

doi:10.13428/j.cnki.fjlk.2024.04.020

厦门城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果分析

洪志猛

(福建省林业科学研究院,福建 福州 350012)

摘要: 基于福建省森林资源 2020 年度监测数据,测算厦门城市森林碳储量和碳固定量,定量评估厦门城市森林碳汇抵消城市能源碳排放效果。结果表明:厦门城市森林总碳储量为 150.37 万 t,总固碳量为 26.63 万 t·a⁻¹,而厦门城市在 2016—2020 年间年均能源碳排放量为 925.91 万 t,厦门城市森林总碳储量约占年均能源碳排放量的 16.24%,城市森林碳固定量可抵消能源碳排放量的 2.88%。厦门城市森林平均碳密度为 32.46 t·hm⁻²,平均固碳率为 5.75 t·hm⁻²·a⁻¹,不同林型和林龄的碳密度和固碳率存在差异。依据厦门城市森林固碳量特征,从提升城市森林资源面积、优化城市森林空间结构以及强化科学经营管理等方面提出增加碳汇的相应策略,为城市森林科学管理提供支撑。

关键词: 城市森林;固碳;碳汇;碳抵消;厦门市

中图分类号: S731.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-7351(2024)04-0112-08

Analysis on the Effect of the Carbon Sink to Urban Forests Offsetting Energy Carbon Emissions in Xiamen City

HONG Zhimeng

(Fujian Academy of Forestry Sciences, Fuzhou 350012, Fujian, China)

Abstract: Based on the annual monitoring data of forest resources in Fujian Province in 2020, the distribution characteristics of carbon storage and carbon fixation in Xiamen City were estimated, and the effect of Xiamen urban forest offsetting energy emissions was evaluated. The results showed that the carbon storage of urban forest in Xiamen was 150.37×10⁴ t. The carbon sequestration of urban forest in Xiamen was 26.63×10⁴ t·a⁻¹, from 2016 to 2020, the average annual energy carbon emission in Xiamen was 925.91×10⁴ t, and the urban forest carbon storage was about 16.24% of the average annual energy carbon emission. The urban forest carbon fixation can offset 2.88% of the average annual energy carbon emission. The average carbon density of urban forest was 32.46 t·hm⁻² in Xiamen City and the average carbon sequestration rate was 5.75 t·hm⁻²·a⁻¹. Carbon density and carbon sequestration rate was different from forest type and forest age. Based on the characteristic of the carbon fixation in Xiamen City, the project put forward corresponding strategies to increase carbon sinks from the aspects of improving the area of urban forest resources, optimizing the spatial structure of urban forest and strengthening scientific management and operation, so as to provide support for the scientific management of urban forests.

Keywords: urban forest; carbon fixation; carbon sink; carbon offset; Xiamen City

全球气候变化是人类共同面临的问题之一。自工业革命以来,大气 CO₂ 浓度上升超过 125 ppm,全球地表温度升高了 1.07℃^[1]。温室气体导致地表温度的持续升高,带来更加频繁、更为严重的自然灾害,影响人类社会的稳定发展^[2],破坏了生态系统平衡^[3]。城市是化石能源消耗主要区域,城市消耗 75% 能源总量,占据了世界 80% 温室气体排放量^[4]。城市森林在改善城市生活品质、缓解 CO₂ 排放等城市环境问题发挥着重要的作用^[5-6],以树木为主体的城市森林通过植物固碳、土壤层固碳以及植被遮荫功能减少建筑物能耗等^[7]来减少城市 CO₂ 排放。据研究表明,美国城市森林碳储量达到 70 亿 t,固碳量达到了 2.28 亿 t^[8],城市土壤具有较强固碳功能,城市土壤固碳量是城市森林植被的 3 倍^[9],城市森林引起的建筑节能碳减排则为植被固碳量的 3 倍多^[10],城市森林在固碳功能发挥着重要作用。同时,城市森林还具

收稿日期: 2024-05-30; 修回日期: 2024-06-05

基金项目: 省属公益类科研院所基本科研专项(闽财指[2023]600号)

作者简介: 洪志猛(1976—),男,福建省林业科学研究院高级工程师,硕士,从事观赏园艺和森林生态研究。E-mail: 328180160@qq.com。

有降温增湿、雨水截留、净化空气、美化环境等方面的综合效益。

目前国内外学者在城市森林碳储量评估^[8,11-15]和综合效益评价^[16-19]等方面研究较多。但是,定量揭示城市森林植被固碳功能及其抵消碳排放的研究较少,仅见广州^[20]、上海^[21]等少数城市有相关报道,而城市森林固碳能力对发展低碳城市具有重要的意义。为此,本文以厦门城市森林为研究对象,测算城市森林的碳储量和碳固定量,探讨其碳汇抵消能源碳排放水平,旨在明晰厦门市森林碳汇现状及评估其在抵消能源碳排放中的效果,为城市森林科学经营管理提供支撑作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

厦门市位于北纬 24°23′—24°54′、东经 117°53′—118°26′,属亚热带海洋性季风气候,温和多雨,年均气温为 21℃,冬无严寒,夏无酷暑。年降水量 1143.5 mm,年相对湿度 76%。地貌类型以丘陵、台地为主,地势由西北向东南倾斜,山地土壤主要以砖红壤和黄壤为主。厦门市土地总面积为 15.56 万 hm²,林地用地面积 6.6 万 hm²,非林业用地面积 8.93 万 hm²,森林蓄积量 76526 万 m³。其中:乔木林地面积 4.63 万 hm²,非林地森林面积 0.51 万 hm²,森林覆盖率 41.72%,林木绿化率 42.39%。

1.2 数据来源

本文采用的数据均来源于福建省森林资源 2020 年度监测数据,其中包括厦门市城市森林各种林型小班的起源、区位、龄级、面积和蓄积等相关数据信息。厦门市城市森林主要林型分为杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb) Hook.)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、阔叶林、木麻黄(*Casuarina equisetifolia* L.)、桉树(*Eucalyptus*)等 5 种,具体各行政区城市森林林型面积见表 1。

表 1 厦门市各行政区城市森林主要林型面积

行政区	杉木	马尾松	阔叶林	木麻黄	桉树	合计
思明区	2.36	390.28	1566.03	40.52	4.89	2004.09
海沧区	121.04	1692.78	2561.88	1.12	203.44	4580.26
湖里区	0	117.16	133.63	1.77	27.80	280.35
集美区	9.99	1015.02	4501.77	0	158.63	5685.42
同安区	1529.33	15188.29	7793.79	4.75	1973.25	26489.40
翔安区	116.69	3206.77	3093.30	240.47	629.64	7286.87
合计	1779.42	21610.31	19650.41	288.63	2997.64	46326.40
占比/%	3.84	46.65	42.42	0.62	6.47	100.00

1.3 研究方法

城市森林碳储量采用生物量乘以其含碳率计算。不同林分生物量采用转换因子连续函数法来计算, $Y=ax+b$,式中: Y 为某一林分单位面积生物量($t \cdot \text{hm}^{-2}$); x 为蓄积量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); a 和 b 为蓄积量和生物量转换参数。各林分类型的计算参数、含碳率数值参照 2011 年 2 月国家林业局调查规划设计院发布的《全国林业碳汇计量监测技术指南(试行)》,详见表 2。

城市森林碳固定量为净初级生产力(NPP)所固定年均固碳量, NPP 值为扣除植物呼吸及死亡所排出部分的植物固定碳总量^[23-24],固碳量采取 NPP 乘以系数 0.5 来获得^[20]。具体碳储量和固碳量计算公式为^[20]: $C = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (C_{ji} \times A_{ji})$,式中: C 为城市森林碳储量(t)或固碳量($t \cdot \text{a}^{-1}$); C_{ji} 为第 j 个小班第 i 个林型的碳储量($t \cdot \text{hm}^{-2}$)或固碳量($t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), A_{ji} 为第 j 个小班第 i 个树种或林型的面积; m 为小班个数; n 为林型个数。

厦门市能源消耗碳排放量的数据主要基于 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)的清清单指南方法。厦门市能源消耗碳排放核算年份为 2016—2020 年,能源消耗数据主要来自于各年份厦门经济特区年鉴。具体核算公式为: $E_c = \sum_i F_i \times EF_i$,式中: E_c 为城市能源消费碳排放量 tC ; F_i 为 i 类型能源消费总量

(万 tce,吨标准煤当量 ton of standard coal equivalent); EF_i 为 i 类型能源碳有效排放因子。厦门市主要化石能源碳排放因子详见表 3,厦门市主要能源消耗水平详见表 4。

表 2 城市森林生物量转换参数、含碳率及 NPP 估算方程

林分类型	蓄积量、生物量转换参数		地上/地下生物量比		含碳率/%	NPP 估算方程 ^[22]
	a	b	幼龄林、 中龄林	近熟林、 成过熟林		
杉木	0.4652	19.1410	5.18	6.02	51.27	$NPP = B / (0.636A - 0.015B)^{[25]}$, $R^2 = 0.84, P < 0.01$
马尾松	0.5034	20.5470	5.18	6.02	52.71	$NPP = B / (0.238A + 0.0304B)^{[26-27]}$, $R^2 = 0.83, P < 0.01$
阔叶林	0.9788	5.3764	3.18	5.23	47.96	$NPP = 81.54B^{-0.353[25]}$, $R^2 = 0.36, P < 0.01$
木麻黄	0.7441	3.2377	3.97	4.68	48.93	$NPP = 81.54B^{-0.353[25]}$, $R^2 = 0.36, P < 0.01$
桉树	0.7893	6.9306	3.97	4.68	47.48	$NPP = 0.208B + 1.836^{[25]}$, $R^2 = 0.94, P < 0.01$

* : A 为林龄 (a); B 为植被生物量 ($t \cdot hm^{-2}$)。

表 3 厦门市主要能源碳排放因子

主要能源	碳排放因子 ^a /(tC/TJ)	氧化率/%	有效碳排放因子 ^b /(tC/万 tce)
原煤	27.4	100	7561.36
焦炭	29.5	100	8140.88
汽油	18.9	100	5215.68
柴油	20.2	100	5574.43
燃料油	21.1	100	5822.80
液化石油气	17.2	100	4746.55
外输热力			10112.8 ^c
外输电力 ^d /(tC/MWh)			0.2758

* : ^a 为化石能源碳排放因子参考^[27]; ^b 为有效碳排放因子依据标准煤转换系数进行计算; ^c、^d 分别为电力排放系数参考国家气候战略中心发布的 2020 年、2021 年减排项目中国区域电网基准线排放因子^[28]。

表 4 2016-2020 年厦门市的主要能源消耗量

年份	煤炭/万 tce	焦炭/万 tce	汽油/万 tce	柴油/万 tce	燃料油/ 万 tce	液化石油气/ 万 tce	外输热力/ 万 tce	外输电力/ 万 MWh
2016	394.5403	0.0950	1.8931	3.8821	1.353	0.8331	622.9545	94.3608
2017	330.7536	0.0356	1.6886	3.7549	0.8465	0.8491	602.8800	98.1390
2018	352.1063	0.0198	1.5635	3.8088	0.5189	0.8431	582.5892	107.5158
2019	395.6098	0.0152	1.4796	3.6878	0.453	0.8276	584.3533	116.0892
2020	400.0839	0.0001	1.4198	3.2582	0.2845	0.7886	622.4053	111.4546

2 结果与分析

2.1 厦门市城市森林碳储量和碳密度分析

厦门城市森林的总碳储量为 150.37 万 t,不同行政区碳储量分布不均匀(表 5)。其中,厦门岛内思明区、湖里区碳储量分别为 11.59、0.96 万 t,岛内城市森林碳储量仅占据厦门城市总碳储量的 8.35%;厦门岛外碳储量占厦门城市碳储量的 91.65%,仅同安区碳储量就达到 73.81 万 t,占厦门城市碳储量的近一半(49.08%),翔安区、集美区碳储量相近,分别为 23.72、23.63 万 t,占比分别为 15.78%、15.72%。各林型中的碳储量(表 6)从大到小依次为阔叶林、马尾松、桉树、杉木、木麻黄。其中,阔叶林、马尾松林碳储量分

别为 83.93、51.85 万 t, 分别占 55.82%、34.48%, 二者占总碳储量的 90.30%, 是厦门城市森林碳储量的主要组成; 其它林分类型占比少。从不同林龄分布来看, 幼龄林、中龄林、近熟林、成过熟林分别占厦门城市森林总碳储量的 9.66%、31.81%、16.45%、42.08%, 中龄林和成过熟林的碳储量比重大。

从碳密度的分布来看(表 5), 厦门市城市森林平均碳密度为 $32.46 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 不同行政区城市森林碳密度差异性较大, 变化范围 $27.86 \sim 57.82 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。整体上看, 厦门市城区或近城区更注重城市山体林分景观提升和改造, 城市森林碳密度也较高, 如厦门岛内思明区碳密度最高为 $57.82 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 集美区、海沧区分别为 41.57 、 $36.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而处于远郊区的同安区碳密度仅为 $27.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同林型的碳密度存在差异性, 各林型中碳密度从大到小依次为阔叶林、木麻黄、杉木、桉树、马尾松, 变化范围 $24.00 \sim 42.70 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同龄组林分的碳密度差别也较大(表 6), 除桉树外, 碳密度随着林龄的增加而呈增大趋势。桉树林分由于是短周期工业原料林, 可能生长一定阶段进行疏伐, 导致幼龄林碳密度高于中龄林和近熟林。阔叶林碳密度增幅较大, 从幼龄林、中龄林、近熟林、成过熟林分别为 23.63 、 39.08 、 48.69 、 $59.66 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表 5 厦门市行政区主要林型碳储量和碳密度

行政区	碳储量		碳密度/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$					均值
	值/万 t	占比/%	杉木	马尾松	阔叶林	木麻黄	桉树	
思明区	11.59	7.71	37.37	25.32	66.06	56.43	36.23	57.82
海沧区	16.66	11.08	32.06	22.94	45.56	35.41	34.82	36.36
湖里区	0.96	0.64	0.00	28.73	36.47	32.11	47.88	34.34
集美区	23.63	15.72	25.17	31.98	43.58	0.00	46.92	41.57
同安区	73.81	49.08	30.08	23.17	38.50	25.01	20.24	27.86
翔安区	23.72	15.78	25.59	25.62	38.11	33.89	41.38	32.56
总和/均值	150.37	100.00	29.91	24.00	42.70	36.91	27.36	32.46

表 6 厦门城市森林不同龄组类型碳储量和碳密度分析

龄组	杉木		马尾松		阔叶林		木麻黄		桉树		占比/%
	碳储量/ 万 t	碳密度/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	碳储量/ 万 t	碳密度/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	碳储量/ 万 t	碳密度/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	碳储量/ 万 t	碳密度/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	碳储量/ 万 t	碳密度/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	
幼龄林	0.02	17.27	1.34	14.40	11.81	23.63	0.02	14.14	1.34	23.66	9.66
中龄林	0.42	27.62	22.78	22.26	23.66	39.08	0.01	23.47	0.97	22.26	31.81
近熟林	0.61	27.26	10.12	25.55	12.79	48.69	0.05	27.10	1.17	21.52	16.45
成过熟林	4.27	30.63	17.61	27.15	35.67	59.66	0.99	38.87	4.72	32.45	42.08
总和/均值	5.32	29.91	51.85	24.00	83.93	42.70	1.07	36.91	8.20	27.36	100.00

2.2 厦门城市森林固碳量分析

厦门不同行政区主要林型的年固碳量见表 7。厦门城市森林年固碳量为 $266266 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 平均固碳率为 $5.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其城市森林固碳量的空间分布呈现不平衡状况。厦门岛内思明区、湖里区的固碳量仅占厦门城市森林总固碳量的 5.7%, 而厦门市岛外的固碳量占厦门城市森林总固碳量的 94.3%。其中, 远郊的同安区年固碳量为 $134817 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 占城市森林总固碳量的 50.63%; 湖里区的年固碳量最小, 为 $1699 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 仅占城市森林总固碳量的 0.64%。不同林型的年固碳量差异较大, 阔叶林的年固碳量最高达到 $168997 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 占城市森林总固碳量的 63.47%; 其次为马尾松林, 年固碳量达到 $75551 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 占城市森林总固碳量的 28.37%; 二者年固碳量占到总固碳量的 91.84%, 是厦门城市森林固碳水平高低的关键; 而桉树、杉木、木麻黄的年固碳量分别仅占总固碳量的 6.30%、0.89%、0.97%。固碳率同样受到不同林分类型和林龄影响(图 1)。其中, 平均固碳率最高为木麻黄, 达到 $10.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 其次为阔叶林、桉树, 分别为 8.58 、 $5.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 而杉木最低, 仅 $2.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。不同树种的固碳率均随着林龄的增大而呈现下降趋势, 阔叶林固碳率从幼龄林的 $10.30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 降到成过熟林的 $7.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 木麻黄林从幼龄林的 $12.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 降到成过熟林的 $8.70 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 而马尾松林则从幼龄林的 $6.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 降低到成过熟林的 $2.10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

表 7 厦门不同行政区主要林型的年固碳量

行政区	年固碳量/(t·a ⁻¹)					合计	占比/%
	杉木	马尾松	阔叶林	木麻黄	桉树		
思明	3	1051	12039	353	27	13472	5.06
海沧	130	5645	21660	14	1150	28600	10.74
湖里	0	358	1172	15	154	1699	0.64
集美	11	2833	36758	0	889	40491	15.21
同安	2012	52623	69125	43	11014	134817	50.63
翔安	213	13040	28243	2161	3530	47187	17.72
总计	2369	75551	168997	2586	16764	266266	100.00
占比/%	0.89	28.37	63.47	0.97	6.30	100	

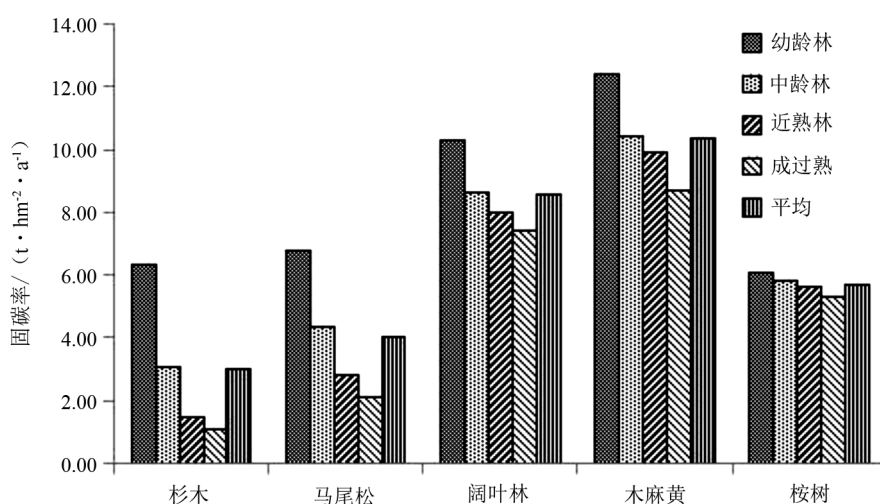


图 1 厦门城市森林主要林型各林龄的固碳率

2.3 厦门城市森林抵消能源碳排放效果分析

2016—2020 年厦门能源碳排放变化见图 2。厦门市 2020 年的能源碳排放量为 965.78 万 t, 相对于 2016 年的能源碳排放量 958.74 万 t, 变化不大, 稳定在一定水平。而 2017—2019 年能源碳排放量分别为 890.74、888.71、925.59 万 t, 相对于 2016 年没有增长, 反而降低, 主要是因为厦门在“十三五”积极推进煤改电、煤改气的节能减排措施, 促进能源碳排放的降低。5 年间能源碳排放平均值为

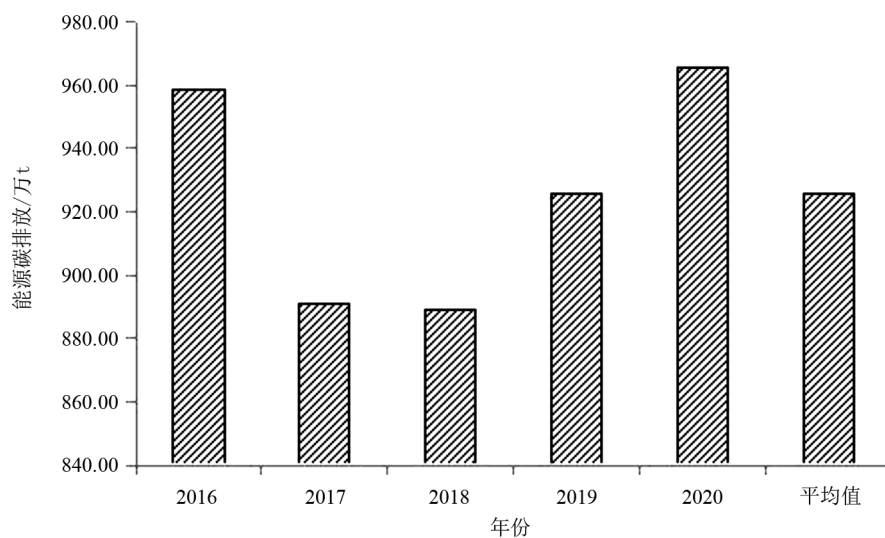


图 2 2016—2020 年厦门市化石能源碳排放量

925.91 万 t, 同期厦门城市森林年固碳量为 266266 t·a⁻¹, 年均可抵消厦门城市能源排放量的 2.88%。厦门城市森林碳总量达 150.37 万 t, 为 2016—2020 年厦门市能源碳排放量均值(925.91 万 t) 的 16.24%。

3 结论与讨论

3.1 厦门城市森林碳储量和固碳量比较分析

厦门市城市森林平均碳密度为 $32.46 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 低于福建省森林碳密度平均水平 ($48.87 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[29], 也低于全国自然条件下森林碳密度 ($41.32 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[30] 和世界森林碳密度 ($86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[31] 的平均水平, 高于广州市城市森林碳密度 ($28.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[20]。厦门市城市森林中杉木、马尾松、阔叶林、桉树的平均碳密度分别为 29.91 、 24.00 、 42.70 、 $27.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而自然条件下同种林型平均碳密度分别为 40.55 、 56.25 、 82.12 和 $20.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[32], 自然条件下杉木、马尾松、阔叶林、桉树分别是厦门城市森林平均碳密度的 1.36 、 2.34 、 1.92 、 0.76 倍, 除桉树外, 其它林型均低于自然条件下森林碳密度。厦门城市森林碳密度较低可能是立地条件、树种组成和林龄结构等综合因素造成^[33-34], 厦门岛地处东南沿海, 山体土层瘠薄、土壤肥力差, 长期受到台风等天气影响, 年降水量少, 导致山体植被树种单一, 耐瘠薄马尾松纯林占城市森林总面积的 46.65% 、碳储量和年固碳量分别占总量的 34.48% 和 28.37% , 而其平均碳密度最低仅 $24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 导致厦门城市森林整体碳密度水平偏低。同时, 林龄结构也影响城市森林碳密度水平, 碳密度随着林龄的增加呈增大趋势, 厦门城市森林林龄结构中幼龄占 41.47% , 影响城市森林碳储量, 但具有较大的固碳潜力。

3.2 城市森林碳汇与抵消碳排放效益分析

城市森林作为城市生态系统重要的组成部分, 在增汇方面城市森林具有不可替代的作用。世界各国将森林生态系统作为吸收 CO_2 温室气体的战略手段, 最大限度提高森林的碳汇功能^[35-36]。本研究结果表明, 厦门城市森林年固碳量可抵消城市能源排放量的 2.88% , 而杭州达到 4.76% 、北京为 1.41% 、广州为 2.27% 、上海最低为 0.01% 、纽约为 0.27% 、韩国春川为 1.75% 等^[20], 厦门城市森林年固碳量抵消碳排放量相对于其它城市较高, 仅次于杭州市。但是, 由于受基础数据的限制, 本文测定的森林植被碳汇以乔木林为主, 没有涉及灌木层、草本层及土壤固碳量, 因此, 森林碳汇固碳效果比实际小。此外, 城市森林还有释氧功能、降温增湿、净化空气、雨水截留、建筑节能、美化环境和游憩功能等多方面综合效益^[37-38]。从整体上看, 城市森林在减少 CO_2 排放、减缓城市热岛效应方面具有重要作用。但是, 与高强度的能源碳排放相比, 城市森林在碳抵消的比重普遍较小。然而, 城市森林多重的综合生态效益和服务价值, 对提升城市居民的生活品质, 促进城市低碳发展和可持续发展具有重要作用。

3.3 城市森林碳汇制约因素及提升途径

城市森林在增加森林碳汇能力、降低 CO_2 排放、减缓城市热岛效应、降低建筑能耗、促进低碳城市建设等方面发挥重要的作用。厦门城市森林碳汇制约因素主要为: 林龄结构不合理、林分结构树种单一、经营管理粗放及碳汇功能较低等问题。依据厦门城市森林特点, 可通过增加森林资源面积、优化城市森林空间结构以及强化科学经营管理等增加碳汇功能。

3.3.1 增加城市森林面积 厦门城区用地紧张, 提升森林资源面积措施如下: 一是结合厦门山海格局特点, 合理规划布局“绿楔”“绿环”“绿道”“绿廊”, 将城区绿地系统、山体植被及城市外围森林生态系统等自然生态要素有机连接, 形成城市森林碳汇网络体系, 提升碳汇绿地空间; 二是按照“宜林则林”的原则, 在海沧湾、同安湾等宜林海域种植恢复红树林, 保护和修复马銮湾湿地, 促进滨海湿地公园建设, 扩展湿地绿地空间, 可大幅度提升湿地碳汇功能, 从而提升城市森林固碳能力。研究表明: 长江口湿地固碳量可达全国陆地植被固碳能力的 $2.3 \sim 4.9$ 倍^[39]; 三是加大厦门市废弃矿山森林植被恢复。结构合理的植物群落能够通过植物的呼吸、土壤微生物活动、凋落物的分解等提高森林生态系统碳汇功能^[40-41]。矿山植被恢复应遵循近自然式营建理念, 合理选择乡土树种营建多树种混交林, 促进废弃矿山植被恢复与周围山体自然生态有机融合。

3.3.2 优化城市森林空间结构, 提高地块碳密度 一是城区中的城市森林由于受到建筑布局、道路及植物造景的影响, 植被密度较低而且碳密度远低于天然林^[42], 可通过构建以乔木林为主体的森林群落结构, 不同树龄, 快生和慢生树种合理搭配, 营造乔灌草相结合的复层植物群落结构, 可大幅度提高单位面积城

市森林固碳能力^[36,43]。研究表明:植被覆盖面积由 20% 提升至 40%,绿地植被碳汇量将提高 34.61%^[44],提升碳汇效果显著;二是厦门城市森林中阔叶林占比达到 42%,阔叶林具有较高的碳汇功能、生物多样性较为丰富,应以保护和促进天然更新为主,加强森林科学经营管理,加大阔叶林大径材培育,维持林下植被物种多样性,提升森林稳定性和固碳增汇功能。三是加强马尾松林分结构改造。厦门城市森林中马尾松纯林占比达 46.65%,存在较低的固碳功能、生物多样性、水源涵养、水土保持等生态服务功能,较高的水分消耗及病虫害风险等特征。对马尾松纯林采取人工补植、抽针补阔、间针育阔、透光疏伐等方式,调整树种混交比例和林龄结构,促进马尾松纯林向以乡土阔叶树种为主的复层多树种混交林转变。

3.3.3 强化科学经营管理,提升森林景观质量 一是合理选择造林树种。不同树种具有不同碳密度和生长速率水平^[45],如马尾松碳密度($24.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)仅为阔叶林碳密度($42.70 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)的 56.60%,造林树种上应选择充分考虑厦门沿海山地土壤瘠薄、土壤肥力差等特点,因地制宜选择生产力高、抗逆性良好、耐干瘠的树种,可选择木荷(*Schima superba* Gardner & Champ.)、火力楠(*Michelia macclurei* Dandy)、厚荚相思(*Acacia crassicaarpa* Benth.)、马占相思(*Acacia mangium* Willd.)、鸡爪槭(*Acer palmatum* Thunb.)、枫香(*Liquidambar formosana* Hance)、台湾栎树(*Koelreuteria elegans* subsp. *formosana*)、黄山栎树(*Koelreuteria bipinnata* var. *integrifoliola* (Merr.) T. Chen)、潺槁木姜子(*Litsea glutinosa* (Lour.) C. B. Rob.)等;二是合理进行森林抚育。厦门城市森林中幼林比例占 41.47%,森林抚育能有效提高幼林的成活率和成林的生长率,应加强对中幼林植被的抚育措施,主要包括施肥、灌溉、修枝、除草等^[46],增加植被生物量和碳汇能力^[44,47-48];三是间伐改造措施。随着森林进入近成熟期及成过熟期阶段,其树木的固碳能力逐渐降低,厦门城市森林近成熟林、成过熟林比例占 58.53%,特别是成过熟林达到 42.08%。森林的固碳能力与林龄有关,应加强成过熟林的间伐改造,依照以“伐”促“育”的理念,采取疏伐、透光伐、生长伐和卫生伐等措施^[44],补造更新造林树种,着重提升林分产量和景观价值^[49],建成多树种复层结构、季相变化明显、群落结构稳定、抗逆性强的城市森林。

参考文献:

- [1] 曾子航. 全球气候变化对森林的影响与启示[J]. 绿色中国, 2022, 30(8): 60-63.
- [2] 胡雨梦, 姜雪梅, 王森, 等. 应对与发展——全球气候变化背景下的加拿大林业[J]. 世界林业研究, 2017, 30(6): 73-77.
- [3] KARL T R, NICHOLLS N, GREGORY J et al. The coming climate[J]. Scientific American, 1997, 276(5): 78-83.
- [4] 顾朝林, 谭纵波, 刘宛, 等. 气候变化、碳排放与低碳城市规划研究进展[J]. 城市规划学刊, 2009(3): 38-45.
- [5] DALLIMER M, TANG Z Y, BIBBY P R, et al. Temporal changes in greenspace in a highly urbanized region[J]. Biology Letters, 2011, 7(5): 763-766.
- [6] FULLER R A, GASTON K J. The scaling of green space coverage in European cities[J]. Biology Letters, 2009, 5(3): 352-355.
- [7] ESCOBEDO F, VARELA S, HAO 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.
- [8] NOWAK D J, CRANE D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 381-389.
- [9] POUYAT R V, YESILONIS I D, NOWARK D J. Carbon storage by urban soils in the united states[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(4): 1566-1575.
- [10] MCPHERSON E G. Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest[J]. Journal of Arboriculture, 1998, 24(4): 215-223.
- [11] PATAKI D E, ALIG R J, FUNG A S, et al. Urban ecosystems and the North American carbon cycle[J]. Global Change Biology, 2006, 12(11): 2092-2102.
- [12] 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.
- [13] 王祖华, 刘红梅, 关庆伟, 等. 南京城市森林生态系统的碳储量和碳密度[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(4): 18-22.
- [14] 粟娟, 周璋, 李意德, 等. 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.

- [15] 张桂莲. 基于遥感估算的上海城市森林碳储量空间分布特征[J]. 生态环境学报, 2021, 30(9): 1777-1786.
- [16] 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.
- [17] TSIROS X I. Assessment and energy implications of street air temperature cooling by shade trees in Athens (Greece) under extremely hot weather conditions[J]. Renewable Energy, 2009, 35(8): 1866-1869.
- [18] GIRIDHARAN R, LAU S, GANESAN S, et al. Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: The vegetation influence[J]. Building and Environment, 2008, 43(10): 1583-1595.
- [19] 董建华, 何奇江, 高月, 等. 典型城市森林和湿地的小气候效应及人体舒适度影响——以杭州市为例[J]. 环境保护科学, 2019, 45(6): 101-107.
- [20] 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, 2013, 33(18): 5865-5873.
- [21] 张彪, 谢紫霞, 高吉喜, 等. 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.
- [22] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320-2322) 的若干说明[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 243-249.
- [23] MELILLO J M, MCGURIE A D, KICKLIGHTER D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production[J]. Nature, 1993, 363(6426): 234-240.
- [24] PENG C H, APP M J. Modelling the response of net primary productivity (NPP) of boreal forest ecosystems to changes in climate and fire disturbance regimes[J]. Ecological Modelling, 1999, 122(3): 175-193.
- [25] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄, 等. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [26] Zhou G Y. Measures to increase carbon sink in Guangzhou based on carbon storage dynamics in recent 10 years[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2007, 5(6): 24-27.
- [27] 国家发展与改革委员会. 省级温室气体清单编制指南(试行)[EB/OL]. [2011-05-05]. <https://shengjiwenshiqiti.pdf> (cbcsd.org.cn).
- [28] 国家气候战略中心. 2020、2021年减排项目中国区域电网基准线排放因子[ED/OL]. [2023-11-17]. <https://mhuanbao.in-en.com/html/huanbao-2382148.shtml>.
- [29] 吴文斌, 黄朝法, 郑德祥, 等. 福建省森林碳储量及碳密度特征分析[J]. 四川农业大学学报, 2016, 34(3): 298-303.
- [30] ZHAO M, ZHOU G S. Carbon storage of forest vegetation in China and its relationship with climatic factors[J]. Climatic Change, 2006, 74(1-3): 175-189.
- [31] 刘国华, 傅伯杰, 方精云, 等. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
- [32] ZHAO M, ZHOU G S. Estimation of biomass and net primary productivity of major planted forests in China based on forest inventory data[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 207(3): 295-313.
- [33] 刘双娜, 周涛, 魏林艳, 等. 中国森林植被的碳汇/源空间分布格局[J]. 科学通报, 2012, 57(11): 943-950.
- [34] 吴国训, 唐学君, 阮宏华, 等. 基于森林资源清查的江西省森林碳储量及固碳潜力研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 105-110.
- [35] 刘文玲, 王灿. 低碳城市发展实践与发展模式[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4): 17-22.
- [36] 铁铮. 低碳城市离不开森林碳汇[J]. 中国林业, 2012(9): 30-31.
- [37] 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.
- [38] LIU C F, HE X Y, CHEN W, et al. Ecological benefit evaluation of urban forests in Shenyang City based on QuickBird image and CITYgreen model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 1865-1870.
- [39] 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.
- [40] GUO J F, YANG Y S, CHEN G S, et al. Soil C and N pools in Chinese fir and evergreen broadleaf forests and their changes with slash burning in mid-subtropical China[J]. Pedosphere, 2006, 16(1): 56-63.
- [41] 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.

- [15] 刘树生. 欧洲千里光中的吡咯双烷生物碱类的双烷生物碱类的分离与鉴别(译文)[J]. 牡丹江医学院学报, 1993(S1): 145-146.
- [16] 熊爱珍, 杨莉, 杨雪晶, 等. UPLC-MS 同时测定千里光和欧洲千里光中阿多尼弗林碱和千里光碱的含量[J]. 中国中药杂志, 2011, 36(6): 702-705.
- [17] EBADI M, EFEKHARI R. Morphological and genetic diversity of *Senecio vulgaris* L. (Asteraceae) in Iran[J]. Acta Botanica Croatica, 2021, 80(2): 125-130.
- [18] 吉林省特产学会, 吉林省特产研究所. 特产科学实验: 中草药专辑[Z]. 吉林, 1980: 55.
- [19] 卫生部药品生物制品检定所, 云南省药品检验所, 等. 中国民族药志[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1984: 307.
- [20] 石得仁, 刘昶时. 白癜风患者发内微量元素测定及驱虫斑鸠菊治疗白癜风[J]. 中华皮肤科杂志, 1989, 22(5): 2.
- [21] 陈琰. 实用中药种子技术手册[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1999: 603.
- [22] 张艺, 杜江. 民族药物学[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2020: 151.
- [23] NOOR J, MANSOOR A, MEHJABEEN, FARAH S, et al. Anti-nociceptive activity of seed extract of *Vernonia anthelmintica* Willd[J]. Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences, 2014, 27(6): 2177-2181.
- [24] SUBIA J, RAFEEQ A K, SHADAB A, et al. Evaluation of anti-inflammatory and anti-oxidant potential of seed extracts of *Vernonia anthelmintica*[J]. Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences, 2017, 30(3): 755-760.
- [25] 刘宗洋, 咎珂, 吴霞, 等. 维药驱虫斑鸠菊化学成分、质量控制及其药理活性的研究进展[J]. 药物分析杂志, 2020, 40(2): 199-208.
- [26] 郭喜红, 张丹, 黎玉红, 等. 驱虫斑鸠菊软膏质量标准研究[J]. 中国药房, 2008, 19(27): 2120-2122.
- [27] 古丽斯坦·阿吾提, 何承辉, 刘宣麟, 等. 复方驱虫斑鸠菊丸质量标准[J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(13): 94-96.

(上接第 119 页)

- [42] FANG J Y, CHEN A P, PENG C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [43] 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[J]. 中国园林, 2022, 38(3): 78-83.
- [44] 汤煜, 石铁矛, 卜英杰, 等. 城市化进程中沈阳城市绿地土壤有机碳储量空间分布研究[J]. 中国园林, 2019, 35(12): 68-73.
- [45] WANG H, LIU S R, MO J M, et al. Correlation between leaf litter and fine root decomposition among subtropical tree species. Plant and Soil, 2010, 335(1): 289-298.
- [46] 康孟龙. 森林抚育对森林生态系统的影响[J]. 新农业, 2022(14): 42-43.
- [47] MIGUEL A B, ROQUE R S, AUGUSTIN M, et al. Temporal variations and distribution of carbon stocks in above ground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 237(1-3): 29-38.
- [48] 刘世荣, 王晖, 李海奎, 等. 碳中和目标下中国森林碳储量、碳汇变化预估与潜力提升途径[J]. 林业科学, 2024(4): 157-172.
- [49] 贾忠奎. 我国人工林长期生产力维持技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2012, 25(1): 49-54.