



基于耦合协调度模型的城市公园植物群落景观质量与碳汇功能协同研究

张晓艺,秦安华,蔺阿琳

(浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018)

摘要:存量绿地更新亟须协同提升景观质量与碳汇功能,通过量化诊断二者的耦合协调关系并识别高协调度植物群落的关键结构特征,可有效推动存量绿地多目标协同发展。以杭州市主城区7个公园123个植物群落为研究对象,采用层次分析法与生物量异速生长方程法分别测算景观质量与碳汇量,进而引入耦合协调度模型,系统诊断二者协同发展水平及等级。结果显示:调查区域植物群落整体景观质量较好,“非常好”与“较好”等级样地合计占比约70%;碳汇水平整体偏低,低碳汇量样地占比77%;耦合协调度以“一般协调”为主(占比48%),“优质协调”与“良好协调”样地仅占28%;高景观质量得分低碳汇量的样地较多(26个),高耦合度低耦合协调度的样地为4个;高协调度群落(优质与良好协调等级)关键结构特征为物种数 ≥ 3 种、生活型2~4类、垂直结构 ≥ 3 层、季相覆盖 ≥ 3 季、观赏特性 ≥ 2 类、色彩丰富度 ≥ 5 种、树干形态2~3种,且此类群落碳汇量集中于892.12~5588.50 kg,景观质量得分介于0.56~0.85之间。研究表明,景观质量与碳汇功能之间存在非线性耦合关系,通过构建中度复杂性与多样性的植物群落可实现二者协同增效。该研究提出的高协调度群落结构配置模式,可直接指导存量绿地增汇提质改造,为“双碳”目标下城市绿地多目标协同更新提供量化路径与科学依据。

关键词:城市公园;植物群落;碳汇;景观评价;耦合协调度

中图分类号: S731.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2026)09-0703-09

引文格式: 张晓艺,秦安华,蔺阿琳. 基于耦合协调度模型的城市公园植物群落景观质量与碳汇功能协同研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2026,55(5):703-711.

Reference Format: ZHANG Xiaoyi, QIN Anhua, LIN Alin. A synergy study of landscape quality and carbon sink function in urban park plant communities based on the coupling coordination degree model[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(5): 703-711.

A synergy study of landscape quality and carbon sink function in urban park plant communities based on the coupling coordination degree model

ZHANG Xiaoyi, QIN Anhua, LIN Alin

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The renewal of existing urban green spaces urgently requires the synergistic improvement of landscape quality and carbon sink function. Quantifying the coupling coordination between these two objectives and identifying key structural traits of highly coordinated plant communities can effectively promote the multi-objective synergistic development of existing urban green spaces. This study investigated 123 plant communities in seven parks in the main urban area of Hangzhou. Landscape quality

收稿日期: 2026-01-12 网络出版日期: 2026-04-30

基金项目: 浙江省哲学社会科学规划课题(24NDQN174YBM)

作者简介: 张晓艺(2001—),女,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事园林景观设计方面的研究。

通信作者: 秦安华, E-mail: qah@zstu.edu.cn

was evaluated using the analytic hierarchy process (AHP), while carbon sink capacity was estimated via biomass allometric equations. A coupling coordination degree model was then applied to assess the level and grade of synergistic development. Results showed that landscape quality was generally high, with 70% of samples rated "good" or "excellent", whereas carbon sink capacity was relatively low, with 77% of samples exhibiting low carbon sink capacity. The coupling coordination level was mostly moderate, accounting for 48% of all communities, and only 28% achieved "good" or "high-quality" coordination. Samples with high landscape quality scores but low carbon sink capacity were relatively numerous (26), and 4 samples exhibited high coupling degree but low coupling coordination degree. Highly coordinated plant communities exhibited distinct structural characteristics: species richness ≥ 3 , life-form types 2~4, vertical stratification ≥ 3 layers, seasonal ornamental performance ≥ 3 seasons, ornamental traits ≥ 2 , color richness ≥ 5 types, and trunk types 2~3. Their carbon sink capacity ranged from 892.12 to 5588.50 kg, with landscape quality scores between 0.56 and 0.85. A non-linear coupling relationship was observed between landscape quality and carbon sink function. Synergistic improvement can be achieved by configuring plant communities with moderate complexity and diversity. The highly coordinated structural models identified in this study provide a scientific reference for the renewal and optimization of existing green spaces, thereby supporting China's dual carbon goals.

Key words: urban park; plant communities; carbon sink; landscape evaluation; coupling coordination degree

0 引言

中国城市化进程已由增量扩张转向存量优化,提升生态系统服务功能与营造高品质人居空间已成为城市更新的双重挑战^[1]。城市公园植物群落作为存量绿地的核心载体,其碳汇功能与景观质量的协同优化关乎碳中和目标的落实以及人民对美好生活需求的满足^[2-3],但在工程实践中二者往往难以兼顾。为追求快速固碳而营造的高密度纯林,结构单一、景观单调、生物多样性偏低^[4];过度注重视觉效果的景观设计,则会削弱群落生态效率与系统韧性^[2]。以上矛盾表明,碳汇功能与景观质量的协同研究,已成为存量绿地实现增汇提质的关键科学问题。

植物景观质量评价涵盖客观构成要素与主观感知两大维度,层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 兼具定性与定量优势,已广泛应用于公园植物景观评价。刘钊^[5]、葛楠等^[6]与王一鸣等^[7]分别针对森林公园、综合公园等绿地类型,基于该方法构建评价体系并提出优化策略,但此类研究多聚焦视觉美学价值,未能兼顾群落生态功能的同步提升。城市绿地碳汇研究主要聚焦于碳汇量评估及其影响机制分析^[8],生物量异速生长方程法因可操作性强、参数易获取,成为碳储量测算的核心方法^[9-10]。张丽等^[11]、侯文硕等^[12]则从不同维度揭示了植物特征对碳汇功能的影响机制,但相关研究多以碳汇功能提升为单一目标,易出现生态功能提升而景观效果欠佳的问题,难以满足存量绿地高品质

更新需求。

近年来,景观与生态功能耦合协调研究逐步兴起,耦合协调度模型已成为揭示多系统协同关系的重要工具。李诗尧等^[13]运用该模型分析了南太行地区碳储量与景观格局的协同演变特征;Ma 等^[14]结合 InVEST 模型,评估了桂林市碳储量、生境质量与水源涵养的协同关系。但现有研究多聚焦宏观尺度的景观格局,未在植物群落微观尺度建立碳汇功能与景观质量的量化关联,也未识别协同增效的群落结构特征,难以指导存量绿地精细化更新。

本文以杭州市主城区 7 个公园 123 个植物群落为研究对象,采用层次分析法与生物量异速生长方程法分别量化景观质量与碳汇量,引入耦合协调度模型诊断二者协调发展水平,揭示量化关联并识别高协调度群落关键结构特征,为存量绿地精细化更新提供量化依据,以推动城市绿地生态效益与景观品质协同提升,助力碳中和与高品质人居空间建设。

1 研究对象选取与调查

1.1 研究区域与样地公园

本文以杭州市主城区为研究区域。杭州地处长三角核心区,属亚热带季风气候,四季分明;作为中国重要中心城市,其公园建设体系完善、类型丰富、景观多样,为城市公园植物群落碳汇与景观协同研究提供了典型样本。为确保样地代表性、多样性并兼顾调查可行性,选取主城区内交通便利、功能完善且植物群落类型丰富的 7 个公园布设样地,所选公

园涵盖不同建成年代、区位与规模,包括金沙湖公园(一期)、高教西公园、北塘河沿岸公园、城北体育公园、拱墅运河体育公园、太子湾公园和丰收湖公园。调研公园的基本信息见表 1,区位分布见图 1。

表 1 调研公园基本信息

序号	公园名称	地理位置	建成年份	面积/hm ²
1	金沙湖公园(一期)	钱塘区	2012 年	13.2
2	高教西公园	钱塘区	2009 年	18.1
3	北塘河沿岸公园	滨江区	2012 年	10.9
4	城北体育公园	拱墅区	2010 年	45.3
5	拱墅运河体育公园	拱墅区	2021 年	46.7
6	太子湾公园	西湖区	1990 年	80.0
7	丰收湖公园	上城区	2021 年	13.7



(a) 浙江省地图



(b) 杭州市地图

图 1 调研公园区位分布图

注:地图来源于浙江省地理信息公共服务平台(天地图浙江)。图 1(a)地图审核号:浙 S(2025)23 号;图 1(b)地图审核号:浙 S(2025)23 号。

表 2 样地数量分布

郁闭度等级	植物群落类型	样地数量							合计
		金沙湖公园(一期)	高教西公园	北塘河沿岸公园	拱墅运河体育公园	城北体育公园	太子湾公园	丰收湖公园	
高郁闭度	乔木型	3	2	5	5	0	3	3	21
	乔灌型	3	2	5	1	5	2	2	20
中郁闭度	乔木型	3	0	4	5	0	3	3	18
	乔灌型	2	5	6	1	5	2	2	23
低郁闭度	乔木型	2	2	4	5	0	3	3	19
	乔灌型	4	2	6	1	5	2	2	22
样地数量合计		17	13	30	18	15	15	15	123

2 研究方法

2.1 植物群落景观质量评价

本文采用层次分析法构建城市公园植物群落景观质量评价指标体系(见表 3)。评价体系包含目标层、准则层和指标层三级结构,其中准则层由景观组成要素和美学要素构成。指标筛选严格遵循科学性、代表性、独立性、全面性和可行性原则,聚焦可量化、易观测的

1.2 样地设置与调查内容

为涵盖不同群落结构与光照环境,提升样地生态代表性并避免抽样偏差,依据郁闭度(高、中、低 3 个等级)与群落类型(乔木型、乔灌型)进行分层抽样,共设置 6 类样地(3 个郁闭度等级×2 种群落类型),最终在 7 个公园内布设 123 个 15 m×15 m 的固定样地。于 2025 年 3—11 月对样地乔木及单株形态明显的灌木开展调查,记录树种、胸径、树高与冠幅等指标,为植物碳汇测算提供基础数据。草本及地被层碳汇量较低,对碳储总量贡献有限,因此未将其纳入测算范围。各样地数量分布见表 2。

群落特征因子。经文献梳理、多轮专家咨询与实地调查验证,合并内容重叠指标,剔除界定模糊、难以量化的指标,最终确定物种多样性、生活型多样性、观赏特性多样性、季相观赏多样性、树干形态、颜色丰富度及层次丰富度 7 项核心指标。为保证权重合理性,邀请 21 位风景园林及相关领域专家(18 人具有中高级职称,20 人具有硕博学位),采用 1—9 标度法进行问卷打分,经一致性检验后确定各指标权重。

表 3 城市公园植物群落景观质量评价指标体系

目标层	准则层要素	准则层权重	指标层要素	指标层权重	说明	属性	计算方法
城市公园植物群落景观质量评价 (1.0000)	景观组成要素	0.6901	物种多样性	0.2153	每种植物的个体数量	定量	Simpson 多样性指数 ^[15]
			生活型多样性	0.1572	常绿乔木、落叶乔木、常绿灌木、落叶灌木的比例	定量	
			观赏特性多样性	0.1508	观形、观叶、观花、观果植物的比例	定量	
			季相观赏多样性	0.1668	四季中具有观赏植物的比例	定量	
	景观美学要素	0.3099	树干形态	0.0796	树木枝干呈现的形态,含通直、一般、弯曲、2 种和 3 种形态组合	定性	1—5 打分法
			颜色丰富度	0.1342	四季观赏植物色彩数量	定量	计数
			层次丰富度	0.0961	垂直层次数量	定量	计数

评价指标采用定量与定性相结合的方法,其中物种多样性、生活型多样性、观赏特性多样性和季相观赏多样性采用 Simpson 多样性指数计算,公式如下:

$$D_{sim} = 1 - \sum P_i^2 \tag{1}$$

其中: D_{sim} 为 Simpson 多样性指数; P_i 为样地中第 i 种个体数占总个体数的比例。

树干形态为定性指标,采用 1—5 打分法量化:通直 1 分、一般 2 分、弯曲 3 分,2 种形态组合 4 分、3 种形态组合 5 分。颜色丰富度及景观层次丰富度则采用计数法。景观质量得分采用加权求和法计算,公式为:

$$L = \sum E_i F_i \tag{2}$$

其中: L 是城市公园植物群落景观质量得分, E_i 是指标 i 标准化得分, F_i 为权重。

最后,利用 K -means 聚类算法对所有样地的景观质量得分进行聚类分析,将其划分为“非常好”、

“较好”、“一般”和“较差”4 个等级,便于后续比较与特征识别。

2.2 植物群落碳汇量计算

植物群落碳汇量参照吴举扬等^[16]和钟钰^[17]总结的树种生物量异速生长方程(见表 4)进行估算。基于实测的胸径、树高、冠幅等数值,代入方程计算乔木层与灌木层单株生物量。将单株生物量乘以联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)2006 年发布指南中默认的含碳系数 0.5,计算得到单株碳汇量,样地总碳汇量为所有乔木、灌木单株碳汇量之和。

计算过程中,优先选用与研究区气候、立地条件相近地区的生物量异速生长方程^[18];无对应树种方程时,采用同科或同属树种方程替代^[19];若仍无适用方程,则采用阔叶树或针叶树的广义方程进行估算^[20]。碳汇量可直接反映调查时点群落的碳库大小,本文将作为评估群落碳汇能力的核心指标。

表 4 树种生物量异速生长方程^[16-17]

树种	生物量异速生长方程	树种	生物量异速生长方程
香樟	$W=0.937+0.037D^2H$	玉兰	$W=1.086D^{1.224}$
柳树	$W=0.178D^{2.581}$	李	$W=0.3421D_{10}^{2.1813}$
榆树	$W=0.1458(D^2H)^{0.8191}$	苦楮	$W=0.2045(D^2H)^{0.7529}$
栾树	$W=0.915+0.1D^2H$	女贞	$W=0.856+0.017(D^2H)$
雪松	$W=1.26(0.3721D^{1.2928}+0.2805D^{1.3313})$	鹅掌楸	$W=0.06393D^{2.61147}$
枫树	$W=0.043(D^2H)^{0.994}$	鸡爪槭	$W=0.527D_{10}^{2.217}$
马尾松	$W=0.1309D^{2.4367}$	山茶	$W=0.078(BD^2H)^{0.934}$
紫薇	$W=0.895+0.035(D^2H)$	绣线菊	$W=0.033+0.035(BD^2H)$
银杏	$W=-0.684+0.090D^2H$	阔叶十大功劳	$W=0.7931CHV^{1.7032}$
杜英	$W=1.422+0.028(D^2H)$	石楠	$W=0.805(BD^2H)^{1.051}$
水杉	$W=0.0130596(D^2H)^{0.943797}$	火棘	$W=0.6246(D^2H)^{0.8138}+0.1884(D^2H)^{1.1503}$
无患子	$W=-3.672+0.0481D^2$	灌木(乔木型)	$W=0.182D^{2.487}$
西府海棠	$W=0.876D^{1.478}$	其他灌木	$W=100.71(A_c)^{0.925}$
蒙古栎	$W=0.233D^{2.208}$	阔叶树	$W=0.0396(D^2H)^{0.933}$

注: W 表示单株生物量,kg; D 表示胸径,cm; BD 表示基径,cm,即距地面 5 cm 处的直径; D_{10} 表示距地面 10 cm 的直径,cm; H 表示树高,m; C 表示冠幅,m; $A_c=\pi C_1C_2/4$, C_1 表示南北方向冠幅、 C_2 表示东西方向冠幅; $CHV=C(H/10)$ 。

2.3 耦合协调度

为揭示植物群落景观质量与碳汇功能间的协同水平,本文引入耦合协调度模型。运用 IBM SPSS Statistics 27.0 软件对景观质量评价得分与碳汇量数据进行标准化处理,以消除量纲影响,并依据式(3)—(5)分别计算耦合度、综合协调指数及耦合协调度^[21]:

$$K = \frac{2\sqrt{U_1 \times U_2}}{U_1 + U_2} \tag{3}$$

$$T = \alpha \times U_1 + \beta \times U_2 \tag{4}$$

$$d_{cc} = \sqrt{K \times T} \tag{5}$$

其中: K 为耦合度,取值范围为 $[0,1]$,数值越高表示景观质量与碳汇功能耦合程度越好; T 为综合协调指数; d_{cc} 为耦合协调度; U_1 为景观质量评价得分标准化数值; U_2 为碳汇量标准化数值; α 、 β 为权重系数,且 $\alpha + \beta = 1$,结合专家意见,植物群落景观质量与碳汇功能同等重要,故令 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

耦合协调度等级初步划分参考廖重斌^[21]提出的 10 级标准,结合本文计算结果的实际分布特征,为更清晰地展现样本间差异,将性质相近的相邻等级进行合并,最终将耦合协调度划分为 5 个等级(见表 5)。

表 5 耦合协调度等级划分

耦合协调度	耦合协调度等级
$0.8 < d_{cc} \leq 1.0$	优质协调
$0.6 < d_{cc} \leq 0.8$	良好协调
$0.4 < d_{cc} \leq 0.6$	一般协调
$0.2 < d_{cc} \leq 0.4$	较差协调
$0.0 < d_{cc} \leq 0.2$	极差协调

3 结果与分析

3.1 植物群落基本特征

本文共调查 123 个植物群落样地(仅统计乔灌木),调查发现:群落物种数介于 1~9 种之间,多数群落包含 2~4 种生活型;近半群落具有 2 类观赏特性,同时具备 4 类观赏特性的较少;季相变化方面,多数群落季相覆盖 3~4 个季节,四季观赏色彩数量较为丰富;群落垂直结构以 2~5 层为主,多数群落达到 3 层及以上。

3.2 植物群落景观质量评价分析

各景观质量等级植物群落郁闭度与群落类型分布见图 2。其中“非常好”等级的样地 44 个,“较好”等级 42 个,“一般”等级 18 个,“较差”等级 19 个,各等级特征如下:

a) “非常好”等级。评分范围 0.67~0.91,包含高郁闭度植物群落 21 个、中郁闭度 16 个、低郁闭度 7 个。群落类型以乔灌型为主,植物种类丰富,通常为 4~10 种,生活型 2~3 类,观赏特性 3~4 类,垂直结构 3~5 层,季相观赏覆盖 3~4 季。该类群落景观结构完整、季相变化连续,综合评价最高。

b) “较好”等级。评分范围 0.49~0.66,包含高郁闭度植物群落 13 个、中郁闭度 16 个、低郁闭度 13 个。乔灌型(19 个)、乔木型群落(23 个)分布较均衡,物种数 2~5 种,生活型 2 类,观赏特性 2~3 类,垂直结构多为 3 层,季相观赏覆盖 2~4 季。群落景观结构协调,但丰富度与季相连续性仍有提升空间。

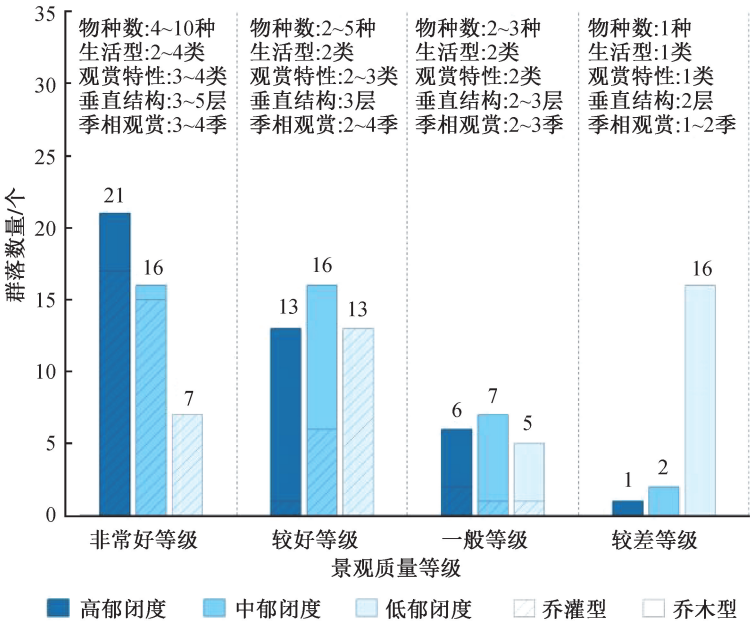


图 2 各景观质量等级植物群落郁闭度与群落类型分布柱状图

c) “一般”等级。评分范围 0.28~0.48, 包含高郁闭度植物群落 6 个、中郁闭度 7 个、低郁闭度 5 个。群落以乔木型为主, 物种数较少, 为 2~3 种, 生活型与观赏特性较为单一, 均为 2 类, 垂直结构多为 2~3 层, 观赏季节集中于 2~3 季。整体景观结构简单, 季相连续性较弱。

d) “较差”等级。评分低于 0.21, 包含高郁闭度植物群落 1 个、中郁闭度 2 个、低郁闭度 16 个。群落均为乔木型, 物种高度单一, 多数仅 1 种, 生活型、观赏特性及垂直结构均显著简化, 季相观赏期仅 1~2 季。群落景观构成单调、季相断裂, 导致物种多样性、生活型多样性及层次丰富度等指标偏低, 综合评价最低。

3.3 植物群落碳汇量分析

基于聚类分析结果, 植物群落碳汇量及等级分布如图 3 所示, 从图中看出: 高、中、低碳汇量样地数量分别为 6 个、22 个和 95 个, 3 号样地碳汇量最高(5588.50 kg, 高郁闭度, 包含三角枫 3 株、栾树 5 株、桂花 3 株); 118 号样地碳汇量最低(24.26 kg, 低郁闭度, 仅含乐昌含笑 1 株)。

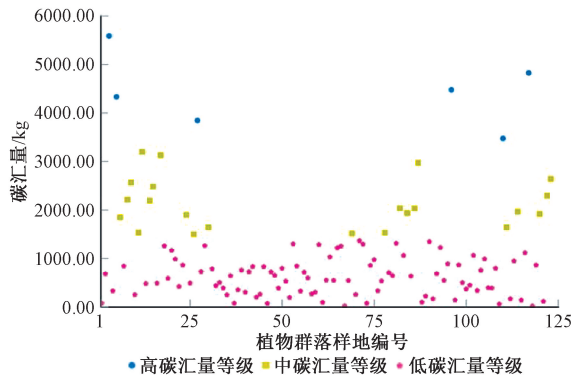


图 3 植物群落碳汇量及等级分布散点图

3.4 景观质量与碳汇功能的耦合协调度分析

景观质量评价与碳汇量耦合协调度及等级分布见图 4, 各耦合协调度等级植物群落郁闭度与群落类型分布见图 5。分析表明, 景观质量与碳汇功能之间存在非线性耦合关系, 单一指标的优势无法弥补另一指标的不足。其中, “优质协调”样地 9 个(7%), “良好协调”26 个(21%), “一般协调”59 个(48%), “较差协调”22 个(18%), “极差协调”7 个(6%), 各协调等级群落特征如下:

a) “优质协调”等级。包含乔灌型植物群落 6 个、乔木型 3 个, 以中高郁闭度为主。物种数 3~8 种, 生活型 2~4 类, 观赏特性 2~4 类, 垂直层次 3~5 层, 观赏期多覆盖 3~4 季, 四季色彩丰富, 为

5~12 种。该类群落碳汇功能与景观质量高度协调, 通过适度的物种与生活型组合, 形成结构稳定、视觉丰富的中度复杂群落。合理的垂直层次与多种观赏植物配置, 构建了连续的多季相观赏序列; 中高郁闭度也有利于林内环境稳定与生物量积累, 实现生态与景观效果的协同提升。

b) “良好协调”等级。结构与“优质协调”相似, 同样以中高郁闭度为主, 包含乔灌型 20 个、乔木型 6 个。物种数 2~9 种, 生活型 2~3 类, 观赏特性 2~4 类, 垂直层次 3~5 层, 观赏期 3~4 季, 四季色彩 3~12 种。此类群落具备良好的结构基础与多季观赏潜力, 处于稳健向优质过渡阶段, 但生活型多样性、季相衔接与景观鲜明度仍有不足, 生态与景观尚未达到高度融合。

c) “一般协调”等级。乔灌型(29 个)与乔木型(30 个)样地比例均衡, 郁闭度类型分布全面。物种数 2~7 种, 生活型 2~3 类, 观赏特性 2~4 类, 垂直层次 3~4 层, 观赏期 2~4 季, 四季色彩跨度较大(2~18 种)。此类群落结构相对简化, 生活型与层次丰富度有待提升, 部分群落存在观赏期连续性不足的问题, 景观持续性与生态稳定性仍需加强。

d) “较差协调”等级。以乔木型为主(15 个), 乔灌型为辅(7 个), 绝大部分为低郁闭度, 仅少数为中郁闭度。物种数 1~3 种, 生活型 1~2 类, 观赏特性限于 1~2 类, 垂直层次缩至 2~3 层, 观赏季节分布离散, 介于 1~4 季之间, 四季色彩 2~7 种。此类群落结构较为简单, 物种与生活型丰富度有限, 景观时序性较弱, 生态与碳汇功能存在较大提升空间, 可通过增加物种多样性、优化生活型配置、完善垂直结构及强化季相组织进行系统提升。

e) “极差协调”等级。均为低郁闭度单一乔木型群落。物种数、生活型及观赏特性普遍仅 1 种, 垂直层次局限于 2 层, 观赏季节不超过 2 季, 四季色彩数量极少, 仅 1~2 种。此类群落结构高度简化, 生态与景观功能整体较弱, 虽个别单株形态或季相可形成局部观赏点, 但群落层次不足、观赏维度单一、持续性有限, 需通过结构复层化、物种多样化及季相时序整合等方式进行系统性优化与功能重构。

植物群落景观质量与碳汇功能作为耦合协调度计算的 2 个子系统, 二者之间的关系值得关注。本文以景观质量得分“非常好”和“较差”等级以及“高碳汇量”和“低碳汇量”等级作为衡量标准, 比较后发现: 在所有样地中, 景观质量得分高且碳汇量高的样地有 6 个, 均为“优质协调”等级; 景观质量得分高但

碳汇量低的样地有 26 个,包含“良好协调”等级 7 个、“一般协调”等级 17 个、“较差协调”等级 2 个;景观质量得分低且碳汇量低的样地有 19 个,均为“极差协调”等级;样地中未出现景观质量得分低而碳汇

量高的情况。由此可见,景观质量得分高但碳汇量低的样地较多,碳汇功能是制约高景观质量样地耦合协调水平的关键短板,同步提升二者水平,才能实现优质协调。

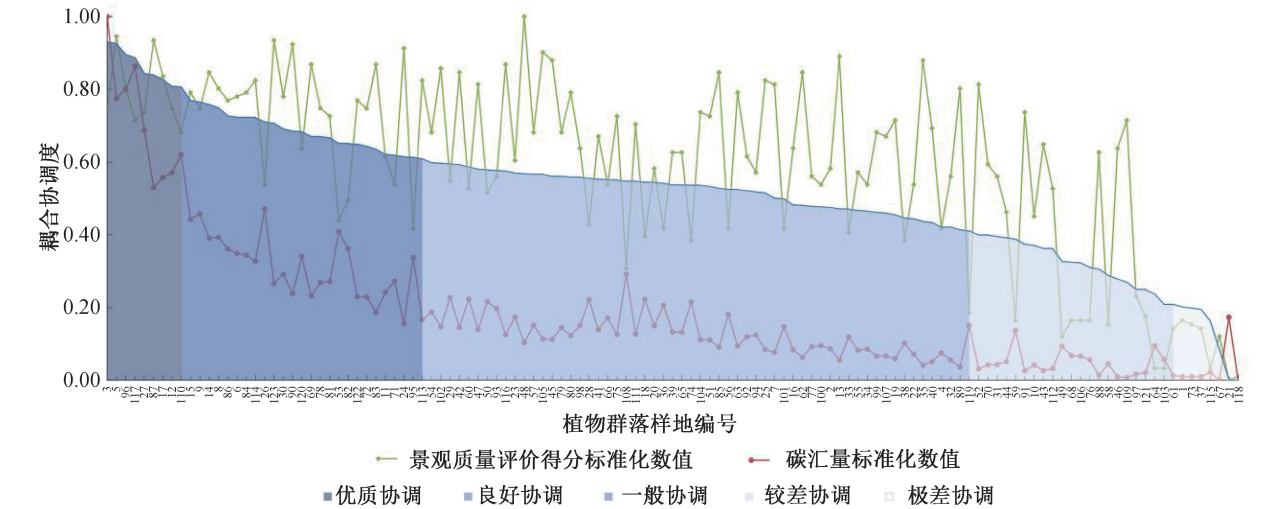


图 4 景观质量评价与碳汇量耦合协调度及等级分布折线图

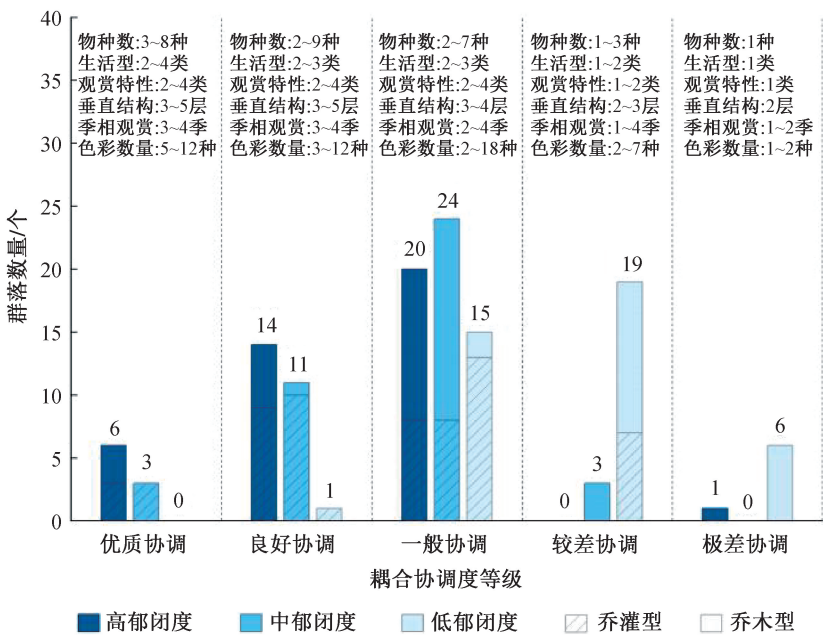


图 5 各耦合协调度等级植物群落郁闭度与群落类型分布柱状图

此外,本文发现耦合度高并不等同于耦合协调度高,存在低水平均衡陷阱,即当植物群落景观质量与碳汇功能 2 个子系统均处于低水平时,同样会形成高耦合假象。例如,耦合度介于 0.96~1.00 的 4 个样地虽属于高耦合度,但其耦合协调度仅为 0.16~0.39,处于“较差协调”和“极差协调”等级。该类群落以单一乔木为主,群落结构简单,仅单季观赏效果突出,季相连续性与垂直层次结构均存在明显不足。

综上所述,碳汇功能与景观质量达到优质及良好协调的群落,依赖于物种组成、垂直层次、季相更替及形态特征等多维度的协同配置,其内在机制在于植物群落在水平、垂直及时空维度上展现出较高的结构多样性。具体而言,中高郁闭度的乔灌木型结构是实现二者协同增效的理想模式,而低郁闭度的单一乔木型结构则易导致系统耦合协调水平下降。

3.5 高协调度群落的结构特征阈值

为提炼协同增效的关键结构特征,本文基于耦

合协调度结果选取“优质协调”与“良好协调”等级的 35 个样地作为高协调度群落。部分样地存在数据断层、显著偏离整体分布趋势的现象,将其作为异常个案予以剔除,最终保留有效样地 27 个,对应原始数据统计范围为:碳汇量 892.12~5588.50

kg,景观质量得分 0.56~0.85。各指标阈值共同构成了可量化、可操作的“中度复杂性与多样性”群落结构特征,为面向“增汇提质”目标的景观设计提供了明确的科学基准。高协调度群落的结构特征见表 6。

表 6 高协调度群落的结构特征

指标	阈值	说明
物种多样性	0.480~0.864	树种不少于 3 种,最多可达 9 种;多样性随树种类型增加及分布均匀而提升
生活型多样性	0.397~0.660	以 2~4 种为宜,生活型越多、各类型数量越均匀,多样性数值越高
观赏特性多样性	0.444~0.720	具备 2 种以上,具备观花、观果、观叶、观形等 4 种观赏类型时,观赏特性多样性数值最高;观赏类型越多、各种观赏类型植物数量越均匀,多样性数值越高
季相观赏多样性	0.660~0.872	季相覆盖至少 3 个季节,观赏季节愈多且植物分布越均匀,多样性越高
树干形态	1~5	2~3 种树干形态的组合更有利于协同提升,单一形态效果欠佳
颜色丰富度	3~17	四季观赏色彩最好 5 种以上
层次丰富度	2~5	垂直结构层次宜在 3 层以上

4 结 语

本文基于耦合协调度模型,系统分析了杭州市主城区 7 个公园 123 个植物群落的景观质量与碳汇功能的协同关系。研究发现,二者之间存在非线性耦合关系,其协同增效可通过构建“中度复杂性与多样性”植物群落实现。进一步提炼出高协调度群落(优质与良好协调等级)的量化结构特征,即物种组成不少于 3 种、生活型以 2~4 类为佳、垂直结构达到 3 层以上、季相变化覆盖至少 3 季、观赏特性不少于 2 类、四季色彩数量不低于 5 种,并搭配 2~3 种树干形态;在此结构配置下,群落碳汇量集中于 892.12~5588.50 kg 区间,景观质量评分介于 0.56~0.85 之间。此类群落在生态功能与美学表现间达成协同优化,通过多层次垂直结构与多物种功能互补,有效积累碳汇能力;同时,多类型观赏植物的合理配置与物候衔接,也保障了景观时序丰富度与视觉多样性。

理论层面,本文深化了植物群落碳汇与景观质量的关联研究,弥补了当前城市公园碳汇与景观协同不足、功能单维度分析的局限,为多目标协同优化提供了可量化的分析路径;在实践层面,提炼的关键结构特征可为存量绿地植物配置设计与精准更新提供科学依据,可直接指导其增汇提质改造,进而助力城市公园生态效益与景观品质的协同提升。

本文存在一定局限。碳汇测算上,一方面,部分树种因缺乏匹配的生物量异速生长方程而采用通用方程,可能导致碳汇量数值存在一定误差,但由于样地均采用统一测算标准与方法,因而误差影响有限;

另一方面,未测算草本层与地被层碳汇量,可能导致总碳汇被低估,后续可通过补充草本植物生物量加以完善。景观评价方面,指标未进行信效度检验,可能影响指标体系的客观性与普适性,未来可结合问卷调查与因子分析等方法,进一步完善指标体系的检验。此外,本文以地处亚热带季风气候区的杭州为例,植被类型与城市发展特征具有一定区域代表性,结论对于中国东部同气候带、同类型的城市植物景观研究具有一定的参考价值与借鉴意义,但将结论向其他地区推广时,仍需结合当地实际情况谨慎验证。未来可通过构建本地化树种生物量数据库、完善景观评价体系、分析特殊案例及扩大样本覆盖范围,不断优化研究方法的可靠性与结论的普适性,进一步凝练景观质量与碳汇功能协同的植物配置模式,并开展长期跟踪观测验证其稳定性,为存量绿地的精准更新提供动态、可推广的科学依据。

参考文献:

[1] 张丽丽,董丽,郝培尧,等. 城市更新背景下的存量绿地植物景观设计策略思考[J]. 景观设计, 2022, 20(2): 94-97, 93.

[2] Liu P, Quan F, Gao Y X. Quantitative evaluation and optimization of carbon sequestration in Chongqing's parks under the 'dual carbon' strategy[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2025, 20: 1455-1465.

[3] 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.

[4] 陈佳颖,汪鸿波,孟京辉,等. 中国人工针叶林退化及修复研究

进展[J]. 世界林业研究,2025,38(4): 99-105.

[5] 刘钊. 基于 AHP 法的太原城郊森林公园视觉景观质量评价[J]. 中南林业科技大学学报,2023,43(2): 188-200.

[6] 葛楠,李鸿祥,曹峰. 基于 SBE-AHP 法的河北塞罕坝森林公园植物景观质量评价[J]. 中南林业科技大学学报,2023,43(4): 182-190.

[7] 王一鸣,李松,蒋婧怡,等. 武汉市综合公园植物景观评价[J]. 中国城市林业, 2023, 21(2): 139-144.

[8] 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.

[9] 顾韩,施芋宇,刁洁,等. 哈尔滨丁香公园 4 种典型人工绿地群落碳密度研究[J]. 环境科学研究,2021,34(6): 1417-1424.

[10] 许杰. 城市公园绿地碳汇计量方法及影响因素分析:以济南市公园绿地为例[J]. 中国林业经济, 2025(6): 17-24.

[11] 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.

[12] 侯文硕,张瑶,张颖,等. 城市绿地固碳释氧效益对植物群落特征因子响应分析[J]. 风景园林,2024,31(6): 55-61.

[13] 李诗尧,李翅. 南太行地区碳储量与景观格局耦合协调演变[J]. 中国城市林业, 2025, 23(2): 100-106.

[14] Ma Y M, Ma M M, Lin S S, et al. Strategies for enhancing carbon sink capacity and optimizing blue-green infrastructure in Guilin City based on ArcGIS and the InVEST model[J]. Sustainability, 2026, 18(4): 1977.

[15] Simpson E H. Measurement of diversity[J]. Nature, 1949, 163(4148): 688.

[16] 吴举扬,朱江,艾训儒,等. 亚热带常绿落叶阔叶混交林木本植物生物量模型数据集[J]. 中国科学数据, 2022, 7(4): 342-353.

[17] 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: 54-56.

[18] Liu C F, Li X M. Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2012, 11(2): 121-128.

[19] 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.

[20] 邓亮,崔耀平,唐晔,等. 城市绿地碳储量分布特征及其影响因素[J]. 森林与环境学报,2023,43(3): 319-328.

[21] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系:以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999, 19(2): 171-177.

(责任编辑:康 锋)