

王敏, 宋昊洋. 影响碳中和的城市绿地空间特征与精细化管控实施框架 [J]. 风景园林, 2022, 29 (5) : 17-23.

影响碳中和的城市绿地空间特征与精细化管控实施框架

Spatial Characteristics and Implementation Framework for Fine Control of Urban Green Space Affecting Carbon Neutrality

王敏 宋昊洋

WANG Min, SONG Haoyang

开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)



中图分类号: TU985

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2022) 05-0017-07

DOI: 10.14085/j.fjyl.2022.05.0017.07

收稿日期: 2022-01-10

修回日期: 2022-03-17

王敏 / 女 / 博士 / 同济大学建筑与城市规划学院景观学系副主任、副教授、博士生导师 / 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室水绿生态智能分实验中心联合创始人 / 研究方向为蓝绿空间生态系统服务、城市绿地与生态规划设计、韧性景观与城市可持续
WANG Min, Ph.D., is deputy director of, and associate professor and doctoral supervisor in the Department of Landscape Architecture, College of Architecture and Urban Planning (CAUP), Tongji University, and a co-founder of Eco-SMART LAB attached to Key Laboratory of Ecology and Energy-saving Study of Dense Habitat (Tongji University), Ministry of Education. Her research focuses on ecosystem services for blue and green spaces, ecological planning and design of urban green spaces, and resilient landscape and urban sustainability.

宋昊洋 / 女 / 同济大学建筑与城市规划学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计
SONG Haoyang is a master student in the College of Architecture and Urban Planning (CAUP), Tongji University. Her research focuses on landscape planning and design.

摘要: 城市绿地具有增碳汇、减碳排的双重生态效益, 被认为是推动城市实现“双碳”目标的重要自然途径。在城市高密度建设与存量发展背景下, 推进城市绿地空间精细化管控是自然维度下拓展碳中和实践路径、提升城市整体碳中和绩效的重要着力点。基于相关文献, 梳理并提出固碳增汇、降温减排、绿色慢行 3 个路径, 讨论了城市绿地空间特征与碳中和的关联影响机制, 并从总体规模特征、分布格局特征、几何形态特征、植物配置特征、场地使用特征 5 个维度厘清了城市绿地影响碳中和的关键空间特征和实证变量指标。按照“系统化分级统筹、差异化分区定标、多维度精准增效”的思路, 提出面向碳中和高效配置绿地空间资源的精细化管控指标和实施框架, 以期为绿地碳中和效能提升的后续深化研究与城市绿地空间精细化管控提供参考和建议。

关键词: 风景园林; 城市绿地; 碳中和; 绿色碳汇; 碳排放; 空间特征; 规划管控

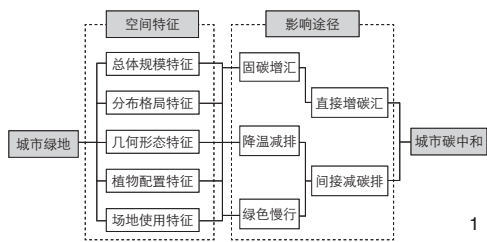
基金项目: 国家自然科学基金 (编号 52178053)

Abstract: Urban green space has the dual ecological benefits of increasing carbon sink and reducing carbon emission, and is widely regarded as an important natural way to promote cities to achieve carbon peaking and carbon neutrality goals. In the context of high-density urban construction and stock development, promoting the fine control of urban green space is an important focus point to expand the paths for carbon-neutral practice and improve the overall carbon-neutral performance of cities. Based on relevant literature, this research sorts and puts forward three paths of carbon sequestration and sink increase, temperature and emission reduction, and green slow traffic, discusses the mechanism for correlative influence of spatial characteristics of urban green space and carbon neutrality, and clarifies the key spatial characteristics and empirical variable indicators of urban green space affecting carbon neutrality from the following five dimensions: overall scale characteristics, distribution pattern characteristics, geometric morphological characteristics, plant configuration characteristics, and site use characteristics. In addition, the research also, following the idea of "systematic and hierarchical coordination, differentiated zoning and precise multi-dimensional efficiency improvement", proposes the indicators and implementation framework for fine control conducive to the efficient allocation of green spatial resources targeting carbon neutrality, with a view to providing references and suggestions for subsequent researches on the improvement of carbon-neutral efficiency of green space, and for the fine control of urban green space.

Keywords: landscape architecture; urban green space; carbon neutrality; green carbon sink; carbon emission; spatial characteristics; planning and control

Fund Item: The National Natural Science Fund of China (No. 52178053)

在快速城镇化进程中, 经济社会高速发展、列重大环境和社会问题。实现碳中和已成为全球应对气候变化的共识^[1-2]。2020年9月, 中国正式宣布二氧化碳排放力争于2030年前达到



1 城市绿地空间特征对于碳中和的影响路径
Paths for spatial characteristics of urban green space affecting carbon neutrality

峰值，努力争取在 2060 年前实现碳中和的目标^[1]。作为一场广泛且深刻的系统性变革，碳中和目标的实现需要从节能减排、固碳增汇 2 个方面发力，在减少能源消耗、降低碳排放的同时，提升生态系统碳汇效能，推动社会发展全面向低碳转型^[4-6]。

城市是人类活动的主要空间载体，是高耗能和高碳排放的集中地^[7]。城市绿地作为城市中的唯一近自然生态空间，对于维持碳平衡、提升生态系统服务等方面具有重要作用^[8]。因此，虽然城市绿地在建造施工和管理养护过程中存在一定的碳排放^[9]，但仍被认为是城市增碳汇、减碳排的重要自然途径^[10]。一方面，其直接效益为固碳释氧。联合国环境规划署（United Nations Environment Programme, UNEP）和世界自然保护联盟（International Union for Conservation of Nature, IUCN）指出，基于自然的解决方案（Nature-based Solution, NbS）通过提升生态系统的碳汇能力，在 2030 年前可实现每年二氧化碳减排量和清除量共 50 亿 t，保守估计到 2050 年可实现 100 亿 t^[11]。另一方面，绿地通过缓解城市热岛效应降低建筑能耗间接降低碳排放^[12]，并通过对居民出行方式的积极影响降低城市交通能耗，一定程度上降低碳排放^[13]。此外，绿地的自然教育功能可帮助居民在休闲游憩的同时了解到更多实现低碳的方式，对实现碳中和同样具有促进作用^[8]。梳理已有研究，除绿地的自然教育功能较少从空间特征角度进行研究外，其余路径均与绿地的规模、布局、类别等密切相关，是研究的重点。但是当前研究多基于定性分析视角，缺乏在多路径体系下对城市绿地影响碳中和的定量认知

和系统整合，无法揭示绿地空间特征及其碳中和和作用机制之间的复杂交互关系。

当前中国经济社会发展步入新常态，城镇化正处于快速发展向高质量发展的历史转型时期。在绿色低碳和用地集约的规划发展思路下，以“盘活存量、做优增量”为导向的城市绿地空间新一轮更新发展，逐渐转向精细化规划管理调控和高效生态空间营造。这促使城市绿地建设思路由重“量”不重“质”的粗放型建构转向增“量”提“质”并重的精明型优化^[14]，不再只关注单一的规模指标，而是更多强调绿地空间精准落位，资源精准增效，并在宏、中、微多个层级共同引导不同类型绿地空间的布局调整和功能完善^[15]。与发展日益成熟的城市建设空间发展管控技术相比，中国城市绿地空间的规划和管理指标控制在精细化、多元化、体系化方面远远滞后于当前绿地空间高效发展的需求。因此，有必要探讨绿地空间特征对碳中和效能的多影响路径和多维表征，构建“双碳”目标导向下城市绿地精细化管控框架。

基于此，笔者构建了城市绿地空间特征对于碳中和的影响路径研究框架（图 1）。首先基于中国知网和 Web of Science (WoS) 2 个主要的中外文献数据库，以“城市绿地”“碳中和”“碳汇”“碳排”“热岛效应”“绿色出行”“urban green space”“carbon neutrality”“carbon sink”“carbon emission”“heat island”“walkability”作为主要关键词进行文献搜索和筛选。经进一步文献梳理，研究归纳总结了固碳增汇、降温减排、绿色慢行三大影响路径，从研究方法、尺度范畴、指标选取方面梳理辨析了绿地空间在总体规模、分布格局、几何形态、植物配置、场地使用 5 个方面的特征及其对碳中和效益的影响机制。随后，基于空间规划体系，提出可后续深入拓展优化的城市绿地精细化管控框架，以期在碳中和目标下高效绿地空间营造提供深化研究思路，为城市绿地精细化规划管控提供参考建议，在自然维度下拓展城市碳中和的实践路径。

1 城市绿地对碳中和的影响路径研究

基于相关文献梳理，研究总结出目前城

市绿地对于城市碳中和的积极影响主要体现在 3 个方面，即通过植物光合作用直接提高绿色碳汇，通过改善城市微气候间接降低建筑碳排放，以及通过影响人群出行模式间接降低交通碳排放^[16]，可归纳为固碳增汇、降温减排和绿色慢行 3 个影响路径。

1.1 固碳增汇

《联合国气候变化框架公约》将碳汇（carbon sink）定义为“从大气中去除二氧化碳的过程、活动或机制”^[17]。其中，绿色碳汇是通过植物光合作用释放氧气，吸收大气中的二氧化碳并将其固定在植被和土壤中，从而减少大气中二氧化碳浓度的过程、活动或机制^[18-19]。绿地是城市生态系统的重要载体，生物群落在不同时间尺度下大量吸收二氧化碳并储存转化为有机物，成为绿地影响碳中和的最直接途径^[20-21]，主要包括 2 种方式^[22]：1) 植物通过叶片的光合作用固定二氧化碳、积累净碳量；2) 城市绿地范围内的土壤，依托植物光合作用、分解作用等，以有机物和无机物的形式储存碳，形成土壤碳库。对于城市绿地碳汇的研究，多以碳储量、碳密度等表征绿色碳汇能力，其中碳密度是指经过植物、土壤和大气中连续的碳交换后，植物叶片、木质部分和土壤养分单位面积上的碳存储量，反映了绿地空间的林分质量与植被、土壤的生物学特性相关，并受人为活动干扰程度和绿地维护管理水平影响^[23]。相关研究表明，受气孔导度、叶面温度、胞间二氧化碳浓度等生物学特征的影响，在不同生命周期阶段中，不同类型的植物的单位叶面积光合量呈现一定差异^[24-25]。在人为活动的干扰下，土壤层次结构、温度、湿度等也会显著影响微生物分解枯枝落叶的活性^[26-27]。而碳储量则是指植物和土壤的碳储存总量，与地下生物量、地上生物量、枯落物和土壤有机质碳库等密切相关^[28]，反映了绿地碳库的大小。

1.2 降温减排

城市绿地能够有效缓解城市热岛、降低城市能耗，从而实现间接减排。联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）的研究报告显示，能源消耗是城市主要的碳排放领域，而

热岛效应是影响能耗的重要因素^[29]。尤其在夏季，气温升高会导致城市耗电量大幅提升，促使温室气体排放增加，加剧热岛效应和能源消耗^[30]。因此，减缓热岛效应是实现城市碳中和的重要途径。梁益同等^[31]的研究表明，绿地能降低一定范围内的环境气温，有效缓解城市热岛效应，植被覆盖率每提高10%，热岛强度约下降1.1℃。在微观尺度下，绿地植被一方面可通过树冠遮挡阳光减少地面吸收的热量，另一方面通过蒸腾作用，水经过叶片的气孔和角质层以气态形式散发到空气中，吸收周围环境中的热量进而降低温度、增加湿度，提高城市环境舒适度^[32-35]。受物种生态学特征的影响，不同植物的单位叶面积日蒸腾量存在差异，对周围的降温增湿作用强度也不同^[25]。在宏观尺度下，可通过构建通风廊道，优化城市风环境，促进城市绿地格局优化，进而缓解城市热岛效应^[36]。对于绿地降温减排效能的量化评估，有研究已借助定量计算证实了城市微气候能显著减少建筑能耗^[37]。基于此，王敏等^[12]结合城市绿地降温幅度与居民用电量估算，在街区尺度量化并测算出2015年上海市黄浦区城市绿地的减排效能可在0~55.12 t/hm²；张彪等^[38]计算出2017年上海城市绿地可节约夏季空调能耗的经济价值为14.57亿元。

1.3 绿色慢行

交通碳排放约占全球碳排放25%，促进交通减排是高密度城市碳减排的重点领域，可从降低交通运输需求、优化交通运输方式、提升交通运输技术和管理水平等方面实现^[19]。借助绿地系统形成完善的慢行网络，可有效促进居民绿色慢行，提升城市低碳交通方式比重^[39]，降低交通碳排放总量，实现绿地间接减少碳排放。一方面，有研究聚焦于增强城市林荫街道的可步行性^[40-43]，强调绿地空间对于人步行出行的引导能力，其核心包含了出发地和目的地之间的空间临近性，及其两点之间步行的便捷舒适性^[44-45]。即引导居民绿色慢行不仅要在宏观层面提升城市绿地网络连通性，提升步行网络便捷性，还要在微观层面优化步行空间的绿化界面，舒缓居民身心压力，提升他们的步行游憩感受^[13, 46-48]。另一方面，绿地作

表1 影响碳中和的绿地空间特征
Tab. 1 Spatial characteristics of green space affecting carbon neutrality

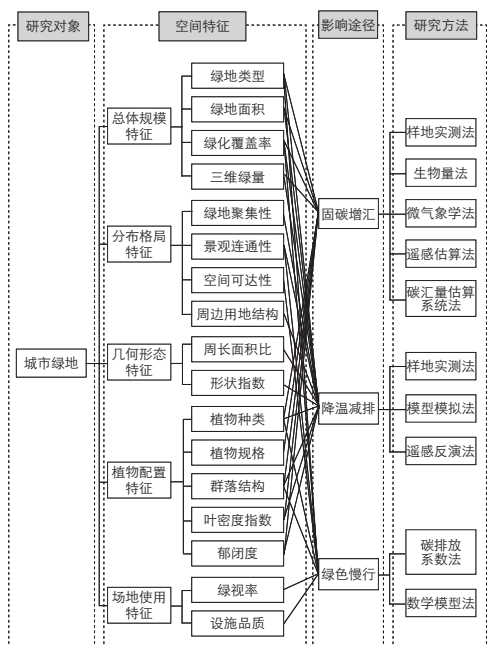
影响路径	绿地空间特征		
	特征分类	特征描述	特征指标
固碳增汇	总体规模特征	高绿量	绿地面积、绿地率、绿化覆盖率、三维绿量、归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)
	植物配置特征	以乔木、常绿阔叶、乡土植物为主	植物类型及其占比
		以中幼龄、大胸径的树木为主	植物规格
		乔-灌-草复合配置 高密度种植	植物群落结构 叶密度指数、郁闭度
分布格局特征	集中布局	绿地斑块密度、聚集度指数、连通性指数	
	建设用地比例低	周边用地类型	
降温减排	总体规模特征	规模面积大	绿地面积、绿地率、三维绿量
	几何形态特征	边界形态复杂/规则	绿地周长、周长面积比、形状指数
	植物配置特征	以乔木植物为主	植物类型及其占比
		乔-灌-草复合配置 高密度种植	植物群落结构 叶密度指数、郁闭度
分布格局特征	景观连通性高	整体连通性指数、可能连通性指数	
	空间可达性高	路网密度、联节点比率	
绿色慢行	总体规模特征	规模面积大	三维绿量、乔木覆盖率
	植物配置特征	乔-灌-草复合配置	植物群落结构
	场地使用特征	绿色感知良好 活动设施多样	绿视率 服务设施类型及评价

为重要的休闲游憩场所，其景观品质和服务设施的提升有利于引导居民积极开展体力活动，培养绿色生活方式^[49]。尤其是在大力推行社区生活圈建设、促进社会服务公平的背景下，在居民慢行可达的范围内进行城市公园绿地和其他小微绿地的合理布置以及品质优化^[50]，也是促进“双碳”目标实现的重要举措，有利于引导居民提升步行频次，扩大居民步行可达范围，降低居民对高碳排出行的需求。

2 不同路径下影响碳中和的城市绿地空间特征

基于上述研究可知，城市绿地空间特征与城市碳中和存在紧密联系^[51]。其中，固碳增汇为实现减少碳排放的最直接作用途径，而降温减排、绿色慢行则要借助改善热岛效应、提升城市低碳交通方式比重实现减排，是2个间接作用途径。关于后2种影响路径，现有研究较少以绿地为研究主体，运用定量方法探讨空间特征对碳排放的影响，而更多聚焦于建成环境^[52]，可借鉴意义不大。因此，在梳理影响碳中和的城市绿地空间特征

时，笔者选择从直接影响绿地增汇效能、降温效能和可步行性的视角切入，并从总体规模、分布格局、几何形态、植物配置、场地使用5个方面归纳城市绿地空间特征。其中，总体规模特征是绿地的量级指征，主要指的是一定区域内城市绿地覆盖面积的大小，是绿色生物量的基本指征；分布格局特征是指在宏观层面，不同类型绿地在城市空间中的整体结构特征和与城市建设用地的空间关系，影响了绿地的连通性、可达性和空间公平性；几何形态特征则主要基于景观格局指数对绿地空间的几何形态进行表征；植物配置特征主要包括绿地内部植物的种类、年龄、规格、群落特征等，多是从微观视角对绿地植物类型和群落结构进行三维表征；场地使用特征则是从使用者的感知体验出发，对绿地空间的设施品质、景观风貌等进行评价，以表征绿地空间对于居民身心健康的积极效应。总体来说，不同的绿地空间特征对于城市碳中和的影响机制在研究对象、尺度范畴、指标选取等方面存在一定差异，并通过一种或多种的影响路径发挥绿地的碳中和效益(表1, 图2)。



2 不同影响路径下的绿地空间特征及其研究方法
Spatial characteristics of green space under different influence paths and research methods thereof

2.1 促进固碳增汇的绿地空间特征

已有研究聚焦于绿地类型、植物群落、植物个体等不同层面上，明确指出城市绿地的总体规模特征和植物配置特征对其固碳增汇能力具有显著影响^[53]。

在总体规模特征方面，绿量对于植物生态调节功能具有重要作用，绿地面积和绿化覆盖率的增加可以有效增加城市碳汇总量^[54]；城市绿地在固碳时，受人为活动干扰产生一定的碳排放，固碳效应小于天然林地^[55]。Ren等^[56]基于样地实地测定，进行绿地参数和碳储量的回归分析，结合遥感数据获得区域内绿地系统碳汇量，指明了绿地碳储量和绿地面积、绿化覆盖率的正相关关系。已有研究进一步明确了在总体绿量的影响下不同绿地类型固碳能力的差异性，以休闲文体为主导功能的公园绿地碳汇能力要高于防护绿地和附属绿地^[57]。因此，越来越多的研究综合考虑叶密度指数和绿化三维体积，引入三维绿量、NDVI等作为表征绿地碳汇能力的重要指标。

在植物配置特征方面，研究多在中、微观尺度下，借助样地实测法、生物量法、微气象学法、碳汇量估算系统等方法，表明了

植物的类型、年龄、规格、群落结构等对其固碳能力有一定影响。一般来说，不同类型的植物碳汇能力差异较大^[58]，乔木远高于灌木、草本和藤本植物^[59-60]，阔叶林高于针叶林^[6, 61-62]，落叶树高于常绿树^[63]，部分乡土植物高于外来植物^[55]，幼龄、中龄的植物高于成熟期的植物^[53]。在碳密度的影响下，植物群落的树种搭配、层次结构、群落密度等特征因子也会使城市绿地的碳汇功能有所区别^[64]。张倩倩^[65]在北京市对乔-灌-草-灌-草和草坪3种居住区绿地类型进行调查，比较结果表明乔-灌-草复合类型的居住区绿地对空气中的二氧化碳的调节能力明显高于另外2种居住区绿地类型。于超群等^[66]对济南市城区典型绿地碳储量的研究进行分析，发现植物群落层次越复杂，固碳效果越好，植物群落密度越高，碳汇功能越强。广州典型绿地的样方评估证实在合理设计种植密度的前提下，乔木种植密度越大，绿地固碳效率也会越大^[55]。基于上述研究可知，除绿量以外，个体生态学功能对于植物生态调节功能也起到重要作用。增加总体绿量和配置固碳效益强的植物群落，能显著提升城市绿地的碳汇能力^[25, 67]。

值得一提的是，在对绿地建造施工和管理养护过程中，因涉及燃油利用和材料使用等，存在一定的碳排放，对城市环境造成负面影响。因此，为进一步全面分析绿地的净固碳能力，已有研究从全生命周期视角切入，对不同类型绿地的碳足迹进行实证分析^[55]，指明除人为建设管理方式外，对植物类型、植被配置、立地条件等空间特征的精细管控也有助于降低绿地的碳排放量，由此提升绿地整体的增汇效能。

2.2 促进降温减排的绿地空间特征

基于在宏、微观层面的数据实测和模拟论证，相关研究证实了城市绿地总体规模特征、分布格局特征、几何形态特征和植物配置特征都会显著影响其对于周边环境的降温减排效果。

在宏观层面上，绝大部分研究采用模型模拟、遥感反演等手段，从绿地的总体规模特征、分布格局特征、几何形态特征等方面

衡量绿地的降温减排效应^[68]。在规模特征方面，基于绿地类型的实地观测数据表明，公园绿地的平均降温幅度最大^[69]。周雯等^[70]指出景观组分对降温强度的影响高于景观构型，每增加10%的乔木林地面积，可以降低区域温度1.03℃。绿地规模面积越大，绿地温度越低^[71-72]，但发挥显著降温效果的绿地面积阈值存在差异^[73-74]。在分布格局特征方面，研究证实，在绿地覆盖面积低于40%时，绿地格局对降温、增湿等生态环境效应起主要作用^[75-76]。绿地的聚集度越低、破碎度越高，越不利于绿地降温^[71, 77]。基于形态学空间格局分析法，已有研究提出提升绿地核心斑块集中性与连通度、优化斑块边界、减少破碎化小斑块数量等措施能有效改善热环境^[78]。同时，研究发现公园绿地的降温作用与周边用地结构具有较明显的对应关系^[79]，其降温幅度与绿地和建设用地的面积比值之间存在明显的正相关关系，与建设用地的容积率之间存在负相关关系^[80]。在形态特征方面，基于对绿地的面积、周长面积比、形状指数等指标的研究，发现绿地的面积和形状对绿地温度的影响具有不确定性^[81-83]，在较大尺度下，绿地面积越大、形状越规则，其降温效应越好^[82-83]；在较小尺度下，分散型绿地降温效应则优于集中式大型绿地，形状复杂的绿地降温效应更好^[83]。

在微观层面上，研究借助样地实测、模型模拟等手段，证实了城市植物配置特征，包括植物种类和群落特征等会影响绿地的降温效应^[25]。薛海丽等^[62]提出灌木植物和阔叶乔木的叶片降温增湿能力最强，针叶乔木较弱，草本最弱。另有研究证实绿地内的植物群落结构对其降温功能有显著影响^[84]，不同城市绿地植物群落结构降温增湿效益呈现为乔-灌-草>灌-草>草地。高吉喜等^[32]指出郁闭度和绿量对绿地降温增湿功能均有明显影响，但郁闭度影响更大，冠层郁闭度处于0.60~0.85、三维绿量密度 $\geq 5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 的乔-灌-草或乔-草型绿地具有最大降温增湿功能。

2.3 促进绿色慢行的绿地空间特征

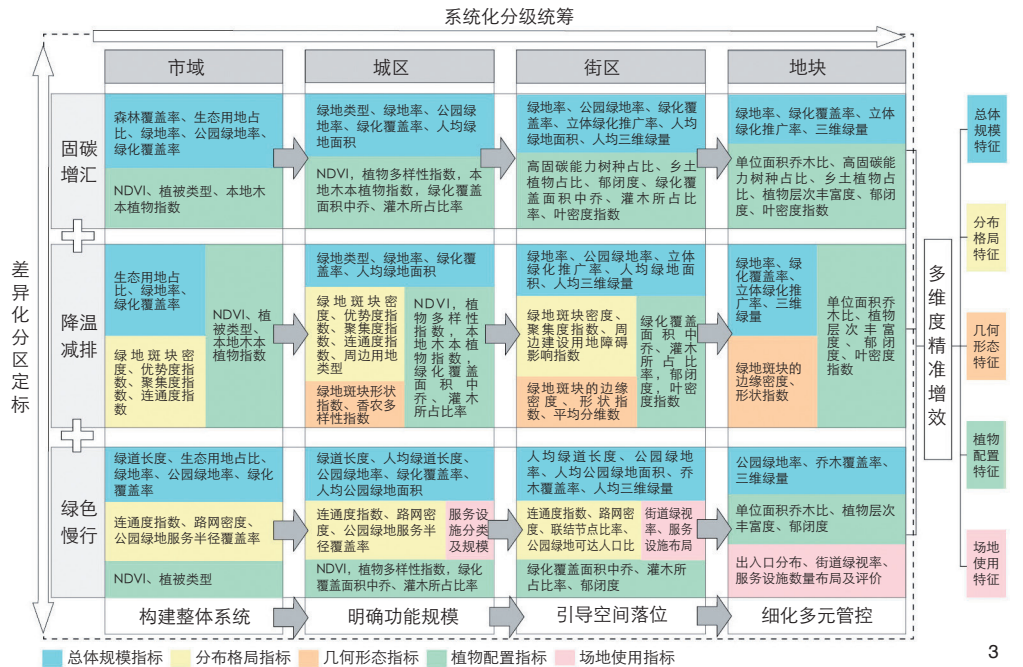
对于城市绿地空间特征促进居民步行活动、降低交通碳排的相关研究，主要聚焦于城市绿地的分布格局特征和场地使用特征。

在分布格局特征方面，依托于城市绿道系统，较高的空间可达性和景观连通性^[85-87]能有效促进居民的步行活动，提升居民步行活动品质。相关研究多采用 GIS 平台，借助遥感影像数据，引入可达面积比、可达人口比、整体连通性指数、可能连通性指数等指标，对研究区中绿地进行评价。面向线状绿道网络，有研究基于对步行时间、步行距离和可步行指数等指标分析和评价绿道的可步行性，发现较高的路网密度、较多的连通节点能够促进居民绿色慢行^[88]。

在场地使用特征方面，相关研究数据表明，较高的植被覆盖率和绿视率、丰富的植物搭配、必要的服务设施布局能促进居民的步行行为，从而推动城市交通结构的低碳调整^[88-89]。有研究表明，街道乔木覆盖率达到40%、绿视率达到20%时，可显著舒缓精神压力^[90]。乔-灌-草复合搭配的绿地能有效缓解步行者心理压力^[91]。徐磊青等^[88]结合客观测量与问卷调查指出，良好绿化景观和丰富的服务设施都对步行活动品质的提高具有非常重要的价值。

3 面向碳中和的城市绿地精细化管控实施框架

综上，绿地空间特征从多个尺度通过对绿地的城绿关系、功能规模、生态效能、服务落位等规划管控内容的介入，实现了在一种或多种影响路径下的绿地碳中和增效。当前城市碳中和绩效讨论多围绕低碳发展的重点领域、经济发展指标、二氧化碳排放量等构建综合评价体系，逐渐强调与社会、经济、环境的协同^[92]。因此，加强对于城市绿色碳汇效益和间接减碳排效益的总体评估与协同量化研究，对于指导绿地空间调整、高效发挥其多重生态效应具有重要意义。既有研究显示，固碳释氧过程是绿地最直接有效的碳中和机制^[53]，在有限的城镇空间中，如何高效提升绿地碳汇总量和碳汇效率，是面向碳中和绿地建设的首要目标。同时，绿地作为城市冷岛和重要的游憩空间，在直接改善人居环境微气候、提升居民生活品质的同时，起到了间接促进降低能耗、减少碳排的生态



3 影响碳中和的城市绿地精细化管控指标和实施框架
Indicators and implementation framework for fine control of urban green space affecting carbon neutrality

效益。相较于固碳增汇，绿地空间特征的优化目标则需兼顾多重目标的协同性，与城市资源禀赋和发展需求紧密结合。

总体来看，针对绿地增汇、减排效益的已有研究更多关注微观尺度的植物单体生态效益量化和宏观尺度的绿地系统功能评价，空间分析视角过于局限^[93]。在城市绿地存量更新背景下，对于绿地碳中和增效的平面化研究结果与实际分类分层级的绿地规划体系和管理机制尚不能很好地结合，提出的空间管控策略实践性不强。因此，在有限的城市空间环境和绿地规模条件下，面向绿地碳中和效能优化诉求，对接城市多级治理单元，本研究按照“系统化分级统筹、差异化分区定标、多维度精准增效”的思路提出高效配置绿地空间资源的精细化管控框架。该框架中，在“市域—城区—街区—地块”四级管控层级下，绿地规划建设要基于生态本底和发展需求制定“双碳”目标，明确主要的增汇减排实践途径，并结合多维度空间管控指标，实现绿地碳中和效能的精准优化，激发城市低碳转型的内生动力（图3）。城市绿地作为多尺度嵌套、多效能耦合的系统，其管控指标与

碳中和增效路径并非一一对应的关系，而是在不同尺度、不同目标下重复出现、交叉影响。一方面，绿地的多尺度属性要求后续研究与实践应将对空间尺度的考量纳入对绿地指标体系的进一步分析、解读与制定过程中。例如，在市域层面以构建整体系统为要，重点关注绿地的总体规模特征、分布格局特征和植物配置特征；在城区一街区层面还需增加对于绿地几何形态特征的重视，进一步明确功能规模、引导空间落位；在地块层面则要细化多元管控，注重上级规划意图的有效传导，探讨管控指标在不同发展情景下的差异化。另一方面，在碳中和目标下，同一城市绿地空间特征指标往往同时影响增汇和减排效能，不同影响路径之间存在着协同或权衡的多重可能，其复杂的交互机制亟待研究，在指标筛选和权重分配过程中要结合碳中和效益的整体评估和多路径耦合进行深入讨论，优化决策。

4 结语

城市绿地空间不仅只是客观存在的物质环境，也是多方利益相关者各种绿地价值诉

求的外在表达。空间资源紧约束条件下,城市绿地如何在国家“双碳”战略中扮演好重要角色,势必需要从固碳增汇、节能减排2个方面发力,探讨多路径优化碳中和效应的绿地空间管控技术集成创新。本研究从固碳增汇、降温减排、绿色慢行3个方面梳理和总结了城市绿地空间特征与城市碳中和的相关性,在文献爬梳的基础上总结不同影响路径下的重要空间特征和主要指标表征,厘清了城市绿地对碳中和的关联影响机制。在此基础上衔接城市绿地规划管控的实践需求,对接多级治理单元,初步构建城市绿地“系统化分级统筹、差异化分区定标、多维度精准增效”的精细化管控框架,为绿地碳中和效能提升的后续深化研究和建设管理实践提供借鉴和建议。

在城市绿地对碳中和的影响研究中,本研究聚焦于空间特征,故并未对其自然教育功能、建设管理方式等对绿地碳中和效能的影响展开详细讨论。受地域特征和城市政策的影响,相关城市绿地对碳中和的影响研究尚需结合更为翔实的、体现地方性的定量研究和实证结论,如当前城市绿地影响城市建筑能耗和交通碳排放的系统研究较少,多是基于建成环境视角或停留在定性讨论,亟待后续深入探索。此外,绿地管控实施框架还有待在多尺度、多维度下进一步细化管控指标,明确不同指标阈值和权重。由于城市绿地的多尺度嵌套、多效能耦合特征,许多特征指标同时影响固碳和减排效能,亟待后续对不同类型生态系统服务之间的耦合协同机制进行进一步研究,构建以城市绿地空间为本位的有科学基础、可操作的碳中和效能优化方法,探索绿地系统低碳规划工具,探讨将城市绿地双碳规划理念与方法更好地融入国土空间规划诸专项,以应对全球气候变化的挑战。

参考文献 (References):

[1] IPCC. Special Report: Global Warming of 1.5 °C[EB/OL]. (2018-10-08)[2022-01-10]. <https://www.ipcc.ch/sr15>.
 [2] UNFCCC. The Paris Agreement[EB/OL]. (2015-12-12)[2022-01-10]. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.

[3] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. (2020-09-22)[2022-01-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.
 [4] 丁仲礼. 中国碳中和框架路线图研究[J]. 中国工业和信息化, 2021 (8): 54-61.
 [5] 郭义强. 生态保护修复有助于碳中和[J]. 资源与人居环境, 2021 (4): 52-53.
 [6] 欧阳海龙, 董实忠, 高素娟. 以生态碳汇助推碳中和的武汉NbS实践路径[J]. 长江技术经济, 2021, 5 (4): 38-44.
 [7] 张哲, 任怡萌, 董会娟. 城市碳排放达峰和低碳发展研究: 以上海市为例[J]. 环境工程, 2020, 38 (11): 12-18.
 [8] 赵彩君, 刘晓明. 城市绿地系统对于低碳城市的作用[J]. 中国园林, 2010, 26 (6): 23-26.
 [9] 殷利华, 姚忠勇, 万敏. 园林绿化工程施工阶段碳足迹研究: 以武汉光谷大道隙地绿化工程为例[J]. 中国园林, 2012, 28 (4): 66-70.
 [10] 洪志超, 苏利阳. 国外城市碳中和策略及对我国的启示[J]. 环境保护, 2021, 49 (16): 68-71.
 [11] UNEP, IUEP. Nature-based Solutions for Climate Change Mitigation[EB/OL]. (2021-11-04)[2022-01-10]. <https://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/37318/NBSCCM.pdf>.
 [12] 王敏, 朱雯. 城市绿地影响碳中和的途径与空间特征: 以上海市黄浦区为例[J]. 园林, 2021, 38 (10): 11-18.
 [13] 高原, 刘堃. 深圳市绿道对多样慢行活动的支持与规划策略[J]. 规划师, 2019, 35 (14): 39-45.
 [14] 周聪惠, 金云峰. “精细化”理念下的城市绿地复合型分类框架建构与规划应用[J]. 城市发展研究, 2014, 21 (11): 118-124.
 [15] 张云路, 马嘉, 李雄. 面向新时代国土空间规划的城乡绿地系统规划与管控路径探索[J]. 风景园林, 2020, 27 (1): 25-29.
 [16] 熊健, 卢柯, 姜紫莹, 等. “碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考[J]. 城市规划学刊, 2021 (4): 74-80.
 [17] 王永华, 高含笑. 城市绿地碳汇研究进展[J]. 湖北林业科技, 2020, 49 (4): 69-76.
 [18] 朱建军, 李秀芬, 张智奇, 等. 城市森林碳汇功能与低碳经济探讨[J]. 上海农业学报, 2010, 26 (4): 57-59.
 [19] LAL R, AUGUSTIN B. Carbon Sequestration in Urban Ecosystems[M]. Dordrecht: Springer, 2012.
 [20] 王法明, 唐剑武, 叶思源, 等. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36 (3): 241-251.
 [21] 叶祖达. 建立低碳城市规划工具: 城乡生态绿地空间碳汇功能评估模型[J]. 城市规划, 2011, 35 (2): 32-38.
 [22] WOODBURY P B, SMITH J E, HEATH L S. Carbon Sequestration in the U.S. Forest Sector from 1990 to 2010[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 241(1-3): 14-27.
 [23] 周健, 肖荣波, 庄长伟, 等. 城市森林碳汇及其核算方法研究进展[J]. 生态学杂志, 2013, 32 (12): 3368-3377.
 [24] 王丽勉, 胡永红, 秦俊, 等. 上海地区151种绿化植物固碳释氧能力的研究[J]. 华中农业大学学报, 2007 (3): 399-401.
 [25] 张艳丽, 费世民, 李智勇, 等. 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益[J]. 生态学报, 2013, 33 (12): 3878-3887.
 [26] 刘为华. 上海城市绿地土壤碳储量格局与理化性质研

究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
 [27] 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 等. 千烟洲人工针叶林CO₂通量季节变化及其环境因子的影响[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004 (22): 109-117.
 [28] 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 等. 碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望[J/OL]. 环境科学, 2021: 1-20. (2021-09-30)[2022-02-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13227/j.hj.kx.202108170>.
 [29] EWING R, RONG F. The Impact of Urban form on U.S. Residential Energy Use[J]. Housing Policy Debate, 2008,19(1): 1-30
 [30] 王频, 孟庆林. 城市人为热及其影响城市热环境的研究综述[J]. 建筑科学, 2013, 29 (8): 99-106.
 [31] 梁益同, 陈正洪, 夏智宏. 基于RS和GIS的武汉城市热岛效应年代演变及其机理分析[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19 (8): 914-918.
 [32] 高吉喜, 宋婷, 张彪, 等. 北京城市绿地群落结构对降温增湿功能的影响[J]. 资源科学, 2016, 38 (6): 1028-1038.
 [33] 张彪, AMANI-BENI M, 史芸婷, 等. 北京奥林匹克公园夏季绿地小气候及人体环境舒适度效应分析[J]. 生态科学, 2018, 37 (5): 77-86.
 [34] 晏海, 王雪, 董丽. 华北树木群落夏季微气候特征及其对人体舒适度的影响[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34 (5): 57-63.
 [35] ZHANG B, XIE G, GAO J, et al. The Cooling Effect of Urban Green Spaces as a Contribution to Energy-Saving and Emission-Reduction: A Case Study in Beijing, China[J]. Building and Environment, 2014, 76: 37-43.
 [36] FAN W. Modelling Sheltering Effects of Trees on Reducing Space Heating in Office Buildings in a Windy City[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(12): 1443-1454.
 [37] 杨小山, 赵立华. 城市微气候对建筑能耗影响的研究方法综述[J]. 建筑科学, 2015, 31 (12): 1-7.
 [38] 张彪, 谢紫霞, 高吉喜, 等. 上海市绿地植被的吸热降温效益评估[J]. 自然资源学报, 2021, 36 (5): 1334-1345.
 [39] 赵敏, 张卫国, 俞立中. 上海市居民出行方式与城市交通CO₂排放及减排对策[J]. 环境科学研究, 2009, 22 (6): 747-752.
 [40] 于长明, 吴培阳. 城市绿色空间可步行性评价方法研究综述[J]. 中国园林, 2018, 34 (4): 18-23.
 [41] ERNAWATI J. Urban Design Qualities Related Walkability in a Commercial Neighbourhood[J]. Environment-Behaviour Proceedings Journal, 2016, 1(4): 242-250.
 [42] EWING R, HANDY S, BROWNSON R C, et al. Identifying and Measuring Urban Design Qualities Related to Walkability[J]. Journal of Physical Activity and Health, 2006, 3(S1): S223-S240.
 [43] LESLIE E, COFFEE N, FRANK L, et al. Walkability of Local Communities: Using Geographic Information Systems to Objectively Assess Relevant Environmental Attributes[J]. Health and Place, 2007, 13(1): 111-122.
 [44] 卢银桃, 王德. 美国步行性测度研究进展及其启示[J]. 国际城市规划, 2012, 27 (1): 10-15.
 [45] 李野. 健康城市理念下城市步行空间设计策略研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
 [46] 冯凌. 融合街道空间的建筑界面研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
 [47] 申世广, 唐欢, 邱冰. 步行友好的绿道评价研究: 以南京环紫金山绿道为例[J]. 风景园林, 2018, 25 (11): 46-51.

- [48] 朱战强, 黄存忠, 柳林, 等. “绿道一邻里”视角下建成环境对城市绿道使用的影响: 以广州为例 [J]. 热带地理, 2019, 39 (2) : 247-253.
- [49] 王兰, 张雅兰, 邱明, 等. 以体力活动多样性为导向的城市绿地空间设计优化策略 [J]. 中国园林, 2019, 35 (1) : 56-61.
- [50] 金云峰, 万亿, 周向频, 等. “人民城市”理念的大都市社区生活圈公共绿地多维度精明规划 [J]. 风景园林, 2021, 28 (4) : 10-14.
- [51] GUSTAFSON E J. Quantifying Landscape Spatial Pattern: What Is the State of the Art?[J]. Ecosystems, 1998, 1(2): 143-156.
- [52] 张卫华, 陈俊杰, 江楠. 考虑交通能源消耗的出行需求管理策略研究 [J]. 系统工程学报, 2015, 30 (4) : 566-574.
- [53] 王敏, 石乔莎. 城市绿色碳汇效能影响因素及优化研究 [J]. 中国城市林业, 2015, 13 (4) : 1-5.
- [54] NOWAK D J, GREENFIELD E J, HOEHN R E, et al. Carbon Storage and Sequestration by Trees in Urban and Community Areas of the United States[J]. Environmental Pollution, 2013, 178: 229-236.
- [55] 黄柳菁, 张颖, 邓一荣, 等. 城市绿地的碳足迹核算和评估: 以广州市为例 [J]. 林业资源管理, 2017 (2) : 65-73.
- [56] REN Z, ZHENG H, HE X, et al. Changes in Spatio-temporal Patterns of Urban Forest and Its Above-Ground Carbon Storage: Implication for Urban CO₂ Emissions Mitigation Under China's Rapid Urban Expansion and Greening[J]. Environment International, 2019, 129: 438-450.
- [57] 朱敏. 西安沪灞生态区城市绿地空间植被碳储量估算研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- [58] 张青云, 吕伟娅, 徐炳乾. 华北地区城市绿地固碳能力测算研究 [J]. 环境保护科学, 2021, 47 (1) : 41-48.
- [59] DAVIES Z G, EDMONDSON J L, HEINEMEYER A, et al. Mapping an Urban Ecosystem Service: Quantifying Above-Ground Carbon Storage at a City-Wide Scale[J]. Journal of Applied Ecology, 2011, 48(5): 1125-1134.
- [60] 王昕歌, 尹正. 基于 Pathfinder 的城市绿地碳汇效益估算及优化: 以西安市小雁塔改建前景区为例 [J]. 城市建筑, 2021, 18 (17) : 166-168.
- [61] 董家靖, 黄伟, 黎秀琼, 等. 我国园林绿地的碳汇研究进展 [J]. 热带生物学报, 2018, 9 (1) : 117-122.
- [62] 薛海丽, 唐海萍, 李延明, 等. 北京常见绿化植物生态调节服务研究 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2018, 54 (4) : 517-524.
- [63] 郭晖, 周慧, 张家洋. 郑州市 15 种常见园林树种固碳释氧能力分析研究 [J]. 西北林学院学报, 2017, 32 (4) : 52-56.
- [64] KOVACS K F, HAIGHT R G, JUNG S, et al. The Marginal Cost of Carbon Abatement from Planting Street Trees in New York City[J]. Ecological Economics, 2013, 95: 1-10.
- [65] 张倩倩. 植树固碳效益在居住区规划设计中的应用研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2012.
- [66] 于超群, 齐海鹰, 张广进, 等. 基于低碳理念的园林植物景观设计研究: 以济南市城区典型绿地为例 [J]. 山东林业科技, 2016, 46 (5) : 10-15.
- [67] 王敏, 石乔莎. 城市高密度地区绿色碳汇效能评价指标体系及实证研究: 以上海市黄浦区为例 [J]. 中国园林, 2016, 32 (8) : 18-24.
- [68] 王晓俊, 卫笑, 邹昊. 城市绿地空间格局对热岛效应的影响研究进展 [J]. 生态环境学报, 2020, 29 (9) : 1904-1911.
- [69] 何亮. 城市不同功能类型绿地的降温增湿和空气净化效应研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [70] 周雯, 曹福亮, 张瑞, 等. 绿地格局对城市地表热环境调节作用的多尺度分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2020, 44 (3) : 133-141.
- [71] GUO G, WU Z, CHEN Y. Complex Mechanisms Linking Land Surface Temperature to Greenspace Spatial Patterns: Evidence from Four Southeastern Chinese Cities[J]. Science of the Total Environment, 2019, 674: 77-87.
- [72] 邹婧, 曾辉. 城市地表热环境与景观格局的关系: 以深圳市为例 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2017, 53 (3) : 436-444.
- [73] ZHOU W, SHEN X, CAO F, et al. Effects of Area and Shape of Greenspace on Urban Cooling in Nanjing, China[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2019, 145(4): 04019016.1-04019016.9.
- [74] XIAO X, DONG L, YAN H, et al. The Influence of the Spatial Characteristics of Urban Green Space on the Urban Heat Island Effect in Suzhou Industrial Park[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 40: 428-439.
- [75] 周志翔, 邵天一, 唐万鹏, 等. 城市绿地空间格局及其环境效应: 以宜昌市中心城区为例 [J]. 生态学报, 2004 (2) : 186-192.
- [76] 吴人韦. 支持城市生态建设: 城市绿地系统规划专题研究 [J]. 城市规划, 2000 (4) : 31-33, 64.
- [77] KONG F, YIN H, WANG C, et al. A Satellite Image-Based Analysis of Factors Contributing to the Green-Space Cool Island Intensity on a City Scale[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2014, 13(4): 846-853.
- [78] 陈明, 戴菲. 基于形态学空间格局分析的城市绿地对热环境的影响研究 [J]. 生态环境学报, 2021, 30 (1) : 125-134.
- [79] 陈方敏. 上海市公园绿地对城市热岛效应影响的多尺度研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [80] 邱海玲. 北京城市热岛效应及绿地降温作用研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [81] 成实, 牛宇琛, 王鲁帅. 城市公园缓解热岛效应研究: 以深圳为例 [J]. 中国园林, 2019, 35 (10) : 40-45.
- [82] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 绿地格局对城市地表热环境的调节功能 [J]. 生态学报, 2013, 33 (8) : 2372-2380.
- [83] 栾庆祖, 李波, 叶彩华, 等. 北京市三维景观格局的局地气象环境影响初探 [J]. 生态环境学报, 2019, 28 (3) : 514-522.
- [84] AMANI-BENI M, ZHANG B, XIE G, et al. Impact of Urban Park's Tree, Grass and Waterbody on Microclimate in Hot Summer Days: A Case Study of Olympic Park in Beijing, China[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2018, 32: 1-6.
- [85] 侍昊, 徐雁南. 基于景观连通性的城市绿地核心区规划方法研究 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2011, 35 (1) : 51-56.
- [86] 臧卓, 张亚男. 不同尺度下城市绿地景观格局与连通性研究 [J]. 中国农学通报, 2011, 27 (25) : 49-55.
- [87] SAELENS B E, SALLIS J F, BLACK J B, et al. Neighborhood-Based Differences in Physical Activity: An Environment Scale Evaluation[J]. American Journal of Public Health, 2003, 93(9): 1552-1558.
- [88] 徐磊青, 施婧. 步行活动品质与建成环境: 以上海三条商业街为例 [J]. 上海城市规划, 2017 (1) : 17-24.
- [89] 王世福, 刘铮. 线形绿色空间作为健康城市资源的机遇与挑战 [J]. 城市建筑, 2018 (24) : 29-32.
- [90] 姜斌. 探索健康城市之路: 论城市自然之于精神健康的益处 [J]. 城乡规划, 2018 (3) : 13-20.
- [91] HOYLE H, HITCHMOUGH J, JORGENSEN A. All about the 'Wow Factor'? The Relationships Between Aesthetics, Restorative Effect and Perceived Biodiversity in Designed Urban Planting[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 164: 109-123.
- [92] 陈楠, 庄贵阳. 中国低碳试点城市成效评估 [J]. 城市发展研究, 2018, 25 (10) : 88-95, 156.
- [93] 杨文越, 李昕, 叶昌东. 城市绿地系统规划评价指标体系构建研究 [J]. 规划师, 2019, 35 (9) : 71-76.

图表来源 (Sources of Figures and Table):

图 1~3 由作者绘制; 表 1 由作者根据参考文献 [17]~[91] 绘制。

(编辑 / 刘昱霏)