

湖南省森林生态系统碳储量、碳密度及其空间分布

刘曦乔^{1,4} 梁萌杰⁵ 陈龙池^{1,3} 汪思龙^{1,3*} 郑文辉^{1,4} 余鑫^{1,4} 李仁山^{1,4}
张广杰^{1,4} 王福生² 杨海军²

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所会同森林生态实验站, 沈阳 110016; ²湖南省林业调查规划设计院, 长沙 410007; ³湖南会同森林生态系统国家野外科学观测研究站, 会同 418307; ⁴中国科学院大学, 北京 100049; ⁵北京中咨海外咨询有限公司, 北京 100048)

摘要 本研究在湖南省野外样地调查的基础上, 结合湖南省 2014 年森林资源二类调查结果, 计算出湖南省森林生态系统碳储量的空间分布格局。结果表明: 湖南省森林生态系统的平均碳密度为 $130.69 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中, 乔木层、灌木层、草本层、凋落物层和土壤的碳密度分别为 28.36 、 1.77 、 0.90 、 1.36 和 $98.30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。植被碳密度与土壤碳密度呈显著正相关关系。土壤碳密度与凋落物层碳密度呈显著正相关关系。阔叶林碳密度最大 ($175.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 其后依次为杉木林 ($136.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、马尾松林 ($133.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、柏木林 ($124.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、竹林 ($117.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、杨树林 ($95.08 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、经济林 ($80.94 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、湿地松林 ($64.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、灌木林 ($63.73 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。湖南省森林生态系统总碳储量为 1572.02 Tg C , 其中, 乔木层、灌木层、草本层、凋落物层和土壤的碳储量分别为 341.18 、 21.29 、 10.78 、 16.36 、 1182.38 Tg C 。阔叶林碳储量最大 (545.77 Tg C), 依次为杉木林 (419.91 Tg C)、马尾松林 (275.58 Tg C)、竹林 (127.76 Tg C)、灌木林 (74.44 Tg C)、经济林 (71.25 Tg C)、柏木林 (25.81 Tg C)、湿地松林 (22.39 Tg C)、杨树林 (9.11 Tg C)。在各市州中, 怀化市森林生态系统碳储量最大, 为 267.43 Tg C ; 湘潭市最少, 为 28.12 Tg C 。湖南省森林生态系统碳储量分布不均, 表现为湘西南 > 湘南 > 湘北 > 湘中。阔叶林、杉木林和马尾松林是湖南省森林生态系统碳储量的主要贡献者, 分别占 34.72% 、 26.71% 、 17.53% 。

关键词 碳储量; 碳密度; 空间分布; 森林生态系统; 湖南省

Carbon storage, carbon density and spatial distribution of forest ecosystems in Hunan Province. LIU Xi-qiao^{1,4}, LIANG Meng-jie⁵, CHEN Long-chi^{1,3}, WANG Si-long^{1,3*}, ZHENG Wen-hui^{1,4}, YU Xin^{1,4}, LI Ren-shan^{1,4}, ZHANG Guang-jie^{1,4}, WANG Fu-sheng², YANG Hai-jun² (¹Huitong Experimental Station of Forest Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²Hunan Institute of Forest Inventory and Planning, Changsha 410007, China; ³Huitong National Research Station of Forest Ecosystem, Huitong 418307, China; ⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁵China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100048, China).

Abstract: Based on the field investigation and forest resource inventory in 2014, we estimated carbon density, carbon storage and their spatial distribution of forest ecosystems in Hunan Province. The results showed that the average carbon density of forest ecosystems in Hunan Province was $130.69 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, of which 28.36 , 1.77 , 0.90 , 1.36 and $98.30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ were in trees, shrubs, herbs, litter, and soil, respectively. Carbon density of vegetation layer and litter layer were positively correlated with that of soil, and the carbon densities of different forest types were found in the following decreasing sequence: broad-leaved forest ($175.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > Chinese fir forest ($136.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > masson pine forest ($133.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > *Cupressus funebris* forest

中国森林生态系统固碳现状、速率、机制和潜力项目(XDA05050200)资助。

收稿日期: 2017-01-20 接受日期: 2017-06-06

* 通讯作者 E-mail: slwang@iae.ac.cn

($124.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > bamboo forest ($117.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > poplar forest ($95.08 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > economic forest ($80.94 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > slash pine plantation ($64.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > shrub ($63.73 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$). The total carbon storage was 1572.02 Tg C in the forest ecosystems in Hunan Province, of which 341.18 , 21.29 , 10.78 , 16.36 , 1182.38 Tg C were in trees, shrubs, herbs, litter, and soil, respectively. The carbon storages of different forest types were found in the following decreasing sequence: broad-leaved forest (545.77 Tg C) > Chinese fir forest (419.91 Tg C) > masson pine forest (275.58 Tg C) > bamboo forest (127.76 Tg C) > shrub (74.44 Tg C) > economic forest (71.25 Tg C) > *Cupressus funebris* forest (25.81 Tg C) > slash pine plantation (22.39 Tg C) > poplar forest (9.11 Tg C). Among 14 cities at prefecture scale, the highest carbon storage (267.43 Tg C) in the forest ecosystem was found in Huaihua, while the lowest (28.12 Tg C) was found in Xiangtan. Spatial distribution of carbon storage was ranked as the order of southwestern Hunan > southern Hunan > northern Hunan > central Hunan. Broad-leaved forest, Chinese fir forest, and masson pine forest acted as the main contributor in carbon storage of the forest ecosystems in Hunan Province, accounting for 34.72% , 26.71% , and 17.53% , respectively.

Key words: carbon storage; carbon density; spatial distribution; forest ecosystem; Hunan Province.

森林生态系统是陆地生态系统中最大的碳库, 约占陆地生态系统碳储量的 $2/3$ (Schlesinger, 1991; Lal, 2005), 在全球碳循环和减缓大气 CO_2 浓度升高中起着重要的作用 (Dixon *et al.*, 1994)。因此, 精确估算森林生态系统碳储量对于深入了解全球碳循环和优化碳循环模型具有重要的意义。近十年来, 众多学者研究了我国或区域森林植被或土壤碳储量 (王绍强等, 2000; Fang *et al.*, 2001; 王效科等, 2001; 李克让等, 2003; 徐新良等, 2007; 李海奎等, 2011; 杨晓菲等, 2011; 孙清芳等, 2016), 然而, 以往研究大多只关注生态系统某一组分 (植被层或土壤层) 碳储量的估算, 尚缺乏对整个森林生态系统碳储量格局的全面了解和认识, 如林下灌木层、草本层、凋落物层及土壤层碳储量的垂直分布, 这不仅严重制约了对森林生态系统碳储量的全面理解, 也不利于对森林生态系统固碳增汇的经营管理 (崔高阳等, 2015)。

湖南省是中国主要的林业大省之一, 其森林面积居于全国第 5 位, 森林覆盖率由 2003 年的 53.67% 增加到 2011 年的 57.13% , 在维持区域碳平衡中扮演着重要角色 (刘兆丹等, 2016)。因此, 精确估算湖南省森林碳储量, 分析其分布格局, 对于精确量化中国森林碳储量及管理森林资源具有重要的意义。虽然对湖南省森林碳储量已有初步研究, 但现有研究由于估算时间不同、选取的森林碳储量组分的不同 (焦秀梅等, 2005; 陈仕栋, 2011; 李斌等, 2015; 刘兆丹等, 2016), 使已有报道对湖南省森林碳储量估

算差异较大。目前, 关于湖南省各主要类型、各地区森林生态系统碳储量估算仍然存在很大的不确定性。为此, 本研究利用湖南省森林资源二类调查资料, 结合野外样地调查, 回答如下两个科学问题: 1) 湖南省森林乔木层、灌木层、草本层、凋落物层、土壤层碳储量对生态系统碳库贡献如何? 2) 湖南省森林生态系统碳密度和碳储量在不同森林类型和地区之间是否存在差异? 哪些林分类型对这种差异起主导作用? 为湖南省森林生态系统碳储量的估算提供更为精确的数据, 为优化森林经营管理措施、增加森林固碳增汇能力提供理论支持。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

湖南省位于长江中游的荆江河段南岸, 地理坐标为 $24^{\circ}38'N$ — $30^{\circ}08'N$, $108^{\circ}47'E$ — $114^{\circ}15'E$ 。国土面积为 211800 km^2 , 辖 13 个地级市和 1 个自治州, 共有 136 个县级以上行政单位。区内为中亚热带湿润季风气候, 年平均气温 $14.8 \sim 18.5^{\circ}\text{C}$, 日照时数 $1238.7 \sim 1868.7 \text{ h}$, 年降水量 $1200 \sim 1800 \text{ mm}$ 。地带性森林植被为亚热带常绿阔叶林, 树种以壳斗科的栲树 (*Castanopsis fargesii*)、青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*) 以及樟科 (*Lauraceae*)、山茶科 (*Theaceae*) 的一些种为主。由于长期的林业生产活动, 杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林、马尾松 (*Pinus massoniana*) 林以及竹 (*Bambusoideae*) 林等是重要的森林类型。地带性土壤以红黄壤和黄壤为主, 零星

分布有红壤、紫壤和黄棕壤。非地带性土壤主要有潮土、水稻土、石灰土、黄棕壤和紫色土等,湘中和湘西还分布有石灰岩。

1.2 研究方法

1.2.1 森林类型确定 湖南省森林类型主要包括乔木林、经济林、竹林,乔木林按起源可以划分为天然林(阔叶林)和人工林,其中天然林以樟、栲、楠、木荷、青冈、栎类等常绿阔叶树种为主,人工林则按优势种确定主要树种,如松木林以马尾松林为主,国外松林以湿地松林为主,经济林以主要经济作物油茶和柑橘为主,本研究中将三杉林(柳杉、落羽杉、水杉林)列入杉木林一并计算,由于调查资料中并未包含桉树林的数据,因此本研究不包括桉树林碳储量。

1.2.2 森林资源数据来源和调查样地分布情况

本研究所采用各类型森林面积的基本数据来源于湖南省 2014 年森林资源二类调查资料《湖南省 2014 年度森林资源统计年报》,根据 2011 和 2012 年野外样地调查数据估算了湖南省阔叶林、杉木林、马尾松林等 8 类森林的植被层(乔木层、灌木层、草本层)、凋落物层、土壤层以及生态系统碳密度、碳储量,其中植被层碳储量根据各类型森林林龄的分布面积估算,土壤层碳储量通过计算发现各森林类型不同林龄间相差不大,因此没有考虑林龄的影响。根据湖南省森林类型、各类森林类型的面积、蓄积构成及其地域分布权重,设置了 256 个 20 m×50 m 的森林调查样地(图 1),其中阔叶林 38 个,杉木林样地 109 个,马尾松林 68 个,柏木林 5 个,湿地松 7 个,杨树

林 5 个,竹林 8 个,经济林 16 个。为了便于调查将样地分成 10 个 10 m×10 m 的样方。

1.3 植被生物量

对每一样地的乔木进行每木检尺,测定胸径、树高,记录树种。确定样方内的主要树种,并按照标准木径级遵循正态分布的原则,每个树种选取 5~10 株标准木。标准木伐倒后测其基径、胸径和树木总长。伐倒后将干、枝、叶分离并称重,树干 2 m 一个区分段,锯段后称重,并在树干中央处截取厚度 3~5 cm 的圆盘测量含水率。根系采取全挖法(Li et al., 2013),称量各级根鲜重。将枝、叶、干、根样品(400~500 g)及中央圆盘带回实验室,75 °C 烘干至恒重,计算含水率。本研究所建立的生物量回归方程 $W=a \cdot (D^2 H)^b$ (W 为生物量, D 为胸径, H 为树高, a 、 b 为常数)能够很好地适用于乔木每一组分(表 1)。应用这些生物量方程来计算每株树木的生物量,从而得到每个样地乔木生物量。

林下植被(包括灌木和草本)生物量估计采用全株收获的方法。灌木的调查通过在样地中随机设置 3 个 2 m×2 m 的样方,记录主要种类及其盖度后,将样方内所有灌木全部收获后,分根、枝干、叶称重,分别取 300 g 代表性样本称重后,带回实验室,75 °C 烘干至恒重,计算含水率,得到灌木层的生物量。在每个灌木调查的样方内,取 1 个 1 m×1 m 的代表性小样方,记录主要草本种类及其盖度后,将小样方内所有植物全部收获后,分地上部分和地下部分称重,并分别取约 300 g 代表性样本称鲜重后,带回实验室,75 °C 烘干至恒重,计算含水率,得到草本层的生物量。

1.4 凋落物生物量

在测定灌草层生物量的样方内,选择代表性地段,布置 1 个 1 m×1 m 的代表性小样方,将小样方内的所有凋落物收集并称重,然后带回实验室,75 °C 烘干至恒重,计算含水率,估算凋落物的干重。

1.5 土壤碳储量

在调查样地内选择 1 个未受人为干扰、植被组成和土壤具有代表性的地段,挖掘 1 个土壤剖面,深至 100 cm,不够 100 cm 至基岩为止。之后,沿剖面按 0~10、10~20、20~30、30~50、50~100 cm 分层,用环刀取样,带回实验室测定土壤容重。容重测定时,去除石砾含量的影响。在样方内使用内径 5 cm 的土钻,按 0~10、10~20、20~30、30~50、50~100 cm,每层随机取 8 钻土,混合成一个混合样,共得到

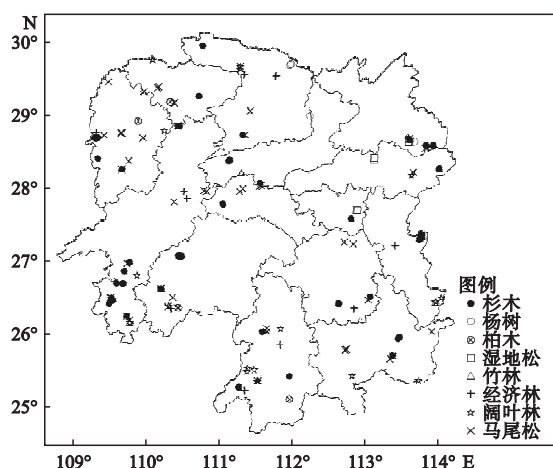


图 1 湖南省不同森林类型样地的空间分布示意图

Fig.1 Spatial distribution of different forests in Hunan Province

表 1 湖南省不同森林类型各器官生物量方程的系数
Table 1 Biomass equation coefficients for stems, branches, foliage and roots of different forests in Hunan Province

类别	器官	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>P</i>	
杉木林	干	0.0310	0.8734	0.990	<0.0001	
	枝	0.0066	0.8471	0.999	<0.0001	
	叶	0.0118	0.7914	0.989	<0.0001	
	根	0.0434	0.6953	0.999	<0.0001	
马尾松林	干	0.0184	0.9930	0.971	<0.0001	
	枝	0.1849	0.5904	0.768	<0.0001	
	叶	0.1127	0.5082	0.787	<0.0001	
	根	0.0039	1.0034	0.912	<0.0001	
柏木林	干	0.2696	0.6927	0.734	<0.0001	
	枝	0.0180	0.8517	0.929	<0.0001	
	叶	0.0039	0.9777	0.906	<0.0001	
	根	0.0488	0.7897	0.986	<0.0001	
湿地松林	干	0.0013	1.3241	0.992	<0.0001	
	枝	0.0782	0.6173	0.993	<0.0001	
	叶	0.0281	0.7571	0.993	<0.0001	
	根	0.0032	1.0634	0.993	<0.0001	
杨树林	干	0.0359	0.8970	0.956	<0.0001	
	枝	0.0450	0.7087	0.696	<0.0001	
	叶	0.0001	1.2408	0.963	<0.0001	
	根	0.0089	0.9310	0.609	0.0005	
竹林	干	0.0202	0.9091	0.847	<0.0001	
	枝	0.0582	0.5325	0.261	0.0006	
	叶	0.0348	0.3965	0.254	0.0002	
	根	90.0896	-0.5415	0.128	0.0015	
经济林	油茶	干	0.0879	0.8468	1.000	<0.0001
		枝	0.0432	0.8210	1.000	<0.0001
		叶	0.0699	0.5563	0.994	<0.0001
		根	0.0794	0.7470	1.000	<0.0001
	柑橘	干	0.3682	0.6755	0.871	0.0010
		枝	0.1550	0.7383	0.985	<0.0001
		叶	0.0693	0.5111	0.943	<0.0001
		根	0.1141	0.6019	0.982	<0.0001
阔叶林	樟木	干	0.0102	1.0444	0.982	<0.0001
		枝	0.1243	0.6261	0.895	<0.0001
		叶	0.0492	0.5164	0.979	0.0013
		根	0.1762	0.6636	0.962	0.0013
	樟	干	0.0131	1.0478	0.964	<0.0001
		枝	0.0166	0.9779	0.736	<0.0001
		叶	0.0061	0.8455	0.584	0.0006
		根	0.0406	0.8791	0.563	0.0018
	栲树	干	0.0716	0.8675	0.999	<0.0001
		枝	0.0560	0.7841	0.994	<0.0001
		叶	0.0192	0.7493	0.991	<0.0001
		根	0.0480	0.7891	0.999	<0.0001
	木荷	干	0.0054	1.1628	0.880	<0.0001
		枝	0.0062	0.9911	0.795	0.0003
		叶	0.0598	0.5905	0.730	0.0001
		根	0.0566	0.8172	0.931	<0.0001
	润楠	干	0.0659	0.8640	0.999	<0.0001
		枝	0.0335	0.8140	0.999	<0.0001
		叶	0.0311	0.7150	0.998	<0.0001
		根	0.1069	0.6930	0.998	<0.0001
	青冈	干	0.0604	0.9185	0.987	<0.0001
		枝	0.0351	0.8852	0.984	<0.0001
		叶	0.0044	0.9316	0.979	<0.0001
		根	0.0395	0.8638	0.991	<0.0001
栎类	干	0.2946	0.7473	0.682	0.0002	
	枝	0.1604	0.6331	0.637	<0.0001	
	叶	0.0522	0.5874	0.632	<0.0001	
	根	0.2740	0.6427	0.700	<0.0001	

5 个不同层次的混合土壤样品。带回实验室,测定碳含量。

将 0~10、10~20、20~30、30~50、50~100 cm 的土壤容重分别乘以各层实测的碳含量,加权平均,即得 0~100 cm 的土壤碳密度(Chen *et al.*, 2016)。

$$\text{计算公式为: } D_s = \sum_{i=1}^5 R_i \times H_i \times \frac{\theta_i}{10}$$

式中, D_s 为样方内 0~100 cm 土壤碳密度($t \cdot hm^{-2}$), R_i 为去除石砾后土壤第 K 层(0~10、10~20、20~30、30~50 和 50~100 cm) 的土壤容重($g \cdot cm^{-3}$), H_i 为碳含量($g \cdot kg^{-1}$), θ_i 为第 K 层采样深度(cm)。

1.6 灌木林生物量

国内有关灌木林生物量的数据极少。在湖南省森林资源清查资料中仅有灌木林的面积数据。本文采用我国秦岭淮河以南地区灌木林单位面积平均生物量 $19.76 t \cdot hm^{-2}$ (焦秀梅等, 2005), 来估算湖南省灌木林生物量。计算公式为: 灌木林生物量 = 单位面积灌木林生物量 × 灌木林面积。灌木林植被碳含量取 $0.484 g C \cdot g^{-1}$ (刘兆丹等, 2016), 灌木林土壤碳密度取平均值 $54.17 t \cdot hm^{-2}$ (陈仕栋, 2011; 曾掌权, 2012), 估算出灌木林的碳储量和碳密度。

1.7 化学分析和数据处理

将烘干的植物样品和凋落物样品研磨。土壤样品风干,磨粉,过 0.25 mm 筛。所有样品均采用重铬酸钾外加热法测定有机碳含量。

植被层碳密度计算公式为: $D_c = B \times R_c$, 式中, D_c 为某种林分某一层碳密度($t \cdot hm^{-2}$); B 为某种林分某一层生物量($t \cdot hm^{-2}$); R_c 为某种林分某一层碳含量。

凋落物层的碳密度以单位面积其生物量或现存量($t \cdot hm^{-2}$) 乘以相应的碳含量求得。

本文湖南省各类型森林不同层次碳储量均由其碳密度和对应的面积计算得来, 计算公式为:

$$\text{碳储量} = \text{碳密度} \times \text{面积}$$

森林生态系统的碳储量为森林不同层次碳储量之和, 即乔木层、灌木层、草本层、凋落物层和土壤层的碳储量之和。

用 Excel 进行基础数据整理, 统计数据利用 SPSS 19.0 软件进行方差分析, Origin 9.0 作图。湖南省各州市的森林生态系统碳储量地理分布图基于湖南省行政区划图和各州市森林生态系统碳储量数据, 采用 ArcGIS 10 出图。

2 结果与分析

2.1 湖南省森林植被碳密度和碳储量格局

湖南省森林植被层平均碳密度为 $31.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中乔木层、灌木层、草本层平均碳密度分别为 28.36 、 1.77 、 $0.90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从空间分布来看, 湘西北和湘东南森林植被层碳密度居高。湘西南、湘东北居中, 位于湘中的衡阳市森林植被层碳密度最少($25.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) (图 2)。

不同森林类型植被层碳密度有差异, 其中阔叶林碳密度最大($55.59 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 依次为马尾松林($40.38 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、杉木林($25.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、柏木林($24.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、杨树林($15.46 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、竹林($12.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、湿地松林($12.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、灌木林($9.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、经济林($3.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) (图 3)。不同森林类型之间碳密度的差异主要取决于乔木层碳密度。灌木层碳密度上, 灌木林最大($9.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 柏木林最小($0.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。草本层碳密度上, 杉木林和湿地松林最大(均为 $1.49 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 柏木林最小($0.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 竹林和经济林内均无草本层和灌木层。

湖南省森林植被层总碳储量为 373.25 Tg C 。其中乔木层碳储量最高, 为 341.18 Tg C 。灌木层和草本层的碳储量较少, 分别为 21.29 、 10.78 Tg C 。从空间分布上看, 森林面积最大的怀化市植被层碳储量最多(65.86 Tg C), 占整个湖南省的 18.19% , 其乔木层、灌木层和草本层的碳储量均排在湖南省首位。而面积最小的湘潭市植被层的碳储量最少, 仅占湖南省的 1.91% 。其他各市的植被层碳储量介于 $13.30 \sim 39.27 \text{ Tg C}$ (图 4)。

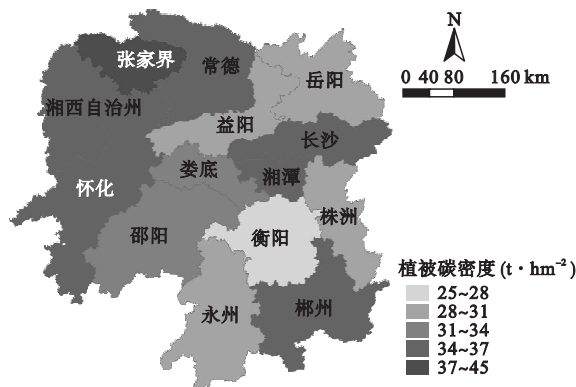


图 2 湖南省森林植被碳密度空间分布
Fig.2 Spatial distributions of carbon density in forest vegetation in Hunan Province

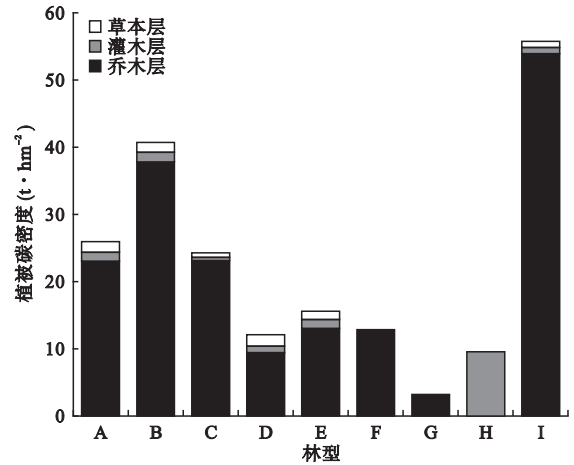


图 3 湖南省不同森林的植被碳密度
Fig.3 Carbon density of vegetation layers in different forests in Hunan province
A. 杉木; B. 马尾松; C. 柏木; D. 湿地松; E. 杨树; F. 竹林; G. 经济林; H. 灌木林; I. 阔叶林。

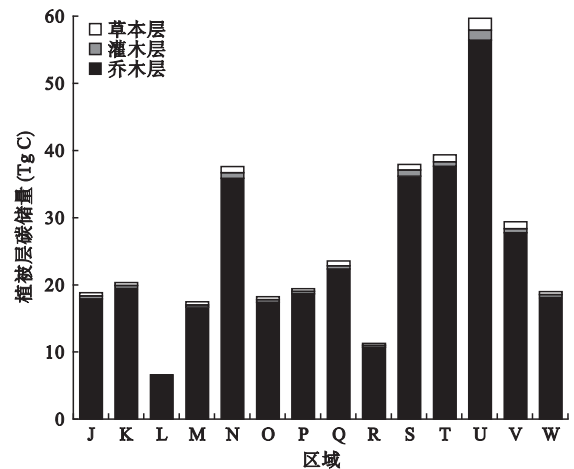


图 4 湖南省森林植被碳储量空间分布
Fig.4 Spatial distributions of carbon storage in forest vegetation layer in Hunan Province
J. 长沙市; K. 株洲市; L. 湘潭市; M. 衡阳市; N. 邵阳市; O. 岳阳市; P. 益阳市; Q. 常德市; R. 娄底市; S. 郴州市; T. 永州市; U. 怀化市; V. 湘西自治州; W. 张家界市。

不同森林类型所占面积是碳储量的决定因素, 分布面积最大的阔叶林, 其植被层碳储量最大, 为 173.11 Tg C 。其次为马尾松林(83.14 Tg C)、杉木林(78.79 Tg C)。森林分布面积较少的竹林(13.68 Tg C)、灌木林(11.17 Tg C)、柏木(5.01 Tg C)、湿地松(4.16 Tg C)和经济林(2.72 Tg C)植被层碳储量均较少。杨树林碳储量最少, 为 1.48 Tg C (图 5)。

2.2 湖南省森林凋落物和土壤碳密度与碳储量格局

湖南省森林土壤层 1 m 深度范围内平均碳密度

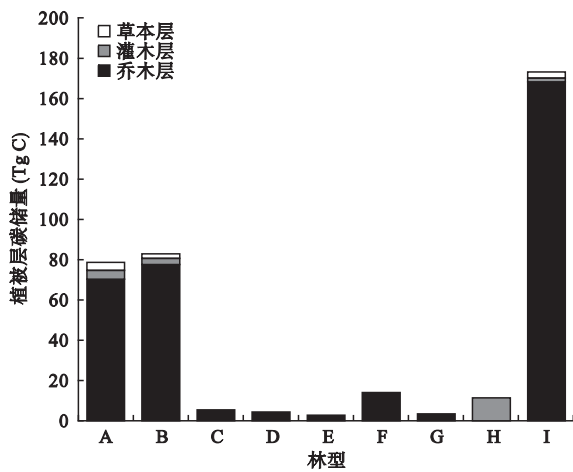


图5 湖南省不同森林植被碳储量
Fig.5 Carbon storage in vegetation layers in different forests in Hunan Province
A.杉木; B.马尾松; C.柏木; D.湿地松; E.杨树; F.竹林; G.经济林; H.灌木林; I.阔叶林。

为 $98.30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占全省森林生态系统的 75.22% 。空间分布上, 各地区间土壤碳密度相差较小(图6) , 其中张家界市最高($107.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) , 衡阳市最低($94.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 。

不同森林类型间阔叶林土壤层碳密度最大($118.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) , 之后依次为杉木林($109.40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 、竹林($102.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 、柏木林($99.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 、马尾松林($91.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 、经济林($77.85 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 、杨树林($79.08 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 、灌木林($54.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) , 湿地松林土壤层碳密度最小($51.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 。如图7所示, 表层土壤($0 \sim 10 \text{ cm}$) 的碳密度最大, 且随着深度的增加不断减小。湖南省森林凋落物层平均碳密度为 $1.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中竹林最大为 $1.92 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其余介于 $0.44 \sim 1.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

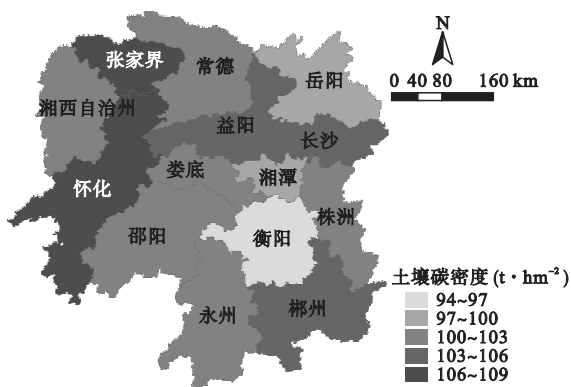


图6 湖南省森林土壤碳密度空间分布
Fig.6 Spatial distributions of carbon density in forest soil in Hunan Province

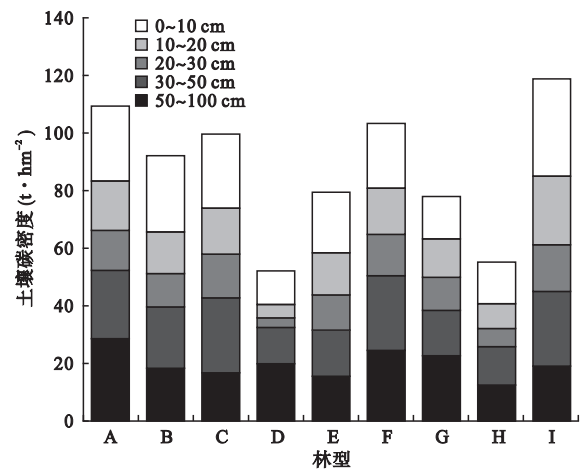


图7 湖南省不同森林土壤碳密度
Fig.7 Soil carbon density in different forests in Hunan Province
A.杉木; B.马尾松; C.柏木; D.湿地松; E.杨树; F.竹林; G.经济林; H.灌木林; I.阔叶林。

如图8所示, 森林土壤层 1 m 深范围内总碳储量为 1182.38 Tg C 。空间分布上, 森林分布面积最大的怀化市土壤碳储量最多, 1 m 深土壤层碳储量为 191.78 Tg C , 其中 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤层碳储量(50.24 Tg C) 占 26.20% 。湘潭市的土壤碳储量最少, 为 20.12 Tg C (图9) 。

不同森林类型间阔叶林和杉木林土壤碳储量较高, 分别占总碳储量的 31.12% 和 28.40% 。柏木林、湿地松、杨树林土壤碳储量较小, 分别占总碳储量的 1.74% 、 1.51% 和 0.64% 。马尾松、竹林、经济林和灌木林的土壤碳储量居中, 分别占 15.97% 、 9.47% 、

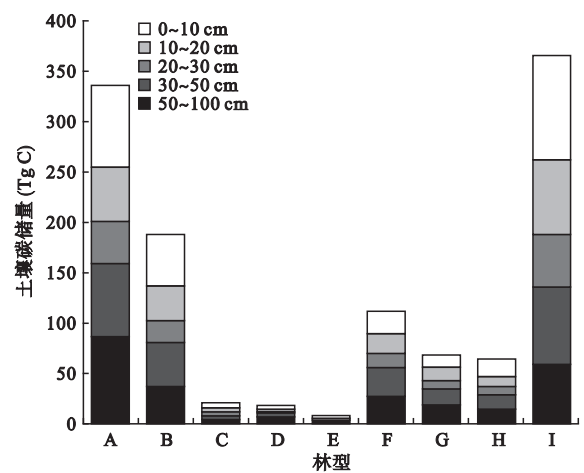


图8 湖南省不同森林土壤碳储量
Fig.8 Soil carbon storage in different forests in Hunan Province
A.杉木; B.马尾松; C.柏木; D.湿地松; E.杨树; F.竹林; G.经济林; H.灌木林; I.阔叶林。

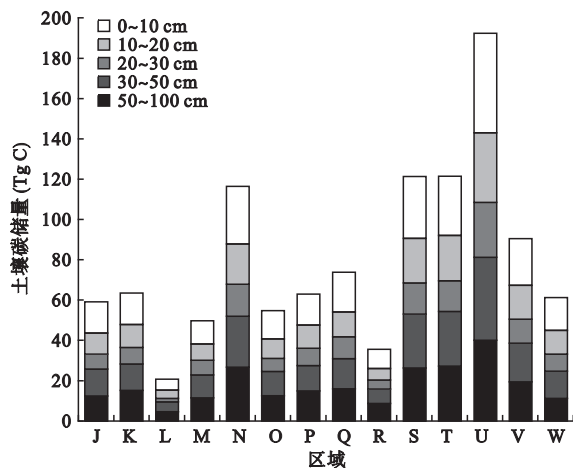


图9 湖南省不同行政区域森林土壤碳储量空间分布
Fig.9 Spatial distributions of carbon storage in forest soil in Hunan Province
J.长沙市; K.株洲市; L.湘潭市; M.衡阳市; N.邵阳市; O.岳阳市; P.益阳市; Q.常德市; R.娄底市; S.郴州市; T.永州市; U.怀化市; V.湘西自治州; W.张家界市。

5.80%、5.35%。不同林型土壤层均表现为表层土壤碳储量(0~10 cm)最大且随深度增加而递减。其中阔叶林表层土壤(0~10 cm)碳储量最多,为106.22 Tg C。全省凋落物层总碳储量为16.36 Tg C,所占生态系统比重较小(1.04%)。

2.3 湖南省森林生态系统碳密度与碳储量格局
湖南省森林生态系统平均碳密度为130.69 t·hm⁻²。不同层之间表现为:土壤层碳密度最大(98.30 t·hm⁻²),其次为植被层(31.03 t·hm⁻²)和凋落物层(1.36 t·hm⁻²) (表2)。空间分布上,以张家界(140.40 t·hm⁻²)、怀化(139.92 t·hm⁻²)、长沙(137.46 t·hm⁻²) 3市居多,衡阳市最少(108.30 t·hm⁻²) (图10)。

不同森林类型之间表现为:阔叶林碳密度最大

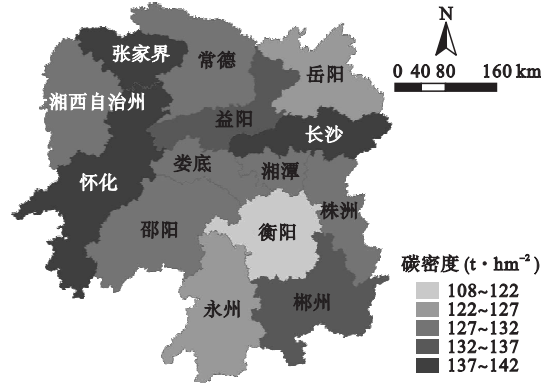


图10 湖南省森林生态系统碳密度空间分布
Fig.10 Spatial distributions of carbon density in forest ecosystems in Hunan Province

(175.26 t·hm⁻²),杉木林(136.81 t·hm⁻²)、马尾松林(133.84 t·hm⁻²)次之,其他森林类型碳密度介于63.73~124.88 t·hm⁻²。不同类型森林生态系统的植被碳:土壤碳比值变化在0.04~0.47,以天然林为主的阔叶林最大0.47,而人为干扰最大的经济林仅为0.04。且植被碳密度与土壤碳密度之间呈显著正相关关系($R^2 = 0.48, P = 0.006$)。土壤碳密度与凋落物层碳密度呈显著正相关关系($R^2 = 0.48, P = 0.039$)。

湖南省森林生态系统总碳储量为1572.02 Tg C。空间分布上表现为湘西南较高,湘东北偏低,湘中最低。其中怀化市碳储量最高(267.43 Tg C),湘潭市碳储量最低(28.12 Tg C) (图11)。

不同森林类型间表现为:面积最大的阔叶林碳储量最大(545.77 Tg C),其次为杉木林(419.91 Tg C)、马尾松林(275.58 Tg C),湿地松、柏木林、经济林、灌木林、竹林碳储量介于22.39~127.76 Tg C,杨树林的碳储量最小(9.11 Tg C) (表2)。

表2 湖南省森林生态系统碳密度及碳储量
Table 2 Carbon density and storage in forest ecosystems in Hunan Province

类别	面积 (×10 ⁶ hm ²)	碳密度(t·hm ⁻²)				碳储量 (Tg C)
		植被	凋落物	土壤	总量	
杉木林	3.07	25.67	1.74	109.40	136.81	419.91
马尾松林	2.06	40.38	1.75	91.71	133.84	275.58
柏木林	0.21	24.23	1.10	99.55	124.88	25.81
湿地松林	0.35	12.01	1.03	51.67	64.71	22.39
杨树林	0.10	15.46	0.44	79.08	95.08	9.11
竹林	1.09	12.56	1.92	102.81	117.29	127.76
经济林	0.88	3.09	-	77.85	80.94	71.25
灌木林	1.17	9.56	-	54.17	63.73	74.44
阔叶林	3.11	55.59	1.51	118.16	175.26	545.77
合计	12.04	-	-	-	-	1572.02

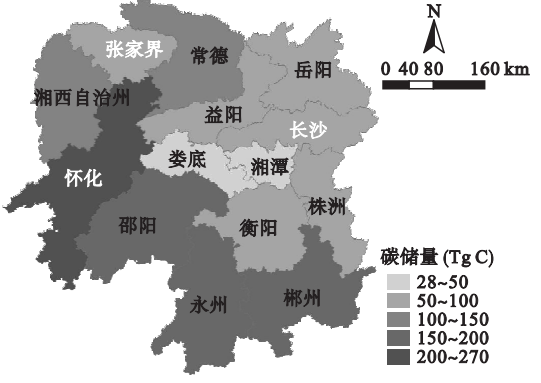


图11 湖南省森林生态系统碳储量空间分布
Fig.11 Spatial distributions of carbon storage in forest ecosystems in Hunan Province

3 讨论与结论

3.1 湖南省森林植被层碳储量特征

本研究估算的湖南省森林植被层平均碳密度为 $31.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 这一结果明显高于焦秀梅等(2005)所报道的 $15.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 以及刘兆丹等(2016)所报道的 $16.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其原因一方面是涵盖的森林群落层次不同, 刘兆丹等(2016)的研究仅计算乔木层的碳密度, 并没有包括林下灌木层、草本层、死地被物层, 这显然会低估湖南省碳密度; 其二, 所报道的研究各自所采用的数据来源不同, 后两者所采用分别是1995和2009年的清查数据, 而本研究所采用的是2011和2012年的样地实测数据; 其三, 所选定的调查样地的代表性也是导致研究结果之间存在差异的主要原因。在湖南省森林植被碳密度当中, 乔木层占91.41%, 其次为灌木层和草本层, 分别占5.70%和2.89%, 表明森林生态系统生物量碳绝大部分贮存在乔木层中。

本研究估算的湖南省森林植被层碳储量为 373.25 Tg C , 高于焦秀梅等(2005)和刘兆丹等(2016)分别报道的 173.97 和 180.53 Tg C , 其主要原因是各研究所采用的各森林类型面积来自不同时期的清查资料, 例如, 刘兆丹采用2009年的调查资料, 焦秀梅采用1995年的调查资料, 而本研究基于2014年的调查资料, 本研究中森林覆盖面积为 $1.204 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 高于 $1.078 \times 10^7 \text{ hm}^2$ (刘兆丹等, 2016) 和 $1.095 \times 10^7 \text{ hm}^2$ (焦秀梅等, 2005)。由此可见, 增加森林覆盖率对提高森林植被碳储量有重要作用。

3.2 湖南省森林土壤层碳储量特征

土壤碳密度已经成为衡量土壤碳储量的一个基本指标(王义祥等, 2005), 而且森林土壤有机碳储量最具不确定性(Huang *et al.*, 2010)。本研究在全省范围内通过野外调查取样获取湖南省森林(100 cm)土壤层平均碳密度, 并且在取样分析土壤容重的过程中, 用石砾含量对土壤容重进行校正, 避免林地土壤石砾含量较高对土壤容重的计算造成偏差。湖南省森林土壤碳密度的最终估算结果为 $98.30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 这个值与江西省森林土壤有机碳密度($102.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)相近(宋满珍等, 2009), 略低于目前所报道的中国森林(100 cm)土壤层平均碳密度 $107.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (刘世荣等, 2011) 和 $115.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (解宪丽等, 2004)。李斌等(2015)估算的湖南省森林土壤(80 cm)层平均碳密度为 $137.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与本

研究相比该值偏大, 理论上推断处于中亚热带区域的湖南林区, 土壤层(80 cm)碳密度平均值应低于我国森林土壤(100 cm)碳密度的平均值, 其结果偏大可能与其采用的文献数据没有统一的采样或分析方法有关。

湖南省不同森林类型土壤碳密度存在显著差异, 阔叶林最大, 其次是杉木林和竹林, 湿地松林最小, 相应地各类型森林凋落物层碳密度也呈相似的变化规律, 即森林土壤碳密度与凋落物层碳密度呈显著正相关关系, 也证明了森林凋落物的现存量及其变化将会对土壤层碳储量产生较大的影响(金峰等, 2000), 如果破坏或干扰凋落物层将直接影响土壤碳密度, 进而对整个森林生态系统碳密度造成深刻的影响。湖南省不同行政区域之间的森林土壤碳密度存在明显差异, 如工业发达的衡阳市、岳阳市、湘潭市土壤碳密度与自然资源保护完好的张家界相比分别降低12.88%、9.18%和8.08%, 说明人类活动产生的扰动会降低土壤碳密度及碳储量。

本研究估算的湖南省森林(100 cm)土壤层(包括凋落物层)碳储量为 1198.74 Tg C , 低于李斌等(2015)估算的湖南省土壤层碳储量(1568.66 Tg C), 这可能与其研究并未考虑各亚类土壤所占森林面积的权重, 而仅使用森林土壤有机碳含量的算术平均值来估算土壤碳储量有关。不同地区间土壤碳储量以怀化市最高(194.60 Tg C), 湘潭市最低(20.42 Tg C), 与陈仕栋(2011)的研究结果一致。这一结果与湖南省各行政区域森林面积和森林土壤碳密度之间的差异有关, 导致不同地区间森林土壤碳储量差异明显。

3.3 湖南省森林生态系统碳储量特征

本研究估算的湖南省森林生态系统平均碳密度为 $130.69 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中土壤层碳密度 $98.30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 植被层 $31.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 凋落物层 $1.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而周玉荣等(2000)研究得到全国森林生态系统的平均碳密度为 $258.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 植被层、土壤层和凋落物层的碳密度分别为 57.07 、 193.55 、 $8.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 可见湖南省森林生态系统各个层次的碳密度均小于全国水平, 导致这一差异的主要原因之一是与湖南省的所处地理区域有关, 湖南省地处中低纬度区域, 根据 Lal 等(2005)的研究, 全球低纬度森林土壤碳密度普遍低于中纬度和高纬度地区, 由于植被碳密度与土壤碳密度之间存在显著正相关关系, 因此较低的土壤碳密度也相应限制植被碳固持; 其二, 与湖南省幼龄林、中龄林森林面积比例

(69.49%) 过大有关; 其三, 具体到不同森林类型, 植被碳与土壤碳的比值差异明显, 最大值出现在以天然林为主体的阔叶林, 其次为马尾松林, 经济林最低, 这一比值反映出, 可以通过生态恢复措施来提升受到人为干扰程度较大的林型的固碳潜力。未来减少人为干扰并加强对幼中龄林的抚育管理, 随着林龄的增加, 湖南省森林生态系统贮存碳的能力将进一步增大。

本研究估算的湖南省森林生态系统总碳储量为 1572.02 Tg C, 这一结果明显低于胡长青等 (2005) 报道的湖南省森林生态系统总碳储量 (2164.95 Tg C), 究其原因可能与胡长青等 (2005) 以全国土壤平均碳密度 $193.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (约是本研究所估算结果的 2 倍) 来代替湖南省森林土壤碳密度去估算有关, 说明分区域小尺度上的研究对于准确估算森林生态系统碳储量尤为重要。森林碳储量在湖南省各州、市分布格局取决于各地的森林类型及其组成比率。其中以张家界市的森林碳密度最大, 主要原因是碳密度最高的阔叶林占全市森林面积的 51.67%。但怀化市的碳储量明显高于张家界市, 原因在于怀化市杉木人工林的面积约是张家界市的 6 倍, 阔叶林是其 2 倍。虽然衡阳市的碳密度最小, 但森林分布面积较小的娄底市 (仅占全省 3.06%) 和湘潭市 (仅占全省 1.85%) 的碳储量反而最小。湖北为洞庭湖区, 水域面积较大, 所以碳储量较少。因此, 加强保护碳密度较高的阔叶林并扩大森林覆盖面积对提高碳储量有着重要作用。

本研究估算了湖南省森林生态系统不同层次 (乔木层、灌木层、草本层、凋落物层和土壤层) 碳储量, 并且对森林生态系统碳储量的空间异质性进行了分析。这些结果不仅可以为湖南省森林经营管理提供理论依据, 而且为全国尺度上估算生态系统碳储量提供较准确的数据支持。但是, 由于采样点选取和调查取样时间等人为因素的干扰, 以及缺少灌木林样地生物量实地调查数据, 都会在一定程度上造成湖南省森林生态系统碳储量估算结果的偏差。未来我们需要加强在不同环境梯度、不同干扰梯度上对各类型森林样地的调查与数据获取, 这对提高整个生态系统碳储量估算的准确性将有重要意义。

参考文献

陈仕栋. 2011. 湖南省土壤有机碳密度、储量的空间分布格局及其影响因素分析 (硕士学位论文). 长沙: 中南林业科技大学.
崔高阳, 陈云明, 曹 扬, 等. 2015. 陕西省森林生态系统碳

- 储量分布格局分析. 植物生态学报, 39(4): 333-342.
胡长青, 桂小杰, 徐永新. 2005. 湖南省森林生态系统碳汇经济价值初探. 湖南林业科技, 32(3): 1-6.
焦秀梅, 项文化, 田大伦. 2005. 湖南省森林植被的碳贮量及其地理分布规律. 中南林业科技大学学报, 25(1): 4-8.
解宪丽, 孙 波, 周慧珍, 等. 2004. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. 土壤学报, 41(5): 687-699.
金 峰, 杨 浩, 赵其国. 2000. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展. 土壤, 32(1): 11-17.
李 斌, 方 晰, 李 岩, 等. 2015. 湖南省森林土壤有机碳密度及碳库储量动态. 生态学报, 35(13): 4265-4278.
李海奎, 雷渊才, 曾伟生. 2011. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量. 林业科学, 47(7): 7-12.
李克让, 王绍强, 曹明奎. 2003. 中国植被和土壤碳储量. 中国科学 D 辑, 33(1): 72-80.
刘世荣, 王 晖, 梁军伟. 2011. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. 生态学报, 31(19): 5437-5448.
刘兆丹, 李 斌, 方 晰, 等. 2016. 湖南省森林植被碳储量、碳密度动态特征. 生态学报, 36(21): 6897-6908.
宋满珍, 刘琪璟, 吴自荣, 等. 2009. 江西森林植被土壤有机碳储量估算及空间分布特征. 江西农业大学学报, 31(3): 416-421.
孙清芳, 贾立明, 刘玉龙, 等. 2016. 中国森林植被与土壤碳储量估算研究进展. 环境化学, 35(8): 1741-1744.
王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 2000. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, 55(5): 533-544.
王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 2001. 中国森林生态系统的植被碳储量和碳密度研究. 应用生态学报, 12(1): 13-16.
王义祥, 翁伯琦. 2005. 福建省土壤有机碳密度和储量的估算. 福建农业学报, 20(1): 42-45.
徐新良, 曹明奎, 李克让. 2007. 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, 26(6): 1-10.
杨晓菲, 鲁绍伟, 饶良懿, 等. 2011. 中国森林生态系统碳储量及其影响因素研究进展. 西北林学院学报, 26(3): 73-78.
曾掌权. 2012. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段碳密度与固碳潜力 (博士学位论文). 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所.
周玉荣, 于振良, 赵士洞. 2000. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 24(5): 518-522.
Chen LC, Wang SL, Wang QK. 2016. Ecosystem carbon stocks in a forest chronosequence in Hunan Province, south China. *Plant and Soil*, 409: 217-228.
Dixon RK, Brown S, Houghton RA, et al. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 262: 185-190.
Fang J, Chen A, Peng C, et al. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292: 2320-2322.
Huang Y, Sun W, Zhang W, et al. 2010. Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review. *Science China Life Science*, 53: 766-775.
Lal R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220: 242-258.
Li N, Xu WB, Lai JS, et al. 2013. The coarse root biomass of eight common tree species in subtropical evergreen forest. *Chinese Science Bulletin*, 58: 329-335.
Schlesinger WH. 1991. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. California: Academic Press Inc.

作者简介 刘曦乔, 女, 1992 年生, 硕士研究生, 森林生态学、人工林经营与管理. E-mail: zkyluixiqiao@126.com
责任编辑 张 敏