浙 江 农 林 大 学 学 报，2018，**35**(5)：829-835
Journal of Zhejiang A&F University
doi:10.11833/j.issn.2095-0756.2018.05.006

杭州花港观鱼公园森林固碳效益评估

施健健[1]，蔡建国[1]，刘朋朋[1]，魏云龙[2]

（1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院，浙江 杭州 311300；2. 浙江省林业勘测规划设计有限公司，浙江 杭州 310020）

摘要：为构建固碳高效的城市森林，以杭州花港观鱼公园为研究对象，对公园的植物种类以及植物群落结构进行详细的实地调研，运用 i-Tree 模型 Eco V 6.0 模块对公园的固碳效益进行评估研究。结果表明：①花港观鱼公园内有树木 5 726 株，隶属 43 科 79 属 119 种；5 类优势种桂花 *Osmanthus fragrans*，山茶 *Camellia japonica*，鸡爪槭 *Acer palmatum*，水杉 *Metasequoia glyptostroboides* 和广玉兰 *Magnolia grandiflora* 共计 2 386 株，占总数的 41.70%；园内常绿树种占 52.17%，落叶树种占 47.83%；阔叶树种占 86.74%，针叶树种占 13.26%；树木胸径在 7.60~<15.20 cm 最多，分布呈现“中间多，两边少”的趋势。花港观鱼公园 Margalef 丰富度指数为 13.64，Simpson 指数为 0.95。②2016 年花港观鱼公园固碳量约 54.95 t·a^{-1}，效益约 6.59 万元·a^{-1}；公园总碳储量约 806.90 t，效益约 968.28 万元；大树(胸径≥30.00 cm 的树木)数量占全园树木 24.54%，其固碳量约占全园总量的 58.51%；公园内固碳能力较强的树种包括樟树 *Cinnamomum camphora*，枫杨 *Pterocarya stenoptera*，广玉兰等。与 12 个北美城市相比，花港观鱼公园的树木固碳量较高。图 4 表 2 参 15

关键词：森林生态学；i-Tree 模型；固碳效益；年固碳量；碳储量；花港观鱼公园

中图分类号：S718.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2018)05-0829-07

Forest carbon storage function value at Hangzhou Huagangguanyu Park

SHI Jianjian[1], CAI Jianguo[1], LIU Pengpeng[1], WEI Yunlong[2]

(1. School of Landscape and Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Forestry Survey Planning and Design Company Limited, Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

Abstract: To provide a scientific basis for building a carbon-efficient urban forest, a detailed study of the plant species and community structure, based on work done at the Hangzhou Huagangguanyu Park, was conducted using i-Tree model Eco V 6.0 to evaluate the carbon storage function value of the park. Referred to i-Tree model user's manual, a systematic survey was done with per-wood survey method for the data required by the study. Evaluation also included use of the Margalef index and the Simpson index. Results showed (1) a total of 5 726 trees in the study area belonging to 43 families, 79 genera, and 119 species. Five types of dominant tree species, including *Osmanthus fragrans*, *Camellia japonica*, *Acer palmatum*, *Metasequoia glyptostroboides*, and *Magnolia grandiflora*, in total of 2 386 trees, accounted for 41.70%. Evergreen species in the garden accounted for 52.17% and deciduous species 47.83%; broadleaf species accounted for 86.74% and coniferous species 13.26%. Most trees in the park were in the DBH range of about 7.60-<15.20 cm and were mainly distributed in the middle. The overall Margalef index for the park was 13.64, and the Simpson index was 0.95. (2) Carbon sequestration for the park in 2016 was about 54.95 tons, worth 65.9 thousands Renminbi Yuan, and the total carbon storage was about 806.90 tons, worth 968.28 million Renminbi Yuan. Trees with a DBH ≥30.00 cm accounted for 24.54% of all garden trees, and had a carbon content of about 58.51% of the total park. Tree species with the strongest carbon sequestration in the park were *Cinnamomum camphora*, *Pterocarya*

收稿日期：2017-09-04；修回日期：2017-11-27

作者简介：施健健，从事园林植物景观规划设计及生态效益研究。E-mail：shijianjian_wyyx@163.com。通信作者：蔡建国，副教授，从事园林景观设计和生态效益等研究。E-mail：yuanlinzhiwu@163.com

stenoptera, and *Magnolia grandiflora*. Overall, compared to 12 North American cities, Huagangguanyu Park had a high carbon sequestration rate. [Ch, 4 fig. 2 tab. 15 ref.]

Key words: forest ecology; i-Tree model; carbon storage function value; annual gross carbon sequestration; carbon storage; Hangzhou Huagangguanyu Park

城市是人类文明的重要组成部分，也是人类活动与自然环境高度复合的独特生态系统[1]。中国的城市化进程不断加速，随之也产生了一系列环境问题，其中以二氧化碳为代表的温室气体排放即成为了普遍关注的热点。有研究表明，全球城市地区的温室气体排放量达到了世界总量的 80%[2]。周葵等[3]在对中国城市化进程与碳排放量关系的研究中发现，城市化率的提高将引起碳排放量的增加，当城市化率提高 1%，碳排放量以 1.61%的比率增加。城市作为碳排放的主要区域正对全球的可持续发展提出新的挑战[4]。森林具有显著吸收二氧化碳的作用[5]，其面积虽然只占陆地总面积的 1/3，但森林植被区的碳储量几乎占到了陆地碳库总量的 2/3[6]。低碳城市的建设呼唤着城市森林。近年来，随着社会发展与技术进步，对城市森林生态效益的评估研究已经由原来的传统方法，如 Council of Tree and Landscape Apprais (CTLA)法、Amenity Valuation of Trees and Wood(AVTW)法、碳税法、造林成本法等，逐步发展到计算机模型测算法[7-8]。i-Tree 模型是由美国林务局开发的一种先进评估工具套装，主要提供城市林业分析和生态效益评估服务，由于其灵活性、准确性而得到了越来越广泛的应用。本研究以杭州花港观鱼公园作为研究对象，通过 i-Tree V 6.0 模型 Eco 模块分析评估该公园的固碳效益，为城市森林如何发挥最大的固碳生态效益提供一定的参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

杭州市地处中北亚热带过渡区，属亚热带季风气候，四季分明，温和湿润，光照充足，雨水充沛。截至 2016 年，杭州市城市化率已经达 76.2%。杭州市生态环境优越，全市森林覆盖率超过 65%，建成区绿化覆盖率约 40%。作为全国首批低碳城市试点之一，杭州早在 2008 年便出台了《杭州市建设低碳城市工作方案》[9]。

花港观鱼公园为西湖十景之一，位于杭州西湖西南角，总面积约 32.8 hm^2，是西湖南片的中心景区。园内港汊纵横，花木繁茂，将中国传统园林造景艺术与西方造园手法巧妙结合，是中国园林规划设计和建设的优秀典范[10]。

1.2 调查方式与内容

参照 i-Tree Eco V 6.0 用户手册，采用每木调查法对花港观鱼公园内的植物现状进行系统调查。根据研究所需数据，调查主要包括植物种类、植物数量、树木胸径、树高、东西冠幅、南北冠幅、枝下高、冠高、健康状况、冠缺率、树木生长类型、所测乔木距建筑物的距离等内容。

1.3 固碳功能效益评估方法

研究通过将前期调查数据经过整理后输入 Excel 表格，而后导入至 Access 数据库中，经过格式化处理后保存为 mdb 格式文件，最后导入 i-Tree V 6.0 中。根据杭州市实际情况定义效益成本参数，并依据就近原则选定位于 30.22°N，120.43°E 的气象数据定义气象参数。在将树种信息导入 i-Tree 时，需要根据 Eco 模块树种目录“Specied List”进行匹配。i-Tree Eco 计算分析森林固碳效益是利用异速生长方程测量各株树木的生物量。如果一个树种没有与之对应的异速生长方程，则可采用同一个属的生长方程预测结果的平均值。如果没有同一个属的生长方程，则可采用所有阔叶树种或者针叶树种生长方程的平均值。Eco 的树种数据库主要是基于美国 16 个参考城市(代表美国的 16 个气候分区)的树种信息建立，若花港观鱼公园的树种在 Eco 的树种数据库中没有相对应的树种，则需要查阅该缺失树种的属性值，匹配属性相近的同属或同叶型树种数据进去。最后，将所有数据发送至美国林务局处理中心，经过分析处理后，又将分析报告发还至本地客户端。分析报告中的固碳结果最终是以调查树木的年固碳量与总碳储量的形式展现。

2　结果与分析

2.1　公园树木结构与生物多样性分析

i-Tree 对城市森林年固碳效益的计算基础是树木生长模型，它根据树木的属性自动分析城市树木吸收二氧化碳和间接减排的效率，并依此计算出各树木每年的固碳量。根据碳排放税征收标准，对城市森林碳吸收能力做具体的经济价值估量[7]。因此，最终固碳效益的结果与城市森林的树种组成、群落结构、径级分布、树冠覆盖度、树的健康状况等都有一定的关系。

2.1.1　*树木组成分析*　通过调查花港观鱼公园 5 726 株树木分析得出，花港观鱼公园内共有 119 种树种，分属 43 科 79 属。其中木犀科 Oleaceae，蔷薇科 Rosaceae，山茶科 Theaceae，槭树科 Aceraceae 和木兰科 Magnoliaceae 所占比例较大，占所调查树木总数的 53.68%。公园优势种为桂花 *Osmanthus fragrans*，山茶 *Camellia japonica*，鸡爪槭 *Acer palmatum*，水杉 *Metasequoia glyptostroboides* 和广玉兰 *Magnolia grandiflora*，共计 2 386 株，占总数的 41.70%。主要树种数量及比例如表 1 所示。由表 1 得出：花港观鱼公园现有的植物群落总体表现为常绿和落叶相均衡的林相。由调查可知：公园内常绿树和落叶树所占比例相近，常绿树共计 2 987 株，占总数的 52.17%，落叶树总计 2 739 株，占总数的 47.83%。而公园内阔叶树与针叶树比例则相差较大，阔叶树共计 4 967 株，占总数的 86.74%；针叶树共计 759 株，仅为总数的 13.26%，两者相差近 7.00 倍。花港观鱼公园内植物群落结构稳定，不同层次植物数量保持和谐的关系。

表 1　花港观鱼公园主要树种(株数＞100)

Table 1　Main tree species of Hangzhou Huagangguanyu Park (number＞100)

序号	树种	科属	数量/株	类型	数量比/%
1	桂花 *Osmanthus fragrans*	木犀科木犀属	898	常绿阔叶乔木	15.70
2	山茶 *Camellia japonica*	山茶科山茶属	499	常绿阔叶灌木	8.70
3	鸡爪槭 *Acer palmatum*	槭树科槭属	459	落叶阔叶乔木	8.00
4	水杉 *Metasequoia glyptostroboides*	杉科水杉属	321	落叶阔叶乔木	5.60
5	广玉兰 *Magnolia grandiflora*	木犀科木犀属	209	常绿阔叶乔木	3.70
6	垂丝海棠 *Malus halliana*	蔷薇科苹果属	191	落叶阔叶乔木	3.30
7	紫薇 *Lagerstroemia indica*	千屈菜科紫薇属	162	落叶阔叶乔木	2.80
8	垂柳 *Salix babylonica*	杨柳科柳属	162	落叶阔叶乔木	2.80
9	杜英 *Elaeocarpus decipiens*	杜英科杜英属	160	常绿阔叶乔木	2.80
10	樟树 *Cinnamomum camphora*	樟科樟属	143	常绿阔叶乔木	2.50
11	无患子 *Sapindus mukorossi*	无患子科无患子属	132	落叶阔叶乔木	2.30
12	樱花 *Prunus serrulata*	蔷薇科樱属	108	落叶阔叶乔木	1.90

2.1.2　*树木胸径分布分析*　为了便于统计，i-Tree 将树木的胸径等级划分为包括＜7.60，7.60~＜15.20，15.20~＜30.50，30.50~＜45.70，45.70~＜61.00，61.00~＜76.20，76.20~＜91.40，91.40~＜106.70，≥106.70 cm 等 9 个等级。数据显示，花港观鱼公园内树木的胸径在 7.60~＜15.20 cm 最多。作为优势树种的桂花、山茶、鸡爪槭胸径都以＜15.20 cm 为主，分别占其总数的 67.30%，99.00%和 89.60%，这既符合它们本身的生长规律，同时说明公园方面也在不断对这些树种进行更新补充。而整个园区胸径在＞91.40 cm 区间的树木约为 14 株，其中樟树和枫杨各占了 5 株，公园最大的树为 1 株胸径 110.10 cm 的樟树，所以樟树、枫杨等树种构成了园区的骨干树种。这些树都是公园 50 多年历史的见证，应该大力保护。树木胸径分布如图 1 所示。

2.1.3　*物种多样性分析*　本研究采用物种丰富度指数 Margalef(d)和度量群落优势度的 Simpson 指数(D)作为花港观鱼公园物种多样性的测量指标[11]。①物种丰富度指数 $d_{ma}=(S-1)/\ln N$。其中：S 表示物种数，N 表示个体总数。Margalef 指数反映花港观鱼公园的物种丰富度。通过对数据的分析整理，得出本次调查的花港观鱼公园物种整体丰富度指数为 13.64。对公园内 85 个不同群落类型的样地分别测算其物种丰富度可以发现，混合型植物群落物种相对单一型植物群落更为丰富，其中常绿落叶阔叶混交型群落

的丰富度指数最高，达 1.75。各群落类型物种丰富度指数从高到低排序为 1.75(常绿落叶阔叶混交型)＞1.58(针阔混交型)＞1.33(竹阔混交型)＞0.89(常绿阔叶型)＞0.56(落叶阔叶型)＞0.25(针叶型)。

②物种多样性指数 $D=1-\sum_{i=1}^{N}P_i^2$。其中：D 为 Simpson 指数，$P_i=N_i/N$，N_i 为第 i 个物种在群落中出现的个体数目，N 为群落中所有个体的总数目。Simpson 指数 D 越小，表示优势度物种越小，也就是丰富度越高。根据数据分析，得出花港观鱼公园的整体 Simpson 指数为 0.95。对公园内 85 个不同群落类型的样地分别进行测算，物种多样性指数从高到底排序为 0.73(常绿落叶阔叶混交型)＞0.72(针阔混交型)＞0.53(常绿阔叶型)＞0.40(竹阔混交型)＞0.36(落叶阔叶型)＞0.30(针叶型)。

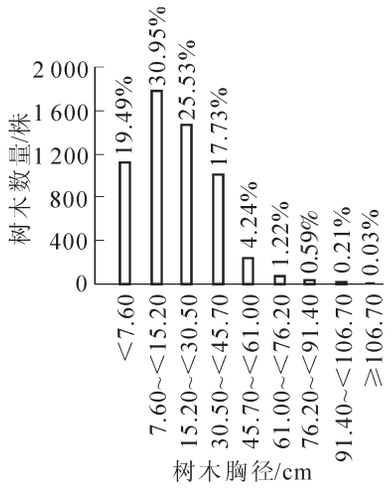

图 1 花港观鱼公园树木胸径分布

Figure 1 DBH distribution of trees at Hangzhou Huagangguanyu Park

2.2 公园固碳效益分析

树木通过光合作用将二氧化碳和水转化有机物并释放氧气，这一生理过程是植物固碳释氧的基本原理，然而城市森林通过吸收二氧化碳直接固碳的量不到城市碳排放量的 1%[7]。树木自身的呼吸作用以及枯枝落叶的腐败过程都是碳排放的过程[12]。i-Tree Eco 正是基于树木的生长模型，计算树木吸收大气中的二氧化碳和改变建筑物中的能源使用而间接减排的碳量，实现对城市森林固碳效益的评估[13]。计算树木在碳吸收方面的经济价值时采用瑞典碳税率固碳价格，即二氧化碳为 1.20 元·kg^{-1}[14]。

2.2.1 *年固碳效益分析* 城市森林通过直接吸收以及间接减排来减少大气中的碳含量，这个数值会随着树木的大小和健康而变化，一般来说每年固碳量都会增加。运用 i-Tree 模型对花港观鱼公园 5 726 株树木 2016 年固碳效益进行评估，得出公园年固碳量约 54.95 t·a^{-1}，效益约 6.59 万元·a^{-1}；全园单株树木年固碳量平均约 9.60 kg·$株^{-1}$·a^{-1}，效益约 11.52 元·$株^{-1}$·a^{-1}。以单株树木进行比较，悬铃木 *Platanus acerifolia* 的年固碳量最高，单株年固碳量达 46.47 kg·$株^{-1}$·a^{-1}，平均固碳效益约 55.61 元·$株^{-1}$·a^{-1}。公园年固碳量前 10 位的树种还包括枫杨 *Pterocarya stenoptera*，麻栎 *Quercus acutissima*，连香树 *Cercidiphyllum japonicum*，樟树，薄壳山核桃 *Carya illinoensis*，槲树 *Quercus dentata*，合欢 *Albizia julibrissin*，白栎 *Quercus fabri*，构树 *Broussonetia papyrifera*。这 10 种树木单株年加权平均固碳量达 35.09 kg·$株^{-1}$·a^{-1}。通过与其他树种比较可以发现，这些树以大树居多。由调查数据计算得到，全园树木平均胸径约 20.52 cm，这 10 种树木的平均胸径则达 47.50 cm，固碳效益最高的悬铃木单株树平均胸径更是达到了最高的 62.93 cm。基于此，根据花港观鱼公园树木实际情况，定义胸径≥30.00 cm 的树木为大树。经调查统计符合要求的大树占全园树木的 24.54%，约 1 405 株。2016 年公园大树的固碳量约 32.15 t·a^{-1}，占全园年固碳量的 58.51%，单株年固碳量达 22.89 kg·$株^{-1}$·a^{-1}，是全园树木平均数据的 2.38 倍。由此可见，大树的固碳能力较其他树木强。公园树木年固碳量前 10 位的树种如图 2 所示。为了减少胸径个体差异对固碳结果的影响，根据上文所划分的胸径等级，将全园树木分为 9 组，分组筛选出年固碳量≥全园树木平均值(9.60 kg·$株^{-1}$·a^{-1})且各组排名前 10 位的树种。不同胸径组树木年固碳量前 10 位的树种如表 2 所示。将表 2 中出现的树种名的频率进行统计，得到出现频率最高的 8 个树种依次为樟树、枫杨、广玉兰、垂柳、薄壳山核桃、白栎、麻栎、无患子，因此，可以认为这 8 种树种的年固碳能力较强。年固碳效益最低的树种为蒲葵 *Livistona chinensis* 和棕榈 *Trachycarpus fortunei*，这 2 种植物的单株树年固碳量平均仅为 0.75 kg·$株^{-1}$·a^{-1}，效益约 0.90 元·$株^{-1}$·a^{-1}。这主要是由于棕榈科 Palmae 植物生长速率相对较慢，生理代谢速度也相应较

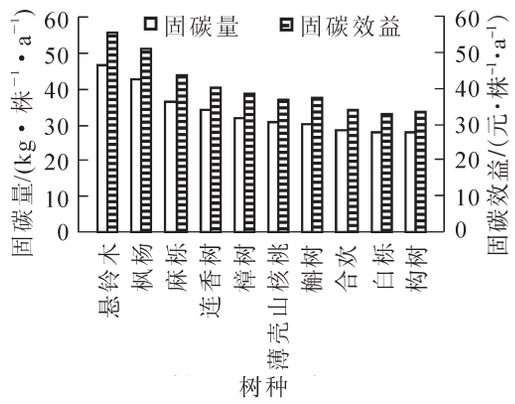

图 2 花港观鱼公园年固碳量前 10 位的树种

Figure 2 Top 10 trees of annual gross carbon sequestration at Hangzhou Huagangguanyu Park

表 2　花港观鱼公园各胸径等级年固碳量≥9.60 kg·株$^{-1}$·a^{-1} 且排名前 10 位的树种

Table 2　Top 10 tree species of annual gross carbon sequestration (while ≥ 9.60 kg·tree^{-1}·a^{-1}) in every DBH grades at Hangzhou Huagangguanyu Park

胸径≥106.70	91.40~<106.70	76.20~<91.40	61.00~<76.20	45.70~<61.00	30.50~<45.70	15.20~<30.50 cm
悬铃木	枫杨	香椿 *Toona sinensis*	薄壳山核桃	麻栎	麻栎	樱花 *Prunus serrulata*
樟树	樟树	枫杨	枫杨	薄壳山核桃	白栎	白栎
	广玉兰	樟树	白栎	白栎	薄壳山核桃	三角槭 *Acer buergerianum*
	连香树	垂柳	樟树	黄桷兰 *Michelia champaca*	黄桷兰	薄壳山核桃
		悬铃木	麻栎	香椿	垂柳	垂柳
		广玉兰	悬铃木	广玉兰	枫杨	龙爪槐 *Sophora japonica*
		雪松 *Cedrus deodara*	连香树	无患子	广玉兰	麻栎
		水杉	无患子	枫杨	樟树	无患子
			广玉兰	樟树	无患子	合欢 *Albizia julibrissin*
			黄桷兰	垂柳	香椿	银杏 *Ginkgo biloba*

慢，因此，公园内配置棕榈科植物时，尤其在杭州地区，需要考虑此因素。

2.2.2　*碳储量效益分析*　随着树木的生长，越来越多的碳被储存在树体中，但不同的树木所能储存的最大碳量是有差异的。i-Tree 模型通过文献数据以及生物量计算方程计算树木地上和地下部分的生物量，以此分析树木的碳储量。NOWAK[15]曾发现，城市开放栽植的树木所固定的碳量往往比森林衍生生物量方程所预测的要少。为了减小误差，模型将生物量计算方程的计算结果乘以相对误差比 0.8 进行调整。而碳储量则是通过计算得到的生物量乘以转化系数 0.5 得到。通过模型分析，花港观鱼公园内 5 726 株树木的碳储量约为 806.90 t，效益约 968.28 万元，全园单株树木平均碳储量约 140.92 kg·株$^{-1}$，效益约 169.10 元·株$^{-1}$。以单株树木进行比较，悬铃木的平均碳储量最高，达 1 400.59 kg·株$^{-1}$，效益约 1 680.71 元·株$^{-1}$。公园单株平均碳储量较高的树还包括枫杨，连香树，樟树，麻栎，合欢，薄壳山核桃，泡桐 *Paulownia fortunei*，香椿，白栎。与年固碳量类似的是，大树的碳储量仍然较高，这主要由于大树体积大，生物量含量高，树体内储存的碳量也相应较高。因此，公园在日常管理中，要格外注意大树的科学养护。花港观鱼公园平均碳储量最高的 10 种树如图 3 所示。

2.3　不同地区固碳量比较评估

i-Tree Eco V 6.0 提供了该模型对部分北美城市森林固碳量进行评估的数据。不同地区固碳量比较如图 4 所示。由图 4 可知：这些地区的城市森林树木年固碳量为 4.44 kg·株$^{-1}$·a^{-1}，最高的波士顿为 8.03 kg·株$^{-1}$·a^{-1}，花港观鱼公园为 9.60 kg·株$^{-1}$·a^{-1}，水平最高；12 个北美城市的树木单株加权平均碳储量为 128.93 kg·株$^{-1}$，最高的波士顿为 244.29 kg·株$^{-1}$，花港观鱼公园为 140.92 kg·株$^{-1}$，处于中等偏上水平。由此可见，花港观鱼公园树木的固碳量较高。

3　结论与讨论

3.1　结论

采用每木调查法对杭州花港观鱼公园内的所有乔木以及符合测量条件的灌木进行相关数据的调查研究，总计调查园内树木 5 726 株，隶属于 43 科 79 属 119 种，植物群落总体表现为常绿和落叶相均衡的林相。公园内大部分树木的胸径集中在 7.60~<15.20 cm，胸径分布总体呈现“中间多，两边少”的趋势。公园的 Margalef 指数为 13.64，Simpson 指数为 0.95，表明杭州花港观鱼公园树种丰富度水平较好，树种多样性水平较优异。对不同群落类型样地的多样性进行分析，则发现混合型植物群落物种相对单一型植物群落更为丰富。

应用 i-Tree 模型对杭州花港观鱼公园固碳效益进行评估可知：杭州花港观鱼公园 2016 年固碳量约 54.95 t·a^{-1}，生态效益约 6.59 万元·a^{-1}；总碳储量约 806.90 t，生态效益约 968.28 万元。其中悬铃木的固碳量最大，年固碳量达 46.47 kg·株$^{-1}$·a^{-1}，效益约 55.61 元·株$^{-1}$·a^{-1}；平均碳储量达 1 400.59 kg·株$^{-1}$·a^{-1}，效益约 1 680.71 元·株$^{-1}$·a^{-1}。大树(本研究定义胸径≥30.00 cm 的树木)的固碳能力要强于其他树木，数

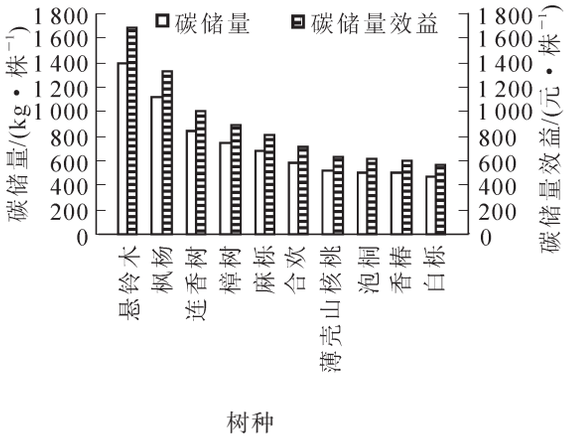

图 3 花港观鱼公园平均碳储量前 10 位的树种

Figure 3 Top 10 tree species of carbon storage at Huagangguanyu Park

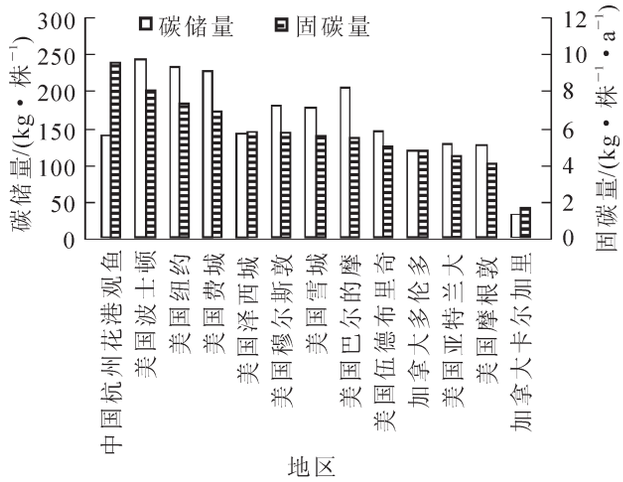

图 4 不同地区树木固碳量比较

Figure 4 Comparison of trees' carbon content in different regions

量占全园树木 24.54%的大树年固碳量约占全园总量的 58.51%，年固碳量达 22.89 kg·株$^{-1}$·a^{-1}，是全园树木平均数据的 2.38 倍。除去胸径大小对固碳量的影响，发现固碳能力较强的树种为樟树、枫杨、广玉兰、垂柳、薄壳山核桃、白栎、麻栎和无患子。

3.2 讨论

杭州花港观鱼公园植物个体的固碳能力较强，这与公园树木整体分布均匀，群落结构稳定，管理养护科学，各层次植物保持和谐发展密不可分，如此才能收获长期的固碳效益和景观效益。在建设固碳高效的城市森林时，应考虑选择固碳能力较强的树木作为骨干树种，例如樟树、枫杨、广玉兰等，再结合植物配置要求，配置大树以及其他层次植物，形成固碳效益与景观效益俱佳的城市森林。

本研究通过运用目前在生态效益评估领域国际领先的 i-Tree 软件，针对花港观鱼公园的生态环境和固碳价值做了一次有益的探索与尝试。然而由于模型内的部分参数是基于美国本土的生态环境及价值取向而确定的，因此会对研究结果的准确性产生一定的影响。这体现在树种匹配上，当公园内的树种在 Eco 的树种数据库中没有对应树种时，通过缺失树种的属性匹配相类似的树种是存在一定误差的。再者，本研究只对公园内的大型乔木或者小乔木进行了相关数据的调查与研究，没有对公园内的灌木以及草本等植物进行数据调查与统计，这对公园固碳效益的评估会有一定的影响；除去植物群落结构以外，杭州花港观鱼公园内存在着一定量的草地以及水体，这些公园内的基本元素构成对于固碳效益应有其相应的价值体现。城市森林的许多属性与特征都会直接影响其结构和功能，本研究考虑其结果由同一软件评估得出，即采用相同的基础数据类型以及算法，故而将杭州花港观鱼公园的固碳量同北美部分地区进行了简单的横向数据比较，旨在提供一定参考，并不能完全反映地区之间城市森林固碳能力差异。总的来说，本研究对杭州花港观鱼公园固碳效益评估的研究还有很多需要改进的地方。希望以此为起点，为今后城市森林固碳效益研究提供一定的参考，更好地服务中国的固碳效益评估研究。

4 参考文献

[1] 徐一鸣，张超，库伟鹏，等. 诸暨市不同绿地系统群落学特征与土壤养分的比较[J]. 浙江农林大学学报，2015，**32**(4)：537 – 544.

XU Yiming, ZHANG Chao, KU Weipeng, *et al.* Community characteristics and soil nutrients in different green space types of Zhuji City, Zhejiang [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2015, **32**(4): 537 – 544.

[2] 李宇，王喆，王菲，等. 城市碳排放的评估方法：影响要素和过程研究[J]. 自然资源学报，2013，**28**(9)：1637 – 1648.

LI Yu, WANG Zhe, WANG Fei, *et al.* A review of assessment methods, influencing factors and process on urban carbon emissions [J]. *J Nat Resour*, 2013, **28**(9): 1637 – 1648.

[3] 周葵，戴小文. 中国城市化进程与碳排放量关系的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境，2013，**23**(4)：41 – 48.

ZHOU Kui, DAI Xiaowen. An empirical study on the relationship between urbanization and carbon emission in China [J]. *China Popul Resour Environ*, 2013, **23**(4): 41 – 48.

[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 – 759.

[5] 刘鑫，张金池，谢德晋，等. 南京近郊麻栎林冠层蒸腾时间变化及降温效应[J]. 浙江农林大学学报，2015，**32**(4)：529 – 536.
LIU Xin, ZHANG Jinchi, XIE Dejin, *et al.* Temporal variation for canopy transpiration and its cooling properties in a *Quercus acutissima* forest of suburban Nanjing [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2015, **32**(4): 529 – 536.

[6] 李碧霞，区余端. 广东三岭山森林公园主要人工林碳汇功能及其经济价值评价[J]. 桉树科技，2015，**32**(4)：15 – 20.
LI Bixia, OU Yuduan. The evaluation of carbon sink function and economic value of plantations in Guangdong Three Ridge Hill Forest Park [J]. *Eucalypt Sci Technol*, 2015, **32**(4): 15 – 20.

[7] 李兴兴. 基于 i-Tree tools 的城市小区森林结构和效益的研究：以川农大都江堰校区为例[D]. 成都：四川农业大学，2012.
LI Xingxing. *Based on the Study of City Community Forest Structure and Efficiency of i-Tree Tools in Sichuan Agricultural University Dujiangyan Campus as an Example* [D]. Chengdu: Sichuan Agriculture University, 2012.

[8] 马宁，何兴元，石险峰，等. 基于 i-Tree 模型的城市森林经济效益评估[J]. 生态学杂志，2011，**30**(4)：810 – 817.
MA Ning, HE Xingyuan, SHI Xianfeng, *et al.* Assessment of urban forest economic benefits based on i-Tree model: research progress [J]. *Chin J Ecol*, 2011, **30**(4): 810 – 817.

[9] 禚振坤，吴洁珍，吴红梅，等. 杭州低碳城市建设的规划实践[C]// 中国城市规划学会. 城乡治理与规划改革-2014 中国城市规划年会论文集(07 城市生态规划). 北京：中国建筑工业出版社，2014：263 – 269.

[10] 包志毅. 借古开新，洋为中用：杭州花港观鱼公园评析[J]. 世界建筑，2014(2)：32 – 35.
BAO Zhiyi. Innovative park design using traditional and western characteristics: a case study of Hangzhou's Viewing Fish in Flower Pond Park [J]. *World Archit*, 2014(2): 32 – 35.

[11] 马克平，黄建辉，于顺利，等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究(Ⅱ)丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报，1995，**15**(3)：24 – 32.
MA Keping, HUANG Jianhui, YU Shunli, *et al.* Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China (Ⅱ) species richness, evenness and species diversities [J]. *Acta Ecol Sin*, 1995, **15**(3): 24 – 32.

[12] KREUTER U P, HARRIS H G, MATLOCK M D, *et al.* Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas [J]. *Ecol Econ*, 2001, **39**(3): 333 – 346.

[13] ABDOLLAHI K K, NING Z H, APPEANING A. *Global Climate Change and the Urban Forest* [M]. Baton Rouge: GCRCC and Franklin Press, 2000: 31 – 44.

[14] 中华人民共和国国家林业局. 森林生态系统服务功能评估规范：LY/T1271–2008[S]. 北京：中国标准出版社，2008.

[15] NOWAK D J. Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest [G]//USDA. *USDA Forest Service General Technical Report NE*-186, 1994: 83 – 94.