

DOI: 10.5846/stxb202009222471

黄娜, 石铁矛, 石羽, 李春林, 胡远满. 绿色基础设施的生态及社会功能研究进展. 生态学报, 2021, 41(20): 7946-7954.

Huang N, Shi T M, Shi Y, Li C L, Hu Y M. Research progress on ecological and social function of green infrastructure. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 7946-7954.

## 绿色基础设施的生态及社会功能研究进展

黄 娜<sup>1,4</sup>, 石铁矛<sup>2,\*</sup>, 石 羽<sup>3</sup>, 李春林<sup>4</sup>, 胡远满<sup>4</sup>

1 沈阳建筑大学建筑与规划学院, 沈阳 110168

2 沈阳建筑大学空间规划与设计研究院, 沈阳 100168

3 沈阳建筑大学设计艺术学院, 沈阳 100168

4 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

**摘要:**随着城市化进程的加快,城市硬化地表不断挤占透水表面,使得绿色基础设施规模不断下降、破碎化程度逐渐加大,严重影响了绿色基础设施服务功能的有效发挥。绿色基础设施的发展经历了早期萌芽、初步形成和快速发展三个阶段,主要在宏观尺度研究区域生态安全,中观尺度促进城市可持续发展,微观尺度解决社区生态环境问题。目前绿色基础设施的研究内容集中在其生态功能和社会功能两个方面,主要关注调蓄降雨径流、消减非点源污染、调节区域微气候、居民健康与福祉和空间布局公平性。而供需结构的合理配置也是决定绿色基础设施服务水平的关键因素。未来的研究应加强与相关学科的交叉融合,完善绿色基础设施功能的测度与评估方法,将绿色基础设施建设与实际规划相结合,以期为区域可持续发展和国家生态文明建设提供支撑与保障。

**关键词:**绿色基础设施;降雨径流;非点源污染;城市热岛;健康与福祉;供需结构

## Research progress on ecological and social function of green infrastructure

HUANG Na<sup>1,4</sup>, SHI Tiema<sup>2,\*</sup>, SHI Yu<sup>3</sup>, LI Chunlin<sup>4</sup>, HU Yuanman<sup>4</sup>

1 School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China

2 Institute of Spatial Planning and Design, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China

3 School of Design and Art, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China

4 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

**Abstract:** The world is currently undergoing unprecedented urbanization which has contributed to replacement of the existing natural green spaces with impervious surfaces. The reduction and fragmentation of green infrastructure can result in environmental challenges locally, regionally and beyond, due to biochemical and physical changes to ecological systems. Specifically, the rapid increase in area of impervious surfaces reduces rainwater interception, storage and infiltration, resulting in a concomitant increase in runoff generation in urban catchments. Therefore, nature-based solutions, denoted as green infrastructure, have been widely recommended to reduce stormwater runoff, improve water quality, cool urban air temperature, provide ecosystem sustainability and so on. The development of green infrastructure has experienced three stages: early germination, initial formation, and rapid development. The research mainly focuses on the regionally ecological security in the macro scale, promotes the sustainable development of the city in the meso scale, and solves the community ecological environment problems in the micro scale. At present, the research content of green infrastructure includes two aspects: ecological function and social function, mainly concentrated on the regulation of rainfall runoff, reduction of non-

基金项目:国家自然科学基金项目(41730647,52008267,51878418,41871192)

收稿日期:2020-09-22; 采用日期:2021-06-09

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tiemaos@sjzu.edu.cn

point source pollution, regulation of regional microclimate, residents' health and well-being, and spatial distribution equity. The supply and demand structure of green infrastructure is also the key factor effecting the service quality of green infrastructure. Generally, the service function of green infrastructure will increase with the increase of its scale, but the imbalance of supply and demand allocation of local green infrastructure often leads to the problem of local service surplus or shortage. At present, the development of green infrastructure is difficult to meet the needs of China's rapid urbanization. The quantitative evaluation of green infrastructure function is insufficient, and the research on supply and demand structure is not deep enough. Future research should strengthen the cross integration with related disciplines, improve the measurement and evaluation methods of green infrastructure function, and combine green infrastructure construction with spatial planning, in order to provide support for regional sustainable development and national ecological civilization construction.

**Key Words:** green infrastructure; rainfall runoff; non-point source pollution; urban heat island; health and well-being; supply and demand structure

随着我国城市化进程的不断加快,城市土地资源的有限性和城市人口急剧增加之间的矛盾日益突出,越来越多的建筑、道路和广场等硬质地表覆盖不断挤占城市绿色空间,进一步加剧了城市的大气污染、内涝、非点源污染、热岛等生态环境问题。绿色基础设施作为城市中重要的自然景观构成,在营造城市自然环境、维系城市生态平衡、提升城市美好形象、调节城市水气循环、应对区域气候变化等方面具有重要作用,能够有效缓解城市急剧扩张过程中产生的一系列城市问题<sup>[1-2]</sup>。本文旨在介绍绿色基础设施的起源与内涵,归纳其在生态和社会两方面的主要功能及其供需结构的研究进展,并总结目前研究存在的问题,提出未来绿色基础设施研究的方向和建议,从而让绿色基础设施的研究和发展能够为新时代生态文明建设提供支撑和保障。

## 1 绿色基础设施的起源及内涵

### 1.1 绿色基础设施的起源

绿色基础设施的发展具有较长的历史,大致可以分为3个阶段(表1)。1850年代现代城市公园的出现是早期萌芽阶段,纽约中央公园的设计就包含了绿色基础设施的理念<sup>[3]</sup>。该阶段绿色基础设施以休闲娱乐、改善公共环境为目标,但缺少科学性和系统性的理论方法<sup>[4]</sup>。1960年后,由于生态学、生态规划、景观生态学等理论和方法的发展,绿色基础设施理论初步形成和完善。此时绿色基础设施主要以生态保护为目标,强调构建廊道和生态网络。1990年代后,美国马里兰州绿道规划中绿色基础设施作为经济社会可持续发展战略目标首次出现,标志着现代绿色基础设施理念的形成。此后绿色基础设施进入快速发展阶段,并且向更多相关专业和行业扩展,其理念和内涵也不断完善。2000年,绿色基础设施概念引入中国,在国内的景观规划设计与生态环境领域得到广泛实践和应用<sup>[5-6]</sup>。

表1 绿色基础设施的发展阶段与特点<sup>[4]</sup>

Table 1 The development stages and characteristics of green infrastructure				
时期 Period	发展阶段 Development stage	代表要素 Representation	目标 Aim	方法 Method
1850—1960	早期萌芽阶段	现代公园、公共空间	休闲娱乐、改善公共环境	景观设计、城市设计的定性方法
1960—1990	初步形成阶段	廊道、生态网络	生态保护	生态学、生态规划、景观生态学的科学方法
1990—今	快速发展阶段	绿道、低影响开发措施、绿色基础设施	区域可持续发展	地理、生态、景观规划、市政工程和工程等多学科交叉的方法

### 1.2 绿色基础设施的内涵

随着研究的不断深入和学科领域的交叉,学者们从各自的研究视角出发,根据其研究范围的大小,从宏

观、中观和微观三个尺度对绿色基础设施的内涵进行了延展和深化<sup>[7]</sup>。在全球、国家或流域的宏观尺度上,绿色基础设施涵盖了森林、草原、农田、河流、湖泊、湿地等一切非灰色基础设施土地利用类型,其研究视角主要集中在绿色基础设施空间分布和连通性方面,强调绿色基础设施作为一个相互连通的生态网络整体,对大区域气候调节和生物多样性保护的重要作用,通过不同时间节点的比较分析,探究绿色基础设施的空间演变,研究其生态过程和连通性<sup>[6]</sup>。在以城市为代表的中观尺度上,绿色基础设施剥离了宏观尺度中的森林、草原、农田等类型,着眼于解决城市发展中面临的一系列城市问题,探索城市内部绿道、公园、湿地等绿色基础设施的空间格局分布与优化,主要侧重于对绿色基础设施相关功能,如雨洪消减、缓解热岛效应、固碳释氧、保护城市生物多样性、提供休闲娱乐场所、绿色基础设施空间公平性等方面的研究<sup>[6, 8-17]</sup>。在以社区为代表的微观尺度上,绿色基础设施的研究视角着重于通过对社区或场地的格局优化,并结合一系列低影响开发措施,实现缓解内涝、消减非点源污染、调节局地微气候、修复河道生态系统、提高绿色建筑节能减排等目标<sup>[8, 18-22]</sup>。

绿色基础设施三个尺度上的研究各具特色。在宏观尺度上,主要强调绿色基础设施的生态功能,与生态系统可持续发展的相关研究极为相近;在中观尺度,强调绿色基础设施是人类活动与城市自然环境相互影响的载体,期望通过合理布局绿色基础设施来有效解决城市发展中的生态环境问题;在微观尺度,重点是对特定场所(如社区、停车场、高架桥等)的绿色基础设施进行格局优化,调节局地微系统,其范畴囊括了植物优化配置、低影响开发措施应用以及灰色基础设施的绿色化改造等方面。绿色基础设施在不同尺度上发挥的功能可以分为生态功能和社会功能两大类。绿色基础设施的土壤厚度、植物种类等物理结构决定了其生态功能,主要包括调蓄降雨径流、消减非点源污染和调节区域微气候等;而绿色基础设施作为城市中稀缺的自然要素,能影响居民的身心健康,因此类型、规模、质量、可达性等特征产生了显著的社会功能,当前研究者对其社会功能方面的研究主要集中在居民健康与福祉和空间布局公平性两个方面。

## 2 绿色基础设施的主要生态功能

### 2.1 调蓄降雨径流

快速城镇化导致越来越多的可渗透区域被硬化表面替代,土地利用形式的变化在一定的时间和空间范围内改变了城市的自然水文过程<sup>[23]</sup>,使得城市地表降雨径流量和径流系数不断增大<sup>[24-26]</sup>。绿色基础设施由于植被和土壤具有拦截、存储、渗透降雨径流的能力,因此其能起到雨水调蓄功能,有助于削减地表径流。绿色基础设施的减少及破碎化削弱了其调蓄降雨径流的能力,进一步加剧了城市内涝问题。

在传统雨水“快排”理念的指导下,大部分城市为解决城市内涝问题都致力于加大雨水排水管网的布局,使得雨水排水管的长度和密度不断增加,却忽视了绿色基础设施在雨洪管理中的积极作用<sup>[25, 27]</sup>。没有植被覆盖的城市区域大约 60% 的雨水会通过雨水排水管排走,而植被覆盖区只有 5%—15% 的雨水会形成地表径流,剩下的雨水则会蒸发或渗透到地下<sup>[28]</sup>。城市雨水被大量直接排走,进一步造成城市地下水水位下降,加剧了城市内涝与城市地下水匮乏之间的矛盾。

绿色基础设施对城市降雨径流具有显著的调蓄能力,其调蓄能力大小主要受植被类型、下垫面的空间结构和特性、降雨特征等影响<sup>[29]</sup>。绿色基础设施的空间分布对地表径流也具有显著影响,在小流域上游绿色基础设施的空间布局和形状特征对地表径流的调蓄作用最明显<sup>[30]</sup>。不同类型的绿色基础设施在调蓄降雨径流效果方面存在一定的差异。下凹式绿地调蓄降雨径流效果优于透水铺装,原因在于下凹式绿地兼具滞留池的功能,其储蓄的雨水在雨后能够继续下渗。透水铺装结构层会因使用年限的增加逐渐堵塞,造成渗透率不断下降<sup>[31]</sup>。而且不同类型的绿色基础设施串联使用的效果更佳,如绿色屋顶和下凹式绿地串联使用削减洪峰和滞蓄雨水效果更显著,且串联效果会随着降雨频率的增大而提高<sup>[32]</sup>。

### 2.2 消减非点源污染

19 世纪中叶发达国家城市率先推行的合流制溢流排水系统,有效缓解了城市雨洪内涝问题<sup>[33]</sup>,但合流制排水系统中总悬浮颗粒物的平均浓度是分流制排水系统的 1.5 倍<sup>[34]</sup>,进一步加剧了非点源污染问题。由



于合流制分流改造难度较大,大部分城市老旧城区仍属于合流制区域,随着点源污染得到有效控制和治理,城市非点源污染成为当前城市水体污染的主要问题<sup>[35]</sup>。城市降雨径流中含有大量从屋面和地表冲刷来的TSS、氮、磷、重金属等污染物,而绿色基础设施中的土壤和植物根系对其具有良好的吸附、过滤和截留作用<sup>[36]</sup>,植被的根系还能够吸收径流中氮磷等非点源污染物获得生长所需的营养元素<sup>[37]</sup>,对非点源污染具有明显的净化作用。因此,绿色基础设施的空间分布对城市非点源污染的控制具有重要意义<sup>[38]</sup>。

绿色基础设施对非点源污染消减能力的大小主要受其规模、植被类型和空间布局的影响。下沉式绿地对Cu、Zn、Pb的消减率能够达到95%以上,且不受植被类型的影响,但是对 $\text{NH}_4^+$ 、TP、COD的消减效果却受植被类型影响显著<sup>[39]</sup>。组合型绿色基础设施比单一型绿色基础设施对非点源污染的消减效果更明显,源头组合型比源头-末端组合型消减效果要好<sup>[15]</sup>。此外,绿色基础设施对非点源污染的削减率会随降雨时间的延长逐渐下降<sup>[36]</sup>,其原因在于随着降雨时间的延长绿色基础设施对降雨径流中非点源污染物的吸附和下渗作用逐渐达到饱和状态,导致非点源污染的消减能力随之降低。

### 2.3 调节区域微气候

绿色基础设施较灰色基础设施具有更好的雨水渗透和存储功能,能够将滞蓄的雨水蒸散发到大气中<sup>[28]</sup>。绿色基础设施的蒸发蒸腾过程能够有效吸收大气中的热量,且还具有一定的遮荫功能,在缓解城市热岛问题方面的作用显著。绿色基础设施中植被的遮荫作用能使墙面温度降低9℃,并能使空气温度降低1℃<sup>[40]</sup>。绿色基础设施通过蒸发蒸腾和遮荫作用降低城市温度,同时还有助于节约空调的使用能耗,从而减少温室气体排放,进一步缓解城市热岛效应。

绿色基础设施的降温能力主要受其空间布局和形状、植被类型结构的影响。从空间布局和形状来看,较大规模的集中绿地和环网状绿地比块状绿地降温效果更佳<sup>[41]</sup>。不同植被结构其降温效果也不相同,灌木-草坪结构蒸发蒸腾作用的降温效果最显著,是树木-灌木-草坪结构的1.85倍,是树木结构的2.93倍,是树木-灌木结构的4.27倍<sup>[42]</sup>。值得注意的是,绿地覆盖率只有达到20%时才会产生比较明显的降温效果,此时绿地与风的耦合关系会产生最大强度的热环境效应<sup>[43]</sup>。

绿色基础设施微气候的调节作用还体现在其固碳释氧和净化空气功能上,绿色植被不仅能够吸收大气中的二氧化碳并释放氧气,还能够从空气中吸附和降解特定的大气污染物<sup>[44]</sup>。绿色基础设施固碳释氧能力通过白天植被的光合作用实现,其规模、植被类型和生长状况都会对其固碳释氧和净化空气功能影响显著<sup>[45]</sup>。同时,绿色基础设施的形状也会对其空气净化功能产生影响,且疏透型绿地较密集型绿地净化效果更佳<sup>[46]</sup>。

## 3 绿色基础设施的主要社会功能

### 3.1 居民健康与福祉

绿色基础设施对城市居民健康与福祉影响深远,不仅能产生调蓄雨洪、净化水质、降温增湿、固碳释氧等生态环境改善效应,更能为城市居民提供休闲游憩和健身场所,有助于提高居民身体和心理健康水平,是维系城市可持续发展和居民健康福祉的重要保障。公园环境优美、空气质量好、游憩设施多、占地规模大,比步行道和社区更容易激发人们去健身的意愿,因此大多数学者都是选取公园作为其研究对象。公园能够为公众提供健身场所,有效降低死亡率和患慢性病的风险<sup>[48]</sup>。城市中的绿地尤其是城市森林能够提供树荫和降低一定区域范围内的温度,有助于减少城市居民患热疾病的风险<sup>[48]</sup>。公园能够为公众提供休闲游憩场所,经常去公园有助于增强自尊心和幸福感,去公园次数较多的大人和小孩明显比去公园次数较少的更加活泼开朗<sup>[49-50]</sup>。通过接触公园的动植物,在喧嚣的城市中回归自然<sup>[51-52]</sup>,有助于缓解压力、稳定情绪,对居民心理健康具有积极影响。

绿色基础设施的供给量是衡量居民福祉的重要指标,其供给标准主要受城市规模、绿地资源和社会经济发展水平的影响<sup>[53]</sup>。当前各个国家的衡量标准主要采用城市居住区到公园的距离和人均公园绿地面积两个指标。欧美等发达国家的绿地供给标准为居住区到公园的距离,如欧洲为15min可达,美国是10min可达,英

国则是 300m 内不少于 200 m<sup>2</sup>, 2km 内不少于 2000 m<sup>2</sup>, 5km 内不少于 10000 m<sup>2</sup>, 10km 内不少于 50000 m<sup>2</sup><sup>[54]</sup>。我国城市绿地供给标准为人均公园绿地面积, 城市各城区标准不得少于 5m<sup>2</sup>/人, 其中, 人均建设用地 ≤80 m<sup>2</sup>、80—100 m<sup>2</sup>、≥100 m<sup>2</sup> 的城市人均公园绿地面积分别不得少于 7.5 m<sup>2</sup>/人、8 m<sup>2</sup>/人、7.5 m<sup>2</sup>/人<sup>[55]</sup>。从我国绿色基础设施的供给情况来看, 社会经济发展水平高的大城市绿地供给高于社会经济发展水平低的中小城市, 呈现“大城市>中等城市>小城市”的分布规律<sup>[56]</sup>。

绿色基础设施对居民健康与福祉的影响主要与绿色基础设施的类型、规模和空间分布等因素有关。绿色基础设施的类型具有多样性, 并且在规模、质量、组织娱乐活动的实用性、实际或潜在用户对其安全性看法等方面存在差异<sup>[57]</sup>。基于绿地供给量的衡量标准涉及公园面积和距离两个因素, 绝大多数学者都是从公园的影响范围和使用情况展开研究。通常将公园使用情况归因于社会文化因素(如经济条件、文化偏好)和空间因素(如旅游距离、景点分布特征)<sup>[49]</sup>。公园周围居民的文化偏好和公园特征相背离会导致公园闲置<sup>[58-59]</sup>。绿色基础设施覆盖率的增加有助于提高可达性, 但二者之间并非完全正相关, 覆盖率相同的情况下, 斑块密度越高的区域其可达性也越大<sup>[60-61]</sup>。大量分散式布局的小型绿色基础设施能够有效提高基于可达性标准的居民健康与福祉<sup>[62]</sup>。绿色基础设施的规模和分布格局还应与其服务半径区域的人口规模相匹配, 如果服务半径区域人口超负荷, 不仅会导致人均公园绿地面积水平低下, 还会产生潜在的公园空间拥堵问题, 居民有可能会放弃去公园健身和游憩<sup>[63]</sup>。

### 3.2 空间布局公平性

随着人们逐渐意识到城市绿色基础设施对公众健康的重要性, 其空间布局的不均衡成为环境公平性方面的热点问题<sup>[64-65]</sup>。影响城市绿地空间布局的因素繁多, 主要包括设计者的设计理念、城市土地开发史、休闲娱乐观念、阶级和种族不平等、政府决策等<sup>[59, 66]</sup>。城市绿色基础设施空间布局的不公平性往往与居民收入水平显著相关。高收入居民所享有的绿色基础设施在数量、规模、质量和可达性上要优于低收入居民<sup>[67]</sup>, 进一步导致高收入群体去公园健身、休闲和游憩的时间和次数比低收入群体多。此外, 从绿色基础设施改进维护费用的支付意愿和可承受的支付额度来看, 高收入居民必然高于低收入居民, 从而加剧了绿色基础设施空间布局在规模和质量方面的不公平性。

近年来, 基于形态空间格局分析(MSPA)的景观连通性成为绿色基础设施空间布局的热点问题, 在识别景观关键连接点、网络连通障碍点方面成效显著<sup>[10-11, 68]</sup>。连通性是有效解决绿色基础设施空间布局公平性的重要途径之一, 英国的绿色空间大多是多种功能特征的绿色廊道网络交织布局<sup>[69]</sup>, 这种类型的布局在有效提高连通性的同时, 也极大地提高了可达性。但目前对绿色基础设施连通性与公平性相结合的研究相对较少。绿色基础设施的公平性还应该从规模的适度性方面展开研究。当前绿色基础设施规模方面的研究主要集中在空间格局及其演变过程、绿地公园人均面积的公平性, 对绿色基础设施规模边际效应研究较少<sup>[70]</sup>。忽视边际效益, 会导致绿色基础设施的实施配置时产生规模不经济问题, 影响其成本效益。

对于城市建成区土地资源的有限性和收入差距带来的绿色基础设施空间布局的不公平性问题, 只有在绿色基础设施较少的低收入者居住区域建设更多的绿色基础设施才能逐步实现布局的公平性。但是由于受市场调节机制的影响, 在贫困社区建设绿色基础设施的意愿要低于高档社区<sup>[71]</sup>。因此, 政府部门应充分发挥宏观调控作用, 在规划过程中应充分考虑绿色基础设施空间分布的公平性和连通性, 通过识别居住区、绿色基础设施及其相互之间的关键连接点和连接廊道, 确定绿色基础设施空间布局的优先顺序。设计师和相关部门还应充分认识到城市人口与土地的矛盾和绿色基础设施的规模效应, 在“适量绿色”理念的指导下, 加大对现有灰绿设施(如黑臭水体、垃圾河畔、废弃场所、硬质路面、老旧社区)的改造力度, 积极呼吁公众参与到改造工作中, 有效解决绿色基础设施空间布局的公平性问题<sup>[72]</sup>。

## 4 生态与社会功能的供需结构

绿色基础设施对维系城市可持续发展和促进城市健康发展具有重要作用, 并主要通过调节生态和社会两

方面来实现<sup>[73]</sup>。通常情况下,绿色基础设施的服务功能会随其规模的增加而增加,但是局部绿色基础设施供给和需求配置的不均衡,往往会产生局部服务功能剩余或不足问题<sup>[1]</sup>。因此,供需结构的合理配置也是决定绿色基础设施服务水平的关键因素。

绿色基础设施社会功能供需结构问题主要是由于不同区域间的供给和需求不均衡造成的。目前的研究主要从覆盖率、密度、规模、人均绿地面积、可达性、服务半径和服务人数等指标来探寻绿色基础设施的供需状态。大城市的中心城区普遍存在供需结构不合理问题。基于生态功能的绿色基础设施供需结构的布局应综合考虑时空因素的影响,绿色基础设施的生态功能在时间和空间上具有一定的差异性和异质性<sup>[74]</sup>,使得生态功能的供给和需求之间存在一定的时空滞后性<sup>[17]</sup>。如河流上游或山坡的植被缓冲带具有消减雨洪峰值、延缓降雨径流流速、减少非点源污染的生态功能。从整个流域或区域角度来看,上游的绿色基础设施能够一定程度上满足下游对绿色基础设施的需求。此外,绿色基础设施的生态功能还受其空间分布的影响。流域源头绿色基础设施的分布格局和基质能够影响其下渗功能,流域中段绿色基础设施网络连通性能够影响其传输调蓄功能,流域末端绿色基础设施(如洼地、湿地、雨水花园等)能够影响其雨水收集功能<sup>[75]</sup>。因此,对绿色基础设施供需结构的研究应将其作为一个时间上连续、空间上连通的整体,打破时间和空间范畴的局限性,构建全过程、全流域管理模式。综合平衡降雨全过程雨洪消减需求量和全流域绿色基础设施调蓄降雨径流的供给量,着重研究上游或坡顶、中段、末端在供给和需求之间的补给关系,探索基于投入产出效益最大化的供需均衡布局。

## 5 问题与展望

### 5.1 存在的问题

#### (1) 绿色基础设施功能的定量研究不足

由于绿色基础设施具有多种生态功能和社会功能,且绿色基础设施的规模、种类、空间布局、连通性等因素都能影响其功能的效果。目前大部分的研究主要局限于绿色基础设施某一特定功能的测度,对其综合生态环境效应的定量评估相对较少。

#### (2) 绿色基础设施供需结构的研究不够深入

目前绿色基础设施供需结构的研究主要侧重于针对单一功能研究单方面的供给或需求,对绿色基础设施所具有的多种功能综合供需结构以及增强连通性能够带来的潜在供给与现实需求之间的关系方面研究不够深入。

#### (3) 绿色基础设施的发展难以满足快速城市化的需求

我国的快速城市化过程产生了很多生态环境问题,而目前城市中绿色基础设施的“质”、“量”和空间布局都难以满足城市发展的需求。城市中老旧小区绿色基础设施面积普遍不足,新建小区虽然在规划中有绿地率指标的约束,但仍然存在种类单一、布局不合理等问题。在宏观尺度上也缺乏相应的科学研究来指导区域的国土空间规划,亟需多学科的交叉融合,共同促进区域可持续发展和生态文明建设。

### 5.2 研究展望

#### (1) 加强与相关学科的交叉融合

多学科交叉融合是现在科学研究的发展方向,绿色基础设施的研究需要与生态学、流行病学、城市规划、环境经济学等学科进行交叉融合,加强气候变化、环境保护、人类健康与福祉、空间规划、生态系统服务价值等方面的研究。随着我国碳达峰碳中和目标的确定,需要加强对绿色基础设施固碳释氧、节能减排、缓解热岛效应等缓解气候变化方面的研究。绿色基础设施的当前研究主要集中在改善环境的生态功能方面,但随着“以人为本”理念和城市生态文明建设的不断深入,越来越多的学者把人作为研究主体,强调人的健康和福祉,研究绿色基础设施对居民和社会的影响。生态系统服务价值的研究能够为区域生态系统建设和社会经济协调发展提供理论依据和实践参考,也是践行“绿水青山就是金山银山”的具体举措。



## (2) 完善绿色基础设施功能的测度与评估方法

由于绿色基础设施的类型很多,且每种类型的还包含植被、土壤、空间分布等多个要素,这就造成了难以评估和对比具体措施的功能及效果。未来研究需要利用实验和观测的方法,对不同种类绿色基础设施制定切实可行的功能测度与评估方法。将绿色基础设施的功能进行量化,有利于实际规划和工程中的应用和推广。

## (3) 注重区域绿色基础设施供需关系的研究

绿色基础设施的供需关系直接影响到其功能实现的效果,并且在不同尺度下,供需关系存在不一致的情况。未来应注重对区域绿色基础设施不同功能供需结构的研究,识别生态功能失调区域,关注居民福祉与绿色基础设施的布局公平性问题。

## (4) 绿色基础设施建设与实际规划相结合

绿色基础设施的建设要规划先行,与区域的实际规划相结合。特别是将绿色基础设施规划融入到国土空间规划中,既要统筹考虑区域生态安全格局,又要兼顾具体生态环境问题。目前实际规划中一般只用绿地率这一单一指标来约束,并且未考虑绿色基础设施的类型、质量和景观格局,缺乏对绿色基础设施的生态功能和社会功能的评估。未来应将绿色基础设施的功能测度与评估、供需关系等研究成果应用到实际规划中,指导城市绿地系统的布局。同时,绿色基础设施建设应考虑不同地区的地域特色,因地制宜,还应注意城乡绿色基础设施建设的差异化,满足不同居民的需求。

## 参考文献 (References):

- [1] 吴晓,周忠学.城市绿色基础设施生态系统服务供给与需求的空间关系——以西安市为例.生态学报,2019,39(24):9211-9221.
- [2] 姜允芳,刘滨谊,刘颂,王丽洁.国外市域绿地系统分类研究的述评.城市规划学刊,2007,(6):109-114.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 陈晨,徐威杰,张彦,周滨,柴曼,刘晗,冯宇.独流减河流域绿色基础设施空间格局与景观连通性分析的尺度效应.环境科学研究,2019,32(9):1464-1474.
- [7] 邵大伟,刘志强,王俊帝.国外绿色基础设施研究进展述评及其启示.规划师,2016,32(12):5-11.
- [8] 何卫华,车伍,杨正,李世奇,吕放放.城市绿色道路及雨洪控制利用策略研究.给水排水,2012,38(9):42-47.
- [9] 魏家星,宋轶,王云才,象伟宁.基于空间优先级的快速城市化地区绿色基础设施网络构建——以南京市浦口区为例.生态学报,2019,39(4):1178-1188.
- [10] 于亚平,尹海伟,孔繁花,王晶晶,徐文彬.基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析.生态学杂志,2016,35(6):1608-1616.
- [11] 吴银鹏,王倩娜,罗言云.基于 MSPA 的成都市绿色基础设施网络结构特征研究.西北林学院学报,2017,32(4):260-265.
- [12] 于亚平,尹海伟,孔繁花,王晶晶,徐文彬.南京市绿色基础设施网络格局与连通性分析的尺度效应.应用生态学报,2016,27(7):2119-2127.
- [13] 林鸿煜,钱晶,严力蛟,黄绍荣.基于形态学空间格局分析与 CA-Markov 模型的武义县绿色基础设施时空格局变化及情景模拟.浙江农业学报,2019,31(7):1193-1204.
- [14] 胡玥,蔡永立.城市公园社会服务空间公平性的定量分析——以上海市中心城区为例.华东师范大学学报:自然科学版,2017,(1):91-103,112-112.
- [15] 栾博,殷瑞雪,徐鹏,翟生强,王鑫,唐孝炎.基于绿色基础设施的城市非点源污染控制研究.中国环境科学,2019,39(4):1705-1714.
- [16] 王云才,申佳可,彭震伟,象伟宁.适应城市增长的绿色基础设施生态系统服务优化.中国园林,2018,34(10):45-49.
- [17] 颜文涛,黄欣,王云才.绿色基础设施的洪水调节服务供需测度研究进展.生态学报,2019,39(4):1165-1177.
- [18] 陈彦熹,李旭东,刘建华,刘小芳,赵坤,马旭升.建筑小区绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统的构建模式.中国给水排水,2018,34(17):134-138.
- [19] 刘文,陈卫平,彭驰.社区尺度绿色基础设施暴雨径流消减模拟研究.生态学报,2016,36(6):1686-1697.
- [20] 陈彦熹.绿色建筑小区年径流总量控制能力研究.中国给水排水,2017,33(17):130-134.
- [21] 孟永刚,王向阳.应用绿色雨水基础设施构建创新的雨水景观.生态经济,2015,31(2):192-196.
- [22] 杨锐,王丽蓉.雨水花园:雨水利用的景观策略.城市问题,2011,(12):51-55.

- [23] Ali M, Khan S J, Aslam I, Khan Z. Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102(4): 271-279.
- [24] 汪慧贞, 李宪法. 北京城区雨水入渗设施的计算方法. *中国给水排水*, 2001, 17(11): 37-39.
- [25] 刘志雨. 城市暴雨径流变化成因分析及有关问题探讨. *水文*, 2009, 29(3): 55-58.
- [26] 殷社芳. 北京城市雨洪利用若干问题的探讨. *北京水务*, 2009, (S1): 77-79.
- [27] Li C Y. Ecohydrology and good urban design for urban storm water-logging in Beijing, China. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2012, 12(4): 287-300.
- [28] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 293-301.
- [29] 郭雪莲, 许嘉巍, 吕宪国. 城市典型下垫面空间构型对降水蓄渗率的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 60-62, 66.
- [30] Fiener P, Auerswald K, Van Oost K. Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments—A review. *Earth-Science Reviews*, 2011, 106(1/2): 92-104.
- [31] 霍锐, 卢奕芸, 邓力文. 基于 SWMM 情景模拟的北京市公园绿地集雨型改造探索. *工业建筑*, 2019, 49(6): 204-209.
- [32] 马姗姗, 庄宝玉, 张新波, 彭森. 绿色屋顶与下凹式绿地串联对洪峰的削减效应分析. *中国给水排水*, 2014, 30(3): 101-105.
- [33] 车伍, 唐磊. 中国城市合流制改造及溢流污染控制策略研究. *给水排水*, 2012, 48(3): 1-5.
- [34] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 孔玲莉. 城市降水径流的污染来源与排放特征研究进展. *水科学进展*, 2006, 17(2): 288-294.
- [35] 李春林, 胡远满, 刘森, 徐岩岩, 孙风云. 城市非点源污染研究进展. *生态学杂志*, 2013, 32(2): 492-500.
- [36] 杨清海, 吕淑华, 李秀艳, 黄民生, 杨凯. 城市绿地对雨水径流污染物的削减作用. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2008, (2): 41-47.
- [37] Deletic A. Sediment transport in urban runoff over grassed areas. *Journal of Hydrology*, 2005, 301(1/4): 108-122.
- [38] Giri S, Qiu Z Y. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: a review. *Journal of Environmental Management*, 2016, 173: 41-48.
- [39] 李畅, 王思思, Fang X, 袁冬海, 李海燕. 下沉式绿地对雨水径流污染物的削减效果及影响因素分析. *科学技术与工程*, 2018, 18(11): 215-224.
- [40] Berry R, Livesley S J, Aye L. Tree canopy shade impacts on solar irradiance received by building walls and their surface temperature. *Building and Environment*, 2013, 69: 91-100.
- [41] 姜允芳, 李悦, 石铁矛, 韩雪梅. 城市住区热环境效果模拟与生态节能性研究. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2018, 34(6): 1145-1152.
- [42] Zhang B, Xie G D, Gao J X, Yang Y. The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: a case study in Beijing, China. *Building and Environment*, 2014, 76: 37-43.
- [43] 王桂芹, 郑伯红, 余翰武. 基于计算流体力学数值模拟的绿地空间布局热环境效应研究. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(6): 1519-1526.
- [44] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 4(3/4): 115-123.
- [45] 齐建东, 黄金泽, 贾昕. 基于 XGBoost-ANN 的城市绿地净碳交换模拟与特征响应. *农业机械学报*, 2019, 50(5): 269-278.
- [46] 丁文, 贾忠奎, 席本野, 施侃侃, 施晓灯. 道路绿地对 PM<sub>2.5</sub> 等颗粒物的作用效果及影响机制. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2018, 47(6): 729-735.
- [47] Hartig T. Green space, psychological restoration, and health inequality. *The Lancet*, 2008, 372(9650): 1614-1615.
- [48] Cummins S K, Jackson R J. The built environment and children's health. *Pediatric Clinics of North America*, 2001, 48(5): 1241-1252.
- [49] Joassart-Marcelli P, Wolch J, Salim Z. Building the healthy city: the role of nonprofits in creating active urban parks. *Urban Geography*, 2011, 32(5): 682-711.
- [50] Timperio A, Salmon J, Telford A, Crawford D. Perceptions of local neighbourhood environments and their relationship to childhood overweight and obesity. *International Journal of Obesity*, 2005, 29(2): 170-175.
- [51] Fuller R A, Irvine K N, Devine-Wright P, Warren P H, Gaston K J. Psychological benefits of greenspace increase with biodiversity. *Biology Letters*, 2007, 3(4): 390-394.
- [52] Kaplan S, Kaplan R. Health, supportive environments, and the reasonable person model. *American Journal of Public Health*, 2003, 93(9): 1484-1489.
- [53] 屠星月, 黄甘霖, 邬建国. 城市绿地可达性和居民福祉关系研究综述. *生态学报*, 2019, 39(2): 421-431.
- [54] Stanners D, Bourdeau P. Europe's environment: the dobris assesment. *Copenhagen European Environment Agency*, 1995, 21(1): 146-171.
- [55] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于印发《国家园林城市申报与评审办法》、《国家园林城市标准》的通知. (2013-10-08) [2021-06-08]. [http://xxgk.beihai.gov.cn/bhsylglj/zcfgzl\\_86408/zcfg\\_88705/201010/t20101008\\_1429004.html](http://xxgk.beihai.gov.cn/bhsylglj/zcfgzl_86408/zcfg_88705/201010/t20101008_1429004.html).



- [56] 周筱雅, 刘志强, 王俊帝. 中国市域人均公园绿地面积时空演变特征. 规划师, 2018, 34(6): 105-111.
- [57] Wolch J R, Byrne J, Newell J P. Urban green space, public health, and environmental justice: the challenge of making cities 'just green enough'. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 234-244.
- [58] Stodolska M, Shinew K J, Acevedo J C, Izenstark D. Perceptions of urban parks as havens and contested terrains by mexican-americans in chicago neighborhoods. *Leisure Sciences*, 2011, 33(2): 103-126.
- [59] Byrne J. When green is White: the cultural politics of race, nature and social exclusion in a Los Angeles urban national park. *Geoforum*, 2012, 43(3): 595-611.
- [60] De Clercq E M, De Wulf R, Van Herzele A. Relating spatial pattern of forest cover to accessibility. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(1/2): 14-22.
- [61] Yu Z L, Wang Y H, Deng J S, Shen Z Q, Wang K, Zhu J X, Gan M Y. Dynamics of hierarchical urban green space patches and implications for management policy. *Sensors*, 2017, 17(6): 1304.
- [62] Peschardt K K, Schipperijn J, Stigsdottir U K. Use of small public urban green spaces (SPUGS). *Urban Forestry & Urban Greening*, 2012, 11(3): 235-244.
- [63] Sister C, Wolch J, Wilson J. Got green? Addressing environmental justice in park provision. *GeoJournal*, 2010, 75(3): 229-248.
- [64] Dai D J. Racial/ethnic and socioeconomic disparities in urban green space accessibility: where to intervene? *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102(4): 234-244.
- [65] Jennings V, Gaither C J, Gragg R S. Promoting environmental justice through urban green space access: a synopsis. *Environmental Justice*, 2012, 5(1): 1-7.
- [66] Byrne J, Wolch J. Nature, race, and parks: past research and future directions for geographic research. *Progress in Human Geography*, 2009, 33(6): 743-765.
- [67] Heynen N, Perkins H A, Roy P. The political ecology of uneven urban green space: the impact of political economy on race and ethnicity in producing environmental inequality in milwaukee. *Urban Affairs Review*, 2006, 42(1): 3-25.
- [68] 刘佳, 尹海伟, 孔繁花, 李沐寒. 基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化. 生态学报, 2018, 38(12): 4363-4372.
- [69] 姜允芳, 石铁矛, 赵淑红. 英国区域绿色空间控制管理的发展与启示. 城市规划, 2015, 39(6): 79-89.
- [70] 黄永明, 陈宏. 基础设施结构、空间溢出与绿色全要素生产率——中国的经验证据. 华东理工大学学报: 社会科学版, 2018, 33(3): 56-64.
- [71] 西奥多·赵·林, 殷一鸣. 基于绿色基础设施的城市社区复兴——以华盛顿特区为例. 国际城市规划, 2018, 33(3): 23-31.
- [72] Curran W, Hamilton T. Just green enough: contesting environmental gentrification in Greenpoint, Brooklyn. *Local Environment*, 2012, 17(9): 1027-1042.
- [73] 王进, 陈爽, 姚士谋. 城市规划建设的绿地功能应用研究新思路. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6): 99-103.
- [74] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [75] 张云路, 李雄, 邵明, 汤林子. 基于城市绿地系统优化的绿地雨洪管理规划研究——以通辽市为例. 城市发展研究, 2018, 25(1): 97-102.