城市绿地乔木固碳能力及碳抵消效果评估*

陈俊华[1] 黎晓平[2] 李羽洁[3] 慕长龙[1] 谢 川[1] 刘一丁[1] 谢天资[1] 简 毅[1]

1 四川省林业科学研究院/森林与湿地生态恢复与保育四川重点实验室 成都 610081
2 南充市林业局 四川南充 637000
3 成都蜀舆科技有限责任公司 成都 610000

摘要：定量测算城市绿地乔木固碳能力及抵消碳排放，可为森林城市建设的树种选择和配置提供决策支持。基于高清卫星遥感影像数据和有关经济社会统计数据，结合实地调查，利用生物量模型法测算南充市主城区绿地乔木的固碳能力，探讨群落结构与固碳能力的影响；分析抵消城市能源 CO_2 排放的成效。结果表明：1）南充市主城区绿化植被中木本植物共 269 种，分属 76 科 163 属。出现频度最高的为桂花、银杏、黄葛树、天竺桂、樟木、樱花等 10 个树种。2）各类绿地林分平均密度 677±425 株 · hm^{-2}，平均胸径 21.01±7.15 cm，平均树高 8.52±2.06 m。3）各类绿地碳密度按大小为广场用地>附属绿地>公园绿地>防护绿地；固碳速率最大的是附属绿地（2.54 t · hm^{-2} · a^{-1}），最小的是公园绿地（1.64 t · hm^{-2} · a^{-1}）。4）南充市主城区绿地乔木 2020 年碳固定量为 9 347 t，能源 CO_2 总排放量为 1 016.55 万 t，绿地乔木大约抵消城市能源 0.09% CO_2 的排放量。最后，建议南充市在城市森林营建过程中，应优先考虑多树种混合使用，并适时调整群落密度以优化林分结构、改善生境条件，促进林木整体水平的生长，进而提高群落的固碳能力；同时尽量采用近自然、较为粗放的经营方式，以减少碳排放。

关键词：城市绿地；乔木；碳密度；固碳速率；生物量；南充市
DOI：10.12169/zgcsly.2023.08.17.0001

Assessment of Carbon Sequestration Capacity and Carbon Offsetting Effect of Arbors in Urban Green Spaces

Chen Junhua[1] Li Xiaoping[2] Li Yujie[3] Mu Changlong[1] Xie Chuan[1]
Liu Yiding[1] Xie Tianzi[1] Jian Yi[1]

(1. Sichuan Key Laboratory of Ecological Restoration and Conservation for Forest and Wetland, Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China; 2. Nanchong Forestry Bureau, Nanchong 63700, Sichuan, China; 3. Chengdu Shuyu Technology Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: The quantitative measurement of carbon sequestration capacity and carbon offsetting effects of trees in urban green spaces can provide supports for the decision-makings on tree species' selection and configuration in forest city building. With high-definition satellite remote sensing image and relevant economic and social statistical data, combined with the data from field investigations, the paper uses the method of biomass model to calculate the carbon sequestration capacity of landscaping trees in the urban area of Nanchong, based on which the interactions of community structure and carbon sequestration capacity are explored, and also analyzes the effects of carbon offsetting the emission of the energy sector in the city. The results show that: 1) There are 269 species of woody plants in the green spaces of the urban

收稿日期：2023-08-17
* 基金项目：四川省创新团队岗位项目（2024LCTD0107）；四川省林业科学研究院科技成果转化项目（川林研工咨 2020025）
第一作者：陈俊华（1972- ），男，博士，研究员，研究方向为森林经营与城市森林。E-mail：295454166@qq.com
通信作者：简毅（1982- ），男，博士，副研究员，研究方向为森林生态效益监测与评价。E-mail：163jianyi@163.com

area of Nanchong, belonging to 163 genera in 76 families. The 10 tree species with the highest presence are *Osmanthus fragrans*, *Ginkgo biloba*, *Ficus virens Aiton*, *Cinnamomum japonicum*, *C. camphora*, *Prunus serrulata*, *F. concinna*, *P. cerasifera*, *F. atropurpurea*, *Acer palmatum* Michelia × alba; 2) The average density of forest stands in various green spaces is 677 ± 425 plants · hm^{-2}, with an average diameter at breast height at 21.01±7.15 cm and an average tree height at 8.52±2.06 m; 3) The average carbon density of the trees in green spaces can be ranked as square >affiliated green spaces>park green spaces>protective green spaces. Affiliated green spaces have the highest carbon sequestration rate (2.54 t · ha^{-1} · a^{-1}), while the lowest is in park green spaces (1.64 t · ha^{-1} · a^{-1}); and 4) The amount of carbon sequestrated by the trees in green spaces in the urban area of Nanchong City in 2020 is 9 347 t, and the total energy-related CO_2 emissions are 1 016.55 × 10^4 t, which means that the trees in green spaces approximately offset 0.09% of carbon emitted by urban energy use. It is suggested that Nanchong should prioritize the mixed use of multiple tree species in its building of urban forest, and the tree community density should be adjusted in a timely manner to optimize the forest structure, improve habitat conditions, promote the growth of trees, and thereby enhance the carbon sequestration capacity. In addition, close-to-nature and extensive management methods should be adopted as much as possible to reduce the carbon emission.

Keywords: urban green space; arbor; carbon density; carbon sequestration rate; biomass; Nanchong city

“双碳”目标是中国应对全球气候变暖主动提出的“国家自主贡献”，同时也是我国实现高质量发展和生态文明建设的重要途径[1-3]。有关研究表明[4]，中国城市碳排放量占全国总量的 90%。城市绿地是城市生态环境可持续发展的基础，是城市范围内唯一直接增汇、间接减排的要素[5]。城市绿地植物是减少城市 CO_2 排放，改善城市生态环境的重要组成部分。合理选择城市绿地植物种类并进行搭配能够有效减少城市 CO_2 浓度，改善城市环境[6]。乔木是城市绿地植被碳储量的主要贡献者。国内学者对城市森林、城市绿地碳储量计量和监测进行了相关研究[7-12]，但对城市绿地抵消能源碳排放的效应研究不多[13]。

2019 年，南充市开始启动国家森林城市创建工作，由政府组织编制的《四川省南充市国家森林城市建设总体规划（2020—2030 年）》（以下简称《总规》）于 2020 年 12 月通过了专家评审，并印发实施。《总规》确定到规划期末，城区绿化覆盖率达到 42.93%，新增公园绿地面积 523.10 hm^2，质量提升 242.17 hm^2。在城市绿地建设过程中，如何让植物更有效发挥吸收 CO_2、改善微气候等功能是要着重考虑的问题。本文基于遥感影像数据和有关经济社会统计数据，结合实地调查，分析南充市主城三区绿地乔木的固碳能力，评估抵消能源碳排放效果，旨在为南充市绿色低碳发展、城市总体规划和森林城市建设提供理论依据。

1　研究区概况

研究区选择南充市的主城区，即顺庆区、嘉陵区、高坪区的建成区，幅员面积 171.47 km^2。南充市属中亚热带湿润季风气候区，四季分明，平均气温 17.5 ℃。年均降水量 1 012 mm，月季降水量分布不均，地貌类型以丘陵为主[14-17]。区域内的原生自然植被以亚热带常绿阔叶林和亚热带落叶阔叶林为主，受人类长期垦荒造田活动的影响，原有的自然植被砍伐殆尽。在自然条件与社会经济条件的综合作用下，现有植被以柏木（*Cupressus funebris*）、马尾松（*Pinus massoniana*）、杉木（*Cunninghamia lanceolata*）等为主。城区内多见樟木（*Cinnamomum camphora*）、黄葛树（*Ficus virens*）、雅榕（*Ficus concinna*）、银杏（*Ginkgo biloba*）、桂花（*Osmanthus fragrans*）、天竺桂（*Cinnamomum japonicum*）、朴树（*Celtis sinensis*）等树种。

2　研究方法

2.1　城市绿地分类

参照《城市绿地分类标准》（CJJ/T85-2017），将南充市主城区的绿地划分为公园绿地、广场用

地、附属绿地、防护绿地 4 种类型。因南充市的区域绿地基本上是天然次生林或人工几乎不干预的林分，本次调查没有调查此类绿地。

2.2 数据来源

以高分二号影像数据作为南充市主城区绿地系统分类的主要数据源，其空间分辨率为 1 m，成像时间为 2020 年 5 月 29 日。采用面向对象分类法和目视解译法对研究区范围中的各类绿地进行提取，统计面积。

2.3 样地选取及调查

依据典型性、代表性、均匀性等原则，项目组于 2020 年 5—7 月选取南充市 75 条街道、14 个公园、5 个广场、21 个小区、19 个学校、16 个机关单位、4 个医院、2 个工业园区设置样地。样地大小为 1 个 20 m×20 m 样方或 4 个 10 m×10 m 样方，对于形状不规则的样地则根据绿地实际情况设置面积不小于 400 m^2的样方，最终共计调查有效样地 229 个。对样地范围内的所有胸径大于 3 cm 的乔木进行每木检尺，记录树种名，测定胸径、树高、冠幅等信息。样地内的乔木密度分为 3 个等级：低密度（≤500 株 · hm^{-2}）、中密度（500~1 200 株 · hm^{-2}）、高密度（≥1 200 株 · hm^{-2}）。平均胸径分 4 个等级：≤10 cm、10~20 cm、20~30 cm、≥30 cm；平均树高分为 3 个等级：≤6 cm、6~10 m、≥10 m。

2.4 城市绿地碳储量及 CO_2排放量核算

本文采用城市绿化乔木树种的生物量-胸径和树高模型计算植被生物量，利用生物量和含碳率计算南充市城市绿地乔木的碳储量[18-19]。

根据 IPCC（2006）发布的清单指南中推荐的核算方法，将城市化相关的碳排放分为工业生产部门中化石燃料燃烧、市内交通的燃料消耗、居民生活能源消耗 3 个部门进行核算，最后对这 3 个部门 CO_2排放量进行累加计算得到与城市化相关的碳排放总量[20-21]。有关基础数据来自《南充市统计年鉴 2021》。

2.5 数据处理

将各绿地野外调查数据录入 WPS 表格，计算每个样地的林分密度、平均胸径、平均树高等群落特征因子。利用统计软件 SPSS 20.0 对群落结构因子与碳密度（每公顷固碳量/t · hm^{-2}）、固碳速率（平均每年每公顷的固碳量/t · hm^{-2} · a^{-1}）进行 Pearson 相关性分析、LSD 多重比较，制图采用 Origin 2018。

3 结果与分析

3.1 南充市主城区绿地结构特征

南充市主城区绿地植被中木本植物共 269 种，分属 76 科 163 属。其中，常绿树种 163 种，分属 55 科 96 属；落叶 106 种，分属 36 科 72 属。出现频度最高的 10 个树种分别是桂花、银杏、黄葛树、天竺桂、樟木、樱花（*Prunus serrulata*）、雅榕、紫叶李（*Prunus cerasifera*）、鸡爪槭（*Acer palmatum*）、白兰（*Michelia alba*）（图 1）。

从群落结构特征（表 1）可以看出，各类绿地群落平均年龄均不大，林分加权平均密度 677±425 株 · hm^{-2}，加权平均胸径 21.01±7.15 cm，加权平均树高 8.52±2.06 m。公园绿地的林分密度明显高于其他绿地，平均胸径和平均树高均以防护绿地的最大，广场用地的最小。由此可见，城市绿地由于营造时人工干预的不同，不同绿地的结构特征存在不同程度的差异[7]。

3.2 南充市主城区绿地固碳能力和分布格局

从各类绿地面积和固碳能力分布格局（表 2）可以看出，面积和碳储量最大的是附属绿地，最小的是广场用地。各类绿地加权平均碳密度为 45.07 t · hm^{-2}，平均固碳速率为 2.16 t · hm^{-2} · a^{-1}。各类绿地碳密度最大的是广场用地，最小的是防护绿地。固碳速率以附属绿地最大，最小的是公园绿地。

表 1 南充市主城区各类绿地群落结构特征

绿地类型	样地个数	林分密度/（株 · hm^{-2}）	平均胸径/cm	平均树高/m	年龄/a
公园绿地	47	840±431	21.22±8.55	7.25±2.14	24.5±6.2
广场用地	16	453±435	20.93±8.32	5.83±2.00	21.3±7.3
附属绿地	158	682±439	21.98±8.69	6.89±2.15	18.2±8.4
防护绿地	8	652±451	22.35±9.35	11.50±2.34	11.9±5.4

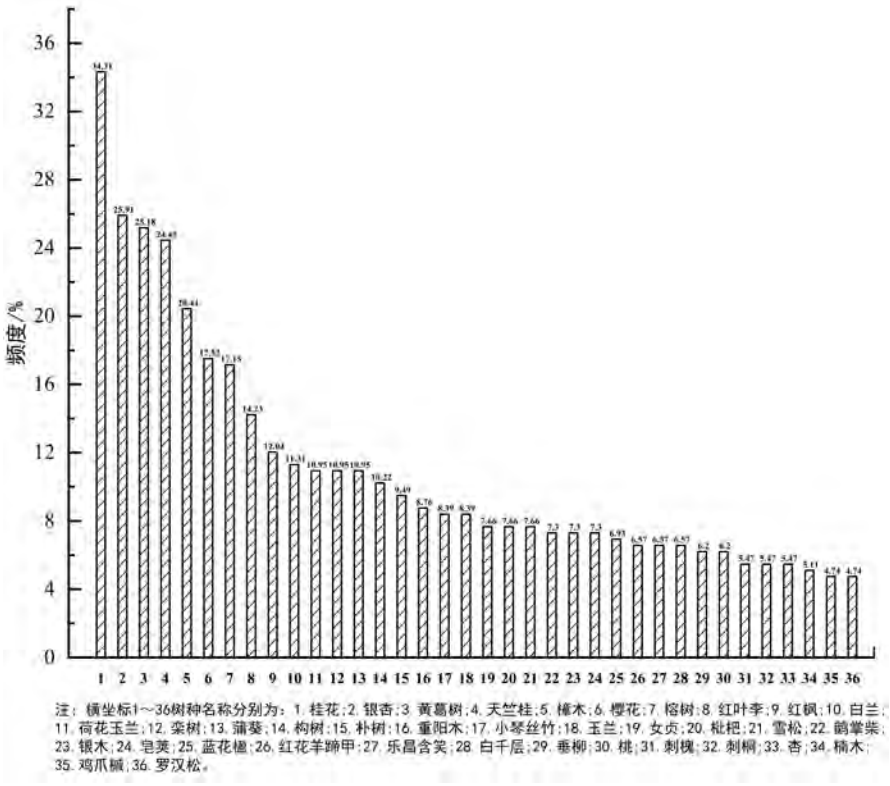


图 1　南充市主城区部分树种应用频度

表 2　南充市主城区各类绿地抽样面积和固碳能力分布格局

绿地类型	面积/hm^2	碳储量/t	碳密度/($t \cdot hm^{-2}$)	年碳固定量/t	固碳速率/($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)
公园绿地	1 788. 34	71 873	40. 19	2 934	1. 64
附属绿地	2 137. 82	98 938	46. 28	5 437	2. 54
广场用地	96. 38	4 796	49. 76	226	2. 34
防护绿地	307. 38	8 932	29. 06	751	2. 44
加权平均值			45. 07		2. 16

3. 3　不同群落结构的固碳能力

3. 3. 1　林分密度

从不同密度群落的碳密度和固碳速率（图 2）可以看出，随着林分密度的增大，加权平均碳密度和加权平均固碳速率均随之增大。其中，加权平均碳密度从低林分密度的 27. 86 $t \cdot hm^{-2}$增加到高林分密度的 84. 16 $t \cdot hm^{-2}$；加权平均固碳速率从 2. 12 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$增加到 7. 63 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$。方差分析和多重比较表明（表 3），碳密度和固碳速率均与林分密度呈显著相关（$P<0.05$）。

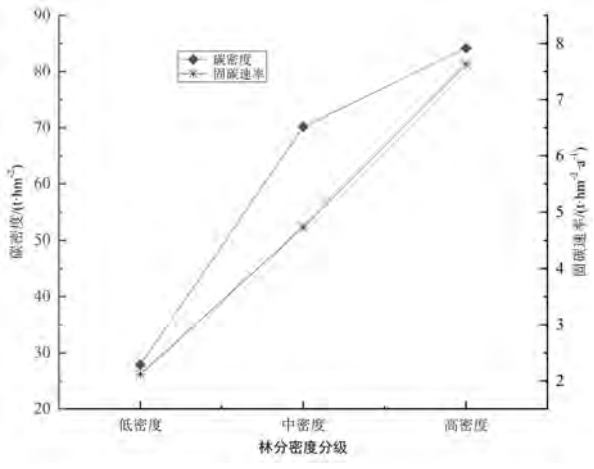


图 2　不同林分密度等级绿地的碳密度和固碳速率

3. 3. 2　平均胸径

从图 3 可以看出，南充市各类绿地的碳密度和固碳速率均随着平均胸径的增大而显著增大（$P<0.05$）。其中，当平均胸径≥30 cm 时，其碳密度极显著增大。方差分析和多重比较表明（表4）：平均胸径≤10 cm 的碳密度仅与平均胸径≥30 cm 之间差异显著（$P<0.05$）；10～20 cm 平均胸径与 20～30 cm、≥30 cm 之间均差异显著（$P<0.05$）；

表 3 不同林分密度等级绿地的碳密度和固碳速率多重比较

密度等级	低密度	中密度	高密度
低密度	0.000 0	−4.755 1*	−10.254 6*
中密度	2.606 0*	0.000 0	−5.499 4*
高密度	5.514 0*	2.908 0*	0.0000

注：对角线下为不同林分密度等级之间碳密度平均值（$t \cdot hm^{-2}$）的多重比较，对角线上为不同林分密度等级之间固碳速率平均值（$t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$）的多重比较；* 表示差异显著（$P<0.05$），下同。

平均胸径 20~30 cm 的碳密度与≥30 cm之间差异不显著（$P>0.05$）。平均胸径≤10 cm 的固碳速率除与 10~20 cm 之间的差异不显著外（$P>0.05$），与其他等级的差异均显著（$P<0.05$）；平均胸径≥30cm 的固碳速率与其他等级之间差异均显著（$P<0.05$）。

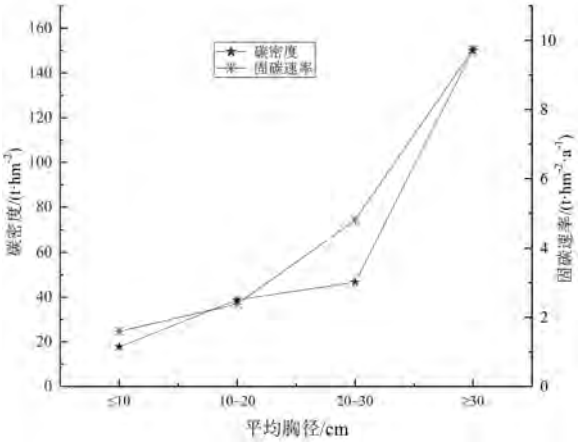


图 3 不同胸径等级绿地的碳密度和固碳速率

表 4 不同胸径等级绿地的碳密度和固碳速率多重比较

平均胸径/cm	10~20	20~30	≥30
≤10	−1.721 5	−5.960 0	−10.600*
10~20	0.000 0	−4.238 5*	−8.8785*
20~30	2.420 5*	0.000 0	−4.640 0
≥30	7.338 0*	4.917 5*	0.000 0

3.3.3 平均树高

由图 4 可以看出，各类绿地碳密度和固碳速率均随平均树高的增大而增大。方差分析和多重比较表明（表 5）：当平均树高≤6 m 时，碳密度仅与平均树高≥10 m 的差异显著（$P<0.05$），其余各等级之间均差异不显著（$P>0.05$）；平均树高≥10 m 的固碳速率与平均树高≤6 m 和 6~10 m 之间差异均显著（$P<0.05$）。

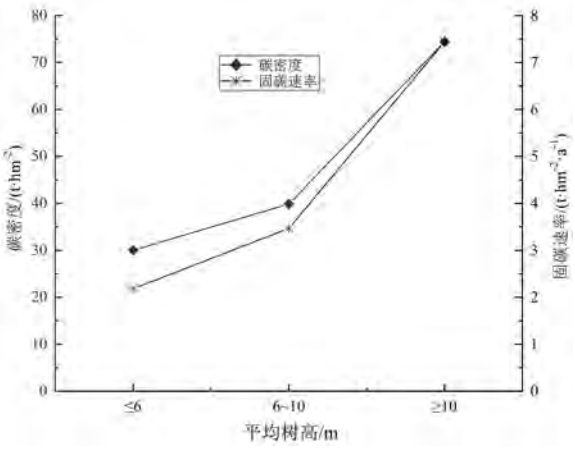


图 4 不同树高等级绿地的碳密度和固碳速率

表 5 不同树高等级绿地的碳密度和固碳速率多重比较

平均树高/m	≤6	6~10	≥10
≤6	0.000 0	−2.646 8	−7.1224
6~10	1.286 2	0.000 0	−4.475 5*
≥10	5.260 0*	3.973 8*	0.0000

3.4 固碳能力与群落结构的相关性

从各类绿地结构因子与碳密度、固碳速率的 Pearson 相关分析（表 6）可以看出：物种丰富度与碳密度、固碳速率均没有相关性；平均胸径、平均树高、林分密度与碳密度、固碳速率均呈极显著正相关（$P<0.01$）；平均胸径、平均树高、林分密度、碳密度、固碳速率与碳储量均无相关性（$P>0.05$）；碳密度与固碳速率呈极显著正相关（$P<0.01$）。

表 6 南充市绿地固碳能力与群落结构因子 Pearson 相关分析

项目	物种丰富度	平均胸径	平均树高	林分密度	碳储量	碳密度	固碳速率
物种丰富度	1.000	−0.264	−0.152	0.025	0.069	−0.176	−0.196
平均胸径	−0.264	1.000	0.643**	0.145	0.014	0.535**	0.663**
平均树高	−0.152	0.643**	1.000	0.060	0.221	0.494**	0.574**
林分密度	0.025	0.145	0.060	1.000	−0.047	0.648**	0.560**
碳储量	0.069	0.014	0.221	−0.047	1.000	0.087	0.092
碳密度	−0.176	0.535**	0.494**	0.648**	0.087	1.000	0.878**
固碳速率	−0.196	0.663**	0.574**	0.560**	0.092	0.878**	1.000

注：N=183；* 表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关；** 表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关。

3.5　南充市城市绿地的碳抵消

3.5.1　城市碳排放量核算

1）工业生产部门碳排放量核算。工业生产部门碳排放包括煤炭、燃料油、汽油、柴油、电力等。但《南充市统计年鉴 2021》只提供了总的能源消耗量数据（即综合能源消费量（吨标准煤））。因此，本研究按总能源消耗量来计算（表 7）。南充市主城区 2020 年度工业生产部门 CO_2排放总量为 354.32 万 t。各区 CO_2排放总量按大小排列为嘉陵区>顺庆区>高坪区。

表 7　南充市 2020 年工业生产部门碳排放量

区域	能源消耗量/（万 t）	碳排放系数	CO_2排放总量/（万 t）
顺庆区	67.71	1.94	131.36
高坪区	40.70	1.94	78.96
嘉陵区	74.23	1.94	144.01
合计			354.32

2）交通部门碳排放量核算。交通工具应包括公共交通工具（公共汽车、出租车等）以及家用轿车、网约车等，根据动力来源还应分为油车、纯电车、油电混合车以及 LPG 等。但《南充市统计年鉴 2021》只提供了汽车保有量，没有进行分类，因此本研究全部按纯汽油车计算。从表 8 可以看出，南充市 2020 年交通部门 CO_2排放总量为 95.96 万 t，其中，顺庆区交通部门 CO_2排放量明显高于其他两个区。

3）居民生活部门碳排放量核算。居民生活排放 CO_2的来源包括液化石油汽、天然气、电力 3 个部分。计算结果表明，南充市 2020 年居民生活部门 CO_2总量为 566.27 万 t（表 9），其中，排放量最高的是顺庆区，最低的是高坪区。

表 8　南充市 2020 年交通部门碳排放量

区域	汽车年保有量/辆	汽车年平均行驶里程/（km/辆）	汽车单位能源消耗量/（L·（100 km）$^{-1}$）	汽车能源消耗量/L	碳排放系数	CO_2排放总量/（万 t）
顺庆区	123 948	15 000	8.8	1 320	3.04	49.74
高坪区	57 378	15 000	8.8	1 320	3.04	23.02
嘉陵区	57 815	15 000	8.8	1 320	3.04	23.20
合计			26.40			95.96

注：汽车保有量是指某年某区域汽车总量；汽车年平均行驶里程是指某年某区域一辆汽车平均行驶里程；汽车单位能源消耗量是指汽车行驶 100 km 消耗油量；汽车能源消耗量等于汽车年平均行驶里程×汽车单位能源消耗量；碳排放系数是指汽车燃料碳排放系数；CO_2排放总量等于汽车年保有量×汽车能源消耗量×碳排放系数。

表 9　南充市 2020 年居民生活部门碳排放量

区域	液化石油汽/（万 t）	天然气/（万 t）	电力/（万 t）	CO_2排放总量/（万 t）
顺庆区	7.12	20.32	185.25	212.69
高坪区	3.30	9.41	150.19	162.89
嘉陵区	3.32	9.48	177.88	190.68
合计	13.74	39.21	513.32	566.27

3.5.2　绿地乔木的碳抵消

南充市主城区 2020 年 CO_2总排放量为 1 016.55万 t，其中居民生活部门碳排放量最大，占 55.71%；其次是工业生产部门，占 34.86%；交通部门占 9.44%。由此可见，南充市主城区 CO_2排放主要来自于居民生活部门和工业生产部门。以绿地乔木年固定 CO_2占区域能源 CO_2排放量的比重作为城市绿地碳抵消作用[12]。计算结果表明，南充市绿地乔木年 CO_2吸收量大约抵消城市 0.09% CO_2排放量。其中，顺庆区大约抵消 0.08%CO_2排放量，高坪区大约抵消 0.11%CO_2排放量，嘉陵区大约抵消 0.09%CO_2排放量。

4　讨论

4.1　林分密度对城市绿地固碳能力的影响

本研究表明碳密度和固碳速率均与林分密度呈极显著正相关（$P<0.01$）。碳密度和固碳速率均随林分密度的增大而显著增大，这与徐飞等[11]的研究结论是一致的。而依兰[22]对天津公园植物群落研究则表明，具有中等栽植密度的植物群落的年固碳效益明显高于高栽植密度与低栽植密度的植物群落。还有学者研究表明，群落密度与森林群落固碳能力的关系没有特别强的规律[23-26]。

这是因为林分密度对固碳能力的影响十分复杂，还得考虑林分年龄和林分郁闭度的影响。在幼龄阶段，较高的密度能提高林分的碳密度和固碳能力；而当林分到中龄林或近成熟林时，应调整密度来优化群落结构、改善生境条件、增加平均胸径，以提高林分的碳密度[27]。南充市现有各类绿地树种树龄均不大，还处于幼龄林阶段，生长旺盛，因此高密度的林分具有较高的碳密度和固碳速率。

4.2 平均胸径、平均树高对城市绿地固碳能力的影响

本研究表明，林分的平均胸径、平均树高均与碳密度和固碳速率呈极显著正相关（$P<0.01$），这与徐飞[11]、贾晓立[28]的研究结果有所差异。徐飞等的研究表明，城市森林的平均胸径、平均树高与碳密度呈显著正相关，而与固碳速率呈显著负相关；而贾晓立则认为，绿地林分的平均胸径与碳密度和固碳速率正相关，而平均树高则与固碳速率负相关。还有学者研究表明林分的固碳能力是由树木生长过程中所吸收的碳量和树木衰亡及叶脱落所释放的碳量共同决定的[29]。南充市的绿地固碳速率与林分的平均胸径、平均树高均呈显著正相关，可能是因为林木尚处于幼龄阶段，生长旺盛，群落的碳吸收能力较强的缘故。

4.3 城市绿地的固碳能力对碳排放的抵消能力

本研究表明，南充市主城区城市绿地乔木每年可抵消城市能源碳排放总量的 0.09%。国内相关学者研究表明[11,30]，不同城市森林植被抵消能源碳排放的比例范围为 0.01%～4.76%，国外研究结论为 1.0%～3.4%[12,31-33]。本研究测算结果较小，原因可能为：1）没有计算区域绿地的固碳量（该类绿地面积 2 645.46 hm^2，占其他绿地总和的 61.10%）；2）仅计算了绿地乔木地上部分的固碳量，没有计算地下部分的固碳量和灌木、草本的固碳量；3）没有计算乔木因遮荫和降温效应间接减少碳排放的效应[27]；4）没有计算土壤和湿地的固碳量（国内专家研究表明，土壤和湿地的固碳效益可达森林生态系统的 20%左右[33-34]）；5）本研究对交通部门的碳排放量全部按纯油车来核算的，没有考虑电动等新能源车，导致交通部门的碳排放量计算结果偏大；6）对于城市森林诸如修剪、移栽、灌溉、施肥和交通运输等养护管理活动产生的碳排放没有进行分析[35]。因此，下一步将完善这些方面的研究，以更合理地评估城市绿地的碳汇潜力和抵消碳排放效果。

5 结论

南充市主城区城市绿地加权平均碳密度为 45.07 $t \cdot hm^{-2}$，年碳固定量为 9 347 t。各结构因子除物种丰富度外，其他与绿地碳密度均呈显著正相关，而所有结构因子与绿地碳储量均无相关性。2020 年，南充市主城三区的乔木对 CO_2 吸收量大约可抵消城市 0.09% CO_2 排放量。因此，建议南充市在城市森林的营建过程中，应优先选择生长速度较快、固碳能力较强的乡土常绿阔叶树种，同时考虑多树种混合使用，并适时调整群落密度来优化林分结构、改善生境条件，促进林木整体水平的生长，进而提高群落的固碳能力。在平时的管护过程中，尽量采用近自然、较为粗放的经营方式，以减少碳排放。

参考文献

[1]王晶懋,高洁,孙婷,等.双碳目标导向下的绿色生态空间碳汇能力优化设计[J].中国城市林业,2023,21(4):33-42.

[2]封加平.碳中和应发挥林业的关键作用[J].中国林业产业,2021(3):2.

[3]刘晓曼,王超,高吉喜,等.服务双碳目标的中国人工林生态系统碳增汇途径[J].生态学报,2023,43(14):5662-5673.

[4]赵彩君,刘晓明.城市绿地系统对于低碳城市的作用[J].中国园林,2010,26(6):23-26.

[5]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[J].中国园林,2016,32(8):18-24.

[6]孙雅伟.天津城市绿地常用乔木固碳规律及效益评估研究[D].天津:天津大学,2019.

[7]姚龙杰,岳邦瑞,潘卫涛,等.县域碳储量时空演变与多情景模拟:基于 FLUS 和 InVEST 模型[J].中国城市林业,2023,21(5):152-158.

[8]粟娟,周璋,李意德.广州市森林生态系统碳储量格局分析[J].中国城市林业,2016,14(4):15-21.

[9]王敏,石乔莎.城市绿色碳汇效能影响因素及优化研究[J].中国城市林业,2015,13(4):1-5.

[10]王敏,朱雯.城市绿地影响碳中和的途径与空间特征:以上海市黄浦区为例[J].园林,2021,38(10):11-18.

[11]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.
[12]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.
[13]张彪,谢紫霞,高吉喜.上海城市森林植被固碳功能及其抵消能源碳排放效果评估[J].生态学报,2021,41(22):8906-8920.
[14]王智慧.基于遥感的南充市城市扩展及驱动力分析[D].成都:成都理工大学,2017.
[15]刘颖.城镇化背景下南充市城市扩张合理性评价[J].西华师范大学学报(自然科学版),2019,40(2):166-171.
[16]肖雅军,唐俊峰,赵旭喆,等.南充市 4 所高校校园木本植物多样性分析[J].四川林业科技,2020,41(2):22-28.
[17]刘一丁,何政伟,陈俊华,等.基于 MSPA 与 MCR 模型的生态网络构建方法研究:以南充市为例[J].西南农业学报,2021,34(2):354-363.
[18]李金良,施志国.林业碳汇项目方法学[M].北京:中国林业出版社,2016.
[19]江佩宜,戴菲.城市绿地碳汇测算方法研究进展[J].中国城市林业,2024,22(1):87-93.
[20]冯韵瑜.基于城市碳排放核算的城市低碳发展研究—以广州市为例[D].广州:广州大学,2020.
[21]EGGLESTON S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Japan: National Greenhouse Gas Inventories Programme, 2006.
[22]依兰.城市公园植物群落的碳收支评估及其优化研究[D].天津:天津大学,2019.
[23]张国庆,黄从德,郭恒,等.不同密度马尾松人工林生态系统碳储量空间分布格局[J].浙江林业科技,2007,27(6):10-14.
[24]鲁绍伟,刘凤芹,余新晓,等.北京山区不同密度油松结构与功能研究[J].水土保持研究,2008,15(1):117-121.
[25]刘常富,赵爽,李玲,等.沈阳城市森林固碳和污染物净化效益差异初探[J].西北林学院学报,2008,23(4):56-61.
[26]刘常富,何兴元,陈玮,等.基于 QuickBird 和 CITYgreen 的沈阳城市森林效益评价[J].应用生态学报,2008,19(9):1865-1870.
[27]张静,张庆费,陶务安,等.上海公园绿地植物群落调查与群落景观优化调整研究[J].中国农学通报,2007,23(6):454-457.
[28]贾晓立.城市绿地碳汇功能的尺度效应与驱动力研究:以中国绿化博览园为例[D].郑州:河南农业大学,2023.
[29]ROWNTREE R A, NOWAK D J. Quantifying the role of urban forests in removing atmospheric carbon dioxide[J]. International Society of Arboriculture, 1991, 17(10):269-275.
[30]周健,肖荣波,庄长伟,等.城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果:以广州为例[J].生态学报,2013,33(18):5865-5873.
[31]ESCOBEDO F, VARELA S, ZHAO M, et al. Analyzing the efficacy of subtropical urban forests in offsetting carbon emissions from cities[J]. Environmental Science & Policy, 2010, 13(5):362-372.
[32]TRLICA A, HUTYRA L R, MORREALE L L, et al. Current and future biomass carbon uptake in Boston's urban forest[J]. Science of the Total Environment, 2020, 709:136196.
[33]马立辉,谢英赞,黄世友,等.彭水县森林生态系统固碳释氧特征及其价值估算[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2015,32(6):68-71.
[34]梅雪英,张修峰.长江口典型湿地植被储碳、固碳功能研究:以崇明东滩芦苇带为例[J].中国生态农业学报,2008,16(2):269-272.
[35]何晶.基于全生命周期的城市绿地乔木群落碳收支研究:以广州市为例[D].武汉:华中农业大学,2017.