

# 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

## Study on Selection and Collocation of Urban Greening Tree Species under Dual Carbon Goal—A Case Study of Shanghai Expo Park

罗玉兰 张冬梅 张浪\* 陈香波  
LUO Yulan ZHANG Dongmei ZHANG Lang\* CHEN Xiangbo

(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)

(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)

文章编号: 1000-0283(2022)01-0025-08  
DOI: 10.12193/j.laing.2022.01.0025.004  
中图分类号: TU986  
文献标志码: A  
收稿日期: 2021-11-11  
修回日期: 2021-12-01

### 摘要

城市绿地系统是城市内唯一的自然碳汇,对大气中CO<sub>2</sub>浓度的变化起到了不可忽视的作用。以上海世博公园为例,探讨不同群落类型、结构及其组成树种的碳汇能力,分析影响群落碳储量的关键因子。结果表明:调查样地内乔木17科27属30种,灌木和藤本植物28科51属62种,地被草本植物9种;2017年、2018年的总碳储量和平均碳密度分别为388.91 t、80.53 t/hm<sup>2</sup>和399.82 t、94.08 t/hm<sup>2</sup>,公园内树种较丰富,碳储量逐年增加。以阔叶林或针叶阔叶林为主的乔木层与灌木层复层配置,阔叶树种与针叶树种混合配置,增加群落的固碳作用。单株碳储量依次为香樟(654.35±84.13 kg)、黄连木(631.47±52.53 kg)、榔榆(538.47±40.35 kg)、重阳木(435.50±62.25 kg)、榉树(386.76±36.83 kg);以香樟(25号、48号)为主要建群种的群落碳密度最高,香樟纯林、香樟+榔榆+枫杨、香樟+朴树+乌桕、香樟+榔榆的碳密度年增量较大。与群落配置相关的6个因子对群落碳密度贡献率从大到小依次为:乔木层树龄(31.44%)、种植密度(25.66%)、乔木层种类(11.95%)、配置结构(10.52%)、物种丰富度(10.50%)、立地类型(9.92%)。城市绿化中的植物群落配置应从树种、群落密度、群落结构等方面综合考虑,提升城市绿地碳汇效益和能力。

### 关键词

城市绿化; 优良固碳树种; 群落配置; 碳汇能力

### Abstract

The urban green space system is the only natural carbon sink in the city and plays an important role in the change of CO<sub>2</sub> concentration. Through a case study of Shanghai Expo Park, the carbon sink capacity of different community types, structures and components were discussed, and the key factors affecting community carbon storage were analyzed. The results showed that there were 30 species of trees belonging to 27 genera and 17 families, 62 species of shrubs and vines belonging to 51 genera and 28 families, and 9 species of herb. The total carbon storage and average carbon density were 388.91 t, 80.53 t/hm<sup>2</sup> (2017) and 399.82 t, 94.08 t/hm<sup>2</sup> (2018). The tree species of Shanghai Expo Park were rich and the carbon storage increased. The carbon sink capacity of the community was increased in the mixed configuration of broad-leaved or coniferous-broad-leaved tree layer and shrub layer, broadleaf species, and coniferous species. Fine tree species for carbon sinking included *Cinnamomum camphora* (654.35±84.13kg), *Pistacia chinensis* (631.47±52.53kg), *Ulmus parvifolia* (538.47±40.35 kg), *Bischofia polycarpa* (435.50±62.25 kg), *Zelkova schneideriana* (386.76±36.83 kg). The community

### 罗玉兰

1975年生/女/上海人/硕士/教授级高级工程师/研究方向为园林植物遗传育种、栽培及应用

### 张冬梅

1970年生/女/河南周口人/博士/教授级高级工程师/上海领军人才/研究方向为城市绿化适生树种选育

### 张浪

1964年生/男/安徽人/博士/教授级高级工程师, 博士生导师/上海领军人才、享受国务院特殊津贴专家/研究方向为生态园林规划设计与技术研究/本刊主编

\*通信作者 (Author for correspondence)  
E-mail: zl@shsyky.com

### 基金项目:

国家自然科学基金“城市生态廊道多尺度结构与功能连接度的关联机制”(编号: 32171569); 上海市科委科技创新行动计划课题“上海‘四化’生态网络空间综合评价与质量提升关键技术研究及集成示范”(编号: 19DZ1203301); 上海市科技计划项目“城市绿地碳汇计量监测技术标准研究与应用示范”(编号: 21DZ2206600)

of the highest carbon density was *C. camphora* (No.25, No.48), and the larger annual increment of carbon density was *C. camphora* + *U. parvifolia* + *Pterocarya stenoptera*, *C. camphora* + *Celtis sinensis* + *Sapium sebiferum*, *C. camphora* + *U. parvifolia*. The contribution rates to community carbon density from high to low were tree age (31.44%), planting density (25.66%), tree species (11.95%), configuration structure (10.52%), species richness (10.50%) and site type (9.92%). Tree species, community density, and community structure should be considered during the plant community configuration. It can be improved the carbon sink efficiency and capacity in urban greening.

**Keywords**

urban greening; fine tree species for carbon sink; community collocation; carbon sink capacity

2020年9月，国家主席习近平在第七十五届联合国大会上提出，中国将采取更加有力的政策和措施，CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。这是应对全球气候变化的绿色低碳转型大方向。目前，国家层面的“双碳”行动方案已在制定过程中，各行、各地也正积极谋划2030年前的“碳达峰、碳中和”行动方案<sup>[1-3]</sup>。2020年中央经济工作会议将“开展大规模国土绿化行动，提升生态系统碳汇能力”作为“碳达峰、碳中和”的内容，并纳入了“十四五”开局之年中国经济重点工作任务。整个绿化工作将由过去注重数量向数量和质量并重转变<sup>[4]</sup>。

随着城市化进程的加快，CO<sub>2</sub>排放量的80%以上均来自于城市及周边地区<sup>[5]</sup>。城市绿地系统是城市内唯一的自然碳汇，在低碳城市发展过程中扮演重要且无可替代的角色<sup>[6]</sup>。2005年，全球碳计划(Global Carbon Project, GCP)发起城市与区域碳管理(Urban and Regional Carbon Management, URCM)研究计划推动了城市碳过程的研究。Konijnendijk发现区域的固碳能力受该区域绿地和树木数量影响，一个树木茂盛的社区固碳能力可达17 t/hm<sup>2</sup><sup>[7]</sup>。李怒云等研究认为森林每生长1 m<sup>3</sup>木材，约可以吸收CO<sub>2</sub>1.83 t<sup>[8]</sup>，经测算，每人每年栽上3棵树，就可以吸收个人当年在基本生活过程中排放的CO<sub>2</sub>，从而实现“零排放”。

为了在有限的城市空间范围内发挥绿

地更大的碳汇效能，除了宏观层面通过国土空间绿地规划增加绿化覆盖率和绿量以外，更应从微观层面的植物固碳能力、群落结构等角度考虑。目前，中国对碳汇的研究主要集中于林业方面，从不同尺度开展了碳汇树种选择、森林碳汇计量、森林碳汇能力评价、森林生态系统碳储量等研究<sup>[9-14]</sup>，而关于城市绿地碳汇中群落配置方面的研究较少<sup>[15-17]</sup>。文章以上海世博公园为例，探讨不同类型、结构群落及其组成树种的碳汇能力，分析影响群落碳储量的关键因子，并对其树种选择和配置提出优化方式，为今后城市绿化行业固碳树种推荐和低碳园林设计提供科学依据。

**1 材料与方法**

**1.1 研究区概况**

调查区域为上海世博公园，位于黄浦江东岸与浦明路之间，呈东西走向，西至倪家浜，东接世博园区广场，长度约1.5 km，总面积约29 hm<sup>2</sup>，绿化覆盖率约为51.8%，是上海世博园区的核心绿地和黄浦江两岸重要的滨江景观带。

**1.2 研究方法**

**1.2.1 样方调查**

以张冬梅等<sup>[18]</sup>划分的上海世博公园64个样地为基础(图1)，其中无生长量异速方程

式或调查面积小于100 m<sup>2</sup>的4个样地未列入统计范围内。于2017、2018年连续调查样地内的乔木种类、数量、胸径、高度和冠幅，灌木种类、平均高度和面积、地被，以及草本植物的种类和盖度。

**1.2.2 碳储量估算方法**

乔木采用生物量法，通过文献检索等方式获得每个树种的单木生物量异速生长方程<sup>[19]</sup>，计算单株乔木的生物量，见公式(1)。

$$W=a(D^2H)^b \quad (1)$$

式中，*W*为生物量，*a*、*b*为方程中的估算参数，*D*为胸径或地径(cm)，*H*为树高(m)。

灌木、藤本和草本采用样方收获法，设置一个1.0 m×1.0 m的样方，收获样方内的灌木或草本，将其烘干称重，即为单位面积内的生物量。

按乔木、灌木、藤本和草本4类将样地内所有植物的生物量相加，进而得到总生物量(*B*)。通过生物量乘以含碳系数，计算样地碳储量，见公式(2)。

$$C=B \times C_c \quad (2)$$

式中*C*为碳储量(t)，*B*为总生物量(t)，*C<sub>c</sub>*为含碳率。为了提高碳储量的计算精度，分别采用不同的含碳系数<sup>[20]</sup>估算其碳储量，其中针叶乔木为0.5265、落叶乔木为0.4622、灌木和藤本为0.4593、地被草本植物为0.3713。通过碳储量除以样地绿化面积，



图1 研究区及64个调查样地  
Fig.1 Study area and 64 investigation plots

计算样地碳密度，见公式(3)。

$$C_p = C/S \quad (3)$$

式中 $C_p$ 为碳密度( $t/hm^2$ )， $C$ 为碳储量( $t$ )， $S$ 为样地绿化面积( $hm^2$ )。

### 1.2.3 数据分析

通过DPS15.1采用单因素方差分析方法对60个样地、树种的指标进行差异性分析，利用相关性分析研究碳密度与树种类型、种植密度、配置形式之间的关系。对存在显著相关的指标进行逐步回归分析，分析影响群落碳储量的关键配置因子。

## 2 结果与分析

### 2.1 上海世博公园群落结构特征及碳储量

从表1可以看出，60个样地内乔木树种共有17科27属30种，其中落叶树种与常绿树种比例为7:3，阔叶树种与针叶树种比例为9:1，落叶阔叶树种在上海世博公园内占有绝对优势。乔木树种在样地中出现频次由高到低依次为香樟(*Cinnamomum camphora*, 45.31%)、榔榆(*Ulmus parvifolia*, 29.68%)、朴树(*Celtis sinensis*, 25.00%)、银杏(*Ginkgo biloba*,

18.75%)、池杉(*Taxodium ascendens*, 17.18%)。以常绿和落叶树种构成的群落有36个，平均种植密度为210.67株/ $hm^2$ 。乔木层下灌木和藤本植物共有28科51属62种，地被和草本植物有9种，组成的乔灌(草)群落48个。从2017年、2018年调查样地的总碳储量和平均碳密度来看，2017年估算为388.91 t、80.53  $t/hm^2$ ，2018年估算为399.82 t、94.08  $t/hm^2$ ，上海世博

公园的碳汇能力处于逐年增加阶段。60个样地之间的碳储量差异较大，连续两年的碳密度增量范围为0.07 ~ 87.34  $t/hm^2$  (图2)，其中25号、48号以香樟为主要建群种的群落碳密度最高，2017年为591.03  $t/hm^2$ 、389.61  $t/hm^2$ ，2018年为678.36  $t/hm^2$ 、464.83  $t/hm^2$ ，两个样地的年增量也处于最高水平，为87.33  $t/hm^2$ 、75.22  $t/hm^2$ ；37号樱花林群落碳汇量最低，两

表1 上海世博公园内植物种类  
Tab. 1 Plant species of Shanghai Expo Park

层次 Level	植物类型 Plant type	种类名称 Species
上层	常绿乔木	香樟、香柚、杜英、女贞、广玉兰、桂花、杨梅、枇杷、蚊母
	落叶乔木	榔榆、悬铃木、黄连木、银杏、三角枫、榉树、朴树、鸡爪槭、枫杨、重阳木、栾树、无患子、乌桕、柿树、樱花、白玉兰、红叶李、海棠、池杉、落羽杉、柳杉
中层	常绿灌木	小叶黄杨、大叶黄杨、山茶、海桐、杜鹃、法国冬青、香桃木、菲油果、胡颓子、金丝桃、金森女贞、银姬小腊、地中海菜萼、南天竹、红叶石楠、阔叶十大功劳、构骨、无刺枸骨、夹竹桃、厚皮香、石斑木、云南黄馨、滨柃、红豆杉、小叶蚊母、洒金珊瑚、八角金盘、日本扁柏、铺地柏
	落叶灌木	大花六道木、绣线菊、郁香忍冬、红花檵木、紫薇、牡荆、黄荆、紫珠、八仙花、锦带花、杞柳、海滨木槿、接骨木、木本绣球、猬实、山麻杆、金叶女贞、醉鱼草、火棘、怪柳、细叶水团花、风箱果、溲疏、毛核木、胡枝子、木槿、海州常山、木芙蓉、双荚决明、连翘、槲棠
	藤本植物	凌霄、蔷薇
下层	地被及草本植物	花叶蔓长春、扶芳藤、络石、黄金菊、迷迭香、凤尾兰、鼠尾草、百日红、长春花

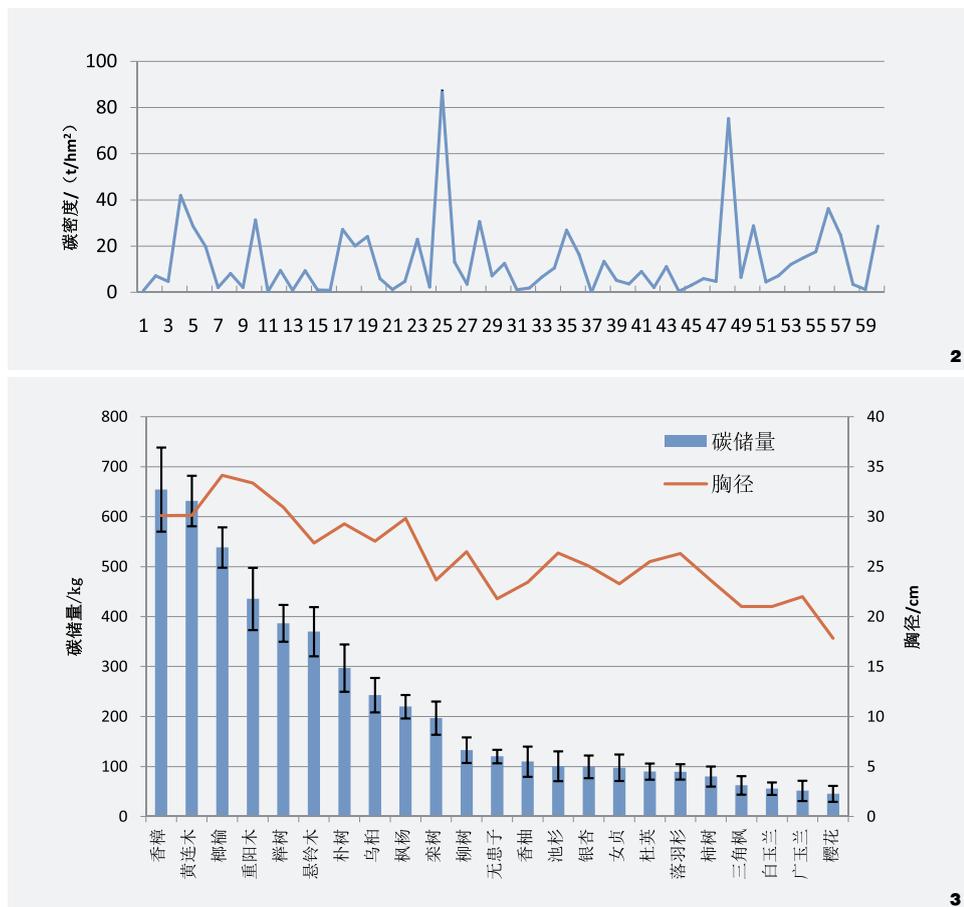


图2 2017—2018年60个样地的碳密度年增量  
Fig.2 Annual increment of carbon density in 60 plots in 2017—2018

图3 23个乔木树种的平均胸径和碳储量统计  
Fig.3 Average diameter and carbon storage of 23 tree species

年的平均碳密度为1.01 t/hm<sup>2</sup>、1.08 t/hm<sup>2</sup>，增量为0.07 t/hm<sup>2</sup>。

### 2.2 不同树种组成对群落碳储量的影响

对23个主要乔木树种的碳汇能力进行比较，从图3可以看出，单株碳储量最大的为香樟 (654.35±84.13 kg)，其次为黄连木 (*Pistacia chinensis*, 631.47±52.53 kg)、榔榆 (*Ulmus parvifolia*, 538.47±40.35 kg)、重阳木 (*Bischofia polycarpa*, 435.50±62.25 kg)、榉树 (*Zelkova schneideriana*, 386.76±36.83 kg)，除了香樟为常绿阔叶树以外，其余均为落叶阔叶树种。单株碳储量最

小的为樱花 (*Prunus serrulata*, 45.57 kg)，广玉兰 (*Magnolia Grandiflora*)、白玉兰 (*Magnolia denudata*)、三角枫 (*Acer buergerianum*)、柿树 (*Diospyros kaki*)、落羽杉 (*Taxodium distichum*)、杜英 (*Elaeocarpus decipiens*)、女贞 (*Ligustrum lucidum*)、银杏的单株碳储量均低于100 kg。另外，碳储量较大的树种胸径均达到了25 cm以上，树种碳储量与胸径之间的相关系数 (r) 为0.806。

30个乔木树种组成了5类不同结构的群落 (表2)，调查的样地中以阔叶林+灌木为主，占57.05%。其中碳密度年增量最大的群落类型为针阔混交林+灌木，2017年、2018

年的碳密度为83.60 t/hm<sup>2</sup>、106.52 t/hm<sup>2</sup>，其碳密度年增量 (22.92 t/hm<sup>2</sup>) 与其他类型群落达到了极显著性差异。以阔叶林或针叶阔叶林为主的乔木层与灌木层形成多层的植物群落结构，其碳密度均比单一乔木层的高，同时阔叶树种与针叶树种混合配置，对群落的固碳效益也起到一定的提升作用。

所调查的样地中，29个群落的乔木层均有香樟，并分别与除了柳树 (*Salix babylonica*)、杜英、三角枫以外的其他19个树种组成了不同类型的乔木冠层。从图4可以看出，以香樟纯林组成的群落平均碳密度较高，2017年、2018年分别为333.57 t/hm<sup>2</sup>、391.28 t/hm<sup>2</sup>；与香樟混交的群落碳密度较低，在100 t/hm<sup>2</sup>左右，并且随着乔木层构成的种类数量增加碳密度减少。

以2~3个树种构成的香樟混交林中，主要是榔榆、悬铃木 (*Platanus Orientalis*)、朴树、枫杨 (*Pterocarya stenoptera*)、乌桕 (*Sapium sebiferum*) 等树种，从表3可以看出，两个树种组成的群落碳密度从大到小依次为：香樟+榔榆、香樟+悬铃木、香樟+朴树，与单株碳储量大小排序相一致，不同树种的配置比例对其影响不大。三个树种组成的群落中，香樟+榔榆+枫杨、香樟+朴树+乌桕的碳密度年增量均高于其他6个混交群落。

### 2.3 不同立地条件对群落碳汇功能的影响

上海世博公园处于城市中心区、黄浦江南岸，为典型的城市滨岸带绿地。园中植物与道路建筑、水体结合布置，根据群落功能、空间性质将调查的60个样地划分成为滨岸带绿化、道路绿化 (主干道、绿道)、构筑物周围绿化4大类型。从图5可以看出，碳密度从大到小依次为：构筑物周围、滨岸带、道路 (主干道)、道路 (绿道)，但不同类型

表2 不同群落类型的碳密度比较  
Tab.2 Comparison of carbon density in different community types

群落类型 Plant community type	分布面积 Distribution area / %	2017年碳密度 2017 carbon density / (t/hm <sup>2</sup> )	2018年碳密度 2018 carbon density / (t/hm <sup>2</sup> )	年增量 Annual increment / (t/hm <sup>2</sup> )
阔叶林	14.46	53.65 ± 5.07B	65.01 ± 4.60B	11.36 ± 1.70B
阔叶林+灌木	57.05	86.17 ± 5.58A	98.39 ± 7.83A	11.11 ± 2.61B
针叶林+灌木	2.55	24.26 ± 3.04C	29.00 ± 5.60C	4.75 ± 0.38C
针叶、阔叶林	0.49	73.52 ± 7.04A	87.69 ± 4.95A	12.63 ± 1.82B
针叶&阔叶林+灌木	25.45	83.60 ± 8.19A	106.52 ± 7.08A	22.92 ± 1.96A

表3 不同树种组成对群落碳密度的影响  
Tab. 3 Effects of different tree species on community carbon density

树种组成 Tree species composition			配置比例 Configuration ratio	2017年碳密度 2017 carbon density / (t/hm <sup>2</sup> )	2018年碳密度 2018 carbon density / (t/hm <sup>2</sup> )	年增量 Annual increment / (t/hm <sup>2</sup> )
1种	2种	3种				
香樟				333.57	391.28	57.71
	香樟+榔榆		3 : 1	169.87	192.37	22.50
		香樟+榔榆+朴树	10 : 1 : 1	128.33	135.53	7.20
		香樟+榔榆+乌桕	11 : 2 : 1	159.32	168.39	9.07
		香樟+榔榆+枫杨	11 : 1 : 1	139.33	167.85	28.52
	香樟+悬铃木		1 : 1	147.27	163.61	16.34
		香樟+悬铃木+朴树	3 : 6 : 1	133.31	142.66	9.35
	香樟+朴树		3 : 5	104.52	119.62	15.10
		香樟+朴树+乌桕	7 : 2 : 1	104.24	131.12	26.88

表4 群落配置关键因子间的相关性  
Tab. 4 Correlation of key factors of community configuration

相关系数 Correlation coefficient	立地类型 Site type	物种丰富度 Species richness	配置结构 Configuration structure	乔木层种类 Types of tree layer	种植密度 Planting density	乔木层树龄 Tree layer age
立地类型 Site type	1					
物种丰富度 Species richness	-0.327	1				
配置结构 Configuration structure	-0.226	0.491	1			
乔木层种类 Types of tree layer	-0.116	0.126	0.158	1		
种植密度 Planting density	0.157	0.048	0.053	-0.187	1	
乔木层树龄 Tree layer age	0.013	-0.003	-0.160	0.173	0.002	1
P值 P value	0.799	0.616	0.452	0.177	0.005**	0.001**
贡献率 Contribution rate	0.067	0.070	0.071	0.081	0.173	0.212
占百分率 Percentage / %	9.92	10.50	10.52	11.95	25.66	31.44

之间没有显著性差异。

## 2.4 影响群落碳密度的关键性因子分析

从表4可以看出，与群落配置相关的6个因子对群落碳密度贡献率从大到小依次

为：乔木层树龄、种植密度、乔木层种类、配置结构、物种丰富度、立地类型，其中乔木层树龄(31.44%)和种植密度(25.66%)的贡献率占到一半以上，与群落碳密度达到显著性差异；其他4个因子之间的贡献率差异

不大，为9.92% ~ 11.95%。

## 3 结论与讨论

### 3.1 优良固碳树种的选择

植物通过光合作用吸收大气中的二氧化

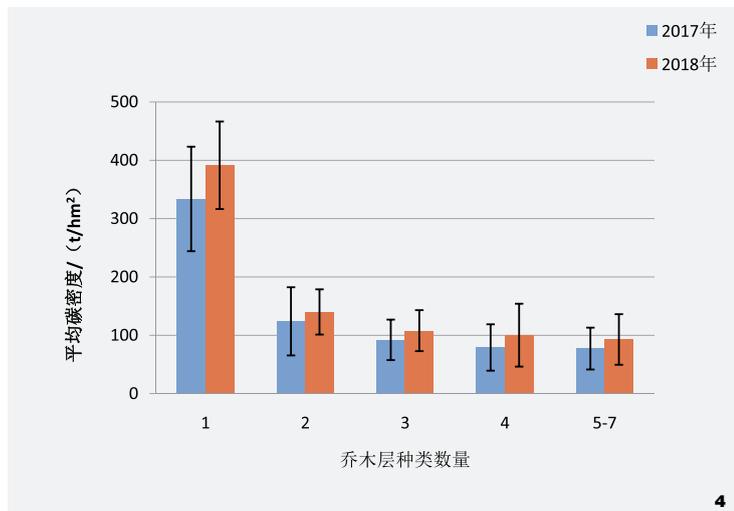


图4 乔木种类数量对群落碳密度的影响  
Fig.4 Effects of tree species number on community carbon density

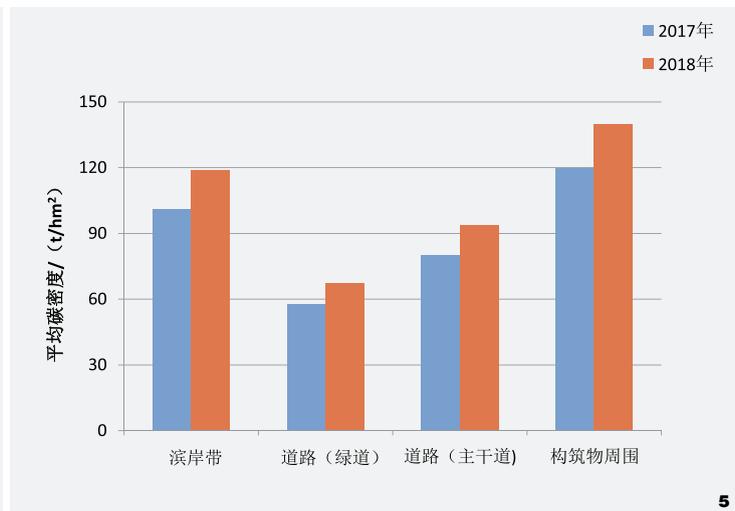


图5 不同立地类型对群落碳密度的影响  
Fig. 5 Effects of different site types on community carbon density

碳(CO<sub>2</sub>), 并将其作为碳存储在体内的不同部位, 如茎、枝、叶等, 从而成为CO<sub>2</sub>吸收库。一般将植物吸收大气中CO<sub>2</sub>的过程, 称为“固碳”。目前, 对单一植物碳储量的衡量主要依据同化量法、生物量法或蓄积量法。王丽勉等<sup>[21]</sup>根据单位叶面积固碳释氧量对上海地区151种植物进行分级, 认为CO<sub>2</sub>固定量大于12 g/m<sup>2</sup>d、O<sub>2</sub>释放量大于8.7 g/m<sup>2</sup>d的固碳能力最强。张娇等<sup>[22]</sup>比较了浙北30种乔木的光合净同化量, 认为香樟、垂柳、碧桃等固碳能力较强。方艳辉<sup>[23]</sup>通过对上海25种常见灌木一年生枝条生物量的分析, 计算单位体积的一年枝的碳储量, 比较得出金丝桃的单位体积碳储量最大, 并建立灌木一年生枝生物量与冠幅和树冠体积的生物量模型。陈婷婷等<sup>[24]</sup>采用生物量转换因子连续函数法对广州天河区5条主要道路行道树碳储量进行估算, 胸径25±5 cm的大叶榕单株生物量、单株碳储量均最高。

但是, 由于中国在估算植物固碳量方面的核算方法不统一、测定误差大、考虑不充

分等问题<sup>[17]</sup>, 无法对单一树种的固碳能力进行比较。近几年, 林玮等<sup>[25]</sup>采用层次分析法构建了碳汇树种评价体系和评分标准, 综合考虑树高、胸径、冠幅以及各器官的含碳量, 从52个树种中评选出8个优良碳汇树种。韩焕金<sup>[26]</sup>对哈尔滨市20种园林植物的叶面积进行测算, 得出其叶面积指数、耐荫参数、固碳释氧量, 通过聚类分析法得出生态优化效益较高的优势树种、灌木种。

叶榕标等<sup>[9]</sup>认为提高树种的固碳能力应优先选择吸收固定CO<sub>2</sub>能力强、优良乡土树种、稳定性和抗逆性强的树种。但对于城市绿化树种, 还要应遵循以下原则:

(1) 选择生长速度快的阔叶树种, 以增加单位面积碳密度。通过生物量法对上海世博公园内的23个主要乔木树种的碳储量进行比较, 单株碳储量由高到低依次为香樟(654.35 kg)、黄连木(631.47 kg)、榔榆(538.47 kg)、重阳木(435.50 kg)、榉树(386.76 kg)等阔叶树种。在城市绿地群落中, 生长期较长、生长速度较快的成年树固

碳释氧效益更高<sup>[27]</sup>。

(2) 选择树种胸径在25 cm左右的乔木树种, 有效提升城市绿地的碳汇能力。树木的碳储量会随着树龄的增加而增加, 当树木胸径从6 cm生长到13 cm时, 树木的碳储量增加幅度小; 当树木胸径从13 cm左右生长到22 cm左右, 进入旺盛期的树木年固碳量最大<sup>[28]</sup>。

(3) 选择易养护的树种, 减少后期的养护管理, 如修剪、施肥等对碳储量的影响。草坪修剪、树木修剪、施肥与灌溉所产生的碳排放量比例为56%、38.4%、0.06%<sup>[29]</sup>。因养护管理而产生的年碳排放量约37.0 ~ 264.9 t/hm<sup>2</sup><sup>[30]</sup>。

### 3.2 植物群落配置及优化

上海世博公园内树种较丰富(图6), 调查的60个样地中, 乔木17科27属30种, 灌木和藤本植物28科51属62种, 地被和草本植物9种。2017年、2018年总碳储量和平均碳密度分别为388.91 t、80.53 t/hm<sup>2</sup>和399.82 t、94.08 t/hm<sup>2</sup>。比较美国市区范围内单位树木覆



图6 上海世博公园内的植物群落类型  
Fig.6 Plant community types of Shanghai Expo Park

盖面积(2005年)碳密度(均值为 $77\text{ t/hm}^2$ )<sup>[31]</sup>,上海世博公园的碳汇能力较高,且呈逐年增加的趋势。

受植物群落配置内在因素,包括树种组成、树木规格、群落结构等,以及立地条件和人为干扰等外界因素影响,即使在同一城区,不同功能区内地表植被碳储量也相差悬殊。本研究调查的60个样地之间的碳储量差异也较大,碳密度年增量范围为 $0.07 \sim 87.34\text{ t/hm}^2$ 。城市绿地如能得到适当改良、保护,可以大大促进绿地的固碳能力<sup>[32]</sup>。通过相关性分析,6个与群落配置有关因子对群落碳密度贡献率从大到小依次为:乔木层树龄(31.44%)、种植密度(25.66%)、乔木层种类(11.95%)、配置结构(10.52%)、物种丰富度(10.50%)、立地类型(9.92%)。因此,除了选择固碳量较大树种外,应考虑从群落密度、乔木层种类和结构等方面增加绿地群落的碳汇能力。

(1) 适当增加群落内乔木树种的栽植密度。植物群落的树木栽植密度与其整体碳汇

能力具有一定的关联, $300 \sim 450\text{ 株/hm}^2$ 栽植密度范围内的植物群落固碳效益最高<sup>[33]</sup>。由于老树和成年树本身储存的碳量高,而幼树则每年吸收的碳多,将不同树龄的树木进行混栽,可以保持植物固碳的稳定性<sup>[34]</sup>。

(2) 构建乔灌草复层、针阔叶混交的植物群落。许多研究表明,植物群落单层结构不利于增加绿地单位面积的碳储量。植物群落层次越复杂,固碳效果越好,植物群落密度越高,碳汇功能越强<sup>[35]</sup>。从植物特性考虑,固碳能力分别由高到低为乔木>灌木>地被及草本植物、落叶植物>常绿植物<sup>[36]</sup>、阔叶林>针阔混交林>针叶林<sup>[37]</sup>。上海世博公园植物群落以阔叶林+灌木为主,占57.05%,年增量最大的群落类型为针阔混交林+灌木,适量增加针叶树种,并与阔叶树种混合配置,群落结构稳定、物种多样,能增加群落的固碳效益。

《上海市生态空间专项规划》作为实施“上海2035”的重要市级专项规划,核心任务是推动生态之城的落地,助力上海构

建与“碳达峰、碳中和”发展要求相匹配的空间治理格局。城市生态绿化双碳目标的实现既要关注人均绿地率、绿化覆盖率、树种多样性等指标的数量变化,也要关注城市绿地、植物群落等空间格局的变化。加强优良固碳树种的引进及选育,特别从观花、观叶等“彩化”方面选育。建立单个树种的碳储量基础数据,针对气候条件、土壤特性以及树种自身特点等进行科学地配置,实现城市绿地碳汇效益最大化。完善碳汇计量、监测方法,建立城市绿地碳汇监测体系,从“高碳汇”“低碳排”角度合理布局公园绿地,为建设低碳园林、低碳城市提供理论依据。

#### 参考文献

- [1] 李俊峰. 做好碳达峰碳中和工作, 迎接低排放发展的新时代[J]. 世界环境, 2021(1): 16-19.
- [2] 缪梦羽, 杨静耕, 李婉清, 等. 成都建设公园城市为城市降碳[N]. 成都日报, 2021-07-09(003).

- [3] 赵璇, 吴晓, 赵银斐. 武汉园林: 让城市全域“应绿尽绿”[N]. 湖北日报, 2021-07-01(T50).
- [4] 耿国彪. 推进国土绿化 建设美丽中国——访全国政协常委、国家林业和草原局副局长刘东生[J]. 绿色中国, 2021(7): 18-21.
- [5] AGUARON E, MCPHERSON G. Comparison of Methods for Estimating Carbon Dioxide Storage by Sacramento's Urban Forest[M]. New York: Springer Verlag, 2012.
- [6] 李信仕, 王诗哲, 石铁矛, 等. 基于低碳城市理念下的绿地系统规划研究策略——以沈阳市为例[J]. 城市发展研究, 2012, 19(3): 134-136.
- [7] KONIJNENDIJK C C, NILSSON K, RANDRUP T B, et al. Urban Forests and Trees[M]. New York: Springer Verlag, 2005
- [8] 李怨云, 宋维明. 气候变化与中国林业碳汇政策研究综述[J]. 林业经济, 2006(5): 60-64.
- [9] 叶榕标, 陈耀辉, 张宋英. 东江流域碳汇林树种选择及主要造林技术措施[J]. 绿色科技, 2012(11): 59-60.
- [10] 邱梓轩. 中国陆表森林植被碳汇测计方法与应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [11] 马兰涛, 洪长福, 姚庆端. 漳州市主要速生树种林分生物多样性及碳汇能力比较[J]. 桉树科技, 2012, 29(4): 15-19.
- [12] 范治. 武汉市森林碳汇能力评价研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
- [13] 徐英明. 南亚热带不同造林模式碳汇林碳积累与碳汇功能研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [14] 马学威, 熊康宁, 张俞. 森林生态系统碳储量研究进展与展望[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 62-72.
- [15] 童家靖, 黄伟, 黎秀琼. 我国园林绿地的碳汇研究进展[J]. 热带生物学报, 2018, 9(1): 117-122.
- [16] 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(4): 69-76.
- [17] 朱凯, 张倩倩, 武鹏飞, 等. 城市绿地碳汇核算方法及其研究进展[J]. 陕西林业科技, 2015(4): 42-47.
- [18] 张冬梅, 张浪, 有祥亮, 等. 气候障碍因子对城市绿化适生树种选择的影响——以上海世博公园为例[J]. 中国园林, 2020, 36(5): 94-98.
- [19] 仲启斌, 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(3): 524-532.
- [20] 唐琳. 城市园林绿化植物固碳效益研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [21] 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(3): 399-401.
- [22] 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): 1740-1750.
- [23] 方艳辉. 上海25种常见灌木的固碳能力及其与叶性状的关系[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [24] 陈婷婷, 鲍戈平. 天河区主要道路行道树结构特征与碳储量研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(31): 172-175.
- [25] 林玮, 白青松, 陈雪梅, 等. 华南主要造林树种碳汇能力评价体系构建及优良碳汇树种筛选[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(1): 28-37.
- [26] 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(5): 68-70.
- [27] NOWAK D J, STEVENS J C, SISINNNI S M, et al. Effects of Urban Tree Management and Species Selection on Atmospheric Carbon Dioxide[J]. Journal of Arboriculture, 2002, 28(3): 113-122.
- [28] 王立. 重庆主城区常见园林树种及群落的碳汇能力研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [29] JO H K, MCPHERSON G. Carbon Storage and Flux in Urban Residential Green Space[J]. Journal of Environmental Management, 1995(45): 109-133.
- [30] JO H K. Impacts of Urban Green Space on Offsetting Carbon Emissions for Middle Korea[J]. Journal of Environmental Management, 2002, 64(2): 115-126.
- [31] NOWAK D J, GREENFIELD E J, HOEHN R E, et al. Carbon Storage and Sequestration by Trees in Urban and Community are-as of the United States[J]. Environmental Pollution, 2013(178): 229-236.
- [32] 管东生, 陈玉娟, 黄芬芳. 广州城市绿地系统碳的贮存、分布及其在碳氧平衡中的作用[J]. 中国环境科学, 1998, 18(5): 437-441.
- [33] 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.
- [34] AKBARI H. Shade Trees Reduce Building Energy Use and CO2 Emissions from Power Plants[J]. Environmental Pollution, 2002(116): 119-126.
- [35] 于超群, 齐海鹰, 张广进, 等. 基于低碳理念的园林植物景观设计研究——以济南市城区典型绿地为例[J]. 山东林业科技, 2016(5): 10-15.
- [36] 史红文, 秦泉, 庆建雄, 等. 武汉市种优势园林植物固碳释氧能力研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(10): 89.
- [37] 吴珊珊, 张赞齐, 王陆军, 等. 合肥环城公园不同群落类型碳储量[J]. 南方农业, 2010, 4(8): 45.