

嵇雨桐, 林添悻, 刘恋, 李雄. 城市公园绿地碳汇能力影响因素的网状荟萃 (Meta) 分析[J]. 风景园林, 2025, 32 (1): 23-31.

城市公园绿地碳汇能力影响因素的网状荟萃 (Meta) 分析

嵇雨桐 林添悻 刘恋 李雄*

摘要: 【目的】城市公园绿地为人类提供与健康福祉密切相关的多种生态系统服务, 具备生态、社会、经济多重效益, 其碳汇能力受多个影响因素控制。综合评估多个因素对城市公园绿地碳汇能力的影响, 以此探讨低碳城市公园设计策略的最优解。【方法】以“碳汇”“公园”等为关键词进行文献检索, 使用网状荟萃 (Meta) 分析对城市公园绿地碳汇能力的不同影响因素进行系统性定量评估, 并根据其影响大小进行分类统计。通过基于网络证据图的影响因素重要性评估、基于联赛表的相对影响能力分析、基于累积排序概率曲线下面积 (surface under the cumulative ranking curves, SUCRA) 图的综合影响能力分析, 综合评估不同影响因素对城市公园绿地碳汇能力的实际作用, 并结合亚组分析和漏斗图评估研究样本的异质性、误差及偏倚。【结果】共检索 952 篇文献, 纳入 50 篇有效文献, 提取 34 个城市公园绿地碳汇能力的关键影响因素, 划分为设计形态、生境组成、种植方式、管护形式、外部环境五大聚类。其中, 设计形态和管护形式对于提升城市公园绿地碳汇能力效果稳定, 适用性较强, 是提升碳汇能力的基础因素; 生境组成和种植方式在特定场景下提升碳汇能力效果显著, 但受场地特征限制; 外部环境对城市公园绿地碳汇能力的直接影响较弱。【结论】城市公园绿地碳汇能力受多种因素共同作用, 在以碳汇为导向的设计方案中, 应优先考虑优化设计形态和管护形式, 根据场地实际条件灵活调配不同的生境组成和种植方式, 并适当考虑外部环境的影响。

关键词: 风景园林; 公园绿地; 碳中和; 荟萃分析; 全生命周期

基金项目: 北京林业大学 2024 年度“双一流”建设项目-科技成果转化应用示范基地建设计划; 北京市共建项目专项资助

中图分类号: TU986

文章编号: 1673-1530(2025)01-0023-09

收稿日期: 2024-08-30

文献标识码: A

DOI: 10.3724/j.fjyl.202408300495

修回日期: 2024-12-04

文章亮点:

- 1、通过对比目前研究中多种元素的实际碳汇能力, 识别不同类型景观策略产生正向影响的效果等级, 以此判断碳中和目标下城市公园设计中运用不同设计元素的优先级。
- 2、首次使用网状 Meta 分析对 3 个及以上的城市公园绿地碳汇能力影响因素统计结果进行合并分析, 横向对比相关文献研究数据, 更综合、全面地探讨提升城市公园绿地碳汇能力设计策略的最优解。

1 研究背景

1.1 城市公园绿地碳汇相关研究进展

随着全球气候问题日益严重, “双碳”目标已成为全球共识。风景园林作为人居环境学科的重要组成部分, 如何将传统造园手法转变为“气候适应型”园林设计模式, 成为当今城市可持续发展趋势下不可避免的问题^[1]。城市公园绿地作为城市中近乎自然的生态空间^[2], 能够在绿化面积有限的高密度城区内部发挥重要的固碳释氧作用^[2-6]。城市公园绿地是同时提供游憩娱乐与生态涵养功能的高价值区域, 也是需要同时平衡 CO₂ 吸收与排放的高警示地段^[4]。自 Pocock^[7] 于 2007 年首次明确公园内部各阶段碳排来源以来, 国内外学者开始对城市公园绿地如何适应气候变化、平衡碳汇碳排展开研究^[8-9], 在植物配置、地形营造、材料选用等方面总结低碳园

林设计策略与建设思路^[8-11], 从对城市公园绿地低碳设计策略的定性探讨过渡至对公园固碳释氧功能的定量统计^[12-13], 以量化手段评估城市公园绿地的增汇减排效能。

目前城市公园绿地碳汇相关研究主要集中在公园碳汇碳排量、低碳营建模式探讨、全周期碳绩效评估等方面, 总体呈现评估标准全面化、计量手段智能化、评估类型精细化的研究趋势。在碳汇碳排量方面, 由最初以单株乔木、群落固碳量测算为主^[14], 发展至针对公园整体的碳汇净值测算^[15-17]; 在低碳营建模式探讨方面, 从增植高固碳树种、丰富群落层次结构等直接增汇形式^[18], 发展至循环利用再生资源、宣教低碳环保意识等间接增汇减排手段^[19]; 在公园全周期碳绩效评估方面, 工程机械过度使用等问题已被发现是导致部分公园成为碳源而非碳汇介质的诱因

之一^[4], 因此已有学者开始统筹考虑公园在设计建造全过程中的碳汇与碳源的平衡方式, 定量分析优质可持续建设项目的增汇减排效能与设计策略的关系, 以此构建城市公园绿地碳绩效评估体系^[20], 为设计师在进行低碳公园设计时提供数据支持。

1.2 城市公园绿地碳汇能力影响因素

目前有关碳汇能力的探讨主要集中在森林、湿地、草原等层面^[21], 针对城市公园绿地碳汇能力影响因素的研究仍处于探索阶段^[22]。城市公园绿地为人类提供与健康福祉密切相关的多种生态系统服务, 具备生态、社会、经济多重效益, 是一个多因素协同驱动的复杂系统^[23]。因此, 城市公园绿地碳汇能力的影响因素比森林的更复杂^[24], 主要原因有以下两点。1) 城市公园绿地碳汇能力的驱动机制复杂, 受公园类型、公园规模、建造阶段、设

计元素、气体流通方式、与绿地系统关联度等多主体影响^[25-27]。例如,小型社区公园为满足居民周末在公共场所进行娱乐活动的需求,其硬质铺装比例更高,相比于拥有更充足种植空间的大型综合公园,小型社区公园的碳汇能力较弱;然而,大型公园在建造阶段使用了过多的机械施工或运输手段,甚至可能成为城市中的碳源,从该角度来看,小型社区公园多采用以人工为主的劳动密集型施工技术,碳排放量将更少^[28]。2)城市公园绿地碳汇能力通常随植物生长而发生变化^[29],因此,如郁闭度^[30]、植株树龄^[31]等影响因素的变化对城市公园绿地碳汇能力的影响存在阈值或非线性关系。

综上所述,城市公园绿地内部的影响因素较为复杂,目前已有专家尝试定性总结低碳策略、建立评估指标,以专家打分等方式确定不同影响因素的权重^[32]。本研究将不同学者的定量分析结论汇总,将针对公园绿地碳汇能力某单一影响因素的实际效能的多个研究有机整合,统筹评估城市公园绿地这一复杂系统内部不同影响因素间的相互作用。因此,引入网状荟萃(Meta)分析对城市公园绿地碳汇能力的多个影响因素进行系统性定量评估,根据其影响大小进行分类统计。通过对比不同设计要素的实际碳汇能力,识别出最优的景观设计策略,为进一步构建城市公园绿地全生命周期设计策略知识库提供数据基础。

2 研究方法与数据来源

2.1 网状 Meta 分析

Meta 分析(Meta-analysis),也被称为荟萃分析、汇总分析、集成分析等,是指将多个研究结果进行定量合并分析的统计方法^[33]。Meta 分析是提供针对某一特定问题的合成型研究证据的最佳手段^[34],早期在医学研究领域被广泛运用,后延伸至教育、心理、农业、生态、经济等领域^[35-37]。Meta 分析在景观、规划等人居环境学科的应用仍处于起步阶段,以环境对人体身心健康^[38]、体力活动影响^[39]等研究为主。网状 Meta 分析被认为是传统 Meta 分析的改进方法,能够从传统

Meta 分析两两对比的统计方法,扩展为 3 个以上干预措施/影响因素同时比较,进而对同一证据体的所有干预措施/影响因素进行综合评价^[40]。为进一步比较不同要素的减碳效益,本研究通过网状 Meta 分析对城市公园绿地碳汇能力的多个影响因素统计结果进行合并分析,同时比较 3 个以上影响因素发挥的实际作用,以此弥补相关研究文献中影响因素样本量不足的局限,更综合、全面地探讨提升城市公园绿地碳汇能力设计策略的最优解。

2.2 文献筛选与质量评价

本研究所用数据均整理自中国知网(CNKI)和 Web of Science(WoS)核心合集数据库中已公开发表的所有学术论文,为增加样本统计量,同时将期刊论文、学位论文纳入检索范围。在中国知网(CNKI)进行检索,以“碳汇/固碳/碳储量/碳中和”“公园/城市公园/城市绿地”“设计/规划/景观设计/风景园林/策略”为关键词,文献发表时间范围设置为 2000 年 1 月 1 日至 2024 年 10 月 1 日,共检索到文献 168 篇,无重复文献;在 WoS 核心合集数据库进行高级检索,以“carbon sequestration/carbon sink/carbon storage/carbon absorption”“parks/urban park”“design/planning/landscape/strategy”为关键词,文献发表时间范围设置为 2000 年 1 月 1 日至 2024 年 10 月 1 日,共检索出 811 篇,其中 27 篇重复。共获得 952 篇有效文献用于网状 Meta 分析。

由 2 名研究人员基于 Meta 分析报告规范的 PRISMA 2020 声明进行文献筛选,如有分歧则与第 3 名研究人员协商解决。使用 EndNote 21.2 软件删除重复文献,通过阅读题目和摘要,初步排除研究主题与绿地碳汇无关的文献,无关文献包括综述及科普书籍(57 篇)、政府文件及新闻(14 篇)、动物研究(30 篇)、材料性能(41 篇)、节能发电(119 篇)、化学药剂(76 篇)、建筑工程(22 篇),以及与沙漠、海洋、湖区、农田、矿区、灾后重建等相关的碳汇研究(115 篇),初步排除后得到 478 篇文献。再次阅读全文复筛,排除研究范围非城市绿地(175 篇)、研究对象非城市公园(62 篇)

的文献后,得到 241 篇文献。为了进一步提高本研究纳入文献的数据质量,再次阅读全文终筛,排除研究对象仅为单个公园(82 篇)、研究方法非定量(51 篇)、评估指标非碳汇能力影响因素(58 篇)的文献,最终纳入 Meta 分析的合格文献有 50 篇^[28-30, 41-87]。

2.3 数据处理

纳入的 50 篇文献均未采用随机分配的方式,使研究对象接受不同的干预措施^[88],为分析不同设计策略对城市公园绿地碳汇能力的影响差异,均选取观察性研究中的案例对照研究。由于部分文献缺少均数、标准差等数据,为便于统计,笔者将每篇纳入文献的原始数据统一处理为二分类变量,并定义了“有效汇碳率”,以此制定影响碳汇能力不同因素的评定标准。二分类变量数据包括事件数和样本总数,其中样本总数为纳入文献中可计数的城市公园绿地样本数量,事件数评判依据为按照研究对象的亚组特征分为公园规模(a)、功能特征(b)、气候类型(c)3 个部分。其中,公园规模分为 10 hm² 以上(a1)、1~10 hm² (a2)、1 hm² 以下(a3);功能特征分为自然游赏(b1)、日常休闲(b2)、主题体验(b3);气候类型分为热带(c1)、亚热带(c2)、温带(c3)、寒带(c4)。

设 E_i 为第 i 个影响因素的碳汇效应量,设 $\bar{E}$ 为所有影响因素碳汇效应量的均值。将第 i 个影响因素的有效汇碳率(R_i)定义为

$$R_i = \frac{E_i}{\bar{E}}, \quad (1)$$

当 $R_i > 1$ 时,认为该影响因素能够对提升城市公园绿地碳汇能力产生积极影响,计入事件数;当 $R_i \leq 1$ 时,认为该影响因素在汇碳方面是无效的,不计入事件数。

2.4 统计分析

本研究采用 Stata/MP 15.1 软件进行网状 Meta 分析,通过网络证据图直观对比不同影响因素的研究样本量;选择相对效应(odds ratio, OR)值及 95% 置信区间(credible intervals, CI)作为效应指标,并通过联赛表比较研究中不同干预措施之间的相对效果;以累积排序概率曲线下面积(surface under

表1 碳汇能力影响因素聚类
Tab. 1 Clustering of influencing factors of carbon sink capacity

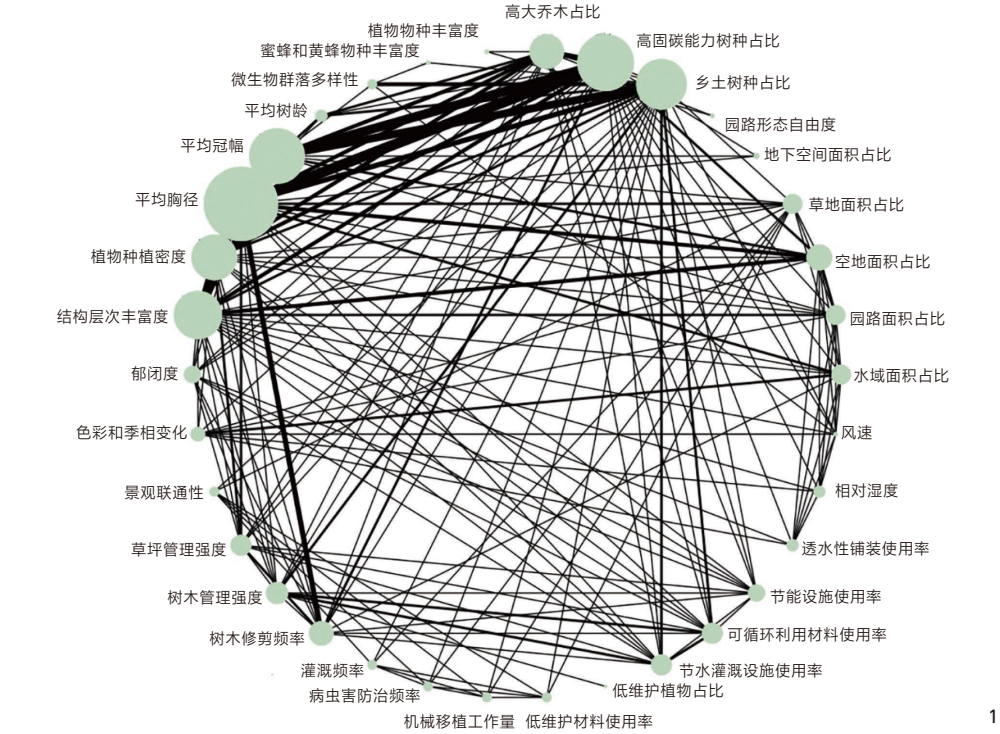
聚类名称	聚类编号	影响因素	影响因素编号
设计形态	A	水域面积占比	A1
		园路面积占比	A2
		空地面积占比	A3
		草地面积占比	A4
		地下空间面积占比	A5
		园路形态自由度	A6
生境组成	B	乡土树种占比	B1
		高固碳能力树种占比	B2
		高大乔木占比	B3
		植物物种丰富度	B4
		蜜蜂和黄蜂物种丰富度	B5
		微生物群落多样性	B6
		平均树龄	B7
		平均冠幅	B8
		平均胸径	B9
种植方式	C	植物种植密度	C1
		结构层次丰富度	C2
		郁闭度	C3
		色彩和季相变化	C4
		景观联通性	C5
管护形式	D	草坪管理强度	D1
		树木管理强度	D2
		树木修剪频率	D3
		灌溉频率	D4
		病虫害防治频率	D5
		机械移植工作量	D6
		低维护材料使用率	D7
		低维护植物占比	D8
		节水灌溉设施使用率	D9
		可循环利用材料使用率	D10
		节能设施使用率	D11
		透水性铺装使用率	D12
外部环境	E	相对湿度	E1
		风速	E2

the cumulative ranking curves, SUCRA) 为标准对城市公园绿地碳汇能力的影响因素进行排序。其中, SUCRA 值越大, 则表明该影响因素的减碳能力越好; 采用散点漏斗图对文献发表偏倚风险进行评估, 根据散点分布是否对称判断是否出现发表偏倚。

3 研究结果

3.1 纳入文献信息分析

最终纳入研究的 50 篇文献大多发表于



1 城市公园绿地碳汇能力影响因素的网络证据图
Network evidence map of the influencing factors of carbon sink capacity of urban park green spaces

2010—2024 年, 近 5 年发文量显著增加, 表明不同国家和地区的学者对城市公园绿地碳汇能力的关注逐年增多。研究对象所在地大多位于中国, 涵盖北京、上海、杭州、成都、西安、武汉等主要城市, 这主要归因于近年来中国对“双碳”的关注及支持; 来自美国和相关研究数量也较多, 这说明发达国家在城市可持续发展方面也积累了一定的经验, 尤其是以首尔为主的韩国大型城市, 其在公园绿地碳汇计量及低碳策略方面取得较多成果^[2, 51, 60-61], 文献作者还来自加拿大、马来西亚、印度、伊朗等国家。研究对象主要包括综合公园、专类公园、社区公园、游园, 面积从 0.1~300 hm² 不等。

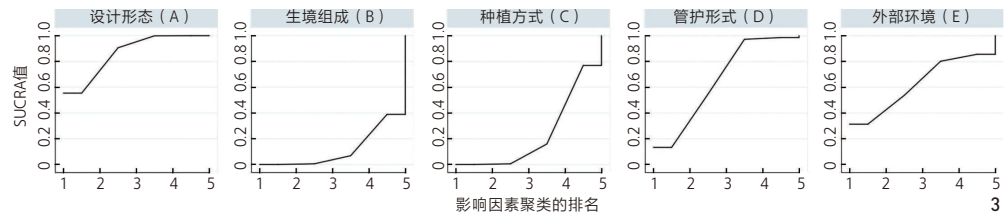
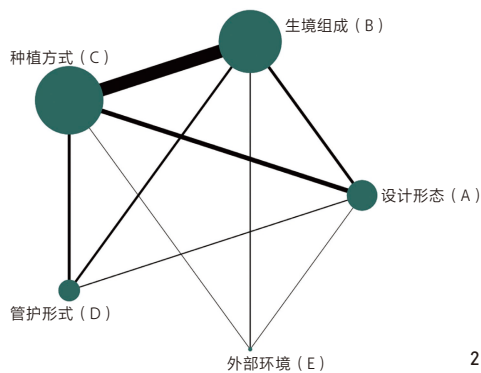
将纳入文献中提到的所有影响因素概括为 34 种, 绘制网络证据图 (图 1), 网络体系的复杂程度表明各类影响因素彼此间联通性较高, 可见城市公园绿地的碳汇能力受多因素共同影响, 未来应更关注如何发挥各因素间的协同作用。图中节点大小代表该影响因素在所有纳入文献中的研究频率及重要性, 例如“高固碳能力树种占比”“平均冠幅”

“平均胸径”的节点较大, 表明这 3 个影响因素在 50 篇纳入文献中被提及的次数最多, 且被证明对城市公园绿地碳汇能力有显著影响。图中连线粗细程度代表 2 个影响因素之间的关联强度, 例如“乡土树种占比”“高固碳能力树种占比”“高大乔木占比”“平均冠幅”“平均胸径”5 个影响因素之间关联较强, 说明乔木的种类与种植模式对提高城市公园绿地碳汇能力重要性较高; 此外, “平均胸径”与“树木修剪频率”关联较强, 表明城市公园绿地的碳汇能力并不是随乔木生长而无限增强, 定期修剪乔木也十分重要。

3.2 影响因素聚类的网状 Meta 分析

3.2.1 基于网络证据图的聚类重要性评估

对 34 个影响因素同时进行 Meta 分析的数据处理量过大, 且并不具备针对设计策略的直接指导意义。因此, 本研究结合 50 篇纳入文献中对各影响因素定义的解读, 将其划分为 5 种聚类 (表 1), 包括设计形态 (A)、生境组成 (B)、种植方式 (C)、管护形式 (D)、外部环境 (E), 并对聚类后的影响因素提升碳汇能力的实际效果进行网状 Meta



2 影响因素聚类的网络证据图
Network evidence map of influencing factor clustering

3 碳汇能力影响因素的累积排序概率曲线下面积图
SUCRA diagram of the influencing factors of carbon sink capacity

表2 不同设计策略对城市公园绿地碳汇能力影响效果的联赛表
Tab. 2 League table of the effects of different design strategies on the carbon sink capacity of urban park green spaces

影响因素聚类	OR值 (95%置信区间)				
	设计形态 (A)	管护形式 (D)	外部环境 (E)	种植方式 (C)	生境组成 (B)
设计形态 (A)	0	1.62 (0.54, 4.85)	1.56 (0.22, 11.05)	3.93 (1.72, 8.99)	4.63 (1.90, 11.26)
管护形式 (D)		0	0.97 (0.12, 7.65)	2.43 (0.97, 6.10)	2.86 (1.09, 7.50)
外部环境 (E)			0	2.51 (0.37, 16.87)	2.96 (0.44, 19.83)
种植方式 (C)				0	1.18 (0.69, 2.02)
生境组成 (B)					0

注：联赛表反应的是横轴与纵轴聚类的两两对比结果，因此表格的上下两半部分结果互为倒数，为明确表示分析结果，仅显示上半部分数据。

分析。

对5种聚类样本量综合分析可知，生境组成(B)在整体碳汇能力研究中处于核心位置，与其他影响因素聚类构成显著关联，尤其是与设计形态(A)和种植方式(C)关系密切，表明这三者在提升城市公园绿地碳汇能力方面具有潜在协同作用及交互影响。管护形式(D)和外部环境(E)的节点与连线均不明显，表明目前纳入文献对这2种聚类关注度不高，证据不足。由此可见，在未来研究中应增加管护形式(D)与外部环境(E)聚类的样本量，并进一步探索设计形态(A)、生境组成(B)、种植方式(C)3种聚类之间的协同能力，以此完善城市公园绿地碳汇能力的综合性评估(图2)。

3.2.2 基于联赛表的5种聚类相对影响能力分析

联赛表(表2)是网状Meta分析中的关键手段，可以通过对比不同影响因素聚类之间的OR值，以及95%置信区间，分析和比较多个影响因素聚类的相对效果。其中OR值

代表纵轴相对于横轴的效应量，95%置信区间不包括1时，代表该数据具有统计学显著性，而非由随机误差造成。由联赛表可知，生境组成(B)在与其他因素聚类的直接比较中显示出较高优势，这表明生境组成对于提升城市公园绿地碳汇能力可能具备显著的积极影响；种植方式(C)与其他聚类相比，相对优势较为明显，对碳汇能力的影响也较为突出；管护形式(D)和设计形态(A)的优势相对较小，表明两者不如生境组成(B)和种植方式(C)对碳汇能力的影响显著；外部环境(E)优势最小，且在统计学不显著，表明其在提升碳汇能力方面的效果相对较弱，或具有较大的不确定性(表2)。

3.2.3 基于SUCRA图的5种聚类综合影响能力分析

SUCRA能反映所有影响因素聚类在整体碳汇能力优化效果中的累积排名。基于SUCRA图对5种影响因素聚类的综合影响能力进行分析可知(图3)，设计形态(A)和

管护形式(D)的SUCRA值迅速上升并趋于1，表明这2种影响因素聚类具有相对较高的稳定性，是城市公园绿地碳汇能力提升的关键因素；生境组成(B)和外部环境(E)的曲线相对平缓，SUCRA总值较低；种植方式(C)的综合排名处于中等水平。

5种影响因素聚类在联赛表和SUCRA图中的优势并未表现出完全一致性，因此需结合两者结果来综合判断各影响因素聚类的实际效果。生境组成(B)在联赛表中的OR值最高，但SUCRA值排名较低，这说明生境组成(B)聚类在发挥碳汇作用时可能受制于具体环境或场地特征，在某些特定条件下碳汇能力显著，但并不能持续稳定地发挥最优效果。设计形态(A)和管护形式(D)聚类的SUCRA值具有较高稳定性及排名，说明这两者的合理配置具有较广泛的适用性，在不同场景下都能有效提升碳汇能力。种植方式(C)聚类可以作为辅助因素进行优化，外部环境(E)聚类在2种分析中均未表现出显著优势，可作为次要因素考虑。

3.2.4 不同研究样本的异质性、误差及偏倚分析

为了进一步探讨分析结果的可靠程度，对城市公园绿地碳汇能力影响因素网状Meta分析中研究样本的异质性、误差和偏倚进行分析。由5种影响因素聚类研究样本的偏倚情况(图4)可知，设计形态(A)和管护形式(D)在漏斗图中围绕中心线分布，总体较为对称，且大多分布于漏斗图的中部偏上区域，标准误差较小，因此这2种影响因素聚类的研究样本总体表现出较低的异质性和误差，表明2种影响因素聚类对城市公园绿地

碳汇能力的影响较为稳定可靠。生境组成（B）和外部环境（E）在漏斗图中的点位分布相对离散，可能是因为这2种影响因素聚类受外部环境和场地条件的影响较大，导致对碳汇能力的提升效果不稳定；此外，生境组成（B）和外部环境（E）这2种影响因素聚类的数据点均在一定程度上偏离中心线，这意味着纳入文献存在部分选择性报告偏倚，未来在关于生境组成（B）与外部环境（E）聚类对碳汇能力影响的研究中，应考虑纳入更多样本控制偏倚，以提高研究结果的可靠性。

3.3 基于不同公园特征的亚组分析

50 篇文献的特征具有一定差异，为进一步明确这些差异对碳汇能力评估的影响程度，采用亚组分析解释所纳入文献数据的异质性来源。根据亚组分析结果，10 hm² 以上的大规模公园异质性较高，1~10 hm² 的中等规模公园与 1 hm² 以下的小规模公园相关研究结果较一致，但小规模公园样本量较低，具有一定误差。50 篇文献中对以自然游赏和主题体验功能为主的公园研究结果的异质性较高，推测是因为以这2类功能为主的综合公园和专类公园的种植方式、生境类型及管理方式等差异性较大；而以日常休闲功能为主的社区公园面积相当、设计元素高度一致，因此，社区公园碳汇能力的影响因素研究结果更具备可信性。不同公园的地理位置、气候条件及土壤类型也会对碳汇能力的改变产生一定影响，由气候类型亚组分析可知，以温带气候类型为主的研究对象内部研究结果异质性较高，推测原因在于温带地区公园绿地的经度差异较大，植物种类、生态环境等方面存在较大差异，所以导致碳汇能力测度结果也有较大差异。

4 5 种影响因素聚类对碳汇能力的提升效果

4.1 设计形态

由网状 Meta 分析结果可知，合理优化公园的设计形态对于提升城市公园绿地碳汇能力有着核心作用，在以低碳为导向的公园设计中，可根据该聚类下属的各项影响因素，生成具有广泛适用性的设计策略。例如，地

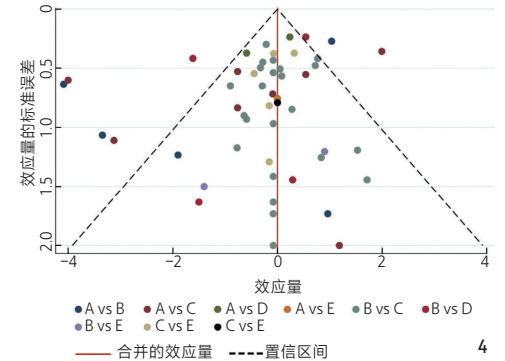
下空间的开发虽提升了土地利用效率，但会降低土壤通透性并增加碳排放水平，因此需谨慎规划^[62]。草地和园路面积占比建议分别控制在 20% 和 30% 以内，以平衡城市公园绿地的游憩与碳汇需求^[59]。用于活动的空地应布置于通风良好的入口或大型广场区域^[59]。自然式、曲线型园路形态可能有助于公园碳汇能力的提升，但目前得出该结论的研究样本较少，未来应通过增加样本量来进一步确定该结果的可行性^[53]。水域面积占比对碳汇作用的影响不显著，建议在水域周边布置高固碳能力的水生植物群落^[59]，并在全园纳入可循环雨水利用设施，同时实现城市公园绿地的增汇与减排效果^[76]。

4.2 生境组成

生境组成属于影响效果最显著但研究结果异质性相对较高的因素，在不同场地条件下对城市公园绿地的影响差异明显。研究显示，胸径和冠幅较大的常绿及落叶乔木在公园建成初期固碳能力较强^[62]，但需配合修剪以避免其碳汇能力因内部成熟林、过熟林过多而下降^[75]；然而，成熟树种因生长速度慢于年轻树种，因此在后续发挥固碳潜力时的优势也会逐渐减弱^[78]。此外，蜜蜂等生物的多样性与植物固碳能力之间也存在协同作用，这是因为蜜蜂和黄蜂通常在木材或未受干扰的地面上筑巢，这些区域往往位于森林或城市公园绿地中碳汇能力较高的地块^[57]，因此蜜蜂和黄蜂的数量在一定程度上对绿地固碳能力有指示作用。考虑到公园内封闭的视野对游人（尤其是女性）安全感^[89]及视觉舒适度^[90]的消极作用，增加植物种植密度并不是普遍适用的优势策略，尤其是在乔木数量众多的中大型公园，大面积、高密度的封闭式种植空间不利于游人停留，从而会影响到城市公园绿地最基本的游憩娱乐属性，因此可以选择在部分开放绿地通过提高结构层次丰富度、提高高固碳能力的常绿及阔叶乔木占比等方式来提升碳汇能力，而非仅增加植物密度^[29]。

4.3 种植方式

种植方式对于提升城市公园碳汇能力同样具有重要意义。已有研究表明双层型乔灌木群落的固碳能力优于双层型乔草群落及单



4 5 种聚类研究样本的偏倚情况
Bias of the five clustered research samples

层结构。因此，在实际的公园养护中，群落郁闭度应控制在适当阈值下，确保光照均匀并避免植被间的过度竞争，建议配合后期修剪维护手段，按照劣势种避让优势种、灌木避让乔木、速生避让慢生的原则进行调整，更有效地提高城市公园绿地的碳汇能力^[30]。

4.4 管护形式

管护形式通常用于辅助其他影响因素提升公园绿地的碳汇能力。比如使用乡土树种可以降低部分管护成本，并一定程度上避免远距离运输时产生的碳排放^[83]。草坪、园路及空地是提供公园锻炼、交流等游憩娱乐服务的主要场所，可在设计之前先行调研不同地区对草坪面积的需求程度，适当降低对公园草坪管理强度，使用人工管护而非机械作业等方式，代替直接减少草坪面积的方式，以此兼顾公园草坪的游憩与低碳需求^[63]。针对规模较小的公园，因为在乔木数量、种类等生境组成结构上不占优势，可以适当增加乔木与灌木的种植密度，考虑在必要时用人工修剪等管护形式代替大型机械，并随时关注需要灌溉、施肥、抽稀补种的时机^[28]；对于中等规模的公园或专类公园，因为公园内活动场地面积较大，施工和后期运营过程中的碳成本较大^[63]，公园内的铺装及景观构筑物应尽量选取木材等天然材料，以引入蚯蚓加速枯落物分解、使用生物炭^[68]等自然施肥方式，以及适当松动土壤来提高土壤碳密度^[28]，从而减少人工及机械成本。

4.5 外部环境

外部环境对城市公园绿地碳汇能力的影

响总体较弱,但仍需在特定场景下予以关注。总体来说,CO₂浓度与风速和气温呈正比,与相对湿度呈反比^[59],合适的小气候环境能够加速植物的光合作用和其他生理反应,而在高温、干旱、低湿条件下,植物固碳能力可能会降低,该气候类型下的公园绿地应通过重点优化种植方式和管理策略等提高碳汇能力。

5 结论

5.1 研究总结

本研究通过网状 Meta 分析系统性探讨 50 篇纳入文献中城市公园绿地碳汇能力的关键影响因素及其协同作用。本研究发现,设计形态和管护形式对于提升城市公园绿地碳汇能力效果稳定,适用性较强,是提升碳汇能力的基础因素;生境组成和种植方式在特定条件下具有显著优势,但效果存在一定波动;外部环境对碳汇能力的直接作用较弱,但其间接影响不可忽视。

5.2 研究局限性

首先,本研究中纳入文献的地理分布不均,以中国和部分发达国家为主,发展中国家数据相对缺乏可能限制了结果的普适性。其次,部分影响因素聚类(如外部环境和管护形式)的研究样本量较少,导致相关研究结果的证据强度较弱。此外,不同公园规模和功能特征下的研究对象异质性较高,可能影响研究结果的准确度。网状 Meta 分析由于完全依赖已有研究数据,可能存在选择性报告偏倚,即正向结果更容易被呈现,而负向或不显著结果则可能被忽视,未来应通过实验性研究重复验证本研究结论。

5.3 未来展望

5.3.1 制定涵盖全流程增汇减排的落地指南

未来研究应拓展城市公园绿地碳汇能力的复合影响因素评估体系,聚焦设计形态、生境组成、种植方式、管护形式及外部环境的协同作用,弥补特殊生态环境下公园碳汇研究的数据空白。并在实践层面,以此为基础,制定涵盖设计—建造—维护全阶段的增汇减排指南,优先使用低维护、可循环的天然材料,如木材、再生混凝土、生物炭等,并通过枯枝覆盖、自然施肥及松土等方式提

升土壤碳汇能力,针对小规模公园适当采用人工代替机械化作业的形式,减少施工建造阶段的碳排放。同时,结合公众参与和科普宣传等方式提高公众低碳意识,以间接形式发挥城市公园绿地在全社会合作协同减排中的价值。

5.3.2 构建人机协同、碳效益最大化的智慧工作流

目前已有学者针对城市公园绿地开发了景观绩效评价平台^[91],未来可整合网状 Meta 分析中识别出的关键影响因素及其效果,建立涵盖公园建设全生命周期的评价框架,通过物联网传感器实时监测植被生长参数(胸径、冠幅等),以及设计参数(机械化工作频率、低维护铺装选用等),结合人工智能算法监测公园碳汇和碳排变化数值,提供实时优化建议。优化后的公园碳绩效评价平台模块还可作为区域化适配的案例数据库,集成全球各区域公园碳汇研究数据,为不同气候环境背景下公园设计策略提供精准决策支持。通过人机协同的智慧工作流,集成设计师与管理人员的实地经验,动态优化设计形态、生境组成、管护形式等策略,进一步推动城市公园绿地碳汇能力的精准化监测及提高。

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] LIU C S. Functional Orientation and Countermeasures of Landscape Architecture Under the Background of Climate Change[J]. Landscape Architecture, 2020, 27 (12): 75-79.
- [3] HYE-MI P, HYUN-KIL J, JIN-YOUNG K. Carbon Footprint of Landscape Tree Production in Korea[J]. Sustainability, 2021, 13 (11): 5915.
- [4] MOON T, KIM M, CHON J Y. Adaptive Green Space Management Strategies for Sustainable Carbon Sink Parks[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2024, 94: 128236.
- [5] JAMIRSAH N, SAID I, JAAFAR B, et al. Carbon Footprint of Built Features and Planting Works During Construction, Maintenance and Renewal Stages at Urban Parks in Petaling Jaya, Selangor[J]. Pertanika Journal of Science and Technology, 2021, 29 (1): 387-406.
- [6] HISHAM F D B, SHAHIDAN M F, JA'AFAR M. Stages and Elements Affecting Development of Low Carbon Parks in Malaysia: An Expert Review[J]. Alam Cipta, 2018, 11 (1): 2-8.
- [7] REYES RIVEROS R, ALTAMIRANO A, DE LA BARRERA F, et al. Linking Public Urban Green Spaces and Human Well-Being: A Systematic Review[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021 (61): 127105.

- [7] POCOCC C. The Carbon Landscape[J]. Topos, 2007, 61: 86-89.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] ZHONG L, WANG W F, GONG P, et al. Practical Ways of “Low Carbon Theory” in Landscape Architecture Construction[J]. Jiangxi Science, 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] ZHAO C J, LIU X M. The Role of Urban Green Space System in Low-Carbon City[J]. Chinese Landscape Architecture, 2010, 26 (6): 23-26.
- [13] 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.
- [14] WANG Z, WAN M. Function Characters and Design Principles of Low-Carbon Landscape Architecture[J]. Chinese Landscape Architecture, 2010, 26 (6): 35-38.
- [15] 杨阳, 赵红红.低碳园林相关理论研究的现状与思考[J]. 风景园林, 2015 (2): 112-117.
- [16] YANG Y, ZHAO H H. Current Status and Reflection on Relevant Theories Research of Low Carbon Garden[J]. Landscape Architecture, 2015 (2): 112-117.
- [17] 谢军飞, 李玉娥, 李延明, 等.北京城市园林树木碳储量与固碳量研究[J].中国生态农业学报, 2007, 15 (3): 5-7.
- [18] XIE J F, LI Y E, LI Y M, et al. Calculation of Carbon Storage and Sequestration in the Urban Trees of Beijing[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2007, 15 (3): 5-7.
- [19] 吴婕, 李楠, 陈智, 等.深圳特区城市植被的固碳释氧效应[J].中山大学学报(自然科学版), 2010, 49 (4): 86-92.
- [20] WU J, LI N, CHEN Z, et al. The Effect of CO₂ Sequestration and O₂ Release of Urban Vegetation in Shenzhen Special Zone[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2010, 49 (4): 86-92.
- [21] 李威, 黄玫, 张远东, 等.中国国家森林公园碳储量及固碳速率的时空动态[J].应用生态学报, 2021, 32 (3): 799-809.
- [22] LI W, HUANG M, ZHANG Y D, et al. Spatial-Temporal Variations of Carbon Storage and Carbon Sequestration Rate in China's National Forest Parks[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32 (3): 799-809.
- [23] BAE J, RYU Y. Land Use and Land Cover Changes Explain Spatial and Temporal Variations of the Soil Organic Carbon Stocks in a Constructed Urban Park[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 136: 57-67.
- [24] HU C G, LIU G Y, SU P, et al. Research on Carbon-neutral Calculation Model of Urban Parks Based on Life-Cycle Assessment: A Case Study from Beijing, China[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2024, 19: 1432-1444.
- [25] 徐飞, 刘为华, 任文玲, 等.上海城市森林群落结构对固碳能力的影响[J].生态学杂志, 2010, 29 (3): 439-447.
- [26] XU F, LIU W H, REN W L, et al. Effects of Community Structure on Carbon Fixation of Urban Forests in Shanghai, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29 (3): 439-447.
- [27] 李惊, 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.
- [28] LI L, WU J M, WANG W Q. Landscape Planning and Design

- Strategies Under Carbon Neutrality Goal[J]. Landscape Architecture, 2022, 29 (5): 45-51.
- [20] 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 (8): 18-24.
- WANG M, SHI Q S. Evaluation Index System and Empirical Study on Green Carbon Sequestration Efficiency in Urban High Density Area: A Case Study of Shanghai Huangpu District[J]. Chinese Landscape Architecture, 2016 (8): 18-24.
- [21] LAL R, FOLLETT R, KIMBLE J M. Achieving Soil Carbon Sequestration in the United States: A Challenge to the Policy Makers[J]. Soil Science, 2003, 168 (12): 827-845.
- [22] TIGGES J, CHURKINA G, LAKES T. Modeling Above-Ground Carbon Storage: A Remote Sensing Approach to Derive Individual Tree Species Information in Urban Settings[J]. Urban Ecosystems, 2017, 20 (1): 97-111.
- [23] HERZOG C P. A Multifunctional Green Infrastructure Design to Protect and Improve Native Biodiversity in Rio de Janeiro[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2016, 12 (1): 141-150.
- [24] ZHAO D, CAI J, XU Y M, et al. Carbon Sinks in Urban Public Green Spaces Under Carbon Neutrality: A Bibliometric Analysis and Systematic Literature Review[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2023, 86: 128037.
- [25] 郭欢欢, 侯少沛, 赵建霞, 等.城市园林绿地不同群落类型碳储量研究: 以郑州市公园绿地为例[J].河南科学, 2019, 37 (9): 1431-1437.
- GUO H H, HOU S P, ZHAO J X, et al. Carbon Storage of Different Community Types in Urban Garden Ecosystem: Taking Park Green Space of Zhengzhou as Example[J]. Henan Science, 2019, 37 (9): 1431-1437.
- [26] FUJIMOTO M, SUGAWARA D, SRIPARAM D, et al. Carbon Sequestration Estimation of Urban Trees in Parks and Streets of Bangkok Metropolitan, Thailand[J]. Thai Journal of Forestry, 2016, 35 (3): 30-41.
- [27] OTHMAN R, SUID S, NOOR N, et al. The Influence of Urban Park Green Spaces, Plant Material Specifications and Spatial Design Organization and Pattern Towards Carbon Sequestration Rate[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17 (4): 8079-8088.
- [28] ZHANG M, CHEN K B, LIU H X, et al. Analysing Carbon Density in Urban Parks By Considering the Management of Different Functional Parks: A Case Study in Beijing[J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112411.
- [29] WANG Y N, CHANG Q, LI X Y. Promoting Sustainable Carbon Sequestration of Plants in Urban Greenspace by Planting Design: A Case Study in Parks of Beijing[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 64: 127291.
- [30] 起雨涵.成都市社区公园植物群落碳汇研究及优化策略[D].成都: 西南交通大学, 2023.
- QI Y H. Carbon Sink Research and Optimization Strategy of Plant Communities in Community Parks in Chengdu[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [31] SAHLE M, SAITO O, FÜRST C, et al. Quantification and Mapping of the Supply of and Demand for Carbon Storage and Sequestration Service in Woody Biomass and Soil to Mitigate Climate Change in the Socio-Ecological Environment[J]. Science of the Total Environment, 2018, 624: 342-354.
- [32] 冀媛媛.可持续理念下低碳景观营造标准及策略研究[D].天津: 天津大学, 2015.
- Ji Y Y. Research of the Evaluation System and Strategies of Low Carbon Landscape Based on the Sustainable Development Idea[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [33] 刘关键, 吴泰相, 康德英.Meta-分析中的统计学过程[J].中国临床康复, 2003, 7 (4): 538-539.
- LIU G J, WU T X, KANG D Y. The Statistical Process of Meta-Analysis[J]. Chinese Journal of Clinical Rehabilitation, 2003, 7 (4): 538-539.
- [34] 詹思延.如何做一个好的系统综述和 Meta 分析[J].北京大学学报 (医学版), 2010, 42 (6): 644-647.
- ZHAN S Y. How to Do a Good Systematic Review and Meta-Analysis[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2010, 42 (6): 644-647.
- [35] 毛晋花, 邢亚娟, 闫国永, 等.陆生植物生物量分配对模拟氮沉降响应的 Meta 分析[J].生态学报, 2018, 38 (9): 3183-3194.
- MAO J H, XING Y J, YAN G Y, et al. A Meta-Analysis of the Response of Terrestrial Plant Biomass Allocation to Simulated N Deposition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (9): 3183-3194.
- [36] 程新, 黄林, 李昆太.Meta 分析: 一种新的文献综述方法[J].广东农业科学, 2010, 37 (6): 376-378.
- CHENG X, HUANG L, LI K T. Meta-Analysis: A New Method in Review[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 37 (6): 376-378.
- [37] 徐润成, 李晓磊, 李剑, 等.农户低碳生产影响因素 荟萃回归分析[J].世界农业, 2020 (7): 61-69.
- XU R C, LI X L, LI J, et al. Meta-Analysis: A Meta-Regression Analysis of Factors Influencing Low-Carbon Production in Farm Households[J]. World Agriculture, 2020 (7): 61-69.
- [38] 陈崇贤, 罗玮菁, 夏宇.自然景观对老龄人群身心健康影响研究的荟萃分析[J].风景园林, 2020, 27 (11): 90-95.
- CHEN C X, LUO W J, XIA Y. A Meta-Analysis of Natural Landscape Effects on Physical and Mental Health of the Elderly Population[J]. Landscape Architecture, 2020, 27 (11): 90-95.
- [39] 黄邓楷, 刘烨, 周佩玲.自发地理信息支持下建成环境与移动型体力活动相关性荟萃分析[J].风景园林, 2024, 31 (4): 12-20.
- HUANG D K, LIU Y, ZHOU P L. Meta-Analysis on Associations Between the Built Environment and Mobile Physical Activity Using Volunteered Geographic Information[J]. Landscape Architecture, 2024, 31 (4): 12-20.
- [40] 曾宪涛, 曹世义, 孙凤, 等.Meta 分析系列之六: 间接比较及网状 Meta 分析[J].中国循证心血管医学杂志, 2012, 4 (5): 399-402.
- ZENG X T, CAO S Y, SUN F, et al. Meta-Analysis Series VI: Indirect Comparison and Net Analysis[J]. Chinese Journal of Evidence-Bases Cardiovascular Medicine, 2012, 4 (5): 399-402.
- [41] 董子萌.低碳理念下社区公园景观优化研究: 以天津市中心城区为例[D].天津: 天津大学, 2021.
- DONG Z M. Research on the Landscape Optimization of Community Parks Under the Low-Carbon Concept: Take Tianjin's Downtown Area as an Example[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [42] 郭欢欢, 尚彬, 付夏楠, 等.郑州市公园植被碳储量分布特征与其影响因素[J].广西林业科学, 2024, 53 (2): 243-251.
- GUO H H, SHANG B, FU X N, et al. Distribution Characteristics and Influencing Factors of Carbon Storages in Parks of Zhengzhou[J]. Guangxi Forestry Science, 2024, 53 (2): 243-251.
- [43] 刘利.基于 i-Tree Eco 模型城市绿地的生态效益分析: 以郑州市典型城市绿地为例[D].郑州: 华北水利水电大学, 2022.
- LIU L. Ecological Benefit Analysis of Urban Green Space Based on i-Tree Eco Model[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2022.
- [44] 邱希阳.基于低碳理念下的城市绿地设计研究[D].杭州: 浙江农林大学, 2011.
- QIU X Y. Based on Low-Carbon Concept Design of Urban Green Space[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2011.
- [45] 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.
- YU C Q, QI H Y, ZHANG G J, et al. Research on Landscape Plants Design Based on Low Carbon Concept: A Case Study of Typical Green Belts in Jinan City[J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 2016, 46 (5): 10-15.
- [46] 王晶懋, 高洁, 孙婷, 等.双碳目标向下的绿色生态空间碳汇能力优化设计[J].中国城市林业, 2023, 21 (4): 33-42.
- WANG J M, GAO J, SUN T, et al. Design Method to Optimize Carbon Sink Capacity of Urban Green Spaces Under Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2023, 21 (4): 33-42.
- [47] 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: .
- WANG D S. Studies on Net Carbon Reserves in Beijing Urban Landscape Green Based on Biomass Measurement[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [48] TANAKA R, KIM Y J, RYOO H K. et al. Analyzing the Influence of Biomass and Vegetation Type to Soil Organic Carbon-Study on Seoseoul Lake Park and Yangjae Citizen's Forest[J]. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology, 2014, 17 (1): 123-134.
- [49] CHAEJINHA, KIM W J. A Study on Assessment of Ecological Value and Management Plans for Neighborhood Parks through CO₂ Storage Measurement in Seoul[J]. Journal of the Korea Landscape Council, 2020, 12 (2): 217-231.
- [50] KIM G S, PI J H, AN J H, et al. Carbon Budget Evaluated in Two Urban Parks of Seoul[J]. Korean Journal of Ecology and Environment, 2016, 49 (1): 51-61.
- [51] PARK H M, JO H K. Ecological Design and Construction Strategies Through Life Cycle Assessment of Carbon Budget for Urban Parks in Korea[J]. Forests, 2021, 12 (10): 1399.
- [52] CHOI S G, KIL J H. Effect of Urban Parks on Carbon and PM_{2.5} Reduction in Gangneung[J]. Journal of Forest and Environmental Science, 2022, 38 (1): 64-73.
- [53] OTHMAN R, SUID S, NOOR N, et al. Estimation of Carbon Sequestration Rate of Urban Park with Linear and Curvilinear Design Landscape Setting[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17 (4): 8089-8101.
- [54] ZHAO D, CAI J, SHEN S J, et al. Nature-Based Solutions: Assessing the Carbon Sink Potential and Influencing Factors of Urban Park Plant Communities in the Temperate Monsoon Climate Zone[J]. Science of the Total Environment, 2024, 950: 175347.
- [55] JANG J, SHIN J. The Analysis of the Carbon Storage Characteristics of Neighborhood Park in Urban Development Areas[J]. Journal of the Korea Landscape Council, 2022, 14 (2): 126-140.
- [56] DU C L, JIA W X, WANG K. Valuing Carbon Saving



Potential of Urban Parks in Thermal Mitigation: Linking Accumulative and Accessibility Perspectives[J]. Urban Climate, 2023, 51: 101645.

[57] BELAIRE J A, HIGGINS C, ZOLL D, et al. Fine-Scale Monitoring and Mapping of Biodiversity and Ecosystem Services Reveals Multiple Synergies and Few Tradeoffs in Urban Green Space Management[J]. Science of the Total Environment, 2022, 849: 157801.

[58] HABIB S, AL GHAMDI S. Estimation of Above-Ground Carbon-Stocks for Urban Greeneries in Arid Areas: Case Study for Doha and FIFA World Cup Qatar, 2021[J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9: 1-8.

[59] JIANG Y F, LIU Y Q, SUN Y C, et al. Distribution of CO₂ Concentration and Its Spatial Influencing Indices in Urban Park Green Space[J]. Forests, 2021, 14 (7): 1-26.

[60] JO H K, KIM J Y, PARK H M. Carbon Reduction and Planning Strategies for Urban Parks in Seoul[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2019, 41: 48-54.

[61] JO HK, PARK H M, KIM J Y. Carbon Offset Service of Urban Park Trees and Desirable Planting Strategies for Several Metropolitan Cities in South Korea[J]. Forests, 2023, 14 (2): 1-15.

[62] KANG M S, KIM J R, KIM M J. A Study of Estimation of Carbon Effects per Unit Area by Park & Green Type in Development Project Area[J]. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology, 2013, 16 (5): 71-81.

[63] MOON T, KIM M, CHON J. Adaptive Green Space Management Strategies for Sustainable Carbon Sink Park[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2024, 97: 1-8.

[64] NERO B F, KUUSAANA E D, AHMED A, et al. Carbon Storage and Tree Species Diversity of Urban Parks in Kumasi, Ghana[J]. City and Environment Interactions, 2024, 24: 100156.

[65] OH C. Reduction of Carbon Dioxide (CO₂) Emissions During the Construction of Urban Parks in South Korea[J]. Sustainability, 2024, 16 (8): 3405.

[66] ALMEIDA C M V B, MARIANO M V, AGOSTINHO F, et al. Exploring the Potential of Urban Park Size for the Provision of Ecosystem Services to Urban Centres: A Case Study in São Paulo, Brazil[J]. Building and Environment, 2018, 144: 450-458.

[67] SINGKARAN N. Carbon Sink Capacity of Public Parks and Carbon Sequestration Efficiency Improvements in a Dense Urban Landscape[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 194 (10): 750.

[68] WANG J Q, MANNING D A C, WERNER D. The Limited Potential of Soil and Vegetation in Urban Greenspace for Nature-Based Offsetting of Institutional Carbon Emissions[J]. Soil Use and Management, 2024, 40 (2): e13081.

[69] WANG V, GAO J. Estimation of Carbon Stock in Urban Parks: Biophysical Parameters, Thresholds, Reliability, and Sampling Load by Plant Type[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 55: 126852.

[70] GRATANI L, VARONE L, BONITO A. Carbon Sequestration of Four Urban Parks in Rome[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 19: 184-193.

[71] MAHAJAN D M, VIJAYALAXMI R S. Carbon Sequestration Potential of Urban Green Spaces (PMC Gardens) in Pune City, India[J]. Journal of Geography Environment and Earth Science International, 2021, 25 (6): 22-38.

[72] DOWNEY A E, GROFFMAN P M, MEJÍA G A, et al. Soil Carbon Sequestration in Urban Afforestation Sites in New

York City[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 65: 127342.

[73] XIE Q J, YUE Y, SUN Q, et al. Assessment of Ecosystem Service Values of Urban Parks in Improving Air Quality: A Case Study of Wuhan, China[J]. Sustainability, 2020, 11 (22): 1-14.

[74] MUNOZ M E, VASQUEZ E, PORTILLA F. Estimates of the Carbon Capture Potential in Urban Parks and Vehicle CO₂ Emissions in Cuenca, Ecuador[J]. Communication, Smart Technologies and Innovation for Society, 2021, 252: 405-417.

[75] FRANCINI G, HUI N, JUMPPONEN A, et al. Vegetation Type and Age Matter: How to Optimize the Provision of Ecosystem Services in Urban Parks[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 66: 127392.

[76] SUNG H C, HWANG S Y. A Preliminary Study on Assessment of Urban Parks and Green Zones of Ecological Attributes and Responsiveness to Climate Change[J]. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology, 2013, 16 (3): 107-117.

[77] GAO X S, HUANG R, LI J, et al. Temperature Induces Soil Organic Carbon Mineralization in Urban Park Green Spaces, Chengdu, Southwestern China: Effects of Planting Years and Vegetation Types[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 54: 126761.

[78] GOPINATH R. Relative Analysis for Carbon Sequestration Potential of Prominent Private and Public Green Spaces in Bengaluru, India[J]. Civil and Environmental Engineering Reports, 2024, 34 (2): 224-241.

[79] GRATANI L, VARONE L. Atmospheric Carbon Dioxide Concentration Variations in Rome: Relationship with Traffic Level and Urban Park Size[J]. Urban Ecosystems, 2014, 17 (2): 501-511.

[80] TAKAHASHI T, AMANO Y, KUCHIMURA K, et al. Carbon Content of Soil in Urban Parks in Tokyo, Japan[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2008, 4 (2): 139-142.

[81] SHAMSIPOUR A, HEIDARI H, AVATEFI R. Estimating of the Climate Effects of Urban Gardens With an Emphasis on Carbon Sequestration in Shiraz, Iran[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2024, 21 (2): 1379-1388.

[82] 何佳怡, 贺俏毅, 邵婕.城市地下空间开发对公园绿地固碳效益影响的实证研究: 以杭州市为例[J].城市建设理论研究 (电子版), 2023 (20): 11-13.

HE J Y, HE Q Y, SHAO J. Empirical Study on the Impact of Urban Underground Space Development on Carbon Sequestration Benefits of Parks and Green Spaces: A Case Study of Hangzhou City[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2023 (20): 11-13.

[83] 李锦凤, 魏光普, 李陕, 等.西北工业城市综合公园在低碳建设中的固碳效益探究[J].乡村科技, 2021, 12 (33): 111-116.

LI J F, WEI G P, LI S, et al. Exploration of Carbon Sequestration Benefits of Northwest Industrial City Comprehensive Parks in Low Carbon Construction[J]. Rural Technology, 2021, 12 (33): 111-116.

[84] 谭霖.成都市综合公园植物群落特征及碳汇效益研究[D].雅安: 四川农业大学, 2022.

TAN L. Plant Community Characteristics and Carbon Sink Benefit in Chengdu Comprehensive Park[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2022.

[85] 唐琳.城市园林绿化植物固碳效益研究: 以呼和浩特典型公园与道路为例[D].呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.

TANG L. Study on Carbon Sequestration Efficiency of Urban Landscaping Plants: Take Typical Parks and Roads in Hohhot as an Example[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.

[86] 张丽, 刘子奕, 麻欣瑶, 等.植物群落特征对城市公园绿地碳汇效能的影响研究[J].园林, 2023, 40 (4): 125-134.

ZHANG L, LIU Z Y, MA X Y, et al. Effects of Plant Community Characteristics on Carbon Sequestration Efficiency in Urban Parks[J]. Landscape Architecture Academic Journal, 2023, 40 (4): 125-134.

[87] 钟钰.南昌市公园绿地植被结构特征与碳储量研究[D].南昌: 江西农业大学, 2024.

ZHONG Y. Study on Vegetation Structure Characteristics and Carbon Storage in Parks of Nanchang[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2024.

[88] 吴泰相, 刘关键, 赵娜, 等.观察性研究系统评价/Meta-分析的方法[J].中国循证医学杂志, 2004, 4 (5): 337-341.

WU T X, LIU G J, ZHAO N, et al. How to Conduct a Systematic Review/Meta-Analysis for Observational Studies[J]. Chinese Journal of Evidence-Based Medicine, 2004, 4 (5): 337-341.

[89] HASHIM N H M, THANI S K S O, JAMALUDIN M A, et al. A Perceptual Study on the Influence of Vegetation Design Towards Women's Safety in Public Park[J]. Procedia, Social and Behavioral Sciences, 2016, 234: 280-288.

[90] SHANAHAN D F, LIN B B, GASTON K J, et al. What Is the Role of Trees and Remnant Vegetation in Attracting People to Urban Parks?[J]. Landscape Ecology, 2015, 30 (1): 153-165.

[91] 刘喆, 欧小杨, 郑曦.基于循证导向的景观绩效评价体系、在线平台的构建与实证研究[J].南方建筑, 2020 (3): 12-18.

LIU Z, OU X Y, ZHENG X. Evidence Based Guidance-Based on Landscape Performance Evaluation System, Online Platform's Construction and Empirical Research[J]. South Architecture, 2020 (3): 12-18.

图表来源(Sources of Figures and Tables):

文中图表均由作者绘制, 其中图 1~4 和表 2 由作者基于 Stata/MP 15.1 软件绘制。

(编辑 / 刘昱霁)

作者简介:

嵇雨桐 / 女 / 北京林业大学园林学院在读博士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计

林添恽 / 男 / 北京林业大学园林学院在读博士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计

刘恋 / 女 / 北京林业大学园林学院在读博士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计

李雄 / 男 / 北京林业大学园林学院教授 / 城乡生态环境北京实验室成员 / 本刊编委会主任 / 研究方向为风景园林规划与设计
通信作者邮箱: lixiong@bjfu.edu.cn

JI Y T, LIN T Y, LIU L, LI X. Network Meta-Analysis of Factors Influencing the Carbon Sink Capacity of Urban Park Green Spaces[J]. Landscape Architecture, 2025, 32(1): 23-31. DOI: 10.3724/j.fjyl.202408300495.

Network Meta-Analysis of Factors Influencing the Carbon Sink Capacity of Urban Park Green Spaces

JI Yutong, LIN Tianyi, LIU Lian, LI Xiong*

Abstract:

[Objective] This research mainly aims to identify the primary interactions between the factors influencing the carbon sink capacity of urban park green spaces and recognize the most effective landscape design strategies, thereby providing a foundational data set for the further development of a repository of lifecycle design strategies for urban green spaces. In light of the increasingly prominent role of urban green spaces in mitigating climate change, the research also seeks to highlight strategies that balance ecological functions with urban recreational and aesthetic needs.

[Method] This research employs the network Meta-analysis method to explore the critical factors influencing the carbon sequestration potential of urban park green spaces, and conduct a systematic quantitative assessment of their respective carbon sink capacity. The research categorizes and statistically analyzes various factors currently involved in relevant research that affect the carbon sink capacity of urban park green spaces, whose interactions and cumulative impacts are assessed using the network Meta-analysis method. The Meta-analysis incorporates network evidence plots, league tables, and SUCRA (surface under the cumulative ranking curves) to evaluate the ranking and relative importance of different factors. Additionally, heterogeneity, bias, and errors are examined through subgroup analyses based on park scale (a), functional characteristics (b), and climatic conditions (c), accompanied by the evaluation of publication bias using funnel plots.

[Results] The analysis in this research involves 50 eligible literature articles published between 2000 and 2024, which are selected from a total of 952 articles initially collected. The research identifies 34 influencing factors, categorized into five distinct clusters: Design characteristics, habitat composition, planting strategies, maintenance methods, and external environment. The research results emphasize the multidimensionality of carbon sequestration in urban parks. Design characteristics and maintenance practices emerge as the most stable and broadly applicable factors. Their SUCRA values rank the highest, reflecting their consistent contribution to carbon sequestration across diverse settings. For instance, controlling the proportions of grasslands and pathways at 20% and 30%, respectively, helps optimize carbon storage while maintaining recreational value. Maintenance practices often act on other influencing factors to enhance carbon sink capacity, such as using native tree species, selecting natural materials, and designing low-maintenance sites to reduce the cost of maintenance. Habitat composition and

planting strategies show significant influence under specific scenarios. Fast-growing tree species with large canopies demonstrate strong initial carbon sink capacity, while subsequent maintenance, including pruning, is essential to sustain long-term benefits. Conversely, habitat composition reveals high heterogeneity, particularly influenced by tree density and vegetation diversity. Planting methods also hold significant importance in enhancing the carbon sequestration of urban parks, such as multi-layered vegetation structures that enhance carbon sink capacity but require careful adjustments to avoid excessive shading and competition, thereby achieving more efficient carbon sequestration. The influence of the external environment on carbon sink capacity is generally weaker but still requires attention in specific scenarios. The geographical location, climatic conditions, and soil types of different parks also lead to certain differences. Subgroup analysis by climate type shows that the research objects dominated by temperate climates show higher heterogeneity, presumably because the longitudinal differences of the research objects in temperate regions are large, and the differences in plant species and ecological environments lead to large differences in the measurement results of carbon sink capacity.

[Conclusion] This research provides critical insights into the interplay of factors shaping the carbon sink potential of urban parks, emphasizing the importance of stable foundational strategies like design and maintenance. While habitat composition and planting strategies offer substantial localized benefits, their variability necessitates tailored interventions informed by specific ecological and social contexts. To advance urban carbon neutrality efforts, future research should integrate these findings into practical tools, such as enhanced modules in landscape performance platforms. These modules should allow for lifecycle assessments that account for design, construction, and maintenance phases, thus supporting real-time monitoring and optimization. Additionally, leveraging human-machine collaboration through intelligent workflows can further enhance decision-making by combining real-time data analysis with human expertise. Future research should expand the assessment system for the composite factors influencing the carbon sink capacity of urban park green spaces, so as to fill the data gaps in the research on carbon sinks of parks under special ecological environments, and further enrich the data used.

Keywords: landscape architecture; park green space; carbon neutrality; Meta-analysis; full life cycle

Authors:

JI Yutong is a Ph.D. candidate in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. Her research focuses on landscape planning and design.

LIN Tianyi is a Ph.D. candidate in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. His research focuses on landscape planning and design.

LIU Lian is a Ph.D. candidate in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. Her research focuses on landscape planning and design.

LI Xiong, Ph.D., is a professor in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, and a member of the Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing Municipal Education Commission, and director of editorial committee of this journal. His research focuses on landscape planning and design.

Corresponding author Email: lixiong@bjfu.edu.cn