

DOI: 10.5846/stxb201605100903

栾博, 柴民伟, 王鑫. 绿色基础设施研究进展. 生态学报, 2017, 37(15): 5246-5261.

Luan B, Chai M W, Wang X. Review of development, frontiers, and prospects of green infrastructure. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 5246-5261.

绿色基础设施研究进展

栾博^{1,*}, 柴民伟², 王鑫²

1 北京大学, 环境科学与工程学院, 北京 100871

2 深港产学研基地北京大学深圳研究院, 绿色基础设施研究所, 深圳 518057

摘要: 综述了绿色基础设施的起源发展, 总结了推动其概念形成的发展脉络, 分别是人居环境视角、生态保护视角和绿色技术视角。提出了绿色基础设施在空间、功能、要素上的内涵, 阐述了它与生态系统服务的外延关系。通过文献研究, 综述了绿色基础设施在气候变化、人体健康、空气质量、雨洪管理、公众认知和社区参与、评价研究等领域的国际研究进展。结合我国绿色基础设施的研究现状和问题进行评述, 并对未来发展提出展望。

关键词: 绿色基础设施; 生态系统服务; 气候变化; 绩效评估

Review of development, frontiers, and prospects of green infrastructure

LUAN Bo^{1,*}, CHAI Minwei², WANG Xin²

1 College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100817, China

2 Green Infrastructure Institute PKU-HKUST Shenzhen-Hong Kong Institution, Shenzhen 518057, China

Abstract: This paper first reviews the origin and development of green infrastructure (GI) and then summarizes the context, formation and development from the perspectives of human settlements, ecological protection, and green technology. Then, it describes GI from spatial, functional, and elemental aspects. The relationship of GI with ecological services is also elucidated. Through a literature review, the international research frontiers of GI are assessed for the following topics: climate change, human health, air quality, stormwater management, public awareness, community participation, and evaluation research. Finally, this paper predicts future developments in GI based on the current status of GI research and problems in China.

Key Words: green infrastructure; ecological services; climate change; performance evaluation

绿色基础设施 (Green Infrastructure, 简称 GI) 是在人居环境、生态保护和绿色技术三大领域起源发展, 逐步形成的概念。GI 的早期雏形可追溯到 19 世纪 50 年代城市公园的出现, 之后经历了 20 世纪 60 年代到 90 年代以生态保护运动为契机的初步形成阶段。90 年代至今, GI 研究实践进入了以多领域协同发展, 多地区广泛传播为特点的快速发展阶段。

1 GI 的源起与发展脉络

1.1 历史脉络

国际上, GI 发展大致可分为 3 个阶段 (表 1): 早期雏形阶段是以 1850 年代城市公园的出现为标志, 此时

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (2016A030313383)

收稿日期: 2016-05-10; 网络出版日期: 2017-03-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luanbo@pku.edu.cn

期以服务公众游憩与审美、改善公共环境为目标,缺少科学性和系统性的理论与方法。初步形成阶段是以 1960 年后生态保护运动的发展为开端,此时期生态学、生态规划、景观生态学的理论方法不断发展,出现了以生物保护与生态系统保护为核心目标的生物廊道和生态网络等概念。人与生物圈计划(MAB)于 1984 年正式提出生态基础设施(Ecological Infrastructure,简称 EI),成为此阶段的标志。快速发展阶段是以 1990 年代以来 GI 在多领域的快速发展为特征。土地保护、精明增长、绿道、低影响开发(LID)与河道恢复等领域共同推动 GI 成为明确的概念共识,相关研究与实践也迅速广泛地发展。2000 年后,GI 在欧盟、加拿大、中国等地广泛传播。

我国古代工程中具有很多类似现代 GI 作用的经验式实践,如周朝古道^[1],南方丘陵地区的陂塘系统^[2],长三角地区的运河水网,黄泛平原的坑塘洪涝调蓄系统^[3-5],它们体现了适应自然的朴素思想,不同程度地发挥生态系统服务功能。GI 概念在 2000 年前后传入我国,至今经历了起步期与快速发展期两个阶段。起步期以 2001 年俞孔坚的《城市生态基础设施建设的十大景观战略》为标志,集中体现在生态基础设施理论体系与构建途径方面的大量探索。快速发展期以 2009 年“绿色基础设施——高绩效景观”主题的第 46 届世界国际景观设计师联盟(IFLA)大会为开端,我国 GI 研究数量持续增多,集中于综述国外 GI 概念与理论发展、探讨 GI 规划与评价方法等方面。

表 1 GI 的发展阶段和特点

Table 1 The development stages and characteristics of GI

时间 Time	发展历程 Development stage	代表性要素 Representation	主要目标 Aim	方法 Method
1850—1960	早期雏形阶段	公园、开放空间系统	游憩、审美公共环境改善	景观设计、城市设计学科的定性方法
1960—1990	初步形成阶段	生物廊道、生态网络	生物保护生态系统保护	生态学、景观生态学、生态规划的科学方法
1990—至今	快速发展阶段	绿道、LID、绿色基础设施	土地保护及精明增长雨洪管理历史文化保护河道修复、湿地恢复生态系统服务	水文、生态工程、市政工程、环境工程等多学科方法

1.2 学科脉络

GI 的发展是公园、公园系统、开放空间、绿道、生态网络、生物廊道和雨洪管理等多个领域共同推进的结果,可归纳为三大脉络:一是人居环境视角,以服务人居需求为出发点;二是生态保护视角,以生物保护为出发点;三是绿色技术视角,以市政工程设施的绿色化为出发点。三大脉络的独立发展与相互影响促进了 GI 概念共识的形成与发展。生态经济学领域的生态系统服务思想,为绿色基础设施的内涵与功能提供了清晰和全面的思想基础(图 1)。

1.2.1 人居环境视角:从公园到土地保护

GI 是公园绿地发展至高级阶段的产物。1850 年代的纽约中央公园是第一个为社会大众提供休闲服务的绿色空间,它改善了当时城市公共卫生环境,可认为是 GI 的早期雏形。19 世纪后期,在 Olmsted 等人的推动下公园之间通过公园道(Parkway)相互连接,出现以波士顿绿宝石项链为代表的公园系统(Park system),在城市中形成了绿地系统,扩展了公园的服务范围^[6-8]。这一时期,公园以提供休闲游憩与审美体验为主要功能,具有朴素的环境改善作用。20 世纪以来,开放空间系统拓展了公园系统的范畴,融入了保护城市与周边地区未开发土地的功能,逐渐发展为土地空间管理控制策略^[9]。1980—1990 年,绿道的研究趋于成熟,成为贯穿城乡连接各类绿色空间的线性开放空间纽带^[10],为 GI 的网络化结构奠定了基础。绿道在游憩、美学^[11-12]、文化遗产保护^[13-14]和生态保护方面^[15-17]具有更为综合的功能(图 1)。最具代表性的是 1991 年的马里兰州绿道体系规划建设,它成为 2001 年开始的马里兰绿色基础设施评价(GIA)与绿图计划的基础^[18-19]。随着生态规划和景观生态学的发展,目标更综合、方法更科学的网络化 GI 应运而生。它超越开放空间与绿道的概念范



图 1 绿色基础设施发展脉络

Fig.1 The development framework of green infrastructure

畴,成为一种新的土地保护策略^[20-22],通过限定城市的增长边界,实现土地的有效保护与城市的精明增长^[23-25]。1999年,美国保护基金会(The Conservation Fund)和农业部森林管理局(USDA Forest Service)首次提出了GI作为国家自然生命支持系统的正式定义^[26]。美国马里兰州1997年的“精明增长法案”和2001年的绿图计划^[27],是以绿色基础设施评价(GIA)为途径进行土地保护的早期代表性实践^[22]。

1.2.2 生态保护视角:从生物廊道到复合生态系统保护

20世纪60年代以来,保护生物学、景观生态学、岛屿生物地理学和复合种群理论不断发展,先后发展了生态廊道、生态网络、生境网络、景观安全格局等一系列以生物保护为核心的理论方法^[28-32]。生态基础设施(Ecological Infrastructure)概念最早由联合国教科文组织“人与生物圈计划”(MAB)于1984年提出,是生态城市规划的五项原则之一^[33]。Mander和Selm等在1988年分别用EI作为生境网络(habitat network)设计的框架^[34-35]。随后,荷兰农业、自然管理和渔业部于1990年颁布的自然政策规划(Nature Policy Plan)中提出了全国尺度上的EI概念^[28]。之后,EI在国外的研究不多,但近15年来在中国得到很大发展。俞孔坚和李迪华运用景观安全格局理论发展和扩展了EI体系,使其超越了原有以生物保护为中心的狭义范畴,成为维护土地上各种生态过程与人文过程的整合性网络。它不仅是城市 and 居民获得持续的自然服务的基本保障,也是城市扩张和土地开发利用不可触犯的刚性限制^[36]。李峰等侧重从城市生态学角度进行研究^[37],认为生态基础设施能够保证自然和人文生态功能正常运行,具有重要的生态系统服务功能。综上,生态基础设施概念起源于生物保护,与生物廊道、生境网络等概念一脉相承,后扩展为保护自然与人文复合生态系统的健康,通过保护土地格局控制城市扩张。至今,EI在功能、结构及构成要素上,都与人居环境视角发展而来的GI逐渐趋同,殊途同归又各有侧重。

1.2.3 绿色技术视角:工程基础设施的灰色化到绿色化

绿色化的工程基础设施是GI的重要组成部分。传统的工程设施为城市及居民提供如能源、道路、建筑、防洪、雨水排放、废水处理等市政基础服务。这些灰色工程均以服务人类社会为中心,虽然在一定程度上单目标地解决了局部问题,却往往引发更多损害生态系统服务的系统性失调问题,包括城市热岛、暴雨洪涝等影响人类社会的城市病。灰色基础设施的绿色化改造是指通过生态工程和绿色技术来降低工程设施所带来的生态胁迫和干扰,并改善和恢复城市生态系统服务功能^[33, 38-39]。绿色化的工程设施系统包括:可持续雨洪管理

技术、河道生态修复与生态防洪工程、道路生态工程、污染废弃地的生态修复技术、污水处理的人工湿地技术、基础设施生态学、能源系统、固体废物处理系统和交通通讯系统^[40-45]。目前,可持续雨洪管理技术、生态水利与河道生态修复的研究相对成熟^[46-47]。

2 GI 的内涵与外延

2.1 内涵

经过多领域的发展与融合后,GI 的内涵逐步清晰和趋同,具有以下核心特征:(1)功能上,GI 提供全面的生态系统服务;(2)空间上,GI 是一个跨尺度、多层次,相互连接的绿色网络结构,是城市发展与土地保护的基础性空间框架;(3)构成要素上,GI 包含国家自然生命支持系统、基础设施化的城乡绿色空间和绿色化的市政工程基础设施 3 个层次(表 2)。

在宏观尺度上,GI 是国家的自然生命支持系统,承载水源涵养、旱涝调蓄、气候调节、水土保持、沙漠化防治和生物多样性保护等维护国土生态安全与国家长远利益的生态服务。在中观尺度上,GI 是基础设施化的绿色空间,不同于传统的城市绿地系统,它具有广泛的缓解城市洪涝灾害、控制水质污染、恢复城市生境、提高空气质量和缓解城市热岛等基础性生态服务,同时提供游憩、审美、文化与精神启发等层面的人居环境服务。在微观尺度和技术层面,GI 是以绿色技术为手段对场地进行人居环境综合设计,以恢复完善生态系统服务。

表 2 绿色基础设施概念框架

Table 2 The conceptual framework of green infrastructure

空间尺度 Spatial scale	方法 Method	首要目标 Priority	构成要素 Constituent elements	生态系统服务 Ecological services	
宏观 Macro-scale	国土与区域 Territory and region	自然生态系统的保护和恢复	保护国土及区域生态格局,维护大尺度生态过程,保障国家生态安全	国家自然生命支持系统:自然森林、河流、湿地、湖泊、草原、农田、自然保护区、风景名胜、国家公园与文化遗产地	维护国土生态安全与国家长远利益的生态服务,如:国土水源涵养、旱涝调蓄、气候调节、水土保持、沙漠化防治、生物多样性保护等
中观 Meso-scale	城市与社区 City and community	自然-人工复合生态系统的恢复和重建	恢复城乡生态格局,构建绿色网络,改善城市人居环境,为城市居民提供全面的生态系统服务	基础设施化的绿色空间网络:绿地与公园系统、开放空间系统、雨洪调节系统、城市水系统(河流、湿地系统)、城市生物栖息地系统、绿道与慢行系统、都市农业与林业系统、文化遗产系统	城市与居民的人居环境服务,如:缓解城市洪涝灾害、控制水质污染、提高空气质量、缓解城市热岛、提供游憩、审美、文化认同与精神启发等
微观 Micro-scale	场地与绿色基础设施 On site and green infrastructure	可持续设计与生态修复技术	通过绿色技术对具体场地进行生态恢复和可持续设计	绿色化的工程设施技术:河流湿地生态修复技术、生态防洪工程技术、生物栖息地恢复技术、可持续雨水管理技术(生物滞留池、植草沟等)、人工湿地污水净化技术、污染废弃地修复技术、固废资源化技术、绿色屋顶与立体绿化技术、生态道路技术、绿色建筑技术、人居环境空间设计	

2.2 GI 与 EI 的联系与区别

EI 是与 GI 相近的概念,两者的内涵已逐渐趋同^[33],都具有提供生态系统服务的生命支持系统的涵义。有国内学者强调 EI 概念更为适用,因为它不仅包括湿地、河流、绿地等绿色空间,还广泛涵盖自然-人工复合生态系统;而 GI 在表意上局限于绿地空间,不利于充分涵盖城市人工生态系统或人工设施的生态化,也不能够完整而准确地对应于城市复合生态系统^[37]。然而,从目前国际研究前沿来看,GI 概念已涵盖人工设施的绿色化(如雨洪管理技术)和城乡人工生态系统,因此两者的内涵是基本一致的。

但二者仍存在区别:首先,就应用范围而言,GI 的广泛性与通用性均高于 EI。自 1980 年代提出后,EI 在

国际上的研究比较有限,少量研究主要围绕生态系统和生物保护展开。近 15 年来,EI 概念在国内得到广泛拓展,具有代表性的学者是俞孔坚、李迪华、李锋、王如松等人。相比而言,1990 年代以来 GI 的研究实践在美国、加拿大、英国等国家和地区得以广泛开展,并且成为开放空间、绿道、土地保护、雨洪管理等众多领域的通用概念。

其次,就发展根源及关注重点而言,EI 概念源于生物保护研究^[36,48],而 GI 的发展是源于生态保护、人居环境和绿色技术三大领域,由此造成两者的关注重点有所区别。EI 主要以景观生态学理论为基础,强调宏观空间格局的连通性与完整性,关注对区域生态系统结构与过程的保护,但一定程度上忽视格局内部的绿色空间质量。虽然连续完整的空间格局是维护生态过程的战略性基础,却不足以保证其发挥生态系统服务的水平。GI 以三大领域为基础发展而来,既有景观生态学的理论基础,也融合了人居环境学科和绿色工程专业的理论与技术体系。GI 的网络化空间结构可以维护生态系统的完整性,而其具体实施技术可以提升空间格局内部人居环境质量和生态系统服务水平。综上,GI 因其起源背景而兼顾空间战略和实施技术。

2.3 GI 与生态系统服务的关系

GI 是生态系统服务的空间落实途径^[49],提供全面的生态系统服务是 GI 的基础功能。不同尺度 GI 所提供的生态系统服务不尽相同(表 2)。当前一些研究对生态系统服务和人类福祉的关系提出了基本框架^[50-58],有学者进一步总结了作为土地管理方式的 GI 对生态系统服务及人类福祉的作用^[59-60]。一些研究表明 GI 除了发挥生态系统服务的正效益外,也会造成一定的负效益^[61]。本文基于 PSR 模型提出 GI 与生态系统结构功能、生态系统服务及人类福祉的关系,以及它们在环境压力、状态、响应过程中的作用(图 2)。

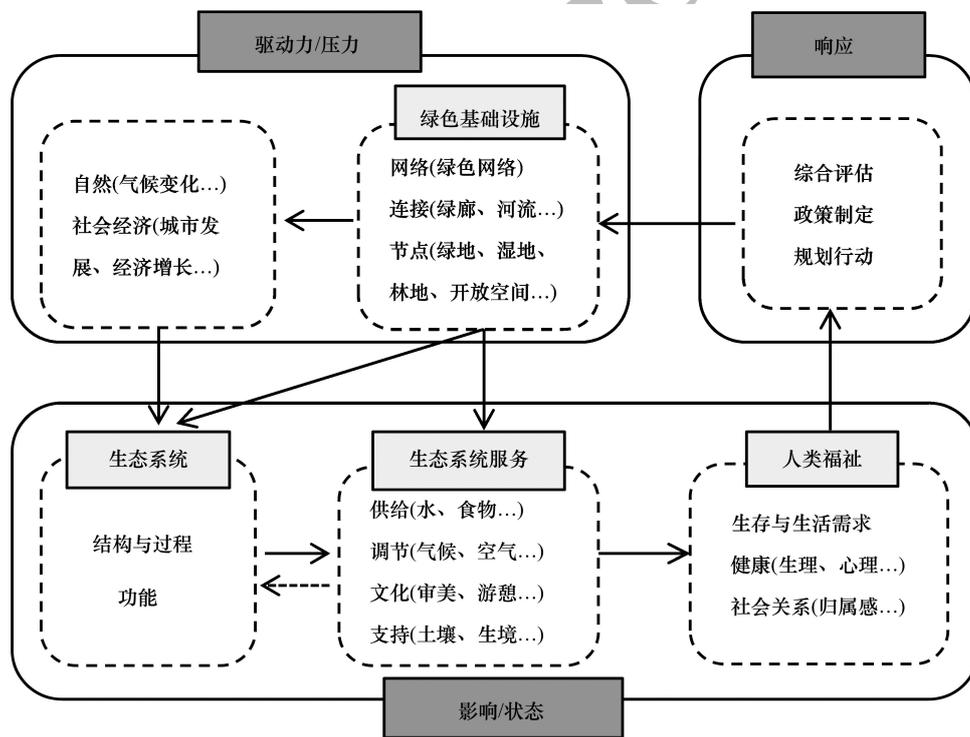


图 2 GI 与生态系统服务、人类福祉的关系

Fig.2 The relationships between GI and ecological services as well as human welfare

3 研究进展

近年来,随着学科领域间交叉合作的不断增加,GI 的研究前沿领域呈现细分化的趋势,国际上的研究前沿主要集中在以下方向:

3.1 适应与缓解气候变化

GI 应对气候变化主要有两个方面。其一,GI 是应对气候变化所引发的暴雨、升温等问题的适应性对策。GI 能够通过控制土地利用调节区域水文状态^[62-64],并通过绿色屋顶、生物滞留池、植草沟、透水地面等雨洪管理技术调节场地径流量与峰值,缓解洪涝^[65-70],控制径流污染^[71-74]。GI 还可以提供绿荫和增加植物蒸散发,从而降低城市温度,改善城市热环境^[75-79]。其二,GI 是直接或间接缓解气候变化的主动性途径。直接途径如植物光合作用吸收 CO₂和土壤贮碳^[58,80-81]。间接途径如 GI 可以降低城市温度,从而减少能源消耗^[82-84],实现温室气体减排^[58, 85-86]。

3.2 改善人体健康

人类健康福祉的程度与绿色空间的数量、质量有着密切的关系^[87-89]。经常使用公园的人通常显示出更好的自感健康状况、更高的活动参与程度和更快的放松能力^[90]。绿色空间和个人健康状况呈现显著的正相关关系^[87]。GI 与人体健康的研究可分为其对个体的生理与心理健康的影响,以及对公众健康的影响。现有的研究方法主要有流行病学研究、实验研究、问卷与访谈调查研究^[91]。有关个体生理健康研究主要包括:居住环境与户外运动^[92-96]以及健康恢复的关系^[97];城市绿色空间对心理恢复的作用^[98]、对老年人寿命的影响^[88-89]、以及土地利用对蚊虫传播疾病和病毒的地理分布的影响^[99-100]。有关心理健康的研究,主要有绿色空间在情绪调节^[101-102]、减轻紧张与压力^[102-103]、缓解疲劳和恢复注意力方面的作用^[94, 104-106]。有学者关注绿地对幸福感、认同感和社会关系的影响^[107-109]。GI 是促进公共健康的重要因素,这是因为环境的改善可以引起人们生理、情感和认知过程的变化,进而增进公众的健康福祉^[110-111]。

3.3 提升雨洪调节与净化能力

GI 可通过控制土地利用格局维护区域水文过程,通过绿色屋顶、透水铺装、生物滞留池(雨水花园)、植草沟、植被过滤带、人工湿地等一系列具体技术措施来管理城市雨水径流,实现缓解洪涝,减轻径流污染以及加强水资源利用的目标。国内外最有代表性的技术体系有 1970 年代起源于美国的最佳管理措施(BMPs)^[112-113];1990 年代美国的低影响发展(LID)^[114];同时期英国发展的可持续城市排水系统(SUDS)^[115-116];澳大利亚开展的水敏感性城市设计(WSUD: Water Sensitive Urban Design)的实践^[117];新西兰集合 LID 和 WSUD 理念形成的低影响城市设计与开发(LIUDD)^[118];以及中国当前正在发展和实施的海绵城市技术体系。现有针对雨洪管理的具体技术在控制径流总量,控制径流峰值,延缓洪峰时间等水文方面的效益明显,而且在去除 TSS、TN、TP、各种重金属污染物方面的研究也已有报道^[46]。这些研究基本证明了 LID 技术在调节水文功能与去除污染物方面具有良好效果^[47, 119-124],也同时指出了可能存在的问题,其中质疑集中在渗透导致地下水污染和冬季效果等方面。

3.4 影响空气质量

GI 能够在一定程度上缓解大气污染,现有研究主要从两方面展开。一方面,通过 GI 空间布局,构建通风廊道增加污染物疏散的有利条件^[125-127],相关的研究已在德国斯图加特、日本东京都,以及中国的北京、上海和武汉等地开展,并取得一定成效^[128-130]。另一方面,植物在改善空气质量中起着不可替代的作用^[131-132],主要表现为:(1)植物叶片具有特殊表面结构和功能,有利于阻滞粉尘^[133]、抑制细菌生长^[134]、吸附大气污染物^[131, 134-135];(2)植物叶片尖端放电以及叶片光合作用产生光电效应,使空气产生负氧离子,改善空气质量^[136-138]。

3.5 GI 的公众认知和公众参与

公众是 GI 最重要的利益相关者。由于欧美国家的决策体制原因,GI 的公众社参与是决定其能否有效实施的关键,而社会认知程度是其中至关重要的因素,因而西方在此方面的研究较多。在公众参与决策方面,Rottle 在从西雅图到卡斯克德山脉的绿色廊道案例中,强调了私人和非营利部门的主导与协调的重要性^[139]。Lovell 和 Taylor 强调 GI 规划中的潜在利益相关者的决策参与,可以鼓励由社区发起的 GI 实施,确保 GI 建设中的民主和公正^[140]。Heckert 和 Rosan 研究发现 GI 需要与更广泛的公众和私人利益相关者合作,提出 GI 公

平指数来权衡社区的优先权,掌握更多的自主权利^[141]。在公众认知方面,Byrne 等研究了公众对于 GI(尤其是增加植树)是否能够帮助杭州市应对气候变化的认知,部分受访者认为增加植树是一种适应性策略,可以减少气候变化带来的影响;居民愿意在公共开敞空间增加绿树的覆盖面积^[142]。Breed 等研究发现,在 GI 中,奖励制度应该具有一定的调整幅度,促进生态系统服务的平衡^[143]。Baptiste 等研究发现居民对 GI 控制雨洪具有较高的认知水平,并指出效率、美学和成本是影响居民对 GI 实施意愿的主要因素^[144]。

3.6 GI 的结构、功能评价与绩效评估

当前,GI 的评价研究可分为 3 类。一是对生态系统/景观结构的评价,二是对生态服务功能的评价,三是对 GI 效益与绩效的评价。对 GI 的生态结构评价主要是基于景观生态学、保护生物学原理,以生物保护为出发点的空间格局评价。主要有关注组分特征的景观格局指数评价和侧重动态过程的景观格局空间模型评价^[31-32]。源于美国马里兰州的 GIA 和保护物种水平运动过程为核心的景观安全格局是近年的代表性方法。GI 的功能评价以评估生态系统服务为热点^[56,59,139,145-150],包括物质质量评估和价值量评估。价值量评估是较主流方法,通常用货币化方法评价生态系统服务的价值,但虚拟估值存在主观性与随机性,无法准确评估实际效果与质量。有学者指出 GI 在发挥生态系统服务的正效益时,也会带来如耗水、生物入侵、挥发性有机污染物(VOC)排放等负效益^[150-153]。GI 的效益与绩效评价有两方面视角。一是从使用者出发的行为和感知评价:如:建成后使用者评估(POE)、视觉质量评价等。二是从环境资源影响出发的物质环境效益评价,当前以评估 GI 某个或某些技术的单目标效益为主:如研究绿色屋顶缓解城市热岛^[79,154]、雨水径流调节^[71]方面的效益;研究雨洪管理技术在雨水径流消减和水质净化方面的作用^[46-47];研究城市 GI 在缓解气候变化方面的效益^[65,155]等。近年来,有学者将时间因素融入 GI 评价中,评估某些技术在原料获取、建设、运营、处置的全生命周期过程中对环境资源影响,成为当今的前沿领域^[62,156-158]。

总体而言,目前针对 GI 具体技术的单方面物质环境评价研究较多,但是全面涵盖生态、社会、健康福祉等方面的综合绩效评价尚处于探索阶段。目前仅有少量的有关 GI 综合指标构建研究,而且基本处于框架性探索阶段^[60,140,159]。

4 我国 GI 研究的现状与问题

国内对 GI 的研究主要集中在以下四方面:

(1) GI 的概念综述和理论框架研究。俞孔坚等对生态基础设施的理论与方法进行了系统研究^[5,33,160];刘滨谊等侧重于 GI 与我国绿地系统的结合^[161-163]。另外,不少学者对国外 GI 概念理论进行了综述研究^[164-169],也有学者对国内 GI 的发展进行了总结^[1,170]。

(2) GI 技术途径和方法研究。国内很多研究集中于综述国外 GI 的规划方法^[164,171-173]。俞孔坚等以景观安全格局作为构建 EI 的技术途径,探索了一套完整的方法体系^[174-176]。有学者将 GI 原理与方法在绿地系统规划中进行应用^[5,161,177-179],还有学者在 GI 构建中探索了形态学空间格局分析、空间利用生态绩效等新方法^[180-181]。

(3) 国内外实践案例介绍:国内大量文章介绍了国外实践案例,包括美国西雅图^[182]、马里兰^[183-184]以及加拿大^[41]、英国^[185]等地的案例。也有研究总体梳理了国内 GI 实践案例^[186]。还有一些研究对场地尺度建成项目的理念方法进行了介绍,如六盘水明湖湿地公园^[187]、金华燕尾洲公园^[188]、哈尔滨群力雨洪公园^[189]等。

(4) 细分领域研究:目前,我国 GI 研究中以雨洪管理领域的应用研究较多^[190-199]。此外,在 GI 的效益评估^[200-201]、气候变化^[202]、空气污染^[203-204]等方面有少量研究。

总体而言,国内 GI 研究在内涵与外延的理解上尚存模糊性,研究内容更关注城市和区域层面的概念理论与方法框架,研究方法以单学科视角的定性研究为主。虽然已初步形成了以生态基础设施为代表的理论体系,但总体上 GI 的发展仍处于初级阶段。主要存在以下问题。

4.1 研究细分度低,近似度高

我国对 GI 领域的研究尚处于探索理论方法的初级阶段,研究的细分程度与深入程度均不高。国内 GI 研究主要来自于景观规划、风景园林、景观生态学等学科领域,此外,环境工程、市政工程、水文水资源等领域有少量研究。研究主要集中在综述 GI 概念与发展历程、介绍国内外理论与实践、探索空间规划与评价方法等方面,研究方向相近度较高。在人体健康、气候变化、空气质量、公众参与等国际前沿的细分领域我国尚缺少深入研究。

4.2 科学、工程与设计学科领域的交叉合作不足

GI 是跨尺度、功能复合的应用领域,由不同学科领域演进发展而来。因此,科学研究、工程技术与设计应用的紧密联系对于 GI 而言尤为重要。目前我国在此方面尚存不足,科学研究缺乏真实问题的应对,工程技术缺乏综合目标的统筹,设计应用缺乏专业技术的支撑。

由于缺少领域间交叉合作,国内 GI 研究虽然具有各自学科的鲜明特点,却也存在明显瓶颈。城市规划、风景园林等人居环境领域善于运用定性方法统筹人文与生态价值进行空间落实,但缺少量化研究与专业技术的支撑。景观生态学领域善于通过空间模型判定和构建完整而连续的宏观网络格局,但对格局内部质量的关注不足,理论模型仍缺少实证支撑^[172,205-206]。环境科学善于运用实验与模型量化研究具体问题,但缺少空间应对策略。生态修复、环境工程、市政工程等领域善于绿色工程技术,但欠缺对 GI 多元价值和综合目标的理解和统筹。

4.3 综合绩效评估及其标准的研究较少

目前,国内 GI 实践大致有两种倾向。一是缺少人文价值的单目标绿色技术应用,如以人工湿地为例的环境工程,它仅关注污水净化的效果,往往缺乏美学价值,也不具有参与性;二是难以评价环境效益的“生态花瓶”,如一些美观的城市湿地公园很可能是四处调水的耗水工程,造成生态系统损害。具备生态与人文的综合价值是 GI 的核心特征,偏颇于任何一方都不符合其内涵。目前,全面衡量 GI 在供给、调节、支持、文化及健康福祉方面生态系统服务综合绩效的评估研究不多。

另外,GI 的公私合营(PPP)模式是未来趋势。目前的障碍是缺少政府按效付费的量化评估方法和标准。因此全面评估 GI 在原状态、材料获取、建设、运行等全生命周期过程中的绩效表现,并以此为基础建立政府购买生态系统服务的定量可测标准是非常关键的环节。目前,国内此方面的研究还很有限。

4.4 人文领域研究介入不足,公众参与、运营模式与体制保障研究有待加强

国内 GI 研究以自然科学与工程学科为导向,人文领域研究的介入不足。GI 并非简单的绿色工程,技术层面之上的文化价值、社会价值、经济价值是其重要属性。目前,我国在 GI 的文化认同、公众参与、运营模式、管理政策、体制保障等方面的研究不多,有限的研究者多以自然学科背景为出发点,社会学、经济学领域的 GI 研究基本是空白。

在 GI 的经济运营与社会参与方面,美国纽约高线公园(Highline Park)为代表的国外实践采用了政府、社区、社会组织或企业共同合作的新模式,为 GI 的建设运营、投融资模式、社区参与、管理政策、产权制度方面提供了新视野。它首先解决运营与持续收益问题,通过特许经营的活动和项目实现经济获益;其次,解决社会参与问题,通过活动拉近社区居民与 GI 的距离,互动参与性更强;第三,政府财政与管理成本更低,只需按期购买绿色服务。我国当前推行的公私合营(PPP)模式仅是单一投融资途径,亟待从更多视角开展深入研究。

5 我国 GI 的展望

5.1 发展机遇

综上所述,我国目前的 GI 研究尚处于初级阶段。未来中国对 GI 实践具有巨大的需求,也必将成为 GI 发展的热点地区。首先,中国生态环境危机的挑战。全国来看,资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化的形势虽然严峻,但也为 GI 的发展提供了空前的机遇。其次,国家顶层设计的政策制度保障。生态文明理念被

要求全面融入到经济、政治、文化、社会各方面,生态文明体制改革总体方案已获通过。作为自然生命支持系统的 GI 是支撑生态文明建设的重要途径。再次,GI 投资作为经济持续发展的良好契机。依托绿色金融战略与国家资金支持,各地将不断加大生态环境基础设施的投资力度,这成为 GI 发展的契机。最后,新型城镇化的发展需求。我国城镇化是不可逆的过程,未来的重点将从规模扩大转为质量提升,当前我国城市建成区平均绿地率已达 35.72%^[207],但发挥的生态系统服务质量与 GI 标准仍有较大差距,这为 GI 发展提供了广阔的实践空间。

5.2 预期研究领域

未来我国将在 GI 领域开展大量实践行动,本地化、具体化和细分化的 GI 研究是实践的重要支撑。我国未来 GI 的发展趋势为:研究内容从理论框架到细分领域,研究角度从单学科视角到多领域合作,研究方法从定性化到量化,应用实践从概念规划到务实设计。可预期的重点研究领域包括但不限于如下方面:

(1) 本土化的 GI 技术标准、评估体系和管理制度

基于我国气候条件、地理特征、生态状况、环境资源以及各地生活方式、文化习俗的基本要件,根据本文所述的 GI 内涵和外延,GI 应着重研究适应我国本土特征的关键技术、评估体系、标准规范、管理制度和产业发展。

(2) 多学科交叉的细分领域

人体健康、气候变化、空气质量、城市热环境、公众参与和综合效益评估是 GI 多学科交叉研究的国际热点。我国 GI 研究需关注的重点有:1) 在我国老龄化与健康问题日益突出的背景下,需开展 GI 对生理与心理健康的影响研究,特别是中国人特有的环境心理范式与 GI 的关系研究;2) 我国将在气候变化领域承担更多责任,需加强 GI 在城市降温、旱涝调节、节能减排、碳汇等适应与缓解气候变化方面的研究;3) 区域复合型大气污染已成为危害我国大城市的普遍问题,需加强应对我国空气污染新形势的 GI 空间布局与设计研究;4) 在我国公共服务市场化的趋势下,需开展用于政府购买生态服务的 GI 综合效益评估及标准研究;5) 需推进经济、社会、文化视角的 GI 研究合作,开展 GI 的公私合营模式(PPP)、公众参与和管理制度的研究。

(3) 雨洪污废综合控制利用研究

GI 是当前海绵城市建设的主要途径,有以下值得研究的方向:1) 用以解决我国水资源短缺问题的雨水和废水的资源化综合控制利用研究;2) 适应我国地区多样性的雨洪管理技术标准与措施途径研究;3) 应对我国季风气候特点的区域流域管理与城市源头控制的雨洪耦合研究;4) 涵盖多元功能与综合价值的海绵城市综合效益评估研究;5) 城市已建成区中灰绿设施结合与雨污合流问题的研究;6) 面向多部门协调合作的机制体制研究。

参考文献(References):

- [1] 贾行飞,戴菲.我国绿色基础设施研究进展综述.风景园林,2015,(8):118-124.
- [2] Gao J, Wang R S, Huang J L. Ecological engineering for traditional Chinese agriculture—a case study of Beitang. Ecological Engineering, 2015, 76: 7-13.
- [3] 吴庆洲,李炎,吴运江,刘小刚.中国古城排涝减灾经验及启示.中国市政工程,2013,(z1):7-13.
- [4] 陈义勇,俞孔坚.古代“海绵城市”思想——水适应性景观经验启示.中国水利,2015,(17):19-22.
- [5] 俞孔坚,张蕾.黄泛平原古城镇洪涝经验及其适应性景观.城市规划学刊,2007,(5):85-91.
- [6] Olmsted F J Jr, Kimball T. Frederick Law Olmsted: Landscape Architect, 1822-1903. New York: The Knickerbockers' Press, 1928.
- [7] 金经元.奥姆斯特德和波士顿公园系统(上).上海城市管理职业技术学院学报,2002,(2):11-13.
- [8] 金经元.奥姆斯特德和波士顿公园系统(下).上海城市管理职业技术学院学报,2002,(4):10-12.
- [9] Turner A. Urban planning in the developing world: lessons from experience. Habitat International, 1992, 16(2): 113-126.
- [10] Little C E. Greenways for America. London: The Johns Hopkins Press LTD, 1995: 8-20.
- [11] Turner T. Greenways, blueways, skyways and other ways to a better London. Landscape and Urban Planning, 1995, 33(1/3): 269-282.
- [12] Ryan R L, Walker J T H. Protecting and managing private farmland and public greenways in the urban fringe. Landscape and Urban Planning,

- 2004, 68(2/3): 183-198.
- [13] Lewis P H. Quality corridors for wisconsin. *Landscape Architecture*, 1964, 54(2): 100-107.
- [14] Scudo K Z. The greenways of Pavia: innovations in Italian landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 76(1/4): 112-133.
- [15] Sinclair K E, Hes G R, Moorman C E, Mason J H. Mammalian nest predators respond to greenway width, landscape context and habitat structure. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 71(2/4): 277-293.
- [16] Miller W, Collins M G, Steiner F R, Cook E. An approach for greenway suitability analysis. *Landscape and Urban Planning*, 1998, 42(2/4): 91-105.
- [17] Linehan J, Gross M, Finn J. Greenway planning: developing a landscape ecological network approach. *Landscape and Urban Planning*, 1995, 33(1/3): 179-193.
- [18] Fábos J G. Greenway planning in the United States; its origins and recent case studies. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 68(2/3): 321-342.
- [19] Weber T, Wolf J. Maryland's green infrastructure-using landscape assessment tools to identify a regional conservation strategy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, 63(1): 265-277.
- [20] Williamson K. CPSI, Growing with green infrastructure [EB/OL]. Heritage Conservancy, (2003). <http://www.heritageconservancy.org/growingwithgreeninfrastructure.pdf>.
- [21] Lynda S L. Urban green infrastructure//Watson D, ed. *Time-Saver Standards for Urban Design*. New York: McGraw-Hill Education, 2003.
- [22] Randolph J. *Environmental Land Use Planning and Management*. Washington, D.C: Island Press, 2004: 95-105.
- [23] Moglen G E, Gabriel S A, Faria J A. A framework for quantitative smart growth in land development. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(4): 947-959.
- [24] Doyle D G. 美国的密集化和中产阶级化发展——“精明增长”纲领与旧城倡议者的结合//陈贞,译. *国外城市规划*, 2002, (3): 2-9.
- [25] Miller J S, Hoel L A. The “smart growth” debate: best practices for urban transportation planning. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2002, 36(1): 1-24.
- [26] Benedict M A, McMahon E T. *Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century*//Sprawl Watch Clearinghouse Monograph Series. Washington, D C: Sprawl Watch Clearinghouse, 2000.
- [27] Daniels T. Smart growth: a new American approach to regional planning. *Planning Practice and Research*, 2001, 16(3/4): 271-279.
- [28] Ahern J. Greenways as a planning strategy. *Landscape and Urban Planning*, 1995, 33(1/3): 131-155.
- [29] Selm A J V. Ecological infrastructure: a conceptual framework for designing habitat networks//Schrieiber K F, ed. *Connectivity in Landscape Ecology*, Proceedings of the 2nd International Seminar of the International Association for Landscape Ecology. Paderborn: Ferdinand Schoningh, 1988: 63-66.
- [30] Noss R F, Harris L D. Nodes, networks, and MUMs: preserving diversity at all scales. *Environmental Management*, 1986, 10(3): 299-309.
- [31] Forman R T T. Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology*, 1995, 10(3): 133-142.
- [32] Yu K J. *Security Patterns in Landscape Planning: with A Case in South China*. MA. USA: Harvard University, 1995.
- [33] 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.
- [34] Mander U, Jagomägi J, Kùlvik. Network of compensative areas as an ecological infrastructure of territories//Connectivity in Landscape Ecology, Proceedings of the 2nd International Seminar of the International Association for Landscape Ecology, Ferdinand Schoningh, Paderborn, 1988:35-38.
- [35] Selm A, J. Van. Ecological infrastructure: a conceptual framework for designing habitat networks//In Schrieibe K F ed. *Connectivity in Landscape Ecology*, Proceedings of the 2nd International Seminar of the International Association for Landscape Ecology. Ferdinand Schoningh. Paderborn, 1998:63-66.
- [36] 俞孔坚, 李迪华. 论反规划与城市生态基础设施建设//中国科协 2002 年学术年会第 22 分会场论文集. 成都: 中国风景园林学会, 2002.
- [37] 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.
- [38] Seiler A, Eriksson I M. Habitat Fragmentation & Infrastructure and the Role of Ecological Engineering. Maastricht & DenHague, 1995: 253-264.
- [39] Van Bohemen H D. Habitat fragmentation, infrastructure and ecological engineering. *Ecological Engineering*, 1998, 11(1/4): 199-207.
- [40] Forman R T T, Sperling D, Bissonette J A, Clevenger A P, Cutshall C D, Dale V H, France R, Goldman C R, Heanue K, Jones J A, Swanson F J, Turrentine T, Winter T C. *Road Ecology: Science and Solution*. Covelo, CA: Island Press, 2003.
- [41] 沈清基. 《加拿大城市绿色基础设施导则》评介及讨论. *城市规划学刊*, 2005, (5): 98-103.
- [42] 唐哈梅, 赵兵. 灰色基础设施的生态化——《加拿大绿色基础设施导则》的解读与启示. *建筑与文化*, 2015, (7): 198-199.
- [43] Adalberth K, Almgren A, Petersen E H. Life cycle assessment of four multi-family buildings. *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings*, 2001, 2(21): 1-21.
- [44] de Baere L. Anaerobic digestion of solid waste: state-of the art. *Water Science and Technology*, 2000, 41(3): 283-290.
- [45] Kondolf G M. Lessons learned from river restoration projects in California. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystem*, 1998, 8(1):

- 39-52.
- [46] Ahiablame L M, Engel B A, Chaubey I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2012, 223(7): 4253-4273.
- [47] Dietz M E. Low impact development practices: a review of current research and recommendations for future directions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 186(1): 351-363.
- [48] Mander U, Jagonaegi J, Kulvik M. Network of compensative areas as an ecological infrastructure of territories. connectivity in landscape ecology// *Proceedings of the 2nd International Seminar of the International Association for Landscape Ecology*. Paderborn: Ferdin and Schoningh, 1988: 35-38.
- [49] Laforteza R, Davies C, Sanesi G, Konijnendijk C C. Green Infrastructure as a tool to support spatial planning in European urban regions. *Forest Biogeosciences & Forestry*, 2013, 6(1): 102-108.
- [50] 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(S3): S93-S115.
- [51] Westman W E. How much are nature's services worth?. *Science*, 1997, 197(4307): 960-964.
- [52] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 293-301.
- [53] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R, Paruelo J, Raskim R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(15): 253-260.
- [54] Daily G. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [55] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [56] de Groot R S, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemen L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 260-272.
- [57] Kumar P. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. London and Washington: Earthscan, 2010.
- [58] Haines-Young R, Potschin M. The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being// Raffaelli D G, Christopher L J F, eds. *Ecosystem Ecology: A New Synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [59] 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*, 2012, 21: 110-122.
- [60] Pakzad P, Osmond P. Developing a sustainability indicator set for measuring green infrastructure performance. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2016, 216: 68-79.
- [61] Pataki D E, Carreiro M M, Cherrier J, Grulke N E, Jennings V, Pincetl S, Pouyat R V, Whitlow T H, Zipperer W C. Coupling biogeochemical cycles in urban environments: ecosystem services, green solutions, and misconceptions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(1): 27-36.
- [62] Spataro S, Yu Z W, Montalto F A. Life cycle implications of urban green infrastructure. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8/9): 2174-2179.
- [63] Gill S E, Handley J F, Ennos A R, Pauleit S. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environment*, 2007, 33(1): 115-133.
- [64] Ellis J B. Sustainable surface water management and green infrastructure in UK urban catchment planning. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2013, 56(1): 24-41.
- [65] Demuzere M, Orru K, Heidrich O, Olazabal E, Geneletti D, Orru H, Bhawe A G, Mittal N, Feliu E, Faehle M. Mitigating and adapting to climate change: multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 2014, 146: 107-115.
- [66] Hunt W F, Smith J T, Jadlocki S J, Hathaway J M, Eubanks P R. Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban charlotte, N.C. *Journal of Environmental Engineering*, 2008, 134(5): 403-408.
- [67] United States Environmental Protection Agency. Green infrastructure case studies: municipal policies for managing stormwater with Green Infrastructure. http://www.sustainablecitiesinstitute.org/Documents/SCI/Report_Guide/Guide_EPA_GICaseStudiesReduced4.pdf.
- [68] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77(3): 217-226.
- [69] Clausen J C. Jordan Cove watershed project 2007 final report. [2010-10-04]. http://www.jordancove.uconn.edu/jordan_cove/publications/final_report.pdf.
- [70] Shuster W D, Morrison M A, Webb R. Front-loading urban stormwater management for success-a perspective incorporating current studies on the implementation of retrofit low-impact development. *Cities and the Environment*, 2008, 1(2): article 8, 15 pp. <http://escholarship.bc.edu/cate/voll/iss2/8>.

- [71] Davis A P, Hunt W F, Traver R G, Clar M. Bioretention technology: overview of current practice and future needs. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, 135(3): 109-117.
- [72] Odefey J, Detwiler S, Rousseau K, Trice A, Blackwell R, O'Hara K, Buckley M, Souhlas M, Brown S, Raviprakash P. Banking on green: a look at how green infrastructure can save municipalities money and provide economic benefits community-wide//A Joint Report by American Rivers. Portland: The Water Environment Federation, The American Society of Landscape Architects, 2012.
- [73] Passeport E, Hunt W F, Line D E, Smith R A, Brown R A. Field study of the ability of two grassed bioretention cells to reduce storm-water runoff pollution. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2009, 135(4): 505-510.
- [74] Berndtsson J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 351-360.
- [75] Yu C, Hien W N. Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*, 2006, 38(2): 105-120.
- [76] Shashua-Bar L, Hoffman M E. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: an empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*, 2000, 31(3): 221-235.
- [77] Nonomura A, Kitahara M, Masuda T. Impact of land use and land cover changes on the ambient temperature in a middle scale city, Takamatsu, in Southwest Japan. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(11): 3297-3304.
- [78] 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 & Urban Greening*, 2012, 11(2): 129-137.
- [79] 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.
- [80] Nowak D J, Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 381-389.
- [81] Pouyat R V, Yesilonis I D, Nowak D J. Carbon storage by urban soils in the United States. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1566-1575.
- [82] Castleton H F, Stovin V, Beck S B M, Davison J B. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 2010, 42(10): 1582-1591.
- [83] Alexandri E, Jones P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 2008, 43(4): 480-493.
- [84] Cheng C Y, Cheung K K S, Chu L M. Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment*, 2010, 45(8): 1779-1787.
- [85] Akbari H. Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants. *Environmental Pollution*, 2002, 116(S1): S119-S126.
- [86] Simpson J R. Improved estimates of tree-shade effects on residential energy use. *Energy and Buildings*, 2002, 34(10): 1067-1076.
- [87] de Vries S, Verheij R A, Groenewegen P P, Spreeuwenberg P. Natural environments-healthy environments? An exploratory analysis of the relationship between greenspace and health. *Environment and Planning*, 2003, 35(10): 1717-1731.
- [88] Takano T, Nakamura K, Watanabe M. Urban residential environments and senior citizens' longevity in megacity areas; the importance of walkable green spaces. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 2002, 56(12): 913-918.
- [89] Tanaka A, Takano T, Nakamura K, Takeuchi S. Health levels influenced by urban residential conditions in a megacity-Tokyo. *Urban Studies*, 1996, 33(6): 879-894.
- [90] Payne L, Orsega-Smith B, Godbey G, Roy M. Local parks and the health of older adults: results of an exploratory study. *Parks & Recreation*, 1998, 33(10): 64-71.
- [91] Tzoulas K, Korpela K, Venn S, Yli-Pelkonen V, Kazmierczak A, Niemela J, James P. Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: a literature review. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 81(3): 167-178.
- [92] Booth M L, Owen N, Bauman A, Clavisi O, Leslie E. Social-cognitive and perceived environment influences associated with physical activity in older Australians. *Preventive Medicine*, 2000, 31(1): 15-22.
- [93] Whitford V, Ennos A R, Handley J F. "City form and natural processes"-indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 57(2): 91-103.
- [94] Humpel N, Owen N, Leslie E. Environmental factors associated with adults' participation in physical activity. *American Journal of Preventive Medicine*, 2002, 22(3): 188-199.
- [95] Humpel N, Owen N, Leslie E, Marshall A L, Bauman A E, Sallis J F. Associations of location and perceived environmental attributes with walking in neighborhoods. *American Journal of Health Promotion*, 2004, 18(3): 239-242.
- [96] Pikora T, Giles-Corti B, Bull F, Jamrozik K, Donovan R. Developing a framework for assessment of the environmental determinants of walking and cycling. *Social Science & Medicine*, 2003, 56(8): 1693-1703.

- [97] Ulrich R S. View through a window may influence recovery from surgery. *Science*, 1984, 224(4647): 420-421.
- [98] Bodin M, Hartig T. Does the outdoor environment matter for psychological restoration gained through running?. *Psychology of Sport and Exercise*, 2003, 4(2): 141-153.
- [99] Patz J A, Norris D E. Land use change and human health. *Ecosystems and Land Use Change*, 2004, 153: 159-167.
- [100] Zielinski-Gutierrez E C, Hayden M H. A model for defining West Nile Virus risk perception based on ecology and proximity. *EcoHealth*, 2006, 3(3): 28-34.
- [101] Korpela K M. Adolescents' favourite places and environmental self-regulation. *Journal of Environmental Psychology*, 1992, 12(3): 249-258.
- [102] Korpela K M, Hartig T, Kaiser F, Fuhrer U. Restorative experience and self-regulation in favorite places. *Environment and Behavior*, 2001, 33(4): 572-589.
- [103] Korpela K, Hartig T. Restorative qualities of favorite places. *Journal of Environmental Psychology*, 1996, 16(3): 221-233.
- [104] Hartig T, Mang M, Evans G W. Restorative effects of natural environment experiences. *Environment and Behavior*, 1991, 23(1): 3-26.
- [105] Taylor A F, Kuo F E, Sullivan W C. Coping with ADD. The surprising connection to green play settings. *Environment and Behavior*, 2001, 33(1): 54-77.
- [106] Hartig T, Evans G W, Jamner L D, Davis D S, Gärling T. Tracking restoration in natural and urban field settings. *Journal of Environmental Psychology*, 2003, 23(2): 109-123.
- [107] Kim J, Kaplan R. Physical and psychological factors in sense of community. New Urbanist Kentlands and Nearby Orchard Village. *Environment & Behavior*, 2004, 36(3): 313-340.
- [108] Kuo F E. Coping with poverty: impacts of environment and attention in the inner city. *Environment and Behavior*, 2001, 33(1): 5-34.
- [109] Kuo F E, Sullivan W C. Aggression and violence in the inner city. Effects of environment via mental fatigue. *Environment and Behavior*, 2001, 33(4): 543-571.
- [110] St Leger L. Health and nature—new challenges for health promotion. *Health Promotion International*, 2003, 18(3): 173-175.
- [111] Stokols D, Grzywacz J G, McMahan S, Phillips K. Increasing the health promotive capacity of human environments. *American Journal of Health Promotion*, 2003, 18(1): 4-13.
- [112] Stern D N, Mazze E M. Federal water pollution control act amendments of 1972. *American Business Law Journal*, 1974, 12(1): 81-86.
- [113] 车伍, 吕放放, 李俊奇, 李海燕, 王建龙. 发达国家典型雨洪管理体系及启示. *中国给水排水*, 2009, 25(20): 12-17.
- [114] USEPA. Low impact development (lid): a literature review. EPA-841-B-00-005. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [115] CIRIA. Sustainable urban drainage system—best practice manual. Report C523. London: Construction Industry Research and Information Association, 2001.
- [116] Spillett P B, Evans S G, Colquhoun K. International perspective on BMPs/SUDS: UK-Sustainable Stormwater Management in the UK. Sacramento, CA: EWRI, 2005.
- [117] Lloyd S D, Wong T H F, Chesterfield C J. Water sensitive urban design—a stormwater management perspective. Industry Report, 2002.
- [118] Van Roon M R, Greenaway A, Dixon J E, Eason C. Low impact urban design and development: scope, founding principles and collaborative learning//Proceedings of the Urban Drainage Modelling and Water Sensitive Urban Design Conference. Melbourne, Australia, 2006.
- [119] Holman-Dodds J K, Bradley A A, Potter K W. Evaluation of hydrologic benefits of infiltration based urban storm water management. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(1): 205-215.
- [120] Walsh C J, Fletcher T D, Ladson A R. Stream restoration in urban catchments through redesigning stormwater systems: looking to the catchment to save the stream. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24(3): 690-705.
- [121] Williams E S, Wise W R. Hydrologic impacts of alternative approaches to storm water management and land development. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, 42(2): 443-455.
- [122] Dietz M E, Clausen J C. Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision. *Journal of Environmental Management*, 2008, 87(4): 560-566.
- [123] Hatt B E, Fletcher T D, Delatic A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale. *Journal of Hydrology*, 2009, 365(3/4): 310-321.
- [124] Damodaram C, Giacomoni M H, Khedun C P, Holmes H, Ryan A, Saour W, Zechman E M. Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable stormwater management. *Journal of the American Water Resources Association*, 2010, 46(5): 907-918.
- [125] Ng E, Yuan C, Chen L, Ren C, Fung J C H. Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: a study in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(1): 59-74.

- [126] Pugh T A M, Mackenzie A R, Whyatt J D, Hewitt N. Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(14): 7692-7699.
- [127] 任超, 袁超, 何正军, 吴恩融. 城市通风廊道研究及其规划应用. *城市规划学刊*, 2014, (3): 52-60.
- [128] 日本建筑学会. 都市风环境评价体系. 东京: 日本建筑学会, 2002.
- [129] Baumüller J, Hoffmann U, Reuter U. Climate booklet for urban development---references for urban planning. Stuttgart: Ministry of Economic Affairs Baden-Württemberg, 2009.
- [130] 翁清鹏, 张慧, 包洪新, 刘久根, 吴豪. 南京市通风廊道研究. *科学技术与工程*, 2015, 15(11): 89-94.
- [131] Prajapati S K, Tripathi B D. Seasonal variation of leaf dust accumulation and pigment content in plant species exposed to urban particulates pollution. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(3): 865-870.
- [132] 赵松婷, 李延明, 李新宇, 郭佳. 园林植物滞尘规律研究进展. *北京园林*, 2013, 29(1): 25-30.
- [133] 刘艳琴. 南京市城市森林抑菌、滞尘效应研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2006.
- [134] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 1998, 99(3): 347-360.
- [135] 廖莉团, 苏欣, 李小龙, 马娜, 王梦迪, 周蕴薇. 城市绿化植物滞尘效益及滞尘影响因素研究概述. *森林工程*, 2014, 30(2): 21-24, 28.
- [136] Jovanić B R, Jovanić S B. The effect of high concentration of negative ions in the air on the chlorophyll content in plant leaves. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 129(1/4): 259-265.
- [137] Wu C C, Lee G W M, Yang S, Yu K P, Lou C L. Influence of air humidity and the distance from the source on negative air ion concentration in indoor air. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(1): 245-253.
- [138] 彭新德. 长沙城市绿地对空气质量的影响及不同目标空气质量下绿地水量平衡研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [139] Rottle N D. Factors in the landscape-based greenway: a mountains to sound case study. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 76(1/4): 134-171.
- [140] Lovell S T, Taylor J R. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8): 1447-1463.
- [141] Heckert M, Rosan C D. Developing a green infrastructure equity index to promote equity planning. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, doi: 10.1016/j.ufug.2015.12.011.
- [142] Byrne J A, Lo A Y, Yang J J. Residents' understanding of the role of green infrastructure for climate change adaptation in Hangzhou, China. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 138: 132-143.
- [143] Breed C A, Cilliers S S, Fisher R C. Role of landscape designers in promoting a balanced approach to green infrastructure. *Journal of Urban Planning and Development*, 2015, 141(3): A5014003.
- [144] Baptiste A K, Foley C, Sardon R. Understanding urban neighborhood differences in willingness to implement green infrastructure measures: a case study of Syracuse, NY. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 136: 1-12.
- [145] Schäffler A, Swilling M. Valuing green infrastructure in an urban environment under pressure-the Johannesburg case. *Ecological Economics*, 2013, 86: 246-257.
- [146] Dennis M, James P. Site-specific factors in the production of local urban ecosystem services: a case study of community-managed green space. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 208-216.
- [147] Jayasooriya V M, Ng A W M. Development of a framework for the valuation of eco-system services of green infrastructure//20th International Congress on Modelling and Simulation. Adelaide, Australia, 2013: 3155-3161.
- [148] Wang Y F, Bakker F, De Groot R, Wörtche H. Effect of ecosystem services provided by urban green infrastructure on indoor environment: a literature review. *Building and Environment*, 2014, 77: 88-100.
- [149] Hansen R, Pauleit S. From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas. *AMBIO*, 2014, 43(4): 516-529.
- [150] Gómez-Baggethun E, Barton D N. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 2013, 86: 235-245.
- [151] Dobbs C, Escobedo F J, Zipperer W C. A framework for developing urban forest ecosystem services and goods indicators. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 99(3/4): 196-206.
- [152] Wang H F, Qureshi S, Knapp S, Friedman C R, Hubacek K. A basic assessment of residential plant diversity and its ecosystem services and disservices in Beijing, China. *Applied Geography*, 2015, 64: 121-131.
- [153] Von Döhren P, Haase D. Ecosystem disservices research: a review of the state of the art with a focus on cities. *Ecological Indicators*, 2015, 52: 490-497.
- [154] Susca T, Gaffin S R, Dell'Osso G R. Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8/

- 9): 2119-2126.
- [155] Chen W Y, Hu F Z Y. Producing nature for public: Land-based urbanization and provision of public green spaces in China. *Applied Geography*, 2015, 58: 32-40.
- [156] Flynn K M, Traver R G. Green infrastructure life cycle assessment: a bio-infiltration case study. *Ecological Engineering*, 2013, 55: 9-22.
- [157] Smetana S M, Crittenden J C. Sustainable plants in urban parks: a life cycle analysis of traditional and alternative lawns in Georgia, USA. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 122: 140-151.
- [158] Wang R R, Eckelman M J, Zimmerman J B. Consequential environmental and economic life cycle assessment of green and gray stormwater infrastructures for combined sewer systems. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(19): 11189-11198.
- [159] Tiwary A, Williams I D, Heidrich O, Namdeo A, Bandaru V, Calfapietra C. Development of multi-functional streetscape green infrastructure using a performance index approach. *Environmental Pollution*, 2016, 208: 209-220.
- [160] 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*, 2001, 17(6): 9-13, 17-17.
- [161] 刘滨谊, 姜允芳. 论中国城市绿地系统规划的误区与对策. *城市规划*, 2002, 26(2): 76-80.
- [162] 贺炜, 刘滨谊. 有关绿色基础设施几个问题的重思. *中国园林*, 2011, 27(1): 88-92.
- [163] 刘滨谊, 张德顺, 刘晖, 戴睿. 城市绿色基础设施的研究与实践. *中国园林*, 2013, (3): 6-10.
- [164] 翟俊. 协同共生: 从市政的灰色基础设施、生态的绿色基础设施到一体化的景观基础设施. *规划师*, 2012, 28(9): 71-74.
- [165] 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.
- [166] 吴伟, 付喜娥. 绿色基础设施概念及其研究进展综述. *国际城市规划*, 2009, 24(5): 67-71.
- [167] 周艳妮, 尹海伟. 国外绿色基础设施规划的理论与实践. *城市可持续发展*, 2010, 17(8): 87-93.
- [168] 何浩, 潘耀忠, 申克建, 朱文泉, 李宜展, 张锦水. 北京市湿地生态系统服务功能价值评估研究. *资源科学*, 2012, 34(5): 844-854.
- [169] 侯晓蕾, 郭巍. 绿色廊道适宜性评价方法探究——以综合功能、生态保护和遗产型绿色廊道为例//2012 国际风景园林师联合会 (IFLA) 亚太区会议暨中国风景园林学会 2012 年会论文集(上册). 上海: IFLA 亚太区, 中国风景园林学会, 上海市绿化和市容管理局, 2012: 254-258.
- [170] 付彦荣. 中国的绿色基础设施—研究和实践//2012 国际风景园林师联合会 (IFLA) 亚太区会议暨中国风景园林学会 2012 年会论文集(下册). 上海: IFLA 亚太区, 中国风景园林学会, 上海市绿化和市容管理局, 2012.
- [171] 李博. 绿色基础设施与城市蔓延控制. *城市问题*, 2009, (1): 86-90.
- [172] 裴丹. 绿色基础设施构建方法研究述评. *城市规划*, 2012, 36(5): 84-90.
- [173] 杜鹃. 城市化进程中绿色基础设施的弹性规划途经研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [174] 俞孔坚, 李迪华, 刘海龙. “反规划”途径. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [175] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 李春波. 北京市生态安全格局及城市增长远景. *生态学报*, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [176] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 乔青, 奚雪松. 国土尺度生态安全格局. *生态学报*, 2009, 29(10): 5163-5175.
- [177] 孟原旭, 王琛. 基于绿色基础设施的绿地系统规划方法探析. *规划师*, 2013, 29(9): 57-62.
- [178] 刘滨谊, 温全平. 城乡一体化绿地系统规划的若干思考. *国际城市规划*, 2007, 22(1): 84-89.
- [179] 刘滨谊, 贺炜, 刘頌. 基于绿地与城市空间耦合理论的城市绿地空间评价与规划研究. *中国园林*, 2012, 28(5): 42-46.
- [180] 邱瑶, 常青, 王静. 基于 MSPA 的城市绿色基础设施网络规划——以深圳市为例. *中国园林*, 2013, 29(5): 104-108.
- [181] 安超, 沈清基. 基于空间利用生态绩效的绿色基础设施网络构建方法. *风景园林*, 2013, (2): 22-31.
- [182] 刘娟娟, 李保峰, (美)南茜·若, 宁云飞. 构建城市生命支撑系统——西雅图城市绿色基础设施案例研究. *中国园林*, 2012, 28(3): 116-120.
- [183] 张晋石. 绿色基础设施——城市空间与环境问题的系统化解决途径. *现代城市研究*, 2009, 24(11): 81-86.
- [184] 李咏华, 王竹. 马里兰绿图计划评述及其启示. *建筑学报*, 2010, (S2): 26-32.
- [185] 黄小金, 刘欣. 浅析英国哈罗新城区绿色基础设施规划. *现代园林*, 2010, (5): 72-75.
- [186] 乔青, 陆慕秋, 袁弘. 生态基础设施理论与实践北京大学景观设计学研究院相关研究综述. *风景园林*, 2013, (2): 38-44.
- [187] 俞孔坚. 让水流慢下来: 六盘水明湖湿地公园. *园林*, 2014, (10): 58-61.
- [188] 俞孔坚, 俞宏前, 宋昱, 周水明. 弹性景观——金华燕尾洲公园设计. *建筑学报*, 2015, (4): 68-70.
- [189] 俞孔坚. 绿色海绵营造适应城市: 哈尔滨群力雨洪公园. *园林*, 2015, (1): 20-24.
- [190] 张伟, 车伍, 王建龙, 王思思. 利用绿色基础设施控制城市雨水径流. *中国给水排水*, 2011, 27(4): 22-27.
- [191] 车伍, 张伟, 李俊奇, 李海燕, 王建龙, 刘红, 何建平, 孟光辉. 中国城市雨洪控制利用模式研究. *中国给水排水*, 2010, 26(16): 51-57.
- [192] 车伍, 闫攀, 赵杨, Tian F. 国际现代雨洪管理体系的发展及剖析. *中国给水排水*, 2014, 30(18): 45-51.
- [193] 车伍, 张鹏, 赵杨. 我国排水防涝及海绵城市建设中若干问题分析. *建设科技*, 2015, (1): 22-25, 28-28.
- [194] 王佳, 王思思, 车伍. 低影响开发与绿色雨水基础设施的植物选择与设计. *中国给水排水*, 2012, 28(21): 45-47, 50-50.

- [195] 王云才, 崔莹, 彭震伟. 快速城市化地区“绿色海绵”雨洪调蓄与水处理系统规划研究——以辽宁康平卧龙湖生态保护区为例. 风景园林, 2013, (2): 60-67.
- [196] 傅文, 王云才. 以水保护为核心的绿色基础设施系统构建研究——烟台市福山区南部地区绿色基础设施体系规划案例探析//中国风景园林学会 2013 年会论文集(上册). 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 359-364.
- [197] 姜丽宁. 基于绿色基础设施理论的城市雨洪管理研究[D]. 临安: 浙江农林大学, 2013.
- [198] 李俊奇, 刘洋, 车伍. 发达国家雨水管理机制及政策. 城乡建设, 2011, (8): 75-76.
- [199] 李俊奇, 王文亮. 基于多目标的城市雨水系统构建与展望. 给水排水, 2015, 41(4): 1-3, 37-37.
- [200] 付喜娥, 钱达, 韩立波, 张凯云. 基于总经济价值的城市绿色基础设施效益评估研究. 建筑经济, 2015, 36(12): 83-86.
- [201] 芦琳. 两种典型城市雨水 LID 技术生命周期评价研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.
- [202] Chen W Y. The role of urban green infrastructure in offsetting carbon emissions in 35 major Chinese cities: a nationwide estimate. *Cities*, 2015, 44: 112-120.
- [203] 杜春兰. 降减 PM_{2.5} 的绿色基础设施途径的思索. 风景园林, 2013, (2): 147-147.
- [204] 朱祥明. PM_{2.5} 与绿色基础设施之我见. 风景园林, 2013, (2): 151-151.
- [205] Weber T C, Blank P J, Sloan A. Field validation of a conservation network on the eastern shore of Maryland, USA, using breeding birds as bio-indicators. *Environmental Management*, 2008, 41(4): 538-550.
- [206] 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.
- [207] 2013 年中国国土绿化状况公报. 国土绿化, 2014, (3): 12-17.