城市公园常见植物固碳能力评估

郭婷婷[1] 朱思瑾[2] 楼一蕾[1] 傅东示[1] 张 洁[1] 幸 怡[1] 杨意帆[1] 张 聪[1] 邵 锋[1]

1 浙江农林大学风景园林与建筑学院 杭州 311300

2 缙云县林场 浙江缙云 321400

摘要：为探究杭州市常见植物在四季生长过程中的固碳能力，以杭州西湖风景名胜区典型的 50 种植物为研究对象，结合便携式光合仪和植物冠层分析仪创新研究方法，分别测算植物四季的光合速率及叶面积，以评估其固碳能力。结果表明：广玉兰固碳能力最强，樟、三球悬铃木等较强，火棘、绣球、金丝桃较弱；乔木固碳能力强于灌木，常绿乔木固碳能力最强；不同季节植物固碳能力为：夏季>秋季>春季>冬季。因此，在植物群落设计时，应加强高固碳能力植物的应用，增加常绿乔木的比例，最大程度提升植物景观美学价值和生态效益。

关键词：城市公园；植物固碳能力；生活型；季节；西湖风景名胜区

DOI：10.12169/zgcsly.2022.10.28.0002

Assessment of Carbon Sequestration Capacity of Plants Common in Urban Parks

Guo Tingting[1] Zhu Sijin[2] Lou Yilei[1] Fu Dongshi[1] Zhang Jie[1] Xing Yi[1]
Yang Yifan[1] Zhang Cong[1] Shao Feng[1]

(1. School of Landscape Architecture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China; 2. Jinyun Forest Farm, Jinyun 321400, Zhejiang, China)

Abstract: In order to investigate the carbon sequestration capacity of plants common in Hangzhou, the study selects 50 typical species of plants in the West Lake Scenic Area of Hangzhou to measure the photosynthetic rate and leaf area of plants in the four seasons using portable photosynthetic apparatus and plant canopy analyzer, and evaluates their carbon sequestration capacity. The results show that *Magnolia grandiflora* has the strongest capacity in carbon sequestration, followed by *Cinnamomum camphora* and *Platanus orientalis*, while *Pyracantha fortuneana*, *Hydrangea macrophylla* and *H. monogynum* have the weaker capacity. Trees have higher carbon sequestration capacity than shrubs, while the evergreen trees sequester the most carbon. Plants have different capacity in carbon sequestration in the four seasons, which is ranked as summer > autumn > spring > winter. It indicates that in the design of plant communities, more focus should be placed on the application of plants with higher carbon sequestration capacity, and the proportion of evergreen trees should be increased, so as to maximize the aesthetic and ecological benefits of plant landscape.

Keywords: city park, carbon sequestration capacity of plant; life orientation; season; West Lake Scenic Area

随着城市化进程的加快，二氧化碳排放和污染成为国际社会的热点问题，其对全球温室效应贡献率超过 60%，极大程度上影响了人类生存环境[1]。温室效应是指太阳短波辐射透过地球大气

收稿日期：2022-10-28

第一作者：郭婷婷（1998- ），女，硕士，研究方向为园林植物应用与园林生态。E-mail：guott191@outlook.com

通信作者：邵锋（1979- ），男，博士，教授，研究方向为园林植物应用与园林生态。E-mail：shaofeng@zafu.edu.cn

射入地面，地面增暖后放出的长波辐射被大气中的水汽、二氧化碳等物质所吸收，导致全球气候变暖[2]。中国在多个国际会议上提及碳达峰碳中和目标，温室气体减排成为世界各国共识[3]。城市绿地具有碳汇潜力，其固碳释氧功能对改善城市生态环境具有重要意义[4-6]，如何提高城市绿地的固碳水平，成为近年来研究焦点。固碳研究起源于以生物量法为基础的植物研究[7]。植物的碳氧平衡功能是缓解环境问题的有效途径，也是实现碳达峰碳中和的主要手段之一[8-10]。众多因素影响植物固碳效益，包括植物生长情况、种类、应用类型、规格和季节等[11-14]，有利于生态系统固碳的植物特征包括生物量大、根系大、CH_4和挥发性有机碳释放较少等[15]。植物在四季的固碳水平表现出显著差异，如 Weissert 等[16]研究表明，常绿树种在冬季可保持较强的净光合能力。还有研究显示，乔木中广玉兰、三球悬铃木等和灌木中木芙蓉（*Hibiscus mutabilis*）、云锦杜鹃（*Rhododendron fortunei*）等都表现出较强的固碳能力[17-20]。已有研究多数集中在不同植物种类间的固碳能力比较，而不同季节的不同植物固碳能力差异性研究较少。本研究以杭州西湖风景名胜区 50 种植物为研究对象，通过测定净光合速率和叶面积指数，探究植物种类、生活型及季节等对植物固碳能力的影响，为高固碳能力型植物群落设计提供科学参考。

1 研究区概况

杭州（118°21′—120°30′E，29°11′—30°33′N）位于我国东南部，地处亚热带季风气候区，四季分明，雨量充沛，全年平均气温 17.8℃，相对湿度 70.3%。春秋季气候宜人，为植物生长提供了良好条件。西湖风景名胜区被评选为“全国十大风景名胜”，其与杭州城区紧密相融，形成“三面云山一面城”的共生互依关系。西湖风景名胜区内植物种类丰富、群落结构多样，仅宝石山景区就有 278 种观赏植物，其中，乔木 129 种，灌木 124 种[21]。

2 研究方法

2.1 样地植物选择

通过充分调查西湖风景名胜区的植物资源，选取应用频度大于 10%的植物，确保其生长环境相对一致，树龄均为 65 年左右，且植株叶片茂盛，生长状况良好，无病虫害。基于此，选择 20 种乔木和 30 种灌木作为研究对象，包括 8 种常绿乔木、12 种落叶乔木、23 种常绿灌木和 7 种落叶灌木。植物统计信息主要包括名称、生活型、胸径、冠幅、株高、枝下高（表 1）。乔木胸径为 21~65 cm，冠幅多为 3~7 m，株高均大于 7 m；灌木胸径多为 1 cm 左右，大型灌木 3~8 cm，冠幅均为 2 m 左右，株高均小于 4 m。

表 1 样地 50 种植物名录

编号	植物名称	生活型	胸径/cm	冠幅/m	株高/m	枝下高/m
1	广玉兰 *Magnolia grandiflora*	常绿乔木	65.0	4.7	17.0	3.4
2	樟 *Cinnamomum camphora*	常绿乔木	56.0	6.9	16.0	3.6
3	木樨 *Osmanthus fragrans*	常绿乔木	28.0	3.1	3.9	0.9
4	杜英 *Elaeocarpus decipiens*	常绿乔木	27.0	2.3	7.9	1.9
5	紫楠 *Phoebe sheareri*	常绿乔木	33.0	3.5	9.0	2.7
6	雪松 *Cedrus deodara*	常绿乔木	42.0	3.2	9.7	3.7
7	冬青 *Ilex chinensis*	常绿乔木	31.0	3.4	8.6	2.8
8	棕榈 *Trachycarpus fortunei*	常绿乔木	26.0	2.8	5.9	1.4
9	玉兰 *Yulania denudata*	落叶乔木	23.0	3.1	7.9	3.6
10	栾 *Koelreuteria paniculata*	落叶乔木	25.0	3.6	8.9	1.9
11	垂柳 *Salix babylonica*	落叶乔木	21.0	4.2	7.3	5.7
12	龙爪槐 *Styphnolobium japonicum* ‘Pendula’	落叶乔木	25.0	3.3	7.9	1.6
13	枫香树 *Liquidambar formosana*	落叶乔木	42.0	3.7	12.0	6.7
14	朴树 *Celtis sinensis*	落叶乔木	23.0	3.4	6.8	1.9
15	三球悬铃木 *Platanus orientalis*	落叶乔木	46.0	5.3	19.0	4.1
16	鹅掌楸 *Liriodendron chinense*	落叶乔木	34.0	3.7	14.0	3.8
17	银杏 *Ginkgo biloba*	落叶乔木	34.0	3.1	13.7	2.9
18	无患子 *Sapindus mukorossi*	落叶乔木	38.0	6.0	16.0	1.8
19	紫叶李 *Prunus cerasifera* ‘Atropurpurea’	落叶乔木	26.0	1.9	7.6	1.6

表 1（续）

编号	植物名称	生活型	胸径/cm	冠幅/m	株高/m	枝下高/m
20	榉树 *Zelkova serrata*	落叶乔木	24.0	3.2	9.4	3.1
21	无刺枸骨 *Ilex cornuta* var. *fortunei*	常绿灌木	0.5	0.9	0.7	0.05
22	紫叶小檗 *Berberis thunbergii* ‘Atropurpurea’	常绿灌木	0.3	2.3	2.6	0.1
23	海桐 *Pittosporum tobira*	常绿灌木	0.5	1.6	1.7	0.1
24	黄杨 *Buxus sinica*	常绿灌木	0.6	1.4	3.6	0.1
25	冬青卫矛 *Euonymus japonicus*	常绿灌木	0.5	1.3	2.1	0.1
26	山茶 *Camellia japonica*	常绿灌木	0.9	1.7	1.9	0.2
27	火棘 *Pyracantha fortuneana*	常绿灌木	1.3	0.3	1.4	0.1
28	杜鹃 *Rhododendron simsii*	常绿灌木	1.6	0.9	0.7	0.1
29	日本女贞 *Ligustrum japonicum*	常绿灌木	0.8	1.3	1.7	0.2
30	短叶罗汉松 *Podocarpus chinensis*	常绿灌木	0.7	2.3	3.1	0.2
31	石楠 *Photinia serratifolia*	常绿灌木	2.3	1.2	2.6	0.05
32	红花檵木 *Loropetalum chinense* ‘Rubrum’	常绿灌木	2.8	0.9	1.8	0.3
33	金叶女贞 *Ligustrum* × *vicaryi*	常绿灌木	3.0	1.6	1.8	0.1
34	十大功劳 *Mahonia fortunei*	常绿灌木	0.2	0.7	1.1	0.05
35	八角金盘 *Fatsia japonica*	常绿灌木	2.3	0.6	1.8	0.2
36	铺地龙柏 *Juniperus chinensis* ‘Kaizuka’	常绿灌木	0.9	1.5	1.3	0.1
37	卫矛 *Euonymus alatus*	常绿灌木	2.3	1.9	2.6	0.4
38	花叶青木 *Aucuba japonica* var. *variegata*	常绿灌木	0.3	0.7	0.7	0.15
39	含笑花 *Michelia figo*	常绿灌木	0.6	1.4	1.6	0.1
40	南天竹 *Nandina domestica*	常绿灌木	0.4	1.1	1.3	0.4
41	齿叶冬青 *Ilex crenata*	常绿灌木	1.2	1.9	2.7	0.2
42	绣球 *Hydrangea macrophylla*	常绿灌木	0.9	0.7	0.9	0.15
43	金边黄杨 *Euonymus japonicas* ‘Aurea-marginatus’	常绿灌木	0.3	0.5	0.3	0.05
44	垂丝海棠 *Malus halliana*	落叶灌木	2.5	2.1	2.8	1.3
45	紫薇 *Lagerstroemia indica*	落叶灌木	4.8	2.3	2.7	0.8
46	东京樱花 *Prunus* × *yedoensis*	落叶灌木	3.6	2.7	2.4	0.9
47	红枫 *Acer palmatum* ‘Atropurpureum’	落叶灌木	8.7	2.3	2.1	0.5
48	鸡爪槭 *Acer palmatum*	落叶灌木	7.0	1.2	1.3	0.4
49	金钟花 *Forsythia viridissima*	落叶灌木	0.9	1.6	1.7	0.1
50	金丝桃 *Hypericum monogynum*	落叶灌木	0.3	0.6	1.1	0.1

2.2　植物固碳能力测定

根据植物光合作用原理，选取植物净光合速率日变化值计算植物日固碳量，采用 Li-6400 XT 便携式光合仪进行测量。以物候（5 d）作为划分季节指标，春季为 3 月第 5 候至 5 月第 6 候，夏季为 5 月第 6 候末至 9 月第 5 候，秋季为 9 月第 5 候末至 11 月第 5 候初，冬季为 11 月第 5 候至 3 月第 5 候[21]。于 2021 年 12 月 23—30 日、2022 年 5 月 1—7 日、8 月 10—17 日及 10 月 11—17 日，分别进行春夏秋冬四季试验。选择晴朗无风天气，在自然光照下，8：00—18：00 每隔 2 h 测量一次，确保每个时段植物测量顺序一致。挑选 4~5 株健康、无病虫害植株，分别选取 5 片阳面、大小一致、成熟的叶片，每次记录 5 个净光合速率瞬时值取平均值[22]。测量时将叶片铺满叶室，无相互遮盖。叶面积指数[23]采用基于图像的光学仪器测量，通过鱼眼镜头和数码相机获取冠层图像，利用 Hemiview 冠层分析软件对冠层图像进行处理与分析，计算太阳辐射透过系数、冠层空隙大小、间隙率等参数，推算叶面积指数 LAI[24]。测量 5 株有代表性的植株取其平均值，在阴天条件下进行拍摄，避免阳光直射。测定当日净同化量的计算公式为：

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

式（1）中：P 代表测定日的净同化总量（8：00—18：00 日净同化总量）（mmol · m^{-2} · d^{-1}）；p_i代表初测点的瞬时光合作用速率（μmol · m^{-2} · s^{-1}）；p_{i+1} 代表下一测点的瞬时光合作用速率（μmol · m^{-2} · s^{-1}）；t_i 代表初测点的瞬时时间（h）；t_{i+1}代表下一测点的时间（h）；j 代表测试次数；3 600 指每小时 3 600 s；1 000 指1 mmol 为 1 000 μmol。

植株净固碳量应扣除其夜间暗呼吸所释放的二氧化碳量，一般植物晚上的暗呼吸消耗量按照

白天同化量的 20%计算[22]，测定日同化总量换算为测定日固定 CO_2量，公式为：

$$w_{CO_2} = P(1 - 0.2) \times \frac{44}{1\,000} \quad (2)$$

式（2）中：w_{CO_2}代表单位面积的叶片日固定 CO_2的量（$g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$）；44 指 CO_2摩尔质量。

单株植物单位冠幅投影面积日固碳量计算公式为：

$$W_{CO_2} = w_{CO_2} \times LAI \quad (3)$$

式（3）中：W_{CO_2} 代表单位冠幅投影面积日固定 CO_2的量（$g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$）；*LAI* 代表叶面积指数。

单株植物日固碳量计算公式为：

$$S_{CO2} = W_{CO_2} \times C \quad (4)$$

式（4）中：S_{CO_2}代表整株植物日固碳量（$g \cdot d^{-1}$）；*C* 为冠幅面积。

2.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 统计和整理数据，运用 SPSS 25.0 分析数据，以 Origin 2021 作图。

3 结果与分析

3.1 不同植物固碳能力评估

50 种植物的单位冠幅投影面积年固碳量为（1 259.27±117.41）~（11 055.47±1 225.97）$g \cdot m^{-2} \cdot y^{-1}$，单位冠幅投影面积年固碳量总计为 2 824.74±1 562.01 $g \cdot m^{-2} \cdot y^{-1}$，其中，广玉兰最强，其次是樟、无刺枸骨，棕榈、齿叶冬青、榉树较弱（表 2）。整株植物年固碳量为（327.60±21.68）~（276 794.55±24 084.19）$g \cdot y^{-1}$，其中，樟、广玉兰、三球悬铃木整株固碳能力居于前 3 位，火棘、绣球、十大功劳固碳能力较弱。采用 K-均值聚类法将 50 个植物样本划分为 4 个等级，以单位冠幅投影面积年固碳量和整株植物年固碳量作为衡量植物固碳能力的特征向量，第一、二类的植物包括广玉兰、樟、木樨、紫楠、栾、垂柳、三球悬铃木和无患子，第三、四类的植物包括龙爪槐、齿叶冬青、金丝桃、金钟花等（图 1）。

表 2 植物单位冠幅投影面积年固碳量和整株年固碳量

编号	植物名称	生活型	W_{CO_2}/（$g \cdot m^{-2} \cdot y^{-1}$）	S_{CO_2}/（$g \cdot y^{-1}$）	聚类排序
1	广玉兰	常绿乔木	11 055.47±1 225.97	233 823.26±25 929.32	1
2	樟	常绿乔木	5 650.02±491.61	276 794.55±24 084.19	1
3	木樨	常绿乔木	4 328.28±556.09	42 936.51±5 516.46	2
4	杜英	常绿乔木	2 747.05±307.75	16 482.27±1 846.49	3
5	紫楠	常绿乔木	3 309.12±175.48	44 011.25±2 333.87	2
6	雪松	常绿乔木	1 714.32±247.66	19 200.40±2 773.77	3
7	冬青	常绿乔木	2 520.57±371.92	31 708.72±4 678.75	3
8	棕榈	常绿乔木	1 565.39±189.80	13 149.28±1 594.28	4
9	玉兰	落叶乔木	2 813.90±433.69	28 786.25±4 436.66	3
10	栾	落叶乔木	3 054.15±325.70	41 780.74±4 455.52	2
11	垂柳	落叶乔木	2 501.86±306.77	47 285.10±5 798.05	2
12	龙爪槐	落叶乔木	1 875.20±275.85	19 183.28±2 822.00	3
13	枫香树	落叶乔木	2 353.21±296.75	33 956.81±4 282.12	3
14	朴树	落叶乔木	2 299.68±258.10	25 802.38±2 895.87	3
15	三球悬铃木	落叶乔木	2 821.57±196.09	77 762.48±5 404.17	2
16	鹅掌楸	落叶乔木	2 435.24±228.96	34 239.54±3 219.18	3
17	银杏	落叶乔木	2 043.06±137.87	19 000.43±1 282.21	3
18	无患子	落叶乔木	1 356.05±207.79	50 445.14±7 729.79	2
19	紫叶李	落叶乔木	1 383.06±260.73	6 569.51±1 238.49	4
20	榉树	落叶乔木	1 259.27±117.41	13 700.86±1 277.44	4
21	无刺枸骨	常绿灌木	5 320.68±547.37	5 746.33±591.16	4
22	紫叶小檗	常绿灌木	2 964.03±276.68	14 316.25±1 336.38	4
23	海桐	常绿灌木	3 367.03±367.02	9 697.03±1 057.00	4
24	黄杨	常绿灌木	3 689.21±227.70	8 263.84±510.05	4
25	冬青卫矛	常绿灌木	3 631.56±196.37	7 081.54±382.92	4
26	山茶	常绿灌木	3 885.94±353.78	12 551.57±1 142.71	4
27	火棘	常绿灌木	2 183.98±144.53	327.60±21.68	4

表 2(续)

编号	植物名称	生活型	W_{CO_2}/(g·m^{-2}·y^{-1})	S_{CO_2}/(g·y^{-1})	聚类排序
28	杜鹃	常绿灌木	3 147.72±402.02	3 399.54±434.18	4
29	日本女贞	常绿灌木	2 375.18±381.96	4 322.83±695.16	4
30	短叶罗汉松	常绿灌木	2 321.86±193.32	12 816.67±1 067.14	4
31	石楠	常绿灌木	4 201.36±336.34	7 058.29±565.05	4
32	红花檵木	常绿灌木	2 419.63±285.88	2 613.20±308.75	4
33	金叶女贞	常绿灌木	3 080.52±216.64	7 393.26±519.95	4
34	十大功劳	常绿灌木	2 599.47±269.88	1 455.70±151.13	4
35	八角金盘	常绿灌木	4 411.63±483.95	3 176.37±348.45	4
36	铺地龙柏	常绿灌木	2 314.63±264.19	5 555.10±634.06	4
37	卫矛	常绿灌木	2 276.52±192.11	7 785.69±657.02	4
38	花叶青木	常绿灌木	3 155.16±331.59	1 766.89±185.69	4
39	含笑花	常绿灌木	1 904.02±193.86	3 998.44±407.11	4
40	南天竹	常绿灌木	2 160.30±160.92	3 089.23±230.12	4
41	齿叶冬青	常绿灌木	1 331.58±59.77	3 195.79±143.44	4
42	绣球	常绿灌木	1 382.39±97.13	774.14±54.39	4
43	金边黄杨	常绿灌木	1 680.91±113.29	2 017.10±135.94	4
44	垂丝海棠	落叶灌木	2 675.30±248.88	10 112.63±940.78	4
45	紫薇	落叶灌木	3 459.27±280.58	19 890.80±1 613.36	3
46	东京樱花	落叶灌木	2 800.25±119.80	21 169.93±905.70	3
47	红枫	落叶灌木	2 222.98±233.90	10 737.00±1 129.73	4
48	鸡爪槭	落叶灌木	1 711.00±194.31	3 079.80±349.77	4
49	金钟花	落叶灌木	1 396.23±185.51	3 350.96±445.23	4
50	金丝桃	落叶灌木	2 080.33±197.65	1 497.84±142.31	4
	总计		2 824.74±1 562.01	25 497.20±16 348.95	

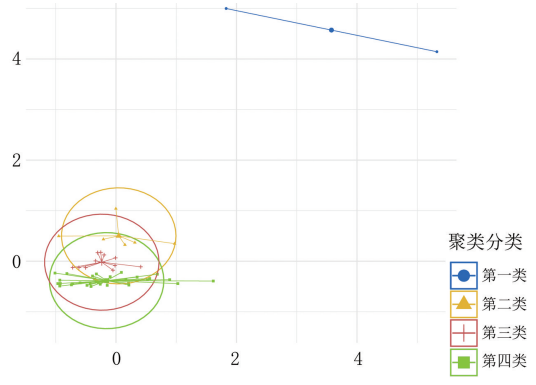


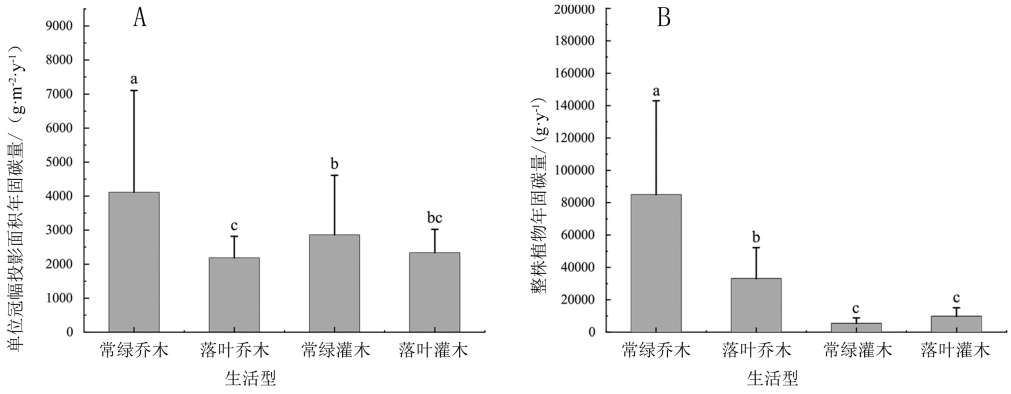
图 1　植物固碳能力聚类分析

3.2　不同生活型植物固碳能力评估

以单位冠幅投影面积年固碳量和整株植物年固碳量作为不同生活型植物固碳能力的评估因素。如图 2 所示：单位冠幅投影面积年固碳量从大到小为常绿乔木>常绿灌木>落叶灌木>落叶乔木，其中常绿乔木固碳能力最强，与其他 3 类生活型植物之间存在显著差异（P<0.05）；整株植物年固碳量为常绿乔木>落叶乔木>落叶灌木>常绿灌木，其中常绿灌木与落叶灌木差异不显著（P>0.05）。乔木的单位冠幅投影面积年固碳量和整株植物年固碳量均大于灌木，说明乔木固碳能力强于灌木。无论是叶片还是整株植物，常绿乔木的固碳能力都强于其他 3 类。这是因为叶片叶绿素含量及光照程度均会影响光合作用强度。常绿乔木的叶片四季常青，其在植物群落中处于上层，这为光合作用提供有利条件；而灌木处于下层，受光照程度弱，能够转化的二氧化碳量少，在一定程度上会影响其固碳能力。

3.3　不同季节植物固碳能力评估

如图 3 所示，春季 50 种植物的单位冠幅投影面积日固碳量为 6.63±4.67 g·m^{-2}·d^{-1}，整株植物日固碳量为 65.37±133.09 g·d^{-1}，春季与秋季差异不显著（P>0.05）；固碳能力最强的季节为夏季，单位冠幅投影面积日固碳量为 14.27±7.67 g·m^{-2}·d^{-1}，整株植物日固碳量为 125.48±224.43 g·d^{-1}；冬季固碳能力最弱。50 种植物的单位冠幅投影面积日固碳量和整株植物日固碳量均表现为：夏季>秋季>春季>冬季。常绿乔木和常绿灌木在不同季节的固碳能力表现为：春季>秋季>春季>冬季（图 4A、图 4C）；落叶乔木和落



注：A 为 4 类生活型植物单位冠幅投影面积年固碳量对比；B 为 4 类生活型植物整株年固碳量对比。

图 2　不同生活型植物固碳能力对比

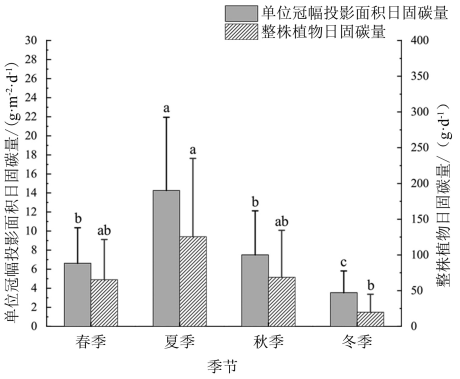


图 3　不同季节植物固碳能力对比

叶灌木在不同季节的固碳能力表现为：夏季>春季>秋季>冬季（图 4B、图 4D）。夏季为植物光合作用最强的季节，与其他季节存在显著差异（$P<0.05$），其光照强度大、日照时间长，固碳速率随之加快。春季和秋季差异不显著（$P>0.05$）。秋季落叶植物叶片脱落，光合速率降低；常绿植物叶片在秋季处于成熟期，相较于春季，叶片营养物质积累，光合作用效果显著。冬季落叶植物无叶片，光合作用减弱，常绿植物在冬季光照强度低，且日照时间短，固碳能力远低于夏季。

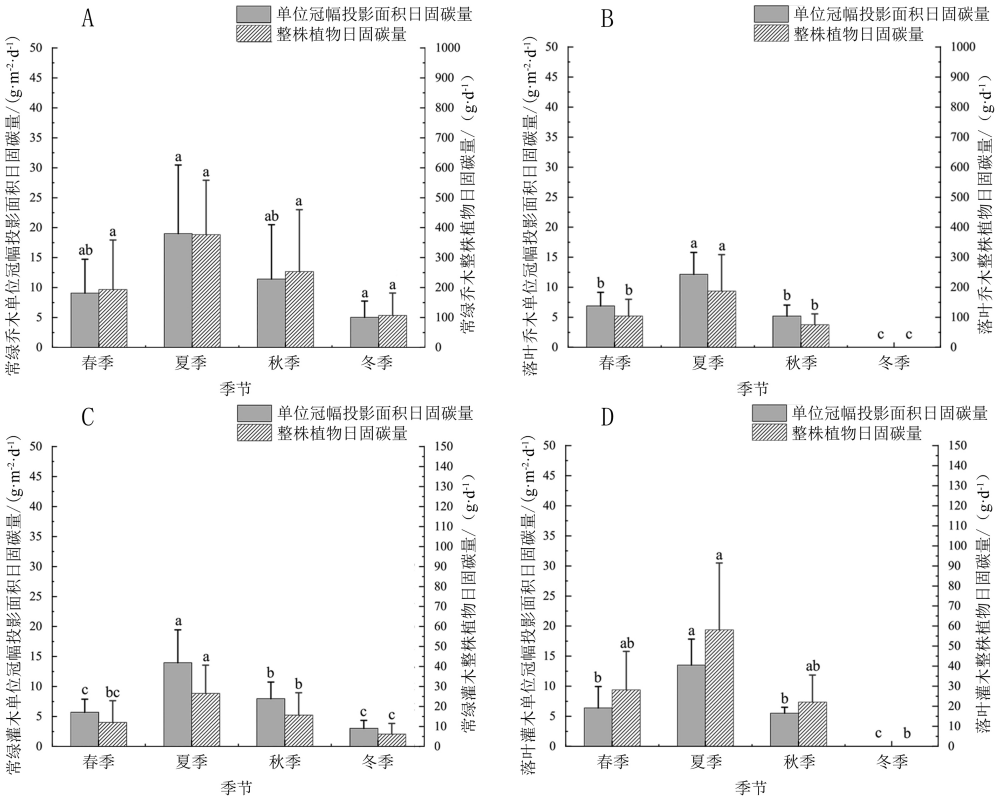


图 4　四类生活型植物不同季节固碳能力对比

4　讨论

植物自身生长状况及外界环境是影响植物固碳的重要因素。杭州市 50 种植物中，整株乔木固碳能力最强的是广玉兰，樟、三球悬铃木、木樨较强；整株灌木固碳能力较强的是紫薇、紫叶小檗、山茶、石楠、无刺枸骨；无刺枸骨、八角金盘、石楠、海桐单位冠幅投影面积叶片的固碳能力较强。这与董延梅[25]的研究结论相近，跟其他学者[17,18,26-28]的研究结果稍有区别。本研究为四季平均日固碳量，与夏季相比测定结果偏低，这是由于植物在夏季生长状态良好，进行光合作用的效率高于其他季节。4 类生活型植物单位冠幅投影面积叶片的固碳能力为常绿乔木>常绿灌木>落叶灌木>落叶乔木；整株植物固碳能力为常绿乔木>落叶乔木>落叶灌木>常绿灌木。Wang 等[29]通过分析植物个体固碳效率表明，常绿乔木平均固碳效率高于其他生活型。本研究 50 种植物固碳能力综合表现为：夏季>秋季>春季>冬季，这与陆贵巧等[30]的研究结果一致，而与赵志刚等[31]的研究结果不同，这可能与试验的环境条件不同有关。

植物单位冠幅投影面积日固碳量反映了叶片吸收二氧化碳的效率，树种的光合效率在不同季节也存在显著差异，整株植物日固碳量则反映了植物整体的固碳能力。本研究中夏季固碳效率最高，其次为秋季，春季单位冠幅投影面积平均日固碳量和整株植物日平均固碳量略低于秋季，冬季为最低。落叶植物在冬季叶片脱落，光合作用最弱；夏季光照强度较其他季节大，光合作用效率随之增高，而过高的光合强度对光合作用有一定抑制作用。部分植物在春秋季的固碳效益与平均水平并不一致，如鹅掌楸、海桐、雪松及玉兰等的固碳能力表现为春季>秋季；广玉兰、樟、八角金盘和无刺枸骨等则表现为秋季>春季，常绿植物和落叶植物固碳能力也存在季节差异。

本研究仅以杭州市西湖风景名胜区的植物为例进行探讨，具有地域局限性。由于植物光合作用的影响因素较多，每个树种在某一时段的光合速率值为同一试验条件下的相对值，不为唯一值，植物测定无法固定为同一时间，每个时段的气候条件也存在差异，生长状态会有细微差别，部分不可避免的误差均会影响植物固碳值[32]。今后的研究中，可扩大研究样地范围及生境类型，以完善不同气候环境及土壤环境条件下的植物固碳评估体系。

5　结论

本研究采用仪器测算法评估杭州市城市植物的固碳能力。以叶片年固碳量和整株植物年固碳量为衡量固碳能力的依据，乔木中广玉兰、樟、木樨、三球悬铃木固碳能力较强，灌木中固碳能力较强的是紫薇、紫叶小檗、山茶、无刺枸骨、八角金盘、石楠。常绿乔木在四个季节的固碳能力均高于其他 3 类生活型，夏季为固碳能力最强的季节，冬季最弱。在城市公园植物群落设计时，应结合生态效益、美学价值及游憩等多种功能，增加常绿乔木的比例，搭配固碳能力强的落叶乔、灌木，以最大程度提升植物景观美学价值和生态效益。

参考文献

[1] IDEM R, TONTIWACHWUTHIKUL P. Preface for the special issue on the capture of carbon dioxide from industrial sources: technological developments and future opportunities[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(8): 2413.

[2] 翟盘茂, 丁明虎, 姜克隽, 等. 领略全世界最前沿科学问题研究进展[N]. 中国气象报, 2021-01-01(3).

[3] 韩立群. 碳中和的历史源起、各方立场及发展前景[J]. 国际研究参考, 2021(7): 29-36, 44.

[4] 冀媛媛, 罗杰威, 王婷. 建立城市绿地植物固碳量计算系统对于营造低碳景观的意义[J]. 中国园林, 2016, 32(8): 31-35.

[5] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 等. 城市绿地的生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 302-315.

[6] 冯晶红, 刘德富, 吴耕华, 等. 三峡库区消落带适生植物固碳释氧能力研究[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(1): 1-8.

[7] MCPHERSON E G. Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 1998, 24(4): 215-223.

[8] 万华伟, 李灏欣, 高吉喜, 等. 我国植被生态系统固碳能力提升潜力空间格局研究[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8568-8580.

[9] 王建, 王根绪, 王长庭, 等. 青藏高原高寒区阔叶林植被固碳现状、速率和潜力[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 374-384.

[10] WANG Y F, FU B J, LÜ Y H, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales

in semi-arid Loess Plateau,China[J].CATENA,2011,85(1):58-66.

[11]王万军,赵林森.昆明市翠湖公园碳储量及碳汇效益分析[J].北方园艺,2012(8):97-99.

[12]JO H K,KIM J Y,PARK H M.Carbon reduction and planning strategies for urban parks in Seoul[J].Urban Forestry & Urban Greening,2019,41:48-54.

[13]史红文,秦泉,廖建雄,等.武汉市10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(9):87-90.

[14]褚芷萱,马锦义,邵海燕,等.不同应用类型园林树木固碳能力[J].中国城市林业,2022,20(1):126-129.

[15]朱新广,王佳伟,韩斌.植物碳汇系统与中国碳中和之路[J].科学通报,2023,68(1):12-17.

[16]WEISSERT L F,SALMOND J A,SCHWENDENMANN L.Photosynthetic CO_2 uptake and carbon sequestration potential of deciduous and evergreen tree species in an urban environment[J].Urban Ecosystems,2017,20(3):663-674.

[17]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.

[18]张艳丽,费世民,李智勇,等.成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益[J].生态学报,2013,33(12):3878-3887.

[19]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(4):209-212.

[20]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(5):829-835.

[21]刁怀庆,饶显龙,董延梅,等.杭州西湖风景名胜区宝石山风景林观赏植物资源分类与统计[J].西北林学院学报,2013,28(5):234-239.

[22]陈高路,陈林,庞丹波,等.贺兰山10种典型植物固碳释氧能力研究[J].水土保持学报,2021,35(3):206-213,220.

[23]GRATANI L,VARONE L,BONITO A.Carbon sequestration of four urban parks in Rome[J].Urban Forestry & Urban Greening,2016,19:184-193.

[24]朱旭珍.三种不同方法估算森林叶面积指数的比较研究[D].杭州:浙江农林大学,2014.

[25]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.

[26]刘雪莲,何云玲,张淑洁,等.昆明市常见绿化植物冬季固碳释氧能力研究[J].生态环境学报,2016,25(8):1327-1335.

[27]于佳,陈宏伟,闫红伟.沈阳市常用园林植物碳汇功能研究[J].中南林业科技大学学报,2015,35(8):94-97.

[28]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(1):33-36.

[29]WANG Y N,CHANG Q,LI X Y.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.

[30]陆贵巧,尹兆芳,谷建才,等.大连市主要行道绿化树种固碳释氧功能研究[J].河北农业大学学报,2006,29(6):49-51.

[31]赵志刚,韩成云,王舸泓,等.南方城市12种常见绿地植物春秋季生态效益分析[J].江苏农业科学,2015,43(12):209-212.

[32]冯晶红,刘瑛,肖衡林,等.三峡库区消落带典型植物光合固碳能力及影响因素[J].水土保持研究,2020,27(1):305-311.