

1974—2018 年福建省森林碳储量特征及动态变化

肖嘉文¹, 刘金福^{1,①}, 郑雯², 王智苑^{3,4}, 方梦凡¹, 洪宇¹, 谭芳林⁵

(1. 福建农林大学, 福建 福州 350002; 2. 福建省金皇环保科技有限公司, 福建 福州 350001;
3. 福建省数字经济发展促进中心, 福建 福州 350003; 4. 昌吉学院, 新疆 昌吉 831199; 5. 福建省林业科学研究院, 福建 福州 350012)

摘要: 基于福建省 1974—2018 年共 9 期的森林资源清查数据, 采用生物量转换因子法和平均生物量法, 分析福建省森林碳储量动态变化, 并对 2014—2018 年乔木林各优势树种(组)的碳储量情况进行分析。结果表明: 1974—2018 年, 福建省森林总体碳储量从 $13\,539.64 \times 10^4$ t 增长到 $33\,962.34 \times 10^4$ t, 平均碳密度从 $25.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增长到 $39.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。乔木林中, 幼龄林和中龄林的面积较大, 而近熟林、成熟林和过熟林的面积逐期增加; 中龄林的碳储量最高; 成熟林和过熟林的碳密度整体较大。天然林和人工林的面积、碳储量和碳密度逐期增加, 且天然林各指标均高于人工林。2014—2018 年, 天然林中阔叶混交林的碳储量最高, 锥栗 [*Castanea henryi* (Skan) Rehder et E. H. Wilson)] 的碳密度最大; 人工林中杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 的碳储量最高, 木麻黄 (*Casuarina equisetifolia* Linn.) 的碳密度最大。综上所述, 福建省森林有较高的碳储量和碳汇能力, 阔叶混交林和杉木是乔木林碳储量的主要贡献者, 因此, 可通过改善这 2 个树种(组)的林龄结构并加强经营管理来提升福建省森林碳汇能力; 并通过合理的采伐和种植策略, 优化幼龄林和中龄林的比例, 以提高福建省森林碳汇能力, 保持成熟林和过熟林面积占比, 以维持福建省较高的森林碳密度。

关键词: 福建省; 森林; 碳储量; 碳密度; 碳汇能力

中图分类号: S718.55⁺4.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)04-0101-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.04.11

Characteristics and dynamic changes of forest carbon storage in Fujian Province from 1974 to 2018 XIAO Jiawen¹, LIU Jinfu^{1,①}, ZHENG Wen², WANG Zhiyuan^{3,4}, FANG Mengfan¹, HONG Yu¹, TAN Fanglin⁵ (1. Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Fujian Jinhuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Fuzhou 350001, China; 3. Fujian Digital Economy Development and Promotion Center, Fuzhou 350003, China; 4. Changji University, Changji 831199, China; 5. Fujian Academy of Forestry Sciences, Fuzhou 350012, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(4): 101–108

Abstract: Based on the forest resource inventory data of 9 periods in Fujian Province from 1974 to 2018, the dynamic changes of forest carbon storage in Fujian Province were analyzed by using the biomass conversion factor method and average biomass method, and the carbon storage of each dominant tree species (group) in arboreal forest from 2014 to 2018 were analyzed. The results show that from 1974 to 2018, the total forest carbon storage in Fujian Province increases from $13\,539.64 \times 10^4$ t to $33\,962.34 \times 10^4$ t, and the average carbon density increases from $25.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $39.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. In the arboreal forest, the areas of young and half-mature forests are relatively large, while those of near-mature, mature, and overmature forests have been increasing period by period; the carbon storage of half-mature forest is the highest; the carbon densities of mature and overmature forests are generally large. The area, carbon storage, and carbon density of natural forest and plantation have been increasing period by period,

收稿日期: 2024-02-23

基金项目: 福建省林业科技项目(2022FKJ02; 2022FKJ26); 福建省省级科技创新重点项目(2021G02007)

作者简介: 肖嘉文(1999—), 男, 湖北天门人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境与资源统计。

①通信作者 E-mail: fjlf@126.com

引用格式: 肖嘉文, 刘金福, 郑雯, 等. 1974—2018 年福建省森林碳储量特征及动态变化[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(4): 101–108.

and the indexes of natural forest are higher than those of plantation. From 2014 to 2018, the carbon storage of broad-leaved mixed forest is the highest and the carbon density of *Castanea henryi* (Skan) Rehder et E. H. Wilson is the largest in natural forest; the carbon storage of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. is the highest and the carbon density of *Casuarina equisetifolia* Linn. is the largest in plantation. In conclusion, the forests in Fujian Province have high carbon storage and carbon sink capacities, and broad-leaved mixed forest and *C. lanceolata* are the main contributors to the carbon storage of arboreal forest, therefore, it is suggested that through improving the age structure of these two tree species (group) and strengthening the management to enhance the forest carbon sink capacity in Fujian Province; furthermore, through reasonable logging and planting strategies to optimize the proportion of young and half-mature forests for enhancing the forest carbon sink capacity in Fujian Province, and to maintain the area proportions of mature and overmature forests for sustaining the high forest carbon density in Fujian Province.

Key words: Fujian Province; forest; carbon storage; carbon density; carbon sink capacity

森林生态系统在陆地碳循环中占核心地位,在抑制全球气候变暖方面扮演着关键角色^[1-2]。虽然全球森林面积仅占陆地面积的30%,但其碳储量却是陆地植被碳储量极其重要的部分^[3]。森林碳储量作为核心衡量标准,揭示了森林生态结构、功能及质量等状况,可评估森林固碳能力^[4]。当前科研焦点在于系统性探究不同区域森林碳储量及其动态演变规律,为应对区域内气候变化和提升森林碳汇功能提供关键性理论依据和数据支持^[5-6]。

根据第九期(2014—2018)全国森林清查结果,福建省森林覆盖率66.8%,位居全国第一^[7]¹⁸⁵。因此,福建省森林碳储量估算备受关注。王念奎^[8]通过估算福建省1994—2013年碳储量发现该时期福建省的森林碳储量以中、幼龄林及针叶林为主;林力等^[9]利用生物量-蓄积量换算因子模型揭示了1974—2013年福建省天然阔叶林碳汇变化情况,即除1974—1978年外,其他时期碳汇均为正值;吴文斌等^[10]基于第八期(2009—2013)全国森林清查数据对福建省森林进行不同林种和龄组碳储量分析,指出阔叶混交林及中龄林的碳储量占比最高;郑德祥等^[11]对福建省1998—2008年共3期的森林清查统计数据变化进行分析,结果显示这段时期近熟林以上龄组森林质量有所下降;王开德等^[12]发现1978—2008年福建省森林植被碳储量随林分类型、林龄结构和土地权属变化而变化。目前,关于福建省森林碳储量的研究还存在研究树种不够精细,缺乏对第九期森林清查数据的整理和分析等问题,不利于福建省森林资源的经营管理。且目前研究者在估算生物量时大多采用生物量换算因子连续函数法^[8,13-14],该方法适用于国家等较大区域层次的生物量估算,有时需要将相似的树

种合并进行估算,而生物量转换因子法^[15]用于省域等较小层次的生物量估算精确度较高,可将各个优势树种(组,下同)单独进行计算。本研究以福建省1974—2018年共9期的森林资源清查资料为依据,采用生物量转换因子法和平均生物量法探讨1974—2018年福建省森林植被的碳储量动态变化及2014—2018年乔木林优势树种碳储量状况,以期为福建省森林合理经营管理和生态环境建设提供科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

福建省位于东经115°50′~120°43′、北纬23°31′~28°18′,地处中国东南沿海,东西最大长度约480 km,南北最大长度约530 km,全省土地面积 $12.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。福建省的地貌多低山丘陵、少平原,素有“八山一水一分田”之称。福建省气候主要为温和湿润的中亚热带和南亚热带季风气候。福建省植物类型复杂多样、种类丰富,植被类型主要有南亚热带雨林、中亚热带常绿阔叶林、竹林等^[11]。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源 数据来源于福建省1974—2018年共9期的森林资源清查资料。该数据仅包含森林资源清查统计报表,未涵盖样地库、样本库等。结合王开德等^[12]和方精云等^[13-14]的研究方法以及福建省森林实际情况,将森林划分为乔木林、疏林、经济林、灌木林和竹林;并根据生长发育阶段将乔木林分为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林,根据森林起源将乔木林分为天然林和人工林。

1.2.2 各森林类型质量估算 由于林业行业中定义

的生物量单位为质量单位,因此本文将“生物量”改为“质量”,“单位面积生物量”改为“生物量”。

1.2.2.1 乔木林质量估算 参考 LY/T 2253—2014 和 LY/T 2988—2018 的生物量扩展因子法估算乔木林质量,计算公式为 $B_i = S_i \cdot V_i \cdot BEF_i \cdot SVD_i \cdot (1 + RSR_i)$,式中, B_i 为树种 i 的质量(t), S_i 为树种 i 的面

积 (hm^2), V_i 为树种 i 的单位面积蓄积量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$), BEF_i 为树种 i 的生物量扩展因子, SVD_i 为树种 i 的木材基本密度($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$), RSR_i 为树种 i 的地下部分质量与地上部分质量的比值。乔木林的质量为所有优势树种质量之和,各树种的 BEF 、 SVD 、 RSR 值见表 1。

表 1 福建省乔木林优势树种(组)用于质量和碳储量估算的相关参数¹⁾
Table 1 Relative parameters used for mass and carbon storage estimation of dominant tree species (group) in arboreal forest of Fujian Province¹⁾

树种(组)Tree species (group)	BEF	SVD	RSR	CF	树种(组)Tree species (group)	BEF	SVD	RSR	CF
铁杉 <i>Tsuga chinensis</i>	1.667	0.425	0.277	0.502	青冈 <i>Quercus glauca</i>	1.355	0.612	0.292	0.500
油杉 <i>Keteleeria fortunei</i>	1.667	0.448	0.277	0.500	锥栗 <i>Castanea henryi</i>	1.514	0.482	0.262	0.490
黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	1.551	0.493	0.280	0.515	樟 <i>Camphora officinarum</i>	1.412	0.460	0.275	0.492
华山松 <i>Pinus armandii</i>	1.785	0.386	0.170	0.523	楠木 <i>Phoebe zhennan</i>	1.639	0.477	0.264	0.503
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	1.472	0.380	0.187	0.460	含笑花 <i>Michelia figo</i>	1.514	0.482	0.262	0.490
高山松 <i>Pinus densata</i>	1.651	0.413	0.235	0.501	木荷 <i>Schima superba</i>	1.894	0.516	0.258	0.497
湿地松 <i>Pinus elliotii</i>	1.614	0.424	0.264	0.511	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	1.765	0.486	0.398	0.497
火炬松 <i>Pinus taeda</i>	1.631	0.424	0.206	0.511	杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i>	1.514	0.482	0.262	0.490
黄山松 <i>Pinus hwangshanensis</i>	1.631	0.424	0.206	0.511	其他硬阔类 Other hardwoods	1.674	0.598	0.261	0.497
其他松类 Other <i>Pinus</i> spp.	1.631	0.424	0.206	0.511	南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i>	1.586	0.422	1.261	0.497
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	1.634	0.307	0.246	0.520	桉 <i>Eucalyptus robusta</i>	1.263	0.578	0.221	0.525
柳杉 <i>Cryptomeria japonica</i>	2.593	0.289	0.267	0.524	台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	1.479	0.443	0.207	0.485
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	1.506	0.278	0.319	0.501	拟赤杨 <i>Alniphyllum fortunei</i>	1.446	0.364	0.227	0.496
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	1.732	0.472	0.220	0.510	杂木 Other tree species	1.586	0.515	0.289	0.483
东北红豆杉 <i>Taxus cuspidata</i>	1.667	0.359	0.277	0.510	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	1.505	0.443	0.213	0.498
栎类 <i>Quercus</i> spp.	1.355	0.612	0.292	0.500	其他软阔类 Other softwoods	1.586	0.422	0.289	0.485
石栎 <i>Lithocarpus glabra</i>	1.355	0.612	0.292	0.500	针叶混交林 Coniferous mixed forest	1.587	0.390	0.267	0.510
栲类 <i>Castanopsis</i> spp.	1.514	0.482	0.262	0.490	阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	1.514	0.482	0.262	0.490
栲 <i>Castanopsis fargesii</i>	1.514	0.482	0.262	0.490	针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	1.656	0.475	0.248	0.498

¹⁾ BEF : 生物量扩展因子 Biomass expansion factor; SVD : 木材基本密度 Wood basic density ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$); RSR : 地下部分质量与地上部分质量的比值 The ratio of under-ground part mass to above-ground part mass; CF : 含碳率 Carbon content.

1.2.2.2 疏林、经济林、灌木林和竹林质量估算 采用平均生物量法^[13,16]估算疏林、经济林、灌木林和竹林的质量,计算公式为 $B_k = Y_k \cdot S_k$,式中, B_k 为森林类型 k 的质量(t), Y_k 为森林类型 k 的平均生物量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), S_k 为森林类型 k 的面积(hm^2)。疏林、经济林和灌木林的平均生物量分别为 19.76、23.70 和 $19.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[13],竹林包括毛竹和其他竹,其平均生物量分别为 81.9 和 $53.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[16]。疏林、经济林、灌木林和竹林的面积见表 2。

1.2.3 各森林类型碳储量估算

1.2.3.1 乔木林碳储量估算 计算公式为 $C_i = B_i \cdot CF_i$,式中, C_i 为树种 i 的碳储量(t), CF_i 为树种 i 的含碳率。乔木林的碳储量为所有优势树种的碳储量之和。鉴于不同树种含碳率存在差异,仅根据含碳率

为 0.5^[17]估算碳储量会导致结果精准度不足,因此,参考 LY/T 2253—2014 和 LY/T 2988—2018 整理出各树种的含碳率(表 1)。

1.2.3.2 疏林、经济林、灌木林和竹林碳储量估算 计算公式为 $C_k = B_k \cdot CF_k$,式中, C_k 为森林类型 k 的碳储量(t), CF_k 为森林类型 k 的含碳率。参考文献[17-18]得到疏林、经济林、灌木林和竹林的含碳率分别为 0.50、0.47、0.50 和 0.50。

1.2.4 各森林类型碳密度估算

1.2.4.1 乔木林碳密度估算 计算公式为 $\rho_i = C_i / S_i$,式中, ρ_i 为树种 i 的碳密度($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[19-20]。乔木林的碳密度为各优势树种的碳密度之和。

1.2.4.2 疏林、经济林、灌木林和竹林碳密度估算 计算公式为 $\rho_k = C_k / S_k$,式中, ρ_k 为森林类型 k 的碳密

表2 1974—2018年福建省疏林、经济林、灌木林和竹林的面积
Table 2 Areas of woodland, non-timber product forest, shrubland, and bamboo forest in Fujian Province from 1974 to 2018

时期 Period (CCYY—CCYY)	面积/(10 ⁴ hm ²) Area			
	疏林 Woodland	经济林 Non-timber product forest	灌木林 Shrubland	竹林 Bamboo forest
1974—1978	46.24	34.20	29.86	58.04
1979—1983	65.97	47.92	29.86	61.16
1984—1988	93.42	56.58	24.35	60.92
1989—1993	14.18	79.14	21.66	68.07
1994—1998	18.28	103.44	23.09	82.03
1999—2003	20.21	112.57	26.70	88.52
2004—2008	9.14	51.97	70.02	99.31
2009—2013	20.43	42.60	67.81	106.75
2014—2018	19.73	3.13	96.96	113.96

度($t \cdot \text{hm}^{-2}$), C_k 为森林类型 k 的总碳储量(t), S_k 为森林类型 k 的总面积(hm^2)^[19-20]。

1.2.5 各森林类型年均碳汇估算 参考文献[21—22]计算各森林类型的年均碳汇。

2 结果和分析

2.1 1974—2018年不同森林类型碳储量、碳密度和年均碳汇的变化

1974—2018年福建省各森林类型碳储量、碳密度和年均碳汇的变化见表3。结果显示:1974—2018年,福建省森林总体碳储量由 $13\,539.64 \times 10^4 t$ 增至 $33\,962.34 \times 10^4 t$, 增量为 $20\,422.69 \times 10^4 t$; 碳密度由 $25.75 t \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $39.86 t \cdot \text{hm}^{-2}$; 年均碳汇由 $-117.23 \times 10^4 t$ 增至 $1\,110.72 \times 10^4 t$ 。可见,福建省森林总体碳储量逐期增加。

由表3还可见:乔木林碳储量明显高于其他森林类型,1974—2018年乔木林碳储量在森林总体碳储量的占比均超过78.40%,其中,2014—2018年的占比最高(89.76%);碳密度由 $31.44 t \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $49.31 t \cdot \text{hm}^{-2}$; 年均碳汇由 $-197.10 \times 10^4 t$ 增至 $1\,112.22 \times 10^4 t$ 。竹林碳储量相对较高,由 $1\,171.05 \times 10^4 t$ 增至

表3 1974—2018年福建省不同森林类型碳储量和碳汇¹⁾
Table 3 Carbon stock and carbon sink of different forest types in Fujian Province from 1974 to 2018¹⁾

时期 Period (CCYY—CCYY)	总体 Total			乔木林 Arboreal forest			疏林 Woodland	
	碳储量/ (10 ⁴ t) Carbon storage	碳密度/ (t · hm ⁻²) Carbon density	年均碳汇/ (10 ⁴ t) Mean annual carbon sink	碳储量/ (10 ⁴ t) Carbon storage	碳密度/ (t · hm ⁻²) Carbon density	年均碳汇/ (10 ⁴ t) Mean annual carbon sink	碳储量/ (10 ⁴ t) Carbon storage	年均碳汇/ (10 ⁴ t) Mean annual carbon sink
1974—1978	13 539.64	25.75	—	11 235.76	31.44	—	456.85	—
1979—1983	12 953.51	23.58	-117.23	10 250.23	29.77	-197.10	651.78	38.99
1984—1988	14 022.40	22.69	213.78	11 007.32	28.75	151.42	922.99	54.24
1989—1993	15 386.86	23.65	272.89	12 792.12	27.36	356.96	140.10	-156.58
1994—1998	19 149.55	24.65	752.54	15 978.29	29.06	637.23	180.61	8.10
1999—2003	22 697.51	27.96	709.59	19 252.63	34.14	654.87	199.67	3.81
2004—2008	23 934.57	30.14	247.41	20 619.91	36.58	273.46	90.30	-21.87
2009—2013	28 408.76	33.65	894.84	24 923.45	41.08	860.71	201.85	22.31
2014—2018	33 962.34	39.86	1 110.72	30 484.52	49.31	1 112.22	194.93	-1.38

时期 Period (CCYY—CCYY)	经济林 Non-timber product forest		灌木林 Shrubland		竹林 Bamboo forest	
	碳储量/(10 ⁴ t) Carbon storage	年均碳汇/(10 ⁴ t) Mean annual carbon sink	碳储量/(10 ⁴ t) Carbon storage	年均碳汇/(10 ⁴ t) Mean annual carbon sink	碳储量/(10 ⁴ t) Carbon storage	年均碳汇/(10 ⁴ t) Mean annual carbon sink
1974—1978	380.94	—	295.05	—	1 171.05	—
1979—1983	533.74	30.56	294.99	-0.01	1 222.77	10.34
1984—1988	630.24	19.30	240.58	-10.88	1 221.27	-0.30
1989—1993	881.54	50.26	214.00	-5.32	1 359.10	27.57
1994—1998	1 152.22	54.14	228.13	2.83	1 610.30	50.24
1999—2003	1 253.92	20.34	263.80	7.13	1 727.49	23.44
2004—2008	578.89	-135.00	691.80	85.60	1 953.67	45.24
2009—2013	474.52	-20.87	669.96	-4.37	2 138.98	37.06
2014—2018	34.87	-87.93	957.96	57.60	2 290.06	30.22

¹⁾ —: 无数据 No datum.

2 290.06 $\times 10^4$ t,每个时期竹林碳储量在森林总体碳储量的占比均大于6.7%;年均碳汇由10.34 $\times 10^4$ t增至30.22 $\times 10^4$ t。疏林、经济林和灌木林碳储量之和占森林总体碳储量的3.50%~12.79%。经计算,1974—2018年疏林、经济林、灌木林的碳密度不变,分别为9.88、11.14、9.88 t $\cdot$ hm $^{-2}$ 。而竹林面积由毛竹和其他竹面积组成,故竹林碳密度在20.00 t $\cdot$ hm $^{-2}$ 发生微小波动。

2.2 1974—2018年不同龄组乔木林面积、碳储量和碳密度的变化

1974—2018年福建省不同龄组乔木林面积、碳储量和碳密度变化见图1。结果显示:除2014—2018年外,前8个时期福建省乔木林中幼龄林和中龄林的面积大于其他龄组,且在9个时期内,幼龄林和中龄林的碳储量之和在总碳储量中占比呈下降趋势,由

1974—1978年的70.66%下降至2014—2018年的44.41%;而近熟林、成熟林和过熟林的碳储量之和逐期增长,占比由最初的29.34%增长到55.59%。1979—2018年,幼龄林的碳密度最小,而过熟林的碳密度除1974—1978年、1989—1993年、1994—1998年外,在其余6个时期均最大。

2.3 1974—2018年天然林和人工林面积、碳储量和碳密度的变化

结果(图2)显示:1974—2018年,福建省天然林和人工林的面积、碳储量和碳密度整体呈增长趋势。其中,天然林面积从270.70 $\times 10^4$ hm 2 增至326.20 $\times 10^4$ hm 2 ,期间其碳储量增量为9 072.32 $\times 10^4$ t,碳密度从38.04 t $\cdot$ hm $^{-2}$ 增至59.38 t $\cdot$ hm $^{-2}$;人工林面积从86.70 $\times 10^4$ hm 2 增至86.70 $\times 10^4$ hm 2 ,碳储量从939.32 $\times 10^4$ t增至11 115.77 $\times 10^4$ t,占乔木林总碳储量的比例

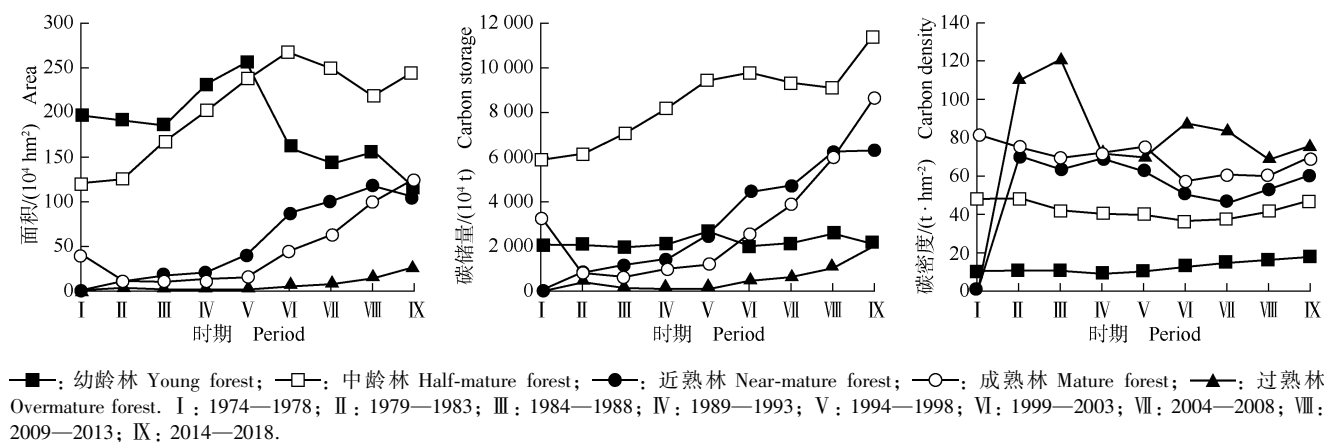


图1 1974—2018年福建省不同龄组乔木林面积、碳储量和碳密度变化

Fig. 1 Changes in area, carbon storage, and carbon density of different age groups of arboreal forest in Fujian Province from 1974 to 2018

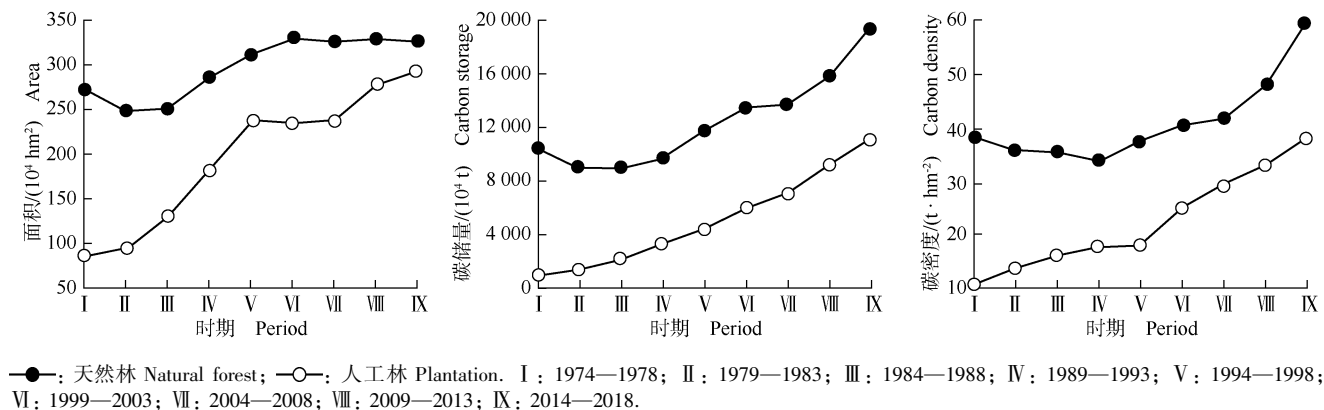


图2 1974—2018年福建省天然林和人工林面积、碳储量和碳密度变化

Fig. 2 Changes in area, carbon storage, and carbon density of natural forest and plantation in Fujian Province from 1974 to 2018

从8.36%增至36.46%。1974—2018年人工林碳储量增量占乔木林总体增量的52.87%。

2.4 2014—2018年天然林和人工林各优势树种面积、碳储量和碳密度情况

2014—2018年福建省天然林和人工林各优势树种的面积、碳储量和碳密度情况见表4。结果显示:2014—2018年,福建省天然林碳储量为 $19\,368.75 \times 10^4$ t,占福建省乔木林总碳储量的63.54%,其中,阔叶混交林的碳储量最高,为 $11\,299.11 \times 10^4$ t,针阔混交林和其他硬阔类的碳储量相对较高,分别为 $2\,853.14 \times 10^4$ 和 $1\,476.88 \times 10^4$ t,这3类的碳储量之和占天然林总碳储量的80.69%;阔叶混交林的面积最

大,为 180.67×10^4 hm^2 ;锥栗[*Castanea henryi* (Skan) Rehder et E. H. Wilson]的碳密度最高,为 $107.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2014—2018年,人工林碳储量为 $11\,115.77 \times 10^4$ t,其中杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]碳储量最高,达 $4\,398.49 \times 10^4$ t,针阔混交林和针叶混交林的碳储量较高,分别为 $1\,986.74 \times 10^4$ 和 $1\,787.34 \times 10^4$ t,这3类碳储量之和占人工林总碳储量的73.52%;杉木的面积最大,为 118.11×10^4 hm^2 ;木麻黄(*Casuarina equisetifolia* Linn.)的碳密度最高,为 $94.31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。总体而言,阔叶混交林总碳储量最高($11\,795.24 \times 10^4$ t),锥栗碳密度最大($107.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

表4 2014—2018年福建省天然林和人工林各优势树种(组)面积、碳储量和碳密度¹⁾

Table 4 Area, carbon storage, and carbon density of each dominant tree species (group) of natural forest and plantation in Fujian Province from 2014 to 2018¹⁾

树种(组) Tree species (group)	天然林 Natural forest			人工林 Plantation			合计 Total		
	A/(10^4 hm^2)	m/(10^4 t)	$\rho/(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	A/(10^4 hm^2)	m/(10^4 t)	$\rho/(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	A/(10^4 hm^2)	m/(10^4 t)	$\rho/(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$
铁杉 <i>Tsuga chinensis</i>	0.24	5.76	24.00	—	—	—	0.24	5.76	24.00
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	25.49	857.23	33.63	43.04	1 255.00	29.16	68.53	2 112.23	30.82
湿地松 <i>Pinus elliotii</i>	—	—	—	6.49	126.88	19.55	6.49	126.88	19.55
火炬松 <i>Pinus taeda</i>	—	—	—	1.44	74.47	51.72	1.44	74.47	51.72
黄山松 <i>Pinus hwangshanensis</i>	2.89	162.94	56.38	0.48	14.37	29.94	3.37	177.31	52.61
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	17.56	674.27	38.40	118.11	4 398.49	37.24	135.67	5 072.76	37.39
柳杉 <i>Cryptomeria japonica</i> var. <i>sinensis</i>	0.24	3.05	12.71	0.24	5.40	22.50	0.48	8.45	17.60
栎类 <i>Quercus</i> spp.	9.14	742.80	81.27	—	—	—	9.14	742.80	81.27
栲类 <i>Castanopsis</i> spp.	—	—	—	0.25	7.95	31.80	0.25	7.95	31.80
栲 <i>Castanopsis fargesii</i>	0.24	16.89	70.38	—	—	—	0.24	16.89	70.38
青冈 <i>Quercus glauca</i>	0.48	38.27	79.73	—	—	—	0.48	38.27	79.73
锥栗 <i>Castanea henryi</i>	0.24	25.68	107.00	—	—	—	0.24	25.68	107.00
樟 <i>Cinnamomum officinarum</i>	—	—	—	0.24	7.82	32.58	0.24	7.82	32.58
楠木 <i>Phoebe zhennan</i>	0.24	3.18	13.25	—	—	—	0.24	3.18	13.25
含笑花 <i>Michelia figo</i>	—	—	—	0.25	1.58	6.32	0.25	1.58	6.32
木荷 <i>Schima superba</i>	2.17	120.84	55.69	2.17	130.45	60.12	4.34	251.29	57.90
枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	0.24	4.23	17.63	0.24	3.35	13.96	0.48	7.58	15.79
其他硬阔类 Other hardwoods	17.34	1 476.88	85.17	1.44	48.14	33.43	18.78	1 525.02	81.20
桉 <i>Eucalyptus robusta</i>	—	—	—	20.88	630.78	30.21	20.88	630.78	30.21
台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	0.48	35.10	73.13	2.41	68.47	28.42	2.89	103.57	35.84
木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	0.24	1.58	6.58	0.72	67.90	94.31	0.96	69.48	72.38
其他软阔类 Other softwoods	1.20	41.70	34.75	0.24	4.51	18.79	1.44	46.21	32.09
针叶混交林 Coniferous mixed forest	19.71	1 006.10	51.05	39.24	1 787.34	45.55	58.95	2 793.44	47.39
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	180.67	11 299.11	62.54	14.43	496.13	34.38	195.10	11 795.24	60.46
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	47.39	2 853.14	60.21	39.71	1 986.74	50.03	87.10	4 839.88	55.57
合计 Total	326.20	19 368.75	59.38	292.02	11 115.77	38.07	618.22	30 484.52	49.31

¹⁾ A: 面积 Area; m: 碳储量 Carbon storage; ρ : 碳密度 Carbon density. —: 无数据 No datum.

3 讨 论

3.1 福建省森林碳储量和碳密度变化

1974—2018年,福建省森林碳储量由 $13\,539.64 \times 10^4 \text{ t}$ 增长到 $33\,962.34 \times 10^4 \text{ t}$,增幅为150.84%;碳密度由 $25.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $39.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,增幅为54.80%。其中,乔木林的碳储量增长最为明显,从 $11\,235.76 \times 10^4 \text{ t}$ 增长到 $30\,484.52 \times 10^4 \text{ t}$,增幅为171.32%,碳密度也由 $31.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $49.31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。表明福建省森林尤其是乔木林的质量大幅度提升,这主要与福建省森林面积大幅增加、乔木林树种组成变化、龄组结构优化及不同树种所占面积比例的调整紧密相关;乔木林中的近熟林和成熟林碳储量占比提高是由其面积增加所致,表明在40多年福建省森林资源管理中,龄组结构得到了有效调整优化,1984—1993年过熟林碳密度下降幅度较大,可能是因为这段时期存在过度的森林砍伐和开发。福建省乔木林在1979—1993年间碳储量增长主要与乔木林面积增加有关,这一时期天然林和人工林面积均显著增加。然而,在1994—2018年,森林面积增幅较小,这段时期森林碳储量增长主要依靠林龄结构的改善,如成熟林、过熟林面积占比增加以及更多高碳密度树种使福建省森林碳密度提高,从而使福建省在森林面积增长放缓的情况下,碳储量依旧保持较高的增长^[12]。2014—2018年,全国乔木林碳储量 $757\,539 \times 10^4 \text{ t}$ ^{[7]436},福建省乔木林碳储量占全国乔木林碳储量的4.02%,福建省乔木林碳密度($49.31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)高于全国($42.11 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^{[7]7},表明福建省的森林植被质量处于较高水平,需要加强管护,维持适度的采伐水平,采用合理的造林再造林措施,提升福建省森林碳汇能力^[23-24]。

3.2 福建省森林碳储量分布特征

从植被类型看,1974—2018年福建省森林中乔木林的碳储量最高,占森林总碳储量的78.40%以上。2014—2018年,阔叶混交林和杉木为乔木林碳储量的2个主要贡献者,二者碳储量之和占乔木林总碳储量的55.33%。在各树种中,阔叶混交林的碳储量是乔木林中最高的,表明阔叶混交林具有优异的碳积累能力,对维持森林生态系统稳定性和多样性有积极作用。目前,福建省人工林以杉木为主,与福建省在造林活动中大量选用杉木及各类针叶和阔叶树种的措

施有关。因此,应加强对阔叶混交林和杉木的抚育和管理,提高其占比,从而提高总体碳储量。

从森林起源看,天然林在乔木林碳储量中占主导地位,占比高达63.53%。虽然天然林碳密度、碳储量均高于人工林^[25-27],但人工林对森林总体碳汇也有巨大贡献^[13,26-28]。因此,科学合理地优化人工林的林分结构,强化林木经营与管理措施,提出天然林实施保护性培育策略,有助于提高福建省森林整体碳汇能力和碳储量。

1974—2018年,福建省森林中,中龄林的碳储量一直排在第1位,随着时间推移,中龄林的林木成熟度不断增加,碳密度、碳储量也逐渐增加^[29],并成为碳密度高、碳储量贡献大的近熟林及以上龄组。因此应积极抚育幼龄林,优化其质量,积极调整优势树种组成,剔除生长低劣及不良的树种,保证其健康成长为中龄林^[30]。森林碳密度与林龄结构间存在明显的相关性,随林龄增加、林木成熟,碳密度呈增加趋势^[10,22,25]。福建省乔木林中,成熟林、过熟林的碳密度较高,因此,建议保持适当的砍伐比例,尽可能保持成熟林、过熟林面积占比,有利于森林碳密度的维持及提高^[10,12]。在新造林再造林时,应侧重选择碳汇能力强、生长周期短、生长优良的优势树种,如杉木等,进一步提高人工林的碳汇能力。

此外,本研究主要考虑福建省森林生态系统中乔木层碳储量,并未对土壤层、草本层、枯落物层和枯死木碳储量进行全面量化分析,因此,整体森林碳储量有待进一步的系统研究。

4 结 论

总体而言,1974—2018年,福建省森林碳储量持续增长,乔木林是碳储量贡献的主体;不同龄组乔木林中,幼龄林和中龄林的面积较大,中龄林的碳储量最高,成熟林和过熟林的碳密度整体较大;从森林起源看,天然林的面积、碳储量和碳密度均高于人工林。2014—2018年,乔木林中碳储量较高的是阔叶混交林和杉木,应加强对这2个树种(组)的抚育和管理,提高其占比。福建省的森林碳储量和碳汇具有很大增长潜力,应注重加强森林抚育和有效经营管理,提高森林资源的数量和质量,不断完善森林碳储量市场的建设,建立完备的森林经营和保护机制,制定相关碳汇经营管理政策和规范,以促进森林碳汇效益和其

他生态效益的发挥,提前实现福建省生态经济和谐发展“双碳”目标。

参考文献:

- [1] 刘国华,傅伯杰,方精云. 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.
- [2] 李海奎,雷渊才,曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J]. 林业科学, 2011, 47(7): 7-12.
- [3] SU Y J, GUO Q H, XUE B L, et al. Spatial distribution of forest aboveground biomass in China: estimation through combination of spaceborne lidar, optical imagery, and forest inventory data[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 173: 187-199.
- [4] AVITABILE V, CAMIA A. An assessment of forest biomass maps in Europe using harmonized national statistics and inventory plots[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 409: 489-498.
- [5] 张春华,王莉媛,宋茜薇,等. 1973—2013年黑龙江省森林碳储量及其动态变化[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4678-4686.
- [6] 张春华,居为民,王登杰,等. 2004—2013年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1739-1749.
- [7] 国家林业和草原局. 中国森林资源清查报告: 2014—2018[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [8] 王念奎. 福建省乔木林碳储量估算及变化动态分析[J]. 林业勘察设计, 2017, 37(2): 40-45.
- [9] 林力,陈信旺,王念奎,等. 福建省天然阔叶林碳汇估算及动态变化研究[J]. 林业勘察设计, 2017, 37(1): 28-32.
- [10] 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.
- [11] 郑德祥,廖晓丽,李成伟,等. 福建省森林碳储量估算与动态变化分析[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(1): 112-116.
- [12] 王开德,邓璐莹. 基于森林清查资料的福建森林植被碳储量及其动态变化[J]. 福建林学院学报, 2014, 34(2): 145-151.
- [13] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 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.
- [14] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
- [15] AALDE H, GONZALEZ P, GYTARSKY M, et al. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Vol. 4[M]. Arlington: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006: 4.13.
- [16] GUO Z D, HU H F, LI P, et al. Spatio-temporal changes in biomass carbon sinks in China's forests from 1977 to 2008[J]. Science China Life Sciences, 2013, 56(7): 661-671.
- [17] 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.
- [18] 李伟,张翠萍,李士美. 基于第8次森林资源清查数据的广西森林碳储量特征研究[J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(3): 127-133.
- [19] 任云卯,温志勇,王敏男,等. 北京市森林碳汇能力评价[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(12): 108-119.
- [20] 郭同方,吴水荣,张超,等. 重点国有林区森林碳储量动态变化及增汇策略分析: 以龙江森工为例[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(3): 582-596.
- [21] 徐思若,成志影,那雪迎,等. 黑龙江省森林碳汇及其经济价值的变化分析与潜力预测[J]. 生态学杂志, 2024, 43(1): 197-205.
- [22] 李海奎. 碳中和愿景下森林碳汇评估方法和固碳潜力预估研究进展[J]. 中国地质调查, 2021, 8(4): 79-86.
- [23] 刘魏魏,王效科,逯非,等. 造林再造林、森林采伐、气候变化、CO₂浓度升高、火灾和虫害对森林固碳能力的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(8): 2113-2122.
- [24] PUGH T A M, LINDESKOG M, SMITH B, et al. Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(10): 4382-4387.
- [25] 岳军伟,李华源. 我国天然林和人工林固碳特征差异分析[J]. 福建林业科技, 2021, 48(4): 1-7.
- [26] 涂宏涛,周红斌,马国强,等. 基于第九次森林资源清查的云南森林碳储量特征研究[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(3): 185-193.
- [27] 张颖,周雪,覃庆锋,等. 中国森林碳汇价值核算研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(6): 124-131.
- [28] 张颖,李晓格,温亚利. 碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(1): 38-47.
- [29] 程鹏飞,王金亮,王雪梅,等. 森林生态系统碳储量估算方法研究进展[J]. 林业调查规划, 2009, 34(6): 39-45.
- [30] 胡忠宇,苏建兰,张若萱,等. 中国天然林碳汇贡献及碳汇潜力研究[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(3): 266-274.

(责任编辑: 吴蕊夷)