.
- [28] Karen S W. Growing with Green Infrastructure. RLA, CPSI, Heritage Conservancy. 2003.
- [29] Weber T, Sloan A, Wolf J. Maryland's green infrastructure assessment: development of a comprehensive approach to land conservation. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77(1/2): 94-110.
- [30] Holling C S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 2001, 4(5): 390-405.
- [31] Kline J D, Moses A, Alig R J. Integrating urbanization into

- landscape-level ecological assessments. *Ecosystems*, 2001, 4(1): 3-18.
- [32] Li F, Wang R S. Research advance in ecosystem service of urban green space. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 527-531.
- [33] Lin Y D. On sustainable development of urban green space. *Journal of Chinese Landscape Architecture*, 2001, 17(6): 29-31.
- [34] Chiesura A. The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 68(1): 129-138.
- [35] Li S Y, Wang J P, Ren H J. The structure and function of urban green space system: a review. *Progress in Geography*, 2010, 29(3): 377-384.
- [36] Li F, Wang R S. Evaluation, planning and prediction of ecosystem services of urban green space: A case study of Yangzhou City. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1929-1936.
- [37] Bowler D E, Buyung-Ali L, Knight T M, Pullin A S. Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 97(3): 147-155.
- [38] Masek J G, Lindsay F E, Goward S N. Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973—1996, from Landsat observations. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(18): 3473-3486.
- [39] 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.
- [40] Liang D C, Zhan G Q, Xu W A. The consideration of construction on modern urban green space system under rapid urbanization process. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2006, 22(3): 140-142.
- [41] Alphan H. Land-use change and urbanization of Adana, Turkey. *Land Degradation & Development*, 2003, 14(6): 575-586.
- [42] Li W. Land sustainable use in process of urbanization. *Urban Problems*, 2003, (4): 40-44.
- [43] Xu H, Wang X, Xiao G. A remote sensing and GIS integrated study on urbanization with its impact on arable lands: Fuqing City, Fujian Province, China. *Land Degradation and Development*, 2000, 11(4): 301-314.
- [44] Ji C Y, Liu Q H, Sun D F, Wang S, Lin P, Li X W. Monitoring urban expansion with remote sensing in China. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(8): 1441-1455.
- [45] Zhao D, Li F, Wang R S. Effects of ground surface hardening on plant eco-physiological processes in urban landscapes. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3923-3932.
- [46] Daily G C, Polasky S, Goldstein J, Kareiva P M, Mooney H A, Pejchar L, Ricketts T H, Salzman J, Shallenberge R. Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 21-28.
- [47] Bhaduri B, Minner M, Tatalovich S, Harbor J. Long-term hydrologic impact of urbanization: a tale of two models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2001, 127(1): 13-19.
- [48] Peffy T, Nawaz R. An investigation into the extent and impacts of hard surfacing of domestic gardens in an area of Leeds, United Kingdom. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 86(1): 1-13.
- [49] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108(455): 1-24.
- [50] Bründl W D M, Dr Höppe P. Advantages and disadvantages of the urban heat island—an evaluation according to the hygro-thermic effects. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology, Series B*, 1984, 35(1/2): 55-66.
- [51] Takebayashi H, Moriyama M. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*, 2007, 42(8): 2971-2979.
- [52] Schindelbeck R R, van Es H M, Abawi G S, Wolfe D W, Whitlow T L, Gugino B K, Idowu O J, Moebius-Clune B N. Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 88(2/4): 73-80.
- [53] Zhao D, Li F, Wang R S, Yang Q R, Ni H S. Effect of soil sealing on the microbial biomass, N transformation and related enzyme activities at various depths of soils in urban area of Beijing, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12: 519-530.
- [54] Smith A J. Subpixel Estimates of Impervious Surface Cover Using Landsat TM Imagery [D]. College Park: University of Maryland, 2000.
- [55] Lee S, Lathrop R G. Sub-pixel estimation of urban land cover components with linear mixture model analysis and landsat thematic mapper imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(22): 4885-4905.
- [56] Yang L M, Huang C Q, Homer C G, Wylie B K, Coan M J. An approach for mapping large-area impervious surfaces: synergistic use of Landsat-7 ETM+ and high spatial resolution imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, 29(2): 230-240.
- [57] Xian G G, Crane M. Assessments of urban growth in the Tampa bay watershed using remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(2): 203-215.
- [58] Wu C S, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 493-505.
- [59] Huber W C, Heaney J P, Nix S J, Dickinson R E, Polmann D J. Storm Water Management Model User's Manual, Version III. US: Environmental Protection Agency, 1987.
- [60] Terstriep M L, Stall J B. The Illinois Urban Drainage Area Simulator, ILLUDAS. Bulletin 58. Champaign, Illinois: Illinois

State Water Survey, 1974.

- [61] Yuan F, Bauer ME. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106: 375-386.
- [62] Mallick J, Rahman A, Singh C K. Modeling urban heat islands in heterogeneous land surface and its correlation with impervious surface area by using night-time ASTER satellite data in highly urbanizing city, Delhi-India. *Advances in Space Research*, 2013, 52 (4): 639-655.
- [63] Raciti S M, Hutrya L R, Finzi A C. Depleted soil carbon and nitrogen pools beneath impervious surfaces. *Environmental Pollution*, 2012, 164: 248-251.
- [64] Westman W E. How much are nature's services worth? *Science*, 1997, 197(4370): 960-964.
- [65] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 293-301.
- [66] Berkowitz A R, Nilon C H, Hollweg K S. *Understanding Urban Ecosystems: A New Frontier for Science and Education*. New York: Springer-Verlag, 2000.
- [67] Wang R S, Hu D, Li F, Liu J R, Ye Y P. *Integrative Ecological Management for Regional Urbanization*. Beijing: China Meteorological Press, 2010.
- [68] Driessen K, Adriaansen F, Rondinini C, Doncasterc P, Matthysena E. Evaluating least-cost model predictions with empirical dispersal data: a case-study using radiotracking data of hedgehogs (*Erinaceus europaeus*). *Ecological Modelling*, 2007, 209(2/4): 314-322.
- [69] De Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41 (3): 393-408.
- [70] Gómez-Baggethun E, Barton D N. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 2013, 86: 235-245.
- [71] Suo A N, Zhao D Z, Wei B Q, Chen Y L. Value evaluation on ecosystem function of wetland in Liaohe River Delta. *Marine Environmental Science*, 2009, 28(4): 387-390.
- 设施途径. *自然资源学报*, 2007, 22(5): 808-816.
- [4] 秦趣, 冯维波, 苏维词, 彭丽. 三峡库区重点城市生态基础设施品质演化及对策. *重庆师范大学: 自然科学版*, 2009, 26 (3): 40-44.
- [5] 俞孔坚, 李迪华, 潮洛蒙. 城市生态基础设施建设的十大景观战略. *规划师*, 2011, 17(6): 9-13, 17-17.
- [6] 杜士强, 于德永. 城市生态基础设施及其构建原则. *生态学杂志*, 2010, 29(8): 1646-1654.
- [9] 刘海龙, 李迪华, 韩西丽. 生态基础设施概念及其研究进展综述. *城市规划*, 2005, 29(9): 70-75.
- [10] 俞孔坚, 李迪华. 论反规划与城市生态基础设施建设//杭州城市绿色论坛论文集. 北京: 中国美术学院出版社, 2002: 55-68.
- [11] 俞孔坚, 李迪华, 李伟. 论大运河区域生态基础设施战略和实施途径. *地理科学进展*, 2004, 23(1): 1-12.
- [12] 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, (2): 19-24.
- [25] 汤键. 城市化进程中的水生态问题研究. *安徽建筑*, 2005, 12 (5): 29-30.
- [32] 李锋, 王如松. 城市绿色空间生态服务功能研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 527-531.
- [33] 蔺银鼎. 对城市园林绿地可持续发展的思考. *中国园林*, 2001, 17(6): 29-31.
- [35] 李素英, 王计平, 任慧君. 城市绿地系统结构与功能研究综述. *地理科学进展*, 2010, 29(3): 377-384.
- [36] 李锋, 王如松. 城市绿地系统的生态服务功能评价、规划与预测研究——以扬州市为例. *生态学报*, 2003, 23 (9): 1929-1936.
- [39] 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.
- [40] 梁东成, 战国强, 许文安. 快速城市化下现代城镇绿地系统建设的思考与对策. *广东林业科技*, 2006, 22(3): 140-142.
- [42] 厉伟. 城市化与土地可持续利用. *城市问题*, 2003, (4): 40-44.
- [45] 赵丹, 李锋, 王如松. 城市地表硬化对植物生理生态的影响研究进展. *生态学报*, 2010, 30(14): 3923-3932.
- [67] 王如松, 胡聘, 李锋, 刘晶茹, 叶亚平. 区域城市发展的复合生态管理. 北京: 气象出版社, 2010.
- [71] 索安宁, 赵冬至, 卫宝泉, 陈艳珑. 基于遥感的辽河三角洲湿地生态系统服务价值评估. *海洋环境科学*, 2009, 28 (4): 387-390.

参考文献:

- [1] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [3] 俞孔坚, 李迪华, 韩西丽. 解决城市生态环境问题的生态基础

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.1 Jan., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Foreword: Complexity and Sustainability	(I)
Frontiers and Comprehensive Review	
Urban eco-complex and eco-space management	WANG Rusong, LI Feng, HAN Baolong, et al (1)
Review of carbon sequestration assessment method in the marine ecosystem	SHI Honghua, WANG Xiaoli, ZHENG Wei, et al (12)
A review of sensitivity model for urban ecosystems	YAO Liang, WANG Rusong, YIN Ke, et al (23)
Urban ecological metabolism of municipal solid waste: a review	ZHOU Chuanbin, XU Wanying, CAO Aixin (33)
Autecology & Fundamentals	
Parameter sensitivity analysis of a coupled biological-physical model in Jiaozhou Bay	SHI Honghua, SHEN Chengcheng, LI Fen, et al (41)
Macroinvertebrate investigation and their relation to environmental factors in Bohai Bay	ZHOU Ran, QIN Xuebo, PENG Shitao, et al (50)
Review of the impacts of bioturbation on the environmental behavior of contaminant in sediment	QIN Xuebo, SUN Hongwen, PENG Shitao, et al (59)
Population, Community and Ecosystem	
Ecosystem services' spatial characteristics and their relationships with residents' well-being in Miyun Reservoir watershed	WANG Dashang, LI Yifeng, ZHENG Hua, et al (70)
Contingent valuation of preserving ecosystem of Changdao Island Nature Reserve	ZHENG Wei, SHEN Chengcheng, QIAO Mingyang, et al (82)
Discussion of carbon sequestration estimates in the island terrestrial ecosystems	WANG Xiaoli, WANG Ai, SHI Honghua, et al (88)
Landscape, Regional and Global Ecology	
An integrated indicator on regional ecological civilization construction	LIU Moucheng, SU Ning, LUN Fei, et al (97)
The eco-environmental evaluation based on habitat quality and ecological response of Laizhou Bay	YANG Jianqiang, ZHU Yonggui, SONG Wenpeng, et al (105)
Analysis of the evolution and value of coastal ecosystem services at Gudong Coast in the Yellow River Delta since 1985	LIU Dahai, CHEN Xiaoying, XU Wei, et al (115)
Research of index system framework in marine ecology monitoring & regulation areas division based on complex ecosystem of nature-human-society	XU Huimin, DING Dewen, SHI Honghua, et al (122)
The environmental function assessment and zoning scheme in China	WANG Jinnan, XU Kaipeng, CHI Yanyan, et al (129)
Resource and Industrial Ecology	
Definition and evaluation indicators of ecological industrial park's complex eco-efficiency	LIU Jingru, LÜ Bin, ZHANG Na, et al (136)
Spatial-temporal distribution of agricultural eco-efficiency in China	CHENG Cuiyun, REN Jingming, WANG Rusong (142)
The coupling mechanism and industrialization mode of ecological restoration in the weak semi arid mining area of Inner Mongolia	CHEN Yubi, HUANG Jinlou, XU Huaqing, et al (149)
Evaluation of ecological marine islands construction based on material flow analysis: a case study of Changhai County	CHEN Dongjing, ZHENG Wei, GUO Huili, et al (154)
Ecological risks and sustainable utilization of reclaimed water and wastewater irrigation	CHEN Weiping, LÜ Sidan, ZHANG Weiling, et al (163)

Estimation of agricultural non-point source pollution based on watershed unit: a case study of Laizhou Bay	
.....	MA Deming, SHI Honghua, FENG Aiping (173)
The evaluation method in the impact of intensive sea use on the marine ecological environment	
.....	LUO Xianxiang, ZHU Yonggui, ZHANG Longjun, et al (182)
Urban, Rural and Social Ecology	
Urban ecological infrastructure based on ecosystem services;status,problems and perspectives	
.....	LI Feng, WANG Rusong, ZHAO Dan (190)
Spatial features of road network in Beijing built up area and its relations with LST and NDVI	
.....	GUO Zhen,HU Dan,LI Yuanzheng,et al (201)
The conjugate ecological management model for urban land administration based on the land complex ecological function	
.....	YIN Ke, WANG Rusong, YAO Liang, et al (210)
Value assessment of the function of the forest ecosystem services in Chongqing	
.....	XIAO Qiang, XIAO Yang,OUYANG Zhiyun, et al (216)
Ecological risk evaluation of port in Bohai Bay	PENG Shitao, QIN Xuebo, ZHOU Ran, et al (224)
Research review of the tail disposal technology of the standard sewage offshore outfall	PENG Shitao,WANG Xinhai (231)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 34 卷 第 1 期 (2014 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34 No. 1 (January, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元