

DOI: 10.5846/stxb201409211867

李斌, 方晰, 李岩, 项文化, 田大伦, 谌小勇, 闫文德, 邓东华. 湖南省森林土壤有机碳密度及碳库储量动态. 生态学报, 2015, 35(13): 4265-4278.  
Li B, Fang X, Li Y, Xiang W H, Tian D L, Chen X Y, Yan W D, Deng D H. Dynamic properties of soil organic carbon in Hunan's Forests. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4265-4278.

## 湖南省森林土壤有机碳密度及碳库储量动态

李斌<sup>1,2</sup>, 方晰<sup>1,3,\*</sup>, 李岩<sup>1</sup>, 项文化<sup>1,3</sup>, 田大伦<sup>1,3</sup>, 谌小勇<sup>3,4</sup>, 闫文德<sup>1,3</sup>, 邓东华<sup>5</sup>

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

4 Division of Science, College of Arts and Sciences, Governors State University, University Park, Illinois 60484(USA)

5 湖南省邵阳县林业局, 邵阳 422100

**摘要:** 基于 2000—2014 年文献和著作资料中的湖南省森林土壤剖面有机碳含量数据, 湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站近 15 年的实测数据, 分析了湖南省主要森林类型土壤有机碳密度, 结合 1983 年至 2009 年湖南省 4 次森林资源清查数据, 研究了湖南省森林土壤有机碳库储量的动态特征。结果表明: 湖南省主要森林类型土壤有机碳算术平均含量在 9.53—22.86g/kg 之间, 灌木林最高, 土壤有机碳含量的分异主要发生在 0—40 cm 土层, 0—80 cm 土壤层有机碳密度在 95.44—181.30 tC/hm<sup>2</sup> 之间, 平均为 137.15 tC/hm<sup>2</sup>, 主要分布在 0—40 cm 土层中, 随土壤深度增加, 各森林类型土壤有机碳密度的差异下降, 受森林类型的影响减弱。从 1983—1987 年到 2009 年, 湖南省乔木林土壤层(0—80 cm)有机碳库储量净增加了 414.86×10<sup>6</sup>tC, 面积加权平均有机碳密度提高了 10.98 tC/hm<sup>2</sup>, 不同乔木林土壤层(0—80 cm)有机碳库储量的差异随着时间进程逐渐增大, 主要分布在杉木林、松木林、阔叶林。天然林是湖南省乔木林土壤有机碳库储量的主要贡献者, 人工林土壤有机碳储量正逐步提高, 经济林、竹林、灌木林对湖南省森林土壤层(0—80 cm)有机碳库储量贡献不同, 且动态变化趋势也不同。森林土壤层有机碳库储量的变化与各森林类型面积的变化密切相关, 而各森林类型面积的增减, 与各项林业政策的实施密切相关。因此, 人类活动深刻影响森林土壤的碳汇功能。

**关键词:** 湖南省; 森林土壤; 森林类型; 有机碳密度; 碳库储量

## Dynamic properties of soil organic carbon in Hunan's Forests

LI Bin<sup>1,2</sup>, FANG Xi<sup>1,3,\*</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, XIANG Wenhua<sup>1,3</sup>, TIAN Dalun<sup>1,3</sup>, CHEN Xiaoyong<sup>3,4</sup>, YAN Wende<sup>1,3</sup>, DENG Donghua<sup>5</sup>

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

4 Division of Science, College of Arts and Sciences, Governors State University, University Park, Illinois 60484, USA

5 Forestry Bureau of Shaoyang County, Shaoyang 422100, China

**Abstract:** Soil organic carbon (SOC) represents a large component of the global carbon cycle, and the SOC pool varies in forest ecosystems depending on species composition, growth stage and management practice. In order to accurately evaluate SOC distribution and dynamics in forests in Hunan Province of China, we reviewed, assembled and analyzed a

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201104009); 国家林业局林业软科学研究项目(2014-R11)

收稿日期: 2014-09-21; 网络出版日期: 2015-01-27

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

comprehensive data package collected from (1) published estimates of SOC contents in various forested soil profiles (a total of 277 soil profiles in the province) in the past 15 years (from 2000 to 2014), (2) four times of forest inventory data from 1983 to 2009 in Hunan's forests, (3) long-term field measurements in the Key National Observation Station of Central South University of Forestry and Technology in Huitong County, Hunan Province of China over the past 15 years (2000—2014) and (4) field surveys of 59 soil profiles taken from ten typical forest types in the province during the period of 2008 to 2014. All forests in the province were classified into four categories of timber-forests, economic-forests, bamboo-forests and shrub-forests. The timber-forests were further divided into eight major forest types based on the species composition of the forest stands. The results showed that the arithmetic average of SOC contents ranged from 9.53 to 22.86 g/kg in the four main forest categories, of which the shrub-forests had the highest SOC content. The differences of SOC mainly occurred in the 0—40 cm of soil layer among the studied forest groups. SOC density was in the range of 95.44—181.30 tC/hm<sup>2</sup> in the 0—80 cm soil layer, with an average of 137.15 tC/hm<sup>2</sup> in the examined forests. The differences of SOC density among the forest groups declined with the increase of soil depth, and the effect of forest types on variation of SOC density was gradually weakened with the increasing soil depth. From 1983 to 2009, SOC pool (0—80 cm soil depth) increases in Hunan's timber-forests with a net increase of 414.86×10<sup>6</sup> tC and the area weighted average of SOC density increased 10.98 tC/hm<sup>2</sup> in the studied timber-forested soils (0—80 cm soil depth) as well. The difference of SOC pool gradually increased with aged stands of timber-forests, mainly occurring in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests, Masson Pine (*Pinus massoniana*) forests and broad-leaved forests. Among the forest types, natural forest accounted for a large percentage (>50%) of the total SOC storage in Hunan's forests. But the proportion of SOC in plantation forests increased as the plantation areas gradually increased in the studied province. Economic-forests, shrub-forests and bamboo-forests made different contributions to the total SOC pool (0—80 cm soil depth) in Hunan's forests, depending upon planting areas, cultivate systems and management practices. The changes in SOC pool in studied forests were closely associated with the alteration of forested area, convention of forest types and land use changes. These changes in terms of forested area and forest type were related to the formation and implementation of forestry policies in local, province and national levels. Our study suggested that human activities would influence SOC pool in forest ecosystems in regional scale through altering forested area and forest types.

**Key Words:** Hu'nan Province; forest soil; forest type; organic carbon density; carbon pool

森林土壤有机碳库是森林生态系统碳库的重要组成部分,其储量占森林生态系统碳库储量的 2/3 以上,其微小变化将会影响全球碳平衡,导致全球气候变化。因此,开展森林土壤有机碳库储量的估算,是全球森林生态系统碳循环研究核心内容之一。至今,我国土壤有机碳库研究已取得了一些成果。全国尺度上,方精云等<sup>[1]</sup>、王绍强等<sup>[2]</sup>、潘根兴等<sup>[3]</sup>、解宪丽等<sup>[4]</sup>、Yang 等<sup>[5]</sup>分别对我国土壤有机碳库储量进行了估算,但结果差异在 50.0—185.7 PgC 之间;省域尺度上,黄从德等<sup>[6]</sup>、王新闯等<sup>[7]</sup>、魏亚伟等<sup>[8]</sup>分别对四川省、吉林省、东北林区森林土壤有机碳库进行了估算。结果表明,无论是全国尺度还是省域尺度上,由于森林土壤结构复杂,空间分布不均匀且变异性大,采样点相对不足,导致目前森林土壤有机碳库储量的估算结果仍存在很大的不确定性<sup>[2,9]</sup>,导致森林土壤每年向大气排放碳量的估计误差(10 PgC)大于工业排放总量(5.3 PgC)<sup>[10]</sup>。此外,对森林生态系统碳储量及其动态变化的研究主要集中在森林植被部分,对森林土壤有机碳库的研究相对不足<sup>[6-8]</sup>,且研究区域分布极不均匀。湖南省作为中国林业大省之一,位于长江中游,其森林碳汇功能将为中国应对全球气候变化作出重要贡献,但目前有关湖南省森林土壤有机碳库研究仍未见报道。本论文利用已有文献和著作资料中的湖南省森林土壤剖面有机碳含量数据资料以及湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站多年实测数据,结合湖南省森林资源清查数据,研究湖南省主要森林类型土壤有机碳含量、碳密度及其有机碳库储量的动态特征,为准确评估湖南省森林在中国森林生态系统碳循环中的地位以及人类经营管理

活动对湖南省森林土壤有机碳库的影响,为制定提高湖南省森林生态系统碳汇功能措施提供科学依据,也为我国森林生态系统碳循环研究提供基础数据,对于减缓大气 CO<sub>2</sub> 浓度持续升高具有重要的意义。

## 1 研究区域概况

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 km<sup>2</sup>,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 1292.32×10<sup>4</sup>hm<sup>2</sup>,有林地面积 1018.59×10<sup>4</sup>hm<sup>2</sup>,森林覆盖率达 57.13%,居于全国第 5 位,活立木总蓄积 4161.19 万 m<sup>3</sup>,活立木总生长量 300.43 万 m<sup>3</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 基础数据的来源、整理及补充

(1)湖南省森林资源清查数据:《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)》和《湖南省森林资源主要数据汇编(2003—2004年)》、《第八次全国森林资源清查湖南省森林资源清查成果(2009)》。为了充分利用湖南省森林资源清查数据和较准确地反映湖南省森林土壤碳储量、碳密度动态,依据湖南省林业厅资源林政处 3 次森林资源清查《湖南省森林资源主要数据汇编》中的主要数据,森林包括乔木林(不包括乔木经济林)、经济林和竹林 3 部分,为了便于归类和整理,将灌木林也列入本研究的研究范畴。因此,本研究将湖南省森林分为:乔木林、经济林、竹林、灌木林(或灌丛林),其中乔木林主要有:杉木林、松木林(包括马尾松林、云南松林、黄山松林等)、国外松林(主要为湿地松林)、柏木林、阔叶林(包括常绿阔叶林、落叶阔叶林、阔叶常绿落叶混交林、针阔混交林)、杨树林、三杉林(包括柳杉、落羽杉、水杉等)、桉树林。其中,杨树林、三杉林、桉树林以人工林为主,马尾松林有天然林和人工林,但以天然林为主。

(2)查阅已发表论文和出版著作,收集记载湖南省森林土壤剖面资料,包括土壤有机碳或有机质含量、容重、森林植被状况、地理位置等。根据土壤剖面资料采集的合理性<sup>[11]</sup>对文献资料进行筛选,得 2000—2014 年有效森林土壤样地剖面数 277 个<sup>[12-58]</sup>,并将其中土壤有机质含量(g/kg)乘以 Bemmelen 换算系数 0.58(指 <2 mm 的土壤颗粒有机质含碳量)<sup>[59]</sup>,转换为土壤有机碳含量(g/kg)。

(3)根据收集的森林土壤剖面文献数据分布状况、湖南省各地市州森林类型的分布特征,采用典型选样法,2008—2014 年在长沙、株洲、湘潭、益阳、永州、郴州、怀化、张家界的杉木林、马尾松林、湿地松林、柏木林、阔叶林、杨树林、桉树林、灌木林、经济林、毛竹林分别设置了 7、8、8、2、11、1、4、3、10、5 个(共 59 个)面积均为 20 m×20 m 的样地。每个样地随机挖取 3 个土壤剖面,均按 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60 cm 以下分层由下至上采集土壤,每个样地 3 个土壤剖面同一土层混合成 1 个土壤样品。同时用 200 cm<sup>3</sup>的环刀测定其容重,用重铬酸钾-水合加热法测定土壤有机碳含量。

(4)估算湖南省森林土壤有机碳储量时,采用了 336 个森林样地土壤剖面有机碳含量数据,空间分布如图 1 所示。

(5)对文献中部分样地土壤剖面缺失土壤容重数据,通过分别建立湖南省各森林类型土壤有机碳含量与其土壤容重相关回归方程(表 1)估算得出。此外,由于三杉林样地土壤剖面数据不多,其土壤有机碳含量与土壤容重的相关回归方程未达到显著水平,因此三杉林缺失的土壤容重数据采用杉木林土壤容重与土壤有机碳含量的回归方程进行估算。

(6)在收集到的文献数据中,多数研究者将土壤层次分为 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60 cm 以下



图1 各森林样地土壤剖面的空间分布图

Fig.1 The spatial distribution map of soil profile in different forest plots

表1 不同森林类型土壤有机碳含量与土壤容重回归方程

Table 1 The regression equation between contents of soil organic carbon and soil volume weights in different forests

森林类型 Forest types	土壤容重( $y, g/cm^3$ )-土壤有机碳含量 ( $x, g/kg$ ) 回归方程 The regression equation between soil volume weights and soil organic carbon contents	相关系数 Correlation coefficient( $r$ ), 样本数 Sample number( $n$ ), 显著水平 Significance level( $P$ )
杉木林 China fir forest	$y = 1.3726e^{-0.0048x}$	$r = 0.5776, n = 112, P < 0.001$
马尾松林 Masson pine forest	$y = 1.4382e^{-0.0085x}$	$r = 0.6472, n = 95, P < 0.001$
湿地松林 Slash pine plantation	$y = 1.4439e^{-0.0101x}$	$r = 0.5182, n = 53, P < 0.001$
柏木林 Cypress forest	$y = -0.021x + 1.7135$	$r = 0.6628, n = 14, P < 0.01$
阔叶林 Broad-leaved forest	$y = 1.4206e^{-0.0068x}$	$r = 0.6508, n = 171, P < 0.001$
杨树林 Poplar forest	$y = 1.6768e^{-0.0186x}$	$r = 0.8104, n = 21, P < 0.001$
经济林 Economic forest	$y = 1.4761e^{-0.0081x}$	$r = 0.4139, n = 79, P < 0.001$
灌木林 Shrub forest	$y = 1.5006e^{-0.0091x}$	$r = 0.8514, n = 78, P < 0.001$
毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i> forest	$y = -0.014x + 1.4079$	$r = 0.5968, n = 44, P < 0.001$

4 个层次,而一些文献中虽然给出了分层土壤有机质(或碳)数据,但对土壤分层有的是以 10 cm、15 cm 或 30 cm 进行划分,为了能有效利用这些数据,采用权重土壤有机碳含量的方法<sup>[60]</sup>将计算结果转化为 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 土层。

## 2.2 各森林类型土壤有机碳密度、碳储量的估算方法

由于已有文献中更深层次土壤数据不多,中国土壤剖面平均厚度为 87cm<sup>[2]</sup>,虽然有些研究给出了更深层次的土壤有机碳含量数据,但本研究中没有包括,仅估算了各森林类型 0—80 cm 土壤层有机碳密度及其碳库储量。

根据各森林类型各土层有机碳含量、土层厚度及其容重,计算出各森林类型土壤层(0—80 cm)有机碳密度( $\text{tC}/\text{hm}^2$ ):

$$\text{TSOC}_i = \sum_{j=1}^m \text{SOC}_{ij} \times \gamma_{ij} \times H_{ij} \times 10^{-1} \quad (1)$$

式中, $\text{TSOC}_i$ 为*i*类森林土壤层(0—80 cm)平均有机碳密度( $\text{tC}/\text{hm}^2$ ), $\text{SOC}_{ij}$ 为*i*类森林*j*土层有机碳含量( $\text{g}/\text{kg}$ ), $\gamma_{ij}$ 为*i*类森林*j*土层容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), $H_{ij}$ 为*i*类森林*j*土层厚度(cm),*m*为*i*类森林土壤剖面土层数(本研究中, $H_{ij}$ 取 20 cm,*m*取 4 层)。

根据各森林类型土壤层(0—80 cm)平均有机碳密度( $\text{tC}/\text{hm}^2$ )及其分布面积( $\text{hm}^2$ )估算出各森林类型土壤层(0—80 cm)有机碳库储量:

$$\text{PSOC}_i = A_i \times \text{TSOC}_i \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中, $\text{PSOC}_i$ 为*i*类森林土壤层(0—80 cm)有机碳储量( $\times 10^6 \text{ tC}$ ), $\text{TSOC}_i$ 为*i*类森林土壤层(0—80 cm)有机碳密度( $\text{tC}/\text{hm}^2$ ), $A_i$ 为*i*类森林的分布面积( $\text{hm}^2$ )。

各森林类型土壤层(0—80 cm)有机碳储量之和即为湖南省森林土壤层(0—80 cm)有机碳库总储量( $\times 10^6 \text{ tC}$ )。

## 2.3 数据处理与分析

应用 Excel、SPSS (Statistical Package for Social Science) 10.0 软件包中的单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同森林土壤有机碳含量、碳密度的差异,计算平均值和标准差,用 Tukey-Kramer 多重检验法检验各森林类型之间、土层之间的差异显著性( $P < 0.05$ ),Person 相关性分析等方法进行数据统计分析与处理。采用柯尔莫洛夫-斯米诺夫检验(K-S 检验)进行土壤有机碳含量的正态性分布检验,显著性水平  $\alpha = 0.05$ ,若  $P > 0.05$ ,则认为数据服从正态分布。用 Excel 软件作图。

## 3 结果与分析

### 3.1 森林土壤有机碳含量及其垂直分布特征

从表 2 可以看出,湖南省主要森林类型土壤有机碳算术平均含量在 9.53—22.86  $\text{g}/\text{kg}$  之间,其中,灌木林最高,其次是三杉林(21.57  $\text{g}/\text{kg}$ )、毛竹林(19.56  $\text{g}/\text{kg}$ )和阔叶林(18.63  $\text{g}/\text{kg}$ ),而杉木林、马尾松林、湿地松林、杨树林、桉树林、经济林较低,湿地松林、柏木林最低,且灌木林、三杉林、毛竹林、阔叶林与杉木林、马尾松林、湿地松林、柏木林、杨树林、桉树林、经济林之间的差异达到显著水平( $P < 0.05$ ),杉木林与湿地松林、柏木林、杨树林之间差异显著( $P < 0.05$ ),与马尾松林、桉树林、经济林差异不显著( $P > 0.05$ )。各土层有机碳含量变化范围在 5.22—52.44  $\text{g}/\text{kg}$  之间,除杨树林外,各森林土壤有机碳含量均随着土层深度的增加呈显著的指数下降( $P < 0.05$ ),表土层(0—20 cm)有机碳含量是 20—40 cm 土层的 1.19—3.31 倍,是 60 cm 以下土层的 1.05—5.82 倍,且除杨树林、桉树林、经济林外,其它 8 种森林表土层与 20—40 cm 土层、40—60 cm 土层的差异达到显著水平( $P < 0.05$ )。各森林类型土壤表层(0—20 cm)有机碳含量标准差( $\sigma$ )最高,其次是亚表层(20—40 cm),随土壤深度增加,标准差( $\sigma$ )逐渐下降,表明各森林类型表土层(0—20 cm)有机碳含量的差异最明显,其次是亚表层(20—40 cm)。

表 2 湖南省主要森林类型土壤有机碳含量(平均值±标准差)/(g/kg)

Table 2 Soil organic carbon content in main forest types in Hunan Province (mean±standard deviation)/(g/kg)

森林类型 Forest types	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	>60 cm	算术平均值 Arithmetic mean
杉木林 China fir forest	25.04±11.83(49)abA	13.76±5.82(49)ab	8.50±3.80(43)abC	5.76±2.81(31)aC	14.42±5.22a
马尾松林 Masson pine forest	22.79±12.47(47)acA	12.12±4.06(45)acB	8.75±3.61(38)abC	6.45±3.96(34)aC	13.09±5.01ac
湿地松林 Slash pine plantation	16.26±5.08(18)cdA	8.80±2.86(18)cb	6.25±2.72(17)ab	5.86±2.18(14)ab	9.53±2.21c
柏木林 Cypress forest	15.51±4.66(7)cdA	9.41±1.54(7)cb	5.93±0.18(4)ab	5.22±0.68(4)ab	9.54±0.96c
阔叶林 Broad-leaved forest	29.07±20.50(73)ba	18.41±13.26(73)bb	12.81±9.34(69)ac	11.31±7.38(45)abC	18.63±11.91b
杨树林 Poplar forest	12.98±6.47(10)da	10.08±6.38(10)acA	11.17±8.25(7)aA	12.33±8.81(6)ba	10.81±6.02c
桉树林 Eucalyptus forest	17.76±2.00(4)ca	13.80±1.98(4)aAB	11.14±2.05(4)aAB	9.25±2.75(4)abB	12.98±1.24ac
柳杉、落羽杉、水杉林 Tsuga, Taxodium distichum, Keteleeria etc.	52.44±15.38(5)eA	15.82±8.67(5)abB	9.01±3.09(5)ab	9.01±3.09(5)abB	21.57±6.12b
经济林 Economic forest	15.80±9.18(76)cdA	13.23±7.40(70)aAB	13.09±8.26(69)abAB	6.88±2.78(16)ab	13.40±7.20ac
灌木林 Shrub forest	34.97±22.17(31)fa	21.85±17.06(31)bb	16.35±16.29(30)bbC	9.09±8.59(21)abC	22.86±17.34b
毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i> forest	27.64±8.16(16)abA	18.82±5.20(15)bb	13.10±5.27(13)abBC	10.57±3.74(5)abC	19.56±5.10b
算术平均值 Arithmetic mean	23.55±15.94A	15.00±10.00B	11.50±8.67B	8.21±5.83B	15.35±9.51

括号内的数据为土壤样本数,不同小写字母表示同一土层不同森林类型差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示同一森林不同土层差异显著( $P<0.05$ )

标准差( $\sigma$ )表征着变量的绝对变异程度,决定变量频率分布分散程度, $\sigma$ 越大,频率分布越分散,反之,频率分布越集中。表 2 和图 2 显示,阔叶林、灌木林表土层(0—20 cm)有机碳含量的 $\sigma$ 高于杉木林、马尾松林,明显高于湿地松林、经济林、毛竹林,其频率分布最为分散,有机碳含量主要分布在 10—70 g/kg 之间,分布频率为 88.15%—90%之间,杉木林、马尾松林较为集中,主要分布在 10—50 g/kg 之间,分布频率为 85.42%—95.92%之间,而湿地松林、经济林、毛竹林频率分布最为集中,湿地松林、经济林主要分布在 30 g/kg 以下,分布频率分别为 89.89%,100%,毛竹林主要分布在 10—50 g/kg 之间,分布频率为 100%。正态性分布检验(K-S 检验)结果表明,各森林类型表土层(0—20 cm)有机碳含量均不符合正态分布( $P<0.05$ )。

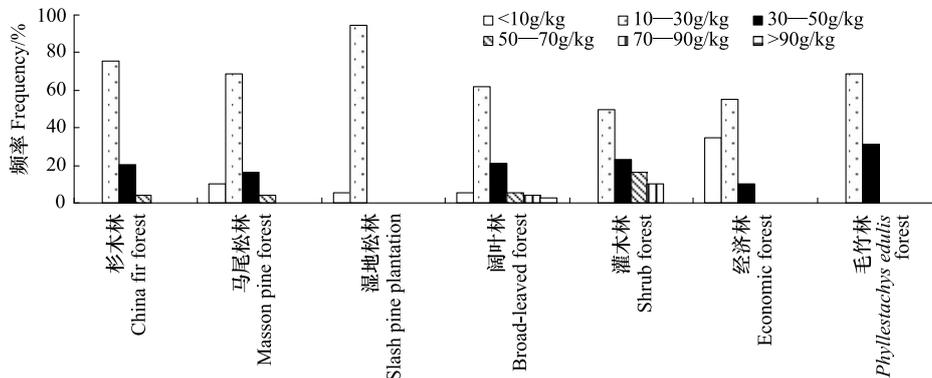


图 2 不同森林类型 0—20 cm 土壤层有机碳含量频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of soil organic carbon content in 0—20 cm under different forests

由于柏木林、杨树林、桉树林、三杉林 4 种森林类型土壤剖面数少,对其 0—20 cm 土壤层有机碳含量进行频率分布统计意义不大,因此在图中没有该 4 种森林 0—20 cm 土壤层有机碳含量频率分布

由表 2 和图 3 可知,湖南省森林表土层(0—20 cm)有机碳含量的 $\sigma$ 最高,其频率分布最为分散,主要分布在 50 g/kg 以下,分布频率为 93.14%,20—40 cm 土层及以下各土层有机碳含量主要分布在 30 g/kg 以下,随土层深度的增加,频率分布越趋于集中,分布频率也逐渐提高。

### 3.2 湖南省森林土壤有机碳密度及其垂直分布特征

如图 4 所示,湖南省主要森林类型 0—80 cm 土壤层有机碳密度变化范围在 95.44—181.30 tC/hm<sup>2</sup>之间,

平均为  $137.15 \text{ tC}/\text{hm}^2$ 。不同森林类型土壤层(0—80 cm)有机碳密度差异明显(变异系数为 18.97%),其中,灌木林最高,其次是阔叶林、三杉林、毛竹林,湿地松林最低,湖南省 11 种森林类型土壤有机碳密度可划分为 3 个等级:灌木林、阔叶林、三杉林、毛竹林高碳密度,在  $150 \text{ tC}/\text{hm}^2$  以上,杉木林、马尾松林、柏木林、桉树林、经济林为中碳密度,介于  $120\text{—}150 \text{ tC}/\text{hm}^2$  之间,而湿地松林、杨树林为低碳密度,在  $95\text{—}120 \text{ tC}/\text{hm}^2$  之间,表明湖南省森林土壤层(0—80 cm)有机碳密度差异较大,受森林类型影响明显。

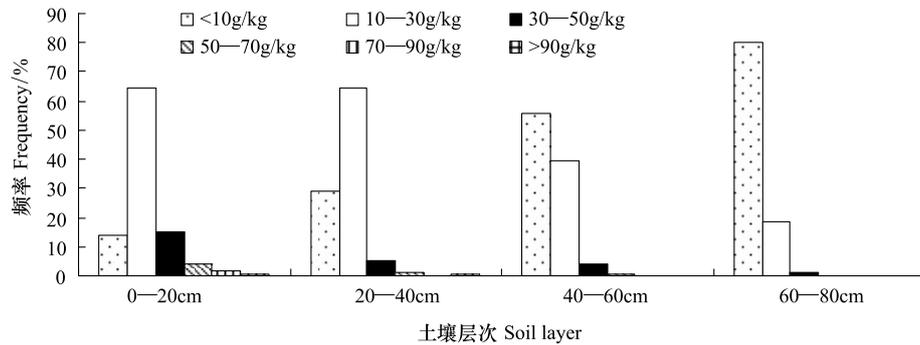


图3 湖南省森林各土层有机碳含量频率分布

Fig.3 Frequency distribution of organic carbon content in different forest soil layer in Hunan Province

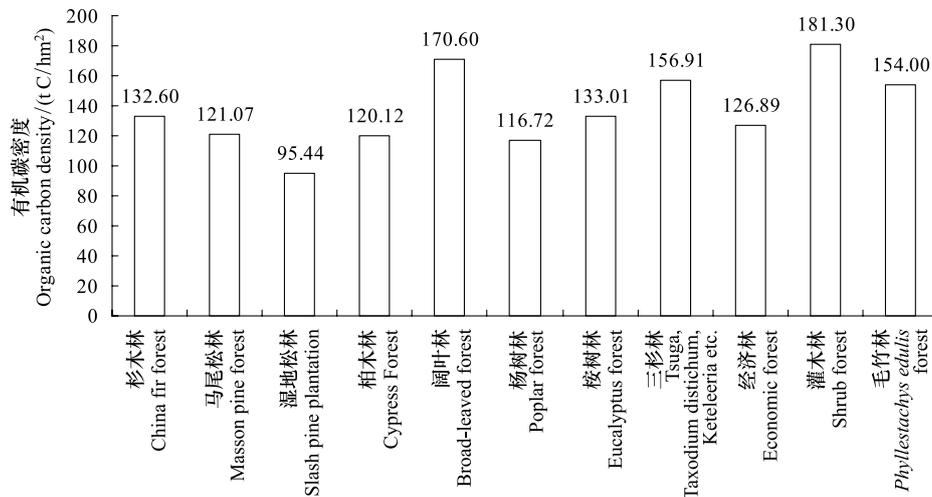


图4 湖南省主要森林类型0—80cm土壤层有机碳密度

Fig.4 Soil organic carbon density in 0—80cm soil layer of main forest types in Hunan Province

湖南省各森林类型(除杨树林外)土壤有机碳密度均随土壤深度的增加而下降,0—20 cm 土层最高,介于  $32.98\text{—}98.74 \text{ tC}/\text{hm}^2$  之间,占 0—80 cm 土层有机碳密度的 28.25%—64.07%,不同森林类型差异显著( $P < 0.05$ ),三杉林最高,其次是阔叶林、灌木林,杨树林最低;20—40 cm 土层介于  $23.19\text{—}49.14 \text{ tC}/\text{hm}^2$  之间,占 0—80 cm 土层有机碳密度的 15.40%—27.22%,不同森林类型差异也显著( $P < 0.05$ ),以灌木林最高,湿地松林最低;40—60 cm 土层在  $16.62\text{—}38.84 \text{ tC}/\text{hm}^2$  之间,占 0—80 cm 土层有机碳密度的 10.27%—25.73%,不同森林类型差异不显著( $P > 0.05$ ),60 cm 以下土层介于  $14.97\text{—}28.29 \text{ tC}/\text{hm}^2$  之间,占 0—80 cm 土层有机碳密度的 10.27%—25.50%,不同森林类型差异不显著( $P > 0.05$ )。表明森林土壤有机碳主要分布在 0—40 cm 土层中,随土壤深度的增加,各森林类型土壤有机碳密度的差异下降,受森林类型的影响逐渐减弱(图 5)。

### 3.3 湖南省乔木林土壤有机碳储量、碳密度的动态

从表 3 可以看出,4 个清查期中,湖南省乔木林土壤层(0—80 cm)有机碳库储量随乔木林面积增加而增加,由 1983—1987 年的  $641.79 \times 10^6 \text{ tC}$  增加到 2009 年的  $1056.65 \times 10^6 \text{ tC}$ ,净增加了  $414.86 \times 10^6 \text{ tC}$ ,年平均增长

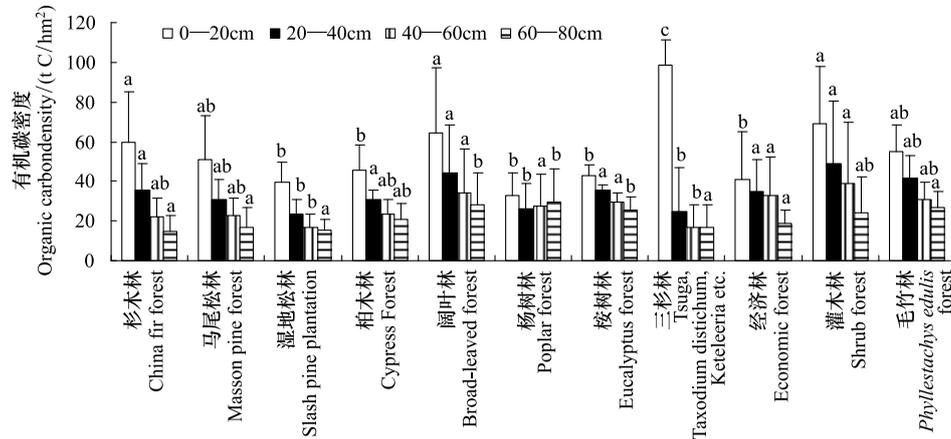


图5 不同森林类型土壤各层 20 cm 厚度的平均有机碳密度

Fig.5 Mean soil organic carbon density in 20 cm soil layer of different forest types

图中不同字母表示同一土层不同森林类型差异显著 ( $P < 0.05$ )

约为  $18.86 \times 10^6 \text{ tC}$ ; 土壤层 (0—80 cm) 面积加权平均有机碳密度也从 1983—1987 年的  $133.49 \text{ tC/hm}^2$  提高到 2009 年的  $144.47 \text{ tC/hm}^2$ , 提高了  $10.98 \text{ tC/hm}^2$ , 年平均提高了  $0.50 \text{ tC/hm}^2$ 。表明湖南省乔木林土壤层碳汇功能不仅随着其面积增加逐渐增大, 而且单位面积乔木林土壤层的储碳能力也在不断提高。

### 3.3.1 不同乔木林类型土壤有机碳储量的动态

同一清查期, 不同乔木林土壤层 (0—80 cm) 有机碳储量差异明显, 1983—1987 年到 2009 年 4 个清查期, 最高林分与最低林分之差分别为  $260.23 \times 10^6 \text{ tC}$ 、 $293.05 \times 10^6 \text{ tC}$ 、 $427.76 \times 10^6 \text{ tC}$ 、 $523.07 \times 10^6 \text{ tC}$ , 不同乔木林之间的差异随着时间进程逐渐增大, 但均主要分布在杉木林、松木林、阔叶林, 三者土壤层 (0—80 cm) 有机碳储量之和分别占湖南省同期乔木林土壤层 (0—80 cm) 有机碳总储量的 95.61%—98.93%, 表明杉木林、松木林、阔叶林在湖南省乔木林土壤有机碳库储量中占有极其重要的地位, 它们土壤层有机碳储量的动态变化将极大地影响湖南省乔木林土壤层有机碳库储量 (表 3)。

从 1983—1987 年到 2009 年, 各乔木林土壤层 (0—80 cm) 有机碳储量呈现出不同的变化趋势, 阔叶林呈显著的上升趋势, 净增加了  $389.00 \times 10^6 \text{ tC}$ , 杉木林、柏木林先上升, 再下降, 但总体上呈上升趋势, 分别净增加了  $38.45 \times 10^6 \text{ tC}$ 、 $1.22 \times 10^6 \text{ tC}$ , 而松木林也是先上升, 再下降, 总体上呈下降趋势, 净减少了  $51.96 \times 10^6 \text{ tC}$ , 国外松林、杨树林、三杉林、桉树林变化不大 (表 3)。表明随着森林植被恢复, 阔叶林在湖南省乔木林土壤层碳汇功能中扮演着越来越重要的角色。

### 3.3.2 不同起源乔木林土壤有机碳储量、碳密度的动态

在 4 个森林资源清查期中, 天然林土壤层 (0—80 cm) 有机碳储量均高于同期的人工林, 随着时间的变化, 天然林、人工林土壤层有机碳储量均随其面积增加而显著增加, 且两者之间的差异基本稳定, 但天然林土壤层 (0—80 cm) 有机碳储量占湖南省同期乔木林土壤层有机碳储量的比例呈下降趋势 (分别为 67.41%、63.61%、51.72%、60.39%), 人工林所占比例总体上呈上升趋势 (分别为 32.59%、36.39%、49.28%、39.61%); 在研究期间, 天然林土壤层 (0—80 cm) 有机碳汇为  $205.45 \times 10^6 \text{ tC}$ , 占全省乔木林土壤层有机碳汇的 49.52%, 人工林为  $209.42 \times 10^6 \text{ tC}$ , 占全省乔木林土壤层有机碳汇的 50.48%, 天然林土壤层 (0—80 cm) 面积加权平均有机碳密度均高于同期人工林土壤面积加权平均有机碳密度, 且随着时间进程逐渐提高, 而人工林变化不明显 (表 4)。表明目前天然林是湖南省乔木林土壤层有机碳库储量的主要贡献者, 且单位面积林分土壤固碳能力持续提高, 人工林土壤层有机碳储量随其面积的增加正逐步提高。

表 3 湖南省不同时期各乔木林分类型土壤层(0—80cm)有机碳储量、碳密度

Table 3 Carbon stock in(0—80cm)soil layer of arbor forests in different period in Hunan Province

乔木林类型 Arbor forest types	1983—1987			1990—1995		
	面积 Area/ ( $\times 10^4 \text{hm}^2$ )	碳储量 Carbon storage/ ( $\times 10^6 \text{tC}$ )	碳密度 Carbon density/ ( $\text{tC}/\text{hm}^2$ )	面积 Area/ ( $\times 10^4 \text{hm}^2$ )	碳储量 Carbon storage/ ( $\times 10^6 \text{tC}$ )	碳密度 Carbon density/ ( $\text{tC}/\text{hm}^2$ )
杉木林 China fir forest	174.04	230.78		219.29	290.78	
马尾松林 Masson pine forest	220.61	267.09		243.20	294.44	
阔叶林 Broad-leaved forest	80.34	137.06		128.68	219.53	
柏木林 Cypress forest	5.72	6.86		9.47	11.37	
国外松林 Slash pine plantation	—	—		23.07	22.02	
杨树林 Poplar forest	—	—		1.21	1.40	
三杉林 Tsuga, Taxodium distichum, Keteleeria etc.	—	—		1.34	2.17	
合计 Total	480.70	641.79	133.49	626.26	841.73	134.41

乔木林类型 Arbor forest types	2003—2004			2009		
	面积 Area/ ( $\times 10^4 \text{hm}^2$ )	碳储量 Carbon storage/ ( $\times 10^6 \text{tC}$ )	碳密度 Carbon density/ ( $\text{tC}/\text{hm}^2$ )	面积 Area/ ( $\times 10^4 \text{hm}^2$ )	碳储量 Carbon storage/ ( $\times 10^6 \text{tC}$ )	碳密度 Carbon density/ ( $\text{tC}/\text{hm}^2$ )
杉木林 China fir forest	267.06	354.12		203.04	269.23	
马尾松林 Masson pine forest	232.26	281.19		177.70	215.14	
阔叶林 Broad-leaved forest	251.37	428.84		308.36	526.06	
柏木林 Cypress forest	10.93	13.31		6.73	8.08	
国外松林 Slash pine plantation	23.12	22.06		23.70	22.62	
杨树林 Poplar forest	6.96	8.12		6.72	7.84	
三杉林 Tsuga, Taxodium distichum, Keteleeria etc.	0.67	1.08		2.89	4.68	
桉树林 Eucalyptus forest	1.34	1.79		2.25	2.99	
合计 Total	793.70	1108.54	139.67	731.39	1056.65	144.47

表 4 不同时期人工林和天然林土壤层(0—80 cm)有机碳储量、碳密度

Table 4 Carbon stock and density in(0—80 cm)soil layer of artificial forest and natural forests in different period

调查时间 Inventory time	起源 Origin	面积 Area/ $10^4 \text{hm}^2$	碳储量 Carbon storage/ $10^6 \text{tC}$					碳密度 Carbon density/ ( $\text{tC}/\text{hm}^2$ )
			0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	合计 Total	
1983—1987	人工林	158.66	92.31	55.16	36.47	25.27	209.22	131.87
	天然林	322.05	178.25	111.71	81.51	61.13	432.61	134.33
1990—1995	人工林	238.89	135.28	80.12	53.13	37.86	306.38	128.25
	天然林	387.37	217.58	138.21	101.86	77.73	535.38	138.21
2003—2004	人工林	425.41	237.63	143.00	97.42	70.10	546.32	128.85
	天然林	368.28	219.44	145.26	109.73	87.80	562.22	152.66
2009	人工林	315.42	178.68	108.64	75.27	56.04	418.64	132.72
	天然林	415.97	249.79	165.00	124.15	99.11	638.06	153.39

### 3.4 湖南省经济林、毛竹林、灌木林土壤有机碳储量的动态

从表 5 可以看出,竹林、灌木林土壤层(0—80 cm)有机碳储量从 1983—1987 年到 2003—2004 年逐渐增加,2009 年均有所下降,但从 1983—1987 年到 2009 年均表现净增加,净增加量分别为  $32.14 \times 10^6 \text{tC}$  和  $38.51 \times 10^6 \text{tC}$ ,而经济林的变化趋势与竹林、灌木林恰好相反,表现为净减少,减少了  $94.68 \times 10^6 \text{tC}$ ,这与经济林、竹林、灌木林面积随时间增减密切相关。

### 3.5 湖南省森林土壤有机碳储量、碳密度的动态

湖南省森林土壤层(0—80 cm)有机碳储量随着森林面积的增加,从 1983—1987 年的  $1177.83 \times 10^6 \text{tC}$  增加

到 2009 年的  $1568.66 \times 10^6 \text{tC}$ , 增加了  $390.83 \times 10^6 \text{tC}$ , 年均递增约  $17.77 \times 10^6 \text{tC}$ 。土壤有机碳密度从 1983—1987 年的  $138.60 \text{ tC}/\text{hm}^2$  提高到 2009 年的  $146.88 \text{ tC}/\text{hm}^2$ , 提高了  $8.28 \text{ tC}/\text{hm}^2$ , 年均增加  $0.38 \text{ tC}/\text{hm}^2$  (表 5), 表明湖南省森林土壤层有机碳储量不仅随着森林面积增加而增加, 而且单位面积森林土壤的储碳能力也不断提高, 这与各类森林面积、土壤层有机碳密度随时间变化有关。

同一清查期, 不同森林土壤层 (0—80 cm) 有机碳储量差异显著, 且随着时间推移, 差异程度逐渐增大, 且变化趋势也不同。4 个森林资源清查期, 乔木林面积最大, 占总面积的 56.56%—68.48%, 且随着时间的推移, 乔木林面积增加量最大, 因此乔木林土壤层有机碳储量最高, 占湖南省同期森林土壤层 (0—80 cm) 有机碳总储量的 54.49%—67.36%, 呈逐渐上升趋势, 净增加量也最大, 而经济林面积呈下降趋势, 其土壤层有机碳储量占湖南省同期森林土壤层 (0—80 cm) 有机碳总储量的百分比逐渐下降, 从 23.29% 下降为 11.45% (表 5)。

表 5 不同时期森林土壤层有机碳储量、碳密度

Table 5 Carbon stock of 0—80cm soil layer in the main forests stands in different period

森林类型 Forest types	1983—1987			1990—1995		
	面积 Area/ $10^4 \text{hm}^2$	碳储量 Carbon storage/ $10^6 \text{tC}$	碳密度 Carbon density/ ( $\text{tC}/\text{hm}^2$ )	面积 Area/ $10^4 \text{hm}^2$	碳储量 Carbon storage/ $10^6 \text{tC}$	碳密度 Carbon density/ ( $\text{tC}/\text{hm}^2$ )
乔木林 Arbor forest types	480.70	641.79		626.26	841.54	
经济林 Economic forest	216.18	274.31		199.52	253.17	
竹林 bamboo forest	56.96	87.72		65.02	100.13	
灌木林 Shrub forest	95.98	174.01		162.98	295.48	
合计 Total	849.82	1177.83	138.60	1053.78	1490.32	141.43
森林类型 Forest types	2003—2004			2009		
	面积 Area/ $10^4 \text{hm}^2$	碳储量 Carbon storage/ $10^6 \text{tC}$	碳密度 Carbon density/ ( $\text{tC}/\text{hm}^2$ )	面积 Area/ $10^4 \text{hm}^2$	碳储量 Carbon storage/ $10^6 \text{tC}$	碳密度 Carbon density/ ( $\text{tC}/\text{hm}^2$ )
乔木林 Arbor forest types	793.70	1108.54		731.39	1056.65	
经济林 Economic forest	126.04	159.93		141.56	179.63	
竹林 bamboo forest	82.93	127.71		77.83	119.86	
灌木林 Shrub forest	277.35	502.84		117.22	212.52	
合计 Total	1280.02	1899.03	148.36	1068.00	1568.66	146.88

## 4 结论与讨论

### 4.1 森林土壤有机碳含量及其垂直分布

森林土壤有机碳含量直接取决于森林凋落物的输入及其分解, 二者与水、热条件紧密相关, 因此森林土壤有机碳含量不仅与森林类型关系密切, 还受制于当地的气候条件。此外, 研究发现, 在没有人为干扰情况下, 森林类型或树种组成对土壤有机碳的固存潜力起决定作用<sup>[61]</sup>, 但与森林类型或树种组成等生物因素相比, 人为干扰在土壤有机碳的积累过程中扮演着更重要的角色<sup>[62]</sup>, 天然林转变为次生林和人工林以后, 土壤有机碳含量显著降低, 对土地利用方式的变化或森林类型转变具有较好的指示作用<sup>[63]</sup>。湖南省主要森林类型土壤层 (0—80 cm) 有机碳算术平均含量介于 9.53—22.86 g/kg 之间, 灌木林、三杉林、毛竹林、阔叶林显著高于其他 7 种森林类型, 杉木林也显著高于湿地松林、柏木林和杨树林, 但灌木林、三杉林、毛竹林、阔叶林两两之间, 杉木林、马尾松林、桉树林、经济林两两之间差异均不显著。原因可能是: 杉木林、马尾松林、湿地松林、柏木林、杨树林、桉树林、经济林等主要为人工林, 人为干扰相对较多, 因此, 其土壤有机碳含量明显低于人为干扰相对较少的灌木林、阔叶林; 毛竹林特有的地下鞭系统生物量大, 每年都有大量老鞭死亡、腐烂, 从而补充了土壤碳库, 使土壤有机碳含量较高; 三杉林虽以人工林为主, 但主要分布在常德、益阳、岳阳洞庭湖防浪林区和南岳衡山高海拔地区, 不仅人为干扰很少, 且多为近成熟林和成熟林, 土壤水分含量高、林内湿度大, 枯枝落叶分

解缓慢,有利于土壤有机碳的积累,也使土壤有机碳含量较高。表明湖南省森林土壤有机碳平均含量不仅与森林类型有关,还与人为干扰状况、当地水热条件有关。此外,各种土壤类型的不同亚类土壤有机碳含量并不均一,由于缺少各个亚类所占森林面积的权重,因此本研究中,森林土壤有机碳含量仅仅是一种算术平均值,但仍然能反映出湖南省当前森林土壤有机碳含量的基本规律。

地表枯枝落叶和林木根系分解所形成的有机碳首先进入土壤表层,从而使得森林表层土壤有机碳含量明显高于深层土壤,且随着土壤深度增加而逐渐下降。Jobbágy 研究指出,植物根系的分布直接影响土壤中有有机碳的垂直分布,因为大量死根的腐解归还为土壤提供了丰富的碳源<sup>[64]</sup>。此外,森林类型、人为干扰活动对林地土壤的影响也主要发生在林木根系主要分布的 0—40 cm 土壤层,即使同一森林类型,不同地区人为干扰活动及局部水、热条件的差异,也会导致森林表层土壤特性的差异。本研究中,各森林类型(除杨树林外)土壤有机碳含量随着土层深度的增加呈显著的指数下降趋势,同一森林类型或不同森林类型土壤表层(0—20cm)有机碳含量的差异最大,其次是亚表层(20—40cm),表明湖南省森林土壤有机碳含量的分异主要发生在表层土壤(0—40cm),与已有研究结果<sup>[65-66]</sup>基本一致。

森林类型或树种组成不仅直接影响凋落物的产量和质量,也间接地影响土壤微生物活动的微环境<sup>[67]</sup>,是影响土壤有机碳库的重要因素<sup>[68]</sup>。本研究中,阔叶林、灌木林表层土壤(0—20cm)有机碳含量频率分布最为分散,表明不同阔叶林之间,灌木林之间表层土壤(0—20cm)有机碳含量差异较大,是由于阔叶林、灌木林组成树种复杂多样,因此其土壤有机碳含量的差异除了来自人为干扰活动和局部地区水、热条件的差异外,还可能来自于不同地区或同一地区的阔叶林、灌木林树种组成的差异。相反,即使在不同地区,杉木林、马尾松林、毛竹林、经济林、湿地松林组成树种单一且相同或相似,其土壤有机碳含量的差异主要来自于人为干扰和局部地区水、热条件的差异,因此频率分布相对集中,差异相对较小。总之,森林土壤有机碳含量受多方面因素的综合影响,某一时段的森林土壤有机碳含量是森林植物光合、凋落量、凋落物分解和土壤有机质矿化分解共同作用的结果。因此,本研究结果表明森林土壤有机碳含量及其垂直分布特征并不是绝对的,仅适用于表征湖南省森林土壤的区域状况,局部反映湖南省森林土壤有机碳格局及其影响因子。

#### 4.2 森林土壤有机碳密度及其垂直分布

湖南省主要森林类型 0—80 cm 土壤层有机碳密度在 95.44—181.30 tC/hm<sup>2</sup>之间,处于中国森林土壤有机碳密度的变化范围(44—264 tC/hm<sup>2</sup>)<sup>[65]</sup>内。湖南省各森林类型 0—80 cm 土壤层有机碳密度均分别高于江西省、广州、浙江省同种森林 0—100 cm 土壤层有机碳密度<sup>[69-71]</sup>。湖南省主要森林类型 0—80 cm 土壤层平均值(137.15 tC/hm<sup>2</sup>)高于中国土壤层(79 cm)平均碳密度(108.3 tC/hm<sup>2</sup>)<sup>[2]</sup>,高于解宪丽等估算的中国森林土壤层(100 cm)平均有机碳密度(115.9 tC/hm<sup>2</sup>)<sup>[4]</sup>和刘世荣等总结国内近十几年文献得出的中国森林土壤层平均有机碳密度(107.8 tC/hm<sup>2</sup>)<sup>[65]</sup>,明显高于江西省森林土壤(0—100 cm)面积加权平均有机碳密度(102.1 tC/hm<sup>2</sup>)<sup>[72]</sup>,表明湖南省森林土壤层有机碳密度较高,是我国森林生态系统中重要的土壤碳库。

森林土壤有机碳库的大小取决于森林凋落物的分解输入和土壤本身呼吸作用的输出<sup>[68]</sup>,在气候条件相同或相似的情况下,森林类型对凋落物的产量和分解速率均有显著影响,进而造成不同森林类型间土壤有机碳密度的较大差异<sup>[72-75]</sup>。本研究中,不同森林类型土壤层(0—80 cm)有机碳密度的变化趋势与其土壤有机碳算术平均含量的变化趋势相似,差异明显,以灌木林最高,其次是阔叶林、三杉林、毛竹林,最低是湿地松林、柏木林。表明湖南省森林土壤层有机碳密度与土壤有机碳含量关系密切,均受森林类型、人为干扰的影响明显,单位面积灌木林、阔叶林、三杉林、毛竹林固碳能力高于其它森林类型。

研究表明,土壤有机碳密度随土层深度的变化主要取决于土壤有机碳含量和土壤容重<sup>[76]</sup>,分布于水热条件较好的地区,土壤有机质受高温高湿影响分解较快,表层土壤有机质积累不明显<sup>[77]</sup>。本研究中,湖南省各森林类型(除杨树林外)土壤有机碳密度均随土壤深度的增加而下降,与已有的研究结果基本一致<sup>[6,8]</sup>。而尽管杨树林与三杉林一样,主要分布在湘北洞庭湖平原区,但杨树林是一种短轮伐期速生林,人为干扰较多,大多为幼龄林和中龄林,且枯枝落叶易于分解,表层土壤有机碳含量与其它各土层有机碳无明显差异,且 20—

40 cm 土层有机碳含量最低(表 3 和图 4)。因此杨树林土壤有机碳密度的垂直分布与其它森林类型有所不同。

### 4.3 湖南省森林土壤有机碳储量、有机碳密度的动态

从 1983—1987 年到 2009 年,湖南省乔木林土壤层(0—80 cm)有机碳库储量逐渐增大,单位面积乔木林土壤层的储碳能力也不断提高。究其原因发现:随着时间进程,湖南省乔木林不仅总面积发生了变化,而且乔木林类型组成及其面积构成比例也发生了明显的变化,从 1983—1987 年到 2009 年 4 个清查期,湖南省乔木林面积增加了  $250.69 \times 10^4 \text{hm}^2$ ,土壤有机碳密度为中等水平的杉木林、松木林面积之和占全省乔木林总面积的比例呈下降趋势(分别为 82.10%、73.85%、62.91%、52.06%),下降了 30.04%,而土壤有机碳密度较高的阔叶林面积占全省乔木林总面积的比例呈上升趋势(分别为 16.71%、20.55%、31.67%、42.16%),提高了 25.45%,表明湖南省乔木林正由杉木林、松木林为绝对优势逐渐转变为由杉木林、松木林、阔叶林为优势的多种乔木林组成,提高了乔木林土壤有机碳库储量及其单位面积土壤储碳能力。可见,在现有乔木林面积不变情况下,可以通过调整乔木林面积构成比例,适当增加阔叶林的面积,以提高湖南省乔木林土壤有机碳库储量和固碳能力。

同一时期,不同乔木林土壤层(0—80 cm)有机碳储量差异明显,且随着时间进程差异明显增大。主要是由于:① 随时间推移,乔木林总面积增加,但各种乔木林面积增加量差异很大,原来面积大的林分增加量大,而面积小的林分增加量小,导致不同乔木林面积的差异增大,1983—1987 年,4 种乔木林面积最大与最小之差为  $214.90 \times 10^4 \text{hm}^2$ ,2009 年,8 种乔木林面积最大与最小之差增大为  $306.11 \times 10^4 \text{hm}^2$ ;② 尽管不同乔木林土壤层有机碳密度的差异远不如其面积的差异大,但不同乔木林土壤层(0—80 cm)有机碳密度差异明显,且面积小的林分,其土壤层有机碳密度也较低(图 3 和表 4)。因此,随着时间变化,不同乔木林土壤层有机碳储量的差异逐渐增大,主要是由于不同乔木林面积的差异随时间变化而增大所致。

自 20 世纪 70 年代末以来,中国实施了大规模的造林、再造林工程,人工林面积不断增加,并在固碳和改善生态环境方面发挥了重要的作用。本研究中,从 1983—1987 年到 2009 年期间,湖南省人工林持续发挥碳汇作用,约一半的乔木林土壤有机碳汇来自人工林(表 5),这归因于人工林面积的持续增加。1998 年起,中国开展天然林资源保护工程,天然林面积得以持续增加,因而使得天然林土壤有机碳库储量也增长显著。研究表明,在湘中丘陵区立地条件基本一致情况下,天然次生林(马尾松+石栎混交林、南酸枣落叶阔叶林、石栎+青冈常绿阔叶林)凋落物量、土壤层有机碳含量及其密度均显著高于地域相邻、年龄相近的杉木人工林<sup>[78-80]</sup>。原因可能是,人工林树种组成单一,凋落物量少,在造林前采用炼山、整地,清除地表生物有机残体及其它灌木、草本植物,造林后,进行除灌除草等抚育措施,以减少林木竞争和病虫害的发生,加快林木生长,导致林地土壤有机碳输入减少。而天然林或次生林由多种树种组成,凋落量较高,通常采用封山育林、适当补植方式促进林木生长,林地土壤有机碳输入量增加。本研究中,4 个清查期,天然林(包括天然次生林)土壤层有机碳密度均高于人工林,且随时间变化持续增加,表明我国天然林的恢复与保护工程在固碳和改善生态方面逐渐呈现出重要的作用。因此,除了通过造林、再造林工程增加森林面积外,保护和恢复现有天然林和次生林,促进其向顶极群落演替,减少人为干扰,提高森林的生产力,是提高整个森林土壤碳储量和土壤持续固碳的有效森林经营措施。

本研究中,各森林类型土壤层有机碳储量是由各类森林面积及其土壤层有机碳密度估算而得,因此,森林土壤层有机碳库储量的变化与各森林类型面积的变化密切相关,而各森林类型面积的增减,与各项林业政策的实施有关。可见,人类活动深刻影响森林土壤层有机碳库储量及其碳汇功能。当前森林土壤碳循环仍然是陆地生态系统碳循环研究中缺乏的部分,尤其对森林土壤有机碳动态变化的了解。本论文估算了湖南省 4 个清查期森林土壤层有机碳库储量,但仍存在不确定性及误差。主要原因是:① 土壤不仅具有复杂结构,且空间分布不均匀,土壤有机碳空间变异大,即使同一地区同一种乔木林分但林龄不同,其土壤有机碳含量不同,在计算森林土壤有机碳密度时,没有分地区、分林龄分别进行统计;② 森林土壤实测调查数据不够充分,分布不

均匀;③收集的文献土壤剖面数据中存在土壤实测深度不一,部分缺乏土壤容重数据。因此,应建立统一和标准的观测和采样方法,重视森林土壤碳库、碳通量和碳循环过程研究,注意空间和时间尺度、数据综合和集成等问题。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库 // 王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 109-128.
- [ 2 ] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. 地理研究, 1999, 18(4): 349-356.
- [ 3 ] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 代静玉, 周运超, 张平究. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题. 地球科学进展, 2003, 18(4): 609-618.
- [ 4 ] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. 土壤学报, 2004, 41(5): 687-699.
- [ 5 ] Yang Y H, Mohammad A, Feng J M, Zhou R, Fang J Y. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. Biogeochemistry, 2007, 84(2): 131-141.
- [ 6 ] 黄从德, 张健, 杨万勤, 张国庆, 王永军. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征. 生态学报, 2009, 29(3): 1217-1225.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 魏亚伟, 于大炮, 王清君, 周莉, 周旺明, 方向民, 谷晓萍, 代力民. 东北林区主要森林类型土壤有机碳密度及其影响因素. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3333-3340.
- [ 9 ] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [ 10 ] 徐德应. 人类经营活动对森林土壤碳的影响. 世界林业研究, 1994, (5): 26-32.
- [ 11 ] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 赵其国. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. 土壤学报, 2001, 38(4): 522-528.
- [ 12 ] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 熊彩云, 张池, 刘素萍, 张剑. 毛竹(*Phyllostachy pubescens*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林生态系统碳贮量及其分配特征. 生态学报, 2007, 27(7): 2794-2801.
- [ 13 ] 巫涛, 彭重华, 田大伦, 闫文德. 长沙市区马尾松人工林生态系统碳储量及其空间分布. 生态学报, 2012, 32(13): 4034-4042.
- [ 14 ] 李洁, 盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 张杨珠. 亚热带丘陵几种林地土壤剖面有机碳和轻组有机碳的分布. 土壤通报, 2013, 44(4): 851-857.
- [ 15 ] 高述超, 田大伦, 闫文德, 方晰, 项文化, 梁小翠. 长沙城市森林土壤理化性质及碳贮量特征. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(9): 16-22.
- [ 16 ] 文丽, 雷丕锋, 戴凌. 不同林龄樟树林土壤碳氮贮量及分布特征. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(6): 106-111.
- [ 17 ] 洪瑜. 湘中丘陵区不同土地利用方式土壤的碳氮含量及质量评价[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2007.
- [ 18 ] 刘杰. 湘中南红壤地区土壤质量特征与退化红壤的肥力调控技术研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
- [ 19 ] 杨甲华. 红壤丘岗区不同土地利用方式对土壤肥力质量的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [ 20 ] 高超, 袁德义, 袁军, 邱亚群, 甘国娟. 生草栽培对湘东丘陵砂梨园土壤理化性状的影响. 湖北农业科学, 2011, 50(8): 1593-1595.
- [ 21 ] 王玉娟. 油茶林地覆盖和间种对土壤理化性质及幼林生长的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009.
- [ 22 ] 李洁, 皮兵, 袁巍, 程宁南, 杨骏. 湖南不同土壤类型盛果期油茶测土施肥配方研究. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(9): 19-23, 33-33.
- [ 23 ] 余济云, 田蜜. 长沙市城乡交错带湿地松人工林土壤特性. 武汉大学学报: 理学版, 2010, 56(1): 120-124.
- [ 24 ] 王玉莹. 杉木林土壤健康监测因子研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.
- [ 25 ] 刘发林, 张思玉, 曾思齐, 王伟. 火灾对马尾松林土壤化学性质的影响. 土壤通报, 2009, 40(6): 1270-1275.
- [ 26 ] 雷丕锋, 项文化, 田大伦, 方晰. 樟树人工林生态系统碳素贮量与分布研究. 生态学杂志, 2004, 23(4): 25-30.
- [ 27 ] 陈学泽, 韩京龙, 江头和彦. 湖南省丘陵区森林红壤化学性质研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(12): 85-89.
- [ 28 ] 曾思齐, 刘发林. 6种经营模式的木荷南方红豆杉次生林土壤理化性质. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(7): 9-11, 18-18.
- [ 29 ] 赵思东, 张琳, 谢志明, 袁德义. 覆草栽培对梨园土壤理化性质的影响. 中南林学院学报, 2005, 25(4): 66-70.
- [ 30 ] 涂佳, 申爱荣, 吴天乐, 吴立潮, 吴建平. 配方施肥对泡桐林生长及土壤质量的影响. 湖南林业科技, 2013, 40(1): 20-24.
- [ 31 ] 王忠诚. 湖南省国家级公益林生态效益监测与评价研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- [ 32 ] 曹小玉, 杨文龙, 刘悦翠. 马尾松林生态系统碳贮量研究. 西北林学院学报, 2012, 27(5): 45-49.
- [ 33 ] 曹小玉, 李际平. 不同龄组杉木人工林土壤有机碳贮量及分布特征. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(7): 104-107.
- [ 34 ] 吴天乐, 马丰丰, 杨楠, 罗佳, 李有志, 牛艳东. 环洞庭湖防护林的土壤理化性状研究. 湖南林业科技, 2011, 38(4): 15-18.
- [ 35 ] 杨丽丽. 桉木人工林生态系统碳密度、贮量及空间分布[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2008.
- [ 36 ] 柏方敏. 洞庭湖区不同防护林的生态功能及生态影响评价[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
- [ 37 ] 李有志, 谢永宏, 李峰, 邹冬生. 洞庭湖湿地杨树人工林对土壤理化性质的影响. 农业现代化研究, 2014, 35(2): 234-239.
- [ 38 ] 王月容, 周金星, 周志翔, 孙启祥. 洞庭湖退田还湖区不同土地利用方式对土壤养分库的影响. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6): 634-639.
- [ 39 ] 刘娜, 王克林, 谢永宏, 杨刚, 段亚锋. 洞庭湖湿地土壤环境及其对退田还湖方式的响应. 生态学报, 2011, 31(13): 3758-3766.
- [ 40 ] 杜冠华. 洞庭湖湿地土壤理化性质分析及其环境质量评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.

- [41] 蒋端生. 南岳森林土壤有机质的研究. 湖南农业科学, 2001, (2): 26-29.
- [42] 吴甫成, 方小敏. 衡山土壤之研究. 土壤学报, 2001, 38(3): 256-265.
- [43] 梅杰, 周国英. 不同林龄马尾松林根际与非根际土壤微生物、酶活性及养分特征. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(4): 46-49.
- [44] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 陈盛彬, 陈志阳, 林仲桂. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤理化特征分析. 农业现代化研究, 2012, 33(6): 757-761.
- [45] 陈孙华. 衡阳紫色土丘陵坡地植物群落根系与土壤理化特征. 中国农学通报, 2012, 28(25): 112-116.
- [46] 郝艳, 刘君昂, 周国英, 李河. 不同抚育措施对油茶林土壤养分、微生物及酶活性的影响. 林业资源管理, 2008, (6): 97-101.
- [47] 李倩, 邓湘雯, 黄小健, 田大伦, 方晰. 邵阳县石漠化治理区湿地松人工幼林碳贮量及分布格局. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(7): 91-96.
- [48] 赵朝辉. 湘西南石漠化治理模式对土壤微生物量和酶活性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- [49] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木纯林与常绿阔叶林土壤活性有机碳库的比较. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 1-6.
- [50] 官超, 汪思龙, 曾掌权, 邓仕坚, 陈建平, 龙康寿. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段碳储量与格局特征. 生态学杂志, 2011, 30(9): 1935-1941.
- [51] 方晰. 杉木人工林生态系统碳贮量与碳平衡的研究[D]. 长沙: 中南林学院, 2004.
- [52] 徐桂林. 杉木林地不同更新方式土壤碳氮垂直分布及碳库管理指数[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009.
- [53] 尹刚强. 湖南会同退耕还林生态环境效益研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
- [54] 翟辉. 湘西不同植被对土壤肥力质量的效应研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
- [55] 漆良华, 范少辉, 肖文发, 艾文胜, 孟永, 杜满义, 曾立雄. 湘中丘陵区不同经营目标毛竹林年龄结构、生物量分配与碳贮量格局. 长江流域资源与环境, 2012, 21(Z1): 69-73.
- [56] 漆良华, 范少辉, 艾文胜, 刘广路, 孟勇, 杜满义, 唐晓鹿. 湘中丘陵区竹杉混交对毛竹林土壤质量的影响. 山地学报, 2012, 30(3): 320-327.
- [57] 肖复明. 毛竹林生态系统碳平衡特征的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [58] 漆良华. 武陵山区小流域退化土地植被恢复生态学特性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [59] 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.
- [60] Li Z, Zhao Q G. Organic carbon content and distribution in soils under different land uses in tropical and subtropical China. Plant and Soil, 2001, 231(2): 175-185.
- [61] Saha S K, Nair P K R, Nair V D, Kumar B M. Soil carbon stock in relation to plant diversity of homegardens in Kerala, India. Agroforestry Systems, 2009, 76(1): 53-65.
- [62] Jonsson M, Wardle D A. Structural equation modelling reveals plant-community drivers of carbon storage in boreal forest ecosystems. Biology Letters, 2010, 6: 116-119.
- [63] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, Yin Y F, Gao R, Lin C F. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China. Plant and Soil, 2009, 323(1/2): 153-162.
- [64] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Application, 2002, 10(2): 423-436.
- [65] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. 生态学报, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [66] 刘桂林, 蒋家淡, 张鼎华, 陈立新. 亚热带山地土壤碳动态与吸存研究进展. 福建林业科技, 2007, 34(2): 163-168.
- [67] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2889-2895.
- [68] Wynn J G, Bird M I, Vellen L, Grand-Clement E, Carter J, Berry S L. Continental-scale measurement of the soil organic carbon pool with climatic, edaphic, and biotic controls. Global Biogeochemical Cycles, 2006, 20(1): GB1007, doi: 10.1029/2005GB002576.
- [69] 张修玉, 管东生, 黎华寿, 黄康有, 许振成. 广州典型森林土壤有机碳库分配特征. 中山大学学报: 自然科学版, 2009, 48(5): 137-142.
- [70] 叶玲燕. 浙江省森林土壤有机碳空间变异及影响因子研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.
- [71] 宋满珍, 刘琪璟, 吴自荣, 欧阳勋志. 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, 2009, 31(3): 416-421.
- [72] Smith P, Fang C M. Carbon cycle: A warm response by soils. Nature, 2010, 464(7288): 499-500.
- [73] 张德强, 叶万辉, 余清发, 孔国辉, 张佑倡. 鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物研究. 生态学报, 2000, 20(6): 938-944.
- [74] Zhou G Y, Li L G, Wei X H, Zhang D Q, Zhang Q M, Yan J H, Wen D Z, Liu J X, Liu S G, Huang Z L, Kong G H, Mo J M, Yu Q F. Litterfall production along successional and altitudinal gradients of subtropical monsoon evergreen broadleaved forests in Guangdong, China. Plant Ecology, 2007, 188(1): 77-89.
- [75] 张新平, 王襄平, 朱彪, 宗占江, 彭长辉, 方精云. 我国东北主要森林类型的凋落物产量及其影响因素. 植物生态学报, 2008, 32(5): 1031-1040.
- [76] 李雪峰, 张岩, 牛丽君, 韩士杰. 长白山白桦 (*Betula platyphlla*) 纯林和白桦山杨 (*Populus davidiana*) 混交林凋落物的分解. 生态学报, 2007, 27(5): 1782-1790.
- [77] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响. 应用生态学报, 2004, 15(4): 593-599.
- [78] 路翔, 项文化, 刘聪. 中亚热带4种森林类型土壤有机碳氮贮量及分布特征. 水土保持学报, 2012, 26(3): 169-173.
- [79] 路翔, 项文化, 任辉, 彭长辉. 中亚热带四种森林凋落物及碳氮贮量比较. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2234-2240.
- [80] 孙伟军, 方晰, 项文化, 张仕吉, 李胜蓝. 湘中丘陵区不同演替阶段森林土壤活性有机碳库特征. 生态学报, 2013, 33(24): 7765-7773.