

湖南省 2014 年森林植被碳储量、碳密度及其区域空间分布格局

李雷达¹, 方晰^{1,2}, 李斌^{1,3}, 刘兆丹¹

(1. 中南林业科技大学 生命科学与技术学院, 湖南 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410004; 3. 国家林业局, 北京 100714)

摘要: 为明晰湖南省现有森林植被碳储量区域分布格局, 基于湖南省 2014 年森林资源年度统计数据, 结合材积源生物量法估算了湖南省现有森林植被碳储量、碳密度及其区域空间分布格局。结果表明: (1) 湖南省乔木林植被碳储量为 145.23×10^6 t, 其中阔叶林植被碳储量占 47.52%, 幼龄林和中龄林植被碳储量之和占 69.49%; 湖南省乔木林植被平均碳密度为 $16.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。(2) 湖南省现有森林植被碳储量为 196.95×10^6 t, 其中乔木林植被碳储量占 73.73%, 湖南省现有森林植被平均碳密度为 $16.31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 比 1995 年湖南省森林植被碳密度提高了 $1.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。(3) 湖南省现有森林植被碳储量、碳密度区域空间分布格局不一致, 碳储量呈现出湘西南怀化、邵阳和湘南永州、郴州较高, 而碳密度则呈现出益阳、常德、邵阳、郴州较高。森林植被碳储量较高地区, 通过封山育林保护措施稳定和提高该区域森林碳储量; 而碳储量较低的地区, 通过增加地带性树种, 优化林分结构组成, 提高该区域森林碳储量。

关键词: 森林植被; 碳储量; 碳密度; 区域空间分布; 湖南省

中图分类号: S718.55

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2017)01-0069-09

Forest vegetation carbon storage, carbon density and spatial distribution pattern in 2014 in Hunan province

LI Leida¹, FANG Xi^{1,2}, LI Bin^{1,3}, LIU Zhaodan¹

(1. College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. National Engineering Laboratory for Applied Forest Ecological Technology in Southern China, Changsha 410004, Hunan, China; 3. State Forestry Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: Regional spatial distribution pattern of carbon storage, carbon density were examined in existing forest vegetation in Hunan province of China, based on forest inventory data in 2014, biomass expansion factors (BEF) and carbon concentration of existing main forest types in this region. The result shows that: (1) carbon storage of arboreal forest vegetation was 145.23×10^6 tC, the highest carbon storage was found in broad-leaved forest vegetation, accounting for 47.52%, and those of the sapling forest and immature forest accounted for 69.49% of the carbon storage of arbor forest. The average carbon density of arbor vegetation was up to $16.26 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$. (2) Carbon storage of existing forest vegetation in Hunan (2014) was 196.95×10^6 tC, the highest carbon storage reserves was found in the arboreal forest vegetation, accounted for 73.73% of the province's forest vegetation. Carbon density was $16.31 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the province's forest vegetation, and increased $1.16 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ by compared with 1995. (3) Spatial distribution pattern carbon storage and carbon density of the province's forest vegetation was not consistent, the higher carbon storage was found in Huaihua and Shaoyang in the west-southern and Yongzhou and Chenzhou in the southern of Hunan province, while the higher carbon density was found in Yiyang, Changde, Shaoyang and Chenzhou. By taking closed forest protection measures to stabilize and improve the carbon storage in the high carbon storage area of forest vegetation, and increasing the zonal tree species, and optimizing the composition and structure of forest stand to improve carbon storage in the low carbon storage area of forest vegetation.

Keywords: forest vegetation; carbon storage; carbon density; regional spatial distribution; Hunan province

收稿日期: 2016-01-10

基金项目: 国家林业局林业软科学研究项目 (2014-R11); 中南林业科技大学引进高层次人才科研启动基金项目 (2014YJ019)

作者简介: 李雷达, 硕士研究生

通讯作者: 方晰, 教授, 博士, 博士生导师; E-mail: fangxizhang@sina.com

引文格式: 李雷达, 方晰, 李斌, 等. 湖南省 2014 年森林植被碳储量、碳密度及其区域空间分布格局 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(1): 69-77.

森林生态系统是陆地生态系统的最大碳库,年固定碳量约占陆地生态系统的2/3,在维持全球碳平衡和减缓全球气候变化等方面起着不可替代的作用^[1],即使其生物量微小的变化,也将引起全球碳平衡的显著波动^[2]。准确评估区域尺度森林植被固碳能力及其变化趋势,探讨不同森林类型固碳能力的空间异质性及其影响因素,对实现森林可持续经营和固碳增汇具有重要意义^[3]。20世纪70年代以来,中国实施了大规模的人工造林、天然林资源保护、退耕还林(草)、长江流域防护林体系等系列林业生态工程,各地区森林恢复迅速,无论是森林面积,还是森林组成及其质量均已发生了显著的变化,亟需及时地更新森林生态系统碳库的估算结果,以准确评价现有森林的固碳现状、速率及潜力。

近20年来,中国许多学者开展了多种尺度、不同森林植被碳储量、碳密度和碳汇计量研究,揭示了中国森林植被碳库大小,不同地区不同森林植被碳储量、碳固定及其与森林结构、林龄和生境条件的关系,在理论、技术和方法等方面取得了丰富成果^[3-16]。但由于中国地域幅员辽阔,涵盖多种生物气候类型,森林类型复杂多样,不同学者采用不同估算方法,而且各地基础数据完备程度也不同,在国家尺度上不同研究之间的估算结果差异较大,变化范围在3 720~13 340 TgC($Tg=10^{12} g=10^6 t$)之间^[7-11]。因此,为了准确估算国家尺度森林植被碳储量,需要采用自下而上的方法,通过估算不同区域尺度森林植被碳储量,然后计算国家尺度森林植被碳储量^[14]。森林植被生物量估算是准确评估森林植被碳储量的前提和基础^[17-18]。然而,由于小尺度标准地生物量难以直接用于推算区域森林生物量,区域尺度森林生物量准确估算成为了制约区域森林植被碳汇能力评估科学性的重要因素^[19-20]。研究表明,省域尺度森林资源连续清查数据适用于大尺度森林生物量和生产力估算,而且建立了主要树种(组)蓄积量转换生物量的方法及其对应参数^[4, 21-22]。目前,森林生物量的测算方法主要有平均生物量法^[22-23]、生物量转换因子法^[4, 21]、生物量转换因子连续函数法^[7, 22]、生物量模型法和遥感方法^[25-26]等。湖南省地处中国中南部,长江中游,自然条件优越,关于湖南省森林植被碳储量及其地理分布规律的研究也曾有报道^[27],但其估算结果是基于湖南省第四次(1990—1995年)森林资源清查数据。而近20多年来,随着一系列林业生态工程的相继实施,湖南省森林恢复迅速,森林类型趋于更复杂和多样化,

森林覆盖率由1995年的50.70%增加到2014年的59.57%,远远高于全国森林覆盖率(21.63%)。迄今,关于湖南省现有森林植被碳库及其区域空间分布格局的量化研究未见报道,仍无法准确评估湖南省现有森林植被碳库和各地区森林植被固碳能力的空间异质性及其影响因子。本研究基于湖南省2014年度森林资源统计数据,结合生物量估算法,研究湖南省2014年森林植被碳储量、碳密度及其地理空间区域分布特征,将有助于了解湖南省各地州市现有森林的生态功能和生产力状况以及统一认识湖南省森林植被的碳储量、碳密度区域空间分布特征,为湖南省森林资源经营管理、林业碳汇经济发展和政府科学决策提供科学依据。

1 研究区概况

湖南省地处中国中南部(108°47'~114°15'E, 24°38'~30°08'N),位于长江中游,东西宽667 km,南北长774 km,地貌复杂,东、南、西三面山岭环峙,丘陵盆地内嵌,向北平原敞开,大体呈“凹”状的地表起伏态势。土地总面积21.18万km²,约占国土总面积2.21%。属中亚热带季风湿润气候,四季分明,春温多变,阴湿多雨,夏热期长,温高湿重,秋季多旱,冬寒期短。地带性土壤主要为红壤、黄壤,武陵源雪峰山东麓一线以东红壤为主,以西黄壤为主。原生植被为亚热带常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、山顶苔藓矮林,植物区系成分复杂,据2014年统计,湖南省林地面积为 $1\,299.89 \times 10^4$ hm²,森林面积(未包括灌木林面积)为 $1\,090.30 \times 10^4$ hm²,森林覆盖率达59.57%,活立木总蓄积为48 410.00万m³,其中乔木林活立木总蓄积为45 941.52万m³。全省管辖13个地级市(长沙、株洲、湘潭、衡阳、邵阳、岳阳、常德、张家界、益阳、郴州、永州、怀化、娄底)和1个自治州(湘西自治州)。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究采用的基础数据来源于湖南省林业厅森林资源与生态环境检测中心2014年12月发布的湖南省2014年度森林资源统计年报。

2.2 研究方法

2.2.1 森林类型的确定

依据“中国森林资源资料的划分”和“湖南

省森林资源清查主要数据汇编”，森林包括三部分：乔木林（不包括乔木经济林）、经济林和竹林。为能准确反映湖南省 2014 年森林植被碳储量、碳密度，本研究也将灌木林列入估算范畴。其中，乔木林主要分为：杉木林、松木林、阔叶林、柏木林、国外松林、杨树林、其它杉类林、桉树林。国外松林、杨树林、其它杉类林、桉树林以人工林为主，马尾松林有天然林和人工林，以天然林为主。

2.2.2 各森林类型生物量的估算

(1) 乔木林生物量的估算 材积源—生物量法 (Volume-biomass method) 是目前估测森林生物量的常用方法 [2, 6]。近年来，以建立生物量与蓄积量关系为基础的森林植被碳储量估算方法已得到广泛应用 [12, 28]。由于湖南省松木林以马尾松林为主，而国外松林以湿地松林为主，阔叶林以常绿阔叶树种（樟、楠、榿、栲、青冈、石栎等）为主，因此，本研究采用材积源—生物量法和刘国华等 [12] 建立的杉木林，马尾松林，樟、楠、榿、栲、青冈组成的阔叶林，湿地松林，柏木林，杨树林，柳杉、落羽杉、水杉组成其它杉类林，桉树林生物量与蓄积量之间的回归方程（见表 1）估算湖南省乔木林生物量。

表 1 各乔木林类型生物量与蓄积量回归方程 [12, 28]
Table 1 The regression equation between biomass and volume with different forests

乔木林类型	蓄积量 ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	生物量 (B, t) — 蓄积量 (V, m^3) 回归方程	相关系数
杉木林	181.38	$B=0.3999V+22.5410$	0.97
松木林	115.42	$B=0.52V$	
阔叶林	133.81	$B=1.0357V+8.0591$	0.91
柏木林	7.50	$B=0.6129V+26.1451$	0.98
国外松林	12.90	$B=0.5168V+33.2378$	0.97
杨树林	6.36	$B=0.4754V+30.6034$	0.93
柳杉、落羽杉、水杉	0.26	$B=0.4158V+41.3318$	0.94
桉树林	1.78	$B=0.7893V+6.9306$	1.00
合计	459.42		

(2) 经济林生物量的计算 目前区域尺度经济林碳储量的研究，尚无生物量与蓄积量之间换算因子参数的相关报道。由于森林资源清查数据仅提供了经济林面积数据，本研究沿用方精云等 [28] 采用的经济林平均生物量法进行估

算湖南省经济林生物量。湖南省经济林主要包括油茶林、油桐林、杜仲林、厚朴林、果树林、茶叶林等，其中油茶林面积占湖南省经济林面积的 60% 以上，因此，本研究根据湖南省油茶林生物量的研究结果 [29-31]，取其算术平均值 $23.52 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 作为估算湖南省经济林生物量，计算公式如式 (1)：

$$W_{\text{经}} = A_{\text{经}} \times S_{\text{经}} \quad (1)$$

式中： $W_{\text{经}}$ 为经济林总生物量 (t)； $A_{\text{经}}$ 为单位面积经济林生物量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)； $S_{\text{经}}$ 为经济林面积 (hm^2)。

(3) 竹林生物量的计算 在森林资源统计数据中，湖南省竹林有毛竹和杂竹两类，有面积和株数。以往研究中，竹林生物量主要由竹林总株数和平均单株生物量推算 [28]。本研究也采用此方法，取竹林单株平均生物量 $22.5 \text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}$ [28]，估算湖南省竹林生物量，计算公式如式 (2)：

$$W_{\text{竹}} = (A_{\text{竹}} \times N_{\text{竹}}) / 1000 \quad (2)$$

式中： $W_{\text{竹}}$ 为竹林总生物量 (t)； $A_{\text{竹}}$ 为竹林单株平均生物量 ($\text{kg}\cdot\text{株}^{-1}$)； $N_{\text{竹}}$ 为竹林总株数。

(4) 灌木林生物量的计算方法 国内有关灌木林生物量或蓄积量的数据极少 [28]。在森林资源清查数据中，仅提供了灌木林的面积数据。以往研究中，灌木林生物量主要根据灌木林面积和灌木林单位面积平均生物量进行估算 [28]。本研究也沿用此方法估算湖南省灌木林的生物量，采用我国秦岭淮河以南地区灌木林单位面积平均生物量 $19.76 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ [28] 进行估算湖南省灌木林生物量，计算公式如式 (3) [28]：

$$W_{\text{灌}} = A_{\text{灌}} \times S_{\text{灌}} \quad (3)$$

式中： $W_{\text{灌}}$ 为灌木林生物量 (t)； $A_{\text{灌}}$ 为单位面积灌木林生物量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)； $S_{\text{灌}}$ 为灌木林总面积 (hm^2)。

2.2.3 森林植被碳储量、碳密度的估算

森林植被碳储量由乔木层、林下灌木层、草本层和死地被物层碳储量组成。本研究中，森林植被碳储量仅指林木的活生物量，未包括林下灌木层、草本层、死地被物层的碳储量。森林植被碳储量 (t) 为森林生物量 (t) 乘以其平均碳含量 ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)。森林植被碳密度 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 为森林碳储量 (t) 除以森林面积 (S)。湖南省各森林类型的碳含量算术平均值如表 2 所示 [32]。对于桉树林、其它杉类林、经济林的碳含量分别采用杨树林、杉木林和灌木林的碳含量来估算其碳储量和碳密度。

表 2 湖南省现有森林植被的算术平均碳含量[†]
Table 2 Arithmetical average carbon concentration of existing main forests in Hunan province

树种	杉木林	马尾松林	湿地松林	柏木林	阔叶林	杨树林	毛竹林	灌木林
碳含量 ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.508(0.035)	0.520(0.037)	0.515(0.044)	0.551(0.021)	0.500(0.032)	0.494(0.016)	0.486(0.031)	0.484(0.049)

† 括号内的数据为标准差。

2.2.4 森林植被碳储量、碳密度区域空间分布图的绘制

应用 Arcgis10.0 地理统计分析软件, 基于湖南省地区行政图和各地州市森林植被碳储量、碳密度数据, 对湖南省森林植被碳储量、碳密度进行区域空间分析, 得出湖南省 2014 年森林植被碳储量、碳密度区域空间分布图。

2.2.5 碳丰度指数的计算

碳丰度指数为能定量描述碳在不同森林类型和不同区域中的分布特征, 本研究引入碳丰度指数这一指标, 计算公式如式 (4):

$$R = \frac{P_{Ci}}{P_{Ai}} \quad (4)$$

式中: P_{Ci} 为第 i 类森林植被碳储量占湖南省森林植被总碳储量的百分比 (%); P_{Ai} 为第 i 类森林面积占湖南省森林总面积的百分比 (%)。

3 结果与分析

3.1 乔木林植被碳储量、碳密度

3.1.1 不同类型乔木林植被碳储量、碳密度

从表 3 可以看出: 湖南省 2014 年乔木林面积为 $893.35 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 不同类型乔木林面积差异显著, 变化范围在 $0.34 \times 10^4 \sim 311.40 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 之间; 其中, 阔叶林面积最大, 占全省乔木林面积的 34.86%, 其次是杉木林、松木林, 分别占 34.36% 和 23.05%, 其他乔木林面积很小, 仅占 0.04% ~ 3.87% 之间。湖南省 2014 年乔木林植被碳储量为 $145.23 \times 10^6 \text{ t}$, 不同类型乔木林植被碳储量差异显著, 在 $0.06 \times 10^6 \sim 69.02 \times 10^6 \text{ t}$ 之间; 其中, 阔叶林最高, 占全省乔木林植被碳储量的 47.52%, 其次是杉木林、松木林, 分别占 25.36%

表 3 不同龄组乔木林植被面积 ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)、碳储量 ($\times 10^6 \text{ t}$) 和碳密度 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)[†]
Table 3 Area ($\times 10^4 \text{ hm}^2$), carbon storage ($\times 10^6 \text{ t}$) and carbon density ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) of different age groups arbor forest

乔木林类型	幼龄林			中龄林			近熟林		
	面积	碳储量	碳密度	面积	碳储量	碳密度	面积	碳储量	碳密度
杉木林	104.72	3.34	3.19	100.89	12.09	11.98	43.81	8.29	18.93
松木林	34.55	1.05	3.04	79.14	10.56	13.34	61.05	11.88	19.47
阔叶林	120.08	7.47	6.22	122.17	32.01	26.20	37.02	14.45	39.03
柏木林	10.07	0.43	4.31	9.38	1.74	18.57	0.97	0.26	26.44
国外松林	17.81	0.88	4.93	11.57	1.55	13.39	2.91	0.51	17.70
杨树林	3.69	0.12	3.14	3.33	0.72	21.50	1.41	0.32	22.54
桉树林	1.56	0.08	5.18	1.69	0.43	25.53	0.40	0.10	24.59
柳杉、落羽杉、水杉林	0.08	0.00	4.23	0.10	0.01	12.23	0.10	0.02	20.07
合计 / 均值	292.55(32.75)	13.37(9.21)	4.57	328.28(36.75)	59.10(40.69)	18.00	147.67(16.53)	35.81(24.66)	24.25
乔木林类型	成过熟林			合计 / 均值					
	面积	碳储量	碳密度	面积	碳储量	碳密度			
杉木林	57.51	13.11	22.79	306.93(34.36)	36.83(25.36)	12.00			
松木林	31.16	7.71	24.76	205.9(23.05)	31.21(21.49)	15.16			
阔叶林	32.13	15.09	46.96	311.4(34.86)	69.02(47.52)	22.16			
柏木林	0.25	0.10	40.61	20.67(2.31)	2.53(1.74)	12.26			
国外松林	2.31	0.49	21.17	34.6(3.87)	3.43(2.36)	9.92			
杨树林	1.15	0.34	29.92	9.589(1.07)	1.49(1.02)	15.59			
桉树林	0.28	0.10	35.56	3.939(0.44)	0.71(0.49)	18.09			
柳杉、落羽杉、水杉林	0.07	0.02	31.84	0.34(0.04)	0.06(0.04)	16.56			
合计 / 均值	124.85(13.98)	36.95(25.44)	29.59	893.35(100)	145.23(100)	16.26			

[†] 括号内的数据为百分比 (%)。

和 21.49%, 而其他乔木林仅占 0.04% ~ 2.37%。各类型乔木林植被碳储量与其面积呈极显著的正相关 (相关系数为 0.941 3, $n=8$, $P=0.000$), 表明湖南省各类型乔木林植被碳储量随其面积增加而增大, 阔叶林、杉木林、松木林是湖南省现有

乔木林植被碳储量的主体。

如表 3 所示: 湖南省 2014 年乔木林植被平均碳密度为 $16.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 不同类型乔木林植被碳密度差异显著, 介于 $9.92 \sim 22.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间; 其中, 阔叶林最高, 其次是桉树林 ($18.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、其他杉类

林 ($16.56 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、杨树林 ($15.59 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、松木林 ($15.16 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)，而柏木林、杉木林较低，分别为 12.26 、 $12.00 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，国外松林最低，仅为 $9.92 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。阔叶林、桉树林、其他杉木林植被碳密度均高于湖南省乔木林植被平均碳密度，表明湖南省不同类型乔木林林分之间质量差异显著，阔叶林、桉树林、其他杉木林发育状况相对较好，而柏木林、杉木林和国外松林发育状况相对较差。

3.1.2 不同龄组乔木林植被碳储量、碳密度

乔木林植被碳储量、碳密度与其林分龄组密切相关。从表 3 可以看出，湖南省各龄组乔木林植被碳储量从高至低依次为：中龄林 > 成过熟林 > 近熟林 > 幼龄林，碳储量主要集中在中龄林，占 40.69%。幼、中龄林面积占全省乔木林面积的 69.49%，两者植被碳储量之和占全省乔木林植被碳储量的 49.90%。近、成过熟林面积占全省乔木林面积的 30.51%，两者植被碳储量之和占 50.10%。与其所占的面积相比，近、成过熟林的碳储量(碳丰度指数 1.64)要高于中、幼龄林(0.72)，是由于幼、中龄林的碳密度远低于近、成过熟林的碳密度。研究表明，全国森林植被碳储量主要分布在成熟林中，虽然成熟林面积仅占森林总面积的 19% ~ 33%，但其碳储量却占整个森林碳储量的 40% ~ 60%^[33]。相比，湖南省幼、中龄林所占面积过大是导致湖南省乔木林植被碳储量偏低的一个重要因素。

不同龄组乔木林植被碳密度差异较大，大小顺序为：成过熟林 ($29.59 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 近熟林 ($24.25 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 中龄林 ($18.00 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 幼龄林 ($4.57 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) (见表 3)。成过熟林植被碳密度约为幼龄林的 6 倍多，表现出随着龄组增大，乔木林植被碳密度增大，也由于幼龄林的面积过大，碳密度低，使得湖南省现有乔木林植被碳储量、碳密度偏低，同时也表明了湖南省乔木林仍具有较大的固碳潜力。从幼龄林到近熟林或成过熟林，各类型乔木林植被碳密度逐渐增加，在成、过熟林达到最高。同一龄组不同类型乔木林植被碳密度差异明显，在各龄组中，阔叶林植被碳密度均明显高于其他乔木林。表明随着林木生长，乔木林储碳能力逐渐提高，而阔叶林储碳能力优于其他各种乔木林。

3.2 湖南省 2014 年森林植被碳储量、碳密度

从表 4 可以看出，湖南省 2014 年森林面积(包括灌木林面积)为 $1207.10 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，其植被碳储

量为 $196.95 \times 10^6 \text{ t}$ 。其中，乔木林面积最大，占全省森林面积的 74.01%，其植被碳储量也最高，占全省森林植被碳储量的 73.73%，表明乔木林是湖南省森林植被碳储量的主体，在维护区域碳氧平衡方面起着最重要的作用；尽管竹林面积明显小于灌木林面积，但其植被碳储量 ($30.53 \times 10^6 \text{ t}$) 高于灌木林，占全省森林植被碳储量的 15.50%，表明竹林固碳潜力较大；经济林和灌木林面积分别占 7.29% 和 9.68%，经济林植被碳储量 ($10.02 \times 10^6 \text{ t}$) 最低，占全省森林植被碳储量的 5.09%。湖南省森林植被平均碳密度为 $16.31 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，不同森林类型植被碳密度差异明显，竹林植被碳密度 ($28.03 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 最高，其次是乔木林 ($16.26 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)，灌木林 ($9.56 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 最低，表明不同森林类型固碳能力差异明显。

表 4 湖南省现有森林植被碳库及其构成[†]
Table 4 Existing forest vegetation carbon pool and its components in Hunan province

项目	面积 ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	蓄积量 ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	碳储量 ($\times 10^6 \text{ t}$)	碳密度 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)
乔木林	893.35(74.01)	459.42	145.23(73.73)	16.25
竹林	108.92(9.02)	/	30.53(15.50)	28.03
经济林	88.03(7.29)	/	10.02(5.09)	11.38
灌木林	116.80(9.68)	/	11.17(5.67)	9.56
合计 / 均值	1207.10(100)	459.42	196.95(100)	16.31

† 括号内的数据为百分比 (%)。

3.3 湖南省 2014 年森林植被碳储量、碳密度的地理空间分布格局

从图 1 可知，湖南省森林植被碳储量主要分布在湘西南的怀化、邵阳和湘南的永州、郴州，分别占全省森林植被碳储量的 14.52%、12.32%、11.80% 和 10.88%；其次为湘西北的湘西自治州、张家界，湘北的常德、益阳和湘东南的株洲，分别占全省森林植被碳储量的 7.87%、5.25%、7.41%、6.22% 和 5.29%，而湘中的娄底、湘东长沙及洞庭湖平原岳阳、湘南衡阳较低，仅占全省森林植被碳储量的 4.89% ~ 2.75%，地处于湖南中部的湘潭最低，仅占全省森林植被碳储量的 1.79%，总体上呈现出西高东低、南高北低的区域空间分布格局。

湖南各地州市森林植被碳密度在 $13.97 \sim 20.11 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间，变化幅度不大。湖南省森林植被碳密度的区域空间分布格局与森林植被碳储量不同，其中益阳最高，其次为邵阳、常德、郴州、永州、长沙和湘潭，分别为 19.81、18.37、

16.88、16.52、16.41、16.40 $t \cdot hm^{-2}$, 其余地州市森林植被碳密度均低于湖南省森林植被平均碳密度

值 (16.31 $t \cdot hm^{-2}$), 岳阳、衡阳最低, 分别仅为 13.97 和 14.24 $t \cdot hm^{-2}$ (见图 1)。

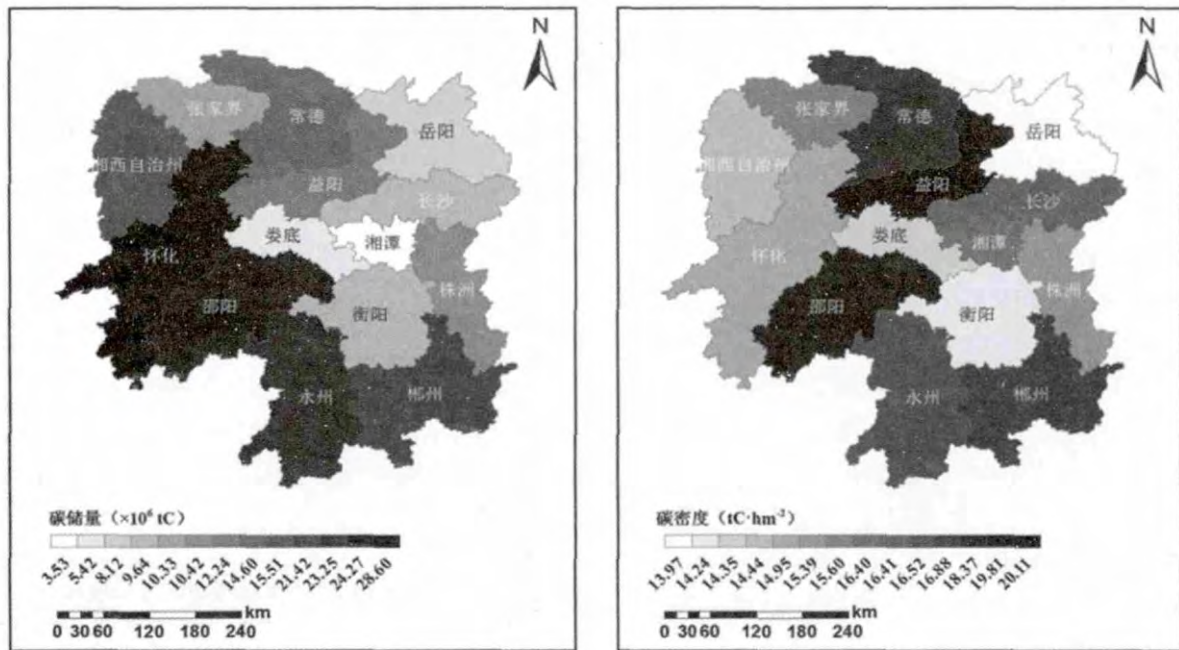


图 1 湖南省森林植被碳储量、碳密度区域空间分布格局

Fig. 1 Geographical spatial distribution pattern of carbon storage and carbon density of forests in Hunan province

4 讨论

4.1 湖南省森林植被碳储量在中国森林植被碳储量中的地位

森林生态系统作为陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 其植被固碳特征一直备受关注。郭兆迪等^[6]估测中国 2004—2008 年森林(包括乔木林、经济林、竹林)植被碳储量为 $6\ 868 \times 10^6 t$, 本研究以此为基准, 估测湖南省 2014 年森林(包括乔木林、经济林、竹林)植被碳储量为 $185.78 \times 10^6 t$, 占中国森林植被碳储量的 2.71%, 但湖南省森林面积为 $1\ 090.30 \times 10^4 hm^2$, 仅占中国森林面积 ($18\ 138 \times 10^4 hm^2$)^[6] 的 6.01%。此外, 湖南省 2014 年森林(包括乔木林、经济林、竹林)植被碳密度 ($17.04 t \cdot hm^{-2}$) 明显低于中国平均水平的 $37.87 t \cdot hm^{-2}$ ^[6], 略高于广西壮族自治区 2010 年森林(包括乔木林、经济林、竹林、灌木林)植被碳密度 ($15.41 t \cdot hm^{-2}$)^[34], 比 1995 年湖南省森林植被(包括乔木林、经济林、竹林)碳密度 ($15.88 t \cdot hm^{-2}$)^[28] 提高了 $1.16 t \cdot hm^{-2}$, 表明湖南省森林植被仍存在较大的固碳潜力, 在中国森林植被碳储量和提高中国森林植被碳汇功能中扮演着重要的角色。

4.2 湖南省现有森林植被碳储量、碳密度特征

研究表明, 作为森林的主体, 中国乔木林面积占森林总面积的 84.4% ~ 89.5%, 贮存了森林总生物量碳库的 93.2% ~ 94.9%^[6]。本研究中, 湖南省各森林类型植被碳储量差异显著, 其中乔木林植被碳储量最大, 占湖南 2014 年森林植被碳储量的 73.73%, 经济林、竹林、灌木林分别占 5.09%、15.50%、5.67%, 是由于各森林类型面积以及林分质量差异明显所致, 例如乔木林面积占湖南省森林面积的 74.01%, 占有绝对的优势, 而经济林、竹林、灌木林分别仅占 7.29%、9.02% 和 9.68%。表明乔木林作为森林的主体, 在湖南省森林植被碳汇功能中起着主导作用。湖南省乔木林植被碳储量主要集中在阔叶林、杉木林和松木林, 总体来说, 阔叶林植被碳储量、碳密度均高于针叶林, 与全国乔木林植被碳储量的分布^[7]基本一致。

研究表明, 中国森林乔木层平均碳密度为 $38.65 \sim 40.12 t \cdot hm^{-2}$ ^[5, 35], 呈现从东南向东北和西增加的趋势。中国森林植物碳密度较高的省区为黑龙江、吉林、西藏和海南, 低于 $53.11 t \cdot hm^{-2}$; 植物碳密度较小的省区包括广东、广西、湖北、湖南、江西、浙江、江苏、安徽和山东, 低于 $12.4 t \cdot hm^{-2}$ 。森林植物碳密度分布规律与我国人口密度的变化趋势呈显著的对数相关关系, 我国实际森

林植物碳密度大小首先取决于人类活动干扰的程度^[11]。本研究中,湖南省 2014 年各类型乔木林植被平均碳密度为 $9.92 \sim 22.16 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 显著低于中国近时期乔木林平均碳密度^[6], 原因可能在于: ①湖南省乔木林主要以幼、中龄林为主, 幼、中龄林占全省乔木林面积的 69.49%, 发育水平较低, 森林质量不高, 多数原始森林已经退化为人工林和次生林, 幼龄林植被碳密度大多在 $6 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以下, 而中龄林植被碳密度大多在 $20 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以下; ②由于人工林普遍存在树种单一, 结构简单, 功能脆弱, 病虫害频繁发生, 人工林植被碳储量、碳密度较低。湖南省 2014 年人工乔木林面积为 $475.43 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占湖南省乔木林面积的 53.22%; ③人口密集, 人地矛盾尖锐, 人类活动干扰程度大, 且目前人工林经营水平不高, 林分质量较低, 直接导致湖南省乔木林植被碳密度较低。

本研究中,湖南省森林植被平均碳密度 ($16.31 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 略高于乔木林。其原因可能是: ①乔木林植被碳密度采用蓄积量转换为生物量碳储量估算, 而经济林、灌木林则采用平均生物量法估算, 导致乔木林植被碳密度随着林分蓄积量的变化而变化, 经济林、灌木林不变; ②通常选择较好的立地生产竹林 (主要毛竹林), 且近年来对竹林多采用集约经营管理措施, 林分质量得到明显提高, 竹林植被碳密度高于乔木林, 导致全省森林植被碳密度略高于乔木林。

4.3 湖南省森林植被碳储量、碳密度的区域空间格局

湖南省森林植被碳储量、碳密度区域空间分布格局不一致, 碳储量以湘西南的怀化、邵阳和湘南的永州、郴州较高, 而碳密度则以益阳、常德、邵阳、郴州较高。究其原因这是由于各地州市森林面积不同, 例如尽管怀化、永州森林植被碳密度 (14.95 、 $16.52 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 处于较低水平, 但两个地区森林面积较大, 分别占全省森林面积的 15.85%、11.66% (分别为 191.36 和 140.75 万 hm^2), 使得怀化、永州森林植被碳储量较大。表明要提高森林植被碳储量不仅要合理经营抚育提高森林质量, 还要通过造林再造林以增加森林面积, 除益阳、常德、邵阳、郴州、长沙、湘潭、永州外, 其余地州市森林植被碳密度均低于全省平均水平, 因此未来可通过合理的抚育管理措施提高林地生产力, 进一步提升湖南省森林植被固碳潜力。

但值得注意的是, 一些地州市森林总面积基本

一致, 但由于各森林类型的面积构成不同, 且同一森林类型碳密度也不同, 例如长沙、岳阳两地的森林面积相近 (分别为 58.74 和 58.17 万 hm^2), 但长沙 (乔木林、经济林、灌木林、竹林面积分别为 46.62 、 4.53 、 1.62 、 5.96 万 hm^2 , 碳密度分别为 16.14 、 11.38 、 9.56 、 $24.26 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、岳阳 (乔木林、经济林、灌木林、竹林面积分别为 43.89 、 3.39 、 2.99 、 7.89 万 hm^2 , 碳密度分别 11.51 、 11.38 、 9.56 、 $30.39 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 面积构成不同, 同一森林类型碳密度也不同, 导致两地森林碳储量、碳密度分别相差 $1.52 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $2.44 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。可见, 在给定的森林面积条件下, 当一个地区碳密度较高的森林类型面积占较高比例时, 该地区森林植被碳储量、碳密度就高, 反之, 该地区森林植被碳储量、碳密度就低。表明各地州市森林植被碳储量、碳密度的差异不仅是由于各地州市森林面积、林分质量的差异, 更是由于各地州市森林面积构成比例不同所致。因此, 各地州市在有限的林业用地条件下, 可通过增加碳密度较高的森林类型面积, 减少碳密度较低的森林类型面积, 调整现有森林面积的构成比例, 提高地区森林植被碳储量、碳密度, 是增强湖南省森林碳吸存能力的主要途径。

湘南和湘西南地区在湖南省森林碳储量中占主导地位, 碳密度 (除邵阳外) 中等, 林分质量一般。这将影响到全省整个森林的碳汇功能, 而此区域以杉木、马尾松天然林为主, 且大多为恢复初期的天然次生林。因此, 采取封山育林等保护措施对提高该区域森林碳储量是一条有效的途径。湘中、湘东部和湘北部分布着较多的人工林和次生林, 碳密度较高, 但人工林普遍存在树种单一、结构和功能较差、病虫害频繁发生等问题, 在这些地区通过增加地带性树种, 优化林分结构组成, 对提高湖南省森林植被碳储量及其固碳能力有着重要的作用。

4.4 区域森林植被碳储量估算的展望

本研究是基于森林资源统计年报数据并结合主要树种 (组) 碳含量的实测数据, 运用 Fang 等^[4]、刘国华等^[12] 研究所得的生物量转换因子连续函数法估算湖南省主要乔木林类型植被碳储量、碳密度, 为评价湖南省森林的碳汇功能提供了基础数据, 但区域乔木林植被碳储量的估算仍有较大的改进空间。在建立主要乔木林类型生物量与蓄积量回归方程时, 大多采用基于国家尺度的蓄积量与生物量转换公式, 这会带来一定误差; 另

方面,一个回归方程式涵盖了多种乔木林类型,而各个类型之间的差异会很大,需要建立适合不同乔木林类型的生物量扩展方程。

其次,经济林、竹林、灌木林植被碳储量估算采用平均生物量法,尽管在方法是可行的。但平均生物量法往往会因野外样地测量选择生长条件较好的森林,而获得较高的生物量,从而高估了区域森林生物量^[36-37];另一方面森林资源清查数据与样地生物量调查数据的时间不一致,以及样地生物量调查数据不足,也是造成本研究估算结果的不精准备的原因。森林植被碳库研究是森林固碳速率、潜力及机制分析的重要基础,也是正确评价森林在全球碳平衡、碳循环中作用和地位的重要手段。因此,应加强区域样地基础数据测定、估算方法的研究与评价,以减少估算结果的误差。

研究表明,林下灌草层、死地被物层也是森林植被碳库的重要组成部分。本研究在估算各森林植被碳储量时,仅对乔木层的碳储量进行了估算,未包括林下灌草层、死地被物层的碳储量。为此,湖南省2014年森林植被碳密度明显低于相邻的江西省森林植被碳密度(26.27 t·hm⁻²)^[15]和广东省(22.60 t·hm⁻²)^[38]。此外,尽管疏林、散生木、四旁树和枯倒木碳储量占的比例较小,总体上对碳储量估算结果影响不大,但疏林、散生木、四旁树及枯倒木等也是区域森林植被碳储量估算的补充,对理解不同森林在区域碳储量中的贡献具有重要意义。本研究也未包括这些部分植被碳储量估算在内,因此估算结果比实际偏低。

5 结论

湖南省乔木林植被碳储量为145.23×10⁶ t,不同类型乔木林植被碳储量差异显著,其中阔叶林植被碳储量占47.52%;湖南省乔木林植被平均碳密度为16.26 t·hm⁻²,不同类型乔木林之间差异显著;湖南省乔木林以幼龄林和中龄林为主,两者植被碳储量之和占湖南省乔木林植被碳储量的69.49%。

湖南省现有森林植被碳储量为196.95×10⁶ t,其中乔木林植被碳储量占73.73%,湖南省现有森林植被平均碳密度为16.31 t·hm⁻²,比1995年湖南省森林植被碳密度提高了1.16 t·hm⁻²,不同森林类型固碳能力差异明显。

湖南省现有森林植被碳储量、碳密度区域空间分布格局不一致,碳储量呈现出湘西南怀化、

邵阳和湘南永州、郴州较高,总体上呈现出西高东低、南高北低的区域空间分布格局,而碳密度则以益阳、常德、邵阳、郴州较高。

各地州市在有限的林业用地条件下,可通过增加碳密度较高的森林类型的面积、减少碳密度较低的森林类型的面积、调整现有森林面积的构成比例来提高地区森林植被碳储量和碳密度,这是增强湖南省森林碳吸存能力的主要途径。此外,森林植被碳储量较高地区,通过封山育林保护措施稳定和提高该区域的森林碳储量,而碳储量较低的地区,通过增加地带性树种,优化林分结构组成,提高该区域的森林碳储量。

参考文献:

- [1] 杨万勤,张健,胡庭兴,等.森林土壤生态学[M].成都:四川科学技术出版社,2006.
- [2] Dixon R K, Brown S, Brown S, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystem [J]. *Science*, 1994, 126(3144): 185-190.
- [3] 杨传强,李士美.2012年山东省乔木林碳储量研究[J].*资源科学*,2015,37(8):1661-1667.
- [4] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, *et al.* Changes in forests biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [5] Zhang C, Ju W, Chen J M, *et al.* China's forest biomass carbon sink based on seven inventories from 1973 to 2008[J]. *Climatic Change*, 2013, 118(3-4): 933-948.
- [6] 郭兆迪,胡会峰,李品,等.1977—2008年中国森林生物量碳汇的时空变化[J].*中国科学:生命科学*,2013,43(5):421-431.
- [7] 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.
- [8] 吴庆标,王效科,段晓男,等.中国森林生态系统植被固碳现状和潜力[J].*生态学报*,2008,28(2):517-524.
- [9] 赵敏,周广胜.中国森林生态系统的植物碳储量及其影响因子分析[J].*地理科学*,2004,24(1):50-54.
- [10] 李克让,王绍强,曹明奎.中国森林植被和土壤的碳储量[J].*中国科学D辑*,2003,33(1):72-80.
- [11] 王效科,冯宗炜,欧阳志云.中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J].*应用生态学报*,2001,12(1):13-14.
- [12] 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.
- [13] Ren H, Chen H, Li L, *et al.* Spatial and temporal patterns of carbon storage from 1992 to 2002 in forest ecosystems in Guangdong, Southern China[J]. *Plant and Soil*, 2013, 363(1-2): 123-138.
- [14] 马琪,刘康,张慧.陕西省森林植被碳储量及其空间分布[J].*资源科学*,2012,34(9):1781-1789.

- [15] 李 鑫, 欧阳勋志, 刘琪璟. 江西省 2001—2005 年森林植被碳储量及区域分布特征 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 655-665.
- [16] 焦 燕, 胡海清. 黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2248-2252.
- [17] García M, Riaño D, Chuvieco E, *et al.* Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using Li DAR height and intensity data [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(4): 816-830.
- [18] Guo Z, Fang J, Pan Y, *et al.* Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods [J]. Forest ecology and management, 2010, 259(7): 1225-1231.
- [19] Wang X, Fang J, Zhu B. Forest biomass and root-shoot allocation in northeast China [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(12): 4007-4020.
- [20] Sileshi G W. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures [J]. Forest Ecology and Management, 2014, 329: 237-254.
- [21] Luo Y, Wang X, Zhang X, *et al.* Variation in biomass expansion factors for China's forests in relation to forest type, climate, and stand development [J]. Annals of Forest Science, 2013, 70(6): 589-599.
- [22] Skovsgaard J P, Nord-Larsen T. Biomass, basic density and biomass expansion factor functions for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in Denmark [J]. European Journal of Forest Research, 2012, 131(4): 1035-1053.
- [23] 张德全, 桑卫国, 李曰峰, 等. 山东省森林有机碳储量及其动态的研究 [J]. 植物生态学报, 2002, 26(Z1): 93-97.
- [24] 吴 丹, 邵全琴, 刘纪远, 等. 1985—2030 年江西泰和县森林植被碳储量的时空动态 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 41-46.
- [25] 范文义, 张海玉, 于 颖, 等. 三种森林生物量估测模型的比较分析 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(4): 402-410.
- [26] Gleason C J, Im J. A review of remote sensing of forest biomass and biofuel: Options for small-area applications [J]. GIScience & Remote Sensing, 2011, 48(2): 141-170.
- [27] 焦秀梅, 项文化, 田大伦. 湖南省森林植被的碳贮量及其地理分布规律 [J]. 中南林学院学报, 2005, 25(1): 4-8.
- [28] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被生物量和净生产力 [J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [29] 湛小勇, 彭元英, 郭照光, 等. 油茶林分生物量及生产力的研究 [J]. 经济林研究, 1996, 14(1): 4-7.
- [30] 陈世清, 王永安, 冯宗伟. 不同经营措施对油茶林生物产量的影响 [J]. 经济林研究, 2000, 18(1): 16-18.
- [31] 何 方, 王义强, 吕芳德, 等. 油茶林生物量与养分生物循环的研究 [J]. 林业科学, 1996, 32(5): 403-410.
- [32] 李 斌, 方 晰, 田大伦, 等. 湖南省现有森林植被主要树种的碳含量 [J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(1): 71-78.
- [33] 杨 昆, 管东生. 珠江三角洲森林的生物量和生产力研究 [J]. 生态环境, 2006, 15(1): 84-88.
- [34] 覃连欢. 广西森林植被碳储量及价值估算研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [35] 徐新良, 曹明奎, 李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究 [J]. 地理科学进展, 2007, 26(6): 1-10.
- [36] Guo Z D, Fang J Y, Pan Y D, *et al.* Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: a comparison of three methods [J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(7): 1225-1231.
- [37] Ni J. Carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems: approaching a more accurate estimate [J]. Climatic Change, 2013, 119(3-4): 905-917.
- [38] 张 亮, 林文欢, 王 正, 等. 广东省森林植被碳储量空间分布格局 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1295-1299.

[本文编校: 谢荣秀]