

城市公园绿地植物群落特征与碳汇效益

张德顺¹, 李蕊¹, 姚曼卿¹, 陈莹莹¹, 胡菊²

(1. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2. 延边大学农学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 以重庆两江绿道沿线公园为研究对象, 基于 36 个典型植物群落样地及 49 种园林植物的实测数据, 系统评估碳汇效益并揭示群落结构调控机制。结果表明, 在物种尺度上, 筛选出 17 种高碳汇植物, 碳汇能力呈现乔木>灌木>草本的显著差异; 在群落尺度上, 聚类解析发现, 树干粗壮高大、冠层郁闭度高的群丛(聚类 I、II)碳汇效益最优, 于 16 个高效群落中脱颖而出; 在结构调控方面, 对于垂直层片, 宜提高高碳汇乔木配比并协同配置高碳汇灌草; 对于水平格局, 则遵循密林>中密林>疏林的梯度增效规律。据此, 从物种遴选、群落构建与空间配置 3 个维度提出城市绿地高碳汇植物配置优化策略, 为提升城市生态系统碳汇韧性与服务以支撑碳中和目标提供了理论依据与实践路径。

关键词: 碳汇效益; 高碳汇群落特征; 绿地; 优化策略

中图分类号: S688.9

文献标志码: A

Plant Community Characteristics and Carbon Sequestration Benefits of Urban Park Green Spaces

ZHANG Deshun¹, LI Rui¹, YAO Manqing¹, CHEN Yingying¹, HU Ju²

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Agriculture, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: Taking the parks along the Liangjiang Greenway in Chongqing as research objects, their carbon sequestration benefits were systematically evaluated and the regulatory mechanisms of community structures were revealed, based on measured data from 36 typical plant community plots and 49 landscaping species. The results show that: at the species scale, 17 high carbon sequestration plants were identified, with the carbon sequestration capacity showing a significant differentiation pattern of trees>shrubs>herbs; at the

community scale, cluster analysis revealed that communities with thick trunks, tall stature, and high canopy closure (cluster I, cluster II) exhibit the optimal carbon sequestration benefits, standing out among 16 high-efficiency communities; regarding the structural regulation, vertical layering should increase the proportion of high carbon sequestration trees while synergistically incorporating high carbon sequestration shrubs and herbs, whereas horizontal pattern follows a gradient efficiency rule of dense forests>moderately dense forests>sparse forests. Accordingly, optimization strategies for high carbon sequestration plant configuration in urban green spaces were proposed from three dimensions: species selection, community construction, and spatial arrangement, providing a theoretical basis and practical pathway for enhancing the carbon sequestration resilience of urban ecosystems and supporting the goal of carbon neutrality.

Keywords: carbon sequestration benefits; communities characteristics with higher carbon sink; green space; optimization strategy

全球气候变暖是当今世界普遍关注的焦点, 过量碳排将导致变暖趋势进一步加剧, 给人类生态环境带来严峻挑战。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告指出, 全球范围内碳排放量总体呈递增趋势^[1]。城市作为碳排主体, 是应对气候变暖的关键场所, 减排增汇是实现“双碳”目标的重要对策^[2-3]。绿地作为城市生态系统的重要组成部分, 植物群落结构层次丰富多样, 是直接固碳增汇、间接减排的核心环节之一, 对维持城市碳氧平衡、生态安全格局和绿地健康可持续发展具有重要作用^[4-6]。马斯喀特城

收稿日期: 2024-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(32071824); 2024年同济大学研究生教材建设项目(2024JC07); 同济大学国家级一流本科课程项目(0100104369)

第一作者: 张德顺, 教授, 博士生导师, 农学博士, 主要研究方向为园林植物与风景园林规划设计。

E-mail: zds@tongji.edu.cn

通信作者: 胡菊, 工学博士, 主要研究方向为园林植物应用。E-mail: huju918@163.com



论文
拓展
介绍

市每公顷绿地储存了11 100 t的CO₂,且路边绿化具有更高的碳固存潜力^[7];杭州城市绿地的固碳释氧价值逐年增加,其中常绿阔叶型和常绿落叶阔叶混交型的固碳释氧价值居前2位^[8];罗马4个城市公园固碳量换算的经济价值为每公顷23 537美元^[9]。然而,植物群落的结构特点导致各地在植物群落碳汇量化方面的研究进展缓慢。同时,目前城市绿地碳汇研究主要集中于植物个体筛选及评价规律总结上^[10-12],对植物群落碳汇计算和形态特征规律关注较少,现有研究成果难以支撑低碳园林实践,且相关研究多聚焦于沿海城市^[13-15]。

近年来,随着城市化水平的提升,重庆的高温热浪问题越来越突出^[16]。同时,全球大气排放数据库显示,1997年至今,重庆碳排放增长趋势明显,近2年虽具放缓趋势但基数仍居高位。重庆两江新区位于中心城区长江以北、嘉陵江以东,包括江北区、北碚区、渝北区3个行政区部分区域^[17]。两江新区力求打造公园城市“样板”,而两江绿道建设则是重点工程之一,其建设目标是构建低碳新空间,内核宗旨是进行碳汇效益估算、塑造低碳园林。然而,目前对以重庆为代表的西南地区气候敏感城市的植物个体及群落固碳能力的研究较少。基于“双碳”目标和全球气候变化背景,探索重庆绿地碳汇效益具有紧迫性和必要性,同时对重庆应对气候变化、促进人居环境可持续发展具有重要意义。本文对重庆两江绿道沿线公园内的36个典型植物群落形态结构特征及固碳效益进行量化研究,筛选高碳汇植物及群落,总结高碳汇效益植株形态特征并提出优化策略,为重庆及周边地区高固碳效益植物配置提供理论依据,助力低碳园林建设,提升城市园林应对气候变暖的生态系统韧性。

1 研究内容与方法

1.1 群落选择

调用PIE-Engine平台相关代码计算输出区域净初级生产力(NPP,可直接反映植被碳固定能力^[18]),重庆两江新区空间分布位于植物固碳能力低值区(见图1中虚线框),可提升空间较多。群落选择遵循以下原则:植物出现频率高且较典型,结构层次多样,覆盖常绿、落叶树种,群落内植物生长稳定、长势良好且乡土植物占比较高。同时,为减少实验误差,选取环境温度、湿度、海拔、经纬度、坡度相似的群落,排除干扰因素。基于此,将重庆两江绿道沿线6个公园样地作为研究区域,从中随机选取36个典型

群落,包括13个乔-灌-草型、2个乔-灌型、11个乔-草型和10个单乔型群落,即花汇园1~7号群落、百林公园8~12号群落、动步公园13~17号群落、恋湖公园18~22号群落、江与城体育公园23~29号群落、石子山体育公园30~36号群落。样点范围涵盖全园各重要区域,设置样方面积为20 m × 20 m。

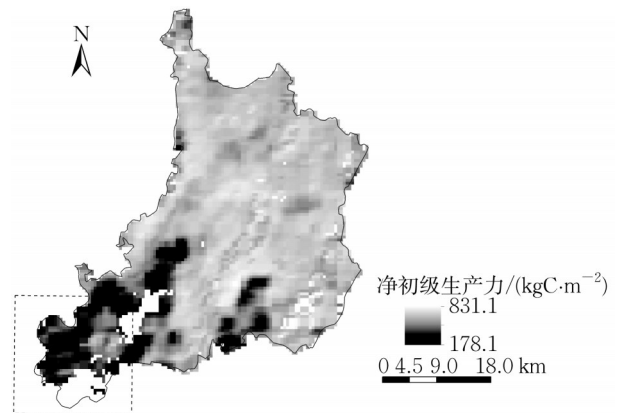


图1 重庆市渝北区植物固碳能力空间分布

Fig.1 Spatial distribution of carbon sequestration capacity of plants in Yubei, Chongqing

1.2 实验方法

1.2.1 形态指标测定

根据各群落的层次组合类型分别记录各乔木层、灌木层和草本层内植物的种类、数量。首先,测定各植株的单叶面积、总间隙率、叶面积指数、冠幅面积、横截面积、冠幅、树高、冠高、胸径/地径等指标;然后,计算各群落的平均单叶面积、平均总间隙率、平均叶面积指数、平均冠幅面积、平均横截面积、平均冠幅、平均树高、平均冠高、平均胸径/地径、郁闭度等指标。

1.2.2 光合指标测定

参照董延梅^[19]的方法,采用Li-6800光合-荧光测定仪,于2023年6—8月,选择光照充足且晴朗无风的天气,在自然光照下测定各群落内植株单元的净光合速率(P_n)日变化值,选取向阳面、大小相近、长势较好、生长健壮的植物叶片,在同一天中的08:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00测定,各时间点记录3个有效瞬时净光合速率取平均值,用于固碳量计算。过于高大而不便测量的乔木,剪取较大且粗的枝条插入水瓶中,按上述方法迅速进行离体测量。

1.3 分析方法

1.3.1 聚类分析

利用Excel将36个群落实测形态数据统计归纳,通过社会科学统计软件(SPSS)系统聚类中的组

间连接方法,对各群落形态指标进行综合聚类分析。将群落中具备相同形态特征的类型划分为同一组别,尽可能使同一组别的群落在形态特征上达成统一标准,最终输出聚类谱系图。

1.3.2 个体固碳效益估算

(1)植物个体日固碳量估算。主要采用同化量法,涉及植物光合速率、呼吸速率、叶面积指数及冠幅面积4个重要参数,日固碳量由日同化量计算得到。采用简单积分法计算测定时植物的日净同化量为^[20]

$$P = \sum_{i=1}^j \frac{3\,600[(P_{n,i+1} + P_{n,i})/2](t_{i+1} - t_i)}{1\,000} \quad (1)$$

式中: P 为日净同化量; $P_{n,i}$ 为初测点瞬时净光合速率; $P_{n,i+1}$ 为下一测点瞬时净光合速率; t_i 为初测点时间; t_{i+1} 为下一测点时间; j 为测试次数。一般植物夜间暗呼吸消耗量按白天同化量的20%计算^[15]。单位叶面积日固碳量计算式为

$$W_{\text{co}_2} = 44P(1 - 0.2)/1\,000 \quad (2)$$

单位土地面积日固碳量为

$$Q_{\text{co}_2} = W_{\text{co}_2} L \quad (3)$$

式中, L 为植物叶面积指数。整株植物日固碳量为

$$E_{\text{co}_2} = Q_{\text{co}_2} M \quad (4)$$

式中, M 为冠幅面积。

(2)植物个体碳储量估算。主要采用生物量扩展因子法,所使用的参数均采用IPCC公布的数据^[21],据此计算材积量、生物量、碳储量。碳储量计算相关参数^[22]中,乔木、灌木和其他树木的平均干材积密度分别为0.440、0.515和0.472 $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$,而平均生物量扩展因子分别为2.01、1.75和1.98;CF缺省值^[23-24]中,亚热带所有树种的含碳率平均值为0.47,含碳率范围为0.44~0.49。地下部分碳储量受多方不可控因素的综合作用,本文暂不计算。

乔木材积计算式为

$$V = f(H + 3)g \quad (5)$$

式中: f 为实验形数^[20]; H 为高度; g 为胸高断面(距地面1.3 m)。灌木地上部分生物量计算式为

$$W_2 = 0.409\,759D^{1.061\,5}H^{0.542\,7} \quad (6)$$

式中, D 为地径。草本单位面积生物量计算式为

$$W_3 = 0.050\,492H^{0.803\,0}G^{1.087\,7} \quad (7)$$

式中, G 为盖度。乔木地上碳储量计算式为

$$S_1 = VWBC \quad (8)$$

式中: W 为木材密度; B 为生物量扩展因子; C 为植物含碳率参数。灌木地上碳储量计算式为

$$S_2 = W_2C \quad (9)$$

草本地地上碳储量计算式为

$$S_3 = W_3C \quad (10)$$

1.3.3 群落固碳效益估算

参照谢军飞等^[25]方法,结合群落郁闭度计算群落固碳效益。群落日固碳量计算式为

$$Z = \sum_{k=1}^K \frac{E_k C_k}{c} \quad (11)$$

式中: E_k 为第 k 株植物的日固碳量; C_k 为第 k 株植物的郁闭度; c 为该群落植物的总郁闭度; K 为植物总株数。树木总碳储量计算式为

$$T_c = \sum_{q=1}^n V_q \rho_q B_q C_q N_q \quad (12)$$

式中: q 为树木类型(乔木、灌木或其他); V_q 为第 q 类树材积; ρ_q 为第 q 类树密度; B_q 为第 q 类树生物量扩展因子(树干生物量/树木总生物量); C_q 为第 q 类树C含量(在同植物间变化不大,采用IPCC缺省值0.50); N_q 为第 q 类树数量。

2 结果与分析

2.1 植物群落类型分析

参照张颖^[22]对树木规格划分的标准,群落内乔木依高度划分为A、B、C类,胸径由大到小分为1、2、3级,综合冠幅划为大乔木、中乔木、小乔木;灌木依高度划分为D1(大灌木)、D2(中灌木)、D3(小灌木)层级。如表1所示,36个植物群落内的植物可细分为49种,按规格类别分大乔木1种、中乔木18种、小乔木15种、大灌木6种、中灌木3种、小灌木1种和草本5种,按生活型分常绿乔木11种、落叶乔木23种、常绿灌木8种、落叶灌木2种和常绿草本5种。

36个群落(见表2)的形态特征可聚类为5类(见图2):聚类I为树冠垂直、水平方向均较大且主干较高、枝干粗壮的群落;聚类II为树冠极茂盛、冠大荫浓、圆润丰满、叶片面积小,但着生较密,枝干高大粗壮的群落;聚类III为树冠大小中等,重心偏高,存在垂直或水平方向上的单项最大值,叶片聚集,主干中粗较长、分枝点略低的群落;聚类IV为树冠大小中等,大多群落平均冠幅面积大于横截面积,呈横向发展,叶片面积较大、树干中粗较长、分枝点高的群落;聚类V为冠部多纵向面积大于横向面积,叶片面积普遍偏低,树干中粗较长、分枝点相对较低的群落。

2.2 群落固碳效益估算

2.2.1 植株碳汇能力评价及排序

植物日固碳量呈乔木>灌木>草本的趋势,部

表1 49种植物的规格类型及日固氮量和碳储量

Tab.1 Specification type, daily carbon sequestration and carbon storage of 49 species

编号	中文名称	拉丁名	规格	日固碳量/(g·d ⁻¹)	碳储量/kg
1'	黄葛树*	<i>Ficus virens</i>	A1	21 718.87	24 509.500
2'	黄葛树*	<i>F. virens</i>	B1	4 809.83	4 536.430
3'	合欢*	<i>Albizia julibrissin</i>	B1	4 534.38	16 552.400
4'	悬铃木*	<i>Platanus × acerifolia</i>	B1	3 920.82	4 360.580
5'	蓝花楹	<i>Jacaranda mimosifolia</i>	B1	3 864.47	2 167.230
6'	蓝花楹	<i>J. mimosifolia</i>	B2	1 476.72	1 115.370
7'	榔榆*	<i>Ulmus parvifolia</i>	B2	2 618.33	1 148.760
8'	皂荚*	<i>Gleditsia sinensis</i>	B1	1 912.38	5 047.810
9'	玉兰*	<i>Yulania denudata</i>	B3	2 063.93	702.200
10'	刺槐	<i>Robinia pseudoacacia</i>	B2	1 528.98	772.680
11'	小叶榕*	<i>Ficus concinna</i>	B1	1 954.35	5 203.360
12'	小叶榕*	<i>F. concinna</i>	B2	1 750.87	1 279.110
13'	构树*	<i>Broussonetia papyrifera</i>	B2	1 855.72	863.320
14'	羊蹄甲*	<i>Bauhinia purpurea</i>	B2	1 580.24	712.720
15'	枫杨*	<i>Pterocarya stenoptera</i>	B2	1 303.67	1 344.200
16'	秋枫	<i>Bischofia javanica</i>	B2	1 051.53	904.560
17'	杨树	<i>Populus przewalskii</i>	B2	987.34	759.300
18'	银杏*	<i>Ginkgo biloba</i>	B2	657.37	545.060
19'	朴树*	<i>Celtis sinensis</i>	B2	835.17	698.960
20'	蒲桃	<i>Syzygium jambos</i>	C3	820.20	245.500
21'	荷花木兰*	<i>Magnolia grandiflora</i>	C3	689.22	197.170
22'	刺桐*	<i>Erythrina variegata</i>	C2	1 896.73	626.360
23'	香樟*	<i>Camphora officinarum</i>	C2	1 672.51	559.760
24'	香樟*	<i>C. officinarum</i>	C3	982.33	134.910
25'	皂荚*	<i>Gleditsia sinensis</i>	C2	1 126.49	704.290
26'	羊蹄甲*	<i>Bauhinia purpurea</i>	C2	946.66	273.340
27'	玉兰*	<i>Yulania denudata</i>	C3	759.22	231.730
28'	桂花*	<i>Osmanthus fragrans</i>	C3	358.77	65.940
29'	紫叶李*	<i>Prunus cerasifera</i> 'Atropurpurea'	C3	300.97	45.480
30'	杜英*	<i>Elaeocarpus decipiens</i>	C3	362.59	130.850
31'	樱花*	<i>Prunus serrulata</i>	C3	350.63	91.260
32'	柚*	<i>Citrus × junos</i>	C3	282.10	49.270
33'	木芙蓉*	<i>Hibiscus mutabilis</i>	C3	217.71	30.770
34'	紫薇*	<i>Lagerstroemia indica</i>	C3	194.31	36.710
35'	蚊母树*	<i>Distylium racemosum</i>	D1	295.44	2.380
36'	黄杨*	<i>Buxus sinica</i>	D1	152.48	2.920
37'	石榴*	<i>Punica granatum</i>	D1	406.88	9.440
38'	山茶*	<i>Camellia japonica</i>	D1	102.48	2.010
39'	杜鹃*	<i>Rhododendron simsii</i>	D1	94.37	0.810
40'	棕竹*	<i>Rhapis excelsa</i>	D1	70.63	1.120
41'	三角梅*	<i>Bougainvillea spectabilis</i>	D2	82.75	1.020
42'	海桐*	<i>Pittosporum tobira</i>	D2	82.58	2.200
43'	红花檵木*	<i>Loropetalum chinense</i> var. <i>rubrum</i>	D2	64.18	2.020
44'	红花檵木*	<i>L. chinense</i> var. <i>rubrum</i>	D3	11.34	0.580
45'	花叶艳山姜	<i>Alpinia zerumbet</i> 'Variegata'	草本	4.80	0.005
46'	蓝花草	<i>Ruellia simplex</i>	草本	3.85	0.005
47'	花叶冷水花	<i>Pilea cadierei</i>	草本	2.62	0.004
48'	早熟禾	<i>Poa annua</i>	草本	0	0.002
49'	麦冬	<i>Ophiopogon japonicus</i>	草本	2.63	0.018

注:*表示重庆乡土植物。

分灌木>乔木(35'、37')(见表1)。乔木类以黄葛树日固碳量相对较大,其中2'达4 809.83 g·d⁻¹,与日固碳量最小植物34'(194.31 g·d⁻¹)相差近25倍;乔木类优势种还有3'~5'、7'和9';灌木类日固碳量最高植物为37'(406.88 g·d⁻¹),最低为44'(11.34 g·d⁻¹);

草本类植物日固碳量差异较小,以45'(4.80 g·d⁻¹)和46'(3.85 g·d⁻¹)相对较多。

植物碳储量呈乔木>灌木>草本的趋势(见表1)。乔木类以1'最大(24 509.500 kg),3'次之(16 552.400 kg),相对优势种还有2'、4'、8'和11',碳

表2 36个群落的植物构成
Tab.2 Plant composition of 36 communities

群落编号	植物构成		
	乔木层	灌木层	草本层
1	小叶榕	杜鹃	麦冬
2	刺槐+荷花木兰+玉兰+银杏	山茶+黄杨	麦冬
3	蓝花楹+玉兰	山茶	
4	悬铃木+玉兰+樱花	蚊母树	麦冬
5	榔榆+黄葛树+银杏+紫薇	杜鹃	
6	小叶榕+银杏		
7	合欢	棕竹	麦冬
8	黄葛树+小叶榕+桂花		蓝花草
9	紫玉兰+桂花+柚		
10	蓝花楹+桂花+紫叶李		
11	刺桐+蒲桃		
12	小叶榕+秋枫+构树+桂花+樱花	红花檵木	麦冬
13	香樟+桂花+紫薇	杜鹃	蓝花草
14	香樟+小叶榕+樱花+紫叶李		花叶艳山姜
15	黄葛树+小叶榕+桂花+银杏+秋枫		早熟禾
16	小叶榕+构树+秋枫+杨树		
17	小叶榕+枫杨+蓝花楹		
18	银杏+樱花+香樟+紫薇	三角梅	蓝花草
19	樱花+紫叶李	海桐+红花檵木	早熟禾
20	羊蹄甲+紫叶李+紫薇+蓝花楹		早熟禾
21	羊蹄甲	海桐	花叶艳山姜
22	羊蹄甲+木芙蓉+紫薇	海桐	蓝花草
23	朴树+小叶榕+桂花	石榴+海桐+红花檵木	早熟禾
24	朴树+小叶榕+刺槐+桂花	海桐	早熟禾
25	小叶榕+樱花+桂花+朴树		早熟禾
26	枫杨+刺桐+刺槐+桂花		早熟禾
27	悬铃木+桂花		
28	黄葛树+紫叶李+桂花		
29	榔榆+桂花+紫叶李+杨树		早熟禾
30	皂荚+桂花		早熟禾
31	桂花+荷花木兰+秋枫+香樟		
32	香樟+蓝花楹+皂荚		早熟禾
33	蓝花楹+紫叶李+桂花	山茶	花叶冷水花
34	蒲桃+香樟+山杜英		早熟禾
35	秋枫+山杜英+柚		
36	黄葛树+秋枫+皂荚+蒲桃		早熟禾

储量值为4 300~5 300 kg;乔木类最小碳储量植物为34'(36.710 kg),与1'差异极大;灌木类碳储量最高植物为37'(9.440 kg),与乔木最小植物34'相差近3.9倍,与草本差距更胜。这说明,植物碳储量与其规格大小和植物材积存在紧密联系,树干更高大、枝干更粗壮的植物所能承载的碳储量更多。

基于上述结果,将49种植物划分为高碳汇植物、较高碳汇植物、中等碳汇植物、较低碳汇植物和低碳汇植物5类(见表3)。碳汇效益呈乔木>灌木>草本的趋势,较高碳汇效益植物主要为大中型乔木,小规格乔木多为中低碳汇等级,而小型乔木(22'、23')有较高碳汇效益,具有一定固碳潜力。灌草层单株植物碳汇效益偏低,但存在部分先锋物种(35'~38'),同样具有固碳潜力。进一步探讨灌草层

的固碳潜力,设置乔-灌组、乔-草组、灌-草组进行实验,获得潜力灌草植物有35'、38'、40'~42'、45'~49'。

2.2.2 群落碳汇效益估算分析

(1)不同类型群落碳汇效益分析(见图3)。不同类型群落的日固碳量整体为:聚类II(9 536~46 458 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)>聚类I(5 000~12 571 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)>其余3类(0~<5 000 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)。不同类型群落的碳储量为:聚类I集中在8 431~74 607 kg,聚类II分布于22 104~22 232 kg,聚类III、IV、V分别为5 016~8 313 kg、1 338~24 291 kg、1 109~54 835 kg。结果表明,植物群落的日固碳量和碳储量存在差异,均为聚类I、II大于其余3类,群落固碳量受内部植株单元体量和干形的影响,枝干越高大粗壮、树形越冠大荫浓的类型固碳效益越好。

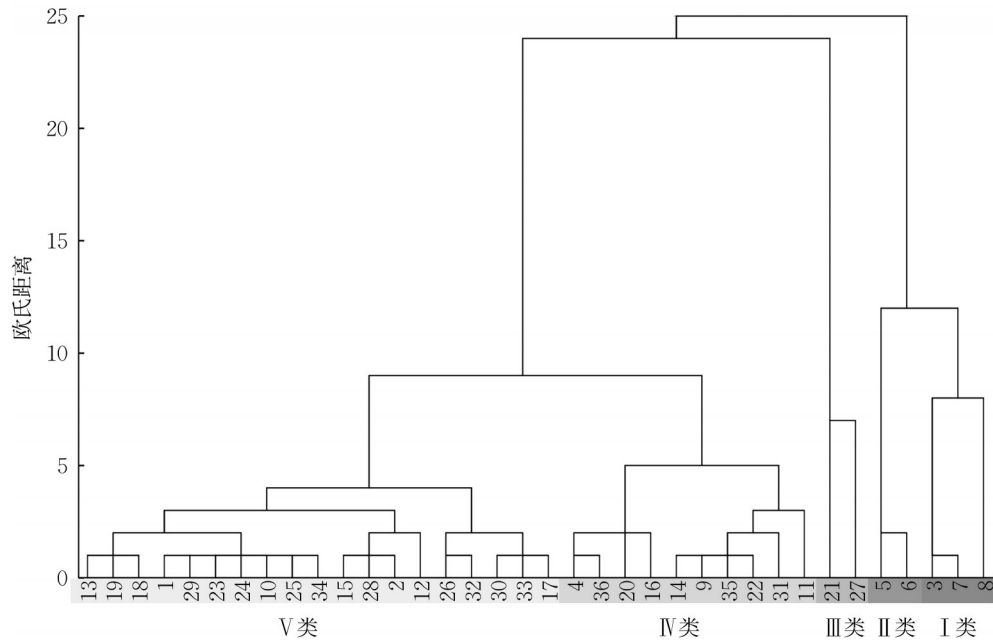


图2 群落形态结构因子聚类谱系

Fig.2 Clustering pedigree of community morphological and structural factors

表3 不同规格植物碳汇能力分类

Tab.3 Category of carbon sink capacities of species in different specifications

植物类别	高碳汇植物	较高碳汇植物	中等碳汇植物	较低碳汇植物	低碳汇植物
乔木	大乔木 1'	中乔木 2'~5', 8', 11'	小乔木 6', 7', 9', 10', 12'~15'	20', 21', 24'~27'	28'~34'
灌木	大灌木	中灌木	小灌木	35'~38'	39', 40'
					41'~43'
					44'
草本					45'~49'

(2)不同结构特征群落碳汇效益分析。垂直结构上(见表4),相同群落类别下各层次结构固碳效益存在明显差异,聚类I、II、III、IV、V分别呈现乔-灌群落>乔-灌-草群落、单乔群落>乔-灌群落、单乔群落>乔-灌-草群落、乔-灌-草群落>乔-草群落>单乔群落、乔-草群落>乔-灌-草群落>单乔群落的现象;相同层次结构上,乔-灌-草群落固碳效益以聚类I>聚类IV>聚类V>聚类III,乔-灌层次结构以聚类I、II差异明显,乔-草结构整体以聚类V>聚类IV,单乔结构以聚类II>聚类III>聚类V>聚类IV。根据联合国粮农组织规定,水平结构上郁闭度>70%为密林,20%~70%为中密林,≤20%为疏林。水平结构上(见表5),聚类I、III、IV以密林和中密林为主,且固碳效益均呈密林>中密林,聚类II为密林,聚类V中3种类型均有分布,固碳效益为密林>中密林>疏林,说明群落水平结构密度越高则碳汇效益越好;相同水平结构比较,密林类群落日固

碳量为聚类II>其余4类,碳储量为聚类I最多,中密林固碳效益为聚类I高于聚类III、IV、V。结果表明,各类群落不同结构对固碳效益具有重要影响,垂直结构上固碳效益较高的群落均注重高固碳乔木的占比,占比越高碳汇效益越明显,同时辅助配置高碳汇灌草植物,4类结构层次均能发挥最大碳汇效益;水平结构上,各类群落固碳效益呈密林类高于中密林和疏林类的规律,该特征可作为塑造高固碳群落的重要理论支撑。

(3)植物群落固碳效益综合评价分析。将36个群落按类型整合并分别聚类,筛选出较高及以上固碳等级群落为聚类I中的8、3、7,聚类II中的5、6,聚类III中的27,聚类IV中的4、36,聚类V中的30、33、32、12、15、1、26、28(见表6)。

2.3 高碳汇效益群落特征分析

如表7所示,聚类I、II由大中规格植物构成,使用高碳汇植物9种,含5种群落结构。平均冠幅面

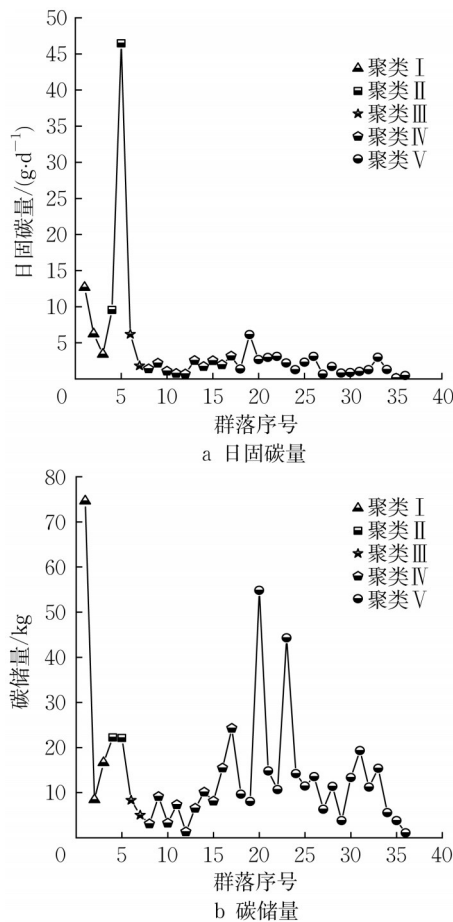


图3 不同群落日固碳量和碳储量对比

Fig.3 Comparison of daily carbon sequestration and carbon storage between different communities

积在71~142 m²区间,群落5最大(141.98 m²);平均

横截面积在47~86 m²区间;平均冠幅在6~12 m区间;平均叶面积指数在3~5区间;平均单叶面积在30~90 cm²区间;平均胸径或地径在20~42 cm区间;平均树高和冠高均以群落6最大;平均郁闭度保持在70%以上。聚类Ⅲ、Ⅳ由中小规格植物组成,涉及高碳汇植物5种,含3种群落结构。平均冠幅面积和横截面积分别在37~56 m²和41~46 m²区间;平均冠幅在5~8 m区间;平均叶面积指数在3~4区间;平均单叶面积以群落27最大,其余群落在60~70 cm²区间;平均胸径或地径在22~31 cm区间;最大、最小平均树高分别出现在群落36、27;平均冠高在5~7 m区间;平均郁闭度基本大于74%。聚类Ⅴ各群落多由较小规格植物组合而成,使用高碳汇植物12种,有8种群落结构。最大、最小平均冠幅面积分别出现在群落32、1,最大平均横截面积为群落33,平均冠幅在4~7 m区间,平均叶面积指数在2.0~4.5区间,平均单叶面积在20~55 cm²区间,平均胸径或地径在16~32 cm区间,平均树高和冠高分别在4~9 m和2.0~6.5 m区间,平均郁闭度均在50%以上。

2.4 群落特征与碳汇效益相关性分析

群落特征中平均冠幅面积、平均横截面积、平均胸径或地径、平均树高、平均冠高、平均树干材积与群落日固碳量和群落碳储量均呈显著正相关,且平均冠幅与群落日固碳量、平均郁闭度与群落碳储量也呈显著正相关(见表8)。结果表明,群落特征与碳汇效益存在一定的相关性。

表4 不同类型群落垂直结构固碳效益对比

Tab.4 Comparison of carbon sequestration benefits of vertical structure between different communities

群落类别	复层结构		双层结构				单层结构	
	乔-灌-草		乔-灌		乔-草		乔	
	平均日固碳量/ (g·d ⁻¹)	平均碳储量/ kg	平均日固碳量/ (g·d ⁻¹)	平均碳储量/ kg	平均日固碳量/ (g·d ⁻¹)	平均碳储量/ kg	平均日固碳量/ (g·d ⁻¹)	平均碳储量/ kg
I	6 818.16	33 214.25	9 456.39	41 519.25				
II			46 457.67	22 104.71			9 536.21	22 232.64
III	1 806.12	5 016.24					6 192.10	8 312.01
IV	2 126.55	13 768.55			2 348.00	10 049.96	1 355.60	6 221.36
V	1 831.52	13 896.95			2 218.34	17 545.49	1 503.24	8 309.33

3 讨论

随着城市化进程加快,城市绿地面积不断增加。作为城市范围内具有固碳作用的主要生态资源,绿地能够改善环境质量,缓解和应对全球气候变化,影响城市生态系统健康^[26-28]。植物个体碳汇是城市绿地碳汇效益研究的基础,而城市绿化中高碳汇植物

筛选是提升碳汇质量及固碳增汇的重要手段。瓦亚纳德地区45个树种610棵树木中菠萝蜜(*Artocarpus heterophyllus*)固碳能力最强,槟榔青(*Spondias pinnata*)固碳能力最弱,而楝树(*Melia azedarach*)固碳潜力最大,印楝(*Azadirachta indica*)固碳潜力最小^[29];巴基斯坦旁遮普森林部植物园蒲桃桉(*Eucalyptus botryoides*)固碳能力最

表 5 不同类型群落水平结构固碳效益对比

Tab.5 Comparison of carbon sequestration benefits of horizontal structure between different communities

群落类别	密林		中密林		疏林	
	群落日固碳量/ (g·d ⁻¹)	群落碳储量/ kg	群落日固碳量/ (g·d ⁻¹)	群落碳储量/ kg	群落日固碳量/ (g·d ⁻¹)	群落碳储量/ kg
I	9 456.39	41 519.25	6 818.16	33 214.25		
II	27 996.94	22 168.68				
III	6 192.10	8 312.01	1 806.12	5 016.24		
IV	2 152.58	12 227.99	1 453.57	5 128.19		
V	2 733.27	19 830.98	1 271.63	10 358.94	477.65	1 109.78

表 6 各群落碳汇效益筛选评价

Tab.6 Screening and evaluation of carbon sequestration benefits of each community

群落类型	高碳汇效益群落	较高碳汇效益群落	较低碳汇效益群落	低碳汇效益群落
I	8	3,7		
II	5	6		
III		27	21	
IV	4	36	31,16,20,35,14	11,22,9
V	30	33,32,12,15,1,26,28	2,25,29,18,17,23,24	34,10,19,13

高,喜马拉雅松(*Pinus roxburgii*)次之^[30];浙北地区 30 种常见绿化树种固碳量值排序前 5 的依次为香樟、碧桃(*Prunus persica* ‘Duplex’)、垂柳(*Salix babylonica*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)和黄山栎树

(*Koelreuteria bipinnata*)^[31]。同时,植物个体固碳效益受植物类型、规格等影响^[32],且树木规格与碳汇能力呈正相关^[33-34],而乔木相比灌木(草本)具有更高的固碳效益^[35]。与上述研究类似,重庆两江绿道沿线公园内的 36 个典型植物群落中不同规格植物共 49 种(见表 1),筛选出较高碳汇效益以上植物 17 种,碳汇效益呈乔木>灌木>草本的趋势(见表 3),其中大中型乔木有较高碳汇效益,而小规格乔木多为中低碳汇效益。在高碳汇效益植物筛选中,除分析树种、生活型、规格外,还进行了群落形态特征聚类分析(见图 2),为后续群落碳汇效益分析奠定了基础。

群落包括垂直结构和水平结构,垂直结构上层次结构越复杂固碳释氧能力越强,水平结构上群落

表 7 高碳汇群落特征分析

Tab.7 Characteristics analysis of high carbon sequestration communities

群落类型	群落编号	高碳汇植物或潜物种	平均冠幅面积/m ²	平均横截面/m ²	平均冠幅/m	平均叶面积指数	平均单叶面积/cm ²	平均胸径或地径/cm	平均树高/m	平均冠高/m	平均郁闭度/%	群落日固碳量/(g·d ⁻¹)	群落碳储量/kg	群落结构
I	8	1',11',46'	82.14	86.00	7.87	4.37	89.71	40.25	11.15	6.60	80.00	12 677.76	74 607.30	乔-草
	7	3',40'	71.15	62.26	6.29	3.94	47.32	31.33	7.80	6.48	70.00	6 818.16	33 214.25	乔-灌-草
	3	5',9',38'	77.70	47.50	8.45	3.79	46.02	22.67	9.89	6.93	88.00	6 235.02	8 431.20	乔-灌
II	5	1',7'	141.98	68.47	9.93	3.81	31.75	28.96	10.47	7.89	90.00	46 457.67	22 104.71	乔-灌
	6	11'	120.83	77.00	11.60	4.11	35.06	41.00	13.09	9.86	90.00	9 536.21	22 232.64	乔
III	27	4'	55.03	41.57	7.30	3.71	131.26	25.50	7.74	5.93	74.00	6 192.10	8 312.01	乔
IV	4	4',9',35'	37.85	41.23	5.76	3.93	66.21	22.20	8.29	6.18	89.50	3 165.02	24 290.23	乔-灌-草
	36	2',8'	46.51	45.85	6.86	3.34	67.18	30.20	9.22	6.92	83.00	1 965.09	15 477.48	乔-草
V	33	5',38',47'	37.35	46.37	4.98	4.01	24.84	16.50	4.83	3.26	81.00	6 141.79	8 032.30	乔-灌-草
	26	15',22',10'	37.68	27.48	5.89	2.83	27.50	20.10	7.23	5.10	84.74	3 125.61	10 691.75	乔-草
	15	2',12'	24.43	24.64	5.36	3.63	56.00	22.42	8.22	5.97	76.00	3 108.78	13 547.35	乔-草
	1	12'	22.59	13.44	4.02	4.24	32.03	18.33	4.46	2.85	50.00	3 002.79	15 382.84	乔-灌-草
	32	23',6'	42.88	27.78	6.35	2.54	21.64	24.38	7.45	5.21	99.00	2 974.39	14 820.13	乔-草
	30	8'	33.52	46.07	5.11	2.35	25.52	26.83	7.96	6.36	87.10	2 682.37	54 834.62	乔-草
	28	2'	31.87	28.07	5.53	3.29	55.61	32.00	6.84	4.98	50.79	2 305.14	11 470.14	乔
12	11',13'	27.32	14.40	4.96	3.69	43.57	22.86	6.88	3.71	88.00	2 202.27	44 284.68	乔-灌-草	

表 8 群落特征与碳汇效益相关性分析

Tab.8 Correlation analysis between community characteristics and carbon sequestration benefits

项目	平均冠幅面积	平均横截面积	平均冠幅	平均叶面积指数	平均单叶面积	平均总间隙率	平均胸径或地径	平均树高	平均冠高	平均郁闭度	平均树干材积
群落日固碳量	0.794**	0.583**	0.555**	0.236	-0.070	0.095	0.365*	0.425**	0.432**	0.286	0.508**
群落碳储量	0.394*	0.582**	0.297	0.091	-0.086	-0.310	0.575**	0.425**	0.337*	0.358*	0.828**

注:*,**分别在 0.05,0.01 级别相关性显著。

密度越高碳汇功能越强^[36]。优选固碳能力较强的植物进行组合配置,可实现降碳目标、维系生态系统碳氧平衡^[37-38]。沈阳五里河公园东侧群落多由乔-灌-草3层构成,高固碳能力植被分布地块、乔灌草均衡布局地块、植物分布密集地块、大树分布地块碳汇能力较高^[39]。南翠屏公园植物群落营建强调层次布局,有助于减少碳足迹,最大化结合低碳与生态修复需求^[40]。此外,基于高碳汇植物个体和群落筛选结果,提出高碳汇植物配置优化策略:首选高固碳效能的乡土碳汇植物,并考虑该物种在冠形上的潜在高储碳性能;在群落构建方面,应满足垂直结构和水平结构上的层次丰富性及密度适宜性,并根据不同场地类型构建不同示范群落模式,为低碳园林植物配置提供多样化且具有针对性的参考范例。未来可从风景园林视角融合多学科类型、多软件手段进行深入研究,提升高碳汇植物群落评价的深度和广度,寻求更具代表性的特征指标,指导适应不同环境的高碳汇绿地种植设计,推动城市绿化生态体系气候韧性综合提升。

4 结语

本文从群落类型、不同结构特征等方面探讨了群落固碳效益。在群落类型上,由树干粗壮高大、冠大荫浓的物种构成的聚类 I、II 碳汇效益更优;在群落空间结构方面,垂直结构上,在提升高碳汇乔木的配置比例的同时,采用高碳汇灌草进行搭配可提升群落固碳效益;水平结构上,固碳效益大小顺序为:密林>中密林>疏林。基于以上效益成果最终筛选出 16 个较高以上等级的碳汇群落名录,总结出高效益群落的特征规律。

作者贡献声明:

张德顺:实验设计。

李蕊:核心实验操作。

姚鳗卿:论文初稿撰写。

陈莹莹:参与核心实验。

胡菊:论文初稿修改与校对。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] SHOBHAKAR D. GHG emissions from urbanization and opportunities for urban carbon mitigation [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2010, 2(4): 277.
- [3] SPEAK A, ESCOBEDO F J, RUSSO A, *et al.* Total urban tree carbon storage and waste management emissions estimated using a combination of LiDAR, field measurements and an end-of-life wood approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120420.
- [4] 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.
WANG Min, SHI Qiaosha. 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, 32(8): 18.
- [5] NICESE F P, COLANGELO G, COMOLLI R, *et al.* Estimating CO₂ balance through the life cycle assessment prism: a case-study in an urban park [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 57: 126869.
- [6] CHEN M, JIA W X, DU C L, *et al.* Carbon saving potential of urban parks due to heat mitigation in Yangtze River Economic Belt [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 385: 135713.
- [7] AMOATEY P, SULAIMAN H. Quantifying carbon storage potential of urban plantations and landscapes in Muscat, Oman [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2020, 22(8): 7969.
- [8] 武文婷, 夏国元, 包志毅. 杭州市城市绿地固碳释氧价值量评估[J]. *中国园林*, 2016, 32(3): 117.
WU Wenting, XIA Guoyuan, BAO Zhiyi. The assessment of the carbon fixation and oxygen release value of the urban green space in Hangzhou [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2016, 32(3): 117.
- [9] GRATANI L, VARONE L, BONITO A. Carbon sequestration of four urban parks in Rome [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 19: 184.
- [10] STOFFBERG G H, ROOYEN M, LINDE M, *et al.* Carbon sequestration estimates of indigenous street trees in the city of Tshwane, South Africa [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2010, 9(1): 9.
- [11] MILLWARD A A, SABIR S. Benefits of a forested urban park: what is the value of Allan Gardens to the city of Toronto, Canada? [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(3): 177.
- [12] PAN L, LUO S, HU WT, *et al.* Carbon sequestration and CO₂ flux in six plant species in vertical greenery systems [J]. *Urban Ecosystems*, 2024, 28(1): 1.
- [13] 薛雪, 张金池, 孙永涛, 等. 上海常绿树种固碳释氧和降温增湿效益研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(3): 81.
XUE Xue, ZHANG Jinchi, SUN Yongtao, *et al.* Study of carbon sequestration & oxygen release and cooling & humidifying effect of main greening tree species in Shanghai

- [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(3): 81.
- [14] 赵艳玲, 阙丽艳, 车生泉. 上海社区常见园林植物固碳释氧效应及优化配置对策[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2014, 32(4): 45.
ZHAO Yanling, KAN Liyan, CHE Shengquan. A preliminary study about common garden plants' effect of carbon fixation and oxygen release in Shanghai's community and optimal arrangement [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2014, 32(4): 45.
- [15] 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.
WANG Limian, HU Yonghong, QIN Jun, *et al.* Carbon fixation and oxygen production of 151 plants in Shanghai [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2007(3): 399.
- [16] 黄海静, 马金辉, 杨雨飞. 山地城市高温热浪灾害空间识别与风险评估: 以重庆市为例[J]. 风景园林, 2024, 31(8): 95.
HUANG Haijing, MA Jinhui, YANG Yufei. Spatial identification and risk assessment of high-temperature heat wave disasters in mountain cities: a case study of Chongqing [J]. Landscape Architecture, 2024, 31(8): 95.
- [17] 李凌月, 颜文涛, 王博坤. 国家空间选择与地方空间重构: 重庆两江新区空间影响研究[J]. 西部人居环境学刊, 2023, 38(4): 69.
LI Lingyue, YAN Wentao, WANG Bokun. State spatial selectivity and local spatial restructuring: the relational spatial impacts of Chongqing Liangjiang New Area [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2023, 38(4): 69.
- [18] 曾见闻, 戴晓爱, 徐纪鹏, 等. 基于PIE-Engine云计算平台和CASA模型的植被NPP时空动态遥感检测: 以道孚县为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(5): 115.
ZENG Jianwen, DAI Xiaoi, XU Jipeng, *et al.* Remote sensing monitoring of vegetation NPP spatiotemporal dynamics based on the PIE-Engine cloud computing platform and CASA model: a case study of DaoFu County [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(5): 115.
- [19] 董延梅. 杭州花港观鱼公园57种园林树木固碳效益测算及应用研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2013.
DONG Yanmei. Research on the measure of carbon fixation benefit and appliance of 57 garden species in Hangzhou Huagangguanyu Park [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2013.
- [20] 陈高路, 陈林, 庞丹波, 等. 贺兰山10种典型植物固碳释氧能力研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 206.
CHEN Gaolu, CHEN Lin, PANG Danbo, *et al.* Study on carbon sequestration and oxygen release capacity of 10 typical plants in Helan Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 206.
- [21] IPCC. Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas 135 inventory [R]. Kyoto: Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI), 2019.
- [22] 张颖. 建筑垃圾堆山公园植物群落固碳效益量化与优化研究: 以天津南翠屏公园为例[D]. 天津: 天津大学, 2019.
ZHANG Ying. Quantification and optimization of carbon fixation benefits of park plant community under construction waste: taking Nancuiping Park in Tianjin as an example [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [23] 余春华. 提高碳汇效益的城市绿地种植设计研究: 以南京林业大学附属绿地为例[D]. 南京: 南京林业大学, 2023.
YU Chunhua. Study on planting design of urban green space to improve the efficiency of carbon sink: taking the attached green space of Nanjing Forestry University as an example [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023.
- [24] WHITTINGHILL L J, ROWE D B, SCHUTZKI R, *et al.* Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems [J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 123: 41.
- [25] 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(3): 5.
XIE Junfei, LI Yu'e, LI Yanming, *et al.* Calculation of carbon storage and sequestration in the urban trees of Beijing [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007(3): 5.
- [26] 王兴瑜, 姚文飞, 陈菲, 等. 城市公园绿地空间布局公平性研究[J]. 中国城市林业, 2024, 22(3): 112.
WANG Xingyu, YAO Wenfei, CHEN Fei, *et al.* Equity in spatial pattern of urban park green spaces [J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2024, 22(3): 112.
- [27] SARKAR C, WEBSTER C, GALLACHER J. Residential greenness and prevalence of major depressive disorders: a cross-sectional, observational, associational study of 94879 adult UK Biobank participants [J]. The Lancet Planetary Health, 2018, 2(4): e162.
- [28] EKKEL E D, DE VRIES S. Nearby green space and human health: evaluating accessibility metrics [J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 157: 214.
- [29] JITHILA P J, PRASADAN P K. Carbon sequestration by trees: a study in the Western Ghats, Wayanad Region [J]. Indian Journal of Ecology, 2018, 45(3): 479.
- [30] AFZAL M, AKHTAR A M. Factors affecting carbon sequestration in trees [J]. Journal of Agricultural Research, 2013, 51(1): 61.
- [31] 张娇, 施拥军, 朱月清, 等. 浙北地区常见绿化树种光合固碳特征[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1740.
ZHANG Jiao, SHI Yongjun, ZHU Yueqing, *et al.* The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species in northern Zhejiang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1740.
- [32] ANJALI K, KHUMAN Y S C, SOKHI J. A review of the interrelations of terrestrial carbon sequestration and urban forests [J]. AIMS Environmental Science, 2020, 7(6): 464.
- [33] SHADMAN S, KHALID P A, HANAFIAH M M, *et al.* The carbon sequestration potential of urban public parks of densely populated cities to improve environmental sustainability [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52: 102064.
- [34] 殷利华, 杭天, 徐亚如. 武汉园博园蓝绿空间碳汇绩效研究[J]. 南方建筑, 2020(3): 41.
YIN Lihua, HANG Tian, XU Yaru. Research on carbon sink performance of blue-green landscape spaces in the Wuhan

- Garden Expo Park [J]. *South Architecture*, 2020(3): 41.
- [35] ZHANG Y, MENG W Q, YUN H F, *et al.* Is urban green space a carbon sink or source? A case study of China based on LCA method [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, 94: 106766.
- [36] 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.
HOU Wenshuo, ZHANG Yao, ZHANG Ying, *et al.* Analysis of the response of the carbon sequestration and oxygen release benefits of urban green space to plant community characteristic factors [J]. *Landscape Architecture*, 2024, 31(6): 55.
- [37] 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.
WANG Hongcheng, YANG Ning. Low carbon development and cooperation innovation: the construction and management of Tianjin Low Carbon Creative Garden [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2018, 34(S2): 34.
- [38] 王晶懋, 姚盈羽, 刘晖, 等. 应对气候变化的城市公园绿地低碳景观提质增效方法: 以西安白马河公园为例[J]. *中国城市林业*, 2023, 21(2): 35.
WANG Jingmao, YAO Yingyu, LIU Hui, *et al.* Methods for improving low carbon landscape quality of urban park green space in response to climate change: a case study of Baimahe Park in Xi'an [J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2023, 21(2): 35.
- [39] 张婉茹. 基于碳汇功能的植物群落优化研究: 以五里河公园东侧为例[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
ZHANG Wanru. Optimization of plant community design based on carbon sink function: a case of east side of Wulihe Park [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.
- [40] 王洪成. 探索城市生态修复的低碳园林途径[J]. *风景园林*, 2017, 24(11): 80.
WANG Hongcheng. The approach of low carbon garden to urban ecological restoration [J]. *Landscape Architecture*, 2017, 24(11): 80.

(上接第222页)

- Applied Clay Science, 2004, 26(4): 337.
- [68] WANG S, ZHU W, QIAN X, *et al.* Temperature effects on non-Darcy flow of compacted clay [J]. *Applied Clay Science*, 2017, 135: 521.
- [69] ALPAYDIN S G, YUKSELEN A Y. Shear strength and compression behavior of colemanite-added sand-bentonite mixtures under high temperature and temperature cycles [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, 81(17): 431.
- [70] INOUE A. Characterization of illitization of smectite in bentonite beds at Kinnekulle, Sweden [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1990, 38(3): 241.
- [71] 项国圣, 卞云飞, 付文青, 等. 热-碱作用对压实膨润土抗剪性能的影响[J]. *安徽建筑大学学报*, 2024, 32(6): 8.
XIANG Guosheng, BIAN Yunfei, FU Wenqing, *et al.* Study on effect of temperature-alkali interaction on the shear properties of compacted bentonite [J]. *Journal of Anhui Jianzhu University*, 2024, 32(6): 8.
- [72] 曾召田, 梁珍, 邵捷昇, 等. 碱-热环境下MX80膨润土导热性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(S2): 155.
ZENG Zhaotian, LIANG Zhen, SHAO Jiesheng, *et al.* Experimental study on thermal conductivity of MX80 bentonite under alkali-thermal environment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(S2): 155.
- [73] CHEN J, JIANG H, LIU Y D, *et al.* Study on the influence of water content on the shear behavior of the soil-structure interface under a temperature field [J]. *Buildings*, 2025, 1(15): 2075.
- [74] CHANG C, BORGLIN S, CHOU C W, *et al.* Hydro-mechanical behavior of heated bentonite buffer for geologic disposal of high-level radioactive waste: a bench-scale X-ray computed tomography investigation [J]. *Applied Clay Science*, 2023, 232: 106792.
- [75] SABA S. Hydro-mechanical behaviour of bentonite-sand mixture used as sealing materials in radioactive waste disposal galleries [D]. Paris: Université Paris-Est, 2013.
- [76] VILAR O M. A simplified procedure to estimate the shear strength envelope of unsaturated soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43(10): 1088.
- [77] HAN Z, VANAPALLI S K. Stiffness and shear strength of unsaturated soils in relation to soil-water characteristic curve [J]. *Geotechnique*, 2016, 66(8): 627.
- [78] PHAM T A, SUTMAN M. An analytical model for predicting the shear strength of unsaturated soils [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 2023, 176(4): 369.
- [79] XU Y F. Peak shear strength of compacted GMZ bentonites in saline solution [J]. *Engineering Geology*, 2019, 251: 93.
- [80] XU Y F, MATSUOKA H, SUN D A. Swelling characteristics of fractal-textured bentonite and its mixtures [J]. *Applied Clay Science*, 2003, 22(4): 197.