

DOI: 10.5846/stxb201305261192

丁访军, 潘忠松, 吴鹏, 崔迎春, 周凤娇. 贵州东部常绿落叶阔叶混交林碳素积累及其分配特征. 生态学报, 2015, 35(6): 1761-1768.

Ding F J, Pan Z S, Wu P, Cui Y C, Zhou F J. Carbon accumulation and distribution characteristics of the evergreen broad-leaved and deciduous broad-leaved mixed forests in East Guizhou. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1761-1768.

贵州东部常绿落叶阔叶混交林碳素积累及其分配特征

丁访军^{1,*}, 潘忠松², 吴 鹏¹, 崔迎春¹, 周凤娇¹

¹ 贵州省林业科学研究院, 贵阳 550005

² 贵州省三都县林业局, 三都 558100

摘要:以雷公山自然保护区常绿落叶阔叶混交林为研究对象,对其碳素含量、碳密度及分配特征进行了研究。结果表明:生态系统碳素含量表现为乔木层(418.58 g/kg)>灌木层(387.26 g/kg)>草本层(382.80 g/kg)>枯落物层(378.11 g/kg)>土壤层(31.48 g/kg),差异极显著($P < 0.01$),乔木不同器官表现为干>根>叶>枝,差异不显著($P > 0.05$),灌、草层均表现为地上>地下,土壤碳素含量随土层深度的增加而减少;生态系统碳密度为 234.68 t/hm²,表现为土壤层(170.00 t/hm²)>乔木层(57.02 t/hm²)>枯枝落叶层(5.48 t/hm²)>灌木层(1.81 t/hm²)>草本层(0.37 t/hm²),分别占生态系统碳密度的 72.44%、24.30%、2.34%、0.77%和 0.16%;植被层碳密度为 58.79 t/hm²,占了生态系统碳密度的 25.09%;乔木层各器官以树干的碳密度最高,占了乔木层碳密度 52.43%;灌木层、草本层地上部分碳密度分别是地下部分的 2.85 倍 1.64 倍;土壤表层(0—20 cm)碳密度为 70.40 t/hm²,显著高于其它各层($P < 0.001$),占了土壤(0—80 cm)碳密度的 41.41%,有很强的表聚性,因此,防止地表的水土流失,可有效保持土壤对碳的吸存。

关键词:碳素含量;碳密度;常绿落叶阔叶混交林;雷公山

Carbon accumulation and distribution characteristics of the evergreen broad-leaved and deciduous broad-leaved mixed forests in East Guizhou

DING Fangjun^{1,*}, PAN Zhongsong², WU Peng¹, CUI Yingchun¹, ZHOU Fengjiao¹

¹ Guizhou Forestry Academy, Guiyang 550005, China

² Sandu County Forestry Bureau, Sandu 558100, China

Abstract: This study was conducted to determine forest carbon content, density, and the characteristics of carbon distribution in the Evergreen Broad-leaved and Deciduous Broad-leaved mixed forest in Lei Gongshan Nature Reserve, Guizhou, China. Results indicated carbon content in the ecosystem varied significantly ($P < 0.01$) between trees, shrubs, herbs, litter and soil: 418.58 g/kg, 387.26 g/kg, 382.80 g/kg, 378.11 g/kg, and 31.48 g/kg, respectively. Among the various organs of a tree, the carbon content was distributed as follows: trunks > roots > leaves > branches. For shrubs, the carbon content was distributed as: stems > leaves > roots. For herbs, the above ground carbon content was higher than the below ground carbon content, while for all of them, the differences in carbon content among the different organs of a tree, shrub or herb was insignificant ($P > 0.05$). The average carbon content of all vegetation was 40.02%, when all types (trees, shrubs, and herbs) and all plant organs were considered. The carbon content in the litter of the un-decomposed layer was higher than in the semi-decomposed layer, though the difference was not significant ($P > 0.05$). The soil carbon content was highest in the soil at a depth of 0 to 20 cm and soil carbon content generally decreased inversely and significantly with soil depth ($P < 0.01$). The most of the carbon in the entire ecosystem (234.68 t/hm²) was divided

基金项目:国家林业局公益专项子项目(201204101-5);贵州省林业厅重大项目(黔林科合[2010]重大 01)

收稿日期:2013-05-26; **网络出版日期:**2014-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ding3920034@163.com

between the soil (170.00 t/hm^2) and trees (57.02 t/hm^2) with the remainder being tied up in the litter (5.48 t/hm^2), shrubs (1.81 t/hm^2) and herbs (0.37 t/hm^2), and accounting for 72.44%, 24.30%, 2.34%, 0.77% and 0.16% of the soil carbon of the entire ecosystem, respectively. The carbon density in the vegetation was 58.79 t/hm^2 accounting for 25.09% of that in the entire ecosystem. The carbon density among the various organs of a tree could be classified as: tree trunks > roots > branches > leaves and among them the carbon density of the tree trunk was the highest, accounting for 52.43% of the total. This indicated that tree trunks, among all the organs of a tree, were the major contributor not only to the tree's capacity to accumulate carbon but also determined the quantity of carbon an ecosystem could store. The aboveground carbon density was 2.85 times higher than the underground density for shrubs and the aboveground carbon density was 1.64 times higher than the underground carbon density for the herbs. The carbon density in the soil ranged from 27.40 t/hm^2 to 70.40 t/hm^2 and it decreased with an increase in the soil depth. The carbon density in the topsoil (0 to 20 cm deep) was 70.40 t/hm^2 and was prominently higher than that of any other soil depth ($P < 0.001$), and the carbon density in the topsoil contributed 41.41% of the entire soil carbon mass measured at depths of 0 to 80 cm, which indicated that carbon accumulated significantly near the topsoil. Therefore, the control of soil and water erosion could effectively maintain the soil's capacity to sequester and fix soil organic carbon.

Key Words: carbon content; carbon density; evergreen broad-leaved and deciduous broad-leaved mixed forests; Lei Gongshan Mountain

自工业革命以来,人类大量燃烧化石燃料和改变土地的利用方式等因素导致大气中的 CO_2 浓度不断升高^[1],由此而引起的气候变暖问题已严重威胁到人类的生存和发展,全球碳循环也因此成了当今研究的热点问题之一。森林作为陆地生态系统的主体,是地球上最大的陆地碳库,在调节全球碳平衡、减缓大气中 CO_2 等温室气体浓度上升以及维护全球气候等方面具有不可替代的作用^[2-3]。热带、亚热带森林在全球森林中占有举足轻重的地位^[4],其生物量的较小波动即可引起全球碳循环的显著变化^[5]。我国亚热带地区植被类型丰富,生物多样性高,对维持全球碳平衡具有极其重要的作用。近年来,有关亚热带典型森林生态系统的碳含量及碳密度研究已取得了较多成果^[6-15],但主要集中在针叶林、针叶混交林和常绿阔叶林,而对于常绿落叶阔叶混交林的研究较少,特别是贵州东部中亚热带地区尚属空白,加之森林生态系统的碳储量和碳密度有很大的空间变异性^[16-17]。因此,研究贵州东部中亚热带常绿落叶阔叶混交林生态系统的碳素含量、碳密度及其分配特征,对于区域及国家尺度上估算森林生态系统碳库和碳平衡以及制定森林资源管理策略具有重要意义。

1 研究地概况

雷公山是贵州苗岭山脉东段主峰,最高峰海拔 2178.8 m,位于东经 $108^\circ 5' - 108^\circ 24'$;北纬 $26^\circ 15' - 26^\circ 32'$ 。属中亚热带季风山地湿润气候区,冬无严寒,夏无酷暑,雨量充沛。最冷月(1月)平均温山顶 -0.8°C ,山麓 $4 - 6^\circ\text{C}$,最热月(7月)山顶 17.6°C ,山麓 $23 - 25.5^\circ\text{C}$,年平均温度山顶 9.2°C ,山麓 $14.7 - 16.3^\circ\text{C}$,年降雨量在 1300—1600 mm 之间。地带性植被属我国中亚热带东部偏湿性常绿阔叶林,植被垂直分布明显。海拔 1350 m 以下是常绿阔叶林,1350—2100 m 是山地常绿落叶阔叶混交林,2100 m 以上是高山灌丛。常绿落叶阔叶混交林中落叶树种以水青冈(*Fagus longipetiolata*)、亮叶水青冈(*Fagus lucida*)、多脉青冈(*Cyclobalanopsis multinervis*)、白辛树(*Pterostyrax psilophyllus*)等为主,常绿树种以栲(*Castanopsis fargesii*)、石栎(*Lithocarpus glaber*)、木莲(*Manglietia fordiana*)、木荷(*Schima superba*)等为主;自然保护区内植被保护较好,常绿落叶阔叶混交林物种丰富,群落结构复杂,优势种不明显。群落年龄结构也十分复杂,平均年龄约在 40a 左右。林下灌木主要有狭叶方竹(*Chimonobambusa angustifolia*)、柃木(*Eurya japonica*)、圆锥绣球(*Hydrangea paniculata*)等。林下草本有楼梯草(*Elatostema umbellatum*)、矮冷水花(*Pilea peplodes*)、禾本科(*Poaceae*)、莎草科(*Cyperaceae*)、菊科(*Asteraceae*)及蕨类(*Pteridophyta*)植物等。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

本研究于 2011 年 8 月在全面踏查的基础上,选择林相相对整齐、立地条件相对一致的常绿落叶阔叶混交林代表性地段设置了 5 块样地,样地面积为 30 m×30 m。在每个样地四角和样地对角线交叉点按梅花型设置 5 个 2 m×2 m 的灌木小样方、5 个 1 m×1 m 的草本和枯落物层小样方,调查样地内乔木树种(胸径≥5 cm)的种类、胸径和树高,灌、草种类及盖度等,样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况
Table 1 General Situations of the Sample plots

样地号 Plot No.	海拔/m Altitude	母岩 Parent rock	土壤 Soil	平均胸径/cm Average diameter at breast height	平均高/m Average height	主要乔木树种 Major tree species	林分密度/ (株/hm ²) Forest density
1	1763	板岩	黄棕壤	12.8	7.8	白辛树(<i>Pterostyrax psilophyllus</i>)、水青冈(<i>Fagus longipetiolata</i>)、毛叶樱(<i>Cerasus dielsiana</i>)、山矾(<i>Symplocos caudata</i>)、石楠(<i>Photinia serrulata</i>)、木莲(<i>Manglietia fordiana</i>)	1100
2	1571	板岩	黄棕壤	12.6	10.6	水青冈(<i>Fagus longipetiolata</i>)、木姜子(<i>Litsea rubescens</i>)、山矾(<i>Symplocos caudata</i>)、木莲(<i>Manglietia fordiana</i>)	1375
3	1769	板岩	黄棕壤	10.5	8.4	亮叶水青冈(<i>Fagus lucida</i>)、石楠(<i>Photinia serrulata</i>)、石栎(<i>Lithocarpus glaber</i>)、木莲(<i>Manglietia fordiana</i>)	1733
4	1780	板岩	黄棕壤	12.6	8.0	白辛树(<i>Pterostyrax psilophyllus</i>)、亮叶水青冈(<i>Fagus lucida</i>)、木莲(<i>Manglietia fordiana</i>)、石楠(<i>Photinia serrulata</i>)、木姜子(<i>Litsea rubesformcens</i>)	1250
5	1184	板岩	黄壤	12.2	8.1	水青冈(<i>Fagus longipetiolata</i>)、枫香(<i>Liquidambar formosana</i>)、石栎(<i>Lithocarpus glaber</i>)、木莲(<i>Manglietia fordiana</i>)	1500

2.2 生物量及碳素含量测定

由于研究样地位于国家级自然保护区,不宜进行大量的破坏性采伐,因此在对样地每木检尺统计分析的基础上,根据胸径总体分布情况,分别常绿和落叶以 2—4 cm 为一个径级选择解析木,株数较多的中央径级选取 2—3 株,其他径级各选取 1—2 株,共 21 株解析木(落叶 11 株,常绿 10 株)建立混合相对生长方程(表 2),并以此计算乔木层不同器官生物量。灌、草层和枯落物层生物量采用样方收获法测定。在测定生物量的同时对乔木层的干、枝、叶和根分别取样,灌木层的叶、茎和根分别取样,草本层的地上部分和地下部分分别取样。枯枝落叶层分为未分解层和半分解层分别取样。样品的碳含量采用重铬酸钾-外加加热法测定^[6, 13-15]。

表 2 生物量相对生长方程
Table 2 Equation of Relative Biomass Growth

组分 Component	回归模型 * Regression model	相关系数 Relative coefficient
干 Trunk	$W=0.093D^{2.320}$	0.947
枝 Branches	$W=0.007D^{2.849}$	0.875
叶 Leaves	$W=0.004D^{2.467}$	0.813
根 Roots	$W=0.020D^{2.546}$	0.932
全株 Whole plant	$W=0.012D^{2.447}$	0.96

式中,W 代表生物量,D 代表胸径

2.3 土壤样品采集及分析

在每个样地内按“S”型随机挖取 5 个土壤剖面,按 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 和 60—80 cm 进行分层土样采集。样品的有机碳含量采用重铬酸钾-外加热法测定,土壤容重采用环刀法测定。

2.4 碳密度的计算

植被层碳密度为植被层各组分生物量与相应组分的碳素含量的乘积。

土壤有机碳密度计算公式^[18]如下:

$$\text{SOC}_i = O_i H_i B_i (1 - G_i) / 100$$

式中, SOC_i 是第 i 层土壤有机碳密度 (kg/m^2), H_i 是第 i 层土壤的厚度 (cm), B_i 是第 i 层土壤的容重 (g/cm^3), O_i 是 i 层土壤的有机碳含量 (g/kg), G_i 为直径 ≥ 2 mm 的石砾所占的体积百分比 (%)。

数据处理及分析采用 Excel2003 和 SPSS16.0 软件。

3 结果与分析

3.1 雷公山常绿落叶阔叶混交林生态系统各组分碳素含量

3.1.1 乔木层碳素含量

乔木层不同器官的平均碳素含量为 $418.58 \text{ g}/\text{kg}$, 表现为干 ($428.12 \text{ g}/\text{kg}$) > 根 ($421.18 \text{ g}/\text{kg}$) > 叶 ($418.91 \text{ g}/\text{kg}$) > 枝 ($406.11 \text{ g}/\text{kg}$), 不同器官碳素含量的变异系数介于 2.09%—8.12% 之间 (表 3), 差异不显著 ($P > 0.05$)。乔木层的平均碳素含量低于杉木^[13]、马尾松^[7,9-10]、樟树^[11] 等亚热带地区主要优势树种的平均碳素含量。这主要是由于组成树种不同, 导致林木不同器官中的碳素含量明显不同, 即使是同一森林类型, 在不同的气候带, 林木各器官碳素含量也有一定的差异^[19]。

表 3 乔木层碳素含量及分配

Table 3 Carbon content and distribution among the tree layer

项目 Item	组分 Component				平均 Average
	干 Trunk	枝 Branches	叶 Foliage	根 Roots	
碳素含量 Carbon Content/(g/kg)	428.12 ± 9.01	406.11 ± 8.5	418.91 ± 34.02	421.18 ± 10.36	418.58 ± 9.18
变异系数 Coefficient of Variation/%	2.10	2.09	8.12	2.46	2.19

3.1.2 林下植被层及土壤层碳素含量

灌木层不同器官的碳素含量介于 370.92 — $408.17 \text{ g}/\text{kg}$ 之间, 平均为 $387.26 \text{ g}/\text{kg}$, 不同器官碳素含量表现为枝干 > 叶 > 根, 变异系数介于 6.08%—13.91% 之间, 草本层不同器官碳素含量表现为地上部分 ($416.27 \text{ g}/\text{kg}$) > 地下部分 ($349.33 \text{ g}/\text{kg}$), 平均为 $382.80 \text{ g}/\text{kg}$, 变异系数介于 12.23%—13.56% 之间 (表 4), 灌木层和草本层不同器官的碳素含量差异均不显著 ($P > 0.05$)。不论灌木和草本, 其地上部分碳素含量均高于地下部分。灌木层的碳素含量高于草本层, 表现出随植物个体高度或组织木质化程度的降低, 其碳素含量相应减少的趋势^[6,13]。枯落物层碳素含量表现为未分解层 ($382.25 \text{ g}/\text{kg}$) > 半分解层 ($373.98 \text{ g}/\text{kg}$), 平均为 $378.11 \text{ g}/\text{kg}$, 变异系数介于 2.24%—2.63% 之间 (表 4), 各层的碳素含量差异不显著 ($P > 0.05$)。

土壤不同层次碳素含量在 17.08 — $58.23 \text{ g}/\text{kg}$ 之间, 平均值为 $31.48 \text{ g}/\text{kg}$, 变异系数介于 16.82%—43.03% 之间, 0—20 cm 土层的碳素含量最高, 为 $58.23 \text{ g}/\text{kg}$, 表现为随土层深度的增加而减少的趋势 (表 4), 且差异极显著 ($P < 0.01$), 说明森林土壤碳含量的分布有较强的表聚性。这主要是由于地表凋落物的积累和分解使得土壤表层有机质具有稳定而丰富的来源, 同时植被根系对土壤表层有机碳的累积发挥了很强的作用^[20-21]。多重比较结果表明: 0—20 cm 和 20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 土层的有机碳含量差异极显著 ($P < 0.01$); 20—40 cm 和 40—60 cm、60—80 cm 土层有机碳含量差异显著 ($P < 0.05$); 40—60 cm 和 60—80 cm 土壤有机碳含量差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 4 林下植被层及土壤层碳素含量
Table 4 Carbon Content in the Understory Vegetation and Soil

层次 Layer	组分 Component	碳素含量/(g/kg) Carbon content	变异系数/% Coefficient of variation
灌木层 Shrubs	叶	382.70±25.12	6.56
	枝干	408.17±17.02	4.17
	根	370.92±22.54	6.08
草本层 Herbs	地上部分	416.27±50.9	12.23
	地下部分	349.33±47.39	13.56
枯落物层 Litter	未分解	382.25±8.58	2.24
	半分解	373.98±9.84	2.63
土壤层 Soil/cm	0—20	58.23±9.80	16.82
	20—40	29.58±12.73	43.03
	40—60	21.03±6.37	30.30
	60—80	17.08±4.39	25.74

总的看来,雷公山常绿落叶阔叶混交林生态系统碳素含量表现为乔木层>灌木层>草本层>枯落物层>土壤层,差异极显著($P<0.01$)。植被层各层及枯落物层碳素含量均与土壤层碳素含量差异极显著($P<0.01$),乔木层与枯落物层碳含量差异显著($P<0.05$),而与其它层差异均不显著($P>0.05$),灌木层与草本层及枯落物层的碳含量差异均不显著($P>0.05$)。

3.2 生态系统碳密度及分配

3.2.1 生态系统碳密度及分配

通过表 5 计算得出生态系统碳密度为 234.69 t/hm^2 ,各层次碳密度表现为土壤层>乔木层>枯落物层>灌木层>草本层。土壤层的碳密度最大,占了生态系统碳密度的 72.44%,乔木层的碳密度次之,占了生态系统碳密度的 24.30%,枯落物层、灌木层和草本层的碳密度均较小,分别只占了生态系统碳密度的 2.34%、0.77%和 0.16%,说明土壤层和乔木层是影响生态系统碳密度最重要的两个部分。同时,土壤层(0—80 cm)的碳密度是植被层和枯落物层的 2.87 和 30.96 倍,这说明土壤层是决定生态系统碳密度大小的关键作用层。

3.2.2 植被层与枯落物层碳密度及分配

从表 5 看出,乔木层碳密度为 57.02 t/hm^2 ,各器官的碳密度表现为干(29.89 t/hm^2)>根(13.06 t/hm^2)>枝(12.05 t/hm^2)>叶(2.01 t/hm^2)。在乔木层各器官中,树干的碳密度最高,占了乔木层碳密度的 52.43%,这充分说明,树干在乔木层各器官中对碳的积累能力和贮存量均有重要的地位及意义。根与枝的碳密度次之,分别占了乔木层碳密度的 22.90%和 21.14%,叶的碳密度最小,仅占了 3.53%。从表 5 还可以看出,灌木层的碳密度为 1.81 t/hm^2 ,表现为枝干(1.04 t/hm^2)>根(0.47 t/hm^2)>叶(0.30 t/hm^2),各器官的碳密度占了灌木层碳密度的 16.52%—57.52%,灌木层地上部分碳密度为 1.34 t/hm^2 ,占了灌木层碳密度的 74.04%,是地下部分的 2.85 倍;草本层的碳密度为 0.37 t/hm^2 ,表现为地上部分(0.23 t/hm^2)>地下部分(0.14 t/hm^2),分别占了 62.16%和 37.84%,地上部分碳密度是地下部分的 1.64 倍;枯落物层的碳密度为 5.48 t/hm^2 ,表现为半分解层(2.98 t/hm^2)>未分解层(2.50 t/hm^2),分别占了 54.43%和 45.57%,半分解层的碳密度是未分解层的 1.19 倍。

3.2.3 土壤层碳密度及分配

土壤碳密度为 170.00 t/hm^2 (0—80 cm),各层土壤碳密度在 27.40 — 70.40 t/hm^2 之间,且随着土壤深度增加而降低(表 5),差异极显著($P<0.01$)。多重比较结果表明:0—20 cm 和 20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 土层的碳密度差异极显著($P<0.001$);20—40 cm 和 40—60 cm 土层的碳密度差异不显著($P>0.05$),而与 60—80 cm 土层的碳密度差异显著($P<0.05$);40—60 cm 和 60—80 cm 土层差异不显著($P>0.05$)。表层(0—20 cm)土壤的碳密度占了土壤总碳密度(0—80 cm)的 41.41%,其他各层占了土壤总碳密度(0—80 cm)的 16.12%—24.00%(表 5),表层(0—20 cm)土壤的碳密度显著高于其它各层,说明雷公山常绿落叶阔叶混交

林土壤碳密度有很强的表聚性。这主要是由于植物根系集中分布在土壤表层,凋落物和腐殖层以及土壤微生物的分解对土壤有机碳的贡献主要作用于地表,且随土壤深度的增加而减弱,因而表层土壤的碳密度大^[20-21]。

表 5 生态系统碳密度及分配

Table 5 Carbon Density and the Distribution in the Ecosystem

层次 Layer	组分 Component	碳密度/(t/hm ²) Carbon density	组分占各层次比例/% Share of the layer	层次占生态系统比例/% Share of the ecosystem
乔木层 Trees	干	29.89	52.43	24.30
	枝	12.05	21.14	
	叶	2.01	3.53	
	根	13.06	22.90	
	合计	57.02	100	
灌木层 Shrubs	叶	0.30	16.52	0.77
	枝干	1.04	57.52	
	根	0.47	25.96	
	合计	1.81	100	
草本层 Herbs	地上部分	0.23	62.16	0.16
	地下部分	0.14	37.84	
	合计	0.37	100	
枯落物层 Litter	未分解层	2.50	45.57	2.34
	半分解层	2.98	54.43	
	合计	5.48	100	
土壤层 Soil/cm	0—20	70.40	41.41	72.44
	20—40	40.80	24.00	
	40—60	31.40	18.47	
	60—80	27.40	16.12	
	0—80	170.00	100	

4 讨论

4.1 碳素含量

本研究所测贵州东部常绿落叶阔叶混交林林下植被层的碳素含量低于乔木层碳素含量。这是由于乔木层有利于植物的光合作用,合成、积累较多的有机物,因而碳含量较高;而灌木层的光合作用减弱,有机物合成、积累少,碳含量相对较低。由于枯落物中的部分有机物被分解,使得处于半分解状态的枯落物碳素含量低于未分解枯落物。而植被层平均碳素含量为 40.02%,比国内外通常采用的碳素含量值(50%或 45%)要低,因此在估算该区常绿落叶阔叶混交林植被层的碳储量时,采用 40%的转换因子较为准确。

4.2 生态系统碳密度

本研究所测常绿落叶阔叶混交林生态系统碳密度约低于我国森林生态系统平均碳密度(258.83 t/hm²)^[22],同时也低于江西九连山^[12]与鼎湖山^[8,14]亚热带常绿阔叶林地带性植被的碳密度,但大于湖南鹰嘴界中亚热带常绿阔叶林^[15]地带性植被及马尾松林^[7,9-10]、樟树林^[11]、针叶混交林^[6]、杉木林^[13]等人工林的碳密度。说明研究区域、森林类型、树种组成、立地条件等不同,导致生态系统碳储量存在较大差异。植被层碳密度约高于我国森林植被平均碳储量(57.07 t/hm²)^[22],这主要是由于亚热带较好的水热条件利于植被生物量的累积。但该植被层碳密度远低于亚热带常绿阔叶林^[8,12,14-15]植被层碳密度,说明该区植被层的碳汇能力较低,还有较大的碳汇潜力。植被层碳密度主要取决于植被层生物量的多少,而生物量又受林分年龄、密度和立地因子等方面的影响存在较大差异。乔木层碳密度占了植被层碳密度的 96.99%,说明植被层碳密度主要

取决于乔木层的生物量。但研究区地处中亚热带,水、热条件丰富,加之属国家级自然保护区,受人为破坏较少,常绿落叶阔叶混交林乔木层物种丰富,在计算乔木层的生物量时采用混合相对生长方程,其精度还有待进一步验证和深入研究。灌草层和枯落物层的碳密度均极低,分别只占了生态系统碳密度的 0.93% 和 2.34%,但林下植被在维持地力、保持水土等方面有着重要的作用^[23],林下植被一旦遭受破坏,不仅造成植被碳的损失,而且加剧了地表径流对表土层的冲刷,进而导致土壤碳流失。而枯落物层是土壤-植物系统碳循环的联结库,对森林生态系统的碳循环起到非常重要的作用。土壤层碳密度(0—80 cm)最高,是植被层碳密度的 2.87 倍,但土壤碳素的来源主要是地表枯枝落叶、土壤动物及植被根系的输送,这说明了植被层及枯枝落叶层对土壤碳的贡献也是非常大的。因此,加强森林保护,充分发挥植被在维持地力、保持水土等方面作用,减少地表径流对表土层的冲刷,进而减少土壤碳散失,以维持和增加土壤碳贮量,对减缓大气 CO₂ 浓度上升有着重大意义。

4.3 土壤碳密度

本研究所得土壤碳密度(0—80 cm)低于周玉荣等^[22]报道的我国森林土壤碳密度平均水平,同时也低于贵州西部^[20]华山松林、杉木林、柳杉林、桉木林和黔中喀斯特地区^[21]常绿落叶混交林土壤层碳密度,但高于解宪丽等^[24]报道的森林土壤碳密度全国平均水平,同时也高于鼎湖山亚热带常绿阔叶林^[8,14]、黔中喀斯特地区灌木林和针阔混交林^[21]、湖南鹰嘴界常绿阔叶林^[15]及江西九连山常绿阔叶林^[12]土壤层碳密度,说明森林土壤碳密度具有很强的空间异质性。这主要是由于森林类型的差异造成地表枯落物、地下微生物、植物根系和林下植被种类等的差异及各地区土壤发育的母岩、土壤类型,降雨量与林地管护等不同影响所致。表层(0—20 cm)土壤碳密度高于我国森林土壤(0—20 cm)土壤平均碳密度(42.4 t/hm²)^[24],一方面主要是由于该区属于亚热带地区,雨量充沛,森林植被结构复杂,林下植被丰富,凋落物现存量充足且分解转化较快^[20-21],另一方面雷公山属于国家级保护区,森林管护较好,林地受破坏较少,表土层碳损失较少。表层(0—20 cm)土壤碳密度占了土壤层(0—80 cm)总碳密度的 41.41%,显著高于其它各层,而(0—40 cm)土壤碳密度占了土壤层(0—80 cm)总碳密度的 65.41%,高于 Detwiler^[25]的热带和亚热带地区 0—40 cm 所贮存的碳占 0—100 cm 的比例,这充分说明该区森林土壤有机碳密度具有很强的表聚性,意味着森林土壤表层碳贮量贡献较大,防止地表的水土流失,可有效保持土壤对碳的吸存。

5 结论

生态系统各组分碳素含量有较明显的规律,表现为乔木层>灌木层>草本层>枯落物层>土壤层。植被层平均碳素含量为 40.02%。土壤层碳素含量以 0—20 cm 土层最高,碳素含量随土层深度的增加而减少。生态系统碳密度为 234.69 t/hm²,各层次碳密度表现为土壤层>乔木层>枯枝落叶层>灌木层>草本层,分别占了生态系统碳密度的 72.44%、24.30%、2.34%、0.77% 和 0.16%。植被层碳密度为 58.79 t/hm²,占了生态系统碳密度的 25.09%,植被层碳密度主要取决于乔木层的生物量。土壤层碳密度(0—80 cm)最高,林地土壤是一个极重要的碳库,其中表层(0—20 cm)土壤碳密度显著高于其它各层,土壤碳密度具有很强的表聚性。

参考文献(References):

- [1] Tans P P. How can global warming be traced to CO₂. *Scientific American*, 2006, 295(6): 124-124.
- [2] 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.
- [3] Watson R T, Noble I R, Bolin R. *Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 30-30.
- [4] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, Solomon A M, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystem. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [5] Phillips O L, Malhi Y, Higuchi N, Laurance W F, Nunez P V, Vasquez R M, Laurance S G, Ferreira L V, Stern M, Brown S, Grace J. Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. *Science*, 1998, 282(5388): 439-442.
- [6] 康冰,刘世荣,张广军,常建国,温远光,马姜明,郝文芳. 广西大青山南亚热带马尾松、杉木混交林生态系统碳素积累和分配特征. *生*

- 态学报, 2006, 26(5): 1320-1329.
- [7] 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.
- [8] 王斌, 杨校生. 4 种典型地带性森林生态系统碳含量与碳密度比较. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2010, 36(4): 464-469, 473-473.
- [9] 尉海东, 马祥庆. 不同发育阶段马尾松人工林生态系统碳贮量研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(1): 171-174.
- [10] 方运霆, 莫江明. 鼎湖山马尾松林生态系统碳素分配和贮量的研究. 广西植物, 2002, 22(4): 305-310.
- [11] 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.
- [12] 邸月宝, 王辉民, 马泽清, 杨凤亭, 张文江, 付晓莉, 梁跃龙, 周华. 亚热带森林生态系统不同重建方式下碳储量及其分配格局. 科学通报, 2012, 57(17): 1553-1561.
- [13] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华. 南亚热带杉木生态系统生物量和碳素积累及其空间分布特征. 林业科学, 2009, 45(8): 147-153.
- [14] 莫江明, 方运霆, 彭少麟, Brown S, 周国逸. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林碳素积累和分配特征. 生态学报, 2003, 23(10): 1970-1976.
- [15] 宫超, 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.
- [16] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社, 1999.
- [17] Fang J Y. Forest productivity in China and its response to global climate change. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 513-517.
- [18] 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.
- [19] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 蔺琛, 康峰峰, 曹文强, 马志波, 李文宇. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 96-110.
- [20] 丁访军, 高艳平, 周凤娇, 潘明亮, 吴鹏. 贵州西部 4 种林型土壤有机碳及其剖面分布特征. 生态环境学报, 2012, 21(1): 38-43.
- [21] 丁访军, 潘忠松, 周凤娇, 吴鹏. 黔中喀斯特地区 3 种林型土壤有机碳含量及垂直分布特征. 水土保持学报, 2012, 26(1): 161-164.
- [22] 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.
- [23] Liu S R, Li X M, Niu L M. The degradation of soil fertility in pure larch plantations in the northeastern part of China. *Ecological Engineering*, 1998, 10(1): 75-86.
- [24] 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.
- [25] Detwiler R P. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils. *Biogeochemistry*, 1986, 2(1): 67-93.