DOI: 10.20103/j.stxb.202308061681

曾鹿敏,赵毅辉,李同欣,高逸平,党秋伟,王懿祥.基于单木的城市绿地乔木碳汇计量及其空间分布特征——以平湖市为例.生态学报,2024,44(20):9209-9220.

Zeng L M, Zhao Y H, Li T X, Gao Y P, Dang Q W, Wang Y X.Measurement and spatial distribution characteristics of the carbon sink of urban garden trees based on single trees: a case study of Pinghu City.Acta Ecologica Sinica,2024,44(20):9209-9220.

基于单木的城市绿地乔木碳汇计量及其空间分布特征——以平湖市为例

曾鹿敏[1,2,3],赵毅辉[1,2,3,4],李同欣[1,2,3],高逸平[5],党秋伟[6],王懿祥[1,2,3,*]

1 浙江农林大学 环境与资源学院、碳中和学院,杭州 311300

2 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室,杭州 311300

3 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室,杭州 311300

4 浙江农林大学 林业与生物技术学院,杭州 311300

5 平湖市住房和城乡建设局,嘉兴 314050

6 浙江地信软件科技有限公司,杭州 311300

摘要:精准计量城市绿地乔木碳汇量是提高绿地碳汇能力的前提。以平湖为例,采用单木调查结合绿地类型方法计量城区乔木碳汇,聚类分析树种碳汇能力,空间自相关与热力图分析碳密度、碳汇速率空间分布特征,以辅助城市绿地合理布局。结果表明:(1) 平湖的附属绿地碳密度与碳汇速率最大,城市乔木绿地平均乔木碳密度(22.72 t C/hm^2)为中上水平,平均乔木碳汇速率(8.99 t CO_2e a^{-1} hm^{-2})高于非城市森林;(2) 硬阔 Ⅱ ((31.13±15.11) kg CO_2e/a)与硬阔 Ⅰ ((30.43±17.56) kg CO_2e/a)树种碳汇能力强于松类、软阔、杉类、柏类;(3) 城市乔木绿地乔木碳密度和碳汇密度具有空间聚集性,高值常沿道路呈条带状或沿水域呈团块状分布。研究方法和结论对于厘清城市绿地乔木的碳家底,管理和提升城市自然碳汇功能,促进城市碳中和具有重要的理论和实践意义。

关键词:城市绿地乔木;单木尺度;碳储量;碳汇;绿地类型;空间分布

Measurement and spatial distribution characteristics of the carbon sink of urban garden trees based on single trees: a case study of Pinghu City

ZENG Lumin[1,2,3], ZHAO Yihui[1,2,3,4], LI Tongxin[1,2,3], GAO Yiping[5], DANG Qiuwei[6], WANG Yixiang[1,2,3,*]

1 *College of Carbon Neutrality, College of Environment and Resources, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou* 311300, *China*

2 *State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou* 311300, *China*

3 *Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration of Zhejiang Province, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou* 311300, *China*

4 *College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou* 311300, *China*

5 *Pinghu Housing and Urban Rural Development Bureau, Jiaxing* 314050, *China*

6 *Zhejiang Geographic Information Technology Software Technology Limited Company, Hangzhou* 311300, *China*

Abstract: Accurately measuring the carbon sink of urban green trees is a prerequisite for improving the carbon sink capacity of green spaces. This article takes Pinghu City as an example, using a single tree survey combined with the green space type method to measure the carbon sink of urban trees, clustering analysis of the carbon sink capacity of tree species, and spatial autocorrelation and heat map analysis of carbon density and carbon sink rate spatial distribution characteristics to assist in

基金项目:金平湖数字创新应用实验室课题(H20230111);国家自然科学基金(31400607);浙江省自然科学基金(LY19C160007)

收稿日期:2023-08-06; **网络出版日期**:2024-07-26

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wangyixiang@ zafu.edu.cn

the rational layout of urban green spaces. The results showed that: (1) The carbon density and carbon sink rate of subsidiary green spaces were the highest in Pinghu, and the average tree carbon density of urban tree green spaces (22.72 t C/hm^2) was at the upper middle level. The average tree carbon sink rate (8.99 t CO_2e a^{-1} hm^{-2}) was higher than that of non-urban forests. (2) The carbon sequestration capacity of Hardwood Ⅱ ((31.13±15.11) kg CO_2e/a) and Hardwood Ⅰ ((30.43±17.56) kg CO_2e/a) was stronger than that of *Pinus*, Softwood, *Cunninghamia*, and *Cupressus*. (3) The carbon density and carbon sink density of trees in urban green spaces exhibited spatial clustering, with high values often distributed in strips along roads or in clusters along water bodies. The methods and conclusions of this study have important theoretical and practical significance for clarifying the carbon background of urban green space trees, managing and enhancing the natural carbon sink function of cities, and promoting urban carbon neutrality.

Key Words: urban garden trees; single tree scale; carbon storage; carbon sink; green space type; spatial distribution characteristics

在城市化进程与“双碳”目标背景下,城市绿地固碳作为城市生态系统中最重要的自然碳汇方式,对助力实现城市碳中和,减缓城市气候变暖具有重要意义[1—2],因此受到了广泛关注。然而现有研究表明:城市发展规划建设过程中存在的一些问题,如绿地类型结构单一、空间分布不均、作为城市绿地碳汇主体的乔木构成简单[3—4],限制了城市绿地碳汇潜力的充分发挥。针对这些问题,优化城市绿地空间布局与乔木配置结构不仅可以增加碳汇量,而且对于推动城市向碳中和目标迈进具有重要作用[5—6]。厘清城市绿地乔木“碳家底”与“碳格局”是管理与优化的前提[7],因此选择更加精确的方法对城市绿地乔木碳汇进行计量尤为重要。

尽管当前已有诸多学者对城市绿色空间开展了碳储量与碳汇量的研究,主要方法包括实地抽样调查法[8—12]、结合抽样调查和遥感法[13—14]、遥感反演法[15]以及生态效益价值评估模型模拟法[16—17],但这些方法均存在一定的局限性。例如,实地调查抽样法、结合抽样调查和遥感法抽样强度一般较低,对碳储量和碳汇量的估算精度有限。同时,遥感反演法在茂盛植被区域的应用精度尚需提高[18]。基于生态效益价值评估模型模拟法虽然操作简单、数据易得,但在国内的应用与发展还面临挑战[17]。

值得注意的是:现有多数研究的对象集中在城市森林[13,15]、公园[19]或绿地[8—9,20]的生态系统整体碳汇能力,而对城市乔木——尤其是行道树这一城市绿地中的重要组成部分的碳汇功能研究相对缺乏,限制了对于城市乔木碳汇能力的全面理解,也影响了乔木配置优化方面的决策。

鉴于此,本文旨在通过高抽样强度的实地调查,以单木为基本单元,精确探究城市乔木的单木固碳功能,并分析其碳汇能力的差异。通过摸清城市的乔木碳密度与碳汇速率空间分布格局,本研究将为优化城市绿地规划与乔木配置提供碳汇角度的科学依据。本文的科学问题聚焦于如何通过提高城市乔木碳储量与碳汇量的测量与估算精度,为城市绿地的碳汇功能优化和城市碳中和目标的实现提供支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省嘉兴市平湖市的城市建成区(30°39′39″—30°46′13″N,120°58′17″—121°4′38″E),城区面积约 4800 hm^2,主要位于钟埭街道、当湖街道与曹桥街道(图 1)。该区域处于杭嘉湖平原,境内地势平坦,海拔范围 0.4 m—13.3 m,为典型亚热带季风性湿润气候区,夏冬季风交替明显,酷热及严寒期均较短,全年无霜期约 225 d,年平均气温约 16 ℃,最低气温-5 ℃,最高气温 41 ℃,年平均日照时数约 2000 h,年平均降水量约 1170 mL。位于当湖街道中北部的东湖是平湖境内最大的湖泊,水域面积约 48.5 hm^2,占全市水域总面积的 1.08%。研究区道路网较密集,道路总长度约 269.47 km,交通便利,公共基础设施完善,区内常住人口约 40.15 万人,形成以现代服务业为主导、都市型工业为支撑的产业发展格局。平湖作为典型三线城市,自然经济社会发展较为均衡,以其城区乔木绿地作为研究对象,有利于进行上限拓宽与下限兼容,具有重要的参考价值。

1.2　数据来源及处理

1.2.1　城区乔木绿地数据

研究区乔木绿地数据源自平湖市住房和城乡建设局提供的平湖市城市建成区国土空间规划数据,并结合实地调查结果进行修正。参照《城市绿地分类标准》(CJJ/T85—2017)[21]、《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB50137—2011)[22],并结合研究区域实际情况,将研究区内乔木绿地空间分为附属绿地、公园广场绿地、生产绿地、防护绿地(图 2)。其中附属绿地包括道路附属、道路附属绿地、工业附属绿地、公共管理等附属绿地、公共设施附属、公用设施附属绿地、居住附属、居住附属绿地、商业附属、商业附属绿地、附属绿地、其他附属绿地,公园广场绿地包括防护绿地转公园绿地、公园绿地、广场用地。

图 1　研究区域区位图

Fig.1　Location map of the study area

1.2.2　固定单木两期数据

单木碳储量与碳汇量计量所需两期乔木生长因子数据,源自对平湖市城市建成区内 1646.08 hm^2 的全部绿地按面积 53.4% 的抽样比例进行每木调查(图 2)。调查内容包括树种、单木位置、胸径、树高、冠幅,调查时间为 2022 年 1 月至 4 月与 2023 年 1 月至 4 月。单木位置采用华测 GNSS-RTK(X5、i7 系列)定位,胸径采用胸径尺测量(精确至 0.01 cm),树高采用激光测高测距仪(Vertex Laser L5 型)测量(精确至 0.01 m)、冠幅采用手持式激光测距仪(DE120)测量(精确至 0.1 m)。

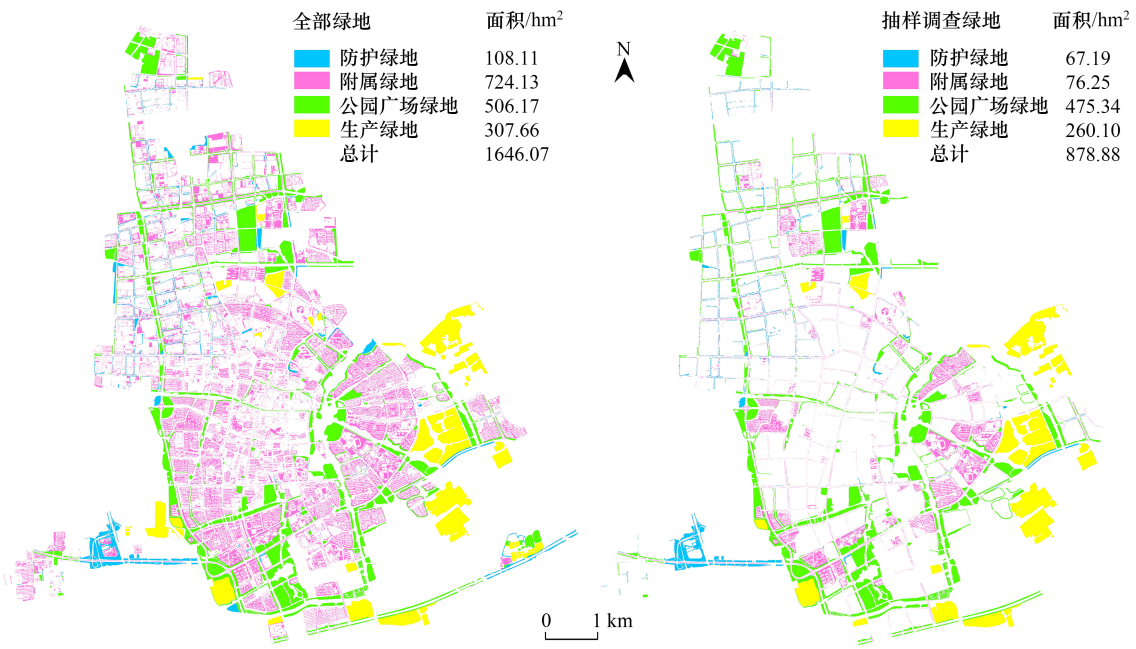

图 2　研究区域全部乔木绿地与抽样调查绿地空间分布图

Fig.2　Spatial distribution map of all tree green spaces and sampling survey green spaces in the study area

统计抽样绿地实地调查树种(表 1)可知抽样绿地乔木数量达 254775 株,采用克朗奎斯特分类法,并参考《园林树木学》(陈有民主编,第二版)进行乔木的科属归类。抽样绿地乔木共涉及 48 科 86 属 125 树种,超过

4000 株的共有 14 个树种(204823 株),占比达 80.39%。

表 1 平湖市抽样绿地乔木树种资源实地调查结果统计表

Table 1 Statistical table of field investigation results of tree species resources in sampling green spaces in Pinghu City

科 Families	属 Genus	种 Species	数量 Number/株	频数 Frequency/%
樟科(Lauraceae)	樟属	香樟(Citrus medica)	75826	29.76
木樨科(Oleaceae)	木樨属	桂花(Osmanthus fragrans)	16362	6.42
榆科(Ulmaceae)	榉属	榉树(Zelkova serrata)	14671	5.76
柏科(Cupressacea)	水杉属	水杉(Metasequoia glyptostroboides)	14094	5.53
银杏科(Ginkgoaceae)	银杏属	银杏(Ginkgo biloba)	14021	5.50
无患子科(Sapindaceae)	无患子属	无患子(Sapindus saponaria)	13404	5.26
蔷薇科(Rosaceae)	樱属	日本晚樱(Prunus serrulata var. lannesiana)	11165	4.38
杉科(Taxodiaceae)	落羽杉属	落羽杉(Taxodium distichum)	10384	4.08
大麻科(Cannabaceae)	朴属	朴树(Celtis sinensis)	6988	2.74
无患子科(Sapindaceae)	栾树属	栾树(Koelreuteria paniculata)	5991	2.35
木樨科(Oleaceae)	女贞属	女贞(Ligustrum lucidum)	5804	2.28
杜英科(Elaeocarpaceae)	杜英属	杜英(Elaeocarpus decipiens)	5757	2.26
杨柳科(Salicaceae)	柳属	垂柳(Salix babylonica)	5399	2.12
蔷薇科(Rosaceae)	李属	紫叶李(Prunus cerasifera 'Atropurpurea')	4957	1.95
其它 37 科(Other 37 subjects)	其它 72 属	其它 111 种	49952	19.61

1.3 研究方法

1.3.1 单木碳储量、碳汇量计量方法

(1)单木碳储量计量

采用江波等[23]、陶吉兴等[24]、华伟平等[25]构建的松类、杉类、硬阔 Ⅰ、硬阔 Ⅱ、软阔与柏类,共 6 种树种组的单木生物量模型计量单木各维度生物量。单木碳储量采用式 1 进行计量:

$$C_{Pi} = (W_{Si} + W_{Ci} + W_{Ri}) \times CF_i \quad (1)$$

式中:C_{Pi}为第 i 株立木的碳储量(kg C);W_{Si}、W_{Ci}、W_{Ri}分别为第 i 株立木的树干、树冠、树根生物量(kg);H_i、D_i、L_i 分别为第 i 株立木的树高(m)、胸径(cm)、冠幅(m);CF_i 为第 i 株立木的树种含碳系数(采用《森林生态系统碳储量计量指南》[26])。

(2)单木碳汇量计量

采用年度碳储量变化量法(式 2)计量单木尺度碳汇量:

$$\Delta C_{t,pi} = (C_{t+1,pi} - C_{t,pi}) \times 44 \div 12 \quad (2)$$

式中:$\Delta C_{t,pi}$为第 i 株立木 t 年的碳汇量(kg CO_2e);$C_{t+1,pi}$为 t+1 年初该立木的碳储量(kg C);$C_{t,pi}$为 t 年初该立木的碳储量(kg C)。

1.3.2 全区域碳储量、碳汇量计量方法

(1)各绿地类型乔木碳密度与碳汇速率计量方法

将抽样绿地乔木碳储量、碳汇量与面积按四类绿地进行分类汇总,得到各绿地类型乔木碳密度(式 3)与乔木碳汇速率(式 4)。

$$D_{t,ym} = \sum_{i=1}^{n} C_{t,pim} \div S_{ym} \div 1000 \quad (3)$$

$$D_{t,t+1,ym} = \sum_{i=1}^{n} \Delta C_{t,pim} \div S_{ym} \div 1000 \quad (4)$$

式中:$D_{t,ym}$为 t 年初抽样绿地 m 类绿地的乔木碳密度(t C/hm^2);$D_{t,t+1,ym}$为 t 年抽样绿地 m 类绿地的乔木碳汇速率(t CO_2e a^{-1} hm^{-2});$C_{t,pim}$为 t 年初抽样绿地内 m 类绿地上第 i 株乔木的碳储量(kg C);$\Delta C_{t,pim}$为 t 年抽样

绿地内 m 类绿地上第 i 株乔木的碳汇量(kg CO_2e);S_{ym}为抽样绿地 m 类绿地总面积(hm^2);m 为附属绿地、公园广场绿地、生产绿地、防护绿地四类绿地中一种;n 为抽样绿地内 m 类绿地的乔木总数。

(2)区域总量计量方法

将各绿地类型乔木碳密度与各类绿地总面积进行计算,从而得到基于单木尺度的全区域碳储量(式 5)与碳汇量(式 6)。

$$C_{t,qm}=D_{t,ym}\times S_{qm} \tag{5}$$

式中:$C_{t,qm}$为 t 年初全区域 m 类绿地总碳储量(t C);S_{qm}为全区域 m 类绿地总面积(hm^2)。

$$\Delta C_{t,qm}=(C_{t+1,qm}-C_{t,qm})\times 44\div 12 \tag{6}$$

式中:$\Delta C_{t,qm}$为 t 年全区域 m 类绿地总碳汇量(t CO_2e);$C_{t+1,qm}$为 t+1 年初全区域 m 类绿地总碳储量(t C)。

1.3.3　碳汇能力分层级方法

系统聚类是对多样本或指标按相似性与距离进行层级化分类的常用方法,可以显化数据内部联系,帮助进一步分析数据。其基本思想是将各样本或指标作为独立的类。选定相似性度量方法(如欧式距离、切比雪夫),计算各类之间的距离矩阵,将其中距离最近的两类合并为新类。根据合并后的聚类,更新距离矩阵,继续合并距离最近两类,直到所有的样本或指标聚为一类或达到需要的类数量。本研究以各科、属、种的平均单木年碳汇量为变量,采用组间连接方法与欧式距离测量依据,进行系统聚类分析,将不同的科、属、种聚类为碳汇能力强、较强、一般、较弱、弱 5 类。分别对应了第 1 到 5 层级。

欧式距离是常用的相似性度量方法,其公式(式 7)如下:

$$d_{ij}=\sqrt{\sum_{k=1}^{n}(x_{ik}-x_{jk})^2} \tag{7}$$

式中:d_{ij}为第 i 个样本与第 j 个样本的欧式距离;x_{ik}是第 i 个样本的第 k 个变量的值;x_{jk}是第 j 个样本的第 k 个变量的值;n 为样本的变量数量。

1.3.4　空间分析方法

(1)网格尺度乔木碳密度与碳汇速率汇算方法

对平湖市全部乔木绿地构建 10m×10m 网格,对抽样绿地所在网格进行碳密度与碳汇速率汇算,以将乔木点数据转换为面数据。网格尺度碳密度(式 8)与碳汇速率(式 9)汇算公式如下:

$$D_{t,wg}=\sum_{i=1}^{n}C_{t,piwg}\div 100 \tag{8}$$

$$D_{t,t+1,wg}=\sum_{i=1}^{n}\Delta C_{t,piwg}\div 100 \tag{9}$$

式中:$D_{t,wg}$为目标网格的 t 年初的乔木碳密度(kg C/m^2);$D_{t,t+1,wg}$为目标网格 t 年的乔木碳汇速率(kg $CO_2e\ a^{-1}\ m^{-2}$);$C_{t,piwg}$为该网格内的第 i 株乔木 t 年初碳储量(kg C);$\Delta C_{t,piwg}$为该网格的第 i 株乔木 t 年的碳汇量(kg CO_2e);n 为该网格内乔木总数。

(2)网格尺度乔木碳密度与碳汇速率空间插值方法

将网格数据赋值于网格中心点,据此对无实测乔木点数据的乔木绿地网格进行克里金(Kriging)插值,得到全部乔木绿地的网格尺度乔木碳密度与碳汇速率数据。克里金插值法公式(式 10、式 11、式 12)如下:

$$Z'_0=\sum_{i=1}^{n}(W_i\times Z_i) \tag{10}$$

式中:Z'_0 为待估点 Z_0 的估计值;Z_i 代表第 i 个已知点的属性值;W_i 代表第 i 个已知点的权重;n 为可以决定该点属性值的点数量(一般取该点周边一定数量的已知点)。

$$\gamma_{ij}=\frac{(Z_i-Z_j)^2}{2} \tag{11}$$

式中:γ_{ij}表示第 i,j 个已知点之间的半方差;Z_j 代表第 j 个已知点的属性值。

选择合适的函数形式,拟合函数 $\gamma=f(d)$。待求点位置已知,可得 $d_{10},\cdots,d_{n0}$,代入函数得到 $\gamma_{10},\cdots,\gamma_{n0}$,计算矩阵乘式:

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \cdots & \gamma_{nn} \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中:λ 是常数;第 0 个领域点表示待求点本身。

最后完成待估点 Z_0 的估值。

(3)网格尺度乔木碳密度与碳汇速率热点分析方法

提取热力图栅格数据值到网格中心点,采用局部莫兰指数(Anselin Local Moran′s I)进行热点分析。相比全局莫兰指数(Moran′s I),局部莫兰指数可以评估局部的要素之间的关系,其值域为[-1,1]。大于 0 表示数据呈现空间正相关,值越大空间相关性越明显;小于 0 表示负相关,值越小空间差异越大;0 表示空间呈随机性。再根据高值与低值的空间关系将要素分为高-高、高-低、低-低、低-高四种集聚类型。局部莫兰指数公式(式 13)如下:

$$I_l = \frac{(z_l - \bar{z})^2}{S^2} \sum_{j=1}^{k} (W_{lj} \times (z_j - \bar{z})) \tag{13}$$

式中:I_l 为第 l 株乔木的局部莫兰指数值;z_l 和 z_j 分别为第 l 株、第 j 株乔木的变量值;$\bar{z}$ 为该变量均值;S^2 为该变量方差;W_{lj}是第 l 株、第 j 株乔木之间的空间权重,设定两乔木相邻则为 1,否则为 0;k 为全部乔木数量。

2 结果与分析

2.1 不同绿地乔木碳密度与碳汇速率

经计量,2023 年平湖市城区绿地乔木总碳储量 37393.07 t C,2022 年总碳汇量 14793.97 t CO_2e。2023 年初平湖城区防护绿地乔木碳密度 16.22 t C/hm^2,乔木碳汇速率 5.96 t CO_2e a^{-1} hm^{-2};附属绿地乔木碳密度 33.61 t C/hm^2,乔木碳汇速率 11.92 t CO_2e a^{-1} hm^{-2};公园广场绿地乔木碳密度 15.26 t C/hm^2,乔木碳汇速率 6.83 t CO_2e a^{-1} hm^{-2};生产绿地乔木碳密度 11.62 t C/hm^2,乔木碳汇速率 6.69 t CO_2e a^{-1} hm^{-2};平均乔木碳密度 22.72 t C/hm^2,乔木碳汇速率 8.99 t CO_2e a^{-1} hm^{-2}(图 3)。

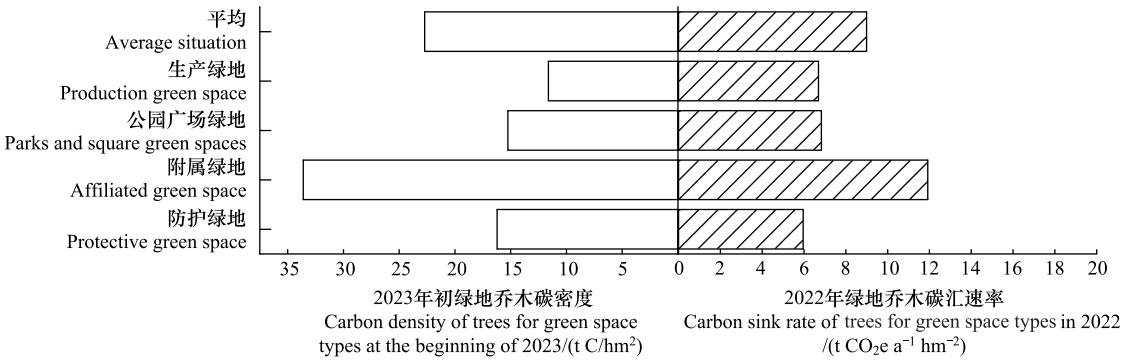

图 3 各类城市绿地乔木碳密度与碳汇速率图

Fig.3 Diagram of carbon density and carbon sink rate of various urban green space trees

2.2 城市绿地乔木碳汇能力

2.2.1 不同乔木类型碳汇能力

对不同科类乔木的单木碳汇能力进行聚类(图 4)发现:第 1 层级的有悬铃木科((76.67±31.96) kg CO_2e/

a)和桃金娘科((75.37±0.69) kg CO_2e/a);能力最弱的为卫矛科((5.43±0.31) kg CO_2e/a)。按不同属进行聚类分析(图 5)发现:第 1 层级的有悬铃木属((76.67±31.96) kg CO_2e/a)和桉属((75.37±0.69) kg CO_2e/a);能力最弱的为樱属((2.48±1.21) kg CO_2e/a)。对不同种进行聚类(图 6),结果表明:三球悬铃木((80.43±33.58) kg CO_2e/a)、大叶榉树((78.67±1.22) kg CO_2e/a)、柠檬桉((75.37±0.69) kg CO_2e/a)处于第 1 层级;第 2 层级 8 个树种中,二球悬铃木(*Platanus acerifolia*)能力最强,为(64.06±9.71) kg CO_2e/a,皂荚(*Gleditsia sinensi*)最弱,为(46.38±7.99) kg CO_2e/a;125 种树种中梅(*Prunus mume*)最弱。树种平均单木碳汇能力为(21.12±4.07) kg CO_2e/a。

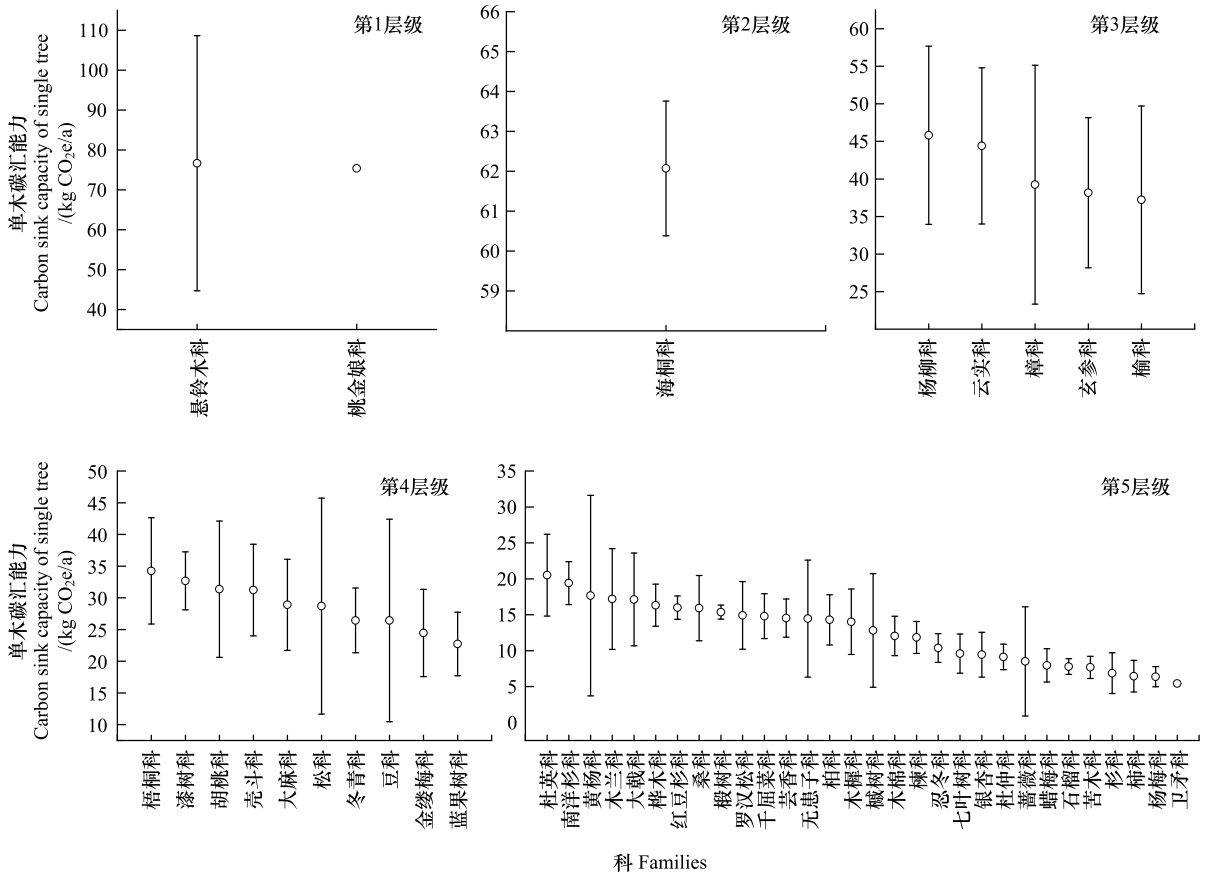

图 4　不同科的城市绿地乔木单木碳汇能力聚类层级图

Fig.4　Clustering hierarchy diagram of carbon sink capacity of single tree in urban green space of different Families

图中数据为平均值±标准差

2.2.2　不同树种组碳汇能力

不同树种组按乔木单木碳汇能力排序:硬阔Ⅱ((31.13±15.11) kg CO_2e/a)>硬阔Ⅰ((30.43±17.56) kg CO_2e/a)>松类((27.72±16.83) kg CO_2e/a)>软阔((3.94±5.68) kg CO_2e/a)>杉类((11.44±4.84) kg CO_2e/a)>柏类((5.32±1.87) kg CO_2e/a)(图 7)。

2.3　城市绿地的乔木碳密度与乔木碳汇速率空间分布特征

平湖市城市绿地乔木碳密度与乔木碳汇速率呈空间聚集性分布特征,且西侧与东湖沿岸相对较高。乔木碳密度高值主要沿西侧道路呈条带状聚集,环中部东湖呈团块状聚集,以及零散高值团块状分布。乔木碳汇速率高值较碳密度新增西北部片状高值区(图 8 与图 9)。

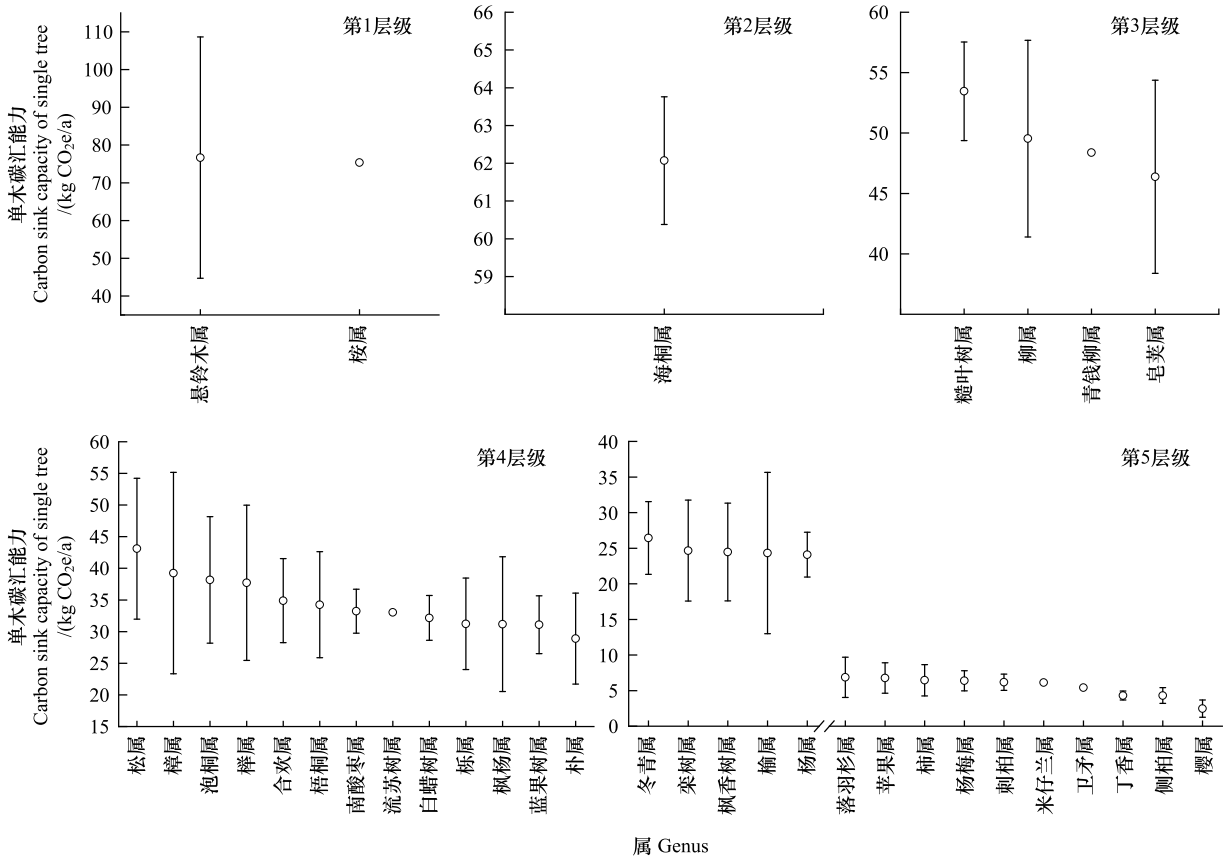

图 5 不同属的城市绿地乔木单木碳汇能力聚类层级图

Fig.5 Clustering hierarchy diagram of carbon sink capacity of single tree in urban green space of different Genus

3 讨论

3.1 基于单木尺度的城市绿地乔木碳汇计量方法

抽样调查结合遥感法[13—14]与遥感反演法[15]两种方法常被应用于中大尺度区域的碳汇研究。但是卫星、机载激光雷达等遥感手段存在单木分割精度不高、难以获得胸径及精确树高等问题[27],其他光学遥感则存在无法获取林木垂直结构信息、易受林木下垫面影响、通常仅可利用植被指数间接评估林木碳汇量的问题,且两种方法均无法准确获知树种组成、树种生物学特性与树种生态学特性,上述问题限制了遥感法的精度[12,18]。另一种生物量法是准确核算植被碳汇量的有效手段[8],常用实地抽样调查法[8—12]获取其胸径、树高等生长因子实现。由于城市绿地需综合考虑景观效果、服务功能、道路交通安全等因素,不同绿地类型之间或同一绿地类型的不同地块间存在树种配置、分布、密度等方面的明显差异,这使得该方法的估算精度受到抽样强度与方法的影响。

本文采用的基于单木尺度的高强度抽样调查法,在高抽样强度地实地精确调查树种、单木所在绿地类型及两期胸径、树高、冠幅等生长因子,并计算单木碳储量与碳汇量的基础上,结合城市公园广场、附属、生产、防护四类绿地的空间矢量数据,计量出研究区所有城市乔木绿地的乔木碳汇量。相较于采用低强度样地抽样法或遥感法来计量城市乔木碳储量[13,28],本研究结果具有较高的可靠性。但由于研究时间与区域的局限性,本研究所采用的计量方法有待更长时间尺度及更多城市建成区域的应用检验。

3.2 绿地乔木碳密度与碳汇速率

由于目前对城市绿地[8—9,20]的研究偏重绿地生态系统整体的碳汇,缺少城市绿地乔木碳密度与碳汇速率

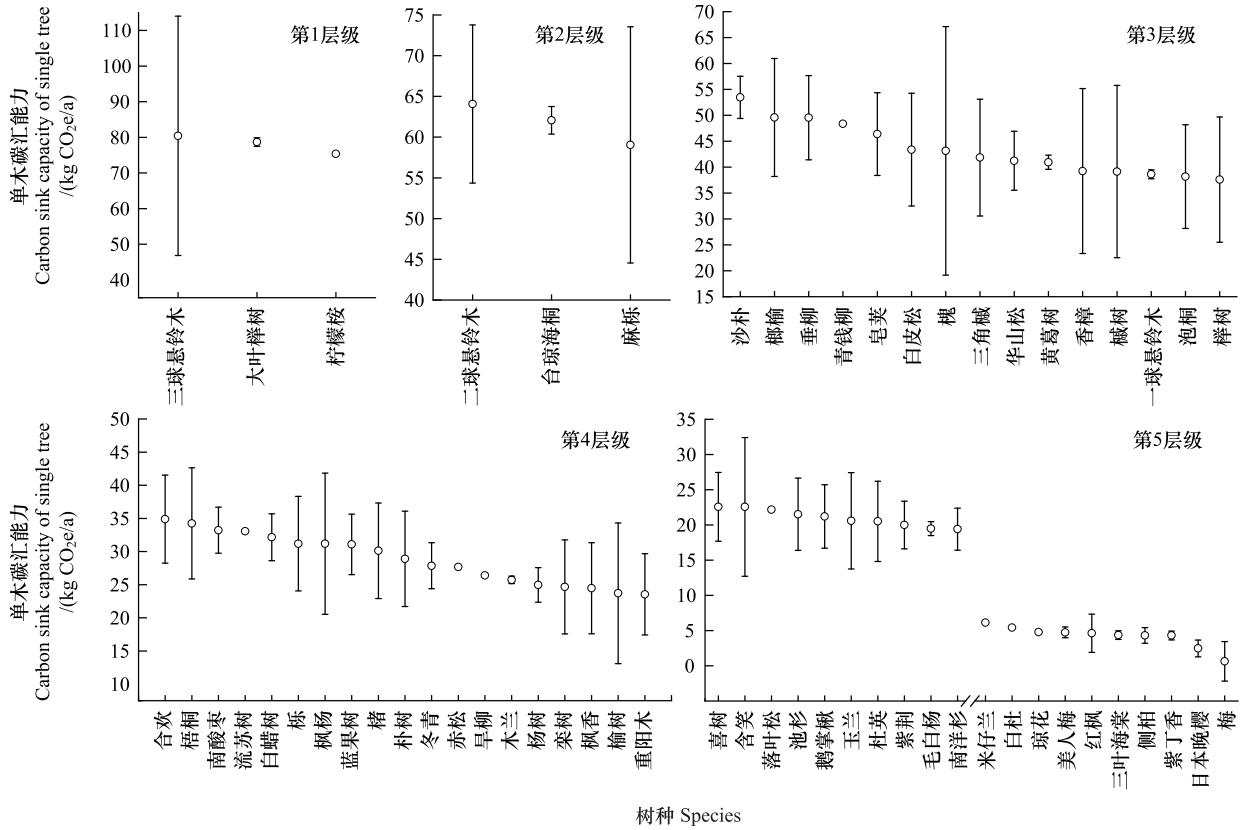

图 6　不同种的城市绿地乔木单木碳汇能力聚类层级图

Fig.6　Clustering hierarchy diagram of carbon sink capacity of single tree in urban green space of different Species

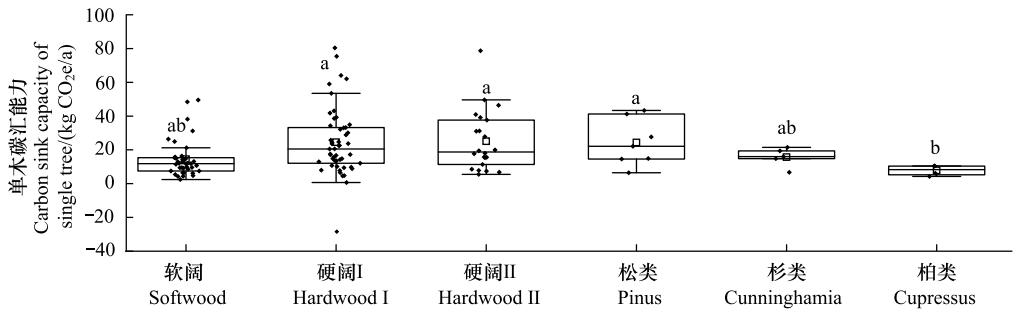

图 7　不同树种组的城市绿地乔木单木碳汇能力分析图

Fig.7　Analysis figure of carbon sink capacity of single tree in urban green space of different tree species groups

图中不同小写字母表示显著差异(P<0.05)

的相关数据,本研究得到平湖市城市绿地平均乔木碳密度 22.72 t C/hm^2,乔木碳汇速率 8.99 t CO_2e a^{-1} hm^{-2},补充了相关数据。比较平湖城市绿地平均乔木碳密度与我国平均城市绿地系统平均碳密度(19.8 t C/hm^2),可知平湖市城市绿地系统平均碳密度较全国平均水平高。与 1989—2014 年期间浙江省非城市森林碳汇速率(3.48 t CO_2e a^{-1} hm^{-2})[29]相比,其乔木碳汇速率高于非城市森林,这与 Hutyra 等的研究结果一致[30]。推测原因可能有以下 3 点:城市园林部门对城市绿地乔木的管理养护有利于乔木生长,稀疏的密度有效缓解了乔木间的竞争[31];城市中较高的 CO_2浓度与温度有利于提高乔木的光合速率。

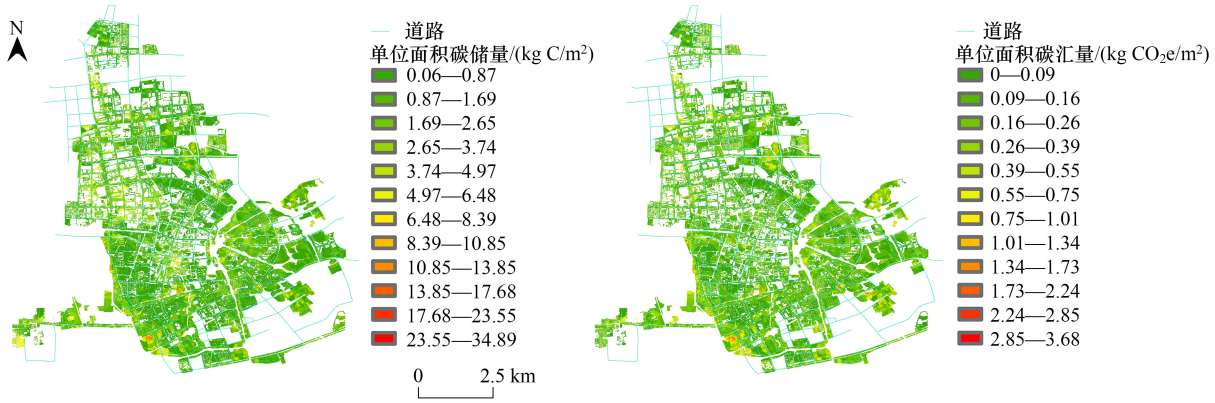

图 8 平湖市绿地乔木碳密度(2023 年初)与乔木碳汇速率(2022 年)热力图

Fig.8 Thermodynamic diagram of carbon density (at the beginning of the 2023) **and carbon sink rate** (the 2022) **of green space trees in Pinghu City**

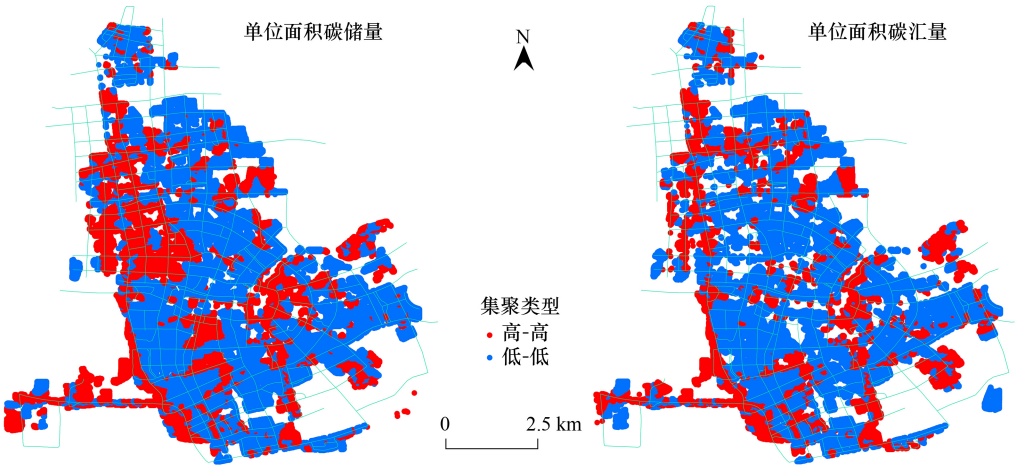

图 9 平湖市绿地乔木碳密度(2023 年初)与乔木碳汇速率(2022 年)集聚图

Fig.9 Agglomeration diagram of carbon density (at the beginning of the 2023) **and carbon sink rate** (the 2022) **of green space trees in Pinghu City**

研究发现附属绿地的乔木碳密度与碳汇速率均最高,而公园广场绿地碳密度排第三,碳汇速率排第二。推测其原因为:城市乔木绿地中的附属绿地空间碎片化程度高,多为建筑周边的零散绿化带或道路旁的狭长行道树绿地,其单位面积对应乔木数量相较呈面状的公园广场绿地多;公园广场绿地侧重于满足城市居民的景观、休憩、健身等需求,乔灌草的配置比例与附属绿地差异较大。

3.3 绿地乔木碳汇能力

选用高碳汇城市绿地树种对充分发挥城市绿地的固碳功能意义重大[12,32]。聚类分析结果显示:三球悬铃木、柠檬桉、大叶榉树(第 1 层级),二球悬铃木、台琼海桐(*Pittosporum pentandrum var. formosanum*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、沙朴(*Celtis sinensis*)、榔榆(*Ulmus parvifolia*)、垂柳、青钱柳(*Cyclocarya paliurus*)、皂荚(第 2 层级)的单木碳汇能力显著强于其他层级乔木($P<0.05$),且硬阔 Ⅱ、硬阔 Ⅰ 的单木碳汇能力强于松类,显著强于软阔、杉类、柏类($P<0.05$),表明硬阔是城市乔木固碳的主要树种类型,这与仲启铖等对上海市进行研究得到的结论相似[32—34]。由于树种碳汇能力与其叶面积指数相关,且城市绿地阔叶乔木多为大型或中型,所以其叶面积指数通常较窄树冠的杉类、柏类高,而平湖区城市绿地软阔树种的单木碳汇能力弱于松类,推测与

该地软阔树种的平均含碳系数低于松类相关[24,26]。

3.4　空间分布特征

石铁矛等研究发现城市植被碳汇具有明显空间聚集特征[35],平湖市城市绿地乔木碳密度、碳汇密度与城市道路走向、水域分布密切相关,呈现空间聚集性分布特征,表现为乔木碳密度高值在西侧道路附属绿地上呈条带状及东湖水域旁的公园广场绿地呈团块状分布(图 8 与图 9),低值则较多的集中于居民附属绿地,而乔木碳汇速率高值分布较之则新增了西北部片状高值区。调查发现其原因为平湖市西侧的道路附属绿地和东湖沿岸的公园广场绿地多密植树体高大的阔叶树。

4　结论

本文提出了基于单木尺度的全区域城市乔木碳汇计量方法,即高抽样率实地调查结合绿地分布补充扩增法,计测得到平湖市城市建成区的全域碳储量与碳汇量。并据此对不同绿地类型的碳密度与碳汇速率、不同城市绿地乔木的碳汇能力、碳密度碳汇密度空间分布特征进行了分析,得到结论如下:

(1)平湖的附属绿地碳密度与碳汇速率最大,城市绿地平均乔木碳密度 22.72 t C/hm^2,在我国处于中上水平,平均乔木碳汇速率 8.99 t CO_2e a^{-1} hm^{-2},高于非城市森林;

(2)硬阔 Ⅱ ((31.13±15.11) kg CO_2e/a)与硬阔 Ⅰ ((30.43±17.56) kg CO_2e/a)树种单木碳汇能力强于松类、软阔、杉类、柏类;

(3) 城市绿地的单位面积乔木碳密度和碳汇密度在空间上具有聚集性特征,且与道路、水域分布相关,呈现出高值常沿道路呈条带状或沿水域呈团块状分布的分布特性。

参考文献(References):

[1] 牛铜钢, 刘为. 双碳战略背景下城市生态系统的碳汇功能与生物多样性可以兼得. 生物多样性, 2022, 30(8): 205-210.

[2] 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. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 64: 127291.

[3] 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. 中国园林, 2016, 32(8): 18-24.

[4] Zhang Y, Meng W Q, Yun H F, Xu W B, Hu B B, He M X, Mo X Q, Zhang L. Is urban green space a carbon sink or source?: A case study of China based on LCA method. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 94: 106766.

[5] Zhao D, Cai J, Xu Y M, Liu Y H, Yao M M. Carbon sinks in urban public green spaces under carbon neutrality: a bibliometric analysis and systematic literature review. Urban Forestry & Urban Greening, 2023, 86: 128037.

[6] 陈硕, 王琪, 任志刚, 刘路阳, 李德生. 城市绿地碳汇能力研究. 山东林业科技, 2011, 41(6): 21-23.

[7] 邓亮, 崔耀平, 唐晔, 赵浩程, 李万隆, 孙亚茹. 城市绿地碳储量分布特征及其影响因素. 森林与环境学报, 2023, 43(3): 319-328.

[8] 王迪生. 基于生物量计测的北京城区园林绿地净碳储量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.

[9] 赵倩, 赵敏. 城市化过程及其绿地储碳研究——以上海"城-郊-乡"样带为例. 长江流域资源与环境, 2015, 24(4): 531-538.

[10] 葛之葳, 周丹燕, 郝雨杉, 陈萍, 关庆伟. 徐州城市绿地乔木层碳储量现状分析. 林业科技开发, 2013, 27(6): 30-34.

[11] 李晓曼, 康文星. 广州市城市森林生态系统碳汇功能研究. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(1): 8-13.

[12] 石铁矛, 王迪, 汤煜, 李沛颖, 初亚奇. 城市生态系统碳汇固碳能力计算方法与影响因素研究进展. 应用生态学报, 2023, 34(2): 555-565.

[13] 应天玉, 李明泽, 范文义. 哈尔滨城市森林碳储量的估算. 东北林业大学学报, 2009, 37(9): 33-35.

[14] 叶辰, 贺斌, 瞿志. 北京翠湖国家城市湿地公园碳汇绩效评估研究. 城市建筑, 2023, 20(9): 189-193, 206.

[15] 高业林. 基于 3S 技术的城市森林碳汇能力研究——以济南市南部山区为例[D]. 济南: 山东建筑大学, 2021.

[16] 张雪, 孙海燕, 贺坤, 何婷, 宋书英, 王玉盈, 莫骞. 基于 i-Tree Eco 模型的校园树木生态效益评估研究. 城市建筑, 2023, 20(6): 15-18.

[17] 和晓彤. 面向总体规划阶段的城市绿地碳汇量估算方法研究——西安市中心城区为例[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.

[18] 朱凯, 张倩倩, 武鹏飞, 冯蕾. 城市绿地碳汇核算方法及其研究进展. 陕西林业科技, 2015(4): 34-39.

[19] 顾韩, 施芋宇, 刁洁, 刘畅. 哈尔滨丁香公园 4 种典型人工绿地群落碳密度研究. 环境科学研究, 2021, 34(6): 1417-1424.

[20] 孙春健. 珠三角城市绿地 CO_2通量研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市绿地分类标准: CJJ/T 85—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市用地分类与规划建设用地标准: GB 50137—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
[23] 江波, 袁位高, 朱锦茹, 沈爱华. 森林生态体系快速构建理论与技术研究. 北京: 中国林业出版社, 2010.
[24] 陶吉兴, 杜群, 季碧勇, 张国江, 傅伟军, 徐军, 葛宏立, 姚鸿文, 王文武. 浙江森林碳汇功能监测. 北京: 中国林业出版社, 2014.
[25] 华伟平, 邱宇, 徐波, 江希钿, 丘甜. 基于生长生物量模型法的福建森林碳汇估算研究. 西南林业大学学报, 2014, 34(6): 35-43.
[26] 国家林业和草原局. 森林生态系统碳储量计量指南: LY/T 2988—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
[27] 李肖肖, 唐丽玉, 彭巍, 陈建新, 麻霞. 基于背包式激光雷达测量系统的城市绿地树木三维绿量估算方法. 应用生态学报, 2022, 33(10): 2777-2784.
[28] 李军吉, 费佳宁, 周婷, 高广, 赵珏晶, 吴敦. 利用高光谱数据估算城市植被碳储量. 测绘通报, 2023(4): 106-110.
[29] 葛志鹏. 浙江省森林碳汇时空变化特征及其驱动机制分析[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
[30] Hutyra L, Yoon B, Alberti M. Terrestrial carbon stocks across a gradient of urbanization: a study of the Seattle, WA region. Global Change Biology, 2011, 17(2): 783-797.
[31] 张乃暄, 王韵頔, 许中旗, 付立华, 张菲, 程顺. 抚育间伐对塞罕坝地区云杉人工林碳储量及固碳速率的影响. 河北农业大学学报, 2022, 45(6): 81-87.
[32] 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.
[33] 王敏, 石乔莎. 城市绿色碳汇效能影响因素及优化研究. 中国城市林业, 2015, 13(4): 1-5.
[34] 仲启铖, 傅煜, 张桂莲. 上海市乔木林生物量估算及动态分析. 浙江农林大学学报, 2019, 36(3): 524-532.
[35] 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. 中国园林, 2022, 38(3): 78-83.