

灞陵湖健身公园树木生态效益及其与功能性状的关系

The Ecological Benefits of Trees and Their Relationships with Functional Traits in Baling Lake Fitness Park

王新静¹ 彭舜磊¹ 李满园^{1*} 李彦克² 马 龙³
WANG Xinjing¹ PENG Shunlei¹ LI Manyuan^{1*} LI Yanke² MA Long³

(1. 许昌学院地理与空间信息学院, 许昌 461000; 2. 花之都实业有限公司, 许昌 461000; 3. 中国建筑一局(集团)有限公司, 北京 100089)

(1. School of Geography and Spatial Information, Xuchang University, Xuchang, Henan, China, 461000; 2. Huazhidu Industries Co., Ltd., Xuchang, Henan, China, 461000; 3. China Construction First Bureau (Group) Co., Ltd., Beijing, China, 100089)

文章编号: 1000-0283(2025)09-0116-10
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2025. 09. 0116. 014
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-04-16
修回日期: 2025-06-17

摘 要

探究公园乔木功能性状与多维生态效益的耦合机制, 揭示树种配置对生态效益的调控路径。以灞陵湖健身公园3 077株乔木为研究对象, 通过i-Tree Eco模型评估固碳释氧、空气净化及截留雨水效益, 采用多元回归与变方差分解方法, 解析生态效益与功能性状的耦合关系。公园年生态效益为50.23万元, 其中固碳(79.83%, 40.1万元) > 产氧(17.54%, 8.81万元) > 净化空气(2.55%, 1.28万元) > 截留雨水(0.08%, 0.04万元)。碳封存与平均胸径、叶片磷含量和枝上高逐步回归关系极显著($\text{adj}R^2=0.767, p<0.001$), 平均胸径贡献率最大(76.26%), 其次是叶片磷含量(15.29%); 净化空气与平均树高、冠幅、叶片磷含量和枝下高逐步回归关系极显著($\text{adj}R^2=0.877, p<0.001$), 平均树高和冠幅的贡献率最大, 分别为41.03%和39.20%。截留雨水与平均树高回归关系显著($\text{adj}R^2=0.273, p<0.05$)。生物量性状(胸径、树高、冠幅)是影响生态效益的关键因子, 与叶片磷含量等生理性状协同影响生态效益。建议优先种植大胸径树种(丝棉木)提高碳汇; 搭配冠幅大、富磷叶片树种(二球悬铃木)改善空气质量; 配置树高生长潜力大的树种(青桐)提高截留雨水和释氧效益, 实现健身公园生态效益最优化。

关键词

固碳释氧; 净化空气; 功能性状; i-Tree Eco模型; 城市健康空间

Abstract

To investigate the coupling mechanisms between the functional traits of urban park trees and their multidimensional ecological benefits, and to elucidate the regulatory pathways through which tree species composition influences these ecological benefits, a total of 3 077 trees in Baling Lake Fitness Park were analyzed. The i-Tree Eco model was employed to access the benefits related to carbon sequestration, oxygen release, air purification, and rainwater interception. Multiple regression and variance partitioning analysis were conducted to explore the relationships between ecological benefits and functional traits. The annual ecological benefits of the park were estimated at 502 300 yuan, with the following distribution: carbon sequestration (79.83%, 401 000 yuan) > oxygen production (17.54%, 88 100 yuan) > air purification (2.55%, 12 800 yuan) > rainwater interception (0.08%, 400 yuan). Carbon sequestration demonstrated a highly significant stepwise regression relationship with mean diameter at breast height (Dm), leaf phosphorus content (Leaf-P), and height above first branch (HFBm) ($\text{adj}R^2=0.767, p<0.001$), with Dm contributing the most (76.26%), followed by Leaf-P (15.29%). Air purification showed a highly significant regression relationship with mean tree height (Hm), mean crown width (CWm), Leaf-P, and height to crown base (HCBm) ($\text{adj}R^2=0.877, p<0.001$), with Hm (41.03%) and CWm (39.20%) being the primary contributors. Rainwater interception was significantly related to Hm ($\text{adj}R^2=0.273, p<0.05$). Biomass traits (Dm, Hm, CWm) are critical factors influencing ecological benefits, interacting synergistically with physiological traits such as Leaf-P. To optimize fitness park ecological benefits, it is recommended to prioritize planting large-DBH species (*Euonymus maackii*) to enhance carbon sequestration, combine tree species with large crowns and high Leaf-P (*Platanus acerifolia*) to improve air quality, and configure tree species with high growth potential in tree height (*Firmiana simplex*) to boost rainwater interception and oxygen release.

Keywords

carbon sequestration and oxygen release; air purification; functional trait; i-Tree Eco model; urban healthy space

王新静

2003年生/女/山东济南人/在读本科生/
研究方向为园林生态学

彭舜磊

1974年生/男/河南驻马店人/博士/副教授/
研究方向为植被生态学

李满园

1989年生/女/河南许昌人/硕士/讲师/研
究方向为园林生态设计

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 12014257@xcu.edu.cn

基金项目:

河南省科技攻关计划“沙颍河流域河南段面源污染关键源区界定与控制技术研究”(编号: 252102320076)

党的十九大提出“健康中国战略”，倡导完善城乡全民健身公共服务体系建设，深入开展大气、水、土壤等污染防治和环境监测，建设健康城市，健身公园应运而生。健身公园一般建于城市建筑和人口密集区域，作为健身人群高频使用的公共空间，园区植被中乔木占比大，对空气净化、固碳释氧、遮阴挡雨的生态效益需求比其他专类公园更为迫切^[1-2]。在“健康中国”战略下，健身公园的生态效益评估对优化城市健康空间布局、提升民生福祉更具现实紧迫性。但是目前有关健身公园的研究多集中在景观设计和服务优化上^[2-4]，针对其生态效益的研究比较缺乏。

园林树木作为城市森林生态系统的主体，承担着固碳释氧、净化空气、截留雨水、观赏游憩等重要的生态服务功能^[5]。i-Tree Eco模型是美国林务局开发的国际通用且最先进的森林生态效益评估工具^[6]，目前v6版本相比v5版本提升了国际适用性。Nowak等^[7]利用i-Tree Eco模型评估纽约州锡拉丘兹市的森林生态系统服务价值为240万美元。Russo等^[8]比较了实测的单株城市树种平均碳封存值为12.06 kg/a，i-Tree Eco模型模拟值为12.97 kg/a，二者接近，证明了i-Tree Eco模型评估精度的可靠性。Vahidi等^[9]评估了德黑兰市第16区植被生态系统服务价值，去除大气污染物总量为78.9 t/a，碳封存量为129 t/a。Kim等^[10]发现韩国大田市儒林公园的树木碳储量为118 t，碳封存为2.899 t/a，固碳与冠幅和生物量回归关系显著。

国内利用i-Tree Eco模型评估城市绿地生态效益的研究多聚焦于行道树和绿化带，且不同地区的生态效益呈现显著差异。Sui等^[11]评估了沈阳历史街区行道树的生态效益，认为叠加热舒适效益可以更准确地反映生态系统服务功能。王希等^[6]对北京10条绿道的研

究发现，节能效益(672.82万元)最大，吸收CO₂效益(16.68万元)最小。在对南京^[12]和宁波^[13]的行道树和绿道生态效益评价中美学效益最大，占比超过60%。李想等^[14]对郑州滨河绿化带生态效益进行分析，发现产氧效益(40.69%)最大，截留雨水效益(9.81%)最小。郭树煌等^[15]发现湛江市行道树冠层截留雨水量为6.89万m³。由此可知，不同地区、不同树木配置下，行道树或绿化带的生态效益差别较大。相比行道树生态效益研究，关于城市公园生态效益的研究相对较少，且集中于生态效益的评估。赵东亮和赵宏宇^[16]评估的长春水文化生态园生态效益为79.96万元/a，单株乔木的生态效益为109.02元/a。姚晓洁等^[17]研究表明张公山公园年总生态效益的价值为8.08万元，生态效益按照大小排序为：固碳效益>空气净化效益>截留雨水效益>产氧效益。李风霞等^[18]对西安城市公园绿地生态效益的评估结果显示：固碳效益>释氧效益>改善空气质量效益。这表明不同地区城市公园的生态效益也存在差异。

植物功能性状直接参与多种生态系统过程，影响生态效益供给，比如生物量与植物干直径、植物高度、叶片氮含量、叶片磷含量、叶片碳含量、比叶面积、叶片干物质含量以及木材密度等关系紧密。基于植物功能性状途径为揭示生态效益形成机制提供了新方法^[19]。张德顺和刘鸣^[20]梳理了园林树木功能性状与生态服务功能的对应关系，比如与固碳有关的功能性状有比叶面积、总叶面积、树高、冠高和冠幅等；与释氧有关的功能性状有比叶面积、总叶面积、树高、光合速率和蒸腾速率等；与空气净化有关的功能性状有总叶面积、冠幅等；与树冠截留及径流减缓有关的功能性状有总叶面积和叶片大小等。张昊等^[21]研究表明叶干物质含量、比叶重、

叶片氮磷含量等是固碳的驱动力，还有一些研究表明叶干物质含量、比叶重、叶片碳氮磷含量以及冠幅、树高、冠高等指标与净化空气有关^[22-24]。Wang等^[25]发现冠幅、冠高、树高以及叶干物质含量、比叶重与树木截留降雨相关性显著。沈思栋等^[26]发现植物叶片蒸腾吸热能力与植物叶片干物质含量、比叶重呈显著正相关，且株高、树木高宽比较大的植株其蒸腾吸热能力较强。由此可见，前人研究多关注单一生态效益与园林树木功能性状指标的关系，园林树木功能性状与多维生态效益的耦合关系研究尚比较缺乏。

灞陵湖健身公园是位于许昌市魏都区西南部的一处供市民健身运动的公园，园区植被以落叶乔木为主。本研究用i-Tree Eco模型评估该公园树木的净化空气、固碳释氧、截留雨水等生态效益，解析树木功能性状与多维生态效益的耦合关系，从树木功能性状的角度揭示健身公园的生态效益形成机制，为健身公园树种选择和生态服务功能提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

灞陵湖健身公园位于河南省许昌市魏都区西南部(E 113° 79' —113° 81', N 34° 01' —34° 03'), 位置在宝源路以南、许由路以北、滨河路以西、灞陵河东侧堤顶路以东，占地面积约16.67 hm² (图1)。公园交通便利，周边有多条城市主干道，是附近市民健身运动的重要场所。气候属于暖温带大陆性季风气候，四季分明，年平均气温为14.4 ℃，年降水量约为700 mm。公园地势较为平坦，园内有一处人工湖泊——灞陵湖，湖面积约10 hm²，湖岸线曲折。植被以乔木为主，主要树种包括丝棉木(*Euonymus maackii*)、樱花(*Prunus serrulata*)、广玉兰(*Magnolia grandiflora*)等。



图1 研究区概况
Fig. 1 Study area overview

1.2 研究方法

1.2.1 乔木调查

以灞陵湖健身公园乔木为研究对象，对公园的全部乔木进行调查。用胸径围尺测量乔木的胸径。使用激光测距仪对准树冠的顶端，仪器自动记录树高，同理可测量枝下高和枝上高。使用激光测距仪测量南北方向和东西方向的冠幅。使用目测树冠的方法，估算树冠损失率和枯死率。

1.2.2 树木功能性状调查

通过整合TRY (TRY植物性状数据库, www.try-db.org) 和BIEN (植物信息与生态网络, bien.nceas.ucsb.edu) 两大权威数据库, 获取树木形态与生理功能性状数据。对于TRY数据库, 首先完成平台注册授权, 然后输入公园25个树种的性状ID, 等待邮件通知进行数

据下载, 获取包含比叶面积 (Specific Leaf Area, SLA)、比叶重 (Leaf Mass Per Area, LMA)、木材密度 (Wood Density, WD)、叶片碳含量 (Leaf Carbon Content Per Leaf Area, Leaf-C)、叶片氮含量 (Leaf Nitrogen Content Per Leaf Area, Leaf-N)、叶片磷含量 (Leaf Phosphorus Content Per Leaf Area, Leaf-P) 等功能性状的原始数据。在收到数据后, 使用R语言的rtry包对下载的数据进一步处理。对于BIEN数据库, 通过R语言的BIEN最新程序包, 利用25个树种的拉丁名, 直接访问和匹配BIEN数据库中对应的功能性状数据。

1.2.3 i-Tree Eco模型的构建

采用i-Tree Eco模型中的Eco v6模块, 基于现场调查数据与气象数据对城市林木生态功能进行量化分析。参考基准选取河南省新郑

市历史气象数据 (与研究区气候及地理条件相似), 涵盖年均温度、降雨量、空气污染物浓度 (SO_2 、 NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10}) 等参数, 以模拟区域环境特征。通过对公园树木的实地调查, 将获取的树种信息汇总至Excel表格, 并完善为能输入i-Tree Eco模型的数据库文件, 再将数据导入已完成模型匹配与参数校正的i-Tree Eco模型, 对灞陵湖健身公园树木生态效益进行定量评估。

1.2.4 生态效益与功能性状的关系分析

采用Pearson相关性分析, 分析i-Tree Eco模型输出的公园乔木生态效益 (空气净化、固碳释氧量和雨水截留量) 与树木功能性状 (SLA、LMA、WD、Leaf-C、Leaf-N、Leaf-P、平均胸径 (Mean Diameter at Breast Height, Dm)、平均树高 (Mean Height of Tree, Hm)、平均冠幅 (Mean Crown Width, CWm)、平均枝下高 (Mean Height to Crown Base, HCBm) 及平均枝上高 (Mean Height above First Branch, HFBm)) 的相关性, 以识别与各个生态效益相关性显著的功能性状指标。为消除功能性状指标的自相关和共线性, 采用step函数建立多元线性逐步回归模型, 剔除共线性功能性状指标。用vegan程序包的varpart函数对保留的功能性状指标, 与生态效益进行方差分解, 解析功能性状单因子或多因子间的交互作用对生态效益的方差解释率。采用glmm.hp程序包计算功能性状指标对生态效益的贡献率。

2 结果与分析

2.1 基于i-Tree Eco模型评估灞陵湖健身公园树木的生态效益

2.1.1 树种组成

灞陵湖健身公园树木有13科24属25种3077株 (表1)。株数占比排名前5的树种分别

表1 灞陵湖健身公园树木种类
 Tab. 1 Tree species in Baling Lake Fitness Park

序号 NO.	树种 Species	科 Family	属 Genus	株数 / 株 Individual count	比例 / % Proportion
1	二球悬铃木 (<i>Platanus acerifolia</i>)	悬铃木科 (Platanaceae)	悬铃木属 (<i>Platanus</i>)	20	0.65
2	无絮毛白杨 (<i>Populus tomentosa</i>)	杨柳科 (Salicaceae)	杨属 (<i>Populus</i>)	64	2.08
3	柳树 (<i>Salix babylonica</i>)	杨柳科 (Salicaceae)	柳属 (<i>Salix</i>)	113	3.67
4	青桐 (<i>Firmiana simplex</i>)	锦葵科 (Malvaceae)	梧桐属 (<i>Firmiana</i>)	3	0.10
5	大叶女贞 (<i>Ligustrum lucidum</i>)	木樨科 (Oleaceae)	女贞属 (<i>Ligustrum</i>)	563	18.30
6	丝棉木 (<i>Euonymus maackii</i>)	卫矛科 (Celastraceae)	卫矛属 (<i>Euonymus</i>)	559	18.17
7	樱花 (<i>Prunus serrulata</i>)	蔷薇科 (Rosaceae)	李属 (<i>Prunus</i>)	432	14.04
8	紫薇 (<i>Lagerstroemia indica</i>)	千屈菜科 (Lythraceae)	紫薇属 (<i>Lagerstroemia</i>)	218	7.08
9	白蜡 (<i>Fraxinus chinensis</i>)	木樨科 (Oleaceae)	栲属 (<i>Fraxinus</i>)	62	2.01
10	广玉兰 (<i>Magnolia grandiflora</i>)	木兰科 (Magnoliaceae)	木兰属 (<i>Magnolia</i>)	200	6.50
11	珊瑚朴 (<i>Celtis sinensis</i>)	大麻科 (Cannabaceae)	朴属 (<i>Celtis</i>)	63	2.05
12	黄山栾 (<i>Koelreuteria bipinnata</i>)	无患子科 (Sapindaceae)	栾属 (<i>Koelreuteria</i>)	139	4.52
13	银杏 (<i>Ginkgo biloba</i>)	银杏科 (Ginkgoaceae)	银杏属 (<i>Ginkgo</i>)	186	6.04
14	乌桕 (<i>Triadica sebifera</i>)	大戟科 (Euphorbiaceae)	乌桕属 (<i>Triadica</i>)	13	0.42
15	七叶树 (<i>Aesculus chinensis</i>)	无患子科 (Sapindaceae)	七叶树属 (<i>Aesculus</i>)	12	0.39
16	五角枫 (<i>Acer pictum</i>)	无患子科 (Sapindaceae)	槭属 (<i>Acer</i>)	23	0.75
17	桂花 (<i>Osmanthus fragrans</i>)	木樨科 (Oleaceae)	木樨属 (<i>Osmanthus</i>)	47	1.53
18	玉兰 (<i>Yulania denudata</i>)	木兰科 (Magnoliaceae)	玉兰属 (<i>Yulania</i>)	45	1.46
19	红叶石楠 (<i>Photinia fraseri</i>)	蔷薇科 (Rosaceae)	石楠属 (<i>Photinia</i>)	114	3.71
20	黄栌 (<i>Cotinus coggygria</i>)	漆树科 (Anacardiaceae)	黄栌属 (<i>Cotinus</i>)	25	0.81
21	枇杷 (<i>Eriobotrya japonica</i>)	蔷薇科 (Rosaceae)	枇杷属 (<i>Eriobotrya</i>)	6	0.20
22	红叶李 (<i>Prunus cerasifera</i>)	蔷薇科 (Rosaceae)	李属 (<i>Prunus</i>)	52	1.69
23	海棠 (<i>Malus spectabilis</i>)	蔷薇科 (Rosaceae)	苹果属 (<i>Malus</i>)	75	2.44
24	木槿 (<i>Hibiscus syriacus</i>)	锦葵科 (Malvaceae)	木槿属 (<i>Hibiscus</i>)	42	1.36
25	红枫 (<i>Acer palmatum</i>)	无患子科 (Sapindaceae)	槭属 (<i>Acer</i>)	1	0.03
总计				3 077	100.00

是大叶女贞 (18.30%)、丝棉木 (18.17%)、樱花 (14.04%)、紫薇 (7.08%) 和广玉兰 (6.50%)；公园内大叶女贞、丝棉木和樱花三个树种株数之和占比高达50.51%。

公园内以11~15 cm胸径级的树木为主 (图2)，株数为1 421株，占比46.18%，主要是大叶女贞、紫薇、黄山栾等。其次是16~20 cm胸径级的树木，占比26.39%，主要是广玉兰、樱花等。胸径最大的树木是二球悬铃木，其胸径在41 cm以上，共有20株。

2.1.2 生态效益分析

公园树木净化空气总量为571.50 kg/a，若扣除O₃和CO，为338.74 kg/a，碳汇400.92 t，产氧量88.11 t，截留雨水27.18 m³，总生态效益为502 305.98元/a (表2)。

在净化空气方面，公园树木生态价值约为1.28万元/a。在单株平均净化空气生态效益上，青桐对NO₂和SO₂的吸收量及对PM_{2.5}和PM₁₀的去除量最大，分别为87.57 g/(a·株)、67.73 g/(a·株)、422.47 g/(a·株)和37.23 g/(a·株)，

其次是二球悬铃木和垂柳。可见，青桐、二球悬铃木、垂柳净化空气的生态效益非常好，对改善城市空气质量、减少雾霾具有重要意义。在固碳方面，公园树木碳储量367.89 t，价值约36.8万元，碳封存量为33.03 t，价值为3.3万元。丝棉木由于株数多固碳量最大，其碳储量占总碳储量的57.88%，碳封存占总碳封存的45.38%，其次是樱花和大叶女贞。从单株生态效益看，丝棉木的碳封存和碳储量均最高，分别为26.82 kg/株和380.93 kg/株，其

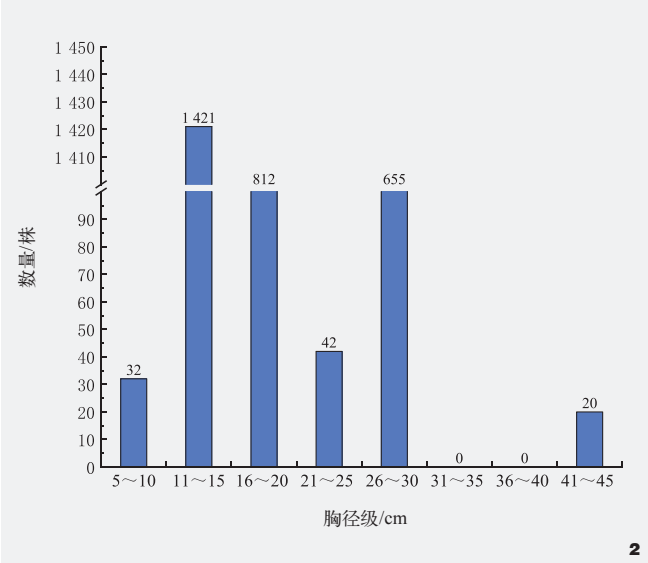


图2 树木胸径级分布
Fig. 2 Distribution of tree diameter classes at breast height (DBH)

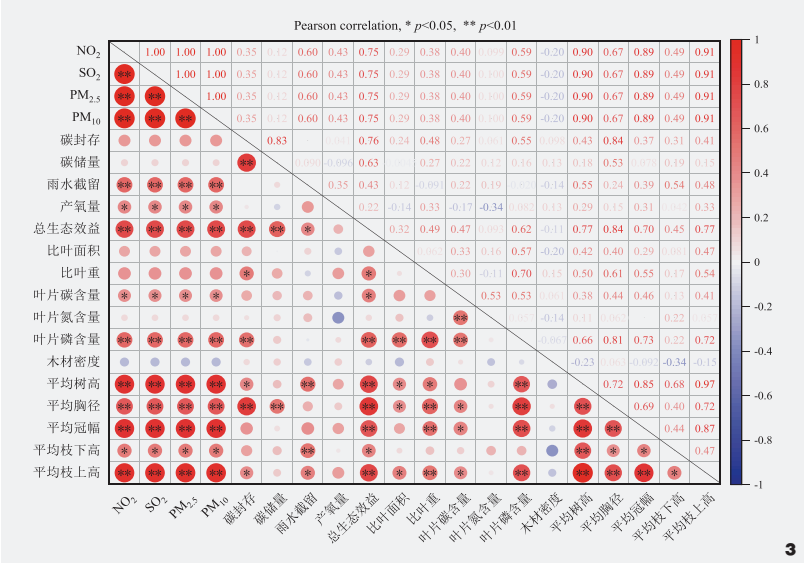


图3 公园树木生态效益与功能性状相关性分析图
Fig. 3 Correlation analysis of ecological benefits and functional traits of park trees

次是二球悬铃木和垂柳。在产氧量方面，公园树木产氧量为8811 t，价值约881万元。丝棉木因株数多产氧量最大，为3999 t。从单株产氧量看，丝棉木的单株产氧量最高（71.5 kg/株），其次是二球悬铃木（48.8 kg/株），枇杷和垂柳单株产氧量也较高，分别为34.3 kg/株和31.7 kg/株。在截留雨水方面，公园乔木共截留雨水2718 m³，效益值为400元。广玉兰的雨水截留量最高，达到5.43 m³。大叶女贞的雨水截留量也较高，达到3.54 m³。从单株看，青桐和白蜡的雨水截留效益最高。在单株总生态效益上，丝棉木的单株总生态效益最高，为481.59元/(a·株)。二球悬铃木和垂柳的单株生态效益也较高，分别为383.66元/(a·株)和220.43元/(a·株)（表3）。

2.2 灞陵湖健身公园树木功能性状分析

由表4可知，公园树木中，二球悬铃木的平均胸径最大，为41.58 cm，其次为丝棉木和垂柳。平均树高最高的树种是二球悬铃木，

树高13.79 m，其次为青桐和垂柳。平均冠幅最大的为二球悬铃木（10.14 m），其次为青桐和垂柳。垂柳的平均枝下高最大（3.21 m），其次为无絮毛白杨、白蜡和丝棉木。比叶面积最大的为二球悬铃木（46.4 cm²/mg），其次为白蜡和七叶树。比叶重最大的为二球悬铃木（0.15 mg/cm²），其次为枇杷和无絮毛白杨。叶片碳含量最大的为二球悬铃木（96.87 g/m²），其次为红叶李和白蜡。叶片氮含量最大的为红叶李（3.34 g/m²），其次为垂柳和玉兰。叶片磷含量最大的为二球悬铃木（6.64 g/m²），其次为垂柳和枇杷。木材密度最大的为枇杷（0.88 g/cm³），其次为桂花和红叶石楠。

2.3 灞陵湖健身公园树木生态效益与功能性状的关系分析

2.3.1 生态效益与功能性状的相关性

由图3可知，4个大气污染物指标与叶片碳含量和平均枝下高显著正相关（ $p < 0.05$ ），与叶片磷含量、平均树高、平均胸径、平均

冠幅和平均枝上高极显著正相关（ $p < 0.01$ ）。碳封存与比叶重、平均树高和平均枝上高显著正相关（ $p < 0.05$ ），与叶片磷含量和平均胸径极显著正相关（ $p < 0.01$ ）。碳储量与平均胸径显著正相关（ $p < 0.01$ ），产氧量与功能性状指标相关性不显著（ $p > 0.05$ ）。雨水截留与平均树高平均枝下高极显著正相关（ $p < 0.01$ ），与平均枝上高显著正相关（ $p < 0.05$ ）。总生态效益与比叶重、叶片碳含量和平均枝下高显著正相关（ $p < 0.05$ ），与叶片磷含量、平均树高、平均胸径、平均冠幅极显著正相关（ $p < 0.01$ ）。

此外，树木功能性状之间存在相关性。比叶面积与平均树高、平均胸径和平均枝下高显著相关（ $p < 0.05$ ），与叶片磷含量极显著相关（ $p < 0.01$ ）。比叶重与叶片碳含量、平均胸径、平均冠幅和平均枝上高极显著正相关（ $p < 0.01$ ），与平均树高显著正相关（ $p < 0.05$ ）。叶片碳含量与叶片氮含量和叶片磷含量极显著正相关（ $p < 0.01$ ），与平均胸径、平均冠幅

表2 研究区树木总生态效益表
 Tab. 2 Total ecological benefits of trees in the study area

树种 Tree species	净化空气 / (kg/a) Air purification				固碳 /t Carbon sequestration		产氧量 /t O ₂ -release	截留雨水 /m ³ Rain-interception	生态效益 / (元 /a) Total-benefit
	NO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀	碳储量 C-storage	碳封存 C-sequestration			
合计	48.24	37.31	232.69	20.5	367.89	33.03	88.11	27.18	502 305.98
二球悬铃木	1.67	1.29	8.05	0.71	5.87	0.37	0.98	0.16	7 673.20
无絮毛白杨	1.99	1.54	9.60	0.85	4.82	0.69	1.84	1.02	7 898.24
垂柳	6.05	4.68	29.17	2.57	18.32	1.34	3.58	3.11	24 908.59
青桐	0.26	0.20	1.27	0.11	0.28	0.03	0.08	0.14	478.17
大叶女贞	6.87	5.32	33.17	2.92	24.34	3.1	8.26	3.54	37 597.14
丝棉木	4.75	3.67	22.89	2.01	212.94	14.99	39.99	2.44	269 208.81
樱花	2.35	1.82	11.34	1.00	33.86	4.29	11.44	1.21	50 237.28
紫薇	3.83	2.96	18.46	1.62	9.36	1.36	3.64	1.97	15 421.32
白蜡	0.87	0.67	4.18	0.37	5.20	0.62	1.67	2.89	7 728.92
广玉兰	10.54	8.15	50.84	4.48	13.56	1.32	3.53	5.43	21 304.00
珊瑚朴	1.22	0.94	5.87	0.52	1.56	0.15	0.40	0.63	2 451.33
黄山栾	1.44	1.11	6.93	0.61	4.78	0.76	2.02	0.74	7 948.02
银杏	1.71	1.33	8.27	0.73	2.02	0.23	0.62	0.88	3 331.26
乌桕	0.33	0.25	1.58	0.14	0.77	0.1	0.27	0.17	1 235.39
七叶树	0.46	0.35	2.21	0.19	0.99	0.11	0.29	0.24	1 519.92
五角枫	0.46	0.36	2.22	0.20	0.96	0.13	0.35	0.24	1 560.55
桂花	0.20	0.16	0.97	0.09	4.86	0.33	0.88	0.10	6 127.39
玉兰	0.14	0.11	0.70	0.06	1.87	0.32	0.85	0.07	3 083.40
红叶石楠	1.81	1.40	8.74	0.77	11.23	1.28	3.41	0.93	16 414.86
黄栌	0.22	0.17	1.07	0.09	1.27	0.21	0.55	0.11	2 091.25
枇杷	0.10	0.08	0.48	0.04	0.80	0.08	0.21	0.05	1 105.56
红叶李	0.45	0.35	2.16	0.19	2.61	0.37	0.98	0.83	4 079.92
西府海棠	0.32	0.25	1.55	0.14	3.36	0.48	1.28	0.17	5 211.00
木槿	0.19	0.14	0.90	0.08	2.22	0.37	0.98	0.10	3 635.10
红枫	0.01	0.01	0.07	0.01	0.04	0	0.01	0.01	55.36

和平均枝下高显著正相关 ($p<0.05$)。叶片磷含量与平均树高、平均胸径、平均冠幅和平均枝下高极显著相关 ($p<0.01$)。平均树高与平均胸径、平均冠幅和平均枝下高极显著相关 ($p<0.01$)，平均胸径与平均冠幅和平均枝上高极显著相关 ($p<0.01$)，与平均枝下高显著相关 ($p<0.05$)。平均冠幅与平均枝下高显著相关 ($p<0.05$)，与平均枝上高极显著相关 ($p<0.01$)，平均枝下高与平均枝上高显

著相关 ($p<0.05$)。

2.3.2 生态效益与功能性状的逐步线性回归模型

选择与生态效益相关性显著功能性状,与生态效益建立逐步线性回归方程，剔除自相关和共线性功能性状因子，结果如表5所示。NO₂、SO₂、PM_{2.5}和PM₁₀与叶片磷含量、平均树高、平均冠幅和平均枝下高回归关系显著 ($\text{adj}R^2=0.877$, $p<0.001$)，碳封存与叶片

磷含量、平均胸径和平均枝上高回归关系显著 ($\text{adj}R^2=0.767$, $p<0.001$)，碳储量与平均胸径回归关系显著 ($\text{adj}R^2=0.696$, $p<0.001$)，雨水截留与平均树高回归关系显著 ($\text{adj}R^2=0.273$, $p=0.004$)。

2.3.3 功能性状对生态效益的贡献率

对表4中的变量进行变方差分解，由图4-a可知，叶片磷含量和平均树高二者的交互

表3 研究区树木单株生态效益表
Tab. 3 Ecological benefits of individual trees in the study area

树种 Tree species	净化空气 / (g / (a · 株)) Air purification				固碳 / (kg/ 株) Carbon sequestration		产氧量 / (kg/ 株) O ₂ -release	截留雨水 / (m³/ 株) Rian-interception	生态效益 / (元 / (a · 株)) Total-benefit
	NO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀	碳储量 C-storage	碳封存 C-sequestration			
二球悬铃木	83.42	64.41	402.41	35.44	293.50	11.23	48.8	0.01	383.66
无絮毛白杨	31.09	24.04	149.99	13.20	75.31	10.78	28.8	0.02	123.41
垂柳	53.50	41.38	258.13	22.73	162.12	11.86	31.7	0.03	220.43
青桐	87.57	67.73	422.47	37.23	93.33	10.00	29.5	0.05	159.39
大叶女贞	12.20	9.45	58.91	5.19	43.23	5.51	14.7	0.01	66.78
丝棉木	8.49	6.56	40.95	3.60	380.93	26.82	71.5	0.00	481.59
樱花	5.44	4.21	26.24	2.31	78.38	9.93	26.5	0.00	116.29
紫薇	17.55	13.57	84.67	7.45	42.94	6.24	16.7	0.01	70.74
白蜡	13.99	10.81	67.48	5.94	83.87	10.00	26.9	0.05	124.66
广玉兰	52.69	40.75	254.20	22.38	67.80	6.60	17.6	0.03	106.52
珊瑚朴	19.31	14.93	93.16	8.20	24.76	2.38	6.4	0.01	38.91
黄山栾	10.33	7.99	49.84	4.39	34.39	5.47	14.5	0.01	57.18
银杏	9.22	7.13	44.47	3.91	10.86	1.24	3.3	0.00	17.91
乌桕	25.25	19.54	121.85	10.72	59.23	7.69	21.1	0.01	95.03
七叶树	38.13	29.50	184.03	16.20	82.50	9.17	24.8	0.02	126.66
五角枫	19.97	15.44	96.31	8.49	41.74	5.65	15.1	0.01	67.85
桂花	4.26	3.30	20.57	1.82	103.40	7.02	18.7	0.00	130.37
玉兰	3.22	2.50	15.52	1.37	41.56	7.11	18.9	0.00	68.52
红叶石楠	15.89	12.28	76.65	6.76	98.51	11.23	29.9	0.01	143.99
黄桷	8.90	6.88	42.93	3.78	50.80	8.40	22.0	0.00	83.65
枇杷	16.48	12.75	79.48	6.98	133.33	13.33	34.3	0.01	184.26
红叶李	8.62	6.66	41.58	3.66	50.19	10.78	18.9	0.02	78.46
西府海棠	4.29	3.31	20.65	1.82	44.80	6.40	17.1	0.00	69.48
木槿	4.43	3.41	21.40	1.88	52.86	8.81	23.6	0.00	86.55
红枫	14.10	10.90	67.80	6.00	40.00	0.00	9.5	0.01	55.36

作用可以解释净化空气总变异的26%，叶片磷含量、平均树高和平均冠幅三者交互作用能够解释净化空气总变异的28%，三个因子间的交互作用较强。由图4-b可知，叶片磷含量和平均胸径的交互作用对碳封存总变异的解释率为10%，叶片磷含量、平均胸径和平均枝上高三个因子共同作用时，对总变异的解释比例为13%。

对表5中的回归方程进行层次分割，计算功能性状对生态效益的贡献率。4个功能性状指标对净化空气的贡献率大小为：平均

树高(41.03%)>平均冠幅(39.20%)>叶片磷含量(11.98%)>平均枝下高(7.79%)，说明平均树高和平均冠幅是影响净化空气的关键因子(图4-c)。3个功能性状指标对碳封存的贡献率为：平均胸径(76.26%)>叶片磷含量(15.29%)>平均枝上高(8.45%)，说明平均胸径是影响碳封存的关键因子(图4-d)。

3 讨论

本研究利用iTree Eco v6模型评估表明，灞陵湖健身公园树木提供了显著的年生生态效

益。其中，碳储量贡献最大，占比近80%，其次是产氧，而净化空气和截留雨水效益的贡献相对较小。这一“固碳主导”的效益结构模式与姚晓洁和杜存刚^[17]对蚌埠市张公山公园以及李凤霞等^[18]对西安城市公园的研究结论一致，共同印证了城市公园乔木在碳汇功能上的核心贡献，突显了其在助力实现城市“双碳”目标中的关键作用。灞陵湖健身公园平均碳密度为22.07 t/hm²，高于韩国大田市儒林公园平均碳密度15.3 t/hm²，原因是许昌市灞陵湖健身公园乔木大径级的乔木比大

表4 灞陵湖健身公园树木功能性状
 Tab. 4 Functional traits of trees in Baling Lake Fitness Park

树种 Tree species	比叶面积 / (cm ² /mg) SLA	比叶重 / (mg/cm ²) LMA	叶片碳含量 / (g/m ²) Leaf-C	叶片氮含量 / (g/m ²) Leaf-N	叶片磷含量 / (g/m ²) Leaf-P	木材密度 / (g/cm ³) WD	平均树高 /m Hm	平均胸径 /cm Dm	平均冠幅 /m CWm	平均枝下高 /m HCBm
二球悬铃木	46.40	0.15	96.87	1.93	6.64	0.55	13.79	41.58	10.14	2.42
无絮毛白杨	13.25	0.08	49.49	0.95	0.54	0.56	8.80	18.80	5.07	2.78
垂柳	18.14	0.06	43.51	2.30	1.67	0.55	9.29	27.02	6.42	3.21
青桐	19.87	0.05	52.70	1.92	0.12	0.57	11.13	22.00	6.72	2.40
大叶女贞	19.01	0.05	34.79	1.92	0.12	0.59	4.99	14.28	4.06	1.88
丝棉木	19.46	0.06	34.01	1.94	0.13	0.58	6.30	27.72	3.05	2.60
樱花	19.16	0.05	57.01	1.94	0.13	0.58	5.01	15.86	3.34	1.40
紫薇	16.64	0.02	57.77	1.95	0.13	0.65	5.68	13.75	4.71	1.20
白蜡	34.76	0.03	58.48	1.91	0.13	0.58	7.50	20.06	3.27	2.78
广玉兰	19.61	0.01	57.38	2.00	0.12	0.43	7.53	17.80	6.10	2.38
珊瑚朴	17.05	0.06	43.38	1.86	0.10	0.57	6.86	18.78	4.02	2.06
黄山栾	28.37	0.01	34.52	1.03	0.14	0.57	6.21	12.09	3.78	2.36
银杏	24.64	0.04	14.65	1.94	0.13	0.63	6.55	12.46	3.32	2.01
乌桕	20.42	0.05	33.11	1.58	0.13	0.55	6.84	16.54	5.87	2.48
七叶树	33.63	0.03	37.01	1.98	0.17	0.60	9.08	16.83	4.61	2.43
五角枫	20.48	0.05	54.85	1.91	0.15	0.57	5.80	13.43	4.95	2.09
桂花	19.63	0.01	53.39	1.91	0.12	0.84	3.14	19.35	2.40	1.51
玉兰	16.38	0.06	55.68	2.18	0.15	0.43	4.66	10.42	2.39	2.20
红叶石楠	23.50	0.04	52.63	0.86	0.19	0.79	4.25	17.37	4.70	0.53
黄栌	21.41	0.05	38.28	1.87	0.13	0.54	5.19	11.64	3.30	1.34
枇杷	8.16	0.12	34.16	0.85	0.63	0.88	5.83	20.67	4.49	1.43
红叶李	20.54	0.05	84.65	3.34	0.21	0.68	4.66	14.11	3.64	1.68
西府海棠	31.27	0.03	44.01	2.00	0.11	0.59	4.25	14.05	2.18	0.72
木槿	24.66	0.02	16.21	1.04	0.28	0.43	3.20	15.32	2.20	0.71
红枫	17.36	0.06	14.36	0.62	0.28	0.58	5.00	14.00	4.25	1.70

田市儒林公园多，生物量较大。与公园树木生态效益相比，城市行道树的生态效益更加突出美学效益和节能效益，比如周贝宁等^[13]研究表明宁波市“三江六岸”绿道树木的美学效益(64.62%)最大。熊金鑫等^[12]也研究表明南京林业大学行道树美学效益(65.67%)最大，吸收CO₂效益与改善空气质量效益较低，仅占2.65%和1.61%。原因是王希等^[6]研究表明北京10条绿道节能效益最大，固碳效益最小。城市行道树是城市的窗口形象，更加注重观赏性树种选择，提高美学效益。

表5 公园树木生态效益与功能性状的逐步线性回归模型
 Tab. 5 Stepwise linear regression model of ecological benefits and functional traits of park trees

生态效益指标 Ecological benefit indicator	逐步多元线性回归方程 Stepwise multiple linear regression	调整 R^2 Adjusted R^2	ρ 值 p -value
NO ₂	$y_1=-38.746-4.319x_1+6.986x_2+7.015x_3-6.236x_4$	0.877	0.000
SO ₂	$y_2=-29.974-3.343x_1+5.403x_2+5.426x_3-4.821x_4$	0.877	0.000
PM _{2.5}	$y_3=-186.856-20.846x_1+33.715x_2+33.832x_3-30.087x_4$	0.877	0.000
PM ₁₀	$y_4=-16.471-1.839Lx_1+2.969x_2+2.981x_3-2.651x_4$	0.877	0.000
碳封存	$y_5=-0.129-0.015x_1+0.016x_5-0.014x_6$	0.767	0.000
碳储量	$y_6=-0.100+0.011x_5$	0.696	0.000
雨水截留	$y_7=-0.006+0.003x_2$	0.273	0.004

注：x₁代表叶片磷含量，x₂代表平均树高，x₃代表平均冠幅，x₄代表平均枝下高，x₅代表平均胸径，x₆代表平均枝上高；y₁代表NO₂浓度，y₂代表SO₂浓度，y₃代表PM_{2.5}浓度，y₄代表PM₁₀浓度，y₅代表碳封存量，y₆代表碳储量，y₇代表雨水截留量。

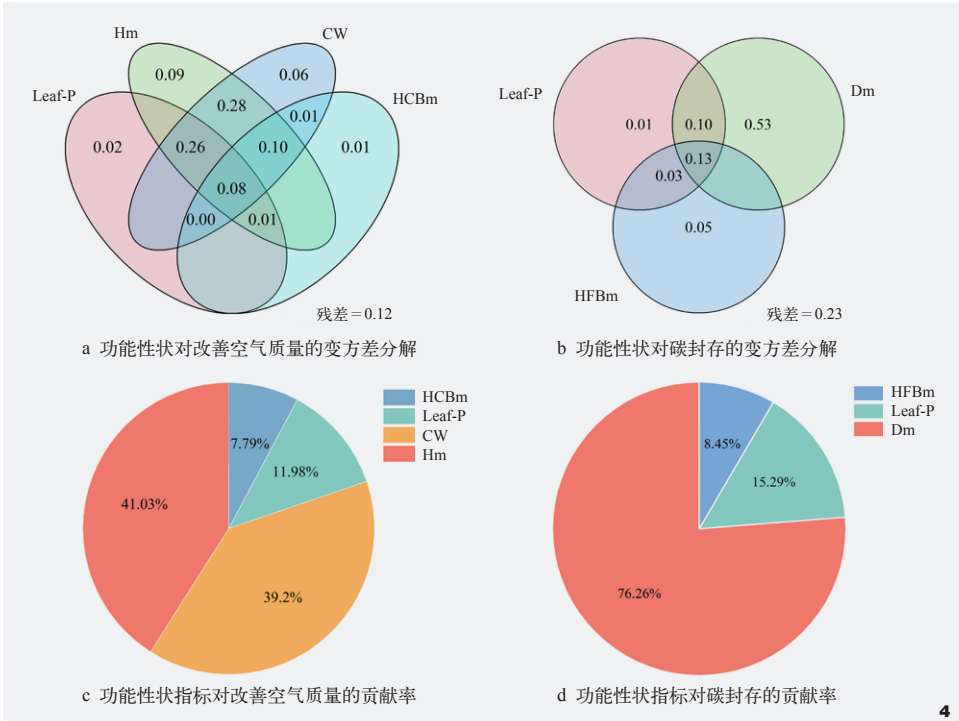


图4 功能性状对生态效益的变方差分解和贡献率
Fig. 4 Variance partitioning and contribution rate of functional traits to ecological benefits

此外，与公园相比，城市行道树在夏季能够为密集建筑遮挡阳光直射，减少室内空调等制冷设备的使用率和运行时间，节能降耗效益突出^[6]。李想等^[14]发现郑州滨河绿化带的产氧效益最大，与本研究结论不同。虽然郑州与许昌地理距离相近，气候降水相似，但郑州如意湖产氧效益突出是因为该绿地以产氧量高的常绿树种雪松为主，而灞陵湖健身公园以落叶乔木为主。由此可知，树木配置和造景的目的不同，是城市不同功能绿地生态效益差异的重要原因。

近年来，植物功能性状及其与生态服务功能耦合研究成为热点研究问题之一^[19]。本研究不仅评估了健身公园乔木的生态效益，而且定量揭示了植物功能性状与多维生态效益指标之间的耦合关系。本研究验证了功能性状之间的相互作用关系，研究结果支持叶片

经济谱理论和树木异速生长关系^[19]。灞陵湖公园树木叶片的比叶面积与叶片磷含量、平均树高、平均胸径、平均枝下高显著相关；而比叶重则与叶片碳含量、平均胸径、平均树高、平均冠幅、平均枝上高显著相关。同时，叶片碳、氮、磷含量与平均胸径、平均冠幅、平均枝下高，以及平均树高与平均胸径、平均冠幅、平均枝下高和平均枝上高之间均存在显著关联。这些发现为理解树木“资源获取—保守”策略（高比叶面积—低木材密度—快生长，低比叶面积—高木材密度—慢生长）及其与整体生长形态（胸径、树高、冠幅）的协同性提供了本地实证^[19]。氮磷是光合酶和生物量合成的关键元素，叶片氮磷含量高的树木通常生产力更高，固碳能力强。宽冠幅树种（如阔叶树）常具高的比叶面积叶片，以扩大光合面积；窄冠幅树种（如针

叶树）比叶重高，叶片寿命长^[20]。本研究最重要突破在于构建了植物功能性状与特定生态效益的定量回归模型，并量化了各性状的贡献率。灞陵湖健身公园树木净化空气效益（NO₂、SO₂、PM_{2.5}和PM₁₀）与叶片磷含量、平均树高、平均冠幅和平均枝下高回归关系显著，贡献率排序为平均树高>平均冠幅>叶片磷含量>平均枝下高，与李娟霞等^[22]和李朝梅等^[23]的研究结果一致。本研究进一步明确了平均树高和平均冠幅的核心作用，其机理在于高大树冠形成的湍流促进颗粒物沉降，平均枝下高大有利于形成厚冠层结构增加气体接触面，提高对净化空气效益^[23,24]。叶片磷含量高，光合速率高，气孔开放度大，有利于叶片气孔对大气污染气体和颗粒物的吸收^[22]。碳封存与叶片磷含量、平均胸径和平均枝上高回归关系显著，贡献率排序为平均胸径>叶片磷含量>平均枝上高，与张昊等^[21]的研究结果一致。本研究精确量化了平均胸径作为碳封存的关键预测因子的贡献（>76%），确认了叶片磷含量通过提升光合速率驱动碳同化的重要性^[19,21]，同时，枝上高通过关联冠层光合面积提高碳封存。碳储量与平均胸径回归关系显著，直接体现了生物量累积的长期结果。截留雨水与平均树高回归关系显著，与Wang等^[25]的研究结果一致，强调了树高通过延长雨水滞留路径和增加冠层体积（常与冠幅协同增长）对截留能力的提升作用^[19,20,25]。

本研究可为城市公园绿地的科学规划与精准管理提供功能性状—生态效益的理论依据和操作路径。在碳汇优化树种选择方面，为最大化固碳速率，应优先选择具有“资源获取型”策略特征的树种，即低木材密度+高比叶面积树种（如丝绵木）。这类树种生长迅速，碳同化能力强。在空气净化提升方面，为增强对大气污染物的去除效果，应重

点配置高大乔木+宽阔冠幅+高叶片氮磷含量(特别是磷含量高)的树种(如二球悬铃木)。其高大的立体结构和高气孔导度是高效净化空气的关键。在雨水截留方面,为提高雨水截留能力,应选择高树高+大冠幅的树种(如青桐),利用其庞大的冠层体积和复杂的枝干结构滞留雨水。

本研究也存在一定局限性。模型气象数据采用邻近的新郑气象站数据,未来需整合许昌本地气象站数据以提高评估精度。当前生态效益评估仅聚焦健身公园乔木,未考虑灌木及地被植物的贡献,未来需推进模型本土化以纳入灌木层生态效益评估,获得更全面的公园生态系统服务价值。此外,基于本研究所揭示的性状一效益关系,未来可在更大尺度上验证其普适性,并探索建立基于功能性状的公园绿地生态效益预测与优化设计模型。

4 结论

(1) 灞陵湖健身公园树木净化空气总量为571.50 kg/a,碳储量367.89 t,碳封存量为33.04 t,产氧量88.11 t,截留雨水27.18 m³;年生态效益50.23万元,其中固碳(79.83%,40.1万元)>产氧(17.54%,8.81万元)>净化空气(2.55%,1.28万元)>截留雨水(0.08%,0.04万元)。

(2) NO₂、SO₂、PM_{2.5}和PM₁₀与叶片磷含量、平均树高、平均冠幅和平均枝下高回归关系显著($\text{adj}R^2=0.877, p<0.001$),碳封存与叶片磷含量、平均胸径和平均枝上高回归关系显著($\text{adj}R^2=0.767, p<0.001$),碳储量与平均胸径回归关系显著($\text{adj}R^2=0.696, p<0.001$),截留雨水与平均树高回归关系显著($\text{adj}R^2=0.273, p=0.004$)。

(3) 4个功能性状指标对净化空气的贡

献率大小为:平均树高(41.03%)>平均冠幅(39.20%)>叶片磷含量(11.98%)>平均枝下高(7.79%),平均树高和平均冠幅是影响净化空气的关键因子。三个功能性状指标对碳封存的贡献率为:平均胸径(76.26%)>叶片磷含量(15.29%)>平均枝上高(8.45%),平均胸径是影响碳封存的关键因子。

注:文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 叶郁,潘思融.体育公园模式演变与空间系统发展脉络研究——基于竞技、风景和触媒的逻辑[J].中国园林,2019,35(09):62-66.
- [2] 杜晓润.全民健身背景下邯郸市永年区体育公园景观设计[J].南方农业,2025,19(02):155-158.
- [3] 陈浩.西宁市体育公园全民健身公共服务优化研究[J].运动与健康,2024(09):49-52.
- [4] 韩会庆,汪田归,陈思盈,等.我国乡村生态体育公园建设及优化对生态系统服务价值的影响[J].西南师范大学学报(自然科学版),2021,46(06):150-157.
- [5] VEERKAMP C J, SCHIPPER A M, HEDLUND K, et al. A Review of Studies Assessing Ecosystem Services Provided by Urban Green and Blue Infrastructure[J]. Ecosystem Services, 2021, 52: 101367.
- [6] 王希,徐敏,王美仙.基于i-Tree模型的北京10条绿道木本植物的生态效益评估[J].园林,2025,42(05):106-113.
- [7] NOWAK D J, HOEHN R E, BODINE A R, et al. Urban Forest Structure, Ecosystem Services and Change in Syracuse, NY[J]. Urban Ecosystems, 2016, 19(04):1455-1477.
- [8] RUSSO A, ESCOBEDO F J, TIMILSINA N, et al. Assessing Urban Tree Carbon Storage and Sequestration in Bolzano, Italy[J]. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 2014, 10(01):54-70.
- [9] VAHIDI H, MEHRIAN M R, JALAYER A, et al. Evaluating the Value of Vegetation Ecosystem Services in District 16 of Tehran Municipality Using the i-Tree Model[J]. Environmental Energy & Economic Research, 2023, 7(01):1265.
- [10] KIM J, KANG Y, KIM D, et al. Carbon Storage and Sequestration Analysis by Urban Park Grid Using i-Tree Eco and Drone-based Modeling[J]. Forests, 2024, 15(04):683.
- [11] SUI Q, JIA H, ZHAO M, et al. Quantitative Evaluation of Ecosystem Services of Urban Street Trees: A Case Study of Shengjing Historical and Cultural Block in Shenyang, China[J]. Sustainability, 2023, 15(03):2532.
- [12] 熊鑫鑫,祁慧君,王倩茹,等.基于i-Tree模型的城市小区行道树生态效益评价[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(02):128-136.
- [13] 周贝宁,芦建国,花壮壮.基于i-Tree模型的城市绿道生态服务效益研究[J].浙江农业学报,2020,32(12):2201-2210.
- [14] 李想,刘利,刘秉涛.基于i-tree模型的滨河绿化带生态效益分析——以郑州市如意运河北段景观绿化带为例[J].水利科技与经济,2022,28(10):17-23.
- [15] 郭树煌,李晓鹏,梁龙锋,等.基于i-Tree模型的湛江市行道树冠层截留雨水效益分析[J].西北林学院学报,2020,35(02):244-251.
- [16] 赵东亮,赵宏宇.基于i-Tree Eco模型的城市森林生态效益评估——以长春水文化生态园为例[J].智能建筑与智慧城市,2022(02):146-148.
- [17] 姚晓洁,杜存刚.基于i-Tree模型的公园植物群落与生态效益研究——以蚌埠市张公山公园为例[J].长春大学学报,2025,35(02):35-41.
- [18] 李凤霞,宋昆仑,冯晓刚,等.西安城市公园绿地生态服务功能价值估算研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2023,55(05):783-790.
- [19] 潘权,郑华,王志恒,等.植物功能性状对生态系统服务影响研究进展[J].植物生态学报,2021,45(10):1140-1153.
- [20] 张德顺,刘鸣.基于“植物功能性状-生态系统服务”评价框架的园林树种选择方法——以上海为例[J].中国园林,2020,36(02):106-111.
- [21] 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.
- [22] 李娟霞,何靖,孙一梅,等.10种园林植物功能性状对大气污染的生理生态响应[J].生态环境学报,2020,29(06):1205-1214.
- [23] 李朝梅,王军梦,王腾飞,等.郑州市常见公园绿化植物的滞尘能力及叶片性状分析[J].西北林学院学报,2021,36(02):123-129.
- [24] 李雨桐,张兴,曲彦婷,等.苏州市常见行道树叶功能性状对空气质量的响应策略研究[J].东北农业大学学报,2022,53(07):16-27.
- [25] WANG Y, LI B B, BAO P P, et al. A Case Study of Leaf Wettability Variability and the Relations with Leaf Traits and Surface Water Storage for Urban Landscape Plants[J]. Water, 2023, 15(12):2152.
- [26] 沈思栋,范舒欣,钱璟,等.基于叶性状与植株构型性状的园林绿化树种热调节效应研究[J].生态学报,2024,44(19):8675-8687.