

DOI: 10.5846/stxb201504230837

刘兆丹,李斌,方晰,项文化,田大伦,闫文德,雷丕锋.湖南省森林植被碳储量、碳密度动态特征.生态学报,2016,36(21): - .
Liu Z D, Li B, Fang X, Xiang W H, Tian D L, Yan W D, Lei P F. Dynamic characteristics of forest carbon storage and carbon density in the Hunan Province. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(21): - .

湖南省森林植被碳储量、碳密度动态特征

刘兆丹¹, 李斌^{1,2}, 方晰^{1,3,*}, 项文化^{1,3}, 田大伦^{1,3}, 闫文德^{1,3}, 雷丕锋^{1,3}

1 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004

2 国家林业局, 北京 100714

3 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004

摘要:利用湖南省 4 次(1983—1987 年、1990—1995 年、2003—2004 年和 2009 年)森林资源清查数据,采用材积源—生物量法,结合湖南省现有森林植被主要树种碳含量实测数据,研究近 20 多年来湖南省森林植被碳储量、碳密度的动态特征。结果表明:从 1987 年到 2009 年,湖南省乔木林植被碳汇为 66.40×10^6 tC,碳密度提高了 5.65 tC/hm²,阔叶林碳汇最大(48.43×10^6 tC),其次是杉木林(9.54×10^6 tC)和松木林(6.68×10^6 tC),各乔木林植被碳密度波动较大;除过熟林外,各龄组乔木林均为碳汇,中龄林碳汇最大,幼龄林、中龄林、近熟林植被碳密度依次提高了 4.75 、 4.09 、 0.83 tC/hm²,成熟林、过熟林分别下降了 6.87 、 13.88 tC/hm²;天然林、人工林植被碳汇分别为 41.01×10^6 tC、 25.39×10^6 tC,碳密度分别提高了 7.19 、 4.91 tC/hm²。湖南省森林植被(包括疏林)碳汇为 84.87×10^6 tC,乔木林碳汇最大,其次是竹林,分别占湖南省森林植被碳汇的 78.24% 和 33.31% ,碳密度提高了 6.24 tC/hm²,各森林类型植被碳储量随其面积变化而变化。表明近 20 多年来,湖南省乔木林植被单位面积储碳能力明显提高,天然林在湖南省乔木林植被碳储量占有重要地位。

关键词:湖南省;森林植被;碳储量;碳密度;动态变化

Dynamic characteristics of forest carbon storage and carbon density in the Hunan Province

LIU Zhaodan¹, LI Bin^{1,2}, FANG Xi^{1,3,*}, XIANG Wenhua^{1,3}, TIAN Dalun^{1,3}, YAN Wende^{1,3}, LEI Pifeng^{1,3}

1 College of Life science and technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 State Forestry Administration, Beijing 100714, China

3 National Engineering Laboratory for Applied Forest Ecological Technology in Southern China, Changsha 410004, China

Abstract: Distribution and dynamics of carbon storage and carbon density were examined in forest vegetation in Hunan Province of China, based on four forest inventories during 1983—2009 (1983—1987, 1990—1995, 2003—2004, and 2009). Inventory data consisted of biomass expansion factors and carbon concentration of existing forest types in this region. The results showed that the arboreal forests were carbon sinks with a value of 66.40×10^6 t C from 1987 to 2009. The highest carbon sink was in broad-leaved forests (48.43×10^6 t C), followed by Chinese fir plantations (9.54×10^6 t C) and pine forests (6.68×10^6 t C). All age-group forests exhibited carbon sinks, except mature forests. The middle-aged forests had the highest value for carbon sinks. Carbon density increased 5.65 t C/hm² in arboreal forests during the four forest inventory periods. Carbon density increased by 4.75 , 4.09 , and 0.83 t C/hm² in young, middle-aged, and near mature arboreal forests, respectively, whereas it declined by 6.87 and 13.88 t C/hm² in mature and over-mature arboreal forests, respectively. Carbon sinks were 41.01×10^6 and 25.39×10^6 t C in natural forests and man-made plantations, respectively.

基金项目:国家林业局林业软科学研究项目(2014-R11)

收稿日期:2015-04-23; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fangxizhang@sina.com

Carbon density increased 7.19 and 4.91 t C/hm² in natural and plantation forests. The total carbon sink was 84.87×10^6 t C in forest vegetation (including open forests). The arboreal and bamboo forests accounted for 78.24% and 33.31% of total carbon sinks, respectively. Carbon density increased 6.24 t C/hm² in forest vegetation. Carbon storage changed in various types of forest vegetation due to change in forested areas. Our results suggested that carbon sequestration ability is considerably high in the arboreal forest vegetation in the Hunan Province. In particular, the natural forests contribute substantially to carbon storage and sequestration in Hunan forests.

Key Words: Hunan Province; forest vegetation; carbon storage; carbon density; dynamic characteristics

森林植被碳储量占陆地植被碳储量的 76%—98%^[1],在区域和全球碳循环中起着关键作用^[2-3]。森林植被碳储量动态与森林面积变化、森林演替、年龄组成、人类经营活动以及环境变化等因素密切相关,是衡量森林生态系统可持续发展的重要指标。因此,研究森林植被碳“源”、“汇”变化不仅对估算区域碳收支和制定应对气候变化的森林管理政策有重要意义^[4],而且对森林植被恢复与重建以及保护和管理也有现实的指导作用^[5]。近 20 多年来,中国不少学者对森林植被碳储量的估算方法进行了研究,并基于国家尺度或省域尺度对森林植被碳储量、碳密度及其碳汇功能进行了研究,取得了显著的成就,涉及不同地区不同森林类型的碳储量、碳固定及其与森林结构、林龄和生境条件的关系^[4-21]。但中国对森林植被碳储量的研究多为国家尺度森林植被碳储量研究,系统量化研究省域尺度森林植被碳储量的动态仍较少^[8,14,17,19-21]。此外,中国地域幅员辽阔,区域空间差异大,自然环境复杂,森林资源复杂多样,不同学者采用不同估算方法,尽管基于同一清查期的森林资源清查数据,但不同尺度(国家尺度、省域尺度)对同一省区森林植被碳储量的估算结果存在较大差异及不确定性,大多省区在国家尺度下的估算结果明显低于省域尺度,特别是湖南省、山东省、宁夏回族自治区(表 1)。因此,为了精确量化中国森林植被碳库储量及其碳汇功能,不仅要建立统一而规范的度量和观测方法,而且需要对各省区森林植被碳储量分别进行详尽估算。

表 1 两种尺度下 15 个省区森林植被碳库储量的估算结果

Table 1 The estimation results of forest vegetation carbon storage in some provinces under the two scales

省(区、市) Area	国家尺度碳储量(PgC, 数据年度) Carbon storage in national scale (PgC, period)	省域尺度碳储量(PgC, 数据年度) Carbon storage in province scale (PgC, period)
海南	0.037(1999—2003) ^[10]	0.038(1998) ^[9]
广东	0.199(2004—2008) ^[11]	0.216(2007) ^[12]
广西	0.321(2004—2008) ^[11]	0.210(2010) ^[13]
福建	0.190(1999—2003) ^[10]	0.251(2003) ^[14]
江西	0.289(2004—2008) ^[11]	0.264(2005) ^[15]
湖南	0.085(1995—1998) ^[10]	0.174(1995) ^[16]
四川(含重庆)	0.677(1999—2003) ^[10]	0.523(2003) ^[8]
云南	0.748(2004—2008) ^[4]	0.884(2007) ^[17]
河南	0.038(1999—2003) ^[10]	0.047(2003) ^[18]
山东	0.014(1999—2003) ^[10]	0.043(2003) ^[19]
陕西	0.193(2004—2008) ^[4]	0.238(2004) ^[22]
山西	0.045(2004—2008) ^[4]	0.045(2005) ^[23]
宁夏	0.005(2004—2008) ^[11]	0.446(2004) ^[24]
吉林	0.433(2004—2008) ^[4]	0.439(2006) ^[25]
黑龙江	0.570(1999—2003) ^[10]	0.803(2003) ^[26]

近 20 多年来,随着天然林资源保护工程、退耕还林(草)工程、长江中上游防护林建设等系列林业生态工程的实施,湖南省森林恢复迅速,森林类型丰富多样,森林覆盖率由 2003 年的 53.67% 增加到 2011 年的 57.

13%^[27],在水源涵养,维系洞庭湖乃至长江流域生态平衡以及区域碳平衡中起着极其重要的作用。此外,其森林碳源汇功能及其时空格局也因经营活动而发生变化。目前,系统量化研究湖南省近 20a 森林植被碳储量的动态未见报道。本研究利用湖南省 4 次(1983—1987 年、1990—1995 年、2003—2004 年和 2009 年)森林资源清查数据,采用材积源—生物量法,结合湖南省现有森林植被主要树种碳含量的实测数据,估算湖南省不同清查期森林植被碳储量、碳密度,并探讨其动态变化趋势,对提高国家尺度的森林碳汇估算精度和当地森林固碳增汇经营管理具有一定的现实科学意义。

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,境内地貌复杂,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%。属于大陆性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 2011 年统计,湖南省林业用地面积 1292.32×10⁴hm²,有林地面积 1018.59×10⁴hm²,森林覆盖率达 57.13%,居于全国第 5 位,活立木总蓄积 4161.19 万 m³,活立木总生长量 300.43 万 m³。

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森林资源二类清查数据:《湖南省森林资源主要数据汇编(1983—1987 年)》、《湖南省森林资源主要数据汇编(1990—1995 年)》、《湖南省森林资源主要数据汇编(2003—2004 年)》和国家林业局中南森林资源监测中心、湖南省林业厅《第八次全国森林资源清查湖南省森林资源清查成果(2009)》。

2.2 研究方法

2.2.1 森林类型确定

依据“中国森林资源资料的划分”和“湖南省 4 次森林资源清查主要数据汇编”,森林包括乔木林(不包括乔木经济林)、经济林和竹林三部分。为能准确地反映湖南省森林植被碳储量、碳密度的动态特征,本研究也将灌木林、疏林列入估算范畴,其中乔木林主要有:杉木林、松木林、国外松林、柏木林、阔叶林、杨树林、其它杉类林、桉树林。

2.2.2 各森林类型生物量的计算方法

(1)乔木林生物量的计算方法:目前普遍认为材积源—生物量法是估测森林生物量较好方法。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^[4,28-29]。由于湖南省松木林以马尾松林为主,国外松林以湿地松林为主,阔叶林以樟、楠、榿、栲、青冈、石栎等常绿阔叶树种为主,其它杉类林以柳杉、落羽杉、水杉为主,因此,本研究利用刘国华等^[5]建立的杉木林,马尾松林,樟、楠、榿、栲、青冈林,湿地松林,柏木林,杨树林,柳杉、落羽杉、水杉林,桉树林的生物量与蓄积量之间的关系式(表 2)估算湖南省不同清查期乔木林的生物量。

(2)经济林生物量的计算方法:由于森林资源清查数据仅提供了经济林的面积数据,方精云等^[29]采用经济林平均生物量法估算经济林生物量。本研究也沿用此方法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,其中油茶林面积占全省经济林面积的 60%以上,因此,本研究根据湖南省油茶林生物量的研究成果^[30-32],取其算术平均值 23.52 t·hm⁻²,估算湖南省经济林生物量,计算公式如(1)式:

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

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(t/hm^2), $S_{\text{经}}$ 为经济林面积(hm^2)。

表 2 各乔木林类型生物量与蓄积量回归方程^[5,29]
Table 2 The regression equation between biomass and volume with different forests

乔木林类型 Arbor forest types	生物量 (B, 单位:t) — 蓄积量 (V/m^3) 回归方程 Regression equation between biomass (B,t) and volume (V/m^3)	相关系数 Correlation coefficient
杉木林 Chinese fir forest	$B = 0.3999V + 22.5410$	0.97
松木林 <i>Masson Pine</i> forest	$B = 0.52V$	
阔叶林 Broad-leaved forest	$B = 1.0357V + 8.0591$	0.91
柏木林 <i>Cypress</i> Forest	$B = 0.6129V + 26.1451$	0.98
国外松林 <i>Slash Pine</i> Plantation	$B = 0.5168V + 33.2378$	0.97
杨树林 <i>Poplar</i> forest	$B = 0.4754V + 30.6034$	0.93
柳杉、落羽杉、水杉林 <i>Tsuga, Taxodium distichum, Keteleeria</i> etc.	$B = 0.4158V + 41.3318$	0.94
桉树林 <i>Eucalyptus</i> forest	$B = 0.7893V + 6.9306$	1.00

(3) 竹林生物量的计算方法:在森林资源清查数据中,竹林主要有毛竹和杂竹两类,仅有面积和株数。以往研究中,竹林生物量主要是由竹林总株数和平均单株生物量推算^[16,29]。本研究也采用此方法,取竹林单株平均生物量 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$ ^[29],估算湖南省竹林生物量,计算公式如(2)式:

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

式中, $W_{\text{竹}}$ 为竹林生物量(t), $A_{\text{竹}}$ 为竹林单株平均生物量($\text{kg}/\text{株}$), $N_{\text{竹}}$ 为竹林株数。

(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^[29]。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 $19.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[29] 估算湖南省灌木林生物量,计算公式如(3)式^[16,29]:

$$W_{\text{灌}} = A_{\text{灌}} \times S_{\text{灌}} \tag{3}$$

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($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), $S_{\text{灌}}$ 为灌木林面积(hm^2)。

2.2.3 森林植被碳贮量、碳密度估算

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、死地被物层碳储量。森林植被碳储量(tC)为森林生物量(t)乘以其碳含量(gC/g)。森林植被碳密度(单位: tC/hm^2)为森林碳储量(tC)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 3 所示^[33]。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 3 湖南省现有森林植被的算术平均碳含量
Table 3 Arithmetical average carbon concentration of existing main forests in Hunan Province

树种 Species	杉木林 Chinese fir forest	马尾松林 <i>Masson Pine</i> forest	湿地松林 <i>Slash Pine</i> plantation	柏木林 <i>Cypress</i> forest	阔叶林 Broad-leaved forest	杨树林 <i>Poplar</i> forest	毛竹林 <i>Moso bamboo</i> forest	灌木林 Shrub forest
碳含量/(gC/g) Carbon concentration	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

3 结果与分析

3.1 湖南省乔木林植被碳储量、碳密度的动态

从表 4 可以看出,从 1983—1987 年到 2009 年,湖南省乔木林面积增加了 $250.69 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其植被碳储量

净增加了 66.40×10^6 tC, 年均递增 (22a) 3.02×10^6 tC/a, 年均增长率 6.27%。不同清查期乔木林植被碳汇介于 2.13×10^6 — 4.21×10^6 tC/a 之间, 最大出现在 2003—2004 年, 从 2003—2004 年到 2009 年, 从 4.21×10^6 tC/a 下降为 2.23×10^6 tC/a。碳密度增加了 5.65 tC/hm², 提高了 56.44%, 年均增加 0.26 tC hm⁻² a⁻¹。表明近 22a 来, 湖南省乔木林植被碳汇功能逐渐提高过程中呈现一定的波动, 单位面积的储碳能力也明显提高。

3.1.1 不同乔木林类型植被碳储量、碳密度的变化趋势

如表 4 所示, 从 1983—1987 年到 2009 年, 各乔木林植被碳储量均表现为净增加, 阔叶林净增加量最大 (48.43×10^6 tC), 其次是杉木林 (9.54×10^6 tC) 和松木林 (6.68×10^6 tC), 柏木林、国外松林、杨树林、其它杉类林、桉树林净增加量较低, 分别为 0.10×10^6 tC、 0.81×10^6 tC、 0.48×10^6 tC、 0.34×10^6 tC、 0.03×10^6 tC。表明近 22a 来, 湖南省各乔木林植被均表现为碳汇, 阔叶林碳汇最大, 其次是杉木林、松木林。不同清查期, 各乔木林植被碳储量的变化趋势有所不同, 从 1983—1987 年到 2003—2004 年, 各乔木林植被碳储量明显增加, 其中杉木林、松木林、阔叶林最明显, 分别净增加了 18.10×10^6 tC、 14.10×10^6 tC、 18.95×10^6 tC, 从 2003—2004 年到 2009 年, 除阔叶林、杨树林、三杉林、桉树林外, 其它乔木林碳储量呈下降趋势, 其中杉木林、松木林减少最明显, 分别净减少了 8.56×10^6 tC、 7.42×10^6 tC, 下降了 38.66% 和 33.79%。

表 4 湖南省不同时期各乔木林类型植被碳储量、碳密度和面积

Table 4 Carbon stock, carbon density and area of arbor forests in different period in Hunan Province						
林分类型 Forest types	1983—1987			1990—1995		
	面积 Area/ ($\times 10^4$ hm ²)	碳储量 Carbon storage/ ($\times 10^6$ tC)	碳密度 Carbon density/ (tC/hm ²)	面积 Area/ ($\times 10^4$ hm ²)	碳储量 Carbon storage/ ($\times 10^6$ tC)	碳密度 Carbon density/ (tC/hm ²)
杉木林 Chinese fir forest	174.04	12.60	7.24	219.29	18.32	8.35
松木林 Masson Pine forest	220.61	15.28	6.93	243.20	20.84	8.57
阔叶林 Broad-leaved forest	80.34	19.90	24.78	128.68	24.17	18.79
柏木林 Cypress Forest	5.72	0.35	6.12	9.47	0.53	5.61
国外松林 Slash Pine Plantation	—	—	—	23.07	0.99	4.27
杨树林 Poplar forest	—	—	—	1.21	0.14	11.57
三杉林 Tsuga, Taxodium distichum, Keteleeria etc.	—	—	—	1.34	0.19	14.18
合计 Total	480.70	48.14	10.01	626.26	65.18	10.41

林分类型 Forest types	2003—2004			2009		
	面积 Area/ ($\times 10^4$ hm ²)	碳储量 Carbon storage/ ($\times 10^6$ tC)	碳密度 Carbon density/ (tC/hm ²)	面积 Area/ ($\times 10^4$ hm ²)	碳储量 Carbon storage/ ($\times 10^6$ tC)	碳密度 Carbon density/ (tC/hm ²)
杉木林 Chinese fir forest	267.06	30.70	11.50	203.04	22.14	10.91
松木林 Masson Pine forest	232.26	29.38	12.65	177.70	21.96	12.36
阔叶林 Broad-leaved forest	251.37	38.85	15.46	308.36	68.33	22.16
柏木林 Cypress Forest	10.93	1.27	11.60	6.73	0.45	6.67
国外松林 Slash Pine Plantation	23.12	2.88	12.47	23.70	0.81	3.41
杨树林 Poplar forest	6.96	0.19	2.69	6.72	0.48	7.07
三杉林 Tsuga, Taxodium distichum, Keteleeria etc.	0.67	0.11	15.88	2.89	0.34	11.88
桉树林 Eucalyptus forest	1.34	0.003	0.23	2.25	0.03	1.45
合计 Total	793.70	103.38	13.03	731.39	114.54	15.66

从 1983—1987 年到 2009 年, 杉木林、松木林植被碳密度均呈现出先上升再下降, 阔叶林持续提高, 柏木林则呈现出下降—增高—下降, 国外松林、其它杉类林从 1990—1995 年到 2009 年, 先增高, 再下降, 国外松林

下降幅度明显,杨树林先下降再增高。表明各乔木林植被单位面积储碳能力变化趋势差异较明显(表4)。

3.1.2 不同龄组乔木林植被碳储量、碳密度的变化趋势

从图1可以看出,4次清查期,中龄林植被碳储量均为最高,且总体上呈上升趋势,占全省同期乔木林植被碳储量的比例(分别为38.24%、39.20%、49.28%和41.31%)也呈上升趋势;幼龄林植被碳储量呈升高—下降—升高趋势,除在2003—2004年低于近熟林、成熟林外,其它调查期仅次于中龄林,占全省同期乔木林植被碳储量的比例分别为27.79%、33.52%、8.65%、28.78%;近熟林植被碳储量的变化趋势与中龄林相似,占全省同期乔木林植被碳储量的比例分别为8.31%、9.47%、21.78%和16.77%;尽管成熟林植被碳储量的变化趋势与中龄林、近熟林相似,但占全省同期乔木林碳储量的比例呈下降趋势,从19.51%下降为11.27%,过熟林植被碳储量逐渐下降,占全省同期乔木林植被碳储量的比例从6.17%下降为1.87%。除过熟林碳储量为净减少外,幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林均表现为净增加,中龄林最高(28.91×10^6 tC),年均增加 1.31×10^6 tC,对乔木林植被碳汇贡献为43.55%;其次是幼龄林(19.58×10^6 tC)和近熟林(15.21×10^6 tC),年均增加分别为 0.89×10^6 tC和 0.69×10^6 tC,对乔木林植被碳汇贡献分别为29.49%和22.91%;成熟林净增加量较低(3.52×10^6 tC),年均增加仅为 0.16×10^6 tC,对乔木林植被碳汇贡献仅为5.30%(图1)。表明幼、中龄林植被碳汇功能正在逐步发挥主导作用。究其原因:(1)各龄组乔木林面积增加是其植被碳储量增加的重要原因之一。中龄林、近熟林、幼龄林、成熟林、过熟林面积分别净增加了 117.95×10^4 hm²、 60.04×10^4 hm²、 50.46×10^4 hm²、 21.26×10^4 hm²、 0.96×10^4 hm²;(2)乔木林生长也是各龄组植被碳储量增加的另一个重要原因,1983—1987年到2009年,幼龄林、中龄林、近熟林植被碳密度依次提高了4.75、4.09、0.83 tC/hm²,相反,成熟林、过熟林碳密度分别下降了6.87和13.88 tC/hm²,过熟林碳密度甚至低于近成熟林。表明近年来,成熟林、过熟林受到了严重的破坏,林分质量明显下降,导致单位面积的蓄积量大幅度下降,使得乔木林植被碳密度随林龄而增加的规律有些间断。值得注意的是,尽管2009年过熟林植被碳密度明显下降,但仍然高于幼龄林、中龄林。表明未达到成熟的乔木林,碳密度尚未达到最大,即随着乔木林生长还能固定一定的碳(图1)。

3.1.3 不同起源乔木林(人工林、天然林)植被碳储量、碳密度的动态变化

从图2可以看出,4次森林清查期,天然林植被碳储量呈持续增加趋势,净增加了 41.01×10^6 tC,占湖南省同期乔木林植被碳储量净增加量的61.76%,年均增加 1.86×10^6 tC/a。人工林植被碳储量从1987年到2004年保持净增加趋势,到2009年净减少了 15.02×10^6 tC,在整个研究期,人工林植被碳储量净增加了 25.39×10^6 tC,占湖南省同期乔木林植被碳储量净增加量的38.24%,年均增加 1.15×10^6 tC/a。从1983—1987年到2009年,天然林植被碳储量占湖南省同期乔木林植被碳储量的比例(分别为79.12%、70.73%、51.19%和69.06%)呈下降趋势,而人工林(20.88%、29.27%、48.81%和30.94%)总体上呈上升趋势,与两者面积的动态变化基本一致,在4次森林清查期中,天然林面积占湖南省同期乔木林面积的比例(分别为66.99%、61.85%、46.40%和56.87%)呈下降趋势,而人工林面积占湖南省同期乔木林面积的比例(分别为33.01%、38.15%、53.60%和43.13%)总体呈上升趋势(图3)。表明目前天然林在湖南省乔木林碳储量占有重要的地位,人工林碳汇功能正在逐步提高。

4次森林清查期,无论是人工林还是天然林,其植被碳储量均主要由幼龄林、中龄林、近熟林所贡献(图2)。人工林、天然林植被碳密度逐渐提高,分别提高了4.91 tC/hm²和7.19 tC/hm²(图3),表明随着林木的生长,湖南省人工林、天然林的碳汇功能将会有很大的提高。此外,人工林植被碳密度仅相当于同期天然林植被碳密度的53.51%和59.01%,表明未来即使不再增加人工林种植面积,随着人工林的生长,仍然可以固定大量的碳,将在湖南省乔木林碳汇功能中扮演重要的角色。

3.2 湖南省经济林、竹林、灌木林、疏林植被碳储量的动态

从图4可以看出,从1987年至2009年,经济林面积持续下降,净减少了 74.62×10^4 hm²,植被碳储量净减少了 8.5×10^6 tC,年均递减为 0.39×10^6 tC,其中,变化最明显的是1990—1995年到2003—2004年,面积净减少 73.48×10^4 hm²,碳储量净减少 8.36×10^6 tC,年平均净减少 0.93×10^6 tC/a;竹林面积持续增长,净增加了 $20.87 \times$

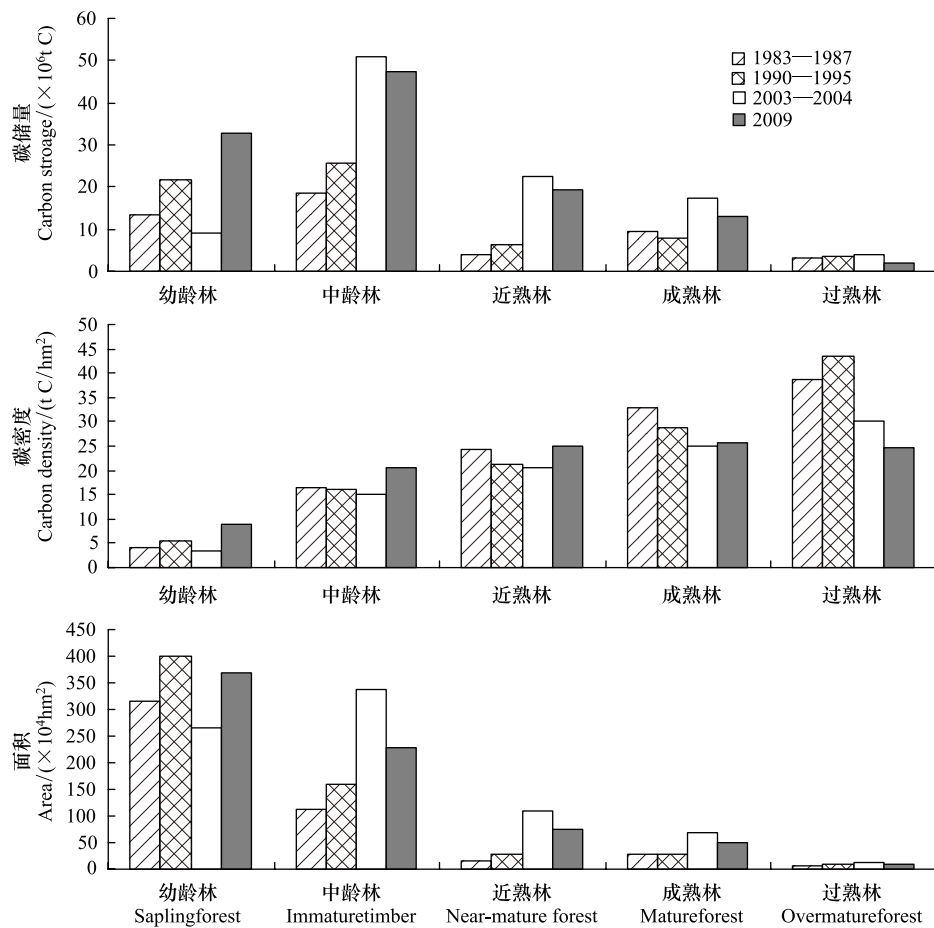


图1 不同时期各龄组乔木林植被碳储量、碳密度和面积

Fig.1 Carbon storage, carbon density and area of different age-class forests in different period

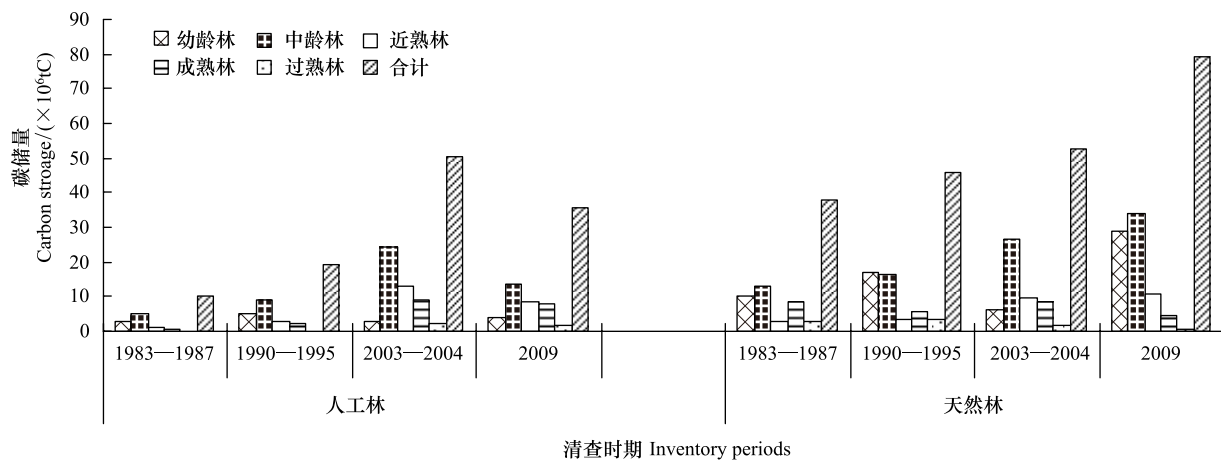


图2 不同时期人工林和天然林植被碳储量

Fig.2 Carbon storage of artificial forests and natural forests in different period

10^4 hm^2 , 植被碳储量净增加了 $28.27 \times 10^6 \text{ t C}$, 年均递增 $1.29 \times 10^6 \text{ t C}$, 植被碳密度增加了 $31.69 \text{ t C}/\text{hm}^2$; 灌木林面积先增加后减少, 总体净增加了 $21.24 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 植被碳储量净增加了 $2.03 \times 10^6 \text{ t C}$, 年均净增加 $0.09 \times 10^6 \text{ t C}$; 疏林面积持续减少, 净减少了 $50.69 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 植被碳储量净减少了 $3.33 \times 10^6 \text{ t C}$, 碳密度由 $6.38 \text{ t C}/\text{hm}^2$ 下降到 $5.56 \text{ t C}/\text{hm}^2$ 。

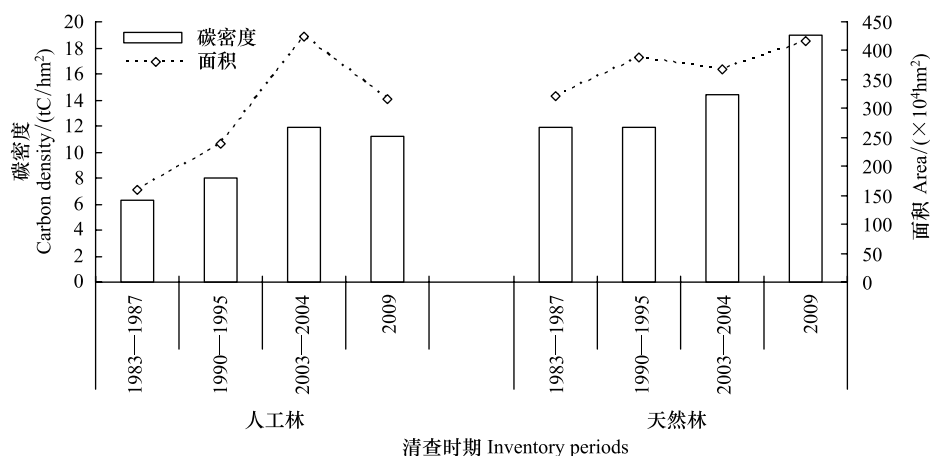


图3 不同时期人工林和天然林植被碳密度、面积

Fig.3 Carbon density and area of artificial forests and natural forests in different period

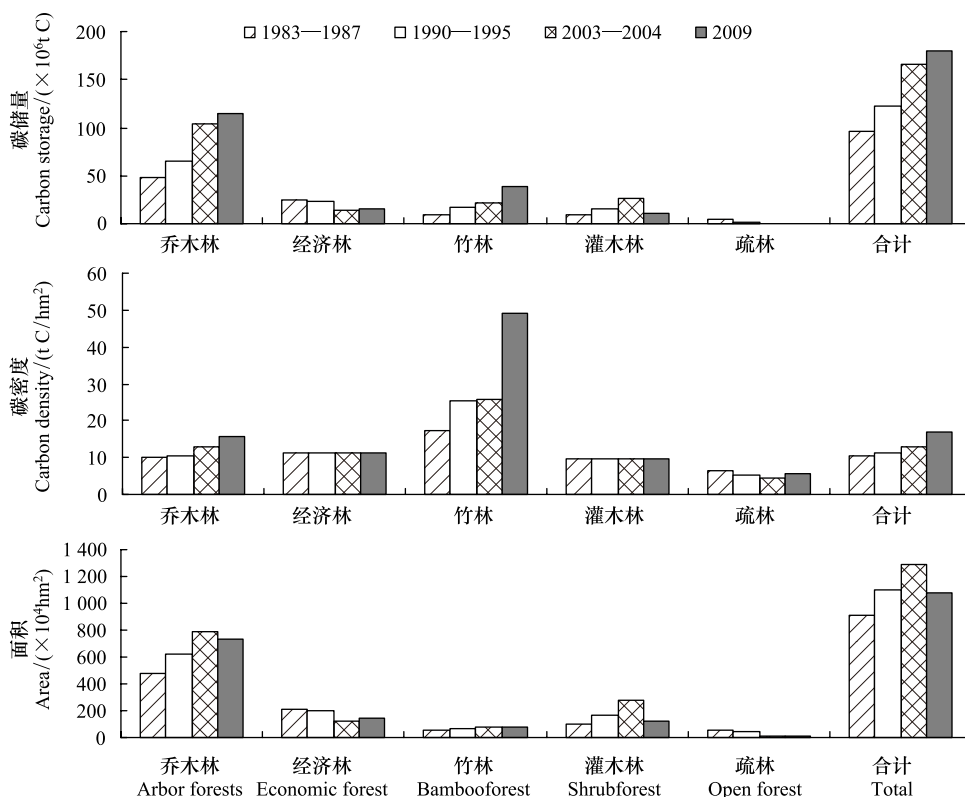


图4 不同时期湖南省各森林类型植被碳储量、碳密度和面积

Fig.4 Vegetation carbon storage, density and area of different forests in different period

3.3 湖南省森林植被碳储量、碳密度动态

湖南省森林植被(包括疏林)碳储量由1983—1987年的 $95.66 \times 10^6 \text{ tC}$ 增加到2009年的 $180.53 \times 10^6 \text{ tC}$,净增加了 $84.87 \times 10^6 \text{ tC}$,年均递增 $3.86 \times 10^6 \text{ tC}$,年均增长率为4.03%。不同清查期,森林植被的碳汇功能不同,最大碳汇出现在2003—2004年清查期($43.97 \times 10^6 \text{ tC}$),最小碳汇出现在2009年清查期($14.38 \times 10^6 \text{ tC}$),与各清查期的乔木林、竹林植被碳汇功能的动态变化趋势基本一致(图4)。

4次森林清查期,乔木林植被分别贮存了湖南省森林植被碳储量的50.32%、53.35%、62.21%和63.45%,净增加 $66.40 \times 10^6 \text{ tC}$,占湖南省森林植被碳汇的78.24%;竹林、灌木林植被碳储量分别占湖南省森林植被碳储

量的 10.28%—21.20% 和 6.21%—15.96%, 为湖南省森林植被碳汇分别贡献了 33.31% 和 2.39%; 经济林、疏林分别占湖南省森林植被碳储量的 8.64%—25.73% 和 0.25%—4.08%, 呈持续下降趋势, 各森林植被碳储量均随着其面积的变化而变化。4 次森林调查期, 乔木林面积最大, 占湖南省同期森林面积的比例(分别为 52.78%、57.17%、61.55%、67.83%) 呈持续上升趋势, 竹林面积占湖南省森林面积的比例(分别为 6.25%、5.94%、6.43%、7.22%) 呈持续上升趋势; 灌木林面积先增加后下降, 1983—1987 年清查期与 2009 年清查期没有明显的差异; 经济林、疏林面积呈持续下降趋势(图 4)。相关性分析结果表明, 各森林类型植被碳储量与其面积呈极显著的线性正相关(相关系数为 0.9472, 样品数 $n=20$, $P<0.001$)。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。

湖南省森林植被碳密度呈上升趋势, 从 1983—1987 年的 10.50 tC/hm^2 增加到 2009 年的 16.74 tC/hm^2 , 提高了 6.24 tC/hm^2 , 年均增加 0.28 tC/hm^2 。其中竹林增加量最大, 增加了 31.69 tC/hm^2 , 年均增加 1.44 tC/hm^2 , 其次是乔木林, 增加了 5.65 tC/hm^2 , 疏林在 $4.46\text{—}6.38 \text{ tC/hm}^2$ 之间波动, 由于经济林、灌木林碳储量是根据面积进行估算, 因此其碳密度在整个研究期不变(图 4)。

4 结论与讨论

4.1 湖南省乔木林植被碳储量、碳密度的动态

从 1987 年到 2009 年, 湖南省乔木林植被碳储量净增加了 $66.40 \times 10^6 \text{ tC}$, 年均递增量(22 年) $3.02 \times 10^6 \text{ tC}$, 年均增长率 6.27%, 高于四川(2.11%)^[8]、广东(3.41%)^[12], 但低于全国乔木林植被年均递增量($63.3 \times 10^6 \text{ tC}$)^[4]。表明 20 多年来, 湖南省乔木林恢复迅速, 碳汇作用明显, 与中国同期森林植被碳储量的总体变化趋势一致^[9], 主要得益于 20 世纪 80 年代中后期, 重视森林保护(如天然林保护工程、退耕还林工程等), 采取了人工造林更新、封山育林措施。4 次森林资源清查期中, 湖南省乔木林植被碳汇在 $2.13 \times 10^6\text{—}4.21 \times 10^6 \text{ tC/a}$ 之间变化, 表明湖南省乔木林植被碳汇功能提高过程中呈现出一定的波动, 可能是由于森林资源生长与资源消耗的交互影响所致。从 1987 年到 2009 年, 阔叶林植被碳储量最高, 其次是杉木林、松木林, 表明阔叶林、杉木林、松木林是湖南省乔木林植被碳储量的主体, 其碳储量的动态变化将明显影响湖南省乔木林植被碳汇功能, 这与阔叶林、杉木林、松木林面积及其林分质量密切相关。阔叶林植被碳储量及其占湖南省同期乔木林植被碳储量的比例(41.34%、37.08%、37.58%、59.66%) 呈明显增加趋势, 杉木林、松木林从 1987 年到 2004 年呈递增态势, 但从 2004 年到 2009 年分别下降了 38.66% 和 33.79%。根据国家林业局中南森林资源监测中心、湖南省林业厅的《第八次全国森林资源清查湖南省森林资源清查成果(2009)》调查结果可知, 主要是由于 2008 年初遭到了罕见的雨雪冰冻灾害, 乔木林采伐消耗量和枯损消耗量均有较大幅度增加, 其中雨雪冰冻灾害后清理采伐乔木林采伐消耗量增加 $3015.85 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占乔木林采伐消耗增量的 75.10%, 杉木林、马尾松林、针阔混交林等受灾较为严重, 导致 2009 年湖南省活立木总蓄积比前期(2004 年)净减了 $865.75 \times 10^4 \text{ m}^3$, 由净增加转变为净减少。此外, 由于森林经营管理水平较低和雨雪冰冻灾害影响, 乔木林生长量有所下降。表明较大的自然灾害和人为经营活动是影响乔木林植被碳储量动态变化的重要因素, 随着森林植被恢复, 阔叶林植被碳储量的动态变化对湖南省乔木林植被碳储量动态变化的影响日益显著。

从 1987 年到 2009 年, 湖南省乔木林植被一直处于碳净吸收, 碳密度增加了 5.65 tC/hm^2 , 提高了 56.44%, 表明湖南省乔木林林分质量明显提高, 可能与湖南省乔木林类型组成及其面积构成比例明显变化有关。1987 年, 湖南省乔木林主要为 4 种林分: 杉木林、松木林、阔叶林和柏木林, 分别占全省同期乔木林面积的 36.20%、45.89%、16.71% 和 1.18%, 2009 年, 湖南省乔木林为 8 种林分: 杉木林、松木林、阔叶林、柏木林、国外松林、杨树林、三杉林、桉树林, 分别占全省同期乔木林面积的 27.76%、24.30%、42.16%、0.92%、3.24%、0.40% 和 3.1%, 阔叶林面积及其占全省乔木林面积比例明显增大(表 4)。表明调整乔木林组成、增加阔叶林面积, 是提高湖南省乔木林植被碳密度的有效途径。

4 次清查期, 中龄林植被碳储量最高, 其次是幼龄林(除 2003—2004 年低于近熟林、成熟林外), 再次是近

成熟林,三者占全省同期乔木林植被碳储量的比例总体上均呈增加趋势,而成熟林、过熟林呈下降趋势。1987—2009年间,幼、中龄林植被碳储量净增加了 $48.49 \times 10^6 \text{ tC}$,对全省乔木林植被碳汇贡献了 73.03%,与各龄组乔木林面积、碳密度变化密切相关。幼龄林、中龄林、近熟林植被碳密度依次提高了 4.75、4.09、0.83 tC/hm^2 ,而成熟林、过熟林分别下降了 6.87 和 13.88 tC/hm^2 。表明近年来,成熟林、过熟林受到了严重的破坏,幼、中龄林碳汇功能正逐步发挥主导作用。

研究表明,乔木林植被碳储量与乔木林年龄组成密切相关,中幼龄林所占面积比例较高是导致中国乔木林现存碳储量较低的主要原因。在不同清查时期,中国成熟林面积仅占同期乔木林面积的 19%—33%,但其碳储量占乔木林植被碳储量的 40%—60%。而中幼龄林恰好相反^[4]。本研究中,4次森林资源清查期,幼、中龄林占湖南省乔木林面积的 75.77%—89.61%,可能是导致湖南省乔木林植被碳储量、碳密度较低的主要原因之一。

4.2 人工林经营管理与人工林碳储量

通过植树造林和提高人工林经营管理水平等措施增强陆地生态系统碳汇功能是清洁发展机制(Clean Development Mechanism, CDM)中最主要途径之一^[8]。Lal 将提高人工林经营管理水平,增强人工林土壤碳汇功能称为“双赢策略(Truly win-win strategy)”和“减缓全球变化的一种可能机制和最有希望的选择”^[34]。研究表明,从 20 世纪 70 年代后期到 2004—2008 年,中国乔木林植被碳储量净增加了 $1710 \times 10^6 \text{ tC}$,年均增加 $63.3 \times 10^6 \text{ tC}$,约一半来自人工林^[4]。《2005 年全球森林资源评估报告》指出,2000—2005 年期间,世界森林面积在减少,但碳净损失量在下降,与中国大规模的人工造林有关,对减缓全球变化具有积极的贡献^[35]。本研究中,从 1987—2009 年,湖南省人工林面积净增加了 $156.76 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占湖南省同期乔木林面积净增量的 62.53%,天然林植被碳储量占全省同期乔木林植被碳储量的比例(79.12%、70.73%、51.19%和 69.06%)呈下降趋势,而人工林(20.88%、29.27%、48.81%和 30.94%)呈增加趋势。但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,是人工林植被碳储量、碳密度较低的一个重要原因。湖南省人工林植被碳储量净增加了 $25.39 \times 10^6 \text{ tC}$,占湖南省同期乔木林碳储量净增量的 38.24%,年均增加 $1.15 \times 10^6 \text{ tC}/\text{a}$,低于天然林($1.86 \times 10^6 \text{ tC}/\text{a}$)。2009 年,湖南省人工林植被碳密度为 11.24 tC/hm^2 ,仅为湖南省同期天然林植被碳密度的 59.01%,明显低于中国人工林植被碳密度(26.7 tC/hm^2)^[4],也低于四川人工林植被碳密度(17.15 tC/hm^2)^[8]。表明湖南省人工林林分质量较低,可通过提高人工林经营管理水平,提高人工林林分质量,提高湖南省乔木林植被碳汇功能。

4.3 湖南省乔木林植被碳储量在中国乔木林植被碳储量中的贡献

近 20 多年来,中国森林植被碳汇功能显著增加^[4,7,36-37]。本研究中,从 1987 年到 2009 年,湖南省乔木林植被碳储量净增加了 $66.40 \times 10^6 \text{ tC}$,占全国同期乔木林植被碳净增量($1542 \times 10^6 \text{ tC}$)^[4]的 4.31%,湖南省乔木林植被碳储量占中国同期乔木林生物量碳储量的比例(分别为 0.99%、1.21%、1.76%、1.78%)呈上升趋势,乔木林面积所占比例(3.65%、4.48%、5.56%、4.70%)总体也呈上升趋势;湖南省乔木林植被碳储量年均增长率(6.27%)明显高于中国乔木林年均增长率(1.58%)^[4],平均碳密度年均增加 $0.26 \text{ tC hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,高于全国乔木林($0.21 \text{ tC hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)(表 5)。表明湖南省乔木林植被在中国乔木林植被碳储量和提高中国乔木林碳汇功能中扮演着重要的角色。

研究表明,中国森林生态系统乔木层平均碳密度为 38.65—40.12 tC/hm^2 ^[21,36],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 tC/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 tC/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^[3]。本研究中,各清查期,湖南省乔木林植被平均碳密度为 10.01—15.66 tC/hm^2 之间,显著低于中国同期乔木林平均碳密度,原因在于:①湖南省乔木林主要以幼、中龄林为主,幼、中龄林植被碳密度在 15 tC/hm^2 以下(图 1);②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低于广西等毗邻省区^[13]。

从 1987 年到 2009 年,湖南省乔木林植被碳密度提高了 5.65 tC/hm²,而全省森林植被碳密度呈上升趋势,提高了 6.24 tC/hm²,年均增加了 0.28 tC/hm²,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、灌木林在整个研究期不变;②通常选择较好的立地生产竹林,且近年来对竹林(主要毛竹林)多采用集约经营管理措施,林分质量得到明显提高,竹林植被碳密度提高幅度远远超过乔木林,导致全省森林植被碳密度提高幅度高于乔木林。

此外,经济林、竹林、灌木林植被碳储量估算采用平均生物量法,尽管在方法上是可行的。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^[38-39];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确定性。森林植被碳库动态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。

表 5 中国和湖南省乔木林面积、碳储量和碳密度
Table 5 Arbor forests area and total carbon stock with different periods in China and Hunan Province

区域 Area	清查期 Period/年	面积 Area/ (×10 ⁴ hm ²)	碳储量 Carbon storage/ (×10 ⁶ tC)	碳密度 Carbon density/ (tC/hm ²)	数据来源 Source
全国 Nation	1984—1988	13169	4885	37.10	[4]
	1989—1993	13971	5402	38.70	
	1999—2003	14279	5862	41.10	
	2004—2008	15559	6427	41.30	
湖南省 Hunan	1983—1987	480.70	48.14	10.01	本文
	1990—1995	626.26	65.18	10.41	
	2003—2004	793.70	103.38	13.03	
	2009	731.39	114.54	15.66	

参考文献 (References):

[1] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458 (7241): 1009-1013.

[2] Zhang Y D, Gu F X, Liu S R, Liu Y C, Li C. Variations of carbon stock with forest types in subalpine region of southwestern China. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300: 88-95.

[3] 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. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 13-14.

[4] 郭兆迪, 胡会峰, 李品, 李怒云, 方精云. 1977—2008 年中国森林生物量碳汇的时空变化. *中国科学: 生命科学*, 2013, 43(5): 421-431.

[5] 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. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.

[6] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.

[7] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981-2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(6): 804-812.

[8] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 赵安玖. 四川省及重庆市地区森林植被碳储量动态. *生态学报*, 2008, 28(3): 966-975.

[9] 曹军, 张懿锂, 刘燕华. 近 20 年海南岛森林生态系统碳储量变化. *地理研究*, 2002, 21(5): 551-560.

[10] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 邓立斌, 逯非, 欧阳志云, 冯宗炜. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28(2): 517-524.

[11] 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. *林业科学*, 2011, 47(7): 7-12.

[12] 叶金盛, 余光辉. 广东省森林植被碳储量动态研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(4): 7-12.

[13] 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.

[14] 郑德祥, 廖晓丽, 李成伟, 叶倩玲, 陈平留. 福建省森林碳储量估算与动态变化分析. *江西农业大学学报*, 2013, 35(1): 112-116.

- [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. 自然资源学报, 2011, 26(4): 655-665.
- [16] 焦秀梅. 湖南省森林植被碳储量及地理分布规律[D]. 长沙: 中南林学院, 2005.
- [17] 裴艳辉, 李江. 云南省森林植被碳储量及其近 10 年动态变化. 中国水土保持科学, 2012, 10(3): 93-98.
- [18] 光增云. 河南森林植被的碳储量研究. 地域研究与开发, 2007, 26(1): 76-79.
- [19] 张德全, 桑卫国, 李曰峰, 王宗泉, 盖文杰. 山东省森林有机碳储量及其动态的研究. 植物生态学报, 2002, 26(增刊): 93-97.
- [20] Ren H, Chen H, Li L J, Li P H, Hou C M, Wan H F, Zhang Q M, Zhang P X. Spatial and temporal patterns of carbon storage from 1992 to 2002 in forest ecosystems in Guangdong, Southern China. Plant and Soil, 2013, 363(1/2): 123-138.
- [21] Zhang C H, Ju W M, Chen J M, Zan M, Li D Q, Zhou Y L, Wang X Q. China's forest biomass carbon sink based on seven inventories from 1973 to 2008. Climatic Change, 2013, 118(3/4): 933-948.
- [22] 马琪, 刘康, 张慧. 陕西省森林植被碳储量及其空间分布. 资源科学, 2012, 34(9): 1781-1789.
- [23] 俞艳霞, 张建军, 王孟本. 山西省森林植被碳储量及其动态变化研究. 林业资源管理, 2008, (6): 35-39.
- [24] 高阳, 金晶炜, 程积民, 苏纪帅, 朱仁斌, 马正锐, 刘伟. 宁夏回族自治区森林生态系统固碳现状. 应用生态学报, 2014, 25(3): 639-646.
- [25] 王新闯, 齐光, 于大炮, 周莉, 代力民. 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2013-2020.
- [26] 谢立红, 张荣涛. 黑龙江省森林碳汇估算及潜力分析. 国土与自然资源研究, 2011, (4): 88-89.
- [27] 我国森林面积 2.08 亿公顷森林覆盖率 21.63%. (2014-02-25). <http://www.scio.gov.cn/video/zxtj/Document/1364864/1364864.htm>. (2015-03-20)
- [28] 焦燕, 胡海清. 黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2248-2252.
- [29] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产力. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [30] 湛小勇, 彭元英, 郭照光, 周志华, 陶盛. 油茶林分生物量及生产力的研究. 经济林研究, 1996, 14(1): 4-6.
- [31] 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. 经济林研究, 2000, 18(1): 16-18.
- [32] 何方, 王义强, 吕芳德, 张才学, 朱承忠. 油茶林生物量与养分生物循环的研究. 林业科学, 1996, 32(5): 403-410.
- [33] 李斌, 方晰, 田大伦, 项文化, 闫文德, 康文星, 邓湘雯. 湖南省现有森林植被主要树种的碳含量. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(1): 71-78.
- [34] Lal R. Forest soils and carbon sequestration. Forest Ecology and Management, 2005, 220(1/3): 242-258.
- [35] FAO. Global Forest Resources Assessment 2005: Progress towards Sustainable Forest Management. Rome: FAO Forestry Paper, 2005: 1-147.
- [36] 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. 地理科学进展, 2007, 26(6): 1-10.
- [37] 刘双娜, 周涛, 魏林艳, 舒阳. 中国森林植被的碳汇/源空间分布格局. 科学通报, 2012, 57(11): 943-950.
- [38] Guo Z D, Fang J Y, Pan Y D, Birdsey R. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: a comparison of three methods. Forest Ecology and Management, 2010, 259(7): 1225-1231.
- [39] Ni J. Carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems: approaching a more accurate estimate. Climatic Change, 2013, 119(3/4): 905-917.