

杭州环西湖公园绿地典型人工植物群落碳收支平衡分析

郭婷婷¹, 黄玉苹², 钱桦³, 邵锋¹, 王冰玉¹, 傅东示¹, 章银柯⁴

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300; 2. 杭州八林景观建设有限公司, 浙江 杭州 310024;
3. 杭州市园林绿化发展中心, 浙江 杭州 310002; 4. 杭州植物园, 浙江 杭州 310013)

摘要: 为揭示植物群落结构对碳收支水平的影响, 本研究选取 5 个杭州环西湖公园绿地为研究地, 以公园绿地内典型的 30 个植物群落为研究对象, 通过 i-Tree 软件和生命周期评价法分别估算植物群落年固碳量和年碳排放量, 分析养护管理方式和植物群落结构对碳收支水平的影响, 探究郁闭度、栽植密度和乔灌木比例与植物群落碳收支水平的关系。结果表明: 各植物群落的平均碳收支量为 $3\ 209.40\ \text{kgC}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中, 平均固碳量为 $11\ 209.87\ \text{kgC}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$, 平均碳排放量为 $8\ 000.47\ \text{kgC}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$; 植物群落郁闭度保持在 0.50~0.75、栽植密度控制在 355~750 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 、乔灌木比例为 0.25~0.50 时, 植物群落的碳收支量最大; 植物群落碳收支量均随着郁闭度、栽植密度、乔灌木比例的增加呈现出先增加后减少的趋势, 在某一等级达到峰值, 随后下降。以上研究结果表明, 通过优化植物群落种植结构, 以适当的郁闭度、群落栽植密度及乔灌木比例设计植物群落, 推动养护管理绿色低碳化, 达到增加固碳量、降低碳排放量的要求, 以提高植物群落碳收支水平。

关键词: 植物群落; 碳收支水平; 郁闭度; 栽植密度; 乔灌木比例

中图分类号: S718.55 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776(2023)06-0082-011

Carbon Budget of Typical Artificial Plant Communities the Parks around the West Lake in Hangzhou

GUO Tingting¹, HUANG Yuping², QIAN Hua³, SHAO Feng¹, WANG Bingyu¹, FU Dongshi¹, ZHANG Yinke⁴

(1. School of Landscape Architecture, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 2. Hangzhou Balin Landscape Construction Co., LTD, Hangzhou 310024, China; 3. Hangzhou Garden Development Center of Zhejiang, Hangzhou 310002, China; 4. Hangzhou Botanical Garden of Zhejiang, Hangzhou 310013, China)

Abstract: Thirty typical plant communities were selected in 5 parks around the West Lake in Hangzhou, Zhejiang province. The annual carbon sequestration and carbon emissions of these communities were estimated by i-Tree software and life cycle assessment method. The effects of tending and management, and plant community structure on carbon budget were analyzed, and the relationship among canopy density, plantation density, and ratio of tree and shrub with the carbon budget of plant communities were explored. The result demonstrated that the average carbon budget of sampled communities was $3\ 209.40\ \text{kgC}\cdot\text{a}^{-1}/\text{ha}$, with an average carbon sequestration of $11\ 209.87\ \text{kgC}\cdot\text{a}^{-1}/\text{ha}$ and average carbon emission of $8\ 000.47\ \text{kgC}\cdot\text{a}^{-1}/\text{ha}$. It showed that the carbon budget of the plant community could top the largest with the canopy density of 0.50-0.75, plantation density of 355-750 tree/ha, and the ratio of tree and shrub of 0.25-0.50. It concluded that the carbon budget of plant communities showed a trend of increasing first and then decreasing with the increase of canopy density, plantation density, and ratio of tree and shrub.

Key words: plant community; carbon budget; canopy density; plantation density; ratio of tree and shrub

收稿日期: 2023-06-05; 修回日期: 2023-10-09

基金项目: 杭州西湖风景名胜区科技发展计划项目“碳达峰、碳中和背景下的杭州西湖西溪景区绿地碳汇功能研究”(2022-001)

作者简介: 郭婷婷, 硕士, 从事园林绿地生态效益评价研究; E-mail: guott191@outlook.com。通信作者: 章银柯, 正高级工程师, 博士, 从事园林绿地生态效益评价研究; E-mail: zyk1524@163.com。

随着经济增速持续加快,人民生活水平不断提高,城市扩张、交通拥堵等问题接踵而至,导致环境问题加剧,尤其是 CO₂ 浓度上升引起的温室效应导致的气候变化是当今人类面临的严重环境问题之一^[1-3]。据统计,城市居民活动排放的 CO₂ 约占 CO₂ 排放总量的 71%^[4]。城市是全球气候变化对人类影响最大的地区^[5],减少城市 CO₂ 排放、提高公园绿地碳汇能力已被认为是缓解城市环境问题的有效途径。

公园绿地植物群落通过光合作用吸收大气中的 CO₂,并将其固定在植被和土壤中。为减少大气中的 CO₂ 浓度,定量研究公园绿地植物群落的碳收支水平,分析影响植物群落碳收支的因素,已成为当前研究的热点问题。万王军等^[6]研究得出,植物群落的碳储量与其规模、种群密度、群落层次和植物种类有密切关系。王敏等^[7]也指出,植物群落结构对固碳具有显著影响。相关研究表明,多层结构的植物群落碳吸收能力是单层结构的 1.1~1.2 倍^[8]。不同类型群落的碳储量大小依次为:阔叶林>针阔混交林>针叶林>疏林^[9]。多数研究应用 i-Tree 工具对当前和未来树木的碳储量和固碳量进行生命周期评估^[10]。刘利^[11]通过 i-Tree 模型分析了城市绿地的生态效益,包括净化空气效益、固碳效益和雨水截留效益。施健健等^[12]使用 i-Tree 模型评估了杭州花港观鱼公园的植物固碳效益。植物群落在吸收 CO₂ 的同时,自身在人工养护管理的过程中也会排放 CO₂,主要包括修剪、灌溉、施肥等方面的碳排放。目前,多采用生命周期评价法(LCA)定量评估碳排放量^[13]。相关研究指出,照明耗电和灌溉用水的 CO₂ 排放较多^[14-16]。人工养护阶段的植物群落是主要碳源,降低植物群落碳排量、增加碳汇量,是高效低碳植物群落景观建设的关键^[17]。由于植物群落本身具有种类多样、结构复杂、类型丰富等特点,专家学者对植物群落的碳汇量化研究较少。因此,本文针对杭州环西湖公园绿地植物群落的碳收支水平展开研究,分析植物组成、郁闭度、栽植密度和乔灌木比例等结构因子对植物群落碳收支的影响,以完善不同尺度的碳收支研究,为今后公园绿地植物群落的设计、营建和管理提供有益参考。

1 研究区概况

西湖风景名胜区位于浙江省杭州市西部,总面积为 59.04 km²,其中,湖面面积为 6.38 km²,外围保护区面积为 35.64 km²。属亚热带季风气候,年平均气温为 17.8 ℃,年平均降水量为 1 500 mm,平均相对湿度为 70.3%。雨量充沛、气候宜人,这为植物生长提供了良好的条件。西湖环湖一带是其景观精华所在,沿线分布的公园各具特色,共同构成了现代城市中较成熟的公园体系。本研究范围为环西湖游线上的 5 个公园——曲院风荷、花港观鱼、柳浪闻莺、杭州太子湾公园、杭州植物园,其植物资源丰富、群落结构多样、植物景观特色鲜明。公园位置如图 1 所示。

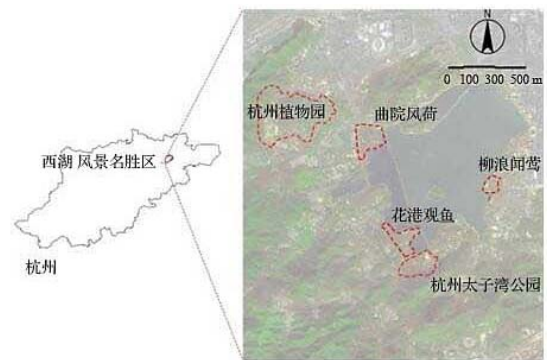


图 1 公园相对位置图

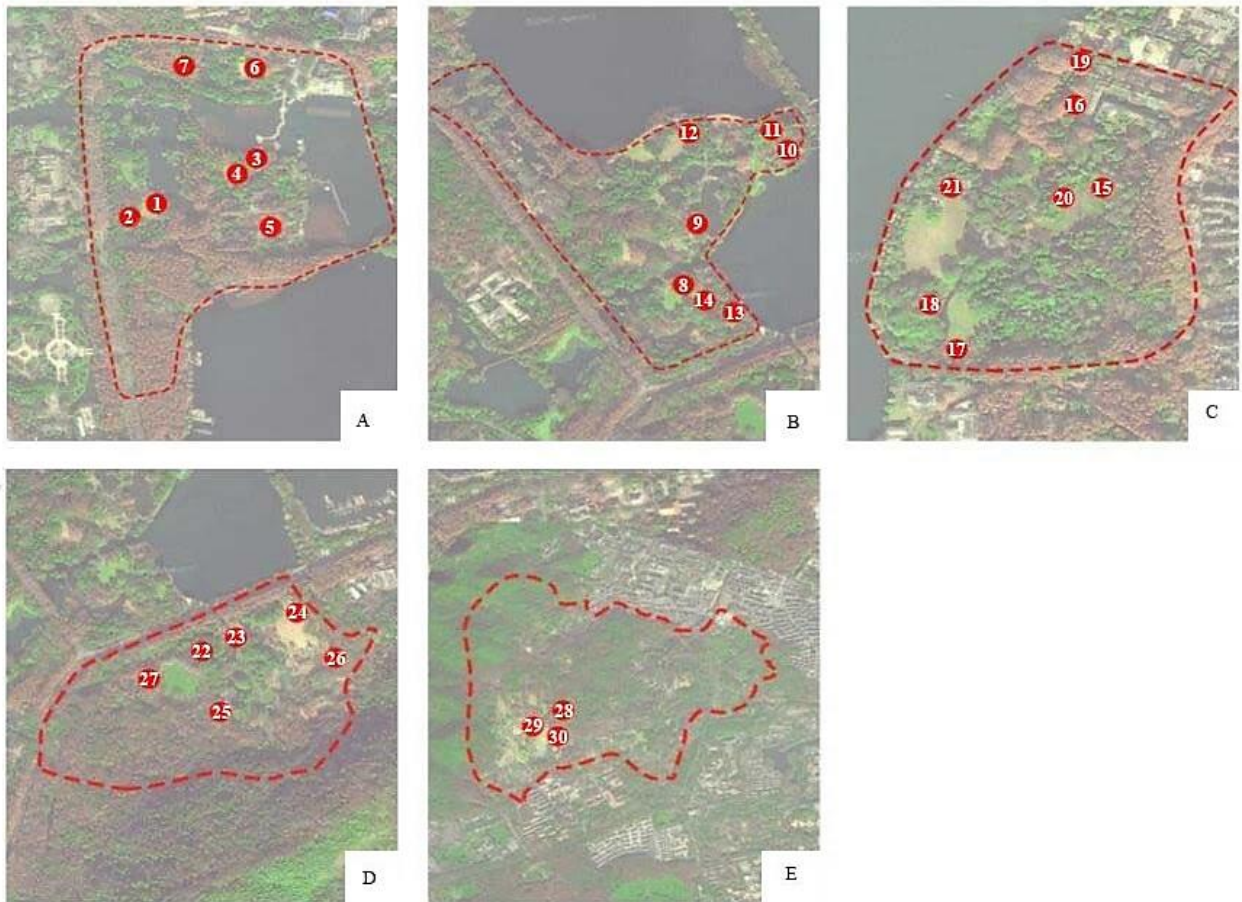
Fig. 1 Location of the parks around the West Lake

2 研究方法

2.1 样地选择

植物群落是指特定空间中植物种群有规律地组合,有一定的植物种类组成,物种之间彼此影响,具有一定的外貌及结构^[18]。为最大限度地避免其他因素的干扰,降低试验误差,在试验设计时,保证试验条件的一致性、可比性及重复性,每个样方面积均为 400 m²,树龄均为 50 年左右。因为多层结构的碳吸收能力较单层结构强^[8],故选取群落类型均为乔—灌—草多层结构形式。样地选择是在充分调研杭州环西湖公园绿地植物群落的基础上确定的,主要考虑因素为植物群落的郁闭度、栽植密度及乔灌木比例。基于以上要求,本试验选取杭州环西湖公园绿地中的曲院风荷、花港观鱼、柳浪闻莺、杭州太子湾公园和杭州植物园为研究地(公园选取符合 CJJT 85—2017 标准)。2021 年 10 月,在 5 个公园内选择 30 个典型植物群落作为研究对象,比较不同植

物群落的碳收支情况(图2)。30个植物群落样点信息见表1。



注: A-曲院风荷植物群落样点位置图; B-花港观鱼植物群落样点位置图; C-柳浪闻莺植物群落样点位置图; D-杭州太子湾公园植物群落样点位置图; E-杭州植物园植物群落样点位置图。

图2 植物群落样点位置图

Fig. 2 Location of sampling plant communities

表1 各样点植物群落信息
Tab. 1 Information of sampling communities

编号	郁闭度	栽植密度/(株·hm ²)	乔灌木比例	主要植物
1	0.75~1.00	1 200	0.33	乔木层: 无患子 <i>Sapindus saponaria</i> 、枫香树 <i>Liquidambar formosana</i> 、木樨 <i>Osmanthus fragrans</i> 、鸡爪槭 <i>Acer palmatum</i> 、紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i> 灌木层: 无刺枸骨 <i>Ilex cornuta</i> 'Fortunei'、十大功劳 <i>Mahonia fortune</i> 草本层: 狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> 、麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>
2	0.75~1.00	1 425	0.46	乔木层: 浙江楠 <i>Phoebe chekiangensis</i> 、无患子、鸡爪槭、木樨 灌木层: 石楠 <i>Photinia serratifolia</i> 、含笑花 <i>Michelia figo</i> 草本层: 黑麦草 <i>Lolium perenne</i> 、金边阔叶麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>
3	0.50~0.75	1 230	0.32	乔木层: 樟 <i>Cinnamomum camphora</i> 、木樨、龙柏 <i>Juniperus chinensis</i> 'Kaizuca' 灌木层: 绣球 <i>Hydrangea macrophylla</i> 草本层: 沿阶草 <i>Ophiopogon bodinieri</i>
4	0.25~0.50	375	0.25	乔木层: 樟、鸡爪槭、东京樱花 <i>Prunus × yedoensis</i> 灌木层: 无刺枸骨、金边黄杨 <i>Euonymus japonicus</i> 'Aurea-marginatus'、石楠 草本层: 结缕草 <i>Zoysia japonica</i>
5	0.25~0.50	645	0.44	乔木层: 水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i> 、木樨 灌木层: 绣球 草本层: 麦冬

表 1 (续)

编号	郁闭度	栽植密度/(株·hm ⁻²)	乔灌木比例	主要植物
6	0.25~0.50	975	0.39	乔木层: 柿 <i>Diospyros kaki</i> 、木樨、东京樱花、鸡爪槭 灌木层: 南天竹 <i>Nandina domestica</i> 、杜鹃 <i>Rhododendron simsii</i> 、无刺枸骨 草本层: 沿阶草 乔木层: 雪松 <i>Cedrus deodara</i> 、鸡爪槭
7	0.75~1.00	1 320	0.15	灌木层: 花叶青木 <i>Aucuba japonica</i> var. <i>variegata</i> 、八角金盘 <i>Fatsia japonica</i> 、山茶 <i>Camellia japonica</i> 、金边黄杨、紫叶小檗 <i>Berberis thunbergia</i> 'Atropurpurea' 草本层: 酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i> 、沿阶草 乔木层: 无患子、木樨、东京樱花、鸡爪槭 灌木层: 红花檵木 <i>Loropetalum chinense</i> var. <i>rubrum</i> 、金丝桃 <i>Hypericum monogynum</i> 、小叶黄杨 <i>Buxus sinica</i> var. <i>parvifolia</i> 、无刺枸骨、金边黄杨、紫叶小檗、十大功劳、山茶、八角金盘
8	0.75~1.00	1 305	0.53	草本层: 麦冬、黑麦草 乔木层: 雪松、朴树 <i>Celtis sinensis</i> 、鸡爪槭 灌木层: 杜鹃、火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i> 草本层: 沿阶草
9	0.25~0.50	1 500	0.11	乔木层: 枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i> 、东京樱花、垂丝海棠 <i>Malus halliana</i> 、木樨 灌木层: 迎春花 <i>Jasminum nudiflorum</i> 、紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i> 'Atropurpurea'、金丝桃 <i>Hypericum monogynum</i> 、无刺枸骨 草本层: 麦冬
10	0.25~0.50	975	0.54	乔木层: 雪松、鸡爪槭、羽毛槭 <i>Acer palmatum</i> var. <i>dissectum</i> 灌木层: 无刺枸骨、红花檵木、山茶、紫叶小檗、杜鹃 草本层: 结缕草、沿阶草
11	0.50~0.75	705	0.82	乔木层: 樟、鸡爪槭、木樨、紫薇 灌木层: 金丝桃、小叶黄杨、南天竹 草本层: 沿阶草
12	0.50~0.75	870	0.84	乔木层: 枫杨、杜英 <i>Elaeocarpus decipiens</i> 、紫楠 <i>Phoebe sheareri</i> 、鸡爪槭、木樨、紫叶李 灌木层: 十大功劳、花叶青木 草本层: 麦冬、早熟禾 <i>Poa annua</i>
13	0.75~1.00	1 500	0.83	乔木层: 无患子、雪松、樟、鸡爪槭、紫叶李 草本层: 黑麦草
14	0.50~0.75	330	0.45	乔木层: 无患子、广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i> 、鸡爪槭、木樨、东京樱花、紫薇 灌木层: 无刺枸骨 草本层: 麦冬、结缕草
15	0.75~1.00	1 425	0.84	乔木层: 樟、枫香树、木樨、鸡爪槭 灌木层: 石楠、小叶黄杨、无刺枸骨、花叶青木、山茶、红花檵木 草本层: 沿阶草
16	0.50~0.75	930	0.42	乔木层: 无患子、垂柳 <i>Salix babylonica</i> 、枫香树、木樨、紫薇、红枫 <i>Acer palmatum</i> 'Atropurpureum' 灌木层: 南天竹、海桐 <i>Pittosporum tobira</i> 、火棘、金边黄杨 草本层: 金边阔叶麦冬
17	0~0.25	900	0.33	乔木层: 樟、木樨、罗汉松 <i>Podocarpus macrophyllus</i> 灌木层: 金边黄杨、海桐、红花檵木、八角金盘、冬青卫矛 <i>Euonymus japonicus</i> 、紫叶小檗、齿叶冬青 <i>Ilex crenata</i> 、小叶黄杨 草本层: 沿阶草、马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>
18	0.75~1.00	825	0.32	乔木层: 垂柳、朴树、木樨、二球悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i> 、垂丝海棠、鸡爪槭、紫薇 灌木层: 山茶、小叶黄杨、杜鹃、无刺枸骨、石楠 草本层: 沿阶草
19	0.75~1.00	1 425	0.30	乔木层: 无患子、雪松、广玉兰、垂丝海棠、鸡爪槭 灌木层: 南天竹、金边黄杨

表 1 (续)

编号	郁闭度	栽植密度/(株·hm ⁻²)	乔灌木比例	主要植物
21	0.50~0.75	480	0.35	草本层: 金边阔叶麦冬
				乔木层: 樟、银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、棕榈 <i>Trachycarpus fortune</i>
22	0.25~0.50	375	0.36	灌木层: 红花檵木、无刺枸骨、金边黄杨、八角金盘
				草本层: 沿阶草、结缕草
23	0.25~0.50	480	0.19	乔木层: 枫香树
				灌木层: 小叶女贞 <i>Ligustrum quihoui</i> 、山茶、蜡梅 <i>Chimonanthus praecox</i>
24	0.25~0.50	795	0.18	草本层: 麦冬、酢浆草
				乔木层: 天竺桂 <i>Cinnamomum japonicum</i> 、东京樱花、木樨、榉树 <i>Zelkova serrata</i>
25	0~0.25	1 005	0.60	灌木层: 小叶女贞、红花檵木、南天竹
				草本层: 麦冬、马唐
26	0~0.25	855	0.79	乔木层: 椴树 <i>Tilia tuan</i> 、木樨、紫叶李
				灌木层: 山茶、红花檵木、南天竹、十大功劳
27	0.25~0.50	1 200	0.53	草本层: 结缕草
				乔木层: 樟、小叶女贞、木樨
28	0.25~0.50	825	0.65	灌木层: 胡颓子 <i>Elaeagnus pungens</i> 、杜鹃、八角金盘
				草本层: 络石 <i>Trachelospermum jasminoides</i> 、沿阶草、结缕草
29	0.50~0.75	720	0.29	乔木层: 东京樱花、雪松、无刺枸骨、红花檵木
				草本层: 狗牙根、沿阶草
30	0~0.25	555	0.29	乔木层: 榆树 <i>Ulmus pumila</i> 、木樨、樟、东京樱花
				灌木层: 金丝桃、南天竹、山茶
28	0.25~0.50	825	0.65	草本层: 麦冬
				乔木层: 枫香树、榉树、枫杨、鸡爪槭、冬青 <i>Ilex chinensis</i>
29	0.50~0.75	720	0.29	灌木层: 南天竹、金叶女贞、忍冬 <i>Lonicera japonica</i>
				草本层: 麦冬
29	0.50~0.75	720	0.29	乔木层: 朴树、玉兰 <i>Yulania denudata</i> 、鸡爪槭
				灌木层: 木槿 <i>Hibiscus syriacus</i> 、石楠、木芙蓉 <i>Hibiscus mutabilis</i>
30	0~0.25	555	0.29	草本层: 金边阔叶麦冬、结缕草
				乔木层: 龙爪柳 <i>Salix matsudana</i> f. <i>tortuosa</i> 、梅 <i>Prunus mume</i> 、桃 <i>Prunus persica</i> 、木樨
30	0~0.25	555	0.29	灌木层: 小叶女贞
				草本层: 狗牙根、沿阶草

经调查,所选植物群落均为人工栽培群落,生长稳定,郁闭度为0~1,栽植密度为0~1 500株·hm⁻²,乔灌木比例为0~1。植物群落中的树种为4~16种·400 m²,其中87%为常绿落叶混交植物群落,13%为常绿植物群落。分析调研结果,将3种因素分为A、B、C、D 4个等级(表2)。分别以郁闭度、栽植密度、乔灌木比例3个因子为变量设置3个小组,每小组4个样点,共30个植物群落,控制其中2种因素为同一等级,比较另一因素的某一等级对植物群落碳收支量的影响。

表 2 植物群落结构分级标准
Tab. 2 Grading of plant community structure

植物群落结构分级	郁闭度	栽植密度/(株·hm ⁻²)	乔灌木比例
A	0~0.25	0~375	0~0.25
B	>0.25~0.50	>375~750	>0.25~0.50
C	>0.50~0.75	>750~1 125	>0.50~0.75
D	>0.75~1.00	>1 125~1 500	>0.75~1.00

2.2 植物群落固碳测定

植物群落年固碳量采用 i-Tree 模型 Eco V 6.0.29 模块计算。i-Tree 模型是进行城市林业分析和效益评估的工具。该模型通过调研实地植物的基础数据,建立基于冠幅、树高及胸径等的函数模型,计算出植物的生物量,进而推算植物固碳效益。用 i-Tree 模型计算植物群落固碳效益是依据异速生长方程计算植物的生物量,若被试

植物在模型中无对应的方程, 会采用同一个属的生长方程计算, 若无对应属的生长方程, 则会采用阔叶树种或者针叶树种生长方程的平均值^[12]。i-Tree 模型中的物种数据库包括 1 万多种乔木和灌木的信息, 是基于不同参考城市的树木生长模型, 以杭州年平均气温、年平均降水量、环境状况为依据, 选取与杭州气候类型相近的地区。分别将 30 个植物群落的调研数据录入 Excel 表中, 并转化为 i-Tree 模型可识别的 csv 格式文件, 经过分析处理后, 即可进行植物群落的年固碳量分析。将乔木、灌木和草本相应数据输入软件中, 进行分析处理。

2.3 养护管理碳排放估算

植物群落年碳排放量采用生命周期评价法计算, 研究边界是植物群落的养护管理阶段, 包括灌溉、修剪、施肥、打药。园林全生命周期的其他阶段, 如建造初始的材料生产运输、设计建造、废弃物处置等阶段不作为考量重点。养护管理阶段的基础数据包括灌溉方式、灌溉频率、施肥频率、打药频率、样点植物群落的灌溉年用水量、年化肥用量、年农药用量、修剪及灌溉分别使用的能源机械型号及功率、年耗油量及年耗电量等, 通过与园林养护一线工作人员及管理人员深入交谈, 同时翻阅公园养护管理日志, 获取上述基础数据。养护管理碳排放量为灌溉、修剪、施肥、农药排放的 CO₂ 总和。为确保数据的可靠性与真实性, 根据《IPCC 国家温室气体排放清单指南》推荐的碳排放转换因子(表 3), 计算相应过程的碳排放量。

表 3 养护能源碳排放转换系数
Tab. 3 Greenhouse gas emissions by tending of plant communities

序号	材料	碳排放因子	参考文献	序号	材料	碳排放因子	参考文献
1	柴油	2.73 kg CO ₂ ·L ⁻¹	[19]	4	杀虫剂	7.730 kg CO ₂ ·kg ⁻¹	[21]
2	湖水	2.26 kg CO ₂ ·L ⁻¹	[20]	5	复合肥	0.742 kg CO ₂ ·kg ⁻¹	[22-23]
3	电力	0.785 kg CO ₂ ·KWh ⁻¹	[20]	6	有机肥	0.0727 kg CO ₂ ·kg ⁻¹	[22-23]

2.3.1 灌溉 CO₂ 排放量 经调查得知, 公园内植物群落的灌溉方式为抽水泵抽水, 抽水泵以柴油为主要能源补给, 通过访谈及资料查阅得到每个样点植物群落的年用水量及年耗油量。灌溉所产生的 CO₂ 计算公式如下:

$$CE_{\text{mai-灌溉}} = \sum_{i=1}^n (Q_{i-柴油} \times C_{柴油} + Q_{i-水} \times C_{水})$$

式中, $CE_{\text{mai-灌溉}}$ 为 30 个植物群落灌溉产生的 CO₂ 排放总量; $Q_{i-柴油}$ 为每个植物群落灌溉产生的柴油消耗量; $Q_{i-水}$ 为每个植物群落灌溉产生的用水消耗量; $C_{柴油}$ 为柴油碳排放因子; $C_{水}$ 为水碳排放因子。

2.3.2 修剪 CO₂ 排放量 各植物群落的修剪方式为机械结合人工修剪, 草坪采用坐骑式割草机及手推式割草机, 以耗油为主; 灌木采用肩背割草机结合手剪, 以耗油为主; 乔木以高枝剪等人工修剪为主, 此过程不计入碳排放计算。修剪所产生的 CO₂ 计算公式如下:

$$CE_{\text{mai-修剪}} = \sum_{i=1}^n (Q_{i-柴油} \times C_{柴油})$$

式中, $CE_{\text{mai-修剪}}$ 为 30 个植物群落修剪产生的 CO₂ 排放总量; $Q_{i-柴油}$ 为每个植物群落修剪产生的柴油消耗量; $C_{柴油}$ 为柴油碳排放因子。

2.3.3 施肥 CO₂ 排放量 各植物群落为冬春季开花施肥, 春季花后叶面追肥, 冬季施基肥, 所使用的肥料包括动物粪便及复合肥, 所有肥料均为政采云网站购置, 每年购置一次。由于肥料运输过程较为复杂, 涉及多个环节, 因此假设所有肥料的运输距离均为 100 km, 油耗为 20 L (柴油)。施肥所产生的 CO₂ 计算公式如下:

$$CE_{\text{mai-施肥}} = \sum_{i=1}^n (Q_{i-w} \times C_w + Q_{i-f} \times C_f + Q_{i-柴油} \times C_{柴油})$$

式中, $CE_{\text{mai-施肥}}$ 为 30 个植物群落施肥产生的 CO₂ 排放总量; Q_{i-w} 为每个植物群落的有机肥消耗量; C_w 为有机肥碳排放因子; Q_{i-f} 为每个植物群落的无机肥消耗量; C_f 为无机肥碳排放因子; $Q_{i-柴油}$ 为每个植物群落施肥产生的柴油

消耗量; $C_{\text{柴油}}$ 为柴油碳排放因子。

2.3.4 农药 CO_2 排放量 据调查, 公园每年会针对不同植物及植物群落施用不同剂量的农药, 每年施农药的频率为 5 次, 农药产品包括三唑酮、天王星、吡虫啉等, 所有农药均为政采云网站购置, 每年购置一次。假设所有肥料的运输距离均为 100 km, 油耗为 20 L (柴油)。农药所产生的 CO_2 计算公式如下:

$$CE_{\text{mai-农药}} = \sum_{i=1}^n (Q_{i-农药} \times C_{\text{农药}} + Q_{i-柴油} \times C_{\text{柴油}})$$

式中, $CE_{\text{mai-农药}}$ 为 30 个植物群落施加农药产生的 CO_2 排放总量; $Q_{i-农药}$ 为每个植物群落的农药消耗量; $C_{\text{农药}}$ 为农药碳排放因子; $Q_{i-柴油}$ 为每个植物群落的柴油消耗量; $C_{\text{柴油}}$ 为柴油碳排放因子。

2.4 植物群落碳收支估算

植物群落养护管理周期的碳收支量为每个植物群落的固碳量与碳排放量相减, 若相减值为正值, 则此植物群落表现为碳汇, 反之则为碳源。碳收支量代表该植物群落中的碳平衡状况, 碳收支平衡是根据固碳值和碳排值确定的, 其确定依据为当固碳值等于碳排值时, 即为碳收支相对平衡状态。碳收支量是检验植物群落生态性的一个重要指标^[24]。植物群落养护管理周期的碳收支计算公式如下:

$$C = CS - CE_{\text{mai}}$$

式中, C 为公园绿地植物群落养护管理周期的碳收支量; CS 为每个植物群落的年固碳总量; CE_{mai} 为每个植物群落养护管理阶段的 CO_2 年排放总量。

2.5 数据处理

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

3 结果与分析

3.1 植物群落碳收支分析

从表 4 可以得出, 各植物群落的平均碳收支量为 $3\ 209.40 \text{ kgC} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中, 样点 21 的碳收支量最高 ($24\ 436.34 \text{ kgC} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$), 该样点植物栽植密度适中、生长空间开阔, 群落以大乔木为主, 其修剪、施肥需求小, 养护管理碳排放少且固碳能力强的植物占比较高。样点 28 的碳收支量最低, 为 $-4\ 261.58 \text{ kgC} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 总体表现为碳源, 该群落栽植密度偏高、植物生长空间狭窄, 造成竞争, 导致部分植物生长状况不佳, 有较多枯枝落叶, 养护频次增多, 且乔木冠幅较小, 造成碳收支量偏低。

3.1.1 植物群落固碳量分析 根据 i-Tree 软件计算得出, 杭州环西湖公园绿地植物群落的平均年固碳量为 $11\ 209.87 \text{ kgC} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由表 4 可知, 样点 21 植物群落的年固碳量最高, 为 $31\ 000.00 \text{ kgC} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 群落的优势树种为樟、银杏, 搭配无刺枸骨、红花檵木等固碳能力较强的常绿灌木, 群落内植物多为杭州地区的乡土植物, 植物胸径和冠幅普遍偏高, 栽植密度为 $4.75 \text{ 株} \cdot 100 \text{ m}^{-2}$, 乔灌比为 0.35, 植物生长状态良好, 群落结构稳定, 因此固碳效益较高。样点 20 年固碳量最低, 为 $2\ 758.41 \text{ kgC} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 群落由无患子、雪松、垂丝海棠等乔木搭配金边黄杨、南天竹等灌木, 乔木冠幅较小, 叶片散布稀疏, 群落郁闭度偏低, 这些特征导致群落固碳量较低。

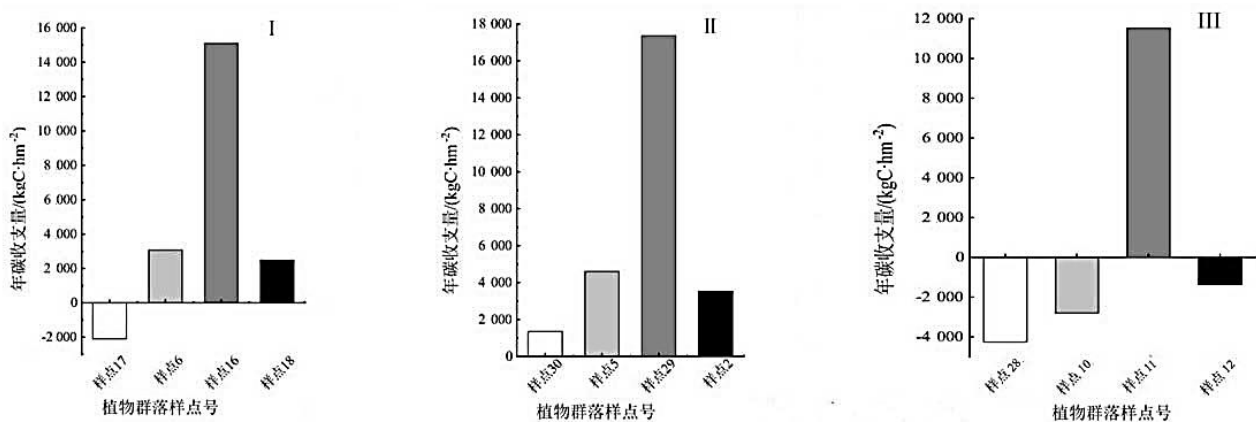
3.1.2 植物群落碳排放分析 各植物群落的年碳排放量为 $(6\ 059.76 \sim 9\ 940.09) \text{ kgC} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均年碳排放量为 $8\ 000.47 \text{ kgC} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。样点 7 植物群落养护管理碳排放量最高, 为 $9\ 940.09 \text{ kgC} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 该样地的郁闭度和栽植密度均为最高, 植物数量偏多, 灌木占比大, 由于灌木需水量较乔木多, 且农药喷洒和肥料施用需求更大, 因此其养护管理阶段碳排放量更多, 其对碳收支为负作用, 造成植物群落碳收支量低。样点 14 植物群落的生命周期管理养护碳排放量最低 ($6\ 059.76 \text{ kgC} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$), 该样点的植物数量较少, 乔灌比例较均衡, 树木规格偏低, 养护需求较小, 所需的肥料和灌溉量偏少, 其对植物群落碳收支为正作用。

表 4 各样地碳收支情况
Tab. 4 Carbon budget of sample points

编号	郁闭度	栽植密度	乔灌木比例	年固碳量/(kgC·a ⁻¹ ·hm ⁻²)	年碳排放量/(kgC·a ⁻¹ ·hm ⁻²)	年碳收支量/(kgC·a ⁻¹ ·hm ⁻²)
1	D	D	B	24 296.26	9 552.72	14 743.55
2	D	D	B	12 927.71	9 398.41	3 529.30
3	C	D	B	14 194.55	8 753.78	5 440.77
4	B	A	A	3 533.58	6 590.01	-3 056.43
5	B	B	B	11 545.36	6 939.09	4 606.27
6	B	C	B	9 929.83	6 857.18	3 072.65
7	D	D	A	8 630.11	9 940.09	-1 309.98
8	D	D	C	14 890.64	9 516.45	5 374.19
9	B	D	A	5 470.34	8 469.96	-2 999.62
10	B	C	C	5 103.26	7 908.65	-2 805.39
11	C	B	D	20 573.67	9 046.72	11 526.95
12	C	C	D	7 362.91	8 742.19	-1 379.28
13	D	D	D	7 041.75	8 998.77	-1 957.02
14	C	A	B	10 125.52	6 059.76	4 065.76
15	D	D	D	11 779.66	9 197.43	2 582.23
16	C	C	B	22 799.71	7 700.43	15 099.28
17	A	C	B	5 071.26	7 172.66	-2 101.40
18	D	C	B	10 623.24	8 129.42	2 493.82
19	B	D	B	9 980.70	8 220.49	1 760.21
20	A	C	A	2 758.41	6 141.90	-3 383.48
21	C	B	B	31 000.00	6 563.66	24 436.34
22	B	A	B	8 386.34	7 378.99	1 007.35
23	B	B	A	10 798.16	7 035.92	3 762.24
24	B	C	A	9 809.31	7 174.00	2 635.31
25	A	C	C	5 119.88	7 693.97	-2 574.09
26	A	C	D	4 804.05	7 929.65	-3 125.60
27	B	D	C	9 134.73	8 755.49	379.24
28	B	C	C	4 046.93	8 308.51	-4 261.58
29	C	B	B	25 857.73	8 489.61	17 368.12
30	A	B	B	8 700.56	7 348.25	1 352.31
平均值	-	-	-	11 209.87	8 000.47	3 209.40

3.2 结构因子对植物群落碳收支的影响

3.2.1 不同郁闭度对碳收支的影响 图 3 反映出不同郁闭度对公园绿地植物群落养护管理碳收支量的影响。



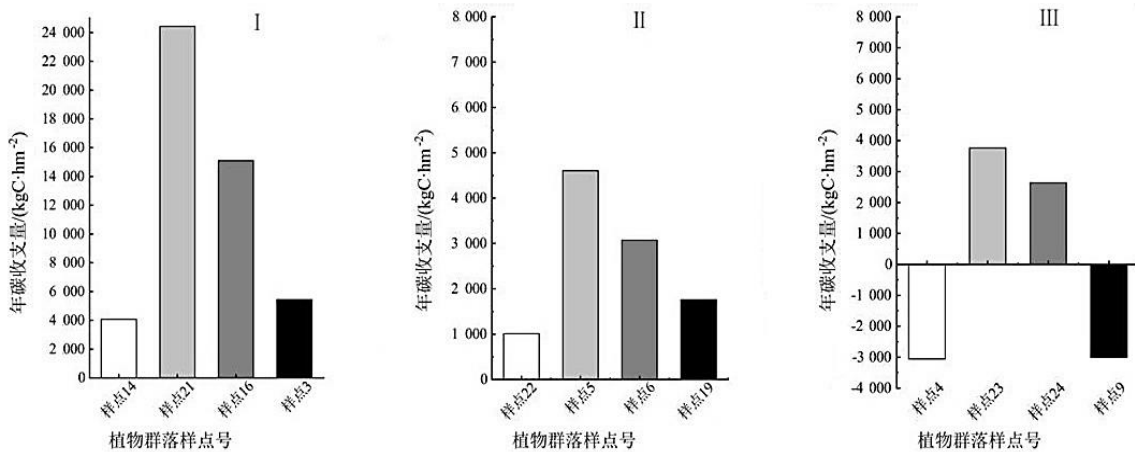
注: I、II、III 分别代表三组控制变量试验; 图中白色柱、浅灰色柱、深灰色柱和黑色柱状分别表示郁闭度等级为 A、B、C、D。

图 3 不同郁闭度植物群落碳收支量对比

Fig. 3 Comparison on carbon budget of plant community with different canopy density

为避免另外 2 种因素影响碳收支水平, 选择栽植密度和乔灌木比例为同一等级, 分析不同郁闭度对植物群落碳收支能力的影响。3 组试验在郁闭度为 0~0.75 时, 碳收支量均表现为随郁闭度的提高而增加, 均为碳汇状态; 当郁闭度为 0.50~0.75 时, 植物群落碳收支量达到最大, 随后开始下降; 郁闭度达到 0.75~1.00 时, 碳收支量随之下降。郁闭度低时, 植物群落覆盖面小, 叶片覆盖率低; 郁闭度偏高时, 植物的叶片生长受到抑制, 固碳效应受到影响。植物群落优化过程中, 可以通过适当提高郁闭度以提升植物群落整体的碳汇能力, 因此将郁闭度控制在 0.50~0.75 为最佳。

3.2.2 不同栽植密度对碳收支的影响 图 4 反映出不同栽植密度对公园绿地植物群落养护管理周期碳收支量的影响。在郁闭度和乔灌木比例一定的情况下, 3 组试验均表现为随着栽植密度增大群落的碳收支量先增加后下降, 当栽植密度增加至 375~750 株·hm² 时, 群落的碳收支量增至最大, 当栽植密度超过 750 株·hm², 群落的碳收支量逐步下降, 部分样点呈现碳源状态。这是由于栽植密度大, 群落内部的植物数量增多, 相互竞争影响植物的固碳效益。此外, 郁闭度和乔灌木比例较均衡的 I 组, 各样点植物群落的碳收支量明显高于另外 2 组, 这表明 3 个因素对植物群落的碳收支水平会产生综合影响。

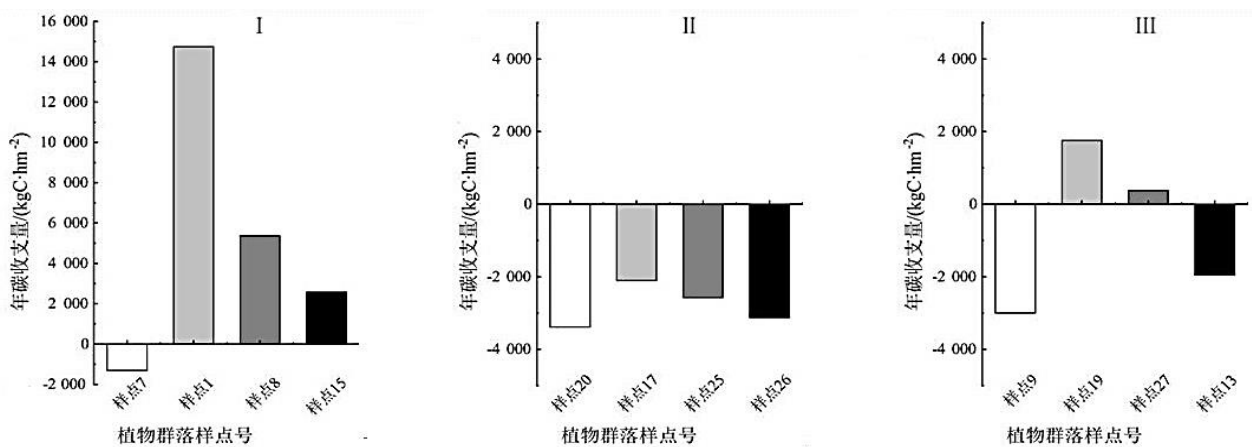


注: I、II、III 分别代表三组控制变量试验; 图中白色柱、浅灰色、深灰色柱和黑色柱分别表示栽植密度等级为 A、B、C、D。

图 4 不同栽植密度植物群落碳收支量对比

Fig. 4 Comparison on carbon budget of plant community with different density

3.2.3 乔灌木比例对碳收支的影响 图 5 反映出乔灌木比例对公园绿地植物群落养护管理周期碳收支量的影响。



注: I、II、III 分别代表三组控制变量试验; 图中白色柱、浅灰色柱、深灰色柱和黑色柱分别表示乔灌木比例等级为 A、B、C、D。

图 5 不同等级乔灌木比例植物群落碳收支量对比

Fig. 5 Comparison on carbon budget of plant community with different proportion of tree and shrub

在郁闭度和栽植密度一定的情况下, 3 组试验中当乔灌木比例为 0.25 ~ 0.50 时, 植物群落的碳收支量最大, 当乔灌木比例为 0 ~ 0.25 时, 植物群落的碳收支量最低, 表明乔灌木比例在影响群落固碳中有显著作用。植物群落固碳主要依靠乔木, 考虑到公园绿地中植物群落的观赏性, 需搭配灌木栽植。乔木过多的群落, 植物生存空间受限, 相互抑制生长; 而灌木过多的群落, 养护管理成本增大, 固碳能力发挥受限。

4 讨论与结论

4.1 讨论

植物群落的碳收支水平受自身结构、树种组成和养护管理等因素的影响。本研究控制植物群落生存环境、光照条件、植物树龄等试验条件, 尽可能减少其他因素的影响, 以郁闭度、栽植密度、乔灌木比例为变量, 分析 3 个结构因子对植物群落碳收支水平的影响, 设置 3 组试验。分别控制其中 2 个自变量为同一等级, 得到另一个自变量对碳收支量的影响, 排除自变量之间相互影响的误差, 提高研究结果的准确性。

通过试验发现, 植物群落的碳收支量均随着郁闭度、栽植密度和乔灌木比例提高而增加, 达到一定值时碳收支量为最大值, 随后降低。张婉茹^[25]通过对比 30 个植物群落的单位面积土地固碳量, 得出当植物群落郁闭度在 0.36 ~ 0.65 或 0.75 以上时, 固碳效益随群落郁闭度的提高而增强, 这与本文的研究结论略有不同。徐飞等^[26]评估城市森林固碳能力, 得到城市森林的郁闭度与碳密度和固碳率呈现出明显的正相关关系, 并且随着郁闭度的提高而明显增强。本研究发现植物群落郁闭度在 0.75 以下时, 碳收支量随着郁闭度的提高而增强, 超过 0.75 时碳收支量下降, 固碳效益降低。何晶^[27]发现, 群落栽植密度越大的植物群落, 在一定的树木种类和规格条件下, 其净碳固定量越大, 当栽植密度超过一定范围时, 碳固定量随之减少, 这与本研究结论一致。依兰等^[28]也认为具有中等栽植密度的植物群落, 其固碳能力明显高于高栽植密度与低栽植密度的植物群落的固碳能力。栽植密度过大会造成生存空间缩小, 植物的生存空间对固碳产生较大影响。可通过调节栽植密度优化植物生存环境, 合理设计植物群落结构, 提高固碳能力。乔木与灌木竞争光照、养分及水分, 通过适当的乔灌木比例创造有利于植物固碳的条件。乔木占比大会导致公园绿地的植物群落层次结构单一, 而灌木占比大则导致养护管理产生的碳排放量增多。本研究发现, 乔木与灌木之比为 0.25 ~ 0.50 时, 可兼顾观赏及固碳功能, 而张颖^[29]研究得出乔灌木之比为 50% ~ 70% 时固碳效益较高, 这是由于研究地域及环境条件不同, 本研究区域位于公园绿地内, 与建筑垃圾堆山公园的环境条件有较大区别, 植物群落的固碳效益因此存在一定差异性。

通过估算植物群落养护管理主要环节——灌溉、修剪、施肥、施农药产生的碳排放量, 以降低养护碳排放为主要目标, 进一步优化养护管理方式, 实现植物养护低碳可持续。萧箫等^[16]以上海 49 个公园为例, 估算植物养护管理各环节 CO₂ 排放量, 得出以自来水灌溉比河水灌溉产生的碳排放多, 同时发现耗电和灌溉所产生的碳排放占比较大, 这与本研究结论一致。黄柳菁等^[30]的研究也表明, 灌溉产生的碳排放量占公园绿地养护碳排放量的 64%, 而修剪产生的碳排放量只占公园绿地养护碳排放量的 9% ~ 19%, 因此采取合理方式节约用水是今后公园绿地减少碳排放量的重点, 节水型灌溉技术能很大程度上降低水资源浪费, 减少碳排放量。张颖^[31]通过核算草坪碳收支量, 得出草坪始终为碳源的结论, Strohbach 等^[32]认为降低草坪修剪频率可减少 70% 的碳排放量, 通过栽植多年生草种或选择其他草坪草覆盖的方式以降低草坪修剪频率。因此降低养护频率, 推广近自然式植物群落, 对植物群落碳汇会起到正向作用。植物群落结构也会影响 CO₂ 排放, 栽植密度和乔灌木比例是主要的影响因素, 植株数偏大时, 灌溉、施肥、农药的需求量相应增多。此外, 大乔木的生长已较为稳定, 养护管理频次相对较少, 而灌木生长需要修剪、灌溉、施肥等, 养护频次较多, CO₂ 排放量相应增多。降低各环节养护管理的碳排放量是提高植物群落碳收支水平的重要渠道, 通过调整植物养护策略以降低能源消耗是今后高效低碳植物群落的研究重点。

4.2 结论

本研究采用 i-Tree 软件估算植物群落固碳量, 养护管理周期评价法估算碳排量, 通过控制变量法分析杭州环西湖公园绿地碳收支水平的影响因素。根据调研及试验的结果得到, 郁闭度、栽植密度、乔灌木比例对植物群落的碳收支水平有一定影响。碳收支量随着郁闭度、栽植密度和乔灌木比例的等级提高而增加, 但郁闭度、

栽植密度、乔灌木比例过高会导致植物生长空间受限,进而影响碳收支水平。研究得出,植物群落郁闭度为0.50~0.75,栽植密度和乔灌木比例分别在375~750株·hm⁻²和0.25~0.50,植物群落的碳收支水平最高。在今后公园绿地植物群落设计时,结合生态效益、美学价值及游憩等多种功能需求,以适当的郁闭度、栽植密度和乔灌木比例设计植物群落,为公园绿地固碳提供有利条件。

参考文献:

- [1] XI C, DING J, WANG J, et al. Nature-based solution of greenery configuration design by comprehensive benefit evaluation of microclimate environment and carbon sequestration[J]. *Energ Build*, 2022, 270: 112264.
- [2] IDEM R, TONTIWACHWUTHIKUL P. Preface for the special issue on the capture of carbon dioxide from industrial sources: Technological developments and future opportunities[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2006, 45 (8): 2413.
- [3] JO H K, KIM J Y, PARK H M. Carbon reduction and planning strategies for urban parks in Seoul[J]. *Urban For Urban Green*, 2019, 41: 48-54.
- [4] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 2008, 319 (5864): 756-760.
- [5] MITCHELL M G E, JOHANSEN K, MARON M, et al. Identification of fine scale and landscape scale drivers of urban aboveground carbon stocks using high-resolution modeling and mapping[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 622-623: 57-70.
- [6] 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.
- [7] 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 (5): 17-23.
- [8] JO H K, KIM J Y, PARK H M. Carbon and PM_{2.5} reduction and design guidelines for street trees in Korea[J]. *Sustainability*, 2020, 12 (24): 10414.
- [9] 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(园林花卉版)*, 2010, 4 (4): 44-48.
- [10] ARILUOMA M, OTTELIN J, HAUTAMÄKI R, et al. Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki[J]. *Urban For Urban Green*, 2021, 57: 126939.
- [11] 刘利. 基于 i-Tree Eco 模型城市绿地的生态效益分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.
- [12] 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.
- [13] 刘瀚洋, 陈步金, 赵兵. 基于生命周期(LCA)的园林碳排放评价初探[J]. *中国城市林业*, 2013, 11 (6): 11-14.
- [14] JO H K, MCPHERSON G E. Carbon storage and flux in urban residential greenspace[J]. *J Environ Manag*, 1995, 45 (2): 109-133.
- [15] OLIVER-SOLÀ J, NÚÑEZ M, GABARRELL X, et al. Service sector metabolism: Accounting for energy impacts of the Montjuic Urban Park in Barcelona[J]. *J Ind Ecol*, 2007, 11 (2): 83-98.
- [16] 萧箫, 陈彤, 郑中华, 等. 上海公园绿化养护碳排放量计算研究[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2013, 31 (1): 67-71.
- [17] 冀媛媛, 罗杰威. 景观全生命周期日常使用和维护阶段碳排放影响因素研究[J]. *风景园林*, 2016, 23 (9): 121-126.
- [18] 龙婷, 陈杰, 杨蓝, 等. 极小种群东北红豆杉所在群落特征及其环境解释[J]. *植物科学学报*, 2020, 38 (1): 77-87.
- [19] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Japan: IGES, 2006: 327-329.
- [20] 国家统计局能源统计司. 2020中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020: 355-356.
- [21] 张令玉. 生物低碳农业[M]. 北京: 中国经济出版社, 2010: 31-32.
- [22] 许秀成. 减排、低碳时代的肥料—从低碳经济出发构建我国肥料新体系[J]. *磷肥与复肥*, 2010, 25 (3): 1-3.
- [23] 刘洪涛, 陈同斌, 郑国砥, 等. 有机肥与化肥的生产能耗、投入成本和环境效益比较分析—以污泥堆肥生产有机肥为例[J]. *生态环境学报*, 2010, 19 (4): 1000-1003.
- [24] 冀媛媛, 罗杰威, 王婷, 等. 基于低碳理念的景观全生命周期碳源和碳汇量化探究—以天津仕林苑居住区为例[J]. *中国园林*, 2020, 36 (8): 68-72.
- [25] 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.
- [26] 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]. *生态学杂志*, 2010, 29 (3): 439-447.
- [27] 何晶. 基于全生命周期的城市绿地乔木群落碳收支研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [28] 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 (3): 36-43.
- [29] 张颖. 建筑垃圾堆山公园植物群落固碳效益量化与优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [30] 黄柳菁, 张颖, 邓一荣, 等. 城市绿地的碳足迹核算和评估—以广州市为例[J]. *林业资源管理*, 2017 (2): 65-73.
- [31] 张颖. 基于生命周期法的城市绿地优势种碳收支研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2022.
- [32] STROHBACH M W, ARNOLD E, HAASE D. The carbon footprint of urban green space: A life cycle approach[J]. *Landscape Urban Plan*, 2012, 104 (2): 220-229.