

# 基于固定样地监测的上海典型园林绿化树种（组）固碳能力研究

## A Study on the Carbon Sequestration Capacity of Selected Landscaping Tree Species (Groups) in Shanghai Based on Plot Monitoring Data

张希金<sup>1</sup> 张艳华<sup>1</sup> 张桂莲<sup>1\*</sup> 李胜华<sup>1,2\*</sup> 仲启铖<sup>1</sup> 易 扬<sup>1</sup>  
ZHANG Xijin<sup>1</sup> ZHANG Yanhua<sup>1</sup> ZHANG Guilian<sup>1\*</sup> LI Shenghua<sup>1,2\*</sup> ZHONG Qicheng<sup>1</sup> YI Yang<sup>1</sup>

(1.上海市园林科学规划研究院, 城市困难立地生态园林国家林业和草原局重点实验室, 国家林业和草原局城市困难立地绿化造林国家创新联盟, 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心, 上海 200232; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

(1. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Landscaping of Challenging Urban Sites, National Innovation Alliance of National Forestry and Grassland Administration on Afforestation and Landscaping of Challenging Urban Sites, Shanghai Engineering Research Center of Landscaping on Challenging Urban Sites, Shanghai, China, 200232; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai, China, 200092)

文章编号: 1000-0283(2026)01-0092-06

DOI: 10.12193/j.laing.20251011001

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2025-10-11

修回日期: 2025-11-13

### 摘 要

基于树木固碳能力评估开展高固碳树种筛选, 是最大限度发挥城市园林绿化树种碳汇能力的重要基础工作。利用上海市公园绿地固定样地监测数据, 构建香樟 (*Camphora officinarum*)、水杉 (*Metasequoia glyptostroboides*)、女贞 (*Ligustrum lucidum*)、复羽叶栎 (*Koelreuteria bipinnata*)、荷花木兰 (*Magnolia grandiflora*) 和落羽杉属 (*Taxodium*) 等6种典型园林绿化树种 (组) 的单株年固碳量—胸径幂函数关系模型并系统量化其固碳能力。研究结果表明: (1) 6种树种 (组) 的单株年固碳量—胸径幂函数关系模型拟合效果较好,  $R^2$  达 0.682 ~ 0.989; (2) 单株年固碳能力随胸径增大呈显著增长趋势, 不同树种 (组) 固碳能力排序随胸径增大而变化; (3) 在常见胸径规格范围内, 复羽叶栎 (14.0 kg/株/a) 和香樟 (12.9 kg/株/a) 的年平均固碳量最高, 落羽杉属 (7.61 kg/株/a) 次之, 女贞 (4.71 kg/株/a)、水杉 (3.79 kg/株/a) 和荷花木兰 (2.78 kg/株/a) 相对较低。旨在为上海城市园林绿化碳汇能力建设提供树种配置依据。

### 关键词

同化量法; 异速生长方程; 园林绿化; 碳中和; 碳汇

### Abstract

The Selection of high-carbon-sequestration tree species based on their carbon sequestration capacity is a fundamental task for maximizing the carbon sink potential of urban landscaping trees. This study utilized fixed-plot monitoring data collected from urban parks in Shanghai to develop power function models of annual carbon sequestration per tree as a function of diameter at breast height (DBH) for six representative landscaping tree species (groups), including *Camphora officinarum*, *Metasequoia glyptostroboides*, *Ligustrum lucidum*, *Koelreuteria bipinnata*, *Magnolia grandiflora*, and *Taxodium* species. The capacities for carbon sequestration of these species were systematically quantified. The results are as follows: (1) The power function models of annual carbon sequestration per tree as a function of DBH for the six species (groups) showed good fit, with  $R^2$  values ranging from 0.682 to 0.989; (2) Annual carbon sequestration per tree increased significantly with DBH, and the ranking of carbon sequestration capacity among species (groups) varied with increasing DBH; (3) Within the standard DBH range, *K. bipinnata* (14.0 kg/tree/a) and *C. officinarum* (12.9 kg/tree/a) exhibited the highest average annual carbon sequestration, followed by *Taxodium* species (7.61 kg/tree/a), while *L. lucidum* (4.71 kg/tree/a), *M. glyptostroboides* (3.79 kg/tree/a), and *M. grandiflora* (2.78 kg/tree/a) showed relatively lower sequestration capacities. This study aims to provide a scientific basis for selecting tree species to enhance the carbon sink capacity of urban landscaping in Shanghai.

### Keywords

assimilation method; allometric growth equation; landscaping and greening; carbon neutrality; carbon sink

### 张希金

1991年生/男/山东济南人/博士/工程师/研究方向为城市绿地碳汇计量监测、植被生态学

### 张桂莲

1976年生/女/山西太原人/博士/教授级高级工程师/研究方向为城市绿地碳汇计量监测、城市绿地生态效益智能评估

### 李胜华

1974年生/男/广东惠阳人/在读博士研究生/高级工程师/研究方向为园林绿化植物栽培养护、有害生物防控

\*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: zgl@shsyky.com; LiSH74@163.com

### 基金项目:

国家重点研发计划项目 (编号: 2022YFC3802605); 上海市绿化和市容管理局项目“上海公园绿地植物群落碳汇评估与增汇关键技术研究” (编号: G220201); 上海市自然科学基金面上项目“城市绿地三维结构对夏季热岛效应的影响机制研究” (编号: 23ZR1459700); 上海市青年科技英才扬帆计划“基于高光谱和激光雷达的城市绿地植被群落碳汇计量监测技术研究” (编号: 22YF1444000)

城市作为全球碳排放强度最高的区域,贡献了超过70%的碳排放<sup>[1]</sup>,成为实现“碳达峰、碳中和”目标的主战场。降低CO<sub>2</sub>排放与提升碳汇能力是缓解气候变化的两项关键措施,也是实现“双碳”目标的必要途径<sup>[2]</sup>。园林绿化作为城市生态系统主要的自然固碳载体,是直接增汇与间接减排的关键要素<sup>[3]</sup>。如何在有限的城市园林绿化空间内,最大限度地发挥树木碳汇能力,已成为中国各大城市推动实现“双碳”战略目标的重要课题。

当前城市植物碳汇相关研究主要集中于碳汇核算<sup>[4-5]</sup>、影响因素解析及管理策略优化等研究<sup>[6-7]</sup>。准确量化城市植物的碳储量与碳汇量是所有相关研究的基础,也是制定有效城市园林绿化政策的前提。如Xu等<sup>[4]</sup>基于优化的CASA模型估算了中国5个城市的绿地碳汇。而理解影响碳汇效率的因素并制定有效的管理策略,是将科学研究转化为实际生态效益的关键环节。如张希金等<sup>[8]</sup>解析了上海香樟群落结构与生物量对碳汇能力的影响,并量化了不同胸径规格的香樟纯林的最佳林分密度。树种亦是影响群落尺度碳汇能力的重要因素。由于不同树种的生理特性存在差异,其固碳能力存在显著区别。在相似的立地条件与群落结构下,树种选择成为决定碳汇能力的关键因素。因此,科学评估不同树种的固碳能力,对于优化城市园林绿化树种配置、提升城市碳汇能力以及推进各大城市实现“双碳”目标具有重要的理论与实践意义。

以往植物固碳能力评估研究多基于光合作用原理,采用同化量法评价植物固碳能力,即通过光合仪测定植物瞬时光合速率,结合公式计算植物单位叶面积固碳量<sup>[9]</sup>。例如,王丽勉等<sup>[9]</sup>通过光合生理参数测定,系统评

价了上海151种园林绿化植物的固碳能力。考虑到植株叶片总面积以及光合有效天数的差异,基于单位叶面积日固碳量推算整株冠层全年净固碳量以衡量单株固碳能力的方法也常被采用<sup>[10]</sup>,但该方法可能引起不确定性<sup>[5]</sup>。估算单株年固碳量的另一种常用方法则是异速生长方程法,分为基于长期监测(至少两期复测)数据采用本地化的异速生长方程估算<sup>[7]</sup>或基于单次实测数据采用i-tree模型以及以i-tree为基础的NTBC模型估算<sup>[11]</sup>。前者所需要的时间周期较长,后者则是基于美国本土数据所得出,其结论应用于不同区域可能存在一定的误差<sup>[12]</sup>。因此,有必要基于本地固定样地的长期监测数据,构建单株年固碳量模型,从而实现对单株及群落固碳能力的快速评估。

研究表明,同一树种的单株年固碳量显著受个体规格(如胸径)、群落密度以及气候环境等因素的影响,其中个体规格被认为是影响同一树种单株年固碳量的主要因子,可解释单株年固碳量变异的61.4%~78.4%<sup>[7]</sup>。作为国家改革开放排头兵和创新发​​展先行者,上海积极响应并落实“双碳”目标,这既是服务国家战略大局的使命,也是自身高质量发展的内在需要<sup>[13]</sup>。本研究基于上海市公园绿地碳汇计量监测固定样地2021-2023年两期监测数据,充分考虑个体规格,构建了上海市6种典型园林绿化树种(组)(包括香樟 *Camphora officinarum*、水杉 *Metasequoia glyptostroboides*、女贞 *Ligustrum lucidum*、复羽叶栎 *Koelreuteria bipinnata*、荷花木兰 *Magnolia grandiflora* 和落羽杉属 *Taxodium*)的单株年固碳量—胸径幂函数关系模型,并基于模型评估了典型树种(组)固碳能力。本研究旨在为上海城市园林绿化碳汇能力建设提供树种配置依据,助力“双碳”目标的实现。

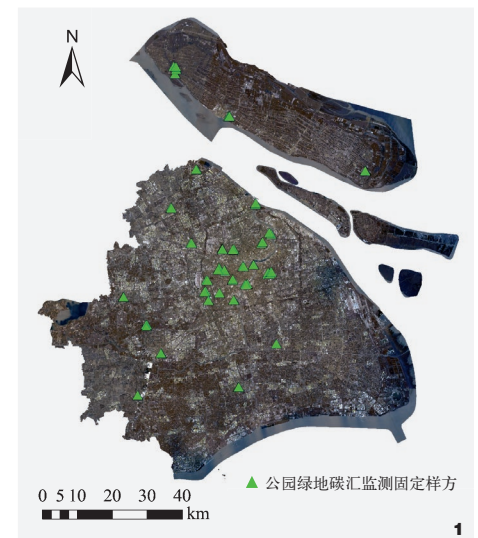


图1 上海公园绿地碳汇计量监测固定样方分布情况  
Fig. 1 Distribution of fixed plots for carbon sequestration measurement and monitoring in Shanghai's parks and green spaces

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域概况

研究区位于上海市(30° 40′—31° 53′ N, 120° 52′—122° 12′ E),地处长江入海口,毗邻东海,为长江三角洲冲积平原。作为中国经济发展最发达的城市之一,行政区域陆地总面积为6 340.5 km<sup>2</sup>,常住人口超2 400万人。上海市属于亚热带湿润季风气候,四季分明,光照充足,雨量充沛,平均气温15.5℃,最高温度39.0℃,最低-8.5℃,年平均降水量1 062 mm,无霜期200 d。

### 1.2 数据来源

数据来源于2021-2023年上海市76个公园绿地碳汇计量监测固定样地复测数据,复测期为两年。样地面积为20 m×20 m,分布于浦东新区、徐汇区、长宁区、普陀区、杨浦区、黄浦区、静安区、宝山区、闵行区、嘉定区、松江区、金山区、青浦区、奉贤区和崇明区等15个市辖区(图1)。对样地内胸径≥5 cm的所有树木进行每木检尺,记录物

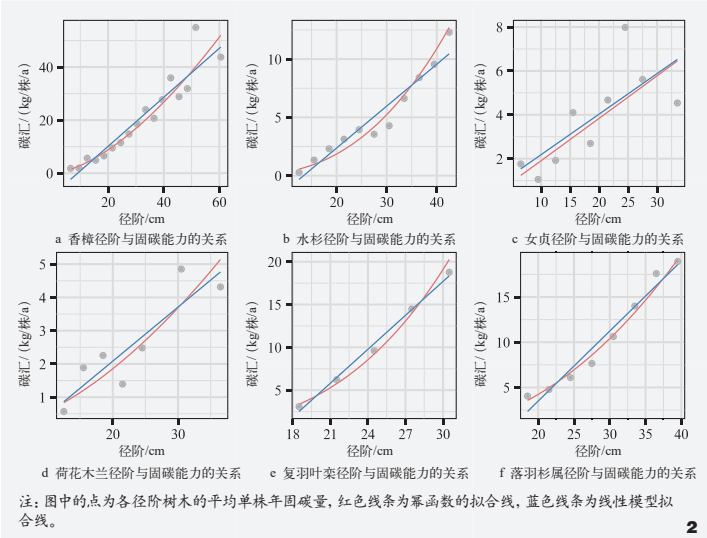


图2 上海6种典型园林绿化树种(组) 径阶与其对应的单株年固碳量的关系  
Fig. 2 The relationship between the diameter classes of six typical landscaping tree species (groups) in Shanghai and their corresponding annual carbon sequestration per individual

种名称、胸径，并目视估测树高及冠幅等指标。

上海市自然植被稀少，大部分为人工植被，主要树种有香樟、水杉、女贞、复羽叶栎、荷花木兰和池杉 (*Taxodium distichum* var. *imbricarium*) 等<sup>[7,14-15]</sup>，在上海园林绿化中占据重要地位。鉴于此，本研究选择上海市典型园林绿化树种(组)，即香樟、水杉、女贞、复羽叶栎、荷花木兰和落羽杉属(包括池杉、落羽杉*Taxodium distichum*、墨西哥落羽杉*Taxodium mucronatum*、中山杉*Taxodium ‘Zhongshanshan’*)为研究对象，开展固碳能力研究。尽管落羽杉属的4个树种生长速率存在差异<sup>[16]</sup>，鉴于现有数据量不足以支撑对每个树种开展单独分析，因此本研究将4个树种的数据整合，旨在构建4个树种在属水平上的单株年固碳量模型。以3 cm为胸径分组间距，将胸径划分为若干径阶(如5 ~ 8 cm、8 ~ 11 cm等)。针对各树种，统计每个径阶的个体数量，剔除个体数量少于三株的径阶(表1)，以确保结果的可靠性。通过计算各径阶单株年固碳量的平均值，反映该径阶的单株固碳能力。

1.3 数据处理与统计分析

1.3.1 单株年固碳量估算

单株碳储量通过各树种的生物量异速生长方程及含碳率计算得出(表2)。落羽杉属的4个树种缺乏相关生物量异速生长方程，鉴于其与水杉同科且树形相似，本研究采用水杉的生物量异速生长方程作为替代进行计算。单株年固碳量(kg/株/a)通过两期碳储量差值除以复测

表1 上海市6种典型园林绿化树种(组) 基本信息  
Tab. 1 Basic information on six typical landscaping tree species (groups) in Shanghai

树种(组) Species (group)	株数/株 Number of individuals	径阶数量/个 Number of diameter classes	胸径范围/cm Range of DBH
香樟	480	17	5 ~ 62
水杉	168	11	11 ~ 44
女贞	120	9	5 ~ 35
荷花木兰	47	7	11 ~ 38
复羽叶栎	33	5	17 ~ 32
落羽杉属	90	8	17 ~ 41

表2 各树种(组) 生物量异速生长方程和含碳率汇总  
Tab. 2 Summary of allometric growth equations and carbon content rates for various tree species (groups)

树种(组) Species (group)	异速生长方程 Allometric growth equation	含碳率 Carbon content
香樟	$B = 0.10387D^{2.535[17]}$	0.45
水杉	$B = 0.06291D^{2.484[18]}$	0.44
女贞	$B = 0.139D^{2.342[19]}$	0.45
荷花木兰	$B = 0.330788D^{1.90957[20]}$	0.44
复羽叶栎	$B = 0.10994D^{2.48438[17]}$	0.43
落羽杉属 (池杉、落羽杉、墨西哥落羽杉和中山杉)	$B = 0.06291D^{2.484[18]}$	0.46

注：含碳率为作者自测。*B*表示生物量(kg)；*D*表示胸径(cm)。

时间间隔(两年)计算得出。

1.3.2 单株年固碳量-胸径关系模型构建

基于散点图反映的数据分布特征，6种典型园林绿化树种(组)的径阶与其对应单株年固碳量的关系分别尝试采用线性模型，见公式(1)，和幂函数模型，见公式(2)，进行拟合(图2)。然而，线性模型拟合的预测值在小径阶范围内出现负值，这与生物学规律相悖。因此，本研究选用幂函数进行单株年固碳量与胸径关系模型拟合。模型拟合基于R语言(4.4.2版本)lm函数完成。其中，在进行幂函数模型拟合时，通过对模型两侧取对数，将其转换为线性模型，以便简化计算和参数估计。

$$C_s = a + b \times D \tag{1}$$

$$C_s = a \times D^b \tag{2}$$

式中，*C<sub>s</sub>*为单株年固碳量(kg/株/a)，*D*为胸径(cm)，*a*、*b*为模

型参数。

1.3.3树种(组) 固碳能力评估

本研究中6种典型园林绿化树种(组) 径阶分布主要集中于胸径11 ~ 38 cm范围。本研究将该胸径范围以1 cm为间隔代入构建的单株年固碳量—胸径幂函数关系模型, 估算了6种典型园林绿化树种(组) 不同胸径规格植株的单株年固碳量。为了综合反映各树种(组) 的固碳能力, 采用该胸径范围内单株年固碳量的平均值作为衡量指标。

2研究结果

2.1单株年固碳量—胸径幂函数关系模型

上海市6种典型园林绿化树种(组) 单株年固碳量—胸径幂函数关系模型见表3。香樟、水杉、复羽叶栎和落羽杉属的模型决定系数 $R^2$ 均超过0.90 ( $p < 0.001$ ), 女贞和荷花木兰的模型决定系数 $R^2$ 相对较低, 分别为0.682( $p < 0.01$ ) 和0.771( $p < 0.01$ )。总体而言, 各树种(组) 单株年固碳量与胸径之间表现出较高的相关性, 其幂函数关系模型拟合效果良好, 可以用于估算不同胸径个体的平均年固碳量。

表3 6种典型园林绿化树种(组) 单株年固碳量-胸径幂函数关系模型  
Tab. 3 Power function relationship models between annual carbon sequestration per individual and DBH of six typical landscaping tree species (groups).

树种(组) Species(group)	模型参数 Model parameters		决定系数 $R^2$ Coefficient of determination	$p$ 值 $p$ value
	a	b		
香樟	0.07241	1.60299	0.967	<0.001
水杉	0.00089	2.55119	0.908	<0.001
女贞	0.18647	1.00936	0.682	<0.01
荷花木兰	0.01159	1.69418	0.771	<0.01
复羽叶栎	0.00009	3.59710	0.989	<0.001
落羽杉属	0.00554	2.21652	0.980	<0.001

2.2不同树种(组) 单株固碳能力与胸径的关系

总体分析表明, 6种典型园林绿化树种(组) 的单株固碳能力均随胸径的增大而显著提升, 且提升速率因树种而异, 导致不同树种(组) 单株固碳能力排序随胸径而变化(图3)。胸径小于20 cm时, 香樟的固碳能力最强, 其他树种相对较低。当胸径处于20 ~ 28 cm区间时, 固碳能力排序为香樟>复羽叶栎>落羽杉属>女贞>水杉>荷花木兰。胸径超过28 cm后, 固碳能力排序变为复羽叶栎>香樟>

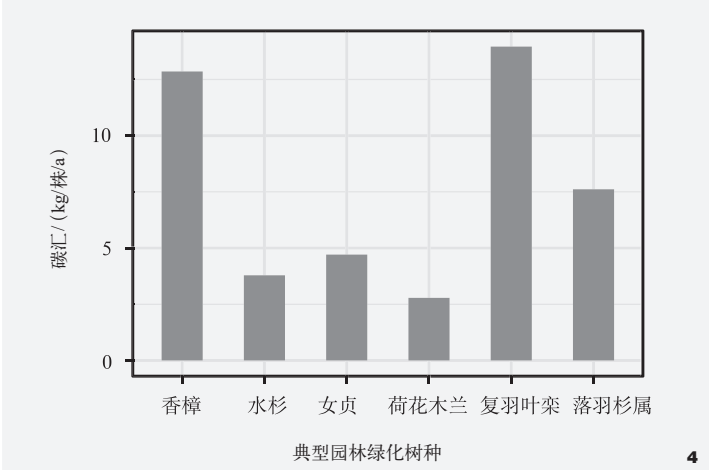
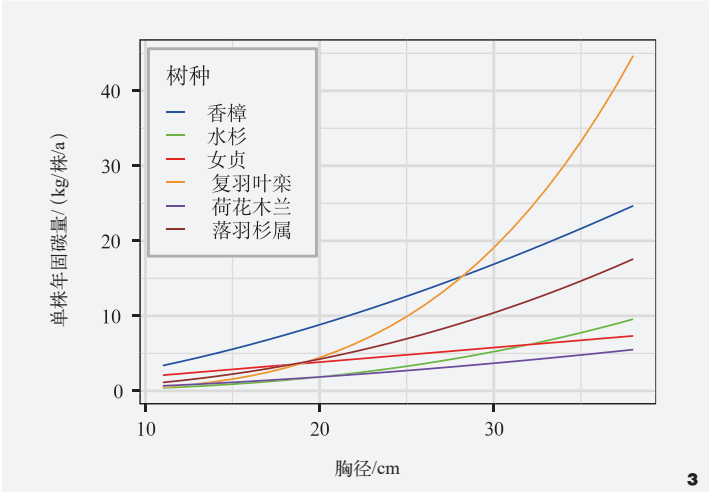


图3 6种典型园林绿化树种(组) 单株年固碳量与胸径(11~38 cm) 的关系  
Fig. 3 Relationship between annual carbon sequestration per individual and DBH (11~38 cm) of six typical landscaping tree species (groups)

图4 6种典型园林绿化树种(组) 固碳能力比较  
Fig. 4 Comparison of carbon sequestration capacity among six typical landscaping tree species (groups)

落羽杉属>水杉/女贞>荷花木兰。

2.3不同树种(组) 固碳能力评估

在本研究所覆盖的常见胸径范围内(11 ~ 38 cm), 香樟、水杉、女贞、荷花木兰、复羽叶栎和落羽杉属的单株固碳能力分别介于3.38 ~ 24.67 kg/株/a、0.40 ~ 9.56 kg/株/a、2.10 ~ 7.33 kg/株/a、0.67 ~ 5.50 kg/株/a、0.52 ~ 44.66 kg/株/a、1.13 ~ 17.57 kg/株/a(表4)。其中, 复羽叶栎和香樟固碳能力最高, 分别为14.0 kg/株/a和12.9 kg/株/a; 落羽杉属次之, 为7.61 kg/株/a; 女贞、水杉和荷花木兰的固碳能力相对较弱, 分别为4.71 kg/株/a、3.79 kg/株/a和2.78 kg/株/a(图4)。



表4 6种典型园林绿化树种（组）常见胸径规格的单株年固碳量  
Tab. 4 Annual carbon sequestration per individual of six typical landscaping tree species (groups) at common DBH range

胸径 /cm DBH	单株年固碳量 / (kg/ 株 /a) Annual carbon sequestration per individual					
	香樟	水杉	女贞	荷花木兰	复羽叶栎	落羽杉属
11	3.38	0.40	2.10	0.67	0.52	1.13
12	3.89	0.51	2.29	0.78	0.71	1.37
13	4.42	0.62	2.48	0.89	0.94	1.63
14	4.98	0.75	2.68	1.01	1.23	1.92
15	5.56	0.89	2.87	1.14	1.58	2.24
16	6.17	1.05	3.06	1.27	1.99	2.58
17	6.80	1.23	3.26	1.41	2.47	2.95
18	7.45	1.42	3.45	1.55	3.04	3.35
19	8.12	1.63	3.64	1.70	3.69	3.78
20	8.82	1.86	3.84	1.86	4.44	4.24
21	9.53	2.11	4.03	2.02	5.29	4.72
22	10.27	2.37	4.22	2.18	6.25	5.23
23	11.03	2.66	4.42	2.35	7.34	5.77
24	11.81	2.96	4.61	2.53	8.55	6.35
25	12.61	3.29	4.80	2.71	9.90	6.95
26	13.43	3.63	5.00	2.89	11.41	7.58
27	14.26	4.00	5.19	3.08	13.06	8.24
28	15.12	4.39	5.39	3.28	14.89	8.93
29	16.00	4.80	5.58	3.48	16.89	9.65
30	16.89	5.23	5.78	3.69	19.08	10.41
31	17.80	5.69	5.97	3.90	21.47	11.19
32	18.73	6.17	6.16	4.11	24.07	12.01
33	19.68	6.67	6.36	4.33	26.89	12.85
34	20.64	7.20	6.55	4.56	29.94	13.73
35	21.62	7.75	6.75	4.79	33.23	14.64
36	22.62	8.33	6.94	5.02	36.77	15.59
37	23.64	8.93	7.14	5.26	40.58	16.56
38	24.67	9.56	7.33	5.50	44.66	17.57

3 结论与讨论

本研究基于上海市公园绿地碳汇计量监测固定样地的监测数据，构建了上海6种典型园林绿化树种（组）的单株年固碳量—胸径幂函数关系模型，并估算了不同胸径规格的单株年固碳量，以表征其固碳能力。本研究中香樟、复羽叶栎的固碳能力最高，落羽杉属次之，女


贞、水杉和荷花木兰固碳能力较低。这一结果与以往基于光合作用同化量法的研究结果并不完全一致。例如，张娇等<sup>[21]</sup>在临安地区测定的10月份单位叶面积日净固定CO<sub>2</sub>量排序为香樟 (11.374 g/(m<sup>2</sup>·d)) >女贞 (7.11 g/(m<sup>2</sup>·d)) >黄山栎树 (*Koelreuteria bipinnata* ‘integrifoliola’) (6.785 g/(m<sup>2</sup>·d)) >荷花木兰 (5.979 g/(m<sup>2</sup>·d))>

落羽杉 (4.704 g/(m<sup>2</sup>·d))。而董延梅<sup>[22]</sup>在杭州地区测定的7~9月平均单位叶面积固定CO<sub>2</sub>量排序为黄山栎树 (11.25 g/(m<sup>2</sup>·d)) >荷花木兰 (10.29 g/(m<sup>2</sup>·d)) >香樟 (7.73 g/(m<sup>2</sup>·d))，且不同季节树种单位叶面积固定CO<sub>2</sub>量的排序亦有所差异。此外，冠层尺度的年度光合同化量并不完全转化为单株尺度的年度生长量。一项跨欧洲和北美洲生物群落的研究表明，树木年轮生长量与初级生产力之间总体表现为较弱的相关性，二者呈现出普遍的解耦现象<sup>[23]</sup>。这种现象的出现是因为树木分生组织的细胞分裂和分化不仅受光合产物供应的影响，还直接受到环境的限制<sup>[24]</sup>。例如，干旱可能降低植物水势和细胞膨压，从而限制细胞分裂和增大<sup>[25]</sup>。

单株年固碳量—胸径幂函数关系模型表明各树种单株固碳能力随胸径的增大而提升，即大规格树木拥有更大的固碳能力。这一趋势在以往基于树木生长监测<sup>[7]</sup>以及单位土地面积日光合同化量<sup>[26]</sup>的研究中也得到了验证。例如，徐嘉艺等<sup>[7]</sup>基于树木胸径生长的长期监测数据分析表明，香樟、水杉、银杏和雪松的单株年固碳量均随胸径增加而显著提升。此外，本研究中幂函数的系数a>0、b>1，表明各树种单株固碳能力的增长速率随着胸径的增大而持续提升，未表现出减缓或下降趋势。这一结果与Wang等<sup>[26]</sup>研究中植物碳汇效率（即单位土地面积叶片日光合同化量）随着胸径或基径的增加逐渐减缓的结论有所不同，但并不矛盾。这种差异主要源于研究所选取的尺度不同：单株尺度和冠层单位土地面积尺度。树木冠幅面积的增加速率通常随着胸径增加而持续增加且未减缓<sup>[27]</sup>，导致单株树木冠层整体碳汇效率理论上也会随着胸径的增加而持续提升且不表现出减缓趋势。此外，随着树木规格和树龄的增加，

生产力通常在叶片和林分两个尺度上出现下降<sup>[28]</sup>。这两类最常被引证为树木生产力随个体规格增加而减缓的观测结果与本研究结论也不矛盾。随着树木年龄老化、规格增大,水分限制可能降低叶片光合速率<sup>[29]</sup>。但单株树木叶面积总量随树木规格增大呈幂函数趋势增加<sup>[30]</sup>,足以弥补单位叶面积尺度上光合速率的下降<sup>[28]</sup>。对于林分尺度上的生产力,相较于树木的平均规格,林分密度对碳汇能力发挥主要驱动作用<sup>[8]</sup>。随着林分年龄增加、树木平均规格增大,树木死亡率上升和种群密度降低,导致单株树木固碳能力的提升无法转化为林分尺度生产力的增长。因此,从单株尺度而言,相较于较小的树木,大规格树木不仅仅是碳储存库,更是活跃的碳固定者;在极端情况下,一株大树一年内固定的碳量可以相当于一整株中等大小树木的碳储量<sup>[28]</sup>。例如,在美国西部原始森林样地中,虽然胸径大于100 cm的树木仅占树木总数的6%,但却贡献了33%的年度森林生物量增长<sup>[28]</sup>。大规格树木的高固碳能力表明,相较于其数量,其在生态系统碳汇过程中发挥着不成比例的重要作用。

综上所述,本研究主要得出以下结论:(1)树木单株年固碳能力随胸径增大呈显著幂函数增长趋势;(2)复羽叶栎和香樟为上海地区的高碳汇树种,落羽杉属次之。基于此,建议:(1)加强保护城市中现有的(相对)大规格树木,以延长大树的寿命并维持其高水平的碳固定能力,避免因开发建设或管理不当而造成其碳汇损失;(2)在城市园林绿化规划中,应优先选择固碳能力强且能够长成大规格的树种进行种植设计,如复羽叶栎、香樟和落羽杉属等树种,这将有助于在未来形成更高效的城市园林绿化碳汇功能;(3)加强固定样地的长期监测研究工作,

依托更长的监测时间尺度,构建更多树种的生长/碳汇模型,进而更为科学且全面地筛选具有高碳汇能力的树种。

注:文中图表均由作者绘制。

## 参考文献

- [1] SETO K C, DHAKAL S, BIGIO A, et al. Human Settlements, Infrastructure, and Spatial Planning[M]. Los Angeles: California Digital Library, 2014.
- [2] DHAKAL S. GHG Emissions from Urbanization and Opportunities for Urban Carbon Mitigation[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2010, 2(04): 277-283.
- [3] 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.
- [4] XU F, WANG X, LI L. NPP and Vegetation Carbon Sink Capacity Estimation of Urban Green Space Using the Optimized CASA Model: A Case Study of Five Chinese Cities[J]. Atmosphere, 2023, 14(07): 1161.
- [5] 张桂莲, 邢璐琪, 张浪, 等. 城市绿地碳汇计量监测方法研究进展[J]. 园林, 2022, 39(01): 4-9.
- [6] 李蕊, 姚鳗卿, 李屹楠, 等. 我国高碳汇植物研究现状[J]. 山东林业科技, 2023, 53(03): 104-110.
- [7] 徐嘉艺, 王小玲, 宋坤, 等. 上海四种常见树种单株固碳能力差异及其影响因子[J]. 生态学报, 2024, 44(13): 5532-5541.
- [8] 张希金, 张艳华, 张桂莲. 上海市香樟群落结构与生物量对碳汇能力的影响研究[J]. 园林, 2025, 42(07): 119-125.
- [9] 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, 26(03): 399-401.
- [10] 张丽. 基于碳汇效能的城市公园绿地植物群落优化设计研究[D]. 浙江: 浙江理工大学, 2023.
- [11] 祝月茹, 李青青, 祝遵凌. 居住区树种碳汇效益测算及环境优化提升——以南京市丁家庄为例[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(10): 129-139.
- [12] 依兰, 王洪成. 城市公园植物群落的固碳效益核算及其优化探讨[J]. 景观设计, 2019(03): 36-43.
- [13] 熊健, 卢柯, 姜紫莹, 等. 上海落实“双碳”目标的国土空间发展战略与实施策略研究[J]. 上海城市规划, 2024(04): 1-8.
- [14] 张彪, 谢紫霞, 高吉喜. 上海城市森林植被固碳功能及其抵消能源碳排放效果评估[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8906-8920.
- [15] 仲启铖, 傅煜, 张桂莲. 上海市乔木林生物量估算及动态分析[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(03): 524-532.
- [16] 王丹碧, 余华, 凌子然, 等. 落羽杉与墨西哥落羽杉3个杂交后代品系的生长和杂种优势分析[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(01): 55-62.
- [17] 王哲, 韩玉洁, 康宏樟, 等. 黄浦江上游主要树种水源涵养林生态系统碳储量[J]. 生态学杂志, 2012, 31(08): 1930-1935.
- [18] 郭雪艳. 上海城市森林多尺度生态质量评价研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [19] 王哲, 杜宝明, 韩玉洁, 等. 上海外环线带女贞人工林生态系统碳储量研究[J]. 生态学杂志, 2014, 33(04): 910-914.
- [20] 王哲. 黄浦江中上游广玉兰人工林生态系统碳储量特点[J]. 林业世界, 2014, 3(03): 34-41.
- [21] 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(06): 1740-1750.
- [22] 董廷梅. 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]. 浙江: 浙江农林大学, 2013.
- [23] CABON A, KANNENBERG S A, ARAIN A, et al. Cross-Biome Synthesis of Source Versus Sink Limits to Tree Growth[J]. Science, 2022, 376(6594): 758-761.
- [24] KÖRNER C. Paradigm Shift in Plant Growth Control[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2015, 25: 107-114.
- [25] HUSSAIN S, HUSSAIN S, QADIR T, et al. Drought Stress in Plants: An Overview on Implications, Tolerance Mechanisms and Agronomic Mitigation Strategies[J]. Plant Science Today, 2019, 6(04): 389-402.
- [26] WANG Y, CHANG Q, LI X. Promoting Sustainable Carbon Sequestration of Plants in Urban Greenspace by Planting Design: A Case Study in Parks of Beijing[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 64: 127291.
- [27] 刘文萍, 仲亭玉, 宋以宁. 基于无人机图像分析的树木胸径预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 99-104.
- [28] STEPHENSON N L, DAS A J, CONDIT R, et al. Rate of Tree Carbon Accumulation Increases Continuously with Tree Size[J]. Nature, 2014, 507(7490): 90-93.
- [29] DRAKE J E, RAETZ L M, DAVIS S C, et al. Hydraulic Limitation Not Declining Nitrogen Availability Causes the Age-Related Photosynthetic Decline in Loblolly Pine (*Pinus Taeda* L.)[J]. Plant, Cell & Environment, 2010, 33(10): 1756-1766.
- [30] BOBEVA A. Quantifying the Distribution of Forest Functional Types and Forest Leaf Area Index in the Alps[D]. Bayreuth: University of Bayreuth, 2003.