

毛竹 (*Phyllostachy pubescens*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林生态系统碳贮量及其分配特征

肖复明^{1,2}, 范少辉^{1,*}, 汪思龙³, 熊彩云², 张池⁴, 刘素萍³, 张剑³

(1. 国际竹藤网络中心, 北京 100102; 2. 江西省林业科学院, 南昌 330032;

3. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 4. 湖南省会同县林业局, 会同 418307)

摘要: 研究比较了湖南会同林区毛竹、杉木人工林生态系统碳含量和碳贮量分配特征, 结果表明, 15 年生杉木各器官碳含量在 47.15% ~ 50.43% 之间, 不同器官碳含量高低依次为树干、树叶、树皮、树枝、树根; 毛竹不同器官碳含量波动在 44.51% ~ 49.91%, 各器官碳含量高低依次为竹鞭、竹枝、竹叶、竹干、竹笋、竹根, 但是毛竹不同器官碳含量与年龄之间没有明显变化规律。林地土壤 3 个层次 (60cm 深) 碳素含量为 0.746% ~ 2.390%, 各层次碳素含量分布不均, 表层 (0 ~ 20cm) 土壤碳素含量和碳贮量最高。毛竹、杉木人工林生态系统碳贮量分别为 166.34 tC·hm⁻² 和 150.19 tC·hm⁻², 并且其碳贮量空间分布格局基本一致, 土壤层是主要部分, 其次为乔木层, 林下植被层和凋落物层所占比例最小。其中, 毛竹林土壤层有机碳贮量占 83.92%, 乔木层占 15.38%, 林下植被和凋落物层分别占 0.38% 和 0.32%; 杉木人工林土壤层碳贮量占 62.03%, 乔木层占 34.99%, 林下植被和凋落物层分别占 0.70% 和 2.28%。另外, 碳贮量在两个树种各器官中的分配, 基本与各自的生物量成正比例关系。从植被年固定碳量来看, 毛竹林为 9.94 tC·hm⁻²·a⁻¹, 相当于年固定 CO₂ 量为 36.44 tCO₂·hm⁻²·a⁻¹, 是杉木林的 1.39 倍。

关键词: 毛竹林; 杉木人工林; 碳贮量; 碳分配

文章编号: 1000-0933 (2007) 07-2794-08 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Carbon storage and spatial distribution in *Phyllostachy pubescens* and *Cunninghamia lanceolata* plantation ecosystem

XIAO Fu-Ming^{1,2}, FAN Shao-Hui^{1,*}, WANG Si-Long³, XIONG Cai-Yun², ZHANG Chi⁴, LIU Su-Ping³, ZHANG Jian³

1 International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China

2 Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, China

3 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

4 Forest Bureau of Huitong county, Hunan Province, Huitong 418307, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (7): 2794 ~ 2801

基金项目: 国家“十一五”科技支撑资助项目 (2006BAD19B0104); 国家自然科学基金资助项目 (30270268); 中国科学院知识创新工程重大资助项目 (KZCX3-SW-418)

收稿日期: 2006-08-07; **修订日期:** 2007-05-24

作者简介: 肖复明 (1972 ~), 男, 江西泰和人, 副研究员, 博士生, 主要从事森林资源培育和森林生态研究。E-mail: jxxiaofuming@163.com

*通讯作者 Corresponding author E-mail: fansh@icbr.ac.cn

致谢: 本研究得到中国科学院会同森林生态实验站和湖南会同森林生态系统国家野外科学观测研究站开放基金的支持, 中国科学院会同森林生态实验站邓仕坚、张秀永、于小军、申正其等参与了部分数据采集工作, 在此一并致谢。

Foundation item: The project was financially supported by National Key Project for Eleventh Five Year Plan, China (No. 2006BAD19B0104) and National Natural Science Foundation of China (No. 30270268) and Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX3-SW-418)

Received date: 2006-08-07; **Accepted date:** 2007-05-24

Biography: XIAO Fu-Ming, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in forest silviculture and forest ecology. E-mail: jxxiaofuming@163.com

<http://www.ecologica.cn>

Abstract: Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) and Moso bamboo (*Phyllostachy pubescens*) are two native and major commercial tree species in South China. Because of their high quality in timber and value in economy, Chinese fir and Moso bamboo have been widely planted in the subtropical area of China. Their distribution area in China are more than $7 \times 10^6 \text{ hm}^2$ for Chinese fir plantation, approximately one fourth of total area of plantation forest in China, and more than $3 \times 10^6 \text{ hm}^2$ for Moso bamboo plantation, accounting for one fifth of the total bamboo forest area in the world. Moso bamboo and Chinese fir plantations are also important for high ecological value in soil preservation, water purification and carbon storage etc. In order to estimate their carbon storage and its spatial distribution we compared the biomass, carbon concentration between the two plantation based on the survey in their permanent plots. The results showed that the mean carbon concentrations between the two tree species were significantly different, with higher total carbon concentration in Chinese fir than in Moso bamboo. The average carbon concentration in all organs changed in the order of trunk (50.43%) > leaf (49.57%) > bark (48.84%) > branch (48.33%) > root (47.89%) for Chinese fir, in the order of sheath (49.91%) > branch (48.46%) > leaf (46.92%) > stem (46.68%) > rhizome (44.78%) > root (44.51%) for Moso bamboo. The average carbon concentration in Moso bamboo was not correlated to their age. The carbon concentration of soil to the depth of 60cm ranged from 0.746% to 2.390%, with higher carbon concentration and storage in the soil of 0—20 cm than in the other layer. The total carbon storage of Chinese fir and Moso bamboo plantation ecosystem were $150.19 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $166.34 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ respectively. The spatial distribution pattern of carbon stocks was basically consistent in the order of soil layer > trees layer > shrub and herb and litter layer, with the order of soil (83.92%) > trees (15.38%) > standing litters (0.38%) > shrub and herb (0.32%) in Moso bamboo plantation forest, and the order of soil (62.03%) > trees (34.99%) > standing litters (2.28%) > shrub and herb (0.70%) in Chinese fir plantation. The carbon storage and its allocation among their organs in tree layer were found to be highly correlated with their biomass. Annual carbon fixation of tree layer in Moso bamboo was $9.94 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, amounted to $36.44 \text{ tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, about 1.39 times as that of Chinese fir plantation.

Key Words: *Cunninghamia lanceolata* plantation; *Phyllostachy pubescens* plantation; carbon storage; carbon distribution

大气 CO_2 浓度上升引起的温室效应及其所带来的一系列生态环境变化已成为生态学、环境科学等研究的热点问题。作为全球气候系统的组成部分之一,森林生态系统中储存了陆地生态系统有机碳地上部分的 80%,地下部分的 40%^[1],因此,森林生态系统对现在及未来的气候变化、碳平衡都具有重要意义。20 世纪 90 年代以来,许多科学家从全球、区域或国家尺度上研究了森林生态系统对全球碳循环的影响和不同森林生态系统碳贮量和碳分配特征^[2~13]。随着《京都议定书》的生效实施,正确评价森林对大气 CO_2 的固定能力,较小尺度上研究某个地区、某个林种的碳平衡特征也就显得十分迫切。杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、毛竹 (*Phyllostachy pubescens*) 是我国南方重要的森林资源,并且近年来种植面积有不断增大的趋势,在各国寻找控制或减轻碳释放途径的背景下,本研究通过对连栽杉木林地上分别营造毛竹和杉木生态系统碳贮量作初步研究与探讨,从碳贮量和碳吸存角度评价杉木多代连栽地继续营造杉木纯林和毛竹林两种不同经营模式,以期对杉木、毛竹次生林、低产林的改造及高效率碳吸存经营措施提供基础数据,也为正确评价森林在全球碳平衡中的作用提供理论依据,同时也为我国森林生态系统碳平衡的估算和动态模拟提供基础数据,进而可为政府部门制定森林发展规划和环境保护政策提供理论支撑。

1 试验地概况

研究样地位于湖南省会同县境内,气候属亚热带湿润气候,年均温度 16.5 ,极端最高温和最低温分别为 36.4 和 -4.4 ,年均降雨量为 $1200 \sim 1400 \text{ mm}$,年均相对湿度在 80%以上,土壤为红黄壤。其中,杉木人工林样地设在中国科学院会同森林生态实验站 ($109^\circ 30' \text{ E}$, $26^\circ 48' \text{ N}$),海拔 $200 \sim 500 \text{ m}$,为低山丘陵地貌类型,林龄为 15 年生,林分现有密度为 $1530 \text{ 株} / \text{hm}^2$,林分平均胸径为 14.8 cm ,平均树高为 12.6 m ,造林地前茬为杉

木林,林地灌木主要以杜茎山 (*Maesa japonica*)、格药铃 (*Eurya muricata*)、草本以狗脊 (*Woodwardia japonica*)、中华里白 (*Diplopterygium chinensis*)等为优势种的生态系统。

毛竹林位于湖南省会同县连山镇 (109°41'E, 26°50'N),海拔高为 300~400m,为 1995年春季母竹移栽造林,初植密度 375株/hm²。竹林抚育为幼林期每年春天和初夏各中耕除草一次,造林前 3a每年于出笋前每株穴施尿素 300~450g,除挖取退笋、弱小的笋外,悉数留笋长竹,自 1999年后进行伐竹作业并且每年冬季进行林地垦复、翻耕等。林分现有密度平均为 2100株/hm²,造林地前茬为杉木林,林地灌木基本没有,生长季节林下植被主要以马唐 (*Digitaria sanguinalis*)、鸡屎藤 (*Paederia scandens*)、鱼腥草 (*Houttuynia cordata*)、蛇葡萄 (*Ampelopsis aconitifolia*)等杂草为主。

2 研究方法

2.1 杉木、毛竹生物量和净生产量测定

杉木生物量测定采用中国科学院会同森林生态实验站现有杉木生长方程^[14]和样地调查相结合。2005年 11月在 1990年营造的杉木林设立 3个 20m×20m标准地,并对标准地内杉木胸高直径和树高进行每木检尺后,利用现有的杉木生长方程,计算出杉木生物量,并以年平均生物量增长量作为净生产量的估算指标。

毛竹生物量是在 3个 20m×30m大小的样地内进行每株立竹直径和树高调查的基础上,计算出每度竹的标准竹,并分别砍伐、度竹的标准竹各 2株,分别测定其竹秆、竹枝和竹叶鲜重,并对地下部分用挖掘法,每个样地挖掘 4个 1m×1m样方,挖出竹蔸、竹鞭和竹根,挖至无根为止,用水细心漂洗,再用筛子在水中筛后捞出所有的根,风干后称其鲜重;各器官取样后带回实验室,在 60℃烘干至恒重,并取小样 105℃烘干,求算生物量。

毛竹年生产力的测定^[15],根据所伐标准竹得到的经验方程,计算出毛竹地上部份的年净生产量,公式如下:

$$w = \sum n_i (w_i - w_{i-1})$$

式中, w 年毛竹地上部分年净生产量, n_i 为各龄竹的株数, i 为竹龄, w_i 为第 i 龄竹的地上部干重平均值。

由所伐标准竹得到的经验方程中毛竹地下部与地上部现存量之比率乘以地上部分年净生产量得出地下部分年净生产量,加上退笋和笋箨的年产量,再加上年凋落物量和林下植物的现存量(因每年垦挖,故以现存量推算),即可得出毛竹林生态系统的年净生产量。

2.2 林下植被生物量和净生产量测定

在每个标准地内分上、中、下坡位设立 1m×1m小样方 5个,采用全挖法实测生物量。即收集每个小样方中全部灌木、杂草,然后混合 5个小样方中的灌木、杂草,烘干至恒重再估算干重,同时用作分析样品。杉木林下植被年净生产量为 2005年与 2004年测定之差,毛竹林由于每年垦翻,即以 2005年的生产量为年净生产量。

2.3 凋落物现存量 and 净生产量测定

2004年 10月在每个样地内设置 5个 (1m×1m)收集器,收集收集器下小样方的全部枯落物,以后每月收集 1次,按组分收集凋落物,并分别称其湿重后,在 80℃条件下烘干后称重,同时选取一定量的凋落物作为分析样品。

2.4 样品采集及化学分析方法

在测定生物量的同时,按层分组采集标准株的分析样品。树干每 2m取 10~20g鲜样进行称重,枝、叶分层(上、中、下),根系分级(按 <0.2cm、0.2~0.5cm、>0.5cm、根头),土壤分层(0~20cm、20~40cm、40~60cm)然后各层(级)分别采集分析样品,土壤各层取样分上、中、下坡 3个取样点,并在每个取样点不同位置取 3个点的混合样,取样点的分布基本采用 S形,同时采用环刀法取原状土,测定土壤容重^[16]。

植物、土壤样品中碳素含量测定采用重铬酸钾法^[16]。

2.5 碳贮量的计算

不同器官生物量与其碳含量的乘积为不同器官的碳贮量;各器官碳贮量之和为乔木层碳贮量;植被各组分年净生产量与其碳含量的乘积为各组分年有机碳固定量;乔木层、灌木层、草本层、枯落物层和土壤层有机碳贮量之和为生态系统中的碳贮量。其中,土壤碳贮量的计算公式:

$$\text{土壤有机碳贮量} = \text{土壤容重} \times \text{采样深度} \times \text{土壤有机碳含量} \times \text{面积}$$

3 结果与分析

3.1 毛竹、杉木人工林生态系统中植被碳含量及其分配

3.1.1 毛竹、杉木各器官碳含量

不同的器官其碳含量不尽相同,从表 1 可知:杉木各器官碳含量在 47.15% ~ 50.82%,各器官碳含量高低依次为树干(50.43%)、树叶(49.57%)、树皮(48.84%)、树枝(48.33%)、树根(47.89%)。杉木树干碳含量最高,树皮和树叶的碳含量相对要低,主要可能是因为木材中纤维素和木质素含量高的原因。毛竹不同器官碳含量波动在 44.51% ~ 49.91%,各器官碳含量高低依次为竹鞭(49.91%)、竹枝(48.46%)、竹叶(46.92%)、竹干(46.68%)、竹笋(44.78%)、竹根(44.51%)。与现有的研究结果相似,即不同树种以及同一树种在不同地区,其各器官碳含量有一定的差异,但它们的变化大都在 45% ~ 55% 范围之内^[14]。

表 1 杉木、毛竹主要器官碳含量 (%)

Table 1 Carbon concentration in different organs of Moso bamboo and Chinese fir (%)

树种 Tree	年龄 Age	树干 Stem	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Root	树皮 Bark	竹笋 Rhizome	竹鞭 Sheath	平均 Average
杉木 Chinese fir	15	50.43 ± 0.01	48.33 ± 0.02	49.57 ± 0.01	47.89 ± 0.03	48.84 ± 0.01			49.05
毛竹 Moso bamboo	2	47.01 ± 0.03a	49.8 ± 0.01a	48.32 ± 0.01a	44.51 ± 0.02a		44.05 ± 0.01a	49.91 ± 0.02a	47.09
	4	46.36 ± 0.01a	46.84 ± 0.01a	46.34 ± 0.01a	44.51 ± 0.02a		43.76 ± 0.02a	49.91 ± 0.02a	46.51
	6	46.9 ± 0.02a	48.48 ± 0.00a	44.59 ± 0.01a	44.51 ± 0.02a		47.13 ± 0.02a	49.91 ± 0.02a	46.71
	8	46.45 ± 0.01a	48.7 ± 0.06a	48.44 ± 0.04a	44.51 ± 0.02a		44.16 ± 0.02a	49.91 ± 0.02a	47.2
毛竹平均 Moso bamboo Average		46.68	48.46	46.92	44.51		44.78	49.91	46.88

表中数据为平均值 ± 标准误差,具有相同字母的处理没有达到显著性检验 ($p < 0.05, n = 5$) Data of the table represent average value ± standard error and those with the same letters are not significantly different ($p < 0.05, n = 5$);下同 the same below

另外,研究也表明杉木林的平均碳含量在不同气候带或是同一气候带不同林龄,其碳含量也有差异,如苏南地区 27年生杉木各器官的平均碳含量为 51%。北亚热带信阳林区 23年生杉木各器官平均碳含量为 46.32%,湖南会同林区 20年生杉木各器官碳含量为 54.1%,14年生的为 48.07%,11年生的为 47.79%,10年生杉木各器官的碳含量为 47.56%^[10,17]。由此可见,同一种森林类型,采用同样的测定方法,但由于其所处的地理位置以及年龄阶段不同,各器官生长速度及其老化程度不同,各器官碳含量的算术平均值存在一定的差异^[17],但是毛竹不同器官碳含量与年龄之间没有明显变化规律,说明毛竹各器官碳含量变化规律与一般林木稍有不同,这可能与毛竹特殊的生物学特性和生长规律有关。

3.1.2 毛竹、杉木人工林生态系统植被层有机碳贮量及其空间分布格局

从植被各部分碳贮量可以看出(表 2),杉木人工林的植被碳贮量要高于毛竹林。杉木植被碳贮量为 57.03 tC·hm⁻²,是毛竹林的 2.13倍,接近于我国森林植被平均碳贮量^[5] (57.07 tC·hm⁻²),高于温带(43.26 tC·hm⁻²)及暖温带针叶林(44.97 tC·hm⁻²),低于全国热带、亚热带针叶林(63.7 tC·hm⁻²),这主要是因为本研究所选的林分林龄低于以上林分平均年龄(20 ~ 30a),毛竹林由于其经营方式和杉木不同,通常是隔年择伐,因此其现存量低于杉木林。

植被碳贮量空间分布格局则因树种不同而略存在差异,乔木层是植被碳贮量的主体,杉木、毛竹乔木层碳贮量分别为 52.55 tC·hm⁻²和 25.59 tC·hm⁻²,占整个植被碳贮量的 91.14%和 95.67%;其次,在杉木林凋

凋落层占 6.01%,比林下植被层碳贮量高 4.17%,而毛竹林则是林下植被层占 2.36%,略高于凋落层 0.4%,这可能与毛竹林的林分结构有关。

从植被碳贮量在乔木层各器官中的分配来看,在杉木林中,树干碳贮量所占比例最大,为 52.7%,其次是根系(15.69%),然后依次为树叶(8.21%)、树皮(8.17%)和树枝(7.37%);在毛竹林中,竹干碳贮量的所占比例也是最大(45.88%),竹鞭和根系次之(15.51%和 12.75%),再者就是竹枝(6.67%),所占的比例最小的为竹叶,仅占 5.56%。另外,由表 2 还可以看出,碳贮量在不同器官中的分配基本上与各器官生物量成正比关系,以树干生物量占的比例最大,碳贮量也最高,说明植被碳贮量主要受植被生物量的影响。

表 2 毛竹、杉木人工林植被层碳贮量及其空间分布

Table 2 Carbon storage of vegetation and its spatial distribution under different plantation ecosystem

项目 Item	毛竹林 Moso bamboo plantation				杉木林 Chinese fir plantation			
	生物量 Biomass (t·hm ⁻²)	比例 Percentage (%)	碳贮量 C Storage (tC·hm ⁻²)	比例 Percentage (%)	生物量 Biomass (t·hm ⁻²)	比例 Percentage (%)	碳贮量 C Storage (tC·hm ⁻²)	比例 Percentage (%)
树干 Stem	26.29 ± 3.40	45.71 ± 1.72	12.27 ± 1.12	45.88 ± 2.18	59.60 ± 2.49	51.27 ± 0.21	30.05 ± 1.37	52.57 ± 1.40
树枝 Branch	3.68 ± 0.42	6.40 ± 0.46	1.78 ± 0.16	6.67 ± 0.67	8.70 ± 0.28	7.48 ± 0.01	4.20 ± 0.39	7.35 ± 0.47
树叶 Leaf	3.17 ± 0.54	5.51 ± 0.27	1.49 ± 0.10	5.56 ± 0.33	9.45 ± 0.30	8.13 ± 0.11	4.68 ± 0.20	8.19 ± 0.27
树根 Root	7.66 ± 1.66	13.32 ± 1.72	3.41 ± 0.22	12.75 ± 0.07	18.69 ± 0.71	16.08 ± 0.05	8.95 ± 0.27	15.66 ± 0.44
树皮 Bark					9.54 ± 0.40	8.21 ± 0.03	4.66 ± 0.29	8.15 ± 0.60
竹莖 Rhizome	5.56 ± 0.64	9.67 ± 0.43	2.49 ± 0.10	9.31 ± 0.41				
竹鞭 Sheath	8.31 ± 1.13	14.45 ± 0.28	4.15 ± 0.29	15.51 ± 0.87				
乔木层小计 Sum	54.67	95.06	25.59	95.67	105.97	91.16	52.55	91.92
林下植被 Understory	1.50 ± 0.20	2.62 ± 0.24	0.63 ± 0.06	2.36 ± 0.03	2.68 ± 0.43	2.31 ± 0.01	1.05 ± 0.06	1.84 ± 0.21
凋落层 Litter	1.34 ± 0.10	2.32 ± 0.31	0.53 ± 0.03	1.96 ± 0.02	7.59 ± 0.05	6.53 ± 0.03	3.43 ± 0.18	6.24 ± 0.35
总计 Total	57.51	100.00	26.75	100.00	116.24	100.00	57.03	100.00

3.2 毛竹、杉木人工林生态系统土壤碳含量和碳贮量

森林枯枝落叶和森林动植物残体作为土壤有机碳的主要来源,在气候、生物等因素的作用下,林地土壤形成了不同的层次结构,其有机碳含量和碳贮量也将随着土壤深度的变化而不同。从林地土壤碳贮量空间分布来看,毛竹、杉木人工林生态系统土壤各层有机碳含量和碳贮量均以 0~20cm 层最高,其次为 20~40cm 层,含量最低的为 40~60cm 层。杉木林地土壤有机碳总量为 93.16 tC·hm⁻²,其中 0~20cm 层土壤碳贮量为 42.02 tC·hm⁻²,占林地土壤碳贮量的 45.1%,分别为 20~40cm 层和 40~60cm 层的 1.38 倍和 2.12 倍。毛竹林地土壤有机碳总量为 139.57 tC·hm⁻²,其中 0~20cm 层土壤碳贮量为 56.91 tC·hm⁻²,占林地土壤碳贮量的 40.8%,分别为 20~40cm 层和 40~60cm 层的 1.02 倍和 2.11 倍。这可能与上层土壤较下层土壤的生物归还量大,有机碳多积累在上层土壤有关。毛竹林地每年垦翻的经营措施,也就造成毛竹林地上两层土壤容重和碳贮量相差不大。

3.3 毛竹、杉木人工林生态系统主要组分碳贮量

由表 4 知,15 年生杉木人工林生态系统中碳贮量为 150.19 tC·hm⁻²,其中土壤层最大,为 93.16 tC·hm⁻²,占总贮量的 62.03%,其次为乔木层,占总贮量的 34.99%,再者就是凋落物层(2.28%)和林下植被层

(0.70%),地上与地下部份(凋落物和土壤层)碳贮量之比为 1:1.80。毛竹林生态系统碳贮量为 $166.34 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}$,也是土壤层碳贮量最大,为 $139.59 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}$,占 83.92%,其次是乔木层为 $25.59 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}$,占 15.38%,林下植被和凋落物层分别为 $0.63 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.53 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别占 0.38%和 0.32%,地上与地下碳贮量之比为 1:5.34,说明林地碳贮量是一个极大的碳贮量库。

表 3 土壤层中的有机碳含量与碳贮量

Table 3 Carbon concentration and carbon storage in soil

林分 Forest	杉木 Chinese fir				毛竹 Moso bamboo			
	容重 Density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	碳含量 Concentration (%)	碳贮量 Storage ($\text{tC}\cdot\text{hm}^{-2}$)	比例 Percentage (%)	容重 Density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	碳含量 Concentration (%)	碳贮量 Storage ($\text{tC}\cdot\text{hm}^{-2}$)	比例 Percentage (%)
0~20	1.218 ±0.051	1.765 ±0.088	42.02 ±1.32	45.1 ±1.41	1.190 ±0.06	2.390 ±0.104	56.91 ±4.24	40.8 ±3.04
20~40	1.253 ±0.131	1.245 ±0.162	31.00 ±4.78	33.3 ±5.14	1.195 ±0.057	2.330 ±0.178	55.71 ±6.65	39.9 ±4.77
40~60	1.361 ±0.012	0.746 ±0.029	20.14 ±0.77	21.6 ±0.82	1.434 ±0.082	0.940 ±0.191	26.97 ±6.10	19.3 ±4.37
合计 Total			93.16	100			139.59	100

表 4 毛竹、杉木人工林生态系统各组分碳贮量 ($\text{tC}\cdot\text{hm}^{-2}$, %)

Table 4 Carbon storage in each component of ecosystem of Moso bamboo and Chinese fir plantation

林分 Forest	乔木层 Tree layer	林下植被层 Understory	凋落物层 Litter	土壤层 Soil	合计 Total
杉木 Chinese fir	52.55 ±2.61 (34.99 ±2.33)	1.05 ±0.06 (0.70 ±0.05)	3.43 ±0.18 (2.28 ±0.16)	93.16 ±4.10 (62.03 ±2.73)	150.19 (100)
毛竹 Moso bamboo	25.59 ±3.87 (15.38 ±1.60)	0.63 ±0.06 (0.38 ±0.05)	0.53 ±0.03 (0.32 ±0.03)	139.59 ±12.87 (83.92 ±7.74)	166.34 (100)

* 括号内数字为百分数 Data in the bracket represent percentage (%)

3.4 植被层碳素年固定量的推算

森林生态系统的生产力研究的主要内容之一是要确定系统同化 CO_2 的能力。由表 4 和表 5 可知,15 年生杉木人工林植被层贮存碳总量为 $57.03 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,相当于同化 CO_2 的量为 $209.11 \text{ tCO}_2\cdot\text{hm}^{-2}$,年固定有机碳量为 $7.17 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,相当于每年同化 CO_2 的量为 $26.29 \text{ tCO}_2\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。毛竹林植被层碳贮量为 $26.75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,只占杉木林的 46.79%,但是,毛竹林年固定有机碳量为 $9.94 \text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,相当于年同化 CO_2 量 $36.44 \text{ tCO}_2\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,是杉木林的 1.39 倍。

4 结论与讨论

15 年生杉木各器官碳含量在 47.15%~50.82% 之间,不同器官碳含量高低依次为树干、树叶、树皮、树枝、树根;毛竹不同器官碳含量波动在 44.51%~49.91%,各器官碳含量高低依次为竹鞭、竹枝、竹叶、竹干、竹笋、竹根,毛竹不同器官的碳含量没有随着年龄增加而增大的趋势。

表 5 毛竹、杉木人工林中碳素年净固定量

Table 5 The annual carbon storage in Moso bamboo and Chinese fir plantation

林分 Forest	层次 Layer	年净生产量	年固定碳量	折合 CO_2 量
		Annual net production ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	Annual net carbon accumulation ($\text{tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	Annual net CO_2 accumulation ($\text{tCO}_2\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)
杉木 Chinese fir	乔木层 Tree layer	6.99 ±0.27	3.48 ±0.13	12.79 ±0.47
	凋落物 Litter	3.94 ±0.26	1.85 ±0.12	6.79 ±0.44
	林下植被 Understory	3.63 ±0.25	1.83 ±0.13	6.71 ±0.47
	合计 Total	13.06	7.17	26.29
毛竹 Moso bamboo	乔木层 Tree layer	17.68 ±0.80	8.29 ±0.38	30.39 ±1.38
	凋落物 Litter	2.58 ±0.14	1.02 ±0.06	3.73 ±0.2
	林下植被 Understory	1.50 ±0.07	0.63 ±0.03	2.32 ±0.12
	合计 Total	21.76	9.94	36.44

杉木、毛竹林地土壤 3 个层次 (60cm 深) 碳含量为 0.746% ~ 2.390%, 各层次碳含量分布不均, 表层 (0 ~ 20cm) 土壤碳含量和碳贮量最高, 可见防止地表水土流失, 可有效保持土壤对碳的吸存能力。杉木、毛竹林地土壤有机碳贮量分别为 $93.16 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $139.59 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别占整个生态系统碳贮量的 62.03% 和 83.92%, 说明林地碳贮量是一个极大的碳贮量库。但是, 林地土壤中的有机碳贮量主要分布在土壤表层, 而人类的各种经营活动也主要作用于土壤表层, 尤其是毛竹林地每年都进行垦翻的经营措施将对土壤中的有机碳产生深刻的影响, 这也往往决定了森林土壤中的碳库的源/汇功能。据 Detwiler 关于热带和亚热带地区土地利用变化对土壤碳库影响的研究, 0 ~ 40cm 所贮存的有机碳占 0 ~ 100cm 总量的比例为 35% ~ 80%, 平均为 57%, 本研究区杉木和毛竹林地 0 ~ 40cm 土层所贮存有机碳量的比重分别为 78.5% 和 80.7%, 略高于其它地区, 这从另一个侧面也反映出该地区人工林土壤较脆弱, 人为干扰容易造成土壤有机碳损失^[12]。因此, 减少人为对森林的干扰活动, 加强对森林植被的保护以维持和增加土壤碳贮量, 对维护全球气候变化, 特别是减缓大气 CO_2 浓度上升等有着重要的意义。另外, 土壤中有有机碳除由植物地上部分枯枝落叶输入外, 还由植物根系分泌和凋落输入土壤中, 其中根系分泌与凋落而释放出的有机碳也是土壤碳的重要来源之一^[18]。廖利平等对会同 13 年生杉木林的研究表明^[19]: 根系的凋落物量为 $497 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 为枯枝落叶量的 36.8%, 有机碳含量为 $525.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可见根系分泌和凋落对土壤中有有机碳的贡献也是十分重要的。

杉木、毛竹林生态系统有机碳贮量分别为 $150.19 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $166.34 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$, 生态系统碳贮量空间分布格局基本一致, 土壤层是主要部分, 其次为乔木层, 林下植被层和凋落层所占比例最小。其中, 杉木人工林土壤层有机碳贮量占 62.03%, 乔木层占 34.99%, 林下植被和凋落物层分别占 0.70% 和 2.28%; 毛竹林土壤层有机碳贮量占 83.92%, 乔木层占 15.38%, 林下植被和凋落物层分别占 0.38% 和 0.32%; 另外, 植被碳贮量主要受植被生物量的影响, 乔木层中的碳贮量又以树干占的比例最大, 杉木和毛竹林树干碳贮量分别为 $30.05 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $12.27 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占植被层碳贮量的 52.57% 和 35.88%; 分布在树枝、树叶和树根中的碳贮量分别占 39.35% 和 49.79%。毛竹林植被碳贮量要比杉木林低, 但在采伐时, 毛竹带走的主要是竹秆、竹枝和竹叶部份, 占植被层碳贮量的 58.11%, 当然竹叶有一部分在林地中分解, 归还土壤, 但是总体上毛竹采伐带走的有机碳量要比杉木林高。

15 年生杉木人工林植被层贮存碳总量为 $57.03 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相当于同化 CO_2 的量为 $209.11 \text{ tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$, 年固定有机碳量为 $7.17 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 相当于每年同化 CO_2 的量为 $26.29 \text{ tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。毛竹林植被层碳贮量为 $26.75 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$, 只占杉木林的 46.79%, 但是, 毛竹林的年固定有机碳量为 $9.94 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 相当于年同化 CO_2 量 $36.44 \text{ tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 是杉木林的 1.39 倍, 说明毛竹是一个固碳能力较强的树种, 并且毛竹林通常是采取择伐作业, 不存在伐后水土流失严重的问题, 因此, 适度的发展毛竹林对生态环境的保护在一定程度上要强于杉木人工林。但是, 由于毛竹轮伐期短, 并且集约经营程度一般要高于杉木人工林, 尤其是毛竹林连年翻耕、去除林下灌木、杂草、施用化肥等经营措施, 导致土壤有机质矿化加剧, 林地土壤养分归还量减少、地力衰退等现象, 因此, 对于增加毛竹林生态系统有机碳贮量的合理经营措施还有待于进一步研究。

References:

- [1] Mathi Y, Baldoechi D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant Cell and Environment*, 1999, 22: 715—740.
- [2] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al*. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263: 185—190.
- [3] Fang J Y, Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(9): 967—973.
- [4] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 733—740.
- [5] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 24(5): 518—522.
- [6] Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 13—16.
- [7] Fang X, Tian D L, Xiang W H, *et al*. Carbon dynamics and balance in the ecosystem of the young and middle-aged second-generation Chinese

- fir plantation Journal of Central South Forestry University, 2002, 22 (1) : 1—6
- [8] Li Y D, Wu Z M, Zeng Q B, *et al* Carbon pool and carbon dioxide dynamics of tropical mountain rain forest ecosystem at Jianfengling, Hainan Island Acta Ecologica Sinica, 1998, 18 (4) : 371—378
- [9] Zhao M, Zhou G S Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors Scientia Geographica Sinica, 2004, 24 (1) : 50—54
- [10] Chen C Y, Liao L P, Wang S L, *et al* Carbon allocation and storage in Chinese fir plantation eco systems Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11 (suppl) : 175—178
- [11] Kang B, Liu S L, Zhang G J, *et al* Carbon accumulation and distribution in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* mixed forest ecosystem in Daqingshan, Guangxi of China Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (5) : 1320—1329
- [12] Huang Y, Feng Z W, Wang S L, *et al* C and N stocks under three plantation forest ecosystems of Chinese fir, *Michelia macclurei* and their mixture Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (12) : 3146—3154
- [13] Zhou G M, Jiang P K Density, storage and spatial distribution of carbon in *Phyllostachy pubescens* forest Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40 (6) : 20—24
- [14] Chen C Y, Liao L P, Wang S L Ecology of Chinese fir plantation Beijing: Science Press, 2000
- [15] Chen H, Hong W, Lan B, *et al* Study on biomass and productivity of *Phyllostachys heterocycla* cv. Pubescens forest in the North of Fujian Scientia Silvae Sinicae, 1998, 34 (Sp1) : 60—64
- [16] Liu G S Observation and standard analysis method of Chinese Ecosystem Research Network: Physiochemical analysis and profile description of soil Beijing: China Standard Press, 1996
- [17] Tian D L, Fang X, Xiang W H Carbon density of the Chinese fir plantation ecosystem at Huitong, Hunan Province, China Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (11) : 2382—2386
- [18] Jobbagy 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
- [19] Liao L P, Yang Y J, Wang S L, *et al* Distribution and nutrient return of fine root in pure *Cunninghamia* and *Michelia macclurei* and the mixed plantations Acta Ecologica Sinica, 1999, 19 (3) : 342—346

参考文献:

- [3] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43 (9) : 967 ~ 973
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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 ~ 16
- [7] 方晰, 田大伦, 项文化. 等. 第二代杉木中幼林生态系统碳动态与平衡. 中南林学院学报, 2002, 22 (1) : 1 ~ 6
- [8] 李意德, 吴仲民, 曾庆波. 等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究. 生态学报, 1998, 18 (4) : 371 ~ 378
- [9] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. 地理科学, 2004, 24 (1) : 50 ~ 54
- [10] 陈楚莹, 廖利平, 汪思龙. 杉木人工林生态系统的碳素分配与贮量的研究. 应用生态学报, 2000, 11 (增刊) : 175 ~ 178
- [11] 康冰, 刘世荣, 张广军. 等. 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
- [12] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙. 等. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量. 生态学报, 2005, 25 (12) : 3146 ~ 3154
- [13] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布. 林业科学, 2004, 40 (6) : 20 ~ 24
- [14] 陈楚莹, 廖利平, 汪思龙. 杉木人工林生态学. 北京: 科学出版社, 2000
- [15] 陈辉, 洪伟, 兰斌. 等. 闽北毛竹生物量与生产力的研究. 林业科学, 1998, 34 (sp1) : 60 ~ 64
- [16] 刘光崧. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法——土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996
- [17] 田大伦, 方晰, 项文化. 湖南会同杉木人工林生态系统碳素密度. 生态学报, 2004, 24 (11) : 2382 ~ 2386
- [19] 廖利平, 杨跃军, 汪思龙. 等. 杉木、火力楠纯林及其混交林细根分布、分解与养分归还. 生态学报, 1999, 19 (3) : 342 ~ 346