李倞，吴佳鸣，汪文清 . 碳中和目标下的风景园林规划设计策略 [J]. 风景园林，2022，29（5）：45-51.

碳中和目标下的风景园林规划设计策略

Landscape Planning and Design Strategies Under Carbon Neutrality Goal

李倞 吴佳鸣 汪文清

LI Liang, WU Jiaming, WANG Wenqing

开放科学（资源服务）标识码（OSID）

中图分类号：TU986.2
文献标识码：A
文章编号：1673-1530(2022)05-0045-07
DOI：10.14085/j.fjyl.2022.05.0045.07
收稿日期：2021-10-12
修回日期：2022-03-12

李倞 / 男 / 博士 / 北京林业大学园林学院教授、博士生导师 / 城乡园林景观建设国家林业和草原局重点实验室成员 / 城乡生态环境北京实验室成员 / 本刊特约编辑 / 研究方向为绿色基础设施、生态网络规划和设计、社区营造和公共健康

LI Liang, Ph.D., is a professor and doctoral supervisor in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, a member of the Key Laboratory of Urban and Rural Landscape Construction of the State Forestry and Grassland Administration and of Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, and a contributing editor of this journal. His research focuses on green infrastructure, ecological network planning and design, community revitalization and public health.

吴佳鸣 / 女 / 北京林业大学园林学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计、生态景观规划设计

WU Jiaming is a master student in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. Her research focuses on landscape planning and design, and ecological landscape planning and design.

汪文清 / 女 / 北京林业大学园林学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计、生态景观规划设计

WANG Wenqing is a master student in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. Her research focuses on landscape planning and design, and ecological landscape planning and design.

摘要：“碳中和”目标为风景园林提供了全新的机遇和挑战。聚焦园林绿地对碳排放的减源和增汇 2 个主要功能，提出了风景园林规划设计的具体措施及其作用机理，为风景园林师开展相关实践提供系统、全面、可行的策略方法，主要包括 3 方面 55 项：1）在直接减源方面，通过减少园林绿地的全生命周期碳足迹，实现项目自身的节能减排；2）在增加碳汇方面，围绕园林植物、土壤、水体三大要素，增强园林绿地本身的碳捕获能力；3）在间接减源方面，园林绿地可以引导居民开展低碳生活、降低城市能耗，间接实现碳减排。

关键词：风景园林；气候变化；碳中和；减碳；碳汇；大气脱碳

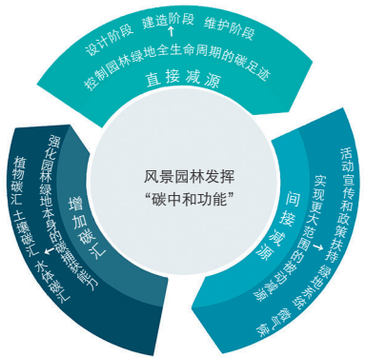
基金项目：国家自然科学基金面上项目（编号 32071833）；住房和城乡建设部项目（编号 12020210276）；中央高校基本科研业务费专项资金（编号 2021BLRD25）

Abstract: The goal of “carbon neutrality” has provided brand-new opportunities and challenges for landscape architecture. Focusing on carbon source reduction and carbon sink increase, the two main functions of green space, this research puts forward specific measures for landscape architecture planning and design together with action mechanisms thereof, with a view to providing systematic, comprehensive and feasible strategies for landscape architects to carry out relevant practice. The research involves a total of 55 measures in the following three aspects: 1) in terms of direct carbon source reduction, minimize the whole life cycle carbon footprint of green space to help the project achieve energy conservation and carbon reduction; 2) in terms of carbon sink increase, enhance the carbon capture capacity of green space centering around the three major elements of landscape plants, soil and water bodies; 3) in terms of indirect carbon source reduction, guide residents to adopt a low-carbon lifestyle through green space, thus reducing urban energy consumption and indirectly achieving carbon emission reduction.

Keywords: landscape architecture; climate change; carbon neutrality; carbon reduction; carbon sink; atmospheric decarbonization

Fund Items: The General Program of the National Natural Science Fund of China (No. 32071833); Project of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development (No. 12020210276); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2021BLRD25)

近年来，极端气候状况频发，引起全球对气候变化问题的普遍关注 [1-4]。中国“双碳”目标的提出 [5] 引发国内各行业的广泛回应，风景园林也不例外。归纳起来，风景园林应对气候变化主要包括 2 种方式 [6]：一方面是提升城市韧性，增强城市对气候变化影响的适应能力；另一方面则是减少碳排放量和发挥碳汇功能，减缓全球气候变暖进程。在国家碳中和目标下，



1

1 风景园林发挥“碳中和功能”的技术框架
Technical framework for landscape architecture to perform the “carbon neutrality function”

后者无疑将成为风景园林行业发展的新机遇。

风景园林在适应气候变化的规划设计领域已经开展了一定的研究[1, 7-9]，但针对风景园林在减源、增汇方面的研究还相对较少。低碳园林是以往研究的主要内容，钟乐等[10]、赵彩君等[11]、王贞等[12]主要针对风景园林低碳营造的相关原则和实践开展研究；周慕云[13]、王迪生[14]、谢军飞等[15]主要借鉴林学相关方法对园林绿地碳汇和碳足迹计量进行初步探讨；玛莎·施瓦茨等[16]从宏观地理工程学视角对风景园林可采用的前沿探索性脱碳措施进行了介绍。总体而言，尚缺乏为实现碳中和目标，在风景园林实践中可以采用的措施和作用机理的系统研究。

通过检索，本研究以中文文献、英文文献、项目报告和设计案例作为研究数据源。中文文献在中国知网（CNKI）数据库以“主题 = 园林 OR 绿地 AND（气候变化 OR 低碳 OR 碳汇 OR 碳中和）”为检索式进行检索，来源类别为所有学术期刊，检索时间跨度为 2008—2021 年，检索后对文献进行进一步筛选，剔除其中的非学术类文献，最终得到 417 篇相关文献；英文文献在 Web of Science 核心合集以“主题 =Landscape OR parks OR garden OR green space AND（carbon neutrality OR carbon footprint OR carbon sequestration OR low carbon OR climate change）AND 语言 = 英语”开展检索，检索时间跨度同上，剔除新闻、综合资讯等条目，最后经过人工筛选，剔除相关性不大的文献，共得到 220 篇文献。同时，综合 Google 浏览器搜索得到相关的 30 份项目报告和 42 个设计案例作为研究数据来源，对碳中和目标下的风景园林直接减源、增加碳汇和间接减源 3 方面功能开展研究（图 1）。

表 1 园林绿地直接减源策略
Tab. 1 Strategies fo direct carbon source reduction through green space

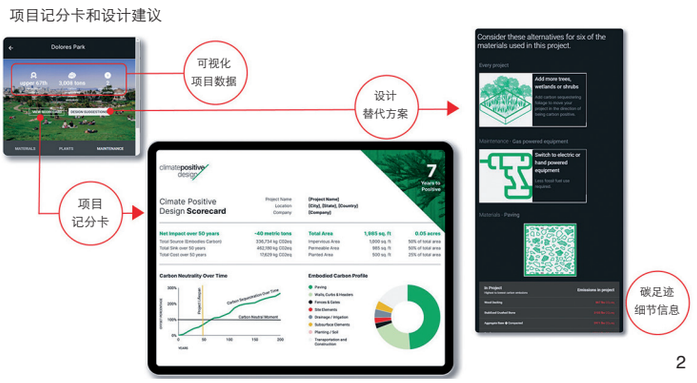
全生命周期阶段	设计措施	作用机理
设计阶段（包括新建与更新）	尊重场地条件，减少过度设计	避免设计中对地形等自然条件进行过度改造导致的不必要的碳排放
	设计被动式园林建筑设施	建筑设施设计顺应气候自然条件，减少人工降温、通风、采光等所产生的碳排放
	设计能发挥气候调节功能的水体	发挥水体的直接降温增湿作用，减少人工气候调节所产生的碳排放
	设计增加城市农业	降低食品长距离运输所产生的碳排放
	设计更大面积的可绿化空间（包括屋顶绿化等）	降低建筑内、外环境的温度，减少人工气候调节，同时发挥绿地碳汇功能
	设计自然式的植物景观	减少精细化养护和植物修剪产生的较高的碳排放
	设计中运用可再生能源	减少化石能源消耗所产生的碳排放
	设计循环收集系统，利用多种类型的降水资源、城市中水等	完整的雨水收集系统能够降低碳排放，同时保障景观水体的水质清洁
	设计更长生命周期的景观	延长景观材料和设计的使用周期，减少不必要的更新所产生的碳排放
	利用碳计算工具协助设计决策	评估工程、材料的碳排碳汇量，优化设计方案，精准完成低碳设计
建造阶段	利用现有材料和工程构造	降低材料运输所产生的碳排放
	运输应用绿色物流服务	降低运输所产生的碳排放
	建造采用模块化单元	降低施工现场的机械运行所产生的碳排放
	建造采用低碳环保材料	节约能耗，可再生材料的碳足迹较低、生命周期长，材料本身具有固碳能力
	建造采用建成后能有效节约运行能耗的材料	降低项目运营过程中的碳排放
	选择本地建造工人	减少对本地以外的工人调度，避免造成额外的交通碳排放
维护阶段	制定全流程管理规范	减少冗余的管理措施和重复的维护工作导致的碳排放
	采用粗放的植物管理方式	植物生长过程的粗放管理能实现更高的生物多样性和植物碳汇能力，降低植物维护所产生的碳排放
	优化管理流程	动态监测日照、风速、湿度等绿地数据，以及管养人员、车辆位置信息，提升管理效率
	采用智慧园林养护技术	运用现代智慧园林技术，降低管理能耗和碳排放
	采用生物水自净系统	利用水生植物自主维护水质，减少人工养护造成的碳排放
	采用节水灌溉系统	采用喷灌、滴灌等节水灌溉设施，减少消耗水资源和人力资源造成的碳排放
	增加生物动力维护，减少使用机械	减少机械运行所产生的碳排放
	减少化学肥料使用，采用有机肥料和养护措施	避免施用化学肥料后排放温室气体，同时有机肥能够促进植物和土壤的碳汇效益
	循环利用人类废料	注重循环利用可再生资源，尤其是园林废弃物，避免固碳释放

1 园林绿地全生命周期的直接减源途径

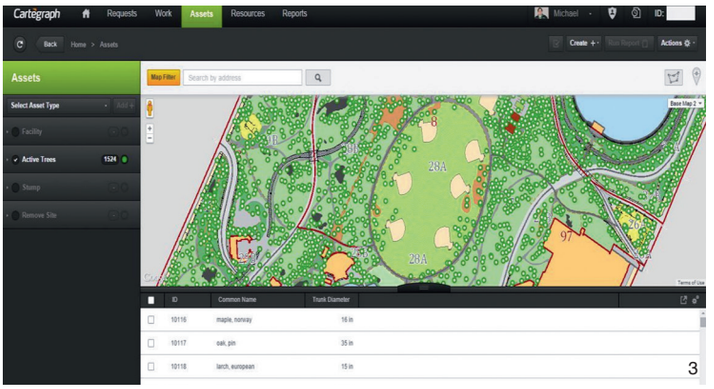
在设计、建造和维护等阶段，需要针对园林绿地的全生命周期碳足迹采取措施，实现项目的长期节能减排（表 1）。

1.1 设计阶段

设计应保障能源的高效利用。古代造园者提及的“相地合宜”“土方就地平衡”和“极尽自然之美，少费人事之功”在当今碳中和园林的建设中尤其适用。在建设中尊重场地原本地形地貌条件，能够有效提升资源利用率[3]。不同的设计要素具有不同的减源作用，通过被动式建筑设计实现通风采光[17-18]以及利用植被自身的绿化遮阴作用[19-20]和水体自身的降温增湿效能[21]，均能实现节能减排。此外，发展城市农业，借助可食用绿化和公共菜园等形式，能够减少食品运输产生的碳排放[11, 22]。但需要注意的是，农业种植耗水量较大，在园林绿地中宜选择节水型的农作物和种植管理方式。



2 Pathfinder 碳计算工具 [6]
Pathfinder Carbon Calculator[6]



3 Cartegraph 智能公园管理软件
Cartegraph Park Management Software

利用可再生能源也将促进直接减源。如太阳能热水、空气源热泵、地源热泵、风力涡轮机、太阳能电池 [11]、生物能源 [23] 等技术应在风景园林中进行更广泛的示范和推广。此外，对可再生资源的循环利用，如多种类型的降水资源、城市中水等，能够减少对自来水供应的依赖 [24]，有效减少碳排放 [25]。在应用节约资源技术的同时，也需考虑清洁能源的负面影响，如生物质能源会降低部分农田的多样性，且生产过程需要消耗大量的水土资源 [26]，导致额外的碳排。因此，设计师需要谨慎评估新能源的使用范围和可能带来的负面影响 [27]。

在设计阶段，不论是新建项目还是更新改造项目，都应在前期确保设计的科学性和决策的合理性，避免因追求风格化和表面化，开展不必要的建设和更新 [12]。利用碳足迹计算器增强风景园林在碳排、碳汇相关数据获取、可视化、定量分析等方面的能力 [28]，能够帮助设计师精准决策。目前，应用较广的碳计算工具主要包括分析植物碳汇能力的 i-Tree[29]、针对风景园林项目的 Pathfinder[6]（图 2）和以建筑为主体的东南大学东禾建筑碳排放计算分析软件 [30] 等。

1.2 建造阶段

园林绿地材料是建造阶段碳排放的重要影响因素，不同的建材、构造之间的碳排量有明显差异。使用场地本身的材料对减少碳排的影响十分显著。例如，卢旺达保护性农业研究学校在建造过程中的材料获取和加工均在当地完成，96% 的材料在境内采购，使得整体项目的碳排放量低于全球标准的 44%[31]。除此之外，选择低碳环保材料也十分重要。一方面可以通过使用高反射率的涂料和保温材料，以及叶片具有较高反射率的植物 [32]，减少热量吸收，降低环境维持能耗；另一方面可以尽量选择木材、碎石、软性铺装等低碳环保材料。此外，新型的现代智能材料也具有诸多减碳优势，如光纤维智能混凝土，由骨料和玻璃纤维共同组成，可以吸收太阳能，减少混凝土建筑外部保温材料的使用 [3]，减少室内环境维护的能耗；重型木结构可替代钢铁和混凝土，其生产过程利用的是可再生资源，具有较高的减排效益 [16]。

对于物流和施工过程的减碳同样不容忽视。2020 年中国移动源环境管理年报表明，我国交通运输行业二氧化碳排放量占道路交通排放量的 84.1%，合理组织运输工具、减少运输过程扬尘、错峰分段运输将有效减少运输过程的碳排 [33]。此外，在园林工程中，通过更合理的施工人员调配和各项工程流程的优化，同时采用模块化的建造单元 [34]，能够提高建造效率，提高资源循环利用效率。

1.3 维护阶段

在维护减源方面，植物的移植、灌溉、施肥措施所产生的碳排放较大，其中灌溉导致的碳排最高 [35]。绿地灌溉的主要碳排来自水车油耗，而非自来水 [36]。因此，在维护过程中，宜使用节水措施，尽可能就近取水，并建议优先选择节水耐旱型的乡土植物，尽量减少化学肥料使用和不必要的移植 [37]。另外，尽可能选择粗放的植物管理方式，这种方式不仅能够降低养护过程中的碳排，还能够提升植物群落的生物多样性，促进其稳定发展，提高植物碳汇能力 [38]。此外，还可以建立智慧园林绿化综合监管平台（图 3），优化管理流程，提高维护效率，减少碳排。例如，实时动态采集绿化管养人员和车辆的位置，对其进行合理调配；也可以运用物联网技术，在绿地中安装传感设备，动态获取绿地环境的指标数据，提高养护效率 [39-40]。

2 提升园林绿地要素碳汇能力的途径

城市园林绿地可以通过光合作用将大气中的 CO_2 吸收并固定在植被与土壤当中，主要包括植物碳汇、土壤碳汇和水体碳汇 3 种类型 [41]（表 2）。

2.1 植物碳汇

生物多样性高的植物群落有益于提高自身碳汇 [42]，同时也能提高土壤的碳汇能力。绿地面积、植物组成结构、竖向层次结构、群落密度等因素 [43] 都会影响植物碳汇。不同类型的植物碳汇能力差异较大 [44]，设计中优先选择乡土植物，可获得更高的碳汇效率 [45]，同时也能够减少维护成本 [43]。通常情况下，乔木碳汇能力远高于灌木、草本和藤本；深根性植物的碳汇能力更强；幼中龄植物生长快，碳汇能力强，但达到成熟期后碳汇能力减弱。由此，打造复层 - 异龄 - 混交的立体植物群落 [43]，并引导群落自然演替，将有效保障植

表 2 园林绿地碳汇提升策略

Tab. 2 Strategies for carbon sink increase through green space

碳汇类型		设计措施	作用机理	潜在负面影响
植物碳汇	植物选择	采用本地高碳汇乡土植物	良好的本地适应性可以提高植物碳汇效能，同时有助于减少养护成本	碳汇能力高的植物可能美观性和实用性不高
		选择处于碳汇能力较强生长阶段的植物	植物因种类、年龄和人为干扰等影响，实际碳汇能力存在较大差异	
		采用深根性植物	促进植物群落生态系统稳定性，同时减缓土壤有机质损失	深根性植物需水量大，可能造成土壤缺水和土壤碳汇能力下降问题
		打造复层和自然演替的植物群落，提高植物多样性	增加生物多样性能提高生态系统的生产力，有助于提高植物和土壤碳汇能力	过分追求生物多样性高的植物群落，可能会增加维护阶段的碳排并造成植物群落碳汇能力下降
	植物利用	增加对植物废弃物的应用	植物废弃物经填埋、堆肥或其他景观利用途径，可以实现长期的储碳；制成生物炭还能够作为土壤有机质改良剂。可减少高昂的废物运输、处理成本和碳排放	植物废弃物由于种类多样，堆肥产能的过程较为复杂，且会产生额外碳排
		鼓励立体绿化	增加植物三维绿量，提高植物活力，增加碳汇	立体绿化需水量大，维护阶段碳排量较高
土壤碳汇		保护建造时间长的绿地	绿地建造时间的长短影响土壤碳汇能力，保护现状土壤可提高碳储量	
		建筑渣土、垃圾污泥等城市废弃物堆肥利用	堆肥熟化后的城市废弃物能增加土壤微生物含量，增加碳汇	
		施用生物炭	增加土壤有机碳，增加碳汇	
		人为恢复土壤生态系统	减少土壤有机质分解，保存碳储量	
		混合种植多年生草本植物	增加土壤碳储量	
		增加地被植物、绿篱等低矮植物比例	减少土壤有机质损失	
		增强岩石固碳、风化固碳	利用硅酸盐岩石加速自然风化固碳进程。硅酸盐岩石遇水时与大气中的 CO_2 反应，形成碳酸盐矿物	岩石开采和运输会产生较大碳排
		在绿地安装直接空气碳捕获装置	绿地作为承载固碳装置的空间，从空气中直接捕获 CO_2，并将 CO_2 转化后埋于地下	可能占用绿地面积，影响其他功能的有效发挥
水体碳汇		雨水截污处理	水体富营养化和酸化可能会减弱水体碳汇能力	
		建设湿地花园（含雨水花园），扩大水生植物种植面积	湿地环境能够抑制土壤中碳的分解	地下水位高、土壤渗透性差的地区易造成次生灾害，水中杂草和淤泥若处理不当，也将减少碳汇效益
		提升水生植物、岸线、土壤等生态功能	健康的水生态系统能够提高水中和水边的动、植物碳吸收量	

物碳汇的稳定性[38, 46]。例如，天津南翠屏公园通过塑造近自然的植物群落结构，植物群落的单位碳储量增加了近 3 倍[47]。

在植物利用方面，可以通过绿色屋顶、垂直绿化和增加地被植物等方式，实现减排增汇[38, 48-49]。当植物死亡后，会释放大量的碳[50]，因此合理保留并利用植物废弃物，也将有效管理场地中的碳元素，如将其作为建材、生物炭[51]，或埋在小丘中[52]，都能够实现长期储碳。

需要注意的是，碳汇效益高的植物景观可能也会造成养护阶段的高碳排放，过于强调营造植物多样性[53]、高密度的植物景观[54]和立体绿化[55]等设计措施，会在一定程度上增加需水量和养护投入。同时，植物废弃物再利用的处理流程较复杂，可能会带来较高的碳排量[56]。

2.2 土壤碳汇

土壤碳储量高出植被碳储量数倍[57]，是园林绿地固碳的主要途径。然而目前较多的碳汇研究主要关注园林植物和水体[10-12, 43]，土壤碳汇仍具有较大探索空间，需要引起更多的重视。

城市绿地建造时间的长短对土壤碳储量有较大的影响。一般来说，建造时间越长、群落郁闭度越高，林下土壤环境越有利于土壤碳储量增加[43]。提高土壤碳汇能力一方面需增加有机物的输入，另一方面需要降低土壤碳的分解[58]。前者可通过在土壤中添加生物炭[59]、垃圾污泥等城市废弃物、植物废弃物堆肥的方式，增加微生物固碳量。另外，还可以选择透水、透气性好的铺装材料促进碳元素进入土壤[60]。例如，华盛顿国家广场的草坪所用土壤选择了粗砂混合的方式，60% 的砂石用于抵抗压实，40% 的有机物用于维持草皮健康生长[61]，有效提升了土壤和植物的碳汇能力。此外，还可以通过人为恢复红树林湿地[62]、草地、森林[63]等生态系统，以及增加地被植物等方法，减少土壤有机质的分解和流失，保存土壤碳储量。

除此之外，土壤碳汇能力也受到植被类型的影响。研究表明，农田中适当的绿篱景观能够有效保护土壤碳储量[64]。混植多年生草本也能提高土壤碳储量，暖季型草和豆类植物的加入可以使土壤的固碳效益增加 193% 和 522%[65]。同时，园林绿地还可以作为固碳装置和固碳措施的承载空间。例如，在园林绿地中安装直接空气碳捕获装置，将空气中的 CO_2 泵入地下岩层，经过化学转化，完成长期固碳；还可以在土壤中增加硅酸盐岩石材料（如橄榄石或菱锰矿），这些岩石材料在遇水时可与 CO_2 发生反应，捕获 CO_2，加速自然风化固碳进程[16]（图 4）。

2.3 水体碳汇

由于矿物质会造成水体富营养化，影响碳汇能力，保持水体清洁是碳汇的基本条件[60]。生物滞留池、透水铺装、浅沟[66]、初雨弃流

4 利用硅酸盐岩石的土壤修复实践 [16]
Soil remediation practices using silicate minerals[16]

表 3 园林绿地间接减源策略
Tab. 3 Strategies for indirect carbon source reduction through green space

	设计措施	作用机理
强化低碳活动宣传与政策扶持	鼓励参与式营建和志愿者加入	引入更多城市居民参与建造和维护过程，培育城市环保群体，推广低碳理念
	举办低碳推广的公共科普活动	结合绿地环境提供多元、直观且有吸引力的展示途径，促进低碳理念传播
	推广低碳主题公园，引导低碳生活行为方式	鼓励低碳、健康的生活方式，倡导居民健康低碳行为
	编制全国统一的绿色基础设施指南	发挥政策导向作用，推动风景园林行业的减排行为
	设立国家城市绿色基础设施基金	发挥政策导向作用，提供资金支持，助力减碳
完善城市绿地系统，构建低碳城市	构建绿地与城市结构紧密融合的紧凑型城市	提升绿地对城市的生态系统服务功能，降低城市能源消耗，减少碳排
	均衡布局城市公园与街道绿地，加强道路、河道、绿地连通性	街旁绿地、公园绿地、道路绿地的碳汇效益各不相同，合理布局三类空间能够有效减源增汇
	完善绿道系统，引导慢行出行	改善慢行环境，提高慢行出行率，减少机动车交通使用量，同时促进碳汇
	增加公园服务覆盖范围，鼓励绿色室外生活	增加社区公园使用人群，减少室内能耗碳排
	规划风适应性街道和开放空间	提高绿地系统的空气流动，降低环境维持能耗
调节城市微气候，鼓励户外低碳生活	优化小微绿地建设，调节小气候，增加户外纳凉设施	提高小微绿地使用率，减少室内能耗碳排
	增加地面植被覆盖面积的比例	调节地表热辐射吸收，吸引人群进行户外活动，减少室内能耗碳排
	增加水景装置（池塘、喷泉、景观雾等）	降温增湿，吸引户外活动，减少室内能耗碳排

池 [67] 等收集方式能够防止雨水被污染，提升水体碳汇能力。健康水生境营造对水体碳汇来说更有意义。改善水下土壤、水生植物和浮游生物、岸线的生态功能，都能够提高水中及岸边带的生物多样性并且清洁水体 [60]。此外，湿地具有较高的碳汇价值 [68]，湿地中的水体、植物、土壤均会影响其碳汇能力 [69]。其中，雨水花园作为一种特殊的人工湿地类型，其固碳量几乎可以全部抵消其建造过程中的碳足迹 [70]，应用价值高。需要注意的是，宜谨慎选择湿地花园的应用地点 [71]，并妥善处理其中的水生杂草和池底淤泥，否则碳汇效益将被减弱 [72]。

3 提升园林绿地间接减源作用的途径

园林绿地除了可以发挥直接的减源和碳汇功能以外，还可以发挥一系列间接减源的功能（表 3），后者的效益巨大，但在相关研究和实践中往往被忽视。

3.1 强化低碳活动宣传与政策扶持

园林绿地作为改变居民生活方式的重要媒介，可以发挥出一系列社会引导效益，让更广泛的城市居民投入减碳行动。值得注意的是，居民的低碳意识才是缓解气候问题的关键。参与式设计能有效减少人员和建设、维护的碳足迹，还有助于激发社区参与度，构建具有生产力的社区，从而实现社区的自我服务，甚至服务其他社区 [73]。结合园林绿地开展多元、直观和有吸引力的展览宣传，能有效帮助构建低碳社会 [74-75]。例如，天津低碳创意花园展，通过举办以低碳创意生活为主题的展览，利用废弃材料实现园内 7 个节点的低碳化更新。节点更新后的平均减碳量达 53%[47]，同时扩大了低碳理念的影响力和传播力 [76]。此外，还可以建设低碳主题公园，建立公园低碳行为体系，创造更生动的科普体验。例如，北京温榆河公园纳入低碳行为地图，结合特色景点，让公众收集“碳积分”并用于兑换园内服务，以达到科普宣传目的 [77]。

当前，“双碳”目标下的园林绿地建设政策、规划设计、标准和奖惩制度都不够严谨和完善，导致效能不确定性增加。加强碳中和目标下的风景园林的政策研究，为中国碳中和园林的建设提供充足的保障，已经成为未来重要趋势。国外已经较早地展开了相关研究，如通过共同制定城市绿色基础设施计划来保障园林绿地碳汇能力，建立全国统一的城市绿色基础设施指南，设立国家城市绿色基础设施的相关基金等 [78-79]。

3.2 完善城市绿地系统布局，构建低碳城市

将低碳理念引入规划阶段，开展以生态绿地空间为本位的低碳规划 [80]，构建绿地与城市结构紧密融合的紧凑型城市。在慢行城市设计中可以构建完善的绿道系统，让绿地更好地发挥碳汇功能，同时促进微生物等生物流实现迁徙和能量交换 [81]，还可以通过增设口袋公园，重新分配街道中的步行、骑行和社交活动的空间，活化城市街道标识系统等措施来提升慢行质量，优化慢行路线的可识别性、渗透性和安全性以提升慢行出行率，从而达到降低居民出行碳排放的目标。

构建碳中和理念的城市绿地系统需要对各种绿地进行合理规划。有利于空气流动的绿地系统布局，可以有效改善微气候，降低城市环境维持的能耗 [2]。合理的绿地系统在白天能够利用盛行风向促进空气流通，在夜晚

能够利用城市中流动的冷空气驱散积累的热量。此外，由于街旁绿地、公园绿地、道路绿地在不同条件下碳汇效益存在差异，设计师需要合理安排不同绿地的布局和连接关系，从而发挥更显著的碳汇功能[82]。在公园绿地的规划中应依据居民的出行行为和意向，使公园布局与出行意向相契合，提升低碳游憩出行率。在规划过程中，增加社区公园服务覆盖范围，对优化统筹绿地系统布局，强化碳汇效益有很大帮助[83]。

3.3 调节城市微气候，鼓励户外低碳生活

良好的微气候能够降低环境的能源消耗，增强户外环境吸引力，在间接减碳上发挥出特色优势[84-85]。公园的选址、朝向、铺装、水面和植物配置等情况都对绿地微气候有不同程度的影响[86-88]。在具体设计时，可以利用一定程度的绿化遮阴来降低地表热辐射吸收[89-91]。不仅如此，还可以引入多种水景装置，如池塘、喷泉、景观雾等，并调节乔木覆盖率、开敞空间数量和新增水面率等改善微气候，提高热舒适性[92]。与此同时，在一些服务半径较小的绿地中增设户外纳凉设施，为居民就近提供舒适便捷的户外休息空间。这些措施都能够鼓励居民参与户外活动，降低室内环境维护所产生的碳排。例如，美国得克萨斯州圣丹斯广场的沃思堡之心[93]，通过使用可调节的遮阳伞，有效地降低了中午的路面温度，而在凉爽的天气里，让阳光充分温暖地面，对周边居民产生了巨大的吸引力。

4 结语

通过对目前相关研究成果、研究报告和实践案例的系统梳理，本研究提出了园林绿地发挥“碳中和功能”55项主要技术措施和作用机理。由于规划设计策略属于基本的减源、增汇技术措施，设计师需要根据不同的设计条件进行创造性地使用，也可将不同措施叠加运用，实现更综合的碳中和效益。此外，不同的技术方法在不同的气候条件下产生的效能会存在显著差异，需根据实际情况选择具体措施。同时，也需要谨慎评估不同措施的负面影响，适度地进行应用。

随着碳中和研究的不断深入，相关学科研究成果将为风景园林实践提供更广泛和先进的技术支撑，规划设计策略也将得到进一步扩展。风景园林尤其应当发挥自身优势，将公园绿地作为先进技术展示和综合示范的平台，开发多类型的碳汇测量估算方法，并结合本土数据测量建立碳汇数据库，完成园林绿地监测和评估，开展更加精细化的减源、增汇技术措施研究，成为城市碳中和能力提升的空间载体和社会低碳生活引导的催化剂。

参考文献 (References)：

[1] 刘长松 . 气候变化背景下风景园林的功能定位及应对策略 [J]. 风景园林，2020，27（12）：75-79.

[2] 巴奈特 . 气候变化如何改变城市设计 [J]. 风景园林，2021，28（8）：10-17.

[3] 沈清基，洪治中，安纳 . 论设计气候效应：兼论气候变化下的设计应对策略 [J]. 风景园林，2020，27（12）：26-31.

[4] LEITZELL K. Climate Change Widespread, Rapid, and Intensifying: IPCC[EB/OL]. (2021-08-09)[2021-09-27]. https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/.

[5] 刘中民 . 绿色发展的必由之路 [N]. 人民日报，2021-08-13（20）.

[6]. Landscape Architecture Foundation (LAF). Climate Positive Design[EB/OL].[2021-09-27]. https://www.lafoundation.org/resources/2019/12/climate-positive-design.

[7] 孙松林 . 基于气候因子分析的风景园林设计策略研究 [D]. 北京：北京林业大学，2015.

[8] 吴碧晨 . 城市户外活动空间气候适应性设计研究进展 [D]. 西安：西安建筑科技大学，2016.

[9] AHERN J, CILLIERS S, NIEMELÄ J. The Concept of Ecosystem Services in Adaptive Urban Planning and Design: A Framework for Supporting Innovation[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 254-259.

[10] 钟乐，王伟峰，龚鹏，等 . 风景园林建设中“低碳理念”的实践途径 [J]. 江西科学，2015，33（3）：396-401.

[11] 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.

[12] 王贞，万敏 . 低碳风景园林营造的功能特点及要则探讨 [J]. 中国园林，2010，26（6）：35-38.

[13] 周慕云 . 上海市公园绿地碳汇研究：以中山公园为例 [J]. 物流工程与管理，2015，37（6）：160-161.

[14] 王迪生 . 基于生物量计测的北京城区园林绿地净碳储量研究 [D]. 北京：北京林业大学，2010.

[15] 谢军飞，李玉娥，李延明，等 . 北京城市园林树木碳贮量与固碳量研究 [J]. 中国生态农业学报，2007（3）：5-7.

[16] 施瓦茨，卡茨 . 设计师的地球工程“工具箱”：危机给予风景园林师扭转、修复和再生地球气候的机会 [J]. 风景园林，2020，27（12）：10-25.

[17] 冯为为 . 自然采光 无电照明：东方风光绿色建筑节能技术开启零碳未来 [J]. 节能与环保，2016（1）：46-48.

[18] REY-HERNÁNDEZ J M, TEJERO-GONZÁLEZ A, VELASCO-GÓMEZ E. IAQ Improvement by Smart Ventilation Combined with Geothermal Renewable Energy at nZEB[J]. Environmental Sciences Proceedings, 2021, 9(1): 7.

[19] 史琰，葛滢，金荷仙，等 . 城市植被碳固存研究进展 [J]. 林业科学，2016，52（6）：122-129.

[20] SKELHORN C, LEVERMORE G, LINDLEY S. Impacts on Cooling Energy Consumption Due to the UHI and Vegetation Changes in Manchester, UK[J]. Energy and Buildings, 2016, 122: 150-159.

[21] 卞晴，赵晓龙，刘笑冰 . 水体景观气候调节性研究进展与展望 [J]. 风景园林，2020，27（6）：88-94.

[22] 马恩朴，蔡建明，林静，等 . 国外城市农业的角色演变、潜在效益及其对中国的启示 [J]. 世界地理研究，2021，30（1）：136-147.

[23] PERTH K. Sustainable Design and Zero Carbon Development Supplementary Guidance[EB/OL]. (2014-04)[2021-09-27]. https://www.pkc.gov.uk/media/24773/Sustainable-Design-SPG/pdf/P_K_Sustainable_Design_SPG_Corrected_Version.

[24] 王雪 . 哈尔滨市节水型园林绿地设计研究 [D]. 哈尔滨：东北农业大学，2013.

[25] WARD S, BUTLER.D, MEMON F. Benchmarking Energy Consumption and CO2 Emissions from Rainwater-Harvesting Systems: An Improved Method by Proxy[J]. Water and Environment Journal, 2012, 26: 184-190.

[26] 方精云 . 碳中和的生态学透视 [J]. 植物生态学报，2021，45（11）：1173-1176.

[27] 徐昉 . 德国景观规划应对气候变化策略 [J]. 风景园林，2020，27（12）：63-68.

[28] 刘文平，陈倩，黄子秋 . 21世纪以来风景园林国际研究热点与未来挑战 [J]. 风景园林，2020，27（11）：75-81.

[29] SONG C, PORTER A, FOSTER J. iTree: Efficiently Discovering High-Coverage Configurations Using Interaction Trees[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2014, 40(3): 251-265.

[30] 东南大学 . 东禾建筑碳排放计算分析软件 [EB/OL].（2022-03-25）[2022-03-28].http://seuicc.com:8080/#/.

[31] ASLA. Rwanda Institute for Conservation Agriculture (RICA)[EB/OL]. [2021-09-27]. https://www. asla. org/2020awards/397. html.

[32] KALA J, HIRSCH A. Could Crop Albedo Modification Reduce Regional Warming over Australia?[J]. Weather and Climate Extremes, 2020, 30: 100282.

[33] 朱俊丽 . 城市建筑业绿色物流发展对策研究 [J]. 广西经济管理干部学院学报，2017，29（2）：39-43.

[34] 罗宇杰工作室 . 骆驼湾村廊架，河北：山村旧房废木的再利用 [EB/OL].（2018-12-03)[2021-09-27]. https://www.gooood.cn/pergola-in-luotuowan-village-china-by-luo-studio.htm.

[35] PARK H M, JO H K, KIM J Y. Carbon Footprint of Landscape Tree Production in Korea[J]. Sustainability, 2021, 13(11): 5915.

[36] 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.

[37] 叶宏 . 全球气候变化背景下低碳园林设计与营造研究 [D]. 北京：北京林业大学，2015.

[38] LYNN D. Landscape Design for Carbon Sequestration[EB/OL]. (2020-07-06)[2021-09-27]. https://issuu. com/dmlynn/docs/lynn_mla_project.

[39] 宋建强，赵让，张明亮 . 感知能耗 智慧监管：江南大学数字化能源监管平台建设探索及实践 [J]. 高校后勤研究，

2018（6）：50-54.
[40] 师卫华，季珏，张琰，等 . 城市园林绿化智慧化管理体系及平台建设初探 [J]. 中国园林，2019，35（8）：134-138.
[41] 许信旺，方金生，张永兰 . 园林绿地固碳能力分析与研究进展 [J]. 安徽农业科学，2017，45（26）：58-62.
[42] FANG J, YU G, LIU L, et al. Climate Change, Human Impacts, and Carbon Sequestration in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(16): 4015.
[43] 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.
[44] 刘路阳 . 北方几种城市绿化树种碳汇能力研究 [D]. 天津：天津理工大学，2012.
[45] WALLER L P, ALLEN W J, BARRATT B I P, et al. Biotic Interactions Drive Ecosystem Responses to Exotic Plant Invaders[J]. Science, 2020, 368(6494): 967-972.
[46] 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.
[47] 王洪成，李佳滢 . 探索以低碳为导向的城市公园更新路径 [J]. 景观设计，2021（4）：30-35.
[48] ZAID S M, PERISAMY E, HUSSEIN H, et al. Vertical Greenery System in Urban Tropical Climate and Its Carbon Sequestration Potential: A Review[J]. Ecological Indicators, 2018, 91: 57-70.
[49] SONG U, KIM E, J BANG J H, et al. Wetlands are an Effective Green Roof System[J]. Building and Environment, 2013, 66: 141-147.
[50] MCPHERSON E, KENDALL A. A Life Cycle Carbon Dioxide Inventory of the Million Trees Los Angeles Program[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(9): 1653-1665.
[51] 温家石，葛滢，焦荔，等 . 城市土地利用是否会降低区域碳吸收能力？：台州市案例研究 [J]. 植物生态学报，2010，34（6）：651-660.
[52] MORONI M T, MORRIS D M, SHAW C, et al. Buried Wood: A Common Yet Poorly Documented Form of Deadwood[J]. Ecosystems, 2015, 18(4): 605-628.
[53] 胡涛 . 西安城市两类生境花园的设计与实践研究 [D]. 西安：西安建筑科技大学，2015.
[54] 包志毅，马婕婷 . 试论低碳植物景观设计和营造 [J]. 中国园林，2011，27（1）：7-10.
[55] 许小东 . 泸州市城市立体绿化应用现状与对策 [D]. 雅安：四川农业大学，2014.
[56] SHI Y, GE Y, CHANG J, et al. Garden Waste Biomass for Renewable and Sustainable Energy Production in China: Potential, Challenges and Development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 22: 432-437.
[57] 张伟畅，盛浩，钱奕琴，等 . 城市绿地碳库研究进展 [J]. 南方农业学报，2012，43（11）：1712-1717.
[58] 王凡，廖娜，曹银贵，等 . 基于生物炭施用的土壤改良研究进展 [J]. 新疆环境保护，2020，42（2）：12-23.
[59] 钱新锋，赏国锋，沈国清 . 园林绿化废弃物生物质炭化与应用技术研究进展 [J]. 中国园林，2012，28（11）：101-104.
[60] 翁许凤 . 基于碳汇理念下的城市景观生态设计应用研究 [D]. 天津：天津大学，2012.
[61] ASLA. Designing, Implementing, and Managing Improvements to the National Mall[EB/OL]. [2021-09-27]. https://www.asla.org/2020awards/584.html.
[62] 张莉，郭志华，李志勇 . 红树林湿地碳储量及碳汇研究进展 [J]. 应用生态学报，2013，24（4）：1153-1159.
[63] 廖明蓉，邵景安，郭跃，等 . 重大森林恢复计划下的碳增汇效应：基于石柱县两次森林资源二类清查的分析 [J]. 生态学报，2014，34（16）：4707-4719.
[64] DREXLER S, GENSIOR A, DON A. Carbon Sequestration in Hedgerow Biomass and Soil in the Temperate Climate Zone[J]. Regional Environmental Change, 2021, 21(3): 74.
[65] FORNARA D A, TILMAN D. Plant Functional Composition Influences Rates of Soil Carbon and Nitrogen Accumulation[J]. Journal of Ecology, 2008, 96(2): 314-322.
[66] 张伟，车伍，王建龙，等 . 利用绿色基础设施控制城市雨水径流 [J]. 中国给水排水，2011，27（4）：22-27.
[67] 姜利杰，周焕，周慧慧，等 . 初期雨水污染控制的弃流系统研究 [J]. 低温建筑技术，2016，38（6）：131-133.
[68] BERNAL B. Carbon Sequestration in Natural and Created Wetlands[D]. Columbus: The State of Ohio University, 2012.
[69] 潘宝宝 . 洪泽湖湿地水生植物群落碳储量研究 [D]. 南京：南京林业大学，2013.
[70] KAVEHEI E, JENKINS G A, ADAME M F, et al. Carbon Sequestration Potential for Mitigating the Carbon Footprint of Green Stormwater Infrastructure[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 94: 1179-1191.
[71] 弓亚栋 . 建设海绵城市的研究与实践探索 [D]. 西安：长安大学，2015.
[72] 王绍增 . 低碳的疑惑与解读 [J]. 中国园林，2011，27（1）：1-6.
[73] 侯晓蕾，疏伟慧 . 微花园 · 微更新 · 微生态：基于社区营造的北京老城区胡同绿色景观环境提升途径探索 [J]. 中国艺术，2020（2）：24-29.
[74] BYRNE J A, LO A Y, YANG J J. Residents' Understanding of the Role of Green Infrastructure for Climate Change Adaptation in Hangzhou, China[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 138: 132-143.
[75] SHEPPARD S R J. Making Climate Change Visible: A Critical Role for Landscape Professionals[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 142: 95-105.
[76] 王洪成，杨宁 . 低碳发展与合作创新：天津低碳创意花园的建设与管理运营 [J]. 中国园林，2018，34（S2）：34-38.
[77] 黄通，曹悦，刘峰 . 碳中和主题公园：北京温榆河公园 · 未来智谷（一期）设计探索与实践 [J]. 风景园林，2022，29（5）：59-63
[78] MARTIN C. Viewpoint: Climate Positive Design: It's Time[EB/OL]. (2021-02-02)[2021-09-27]. https://landscapeaustralia. com/articles/viewpoint-climate-positive-design-its-time/.
[79] MATTHEWS T, LO A Y, BYRNE J A. Reconceptualizing Green Infrastructure for Climate Change Adaptation: Barriers to Adoption and Drivers for Uptake by Spatial Planners[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 138: 155-163.
[80] 戴星翼，陈红敏 . 城市功能与低碳化关系的几个层面 [J]. 城市观察，2010（2）：87-93.
[81] 李方正，张云路，李雄 . 低碳视角下的迁安绿道评价及优化策略研究 [J]. 动感（生态城市与绿色建筑），2014（3）：114-118.
[82] 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.
[83] 骆天庆，李维敏 . 高机动化水平下的公园步行到访及其意向分层：洛杉矶市的启示 [J]. 同济大学学报（社会科学版），2018，29（1）：66-74.
[84] BOWLER D E, BUYUNG-ALI L, KNIGHT T M, et al. Urban Greening to Cool Towns and Cities: A Systematic Review of the Empirical Evidence[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 97(3): 147-155.
[85] MAO D, LIU Y P, WANG F Z, et al. Growth Trend Analysis of Carbon Dioxide (CO_2) Emissions and Urban Green Open Spaces: A Case Study of Henan, China[J]. Oxidation Communications, 2016, 39(4): 3305-3312.
[86] TOPARLAR Y, BLOCKEN B, MAIHEU B, et al. The Effect of an Urban Park on the Microclimate in Its Vicinity: A Case Study for Antwerp, Belgium[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(S1): e303-e322.
[87] LI X M, ZHOU W Q, OUYANG Z Y, et al. Spatial Pattern of Greenspace Affects Land Surface Temperature: Evidence from the Heavily Urbanized Beijing Metropolitan Area, China[J]. Landscape Ecology, 2012, 27(6): 887-898.
[88] LAI D Y, LIU W Y, GAN T T, et al. A Review of Mitigating Strategies to Improve the Thermal Environment and Thermal Comfort in Urban Outdoor Spaces[J]. Science of the Total Environment, 2019, 661: 337-353.
[89] DJEKIC J, MITKOVIC P, DINIC BRANKOVIC M, et al. The Study of Effects of Greenery on Temperature Reduction in Urban Areas[J]. Thermal Science, 2018, 22: 988-1000.
[90] NG E, CHEN L, WANG Y N, et al. A Study on the Cooling Effects of Greening in a High-Density City: An Experience from Hong Kong[J]. Building and Environment, 2012, 47: 256-271.
[91] HAMADA S, OHTA T. Seasonal Variations in the Cooling Effect of Urban Green Areas on Surrounding Urban Areas[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2010, 9(1): 15-24.
[92] 刘珂秀，马椿栋，陈威，等 . 面向小气候热舒适性的滨水景观规划设计探索 [J]. 风景园林，2020，27（11）：104-109.
[93] ASLA. Sundance Square Plaza, The Heart of Fort Worth[EB/OL]. [2021-09-27]. https://www.asla.org/2019awards/634763-Sundance_Square_Plaza_The_Heart_Of_Fort_Worth.html.

图表来源 (Sources of Figures and Tables)：

图 1 由作者绘制；图 2 翻译自参考文献 [6]；图 3 来自 Central Park Conservancy；图 4 引自参考文献 [16]；表 1~3 由作者绘制。

（编辑 / 王一兰）