

植物群落特征对城市公园绿地碳汇效能的影响研究

Effects of Plant Community Characteristics on Carbon Sequestration Efficiency in Urban Parks

张 丽 刘子奕 麻欣瑶 卢 山*

ZHANG Li LIU Ziyi MA Xinyao LU Shan*

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

(School of Architectural Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang, China, 310018)

文章编号: 1000-0283(2023)04-0125-10

DOI: 10. 12193 /j. laing. 2023. 04. 0125. 016

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2022-10-03

修回日期: 2023-03-07

摘 要

城市公园绿地作为城市范围内具有固碳作用的主要生态资源, 具有不可或缺的生态价值, 在缓解和应对全球气候变化的过程中发挥着至关重要的作用。为了探究影响城市公园绿地植物群落碳汇效能的关键特征因子, 有效提升城市生态系统的碳汇绩效, 以杭州经济技术开发区的城市公园绿地为研究对象, 共选取 72 个样地, 对植物群落特征因子(落叶树种占比、平均径级、平均冠幅、平均固碳能力和样地密度)与碳汇效能之间的关系进行 Pearson 相关性分析。结果表明:(1)常绿树种与落叶树种对植物群落碳汇效能的贡献能力相当;(2)当径级范围在 10 ~ 20 cm 时, 平均径级对植物群落碳汇效能具有显著正向影响;(3)平均冠幅对植物群落碳汇效能具有显著正向影响;(4)平均固碳能力对植物群落碳汇效能具有显著正向影响, 植物群落中高碳汇树种的比例越高, 碳汇效能越高;(5)群落密度虽然是实现高碳汇效能的基础条件, 对碳汇效能有一定的促进作用, 但具备高密度, 并不一定具备高碳汇效能, 低密度植物群落通过合理配置也能具备高碳汇效能。最后提出了城市公园绿地高碳汇植物群落优化设计策略, 以期为后续城市公园绿地碳汇能力的研究和建设提供参考, 提升城市绿地碳汇对中国 2060 年实现碳中和目标的贡献。

关键词

公园绿地; 植物群落; 碳汇效能; 结构优化设计

Abstract

Urban park green space has indispensable ecological value as a significant environmental resource with carbon sequestration within the city. In addition, it plays a crucial role in mitigating and responding to global climate change. To explore the critical characteristic factors affecting the carbon sequestration efficiency of the urban park green space plant community and effectively improve the carbon sequestration performance of the urban ecosystem, a total of 72 plots were selected from urban park green space in Hangzhou Economic and Technological Development Zone. SPSS software was used to analyze the relationship between plant community distinguishing factors (proportion of deciduous species, mean diameter class, mean crown magnitude, mean carbon sequestration capacity, and plot density) and carbon sequestration efficiency. The results showed that: (1) Evergreen trees and deciduous trees had the same contribution to the carbon sink efficiency of plant communities; (2) When the diameter class range is 10~20 cm, the average diameter class has a significant positive impact on the carbon sink efficiency of plant communities; (3) The average canopy width has a significant positive impact on the carbon sink efficiency of plant communities; (4) The average carbon sequestration capacity has a significant positive impact on the carbon sequestration efficiency of plant communities. The higher the proportion of high carbon sequestration tree species in plant communities, the higher the carbon sequestration efficiency; (5) Although community density is the essential condition for achieving high carbon sequestration efficiency and has a specific role in promoting carbon sequestration efficiency, high density does not necessarily have high carbon sequestration efficiency. Low-density plant communities can also have high carbon sequestration efficiency through reasonable collocation. At the end of the study, the optimization design strategy of plant communities with high carbon sinks in urban park green space was proposed to provide a reference for the subsequent research and construction of carbon sink capacity of urban park green space and improve the contribution of urban green space carbon sink to China's carbon neutral goal in 2060.

Keywords

parkland; plant community; carbon sink efficiency; structural optimization design

张 丽

1996年生/女/浙江温州人/在读硕士研究生/研究方向为园林与景观设计

刘子奕

1996年生/男/山东安丘人/在读硕士研究生/研究方向为计算性城市设计、数字景观

卢 山

1964年生/男/浙江金华人/教授、硕士生导师/研究方向为风景园林规划与设计

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: lushan516@163.com

工业革命以来，人类的各种活动使得大量的CO₂被释放到大气中，打破了生物圈与大气圈之间原有的碳平衡，引发了全球温室效应等严重的环境问题^[1-2]。实现碳中和已经成为国际共识。2020年9月，习近平主席在第七十五届联合国大会上提出了“2030年碳达峰，2060年碳中和”的目标^[3]。

城市是地球上碳排放强度最高的区域，造成了中国70%以上的碳排放，应作为中国未来实现碳达峰、碳中和的主战场^[4]。城市绿地，是城市范围内唯一具有直接增汇、间接减排功能的子系统^[5-7]，是提升城市生态系统碳汇绩效的重要基础。纵观城市绿地碳汇研究现状，主要有三个层面：宏观层面主要以整个城市区域为研究对象，比较不同时期、不同类型城市绿地的碳密度，以及估算整个城市区域的碳储量等^[8-12]；中观层面主要以城市公园为研究对象，比较不同植物群落的固碳能力，分析影响其碳汇能力的特征因子^[13-16]；微观层面主要以单一树种为研究对象，评估不同树种固碳释氧能力的差异^[17-20]。

如何利用有限的城市绿地空间，最大限度地发挥绿地碳汇效益^[21-22]，已成为中国各大城市推动实现碳中和目标的重要课题。传统的生态理论和建设思路大多拘泥于扩大城市绿地规模的粗放型建构，以统筹和管控绿地率、人均绿地面积等为主要手段^[23-24]。然而，一方面受到客观条件的限制，城市绿地规模难以持续不停地扩张，面临绿化增量空间有限、零散、立地条件困难等问题；另一方面，提升城市绿地碳汇能力不应只关注单一的规模指标，应更多强调增“量”提“质”并重的精明型优化^[25]。因此有必要从中观层面的城市公园绿地植物群落着手，针对植物群落特征展开研究，探究影响植物群落碳汇效能的关键特征因子，提出相应且有效的



图1 调研公园位置分布
Fig. 1 Investigate the location and distribution of parks

策略，在设计阶段构建高碳汇的公园植物群落，从而高效提升城市绿地的碳汇效能。

目前针对中观层面城市公园绿地固碳能力的研究尚在起步阶段，仅有少量文献。其中部分学者对比了不同类型植物群落的碳密度，郭欢欢等^[13]在郑州市公园绿地碳密度的研究中提到城市公园中常绿针叶林的平均碳密度最大，落叶阔叶林的平均碳密度最小；顾韩等^[15]对哈尔滨丁香公园4种典型人工绿地群落碳密度的研究表明落叶松林 (*Larix gmelinii*) 群落植被碳密度最大，白桦林 (*Betula platyphylla*) 群落次之，草地群落最低；罗玉兰^[16]以上海世博公园为例探讨了不同群落类型、结构及其组成树种的碳汇能力，并深入地研究了不同树种组成对群落碳储量的影响，但关于不同群落结构对碳密度的影响则未详细展开。

综上所述，文章以杭州经济技术开发区的城市公园绿地为研究对象，共选取72个植物群落，利用SPSS软件分析植物群落的特征因子和碳汇效能之间的关系，深入探讨影响植物群落碳汇能力的关键特征因子，

最后提出城市公园绿地高碳汇植物群落优化设计策略，以期提升城市绿地碳汇能力提供深化研究思路，助力中国实现2060年碳中和目标。

1 研究方法

1.1 调研内容

1.1.1 调研对象

杭州市 (118° 21'—120° 30' E, 29° 11'—30° 33' N) 位于长江三角洲南沿，处于亚热带季风区。经济技术开发区位于杭州市东部平原，地势低平，河网密布。为使调研结果更具全面性和代表性，本研究选取杭州经济技术开发区范围内交通便利的所有城市公园，共6个，即钱塘生态公园、金沙湖公园、高教西区公园、生态湿地公园、松下友好公园和围垦文化公园 (图1，表1)，这些公园建成于不同时期、坐落于不同方位。为提高群落类型多样性，确保样地类型的均衡，避免重复性工作，从而更深入地开展研究工作，本研究在实地调研前规划了拟调研的样地类型 (表2)，具体径级和密度等级的划分标准由

实际调研情况决定。在对各个城市公园植物群落进行实地踏勘的基础上，每种类型的样地皆采用随机的方式重复选取9个。

1.1.2 调研指标

(1) 自变量指标选取。根据研究目的，结合实际调研过程中的可操作性和便捷程度，本研究拟选择落叶树种占比、平均径级、平均冠幅、平均固碳能力和样地密度5个突出且可量化的群落特征因子作为自变量。其中，落叶树种占比即样地内落叶树种数量占植株总量的比例；平均径级即样地内树种的平均规格；平均冠幅反映了植被枝叶的生长状况和绿量；平均固碳能力即样地内各树种单位叶面积固碳速率的平均值，样地内高固碳树种比例越高，平均固碳能力越高；样地密度即样地内树种总量与样地面积的比值，反映了植被栽植的疏密程度。

(2) 因变量指标选取。本研究选取植物碳汇量作为因变量碳汇效能的量化指标。植物碳汇量，即单位时间内单位土地面积上的植被从大气中吸收并储存的碳的物质质量，时间尺度多采用秒(s)、日(d)、年(a)，可以反映城市绿地的碳汇效能^[26]。植物随着时间的变化而表现出与外界环境因子相适应的固定的形态和生理变化规律，其最短周期为一年。因此，本研究选取植物群落的年碳汇量(kg·m²·a⁻¹)作为因变量指标来衡量各样地的碳汇效能。

1.2 实地调研

由于群落资源有限，无法承载高密度且大径级植物群落的正常生长，实际调研中缺乏此类样地。因此，本研究最终共选取72块生长状况良好、群落特征多样且植被有代表性的样地，面积均为15 m×15 m(表3)，不同

表1 调研公园信息
Tab. 1 Research park information

序号 Num.	公园名称 Park name	建成时间 Completion time	公园面积/hm ² Park area
1	钱塘生态公园	2019年	14.8
2	金沙湖公园	2012年	13.2
3	高教西区公园	2009年	18.1
4	生态湿地公园	2005年	12.4
5	松下友好公园	2014年	9.5
6	围垦文化公园	2009年	12.1

表2 拟调查样地规划
Tab. 2 Planning of sample plots to be investigated

密度等级 Density grade	径级结构 Diameter class structure	样地数量/个 Number of sample plots	合计 Total
低密度	小径级	9	81
	中径级	9	
	大径级	9	
中密度	小径级	9	
	中径级	9	
	大径级	9	
高密度	小径级	9	
	中径级	9	
	大径级	9	

表3 各样地分布和群落类型汇总表
Tab. 3 Summary of distribution and community types

序号 Num.	公园名称 Park name	样地数量/个 Number of sample plots								合计 Total
		低密度			中密度			高密度		
		小径级	中径级	大径级	小径级	中径级	大径级	小径级	中径级	
1	钱塘生态公园	4	0	0	4	1	0	3	0	12
2	金沙湖公园	2	0	1	2	0	0	1	0	6
3	高教西区公园	0	2	4	1	3	4	1	2	17
4	生态湿地公园	1	3	1	0	0	2	2	2	11
5	松下友好公园	1	1	3	0	1	3	1	1	11
6	围垦文化公园	1	3	0	2	4	0	1	4	15
合计		9	9	9	9	9	9	9	9	72

径级和密度等级的划分如表4所示。实地勘测和信息收集于2022年3-5月完成，其中样地信息包括样地中调查树种的名称、胸径、冠幅和树高。由于片状灌木和草本地被本身的固碳量较少，和乔木相比可忽略不计，因

此本研究调查的树种为乔木和孤植大灌木。树种胸径的测量采用规格为2 m×10 mm的测树钢围尺，冠幅的测量采用规格为5 m×19 mm的钢卷尺，树高的测量采用型号为SRC-1/30的哈光林业测高仪。

表4 植物群落径级和密度等级的划分
Tab. 4 Classification of diameter class and density class of plant community

径级 Diameter Class	范围/cm Range	密度等级 Density grade	范围/(株·hm ²) Range
小径级	7.29~11.48	低密度	133.33~266.67
中径级	14.07~18.89	中密度	400.00~533.33
大径级	21.30~31.87	高密度	622.22~755.56

1.3 计算方法

1.3.1 碳汇效能计算

植被碳汇量的估算同时结合多位学者的方法，首先采用同化量法计算出单株树种的年碳汇量^[27-29]，再将样地内所有调研植被的年碳汇量相加^[16]，进而得到植物群落年碳汇量，见公式(1)：

$$C = \sum_{i=1}^j (y \times c \times t / s) \quad (1)$$

式中：*C*为植物群落年碳汇量(kg·m²·a⁻¹)；*y*为第*i*株植物总叶面积(m²)；*c*为第*i*株植物单位叶面积日碳汇量(kg·m²·d⁻¹)；*t*为第*i*株植物年有效光合天数(d)；*s*为样地面积(m²)。

1.3.2 基础数据来源

(1) 单株植物总叶面积。单株植物总叶面积(*y*)的计算采用Nowak等^[29]提出的城市树木叶面积回归模型，见公式(2)：

$y = \exp(0.2942H + 0.7321D - 0.0148S + 5.7217Sh - 4.3309) + 0.1159 \quad (2)$

式中：*y*为总叶面积(m²)；*H*为树冠高度

(m)；*D*为树冠直径(m)；*S*=π*D*(*D*+*H*)/2；*Sh*为遮阴系数，即某一植物树冠垂直投影面积中阴影部分所占比例，本文采用朱文泉等^[30]的研究中各树种组合后的平均值0.83。

(2) 单株植物单位叶面积日碳汇量。单株植物单位叶面积日碳汇量的数据取自董延梅等^[31]测定的杭州市公园内57种常用园林树木的单位叶面积固碳速率。如计算时缺少对应的树种数据，则选择同科属或相似树种进行替换。

(3) 单株植物年有效光合天数。年有效光合天数需要结合降雨日数和季节规律^[32]。降雨日数对植物光合作用具有一定的影响。当日降雨量高于5 mm时，空气中的水分达到饱和状态，植物叶片细胞吸水导致膨胀，叶片上的气孔关闭，最终光合作用停止或极其微弱。因此，在计算年有效光合天数时，有必要减去一年中日降雨量超过5 mm的天数。结合中国气象数据网2010-2020年杭州市降水数据，绿色植物进行有效光合作用的平均天

数为春季72 d，夏季67.3 d，秋季76.4 d，冬季72.5 d。季节规律对落叶植物的光合作用也有一定的影响。冬季由于落叶植物叶片变色脱落，光合作用完全停止，因此落叶植物的有效光合天数也应扣除冬季落叶期的天数。

综上所述，常绿树种的年有效光合天数为288.2 d，落叶树种的年有效光合天数为215.6 d。

1.4 数据分析

对各类型样地群落特征指标(表5)进行统计分析后，利用SPSS软件对各类型植物群落的因变量碳汇效能与自变量群落特征之间的关系进行Pearson相关性分析和散点图绘制。

2 结果与分析

2.1 各类型植物群落碳汇效能

从图2可以看出，总植物群落的年碳汇量均值为6.69 kg·m²·a⁻¹，与其他研究^[8-11]相比数据偏高。这可能是本研究调研区域植被生长旺盛、碳汇计算方式不同或人为选取样地差异等原因造成的。不同径级植物群落的平均碳汇效能由低到高依次为：小径级植物群落<中径级植物群落<大径级植物群落，这说明径级结构对植物群落碳汇效能的影响

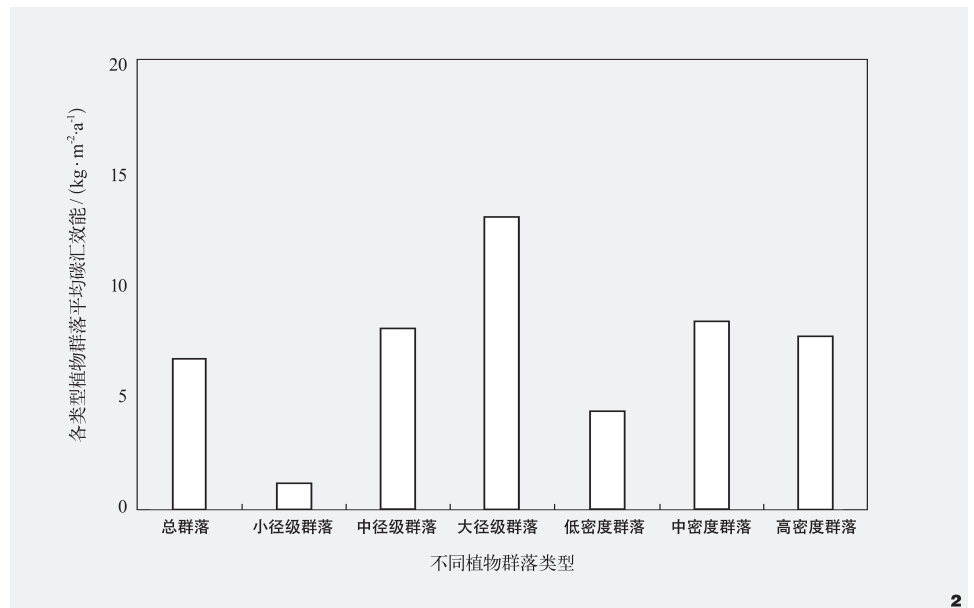
表5 不同类型样地的植物群落特征
Tab. 5 Plant community characteristics of different types of sample plots

样地类型 Sample plot type	落叶树种占比/% Deciduous tree's proportion	平均径级/cm Average diameter class	平均冠幅/m Average crown width	平均固碳能力/(g·m ⁻² ·d ⁻¹) Average carbon fixation capacity	样地密度/(株·hm ²) Sample plot density
总植物群落	0.51±0.39	16.33±6.67	4.03±1.59	6.01±1.78	425.31±197.47
小径级植物群落	0.52±0.39	9.70±1.04	2.44±0.35	4.94±1.15	460.91±200.34
中径级植物群落	0.50±0.40	16.42±1.43	4.25±0.79	6.36±1.73	460.91±203.35
大径级植物群落	0.53±0.40	26.14±3.01	6.09±0.92	7.07±1.86	318.52±148.78
低密度植物群落	0.51±0.41	18.50±7.58	4.56±1.82	6.16±2.16	202.47±33.38
中密度植物群落	0.52±0.38	16.52±6.31	3.99±1.49	6.05±1.64	470.78±37.51
高密度植物群落	0.52±0.41	12.79±3.99	3.28±1.05	5.72±1.38	691.36±43.71

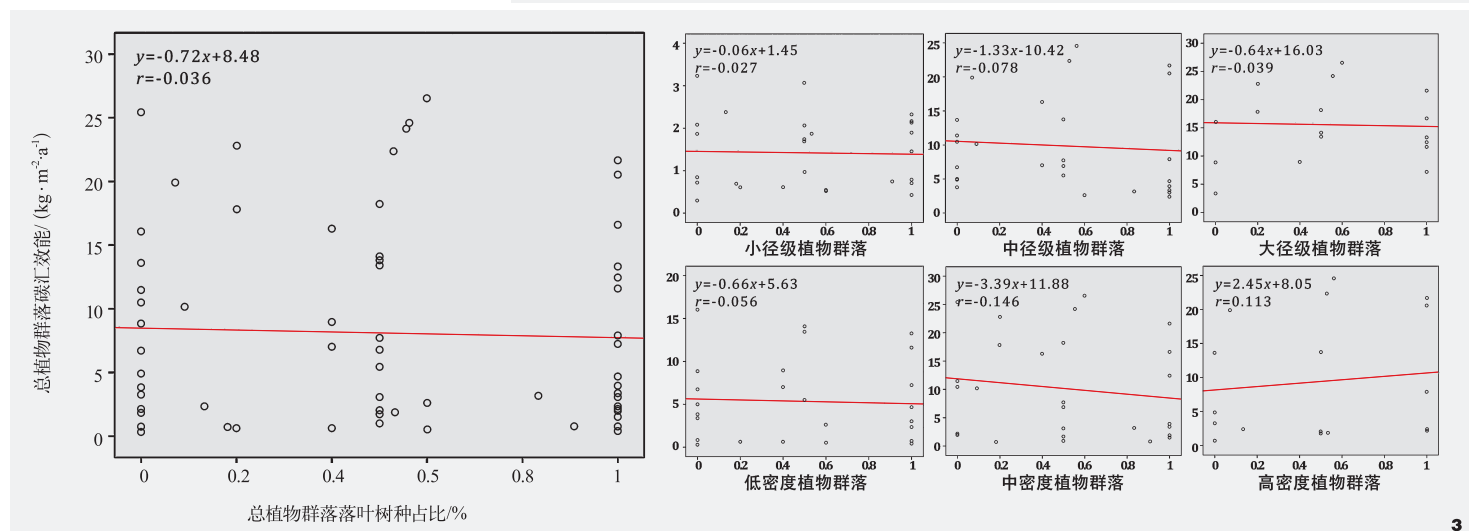
在一定程度上是正向积极的。不同密度等级植物群落的平均碳汇效能由低到高依次为：低密度植物群落<高密度植物群落<中密度植物群落，难以直接推断样地密度对植物群落碳汇效能的影响。

2.2 植物群落特征与碳汇效能之间的相关性分析

以公园植物群落特征因子(落叶树种占比、平均径级、平均冠幅、平均固碳能力和样地密度)为自变量,以总植物群落、小径级植物群落、中径级植物群落、大径级植物群落、低密度植物群落、中密度植物群落和高密度植



2



3

图2 不同类型植物群落年碳汇量

Fig. 2 Annual carbon sequestration of different types of plant communities

图3 不同类型植物群落碳汇效能和落叶占比的关系

Fig. 3 Relationship between carbon sink efficiency of different types of plant communities and the proportion of fallen leaves

物群落的碳汇效能为因变量,进行Pearson相关性分析(表6)和散点图绘制。表6中Pearson相关系数是一种线性相关系数,用 r 反映两个符合正态分布的连续变量之间线性相关的程度。一般认为, $|r| \geq 0.8$ 为极强相关, $0.8 > |r| \geq 0.6$ 为强相关, $0.6 > |r| \geq 0.4$ 为中度相关, $0.4 > |r| \geq 0.2$ 为弱相关, $|r| < 0.2$ 为基本不相关。

2.2.1 落叶树种占比与碳汇效能的相关性分析

对不同类型植物群落的落叶树种占比和碳汇效能进行Pearson相关性分析(表6)和散点图绘制(图3)可知(图中 y 为因变量植物群落碳汇效能, r 为Pearson相关系数),所有类型植物群落的落叶树种占比与碳汇效能的相关性系数均低于0.2。该结果说明:样地

中落叶树种占比对植物群落碳汇效能没有影响,即常绿与落叶树种对植物群落碳汇效能的贡献能力相当。董延梅等^[33]研究了杭州西湖风景区园林绿化树种的固碳释氧能力,认为常绿树种>落叶树种;郭晖等^[19]研究了郑州市常见乡土绿化树种的固碳释氧能力,认为落叶树种>常绿树种。这些研究结果皆与

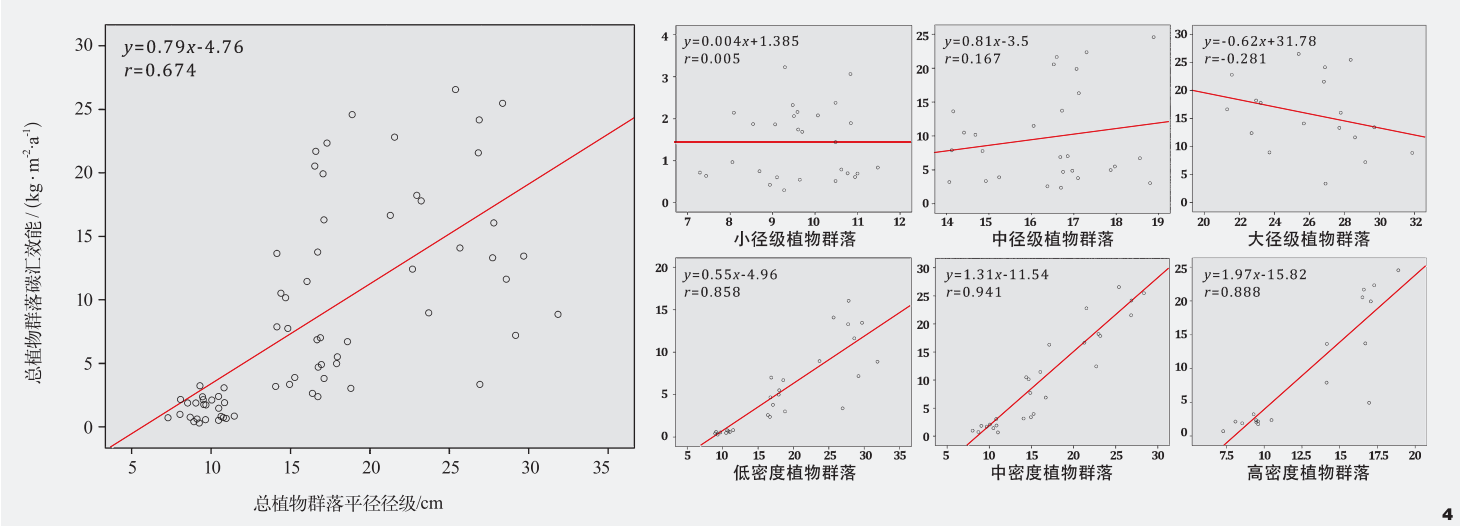


图4 不同类型植物群落碳汇效能和平均径级的关系
Fig. 4 Relationship between carbon sink efficiency and average diameter class of different types of plant communities

表6 不同类型样地碳汇效能与植物群落特征相关系数
Tab. 6 correlation coefficients between carbon sink efficiency and plant community characteristics in different types of sample plots

样地类型 Sample plot type	落叶树种占比 Deciduous tree's proportion	平均径级 Average diameter class	平均冠幅 Average crown width	平均固碳能力 Average carbon fixation capacity	样地密度 Sample plot density
总植物群落	-0.036	0.674**	0.661**	0.54**	0.193
小径级植物群落	-0.027	0.005	0.453*	0.475*	0.766**
中径级植物群落	-0.078	0.167	0.259	0.394*	0.684**
大径级植物群落	-0.039	-0.281	-0.352	0.211	0.728**
低密度植物群落	-0.056	0.858**	0.905**	0.708**	-0.404*
中密度植物群落	-0.146	0.941**	0.85**	0.551**	-0.286
高密度植物群落	0.113	0.888**	0.902**	0.707**	0.003

注：**为0.01水平的显著性，表示极显著；*为0.05水平的显著性，表示显著。

本研究不一致，原因可能是研究内容的不同导致了研究结果的不同。董延梅等和郭晖等的研究内容为常绿树种和落叶树种之间碳汇效能的对比，而本文研究内容为常绿树种或落叶树种对整个群落碳汇效能的影响。

2.2.2 平均径级与碳汇效能的相关性分析

对不同类型植物群落的平均径级和碳汇效能进行Pearson相关性分析（表6）和散点图绘制（图4）可知，平均径级与总植物群

落碳汇效能的相关性系数为0.674，在0.01水平上显著相关；与低、中、高密度植物群落碳汇效能的相关性系数分别为0.858、0.941和0.888，在0.01水平上显著相关。该结果说明：一般情况下，平均径级对植物群落碳汇效能具有显著正向影响，平均径级越大，植物群落的碳汇效能越高。然而径级不能无限制地增加，赵艳玲^[34]和徐飞等^[35]的研究都指出平均径级从10 ~ 20 cm增长至30 ~ 40 cm的过程中，植物群落碳汇效能明

显下降。本研究所选样方的平均径级多分布在10 ~ 20 cm，正处于碳汇能力强的幼龄阶段，因此平均径级对其碳汇效能仅呈现显著的正向影响。

2.2.3 平均冠幅与碳汇效能的相关性分析

对不同类型植物群落的平均冠幅和碳汇效能进行Pearson相关性分析（表6）和散点图绘制（图5）可知，平均冠幅与总植物群落碳汇效能的相关性系数为0.661，在0.01水平

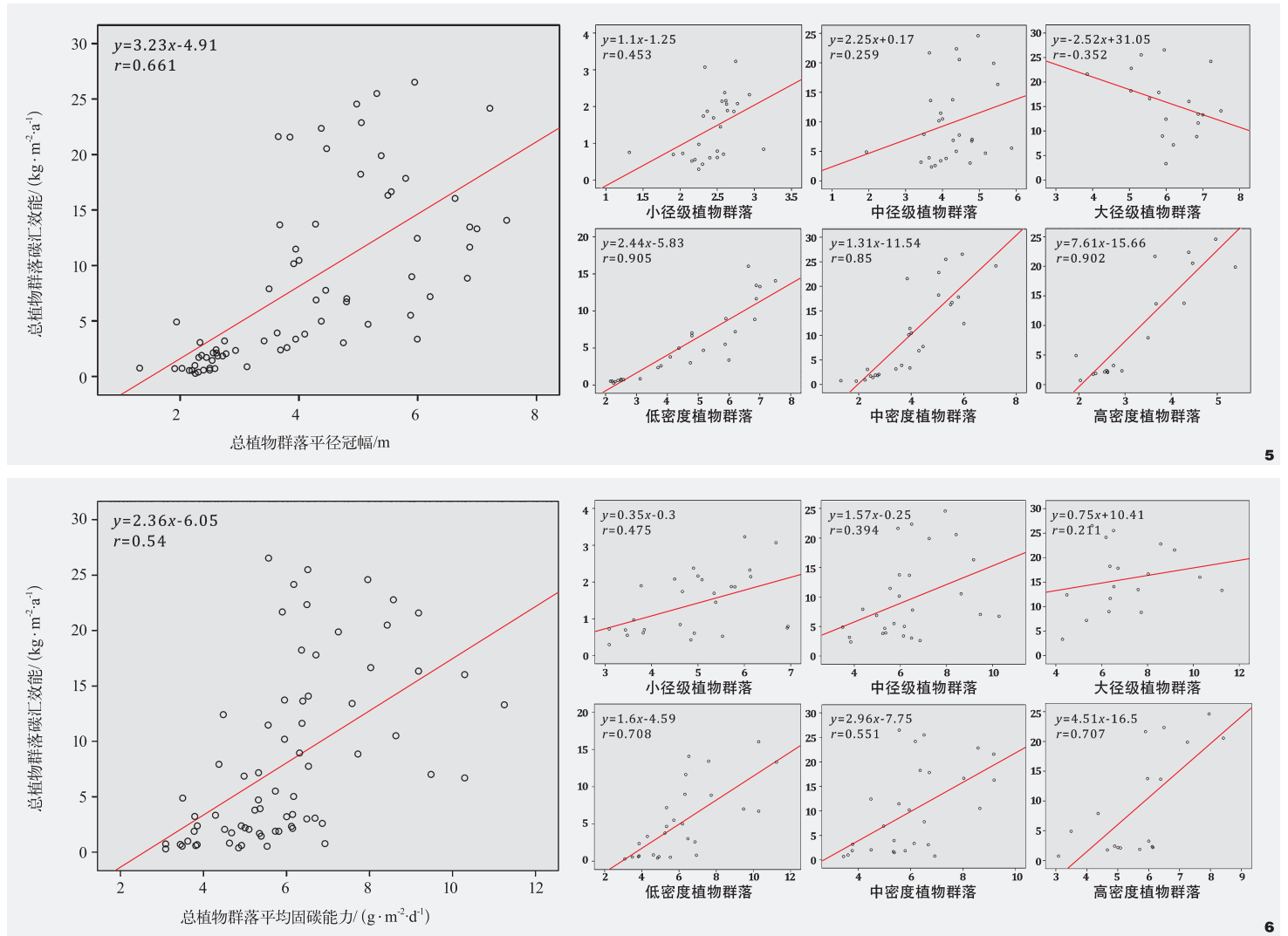


图5 不同类型植物群落碳汇效能和平均冠幅的关系

Fig. 5 Relationship between carbon sink efficiency and average crown width of different types of plant communities

图6 不同类型植物群落碳汇效能和平均固碳能力的关系

Fig. 6 Relationship between carbon sink efficiency and average carbon sequestration capacity of different types of plant communities

上显著相关；与低、中、高密度植物群落碳汇效能的相关性系数分别为0.905、0.850和0.902，在0.01水平上显著相关。该结果说明：平均冠幅对植物群落碳汇效能具有显著正向影响，平均冠幅越大，植物群落的碳汇效能越高。平均冠幅在一定程度上反映了三维绿量，而较高的三维绿量是植物碳汇能力的基本保障^[11]。

2.2.4 平均固碳能力与碳汇效能的相关性分析

对不同类型植物群落的平均固碳能力和碳汇效能进行Pearson相关性分析（表6）和散点图绘制（图6）可知，平均固碳能力与总植物群落碳汇效能的相关性系数为0.540，在0.01水平上显著相关；与低、中、高密度植物群落碳汇效能的相关性系数分别为0.708、0.551和0.707，在0.01水平上显著相关。

该结果说明：平均固碳能力对植物群落碳汇效能具有显著的正向影响，植物群落中高碳汇树种的比例越高，碳汇效能越高。不同树种固碳能力的差异较大，而同一树种在不同地区的固碳能力也有所不同，因此不同地区的高碳汇树种应根据具体地域情况决定。王丽勉等^[36]对上海151个树种固碳释氧能力进行研究，结果表明垂柳 (*Salix babylonica*) 固碳

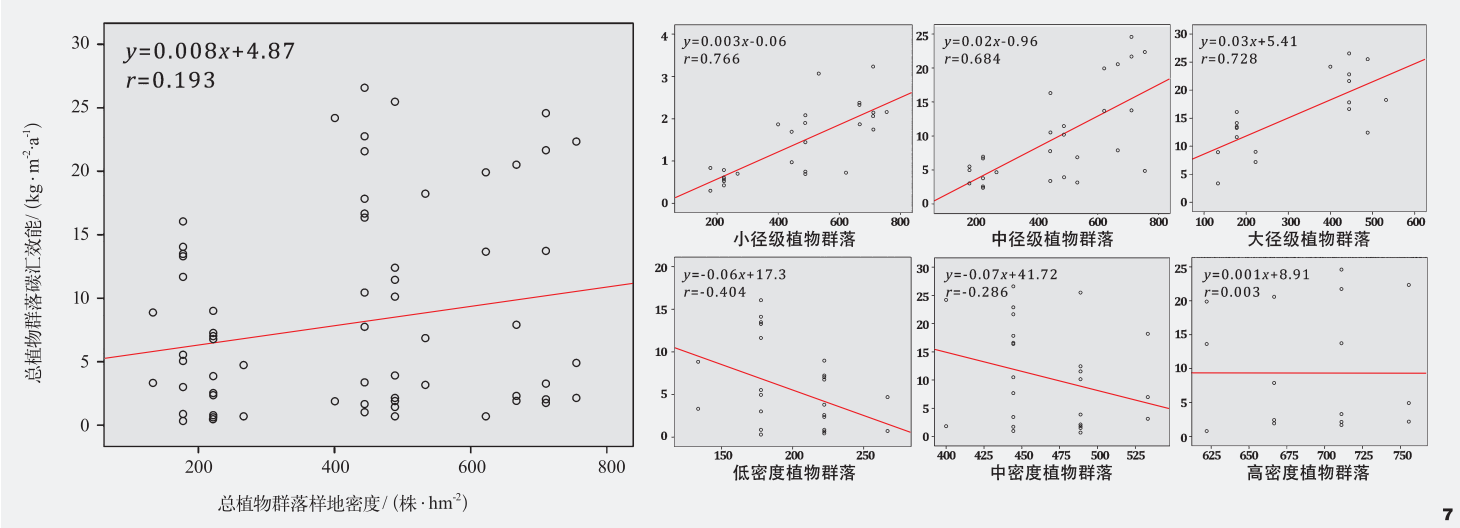


图7 不同类型植物群落碳汇效能和样地密度的关系
Fig. 7 Relationship between carbon sink efficiency of different types of plant communities and plot density

能力最强；王忠君等^[37]测定了福州植物园28种主要绿化植物，认为苏铁(*Cycas revoluta*)、异叶南洋杉(*Araucaria heterophylla*)、榕树(*Ficus microcarpa*)的固碳能力较强。本研究碳汇计算所选取的基础数据来源于董延梅^[31]对杭州57种园林树木碳汇效能的研究，结果表明碳汇能力较高的树种有黄山栎树(*Koelreuteria bipinnata*)、乌桕(*Sapium sebiferum*)和广玉兰(*Magnolia Grandiflora*)等。

2.2.5 样地密度与碳汇效能的相关性分析

对不同类型植物群落的样地密度和碳汇效能进行Pearson相关性分析(表6)和散点图绘制(图7)可知，样地密度与总植物群落碳汇效能的相关性系数低于0.200；与小、中、大径级植物群落碳汇效能的相关性系数分别为0.766、0.684和0.728，在0.01水平上显著相关。总体来看，样地密度对植物群落碳汇效能的影响不太明显；而对径级进行控制变量后，同一径级植物群落的碳汇效能则受到样地密度显著的正向影响。这说明，群落密度

虽然是实现高碳汇效能的基础条件，对碳汇效能有一定的促进作用，但具备高密度，并不一定具备高碳汇效能，其更容易被其他因素影响，例如平均径级，本研究样地中不乏大量高密度小径级植物群落的碳汇效能远低于低密度大径级植物群落的情况。

2.3 讨论

落叶树种在植物群落中的占比对植物群落碳汇效能没有影响，即常绿与落叶树种对群落碳汇效能的贡献能力相当；当径级范围在10~20 cm，平均径级对植物群落碳汇效能具有显著正向影响，平均径级越大，植物群落碳汇效能越高；平均冠幅对植物群落碳汇效能具有显著正向影响，平均冠幅越大，植物群落的碳汇效能越高；平均固碳能力对植物群落碳汇效能具有显著的正向影响，植物群落中高碳汇树种的比例越高，碳汇效能越高；群落密度虽然是实现高碳汇效能的基础条件，对碳汇效能具有一定的促进作用，但具备高密度，并不一定具备高碳汇效能，

低密度植物群落通过合理配置也能具备高碳汇效能。

3 城市公园绿地高碳汇植物群落优化设计策略

3.1 依据景观功能需求选择常绿或落叶树种

常绿树种和落叶树种对植物群落碳汇效能的贡献相当。因此在建设以高碳汇为目标的植物群落时，可减少对照常绿树种与落叶树种固碳量的利弊权衡，根据绿地或场地自身的功能需求，适当调配群落中常绿和落叶树种的比例。例如，对于阻挡道路灰尘和噪音干扰的绿地，可以选择分枝点低的常绿树种；对于冬季有阳光需求的广场绿地，可以选择高大的落叶树种；对于兼顾四季景观的装饰性绿地，可以选择常绿和落叶树种的混交等。

3.2 合理选择树种规格，适当增加幼龄树比例

平均径级对提升植物群落碳汇效能具有积极的正向促进作用。当径级范围在

10 ~ 20 cm时, 群落碳汇效能随着径级的扩大而提升; 当径级从10 ~ 20 cm增长至30 ~ 40 cm的过程中, 群落碳汇能力开始下降。同时, “大树”的移植会对树木的原产地生态产生重大影响^[9], 且在移植过程中及移植后成活率较低, 经济损失风险大。因此在实际建设过程中, 不应为了迅速成景而盲目地选择大量的大规格树种, 应从长远综合考虑, 尽可能多地选择10 ~ 20 cm的中低龄树种; 在径级为30 cm以上的低密度群落中, 可适量补植低龄树种, 做好梯队建设, 有助于营建可持续的高碳汇植物群落。

3.3 提升群落绿量, 做好后期管理养护

平均冠幅对植物群落碳汇效能具有显著的正向影响。平均冠幅一定程度上代表了群落的绿量^[38]。因此增加绿量有助于提高植物群落的碳汇效能。一方面可以选择伞形开阔且枝叶饱满的树种, 比如杭州地区可选择黄山栎树、广玉兰和香樟 (*Cinnamomum camphora*) 等树种; 另一方面也可在林下配置观赏性好、适应性强、繁育简单、低维护成本的耐阴地被, 以弥补下层空隙过大的不足^[8]。最后, 更应该做好完善的养护管理措施, 避免出现枝叶稀疏发黄等生长不良的情况。

3.4 选择固碳能力高的植被种类, 乡土树种优先

不同树种的碳汇能力差异较大, 相同树种在不同区域的碳汇能力也有所不同。因此, 应根据当地气候和环境条件, 查阅当地植被碳汇能力相关的文献资料, 选择固碳能力较强的乡土树种。这样不仅能够让树种在短时间内适应场地的气候和环境, 同时减少了施工建设阶段长途运输过程中产生的碳排放。以杭州为例, 结合董延梅^[31]和

施健健等^[39]的研究, 可知杭州地区碳汇能力较强的树种有悬铃木 (*Platanus hispanica*)、枫杨 (*Pterocarya stenoptera*)、麻栎 (*Quercus acutissima*)、连香树 (*Cercidiphyllum japonicum*)、香樟、合欢 (*Albizia julibrissin*)、构树 (*Broussonetia papyrifera*)、广玉兰和垂柳等。

3.5 科学调整密度, 构建功能适宜的群落

关于构建高密度高碳汇植物群落, 可采用近自然复层异龄混交结构, 提高群落复杂程度, 使各类植物相互依存形成共生的稳定群落, 从而有效提升整体碳汇效能。该配置能够丰富景观层次, 有效隔绝空间, 可用于植物景观节点、私密场所或防护边界等空间。关于构建低密度高碳汇植物群落, 可配置低密度的高大乔木层或具备成为高大乔木潜力的树木幼苗。该配置能够形成视线通透的林下空间, 增强场所的开放感, 可用于疏林草地、露天广场或游步道两侧等空间。在城市公园绿地植物群落的设计过程中结合这两种配置模式, 营造一种旷奥兼备的公园植物景观, 使其疏可走马, 密不透风。

4 总结与展望

城市绿地碳汇研究正迎来快速发展的阶段, 这将是一个机遇与挑战并存的时代。本研究以杭州经济技术开发区的城市公园绿地为例, 深入探讨了植物群落不同特征因子与碳汇效能之间的关系, 并提出了城市公园绿地高碳汇植物群落优化设计策略。值得注意的是, 本研究存在一定局限性: (1) 研究仅选取了2022年3-5月的实地调研信息, 而植物群落的生长数据和特征因子是随着季度不停地变化, 后续将在不同季节开展调研, 以获取更加客观的研究结果; (2) 计算方法中植被固碳速率的数据来源于前人文献, 与实

际值存在一定误差, 未来研究中将会探索更为精准的碳汇数据; (3) 除了本文所考虑的自变量因子, 还存在大量影响群落碳汇效能的特征指标如群落层次等, 有待进行更深入全面的研究。

注: 文中所有图片和表格均由作者绘制, 其中图1底图来自百度卫星地图 (map.baidu.com/@13401402,3525990,14.21z/matype%3DB_EARTH_MAP)。

参考文献

- [1] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(04): 534-574.
- [2] 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.
- [3] 李春慧, 胡林, 王晓宁, 等. 基于“双碳”目标的城乡规划策略[J]. 规划师, 2022, 38(01): 12-16.
- [4] 冯长春, 赵燕芳, 王富海, 等. 面向碳中和的规划响应[J]. 城市规划, 2022, 46(02): 25-31.
- [5] SHAO W W, LIU J H, YANG Z X, et al. Carbon Reduction Effects of Sponge City Construction: A Case Study of the City of Xiamen[J]. Energy Procedia, 2018, 152: 1145-1151.
- [6] LIU J, ZHANG L, ZHANG Q P, et al. Predicting the Surface Urban Heat Island Intensity of Future Urban Green Space Development Using a Multi-scenario Simulation[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 66: 102698.
- [7] 尹沛卓, 李端杰. 基于碳汇理念的城市绿地布局优化——以日照市主城区为例[C]//中国风景园林学会2018年论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 389-394.
- [8] 张青云, 吕伟姪, 徐炳乾. 华北地区城市绿地固碳能力测算研究[J]. 环境保护科学, 2021, 47(01): 41-48.
- [9] 汤煜, 石铁矛, 卜英杰, 等. 城市绿地碳储量估算及空间分布特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(04): 1387-1398.
- [10] 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(03): 117-121.

- [11] 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(08): 18-24.
- [12] 石铁矛, 李沛颖, 汤煜. 碳中和背景下城市碳汇功能及提升策略——以沈阳核心区为例[J]. 中国园林, 2022, 38(03): 78-83.
- [13] 郭欢欢, 侯少沛, 赵建霞, 等. 城市园林绿地不同群落类型碳储量研究——以郑州市公园绿地为例[J]. 河南科学, 2019, 37(09): 1431-1437.
- [14] 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.
- [15] 顾韩, 施芋宇, 刁洁, 等. 哈尔滨丁香公园4种典型人工绿地群落碳密度研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(06): 1417-1424.
- [16] 罗玉兰, 张冬梅, 张浪, 等. 基于“双碳”目标的城市绿化树种筛选及配置研究——以上海世博公园为例[J]. 园林, 2022, 39(01): 25-32.
- [17] 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.
- [18] 王忠君. 福州植物园绿量与固碳释氧效益研究[J]. 中国园林, 2010, 26(12): 1-6.
- [19] 郭晖, 周慧, 张家洋. 郑州市15种常见园林树种固碳释氧能力分析研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(04): 52-56.
- [20] 徐亚如, 戴菲, 殷利华. 武汉园博园碳汇效能综合研究[J]. 中国城市林业, 2019, 17(01): 33-36.
- [21] PEI N C, WANG C, SUN R L, et al. Towards an Integrated Research Approach for Urban Forestry: The Case of China[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2019, 46: 126472.
- [22] STROHBACH M W, ARNOLD E, HAASE D. The Carbon Footprint of Urban Green Space: A Life Cycle Approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 104(2): 220-229.
- [23] 王永华, 高含笑. 城市绿地碳汇研究进展[J]. 湖北林业科技, 2020, 49(04): 69-76.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 于贵瑞, 王秋凤, 刘迎春, 等. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础[J]. 地理科学进展, 2011, 30(07): 771-787.
- [27] 韩焕金. 城市绿化植物的固碳释氧效应[J]. 东北林业大学学报, 2005, 33(5): 68-70.
- [28] 张婉茹. 基于碳汇功能的植物群落优化研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
- [29] NOWAK D J, STEVENS J C, SISINNI S M. Effects of Urban Tree Management and Species Selection on Atmospheric Carbon Dioxide[J]. Journal of Arboriculture, 2002, 28(3): 113-122.
- [30] 朱文泉, 何兴元, 陈玮, 等. 城市森林结构的量化研究——以沈阳树木园森林群落为例[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2090-2094.
- [31] 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.
- [32] 陈自新, 苏雪痕, 刘少宗, 等. 北京城市园林绿化生态效益的研究(3)[J]. 中国园林, 1998(03): 51-54.
- [33] 董延梅, 章银柯, 郭超, 等. 杭州西湖风景名胜区10种园林树种固碳释氧效益研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(04): 209-212.
- [34] 赵艳玲. 上海社区绿地植物群落固碳效益分析及高固碳植物群落优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [35] 徐飞, 刘为华, 任文玲, 等. 上海城市森林群落结构对固碳能力的影响[J]. 生态学报, 2010, 29(03): 439-447.
- [36] 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(03): 399-401.
- [37] 王忠君. 福州植物园绿量与固碳释氧效益研究[J]. 中国园林, 2010, 26(12): 1-6.
- [38] 刘金坤. 沈阳浑河绿道植物群落分析及绿量研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [39] 施健健, 蔡建国, 刘朋朋, 等. 杭州花港观鱼公园森林固碳效益评估[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(05): 829-835.