

基于功能性状的城市绿地植物群落碳汇效益评估

Assessment of Carbon Sequestration Benefits from Urban Green Land Plant Communities Based on Functional Traits

李佳欣¹ 刘 晖^{1,2} 王晶懋^{1,2} 张晓彤^{2*} 李仓拴³ 杨 莹²
LI Jiaxin¹ LIU Hui^{1,2} WANG Jingmao^{1,2} ZHANG Xiaotong^{2*} LI Cangshuan³ YANG Ying²

(1.西安建筑科技大学交叉创新研究院, 西安 710055; 2.西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710055; 3.西北农林科技大学风景园林艺术学院, 杨凌 712100)

(1. Institute for Interdisciplinary Innovation Research, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi, China, 710055; 2. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi, China, 710055; 3. College of Landscape Architecture Art, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, China, 712100)

文章编号: 1000-0283(2025)07-0023-09
DOI: 10.12193/j.laing.2025.07.0023.003
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-01-26
修回日期: 2025-03-12

摘 要

城市绿地植物群落碳汇提升的研究正逐步从植物个体性状转向更加系统的群落视角。以西咸新区渭河北岸中段 13.5 hm² 绿地的植物群落为研究对象, 统计不同植被类型群落的年固碳量、碳储量与功能多样性, 并进行相关性分析和多元逐步回归分析。结果显示: 林地群落乔木层平均高度、胸径等与年固碳量显著正相关 ($p<0.05$); 灌丛群落平均高度与年固碳量显著正相关 ($p<0.05$); 草甸地被群落平均高度、叶面积、叶面积指数与年固碳量极显著正相关 ($p<0.01$)。林地群落年固碳量可由群落平均叶面积指数等拟合, 草甸地被群落年固碳量可由群落平均高度、叶面积指数等拟合。群落碳汇提升更依赖优势物种性状而非多样性互补效应。提出适用三种植被的高固碳植物群落配置模式, 林地群落年固碳量达 10.25 t/hm², 草甸地被达 21.6 kg/m²。研究结果为城市绿地碳汇提质增效提供了量化设计模式, 为实现低碳城市和可持续发展提供了理论支持和实践指导。

关键词

碳汇; 植物群落; 功能性状; 功能多样性; 年固碳量; 碳储量

Abstract

The current research on carbon sequestration in plant communities within urban green spaces should shift from focusing on individual plant indices to considering the community as a whole. In this study, the plant communities of 13.5 hm² of green land located in the middle section of the north bank of the Weihe River in Xixian New Area were examined. The annual carbon sequestration, carbon storage, and functional diversity of different vegetation types within communities were assessed, and correlation analysis and multiple-step regression analysis were conducted. The results showed that the average height and diameter of the tree layer were positively correlated with annual carbon sequestration ($p<0.05$). The average height of the shrub community was positively correlated with annual carbon sequestration ($p<0.05$). The average height of the meadow ground cover community were positively correlated with the annual carbon sequestration ($p<0.01$). The average leaf area index can fit the annual carbon sequestration of the forest land community, and the annual carbon sequestration of the meadow ground cover community can be fitted by the average community height and leaf area index. The increase of community carbon sink is more dependent on the traits of dominant species than on the complementary effects of diversity. The high carbon sequestration plant community allocation model with three planting covers was proposed. The annual carbon sequestration of the forest community was 10.25 t/hm², and that of the meadow ground was 21.6 kg/m². The research results offer a quantitative design paradigm for enhancing the quality and efficiency of urban green space carbon sinks, providing theoretical support and practical guidance for achieving low-carbon cities and sustainable development.

Keywords

carbon sink; plant community; functional trait; functional diversity; annual carbon sequestration; carbon storage

李佳欣

2000年生/女/江西宜春人/在读硕士研究生/研究方向为人居环境生态学

刘 晖

1968年生/女/辽宁沈阳人/博士/教授、博士生导师/西北地景研究所所长/研究方向为西北脆弱生态环境景观规划设计理论与方法、中国地景文化历史与理论

张晓彤

1997年生/女/山东潍坊人/在读博士研究生/研究方向为风景园林规划设计

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 1426758722@qq.com

基金项目:

陕西省自然科学基金一般项目“关中地区城市社区绿地碳汇提质增效与健康公平协同涉及方法研究”(编号: 2023-JC-QN-0525); 渭南市海绵城市建设专题研究服务项目“西部黄土高原地区典型海绵设施适宜性植物选型及景观配置研究”(编号: 20230759)

随着城市化进程加速与全球气温持续升高, 多个国家和地区承诺通过降低温室气体排放来应对气候挑战, 并设定了“双碳”目标^[1]。中国“十四五”规划明确提出要加强城市绿地建设, 提高城市生态服务功能。城市绿地作为城市生态系统中唯一能够实现直接增汇的单元^[2], 其固碳释氧能力对于实现“双碳”目标具有重要意义。在城市碳中和与可持续发展的背景下, 低碳设计作为一种生态规划理念, 通过优化建筑设计与景观布局减少碳排放并增强碳汇能力^[3], 已成为重要的研究方向。国际经验表明通过增加城市绿地面积、实施适应性绿地管理^[4]和优化交通网络^[5]等措施, 可实现低碳与生态效益的双赢。国内的低碳设计研究与实践也在快速推进, 如小尺度绿地营建过程中以全生命周期碳排和碳汇为切入点^[6], 改善绿地碳平衡; 多个城市通过优化绿地系统、实施生态修复工程^[7]和推广海绵城市建设等, 显著提升了城市的碳汇能力和生态服务功能。

城市绿地在减碳增汇、提升城市环境质量和维持生态系统稳定方面发挥着不可替代的作用。不同类型植被的碳汇效益存在显著差异^[8], 群落特征在决定其碳汇能力上起着关键作用。在“双碳”目标的驱动下, 如何在有限的城市绿地空间内优化植物配置和群落建设, 提升其生态效益, 是实现低碳城市和可持续发展的研究重点。群落水平的功能性状特征包括常见的群落特征和丰富的植物生理指标, 能在一定程度上反映植物群落碳积累的机制。本研究尝试将功能性状理论嵌入城市绿地低碳设计, 旨在明确城市绿地植物群落的碳汇功能与群落功能性状特征的关系及其作用机制, 为高碳汇群落配置提供可量化的科学依据, 同时为实现碳中和目标和提升城市绿地生态系统功能提供理论支撑。

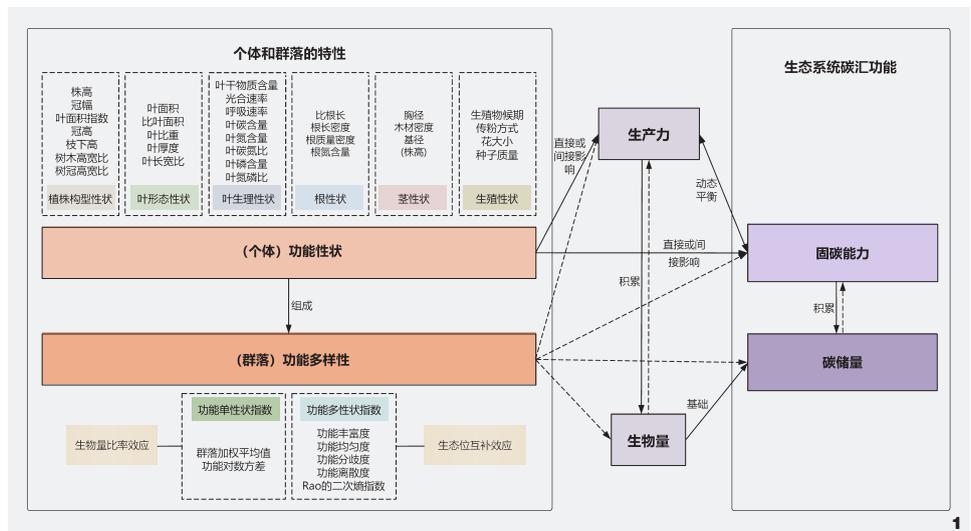


图1 功能多样性与生态系统碳汇功能关系
Fig. 1 Relationship between functional diversity and ecosystem carbon sink function

1 基于功能性状的植物群落碳汇提升必要性研究

1.1 城市绿地高固碳型植物群落构建不足之处

传统生态理论和城市绿化实践多囿于规模扩张的粗放式管理, 较为依赖绿地率等单一指标^[9]。然而, 土地资源的有限性、空间分布的不连续性以及立地条件的复杂性要求城市绿地转向强调提质增效的精细化管理^[10]。近年来, 大量研究尝试从筛选植物固碳树种^[11]、优化径级结构^[12]和群落密度^[13]等角度提升植物群落碳汇, 却尚未建立群落特征与碳汇能力之间的定量关联模型, 难以揭示其核心作用机制。

1.2 功能性状对植物群落碳汇产生重要影响

随着研究的不断推进, 研究者发现基于植物功能性状 (functional traits) 的功能多样性 (Functional Diversity, FD) 能够提供更多植物功能特征和生活史策略的有效信息, 因而在解释生态系统功能上展现出更强的解释力^[14], 其中包括对生产力和固碳功能的解释力, 从

而弥补物种多样性对群落碳汇影响不明确的不足。功能性状, 是指在植物个体水平上的形态、生理和生活史特征^[15], 体现植物的环境适应性, 与生态系统服务功能相关的性状可分为6类^[16]; 功能多样性指群落中植物功能性状的范围、空间分布和离散程度; 功能性状的群落加权平均值 (Community Weighted Mean, CWM) 反映以物种多度或生物量为权重的群落水平上功能性状的组成优势^[17]。生态位互补效应表明, 物种间性状值的差异通过资源利用提高整体生态系统的生产率, 从而促进生物量和碳储量的增加^[18], 对应计算功能多样性指数; 生物量比率效应表明, 物种对生态系统功能的影响取决于优势物种性状特征及其占比^[19], 对应计算群落加权平均值, 二者共同影响森林群落碳汇功能^[20], 具体关系见图1。图中, 不同个体功能性状组成群落功能多样性; 功能性状 (光合速率) 直接或间接 (株高) 间接影响生产力和固碳能力。生产力和固碳能力的关系概括为动态平衡, 涵盖短期相互促进和长期系统调节; 二者积累后分别

转化为生物量和碳储量；生物量是碳储量的基础。虚线箭头表示复杂的间接驱动关系。Yang等^[21]认为植物功能多样性-优势性状值是碳储存的主要驱动因素。Asanok等^[22]发现群落木材密度和比叶面积最能预测生态系统总碳。更多证据表明，功能多样性的提高在一定程度上有助于增强植被的生产力^[22]。因此，功能多样性对增加植物群落碳储量和促进群落生产力具有关键作用^[23]，城市绿地碳汇提升的核心在于具有特定功能性状的优势物种及其组合，而非单一指标或物种多样性。

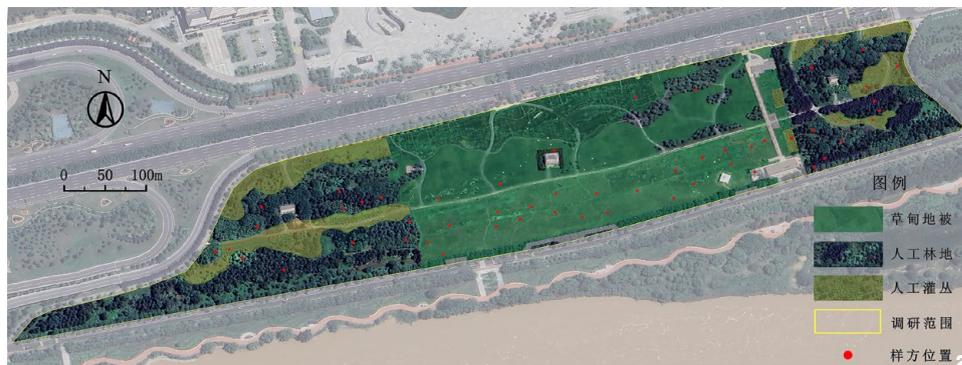


图2 研究区各植被类型分布
Fig. 2 Distribution of vegetation types in the study area

2 研究区域与方法

2.1 研究区域

本研究区地处陕西省西咸新区渭河北岸 (108.86° E, 34.39° N)，位于大秦文明园的南部及三河一山绿道中部，包括郊野公园秦陌花塘及其周边林地，占地14.5 hm²，属农林地。两侧植被为人工林地和人工灌丛，中部植被为草甸地被 (图2)。

于2024年4-11月对研究区植物群落进行调查。两侧植被选取22个10 m×10 m人工林地群落样方，林地中的根据乔木平均胸径 (2~15 cm、16~45 cm) 将针叶林和阔叶林划分为小径级、中径级群落；7个2 m×2 m人工灌丛群落样方；中部草甸地被选取不同群落外貌的样地24个，每个样地设置3个1 m×1 m样方，以生活型划分群落类型 (表1)。

2.2 植物群落固碳量与碳储量测定

2.2.1 乔灌植物年固碳量和碳储量的测定与计算

对乔灌植物采用“模型测算法”。样方内选取胸径大于2 cm的乔木和所有灌木，记录其数量、高度 (Height, H)、胸径 (Diameter at Breast Height, DBH) (灌木记录基径和分枝数)、冠幅 (Crown Width, CW) 等，输入iTree-Eco软件

表1 调研样方汇总表
Tab. 1 Summary of survey quadrats

植被类型 Vegetation type	植被面积 /hm ² Vegetation area	群落分类 Community classification	样方规格 /m Quadrat specification	样方数量 /个 Quadrat quantity
人工林地	6.19	小径级阔叶林	10×10	8
		中径级阔叶林		8
		中径级针叶林		6
人工灌丛	1.57	灌丛	2×2	7
草甸地被	6.32	多年生草本群落	1×1	45
		一年或二年生草本群落		27

计算单棵乔木或灌木的年固碳量和碳储量。

$$W_C = P \times 44 / 1\ 000 \quad (2)$$

进而计算单位土地面积某种植物日固碳量、单位土地面积群落月固碳量，计算见公式 (3) (4)。

$$W = W_C \times L \quad (3)$$

$$W_M = \sum_{n=1}^m W \times D \quad (4)$$

式中， P 为植物的日同化总量，单位为mmol/(m²·d)； p_i 、 p_{i+1} 、 t_i 和 t_{i+1} 分别为测点*i*、*i*+1的瞬时光合速率和时间，单位为μmol/(m²·s)和h； j 为测点数量； W_C 表示植物单位叶面积日固碳量，单位为g/(m²·d)； L 为叶面积指数； W 、 W_M 分别为单位土地面积某种植物一天、某群落一个月固碳量，单位为g/m²； n 为物种编号， m 为物种数量； D 为月有效光合天数，根据陕西省地方志办公

2.2.2 地被植物群落固碳量的测定与计算

对地被植物群落采用“同化量法”^[6]。选择晴朗天气在8:00-18:00每2 h测定1轮，每种植物选取至少3个成熟健康叶片，用Li-6400便携式光合测定仪净光合速率 (Net Photosynthesis Rate, NPR) 和蒸腾速率 (Transpiration Rate, TR)。假定光合有效辐射每天10 h^[2]，则单位叶面积日同化量计算见公式 (1)。

$$P = \sum_{i=1}^j \left[\frac{p_{i+1} + p_i}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times (3\ 600 / 1\ 000) \right] \quad (1)$$

通过摩尔质量数换算为单位叶面积日固碳量，计算见公式 (2)。

室网站获取。

2.3 功能性状采集与计算

选择H、NPR、TR、叶面积(Leaf Area, LA)、叶比重(Leaf Mass per Area, LMA)、比叶面积(Specific Leaf Area, SLA)、叶干物质含量(Leaf Dry Matter Content, LDMC)、叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)和生殖物候期(Reproductive Phenology Duration, RPD)作为描述地被植物的功能性状,选择DBH、H、CW、LA、LMA、SLA、LDMC、LAI和木质密度(Wood Density, WD)作为描述木本植物的功能性状,其中RPD数据来源于iPlant.cn植物智网站,WD数据来源于《中国主要树种的木材物理力学性质》。将NPR叶片用湿巾包好放入保鲜袋中带回实验室,擦干叶片水分称叶片鲜重(Leaf Fresh Weigh, LFW),用透明板将叶片和直尺压住,拍照后导入ImageJ软件中测定LA。将叶片放入信封在80℃烘箱中烘干至恒重,称叶片干重(Leaf Dry Weight, LDW)。所需叶片性状计算公式(5)–(7)。

$$L_m = L_d / L_a \quad (5)$$

$$S_l = L_a / L_d \quad (6)$$

$$L_c = L_d / L_f \quad (7)$$

式中, L_m 表示叶比重, L_d 表示叶片干重, L_a 表示叶面积, S_l 表示比叶面积, L_c 表示叶干物质含量, L_f 表示叶片鲜重。

2.4 功能多样性计算

采用多度加权的单性状指数CWM计算林地、灌地、草甸地被群落水平上功能性状的组成优势,采用多性状指数功能丰富度(Functional Richness, FRic)、功能均匀度(Functional Evenness, FEve)、功能分异度(Functional Divergence, FDiv)、功能离散度(Functional Dispersion, FDis)、Rao的二次熵(Rao's quadratic entropy, FD_0)

来量化草甸地被群落的功能多样性;计算通过R4.4.3软件的“FD”包完成。其中,FRic表示群落所有物种功能性状的多维空间的所占体积;FEve表示功能性状在性状空间中物种分布的规律性及丰度;FDiv表示物种丰度在功能性状空间内的分布及物种与质心距离的散度;FDis表示功能性状空间中物种质心之间的平均距离; FD_0 描述群落中物种之间平均功能性状的差异性^[24]。

2.5 数据分析

数据的整理在Excel中完成,统计学分析方法包括单因素方差分析、Pearson相关性分析、多元逐步回归分析等,在SPSS 27.0和Origin 2022中完成。在进行单因素方差分析和相关性分析前,对所有变量进行正态性检验,对于不符合正态分布的变量采用对数转换法处理。多元逐步回归以调整 R^2 为准则,逐步选择变量构建模型,并通过F检验确认模型的显著性;在多元逐步回归分析前计算方差膨胀因子以剔除 $VF > 5$ 的变量,以避免多重共线性。利用Excel和Origin完成图形绘制。

3 植物群落碳汇效益与功能性状的实证分析

3.1 调研区植物物种组成

本次调查共记录植物48科92属107种(图3),草本、灌木、乔木物种数占比分别为63.6%、16.8%和16.8%。自生植物占总数的66.4%,乡土植物占总数的67.3%。种数排名前三的科依次为菊科(23种)、禾本科(12种)、蔷薇科(10种),占总数的50.5%。

3.2 植物群落的固碳能力差异和功能性状特征分析

3.2.1 不同植被群落的固碳能力差异

对研究区域中各群落的年固碳量和碳储

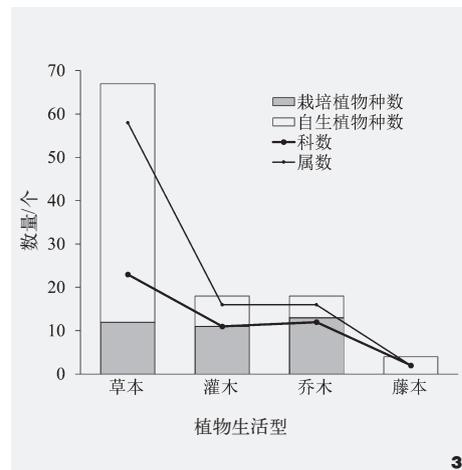


图3 各生活型植物物种数与栽培类型统计
Fig. 3 Statistics on the number of life type and growth state of each plant species

量进行统计(图4),各类群落的年固碳量平均值相近,林地群落中中径级阔叶林群落最高。林地平均年固碳量(2.45 kg/m^2)已接近公园绿地植物群落碳汇优化后的数值^[25]。草甸地被群落是经过秦陌花塘项目低碳实验设计形成的低维护高碳汇群落,平均年固碳量已超过部分林地、灌丛群落;多年生草本群落平均年固碳量略高于一年或二年生草本群落。中径级阔叶林群落的平均碳储量在各类群落中最高,最高值为 90.48 kg/m^2 ;草本群落碳储量在量级上与林地和灌丛相差较大因而忽略不计。

3.2.2 不同植被中群落的功能多样性差异

部分林地、灌丛群落中乔木或灌木的物种数较少(≤ 3 种)而无法计算功能多样性指数,因此对林地群落林上(Overstory, O)乔木层和灌丛群落只统计各功能性状的群落加权平均值,对物种数较多的草甸地被群落统计各性状的群落加权平均值和功能多样性指数(表2)。不同林地群落(O)CWM-LA、LMA、DBH、CW离散程度较大而WD表现稳定;灌丛群落

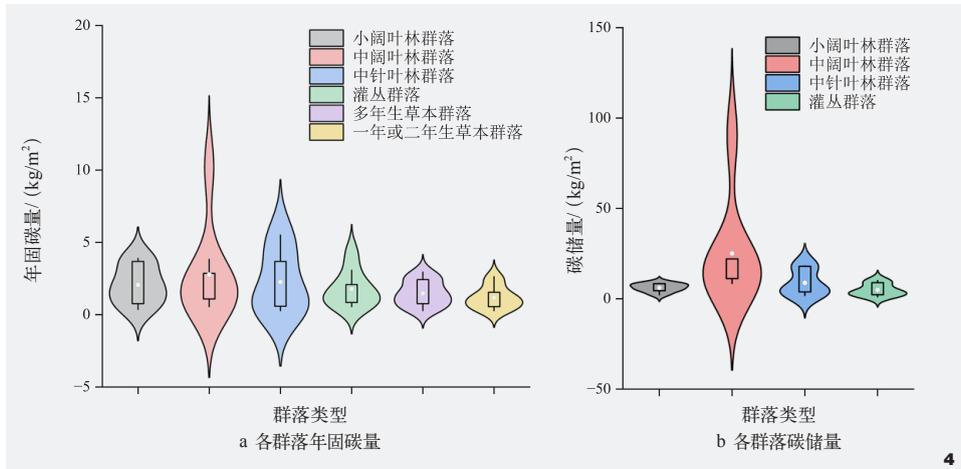


图4 不同类型群落的固碳能力差异
Fig. 4 The difference of carbon sequestration capacity of communities in different vegetation

CWM-H、DBH变异系数较高而LDMC表现稳定,反映了群落结构复杂性与资源利用多样性。地被群落FRic、CWM-LAI变异系数极高,反映草本植物功能性状分布和群落结构的多样化。

3.3 不同植被群落固碳能力与群落功能多样性的相关性

3.3.1 人工林地群落固碳能力与林地乔木层功能性状指标的相关性

对林地群落的年固碳量、碳储量和林上乔木层功能性状CWM进行相关性分析,结果如图5。(O)CWM-H、DBH、CW与年固碳量显著正相关($p < 0.05$), (O)CWM-H、DBH与碳储量极显著正相关($p < 0.01$), (O)CWM-LAI与碳储量显著正相关($p < 0.05$)。叶形态性状与群落固碳能力的关系不显著。

3.3.2 人工灌丛群落固碳能力与群落功能性状指标的相关性

对灌丛群落的年固碳量、碳储量和功能性状CWM进行相关性分析,结果如图6。CWM-LAI和CWM-WD分别与年固碳量显著正

相关、显著负相关($p < 0.05$), CWM-H、LMA、LDMC与碳储量显著正相关($p < 0.05$), CWM-SLA与碳储量显著负相关($p < 0.05$)。

3.3.3 草甸地被群落年固碳量与群落功能多样性的相关性

对草甸地被植物群落的年固碳量和功能性状CWM及功能多样性指数进行相关性分析,结果如图7。CWM-H、LA、LAI与年固碳量

极显著正相关($p < 0.01$), CWM-SLA与年固碳量显著正相关($p < 0.05$), CWM-LMA、LDMC和FDiv与年固碳量显著负相关($p < 0.05$), 其余功能多样性指数的相关性不显著。H、LA和LAI分别意味着草甸地被群落在垂直、水平和三维空间能占据更多的资源,有助于群落增加固碳量。

3.4 功能多样性与碳汇能力指标的回归分析

Pearson分析揭示不同植被群落年固碳量与多个群落加权平均值呈现出不同程度的相关性,而功能多样性指数与碳汇能力指标的相关关系显著性相对不强。多元逐步回归分析(表3)表明,林地群落年固碳量主要受(O)CWM-LAI、SLA影响,林地群落碳储量主要受(O)CWM-DBH、LAI影响影响;灌丛群落未建立有效回归方程;草甸地被群落年固碳量主要受CWM-LAI、H、NPR和LA影响或受CWM-LA、LDMC影响。综上表明不同植被类型群落的碳汇能力与功能性状存在不同的制约关系。CWM与群落年固碳量、碳储量的耦合效应较强,功能多样性指数与年固碳量的耦合效应相对较弱。

表2 不同群落的功能性状加权平均值和功能多样性指数的差异
Tab. 2 The differences of CWM and functional diversity indices of different communities

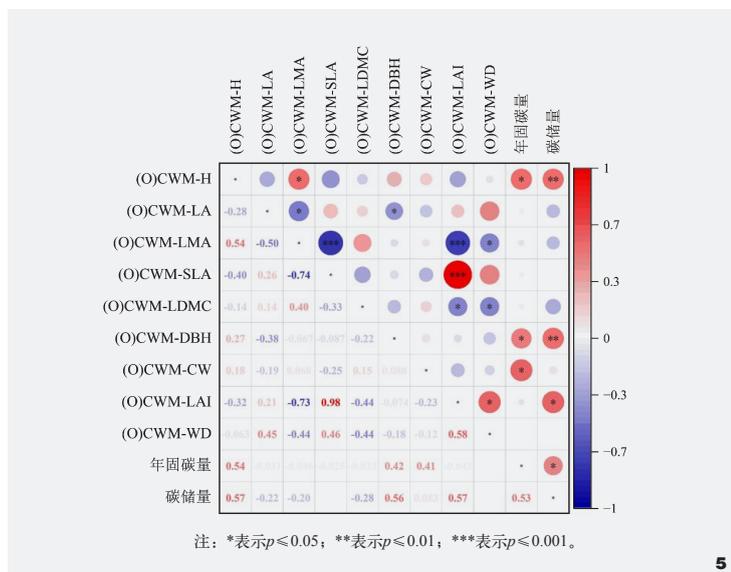
不同群落类型的功能性多样性 Functional diversity of different community types	指数值 Index value		
	功能多样性指标	均值	标准差 变异系数 /%
人工林地群落乔木层功能多样性	(O)CWM-H	7.37	1.83 24.86
	(O)CWM-LA	28.67	23.33 81.36
	(O)CWM-LMA	0.01	0.01 77.18
	(O)CWM-SLA	152.48	101.95 66.86
	(O)CWM-LDMC	0.34	0.12 34.02
	(O)CWM-DBH	21.30	15.77 74.05
	(O)CWM-CW	4.21	3.01 71.57
	(O)CWM-LAI	1.85	1.26 68.12
	(O)CWM-WD	0.60	0.08 12.72

接上表

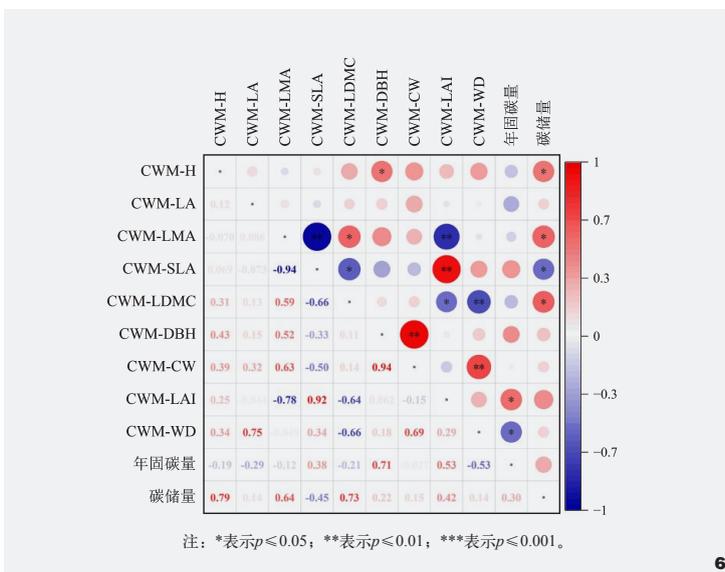
不同群落类型的功能性多样性 Functional diversity of different community types	指数值 Index value			
	功能多样性指标	均值	标准差	变异系数 /%
人工灌丛群落功能多样性	CWM-H	1.74	1.43	82.28
	CWM-LA	15.42	10.13	65.68
	CWM-LMA	0.01	<0.01	39.59
	CWM-SLA	137.94	62.63	45.40
	CWM-LDMC	0.36	0.03	8.42
	CWM-DBH	2.95	2.21	74.96
	CWM-CW	0.80	0.48	60.15
	CWM-LAI	1.07	0.44	41.51
	CWM-WD	0.61	0.14	22.65
	草甸地被群落功能多样性	CWM-H	0.62	0.2
CWM-LA		12.1	8.46	69.9
CWM-LMA		0.01	<0.01	29.59
CWM-SLA		169.44	58.61	34.59
CWM-LDMC		0.24	0.05	21.64
CWM-NPR		2.52	0.44	17.61
CWM-TR		0.62	0.08	13.34
CWM-LAI		2.29	2.34	102.22
CWM-RPD		4.69	0.52	11.17
FRic		1.16	2.06	177.4
FEve		0.59	0.11	19.18
FDiv		0.8	0.13	16.61
FDis		1.68	0.37	22.23
FD ₀		3.55	1.23	34.73

3.5 碳汇能力指标与群落功能性状的内在联系

综合分析表明, H、DBH、LAI是影响林地、灌丛和草甸地被群落固碳能力的关键功能性状且研究结果支持生物量比率效应。CWM-DBH、H已被证实与林地群落年固碳量、碳储量有紧密联系^[25-26]; 一些非功能性状因素, 如种植密度和郁闭度等^[27]对DBH存在限制, 从而间接影响群落碳汇。灌丛群落和草甸地被群落中LMA、SLA和LDMC与固碳能力的显著相关性是相反的。对于木本植物的革质叶、纸质叶而言, SLA通常对固碳能力产生负向驱动作用^[28], 与本研究结果一致。而草甸地被群落较高的SLA有助于光合作用, 但这种优势会牺牲叶片的寿命和耐久性^[29]。另一方面, 草甸地被群落物种数较多, 其功能多样性指数值均有效, 但只有FDiv与年固碳量呈显著负相关; 功能多样性指数与群落固碳能力的相关性还需进一步验证。研究结果对生态位互补效应的支持有限。



5



6

图5 林地群落固碳能力与林上乔木层功能性状的相关性
Fig. 5 Relationship between carbon sequestration capacity of forest communities and functional traits of overforest tree layers

图6 灌丛群落固碳能力与功能性状的相关性
Fig. 6 Relationship between carbon sequestration capacity and functional traits of shrubland communities

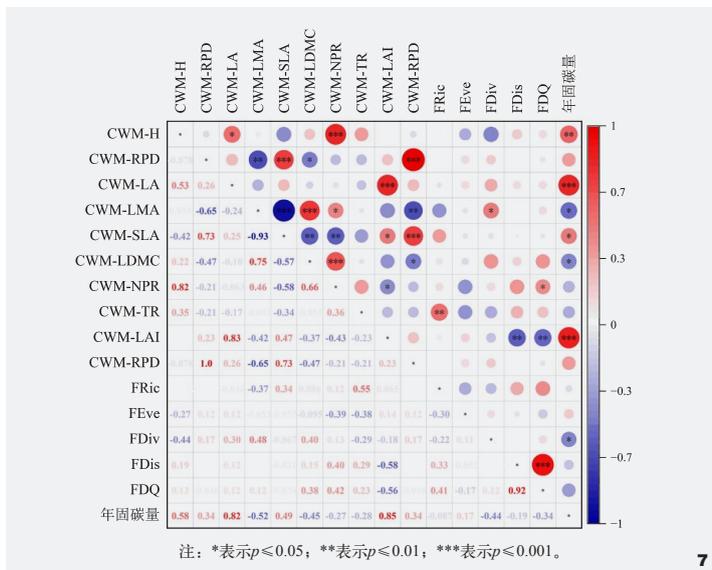


图7 草地群落年固碳量与功能性状特征的相关性
Fig. 7 Relationship between annual carbon sequestration and functional traits in meadow ground communities

表3 不同植被群落功能多样性与碳汇能力的多元逐步回归模型
Tab. 3 Multiple stepwise regression model of functional diversity and carbon sink capacity of different vegetation communities

逐步回归方程 Stepwise regression equation	R^2	F	p
$y_1 = -496.018 + 2.242.401x_1 - 7.199x_2$	0.537	10.420	<0.001
$y_2 = -1.029.371 + 99.867x_3 + 1.349.685x_4$	0.735	25.003	<0.001
$y_3 = 377.252 + 31.886x_5 + 431.226x_6 - 123.727x_7 - 306.402x_8$	0.882	35.444	<0.001
$y_4 = 405.669 + 13.175x_9 - 1.330.536x_{10}$	0.684	22.698	<0.001

注: y_1 为林地群落年固碳量, x_1 为(O)CWM-LAI, x_2 为(O)CWM-SLA; y_2 为林地群落碳储量, x_3 为(O)CWM-DBH, x_4 为(O)CWM-LAI; y_3 为草地群落年固碳量, x_5 为 CWM-LAI, x_6 为 CWM-H, x_7 为 CWM-NPR, x_8 为 CWM-TR, x_9 为 CWM-LA, x_{10} 为 CWM-LDMC。

4 提升植物群落碳汇效益的优化策略

4.1 提升高固碳植物配置优先级

高固碳释氧物种对群落整体效益有显著影响。本研究区植物碳汇能力计算结果显示(表4, 表5), 这些高固碳植物可作为增强单位土地面积碳汇的优选。

4.2 功能性状对高碳汇植物群落配置的影响

研究表明, 植物群落平均高度和叶面积指数以及乔木的胸径和

表4 单株木本植物的年固碳量(最高前8、前4)
Tab. 4 Carbon storage and annual carbon sequestration of individual woody plants (top 8, top 4)

木本植物 (高度/m) Wood plants height	植物名称 Plant name	年固碳量/kg Annual carbon sequestration
中乔木 (10 ~ 15)	国槐 (<i>Styphnolobium japonicum</i>)	44.0
	旱柳 (<i>Salix matsudana</i>)	17.0
	臭椿 (<i>Ailanthus altissima</i>)	19.3
小乔木 (5 ~ 10)	雪松 (<i>Cedrus deodara</i>)	10.5
	紫叶李 (<i>Prunus cerasifera</i> 'Atropurpurea')	9.7
	暴马丁香 (<i>Syringa reticulata amurensis</i>)	8.8
	梓 (<i>Catalpa ovata</i>)	8.2
	银杏 (<i>Ginkgo biloba</i>)	5.4
灌木 (1.5 ~ 3)	山桃 (<i>Prunus davidiana</i>)	6.4
	火棘 (<i>Pyracantha fortuneana</i>)	5.8
	红叶石楠 (<i>Photinia × fraseri</i>)	5.2
	女贞 (<i>Ligustrum lucidum</i>)	3.2

表5 单株草本/藤本植物的年固碳量(最高前10)
Tab. 5 Annual carbon sequestration per herb/vine plants (Top 10)

序号 No.	植物名称 Plant name	生活型 Life form	年固碳量/kg Annual carbon sequestration
1	蜀葵 (<i>Alcea rosea</i>)	多年生草本	1.083
2	滨菊 (<i>Leucanthemum vulgare</i>)	多年生草本	0.493
3	百日菊 (<i>Zinnia elegans</i>)	一年生草本	0.456
4	黄鹌菜 (<i>Youngia japonica</i>)	多年生草本	0.415
5	鹅绒藤 (<i>Cynanchum chinense</i>)	缠绕草质藤本	0.322
6	艾 (<i>Artemisia argyi</i>)	多年生草本	0.316
7	华萝藦 (<i>Cynanchum hemsleyanum</i>)	缠绕草质藤本	0.308
8	林荫鼠尾草 (<i>Salvia nemorosa</i>)	多年生草本	0.284
9	松果菊 (<i>Echinacea purpurea</i>)	多年生草本	0.263
10	黑麦草 (<i>Lolium perenne</i>)	多年生草本	0.225

冠幅等均显著影响群落固碳, 突显植物本身体量对群落固碳的重要影响力。因此在建设以高碳汇为目标的植物群落时, 可结合场地生境特征选择具有特定性状的植物。例如, 对于光照充足的地被, 宜选垂直分层、叶面积各异的多年生草本植物等。

4.3 不同植被类型高碳汇群落配置策略

通过对研究区高碳汇植物群落模式的提取, 结合植物群落的功能性状组合, 从平面布局和立面结构构建植物群落的设计模式。在碳

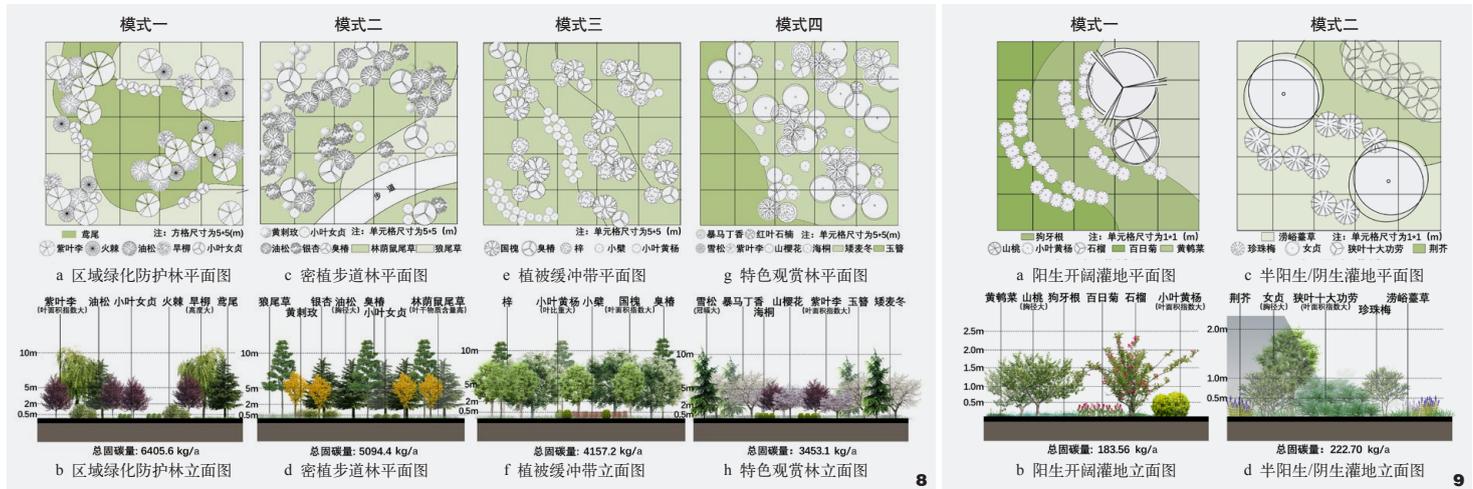


图8 人工林地高固碳群落配置模式
Fig. 8 Allocation model of high carbon sequestration community in artificial forest land with high carbon sequestration

图9 人工灌地高固碳群落配置模式
Fig. 9 Allocation model of in artificial shrub community with high carbon sequestration

汇提升、景观效益和生态稳定性等目标指引下，提出以下配置策略。

4.3.1 城市绿地人工林地植物群落配置模式

对城市绿地中人工林地提出适合不同用途的4种模式，见图8。区域绿化防护林，植以不同高度（7 m < H < 12 m）的速生、慢生树种；密植步道林，选取高枝下高的大乔木，配以叶干物质含量高（LDMC > 0.38）的多年生草本植物；植被缓冲带，由高固碳、叶面积指数较高（LAI > 4.64）的乡土植物组成；特色观赏林乔木层由中等径级（16 cm < DBH < 45 cm）的慢生树种构成，结构、色彩丰富。以上模式种植密度不超过210株/hm²，年固碳量为3 453.1 ~ 6 405.6 kg。

4.3.2 城市绿地人工灌地植物群落配置模式

对城市绿地中人工灌地提出适合不同生境的两种模式，见图9。阳生开阔灌地，选用叶片稀疏的大灌木、叶面积指数高（LAI > 3.95）的小灌木和多年生草本植物，年固碳量为183.6 kg。半阳生/阴生灌地，采用叶面积指数高（LAI > 4.21）的大小灌木和较高的多年生草本的耐阴组合，年固碳量为222.7 kg。

4.3.3 城市绿地草甸地被植物群落配置模式

以调研区高固碳草甸地被群落为原型进行解析，提出两种地被类型的各三种模式，见图10、图11。其中再野化高固碳地被都由叶

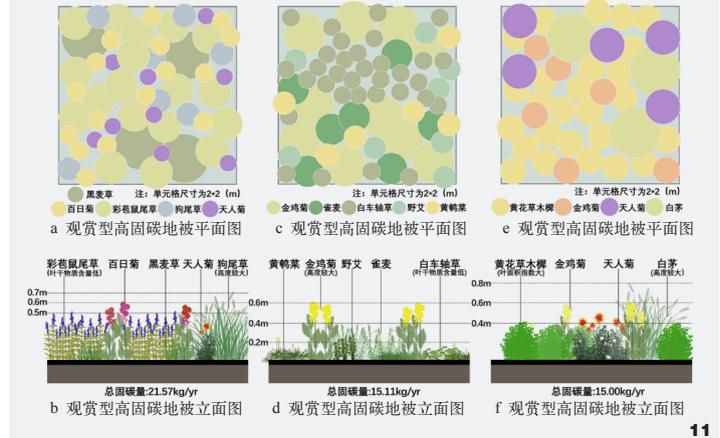
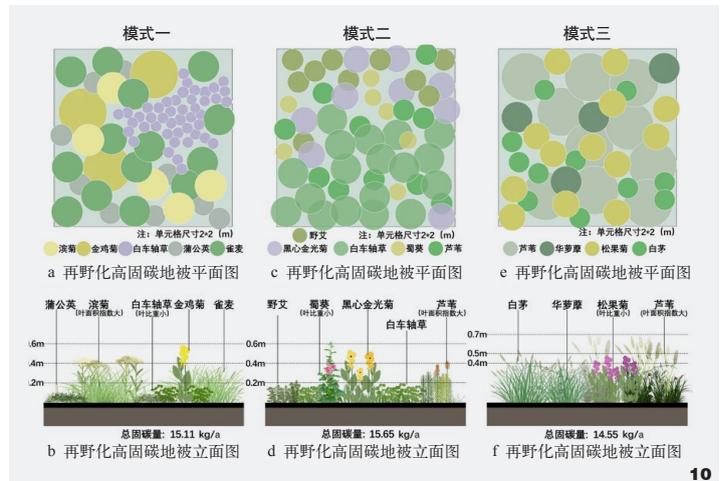


图10 再野化高固碳地被群落配置模式
Fig. 10 Allocation patterns of rewilded meadow ground cover community with high carbon sequestration

图11 观赏型高固碳地被群落配置模式
Fig. 11 Allocation pattern of ornamental meadow ground cover community with high carbon sequestration

比重小 ($LMA < 6.55 \times 10^3 \text{ g/cm}^2$)、叶面积指数大 ($LAI > 0.37$) 的高固碳植物组成, 年固碳量为 $14.6 \sim 15.7 \text{ kg}$; 观赏型高固碳地被主要由干叶物质含量低 ($LDMC < 0.24$)、高度较大 ($H > 0.4 \text{ m}$) 的植物组成, 年固碳量为 $15.0 \sim 21.6 \text{ kg}$ 。

5 结语

城市绿地植物群落碳汇效益的优化是实现“双碳”目标的重要途径。本研究以功能性状为切入点, 通过实证分析明确了植物群落功能性状特征与碳汇能力之间的显著相关性和定量关系。林地群落的年固碳量主要由乔木层平均胸径、高度、叶面积指数驱动, 草甸地被群落的年固碳量主要由群落平均高度和叶面积驱动。群落碳汇提升更依赖优势物种性状而非多样性互补效应。通过筛选高固碳植物并优化功能性状组合, 提出林地、灌地、地被群落的高固碳配置模式, 为城市绿地低碳设计提供指导。未来研究应兼顾不同类型群落碳汇与对应的关键功能性状, 关注高固碳、低维护群落达的稳态结构, 以促进低碳城市建设和城市绿地健康可持续发展。 

注: 文中图表均由作者绘制。

致谢:

感谢西安建筑科技大学在读硕士研究生齐鑫、西北农林科技大学在读硕士研究生李悦、张雅欣对样方植物调查的帮助。

参考文献

- [1] 苑杰.《联合国气候变化框架公约》第26届缔约方大会成果[J]. 国际社会科学杂志(中文版), 2022, 39(02): 159-172.
- [2] 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(02): 35-43.
- [3] 陶晓, 杨军, 骆翔宇, 等. 城市绿地碳汇核算和监测研究进展[J]. 中国园林, 2024, 40(03): 108-113.
- [4] CROCI E, LUCCHITTA B, MOLteni T. Low Carbon Urban Strategies: An Investigation of 124 European Cities[J]. Urban Climate, 2021, 40: 101022.
- [5] MOON T, KIM M, CHON J. Adaptive Green Space Management Strategies for Sustainable Carbon Sink Parks[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2024, 94: 128236.
- [6] 王晶懋, 齐佳乐, 韩都, 等. 基于全生命周期的城市小尺度绿地碳平衡[J]. 风景园林, 2022, 29(12): 100-105.
- [7] 张佰良, 鲁志华, 潘冰月, 等. 基于过程管理视角的城市绿地碳汇水平诊断研究[J]. 现代城市研究, 2024(10): 30-36.
- [8] 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(06): 55-61.
- [9] 张桂莲, 仲启铖, 张浪. 面向碳中和的城市园林绿化碳汇能力建设研究[J]. 风景园林, 2022, 29(05): 12-16.
- [10] 王敏, 宋昊洋. 影响碳中和的城市绿地空间特征与精细化管控实施框架[J]. 风景园林, 2022, 29(05): 17-23.
- [11] 姚侠妹, 偶春, 夏璐, 等. 安徽沿淮地区小城镇主要景观树种固碳释氧和降温增湿效益评估[J]. 生态学杂志, 2021, 40(05): 1293-1304.
- [12] 陈俊华, 黎晓平, 李羽洁, 等. 城市绿地乔木固碳能力及碳抵消效果评估[J]. 中国城市林业, 2024, 22(03): 26-33.
- [13] 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, 2022, 40(04): 125-134.
- [14] BLUMSTEIN M. The Drivers of Intraspecific Trait Variation and Their Implications for Future Tree Productivity and Survival[J]. American Journal of Botany, 2024, 111(04): e16312-e16312.
- [15] HE N, YAN P, LIU C, et al. Predicting Ecosystem Productivity Based on Plant Community Traits[J]. Trends in Plant Science, 2023, 28(01): 43-53.
- [16] 郑华, 潘权, 文志, 等. 植物功能性状与森林生态系统服务的关系研究综述[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 7901-7912.
- [17] MAMMOLA S, CARMONA C P, GUILLERME T, et al. Concepts and Applications in Functional Diversity[J]. Functional Ecology, 2021, 35(9): 1869-1885.
- [18] 郝珉辉, 代莹, 岳庆敏, 等. 阔叶红松林功能多样性与森林碳汇功能关系[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 68-76.
- [19] RAY T, FICHTNER A, KUNZ M, et al. Diversity-enhanced Canopy Space Occupation and Leaf Functional Diversity Jointly Promote Overyielding in Tropical Tree Communities[J]. Science of The Total Environment, 2024, 951: 175438.
- [20] 吴闰宁, 郝珉辉, 何怀江, 等. 长白山森林功能多样性与地上碳汇功能的关系及其随演替的变化[J]. 植物生态学报, 2025, 49: 1-12.
- [21] YANG Y, DOU Y, CHENG H, et al. Plant Functional Diversity Drives Carbon Storage Following Vegetation Restoration in Loess Plateau, China[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 668-678.
- [22] ASANOK L, TAWESUK R, KAMYO T. Plant Functional Diversity is Linked to Carbon Storage in Deciduous Dipterocarp Forest Edges in Northern Thailand[J]. Sustainability, 2021, 13(20): 11416.
- [23] SIMOVIC M, MUELLER K E, MCMAHON S M, et al. Functional Traits and Size Interact to Influence Growth and Carbon Sequestration Among Trees in Urban Greenspaces[J]. Functional Ecology, 2024, 38(04): 967-983.
- [24] SROUR N, THIFFAULT E, BOUCHER J-F. Quantifying Carbon Stocks and Functional Diversity of Roadside Ecosystems—A Case Study in Quebec, Canada[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2024, 91: 128163.
- [25] 王晶懋, 高洁, 孙婷, 等. 双碳目标导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(04): 33-42.
- [26] QUAN Q, HE N, ZHANG R, et al. Plant Height as an Indicator for Alpine Carbon Sequestration and Ecosystem Response to Warming[J]. Nature Plants, 2024, 10(06): 890-900.
- [27] 嵇雨桐, 林添烽, 刘恋, 等. 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(01): 23-31.
- [28] 张昊, 张兴, 高飞, 等. 城市公园木本植物叶功能性状及其对固碳能力的驱动[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(14): 173-180.
- [29] 郭美玲, 姚步青, 石国玺, 等. 高寒草甸植物叶片碳含量及其可塑性与其系统发育的关系[J]. 生态学杂志, 2018, 37(06): 1841-1848.