

不同抚育措施对闽西毛竹林碳密度、碳贮量与碳格局的影响^{*}

漆良华 刘广路 范少辉^{**} 岳祥华 张 华 杜满义

(国际竹藤网络中心, 北京 100102)

摘 要 以闽西永安市 (挖笋 + 劈草 + 施肥 + 灌水)、(挖笋 + 劈草 + 施肥)、(挖笋 + 劈草) 3种不同抚育措施的毛竹林为对象, 对其碳密度、碳贮量及碳格局进行了研究。结果表明: 毛竹各器官碳密度变动范围为 $0.3947 \sim 0.5619 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 碳密度高低排序为竹鞭 > 竹秆 > 竹枝 > 竹笋 > 竹叶 > 竹根 > 鞭根; 不同竹龄间竹秆、竹枝、竹叶、竹根碳密度存在极显著差异 ($P < 0.01$), 而竹笋碳密度差异不显著 ($P > 0.1$); 随着竹龄增加, 毛竹平均碳密度有下降趋势, 1~6年毛竹平均碳密度为 $0.4579 \sim 0.4957 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。、和 类毛竹林毛竹层碳贮量分别为 76.74 、 64.30 和 $55.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 凋落物层碳贮量分别为 2.59 、 3.01 和 $4.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 土壤层碳贮量分别为 150.64 、 197.36 和 $232.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 总碳贮量分别为 227.37 、 261.66 和 $288.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中土壤层碳贮量所占比例最高, 分别为 66.25% 、 75.43% 和 80.62% , 毛竹层碳贮量比例分别为 32.61% 、 23.43% 和 17.69% , 凋落物层碳贮量比例分别为 1.14% 、 1.15% 和 1.69% 。毛竹生物器官中, 竹秆固碳能力最强, 占年总固碳量比例为 $56.47\% \sim 59.66\%$, 鞭根的固碳能力最弱, 占年总固碳量的比例仅为 $2.52\% \sim 2.83\%$; 毛竹林年固碳量排序为 类型 > 类型 > 类型。

关键词 毛竹; 碳密度; 碳贮量; 碳格局; 闽西

中图分类号 Q948.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2009)08-1482-07

Effects of different tending measures on carbon density, storage, and allocation pattern of *Phyllostachy edulis* forests in western Fujian Province. QI Liang-hua, LIU Guang-lu, FAN Shao-hui, YUE Xiang-hua, ZHANG Hua, DU Man-yi (International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(8): 1482-1488.

Abstract: Carbon density, storage, and distribution pattern of *Phyllostachy edulis* forests in Yonggan County, Fujian Province were studied under three tending measures including types (digging shoots, weeding, fertilizing and irrigating), (digging shoots, weeding and fertilizing) and (digging shoots and weeding). The carbon density of different bamboo organs varied from 0.3947 to $0.5619 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, and was in the order of rhizome > stem > branch > culm stump > leaf > root > rhizome root. The bamboos of different ages had significant differences in the carbon densities of stem, branch, leaf, and root ($P < 0.01$), but no significant differences in the carbon density of culm stump ($P > 0.1$). The average carbon density of 1-6 years old *P. edulis* was $0.4579 \sim 0.4957 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, and there was a decreasing trend with increasing age. Under the management types, , and , the total carbon storage of the forest was 227.37 , 261.66 and $288.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the carbon storage of bamboo layer, litter layer, and soil layer was 76.74 , 64.30 , and $55.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 2.59 , 3.01 , and $4.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and 150.64 , 197.36 , and $232.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. In the total carbon storage of the forest, bamboo layer occupied 32.61% in type, 23.43% in type and 17.69% in type, litter layer occupied 1.14% in type, 1.15% in type and 1.69% in type, and soil layer occupied 66.25% in type, 75.43% in type and 80.62% in type. The annual carbon fixation was in the order of

^{*} 国家“十一五”科技支撑专项 (2006BAD19B0103, 2006BAD19B0104, 2006BAD19B0302) 和国际竹藤网络中心基本业务资助专项 (06/07-B17)。

^{**} 通讯作者 E-mail: fansh@icbr.ac.cn

收稿日期: 2008-11-20 接受日期: 2009-05-03

type > type > type, and was the highest (56.47%-59.66% of the total) in bamboo stem and the lowest (2.52%-2.83%) in rhizome root

Key words: *Phyllostachy edulis*; carbon density; carbon storage; carbon distribution pattern; western Fujian Province

森林生态系统对现在及未来的气候变化及碳平衡有重要意义 (Gower *et al*, 1997), 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% (方精云和陈安平, 2001)。毛竹 (*Phyllostachy edulis*) 林是我国南方最重要、最典型的竹林资源类型, 占全国竹林面积的 70% 左右。近年来, 由于片面追求经济效益, 许多天然粗放经营的毛竹林转变为集约经营状态 (徐秋芳等, 2003)。集约经营毛竹林在获得更高经济收益的同时, 也造成土壤理化性质的恶化 (徐秋芳等, 2003), 严重影响毛竹林的可持续经营 (陈双林等, 2004)。植被碳贮量和分配格局是反映生态系统功能的重要指标 (Kurz & Apps, 1999; Houghton *et al*, 2001; Adu-Bredu & Hagihara, 2003; Law *et al*, 2003), 对毛竹林碳贮量和空间分布特征进行研究, 可以了解毛竹林生态系统能量平衡、能量流动和养分循环等功能过程的变化规律。有关竹林碳贮量及空间分布的研究已有报道 (周国模和姜培坤, 2004; 肖复明等, 2007), 但多集中于土壤碳贮量、分布及其季节动态等方面 (徐秋芳等, 2003; 高志勤和傅懋毅, 2006; 周国模等, 2006), 而从生态系统尺度对不同抚育措施条件下毛竹林碳密度、碳贮量及其分布格局的研究较少。本文以福建省永安市不同抚育措施的毛竹林类型为研究对象, 对其碳贮量及空间分配格局进行了研究, 揭示不同抚育措施对毛竹林碳贮量和空间分布规律的影响, 为毛竹林碳汇功能的评价和毛竹林生态经营提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于福建省永安市天宝岩国家级自然保护区试验区的西洋镇桂溪村 (117°31'E—117°33.5'E, 25°55'N—25°58'N), 属于戴云山余脉, 中低山地貌, 海拔 580~1604.8 m。亚热带东南季风气候型, 平均气温 23℃, 最低温 -11℃, 最高温 40℃, 无霜期 290 d, 平均降水量 2000 mm, ≥10℃的活动积温 4520~5800℃, 持续天数为 225~250 d, 空气相对湿度月均为 80% 左右。竹林主要分布

在海拔 800 m 以下, 土壤为红壤。研究区内竹林覆盖率 96.8%, 主要为毛竹, 其间混生江南油杉 (*Keteleeria cyclolepis*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、杨梅 (*Myrica rubra*)、南酸枣 (*Choerospondias axillaris*)、鹅掌楸 (*Liriodendron chinense*) 和木荷 (*Schima superba*) 等树种 (刘广路等, 2008)。

1.2 研究方法

1.2.1 抚育措施与样地调查 2007年9月在研究区内选择有代表性且立地条件相似的毛竹纯林, 按照抚育措施类型的不同设置 (挖笋+劈草+施肥+灌水)、(挖笋+劈草+施肥) 和 (挖笋+劈草) 3类固定样地各 4个, 共 12个, 样地面积为 400 m²。挖笋为每年 3月前挖取冬笋; 劈草为 6月、9月进行 2次作业; 肥料为毛竹专用肥 (总养分含量 ≥30%, N P₂O₅ K₂O = 9 5 6), 施肥用量为每株 0.25 kg。挖穴施, 穴深为 40 cm; 灌水为 9月份对样地进行灌溉 1次。调查样地所处立地条件, 样地内进行每竹检尺, 详细记录立竹胸径、全高、冠幅、枝下高、立竹年龄、立竹密度等因子 (表 1)。

1.2.2 毛竹生物量与生产力测定 研究样地为人工经营毛竹纯林, 林下植被极少, 毛竹林生物量主要为毛竹生物量。采用收获法测定毛竹生物量 (漆良华等, 2007)。根据样地调查资料, 分别计算出 3种抚育措施下毛竹林分的平均立竹密度和立竹平均胸径, 每种类型毛竹林选取不同年龄阶段 (1~6年) 毛竹各 2株共 12株作为标准竹带砍伐竹, 共采伐毛竹 36根。毛竹伐倒后, 按秆、枝、叶、根、秆基+秆柄分别称取鲜质量; 竹鞭生物量的调查采用挖掘法, 沿样地对角线设置 1 m × 1 m 的小样方 5个, 每 20 cm 为一层, 逐层挖出竹鞭和鞭根, 洗净泥土后滤干称鲜质量。分不同器官各取鲜样带回实验室测定含水率。毛竹林生物量计算公式为:

$$W = \sum_{i=1}^n n_i w_i$$

式中, W 为毛竹林的生物量, n_i 为 i 龄竹株数, w_i 为 i 龄标准竹生物量, i 为竹龄。

根据标准竹所得毛竹生物量, 可以推算出毛竹不同器官的生产力, 公式为:

表 1 样地基本情况

Tab 1 Basic information of sampling plots

样地类型	海拔(m)	坡度	坡向	坡位	平均胸径(cm)	平均高(m)	立竹年龄结构(%)	立竹密度(株·hm ⁻²)
	730	30	南	下	10.70	14.07	20.6 26.5 17.6 21.6 13.7 0	2751
	734	35	南	下	11.30	14.42	16.7 37.5 4.2 29.2 12.5 0	2801
	724	30	东南	下	11.00	14.33	30.1 21.7 20.5 20.5 7.2 0	2551
	719	25	东南	下	9.90	13.65	30.1 17.2 30.1 12.9 8.6 1.1	2726
	686	15	东南	下	12.50	14.12	27.5 13.1 13.1 15.0 29.4 1.9	2551
	727	15	东南	下	10.90	13.99	23.3 19.5 7.5 20.1 28.3 1.3	2501
	722	25	东南	下	10.20	13.71	14.2 21.7 11.3 31.1 21.7 0	2251
	716	20	南	下	9.80	12.02	19.5 30.1 5.7 17.9 19.5 7.3	2776
	789	15	南	下	11.10	14.27	20.9 11.0 26.7 7.0 29.1 5.2	2201
	778	15	南	下	10.80	14.11	23.4 7.4 23.4 4.6 39.4 1.7	2451
	783	20	南	下	11.10	14.65	25.5 9.3 23.5 5.4 29.9 6.4	2751
	703	30	西南	下	9.30	12.31	11.9 25.4 11.0 29.7 7.6 14.4	2626

立竹年龄结构为 1~6 年毛竹株数比。

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

式中, Δw_i 为毛竹地上部分的生产力, n_i 为 i 龄竹株数, w_i 为 i 龄标准竹生物量, i 为竹龄。竹鞭及鞭根生产力通过其生物量的比值推测。

1.2.3 样品采集及分析 生物量样品采集:在测定生物量的同时,按层分组采集标准竹的分析样品。竹秆每 2 m 取 10~20 g 鲜样进行称量,枝、叶分层(上、中、下),根系分级(<0.2 cm、0.2~0.5 cm、>0.5 cm、根头)。

凋落物的采集:样地内随机设置 1 m ×1 m 小样方 5 个,收集样方内的凋落物,称鲜质量,取混合样品带回实验室,测定含水率,并取样进行养分分析。土壤样品采集:分层(0~20、20~40 和 40~60 cm),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。

样品分析:植物、土壤样品中碳素含量测定采用

重铬酸钾法(中国科学院南京土壤研究所,1978)。

1.2.4 碳贮量的计算 毛竹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毛竹碳贮量;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;毛竹、枯落物层和土壤层碳贮量之和为生态系统总碳贮量。其中土壤碳贮量的计算方法:土壤碳贮量=土壤容重×采样深度×土壤碳含量×面积(肖复明等,2007)。

1.3 统计分析

标准误差、方差分析(ANOVA)和 LSD 多重比较均在 SPSS 13.0 中进行计算和分析。

2 结果与分析

2.1 毛竹器官碳密度

毛竹器官碳密度高低与竹龄关系密切。从表 2 可见,不同竹龄间竹秆($P=0.0049$)、竹枝($P=0.00001$)、竹叶($P=0.000002$)、竹根($P=0.0060$)的碳密度存在极显著差异。不同年龄的竹秆、竹枝

表 2 毛竹器官不同年龄碳密度方差分析及多重比较(g·g⁻¹)

Tab 2 ANOVA and multiple comparison of carbon densities for different age *Phyllostachy edulis* organs

竹龄(年)	竹秆	竹枝	竹叶	竹根	竹筴
1	0.5342 ±0.0019 a	0.5015 ±0.0122 a	0.5442 ±0.0076 a	0.4381 ±0.0040 a	0.4746 ±0.0083 a
2	0.4986 ±0.0028 b	0.5305 ±0.0053 b	0.5064 ±0.0117 b	0.4125 ±0.0055 a	0.4560 ±0.0060 a
3	0.5623 ±0.0075 a	0.4993 ±0.0058 a	0.4632 ±0.0053 c	0.4403 ±0.0043 a	0.4806 ±0.0087 a
4	0.5689 ±0.0054 a	0.5517 ±0.0047 c	0.4227 ±0.0004 d	0.4163 ±0.0087 a	0.4534 ±0.0074 a
5	0.5035 ±0.0062 b	0.5108 ±0.0042 a	0.4427 ±0.0067 d	0.4761 ±0.0014 b	0.4561 ±0.0092 a
6	0.5054 ±0.0027 b	0.4527 ±0.0062 d	0.4224 ±0.0064 d	0.4101 ±0.0049 c	0.4502 ±0.0056 a
F	6.12	20.99	30.54	5.80	1.15
P	0.0049	0.00001	0.000002	0.0060	0.3857

数据为平均值±标准误差;不同小写字母表示差异显著。下同。

表 3 不同毛竹器官碳密度均值、方差分析及多重比较 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)
Tab 3 Mean values, ANOVA and multiple comparison of carbon densities for different age *Phyllostachy edulis* organs

器官	碳密度
竹秆	0.5288 $\pm$ 0.0044 a
竹枝	0.5078 $\pm$ 0.0064 b
竹叶	0.4669 $\pm$ 0.0064 c
竹根	0.4322 $\pm$ 0.0048 d
竹筴	0.4742 $\pm$ 0.0060 c
竹鞭	0.5619 $\pm$ 0.0106
鞭根	0.3947 $\pm$ 0.0022
F	28.52
P	4.95 $\times 10^{-15}$

碳密度变异较大,变化范围分别为 0.4986 ~ 0.5689 和 0.4527 ~ 0.5517 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; 1 ~ 3 年竹叶碳密度差异显著并呈逐年下降趋势,4 年后较稳定; 1 ~ 4 年竹根碳密度差异不显著,至 5、6 年时差异达显著水平。竹筴碳密度在不同竹龄间的差异均不显著 ($P = 0.3857$)。

碳密度在毛竹不同器官之间的差异也较大。毛竹各器官碳密度变动范围为 0.3947 ~ 0.5619 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (表 3),各器官碳密度高低依次为竹鞭 (0.5619 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、竹秆 (0.5288 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、竹枝 (0.5078 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、竹筴 (0.4742 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、竹叶 (0.4669 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、竹根 (0.4322 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、鞭根 (0.3947 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。方差分析表明,竹秆、竹枝、竹叶、竹根、竹筴碳密度存在极显著差异 ($F = 28.52, P = 4.95 \times 10^{-15} < 0.01$);多重比较结果表明,仅竹叶与竹筴之间碳密度差异不显著,其他器官之间的碳密度均差异显著。

随着竹龄增加,毛竹平均碳密度有下降趋势 (图 1), 1 ~ 6 年毛竹平均碳密度大小依次为

表 4 毛竹林碳贮量及碳分配

Tab 4 Carbon storage and distribution of *Phyllostachy edulis* forests

层次	生物量				碳贮量				生物量				碳贮量				生物量				碳贮量			
	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	(%)	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	(%)	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	(%)	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	(%)	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	(%)	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	(%)	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	(%)	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	(%)	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	(%)	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	(%)	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	(%)	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	(%)
竹秆	79.85 $\pm$ 1.69	53.19	42.23 $\pm$ 0.90	55.03	69.87 $\pm$ 1.93	54.82	36.95 $\pm$ 1.02	57.47	58.39 $\pm$ 0.63	52.73	30.88 $\pm$ 0.34	55.23												
竹枝	11.90 $\pm$ 0.23	7.93	6.04 $\pm$ 0.12	7.88	10.29 $\pm$ 0.38	8.07	5.22 $\pm$ 0.19	8.13	8.53 $\pm$ 0.08	7.70	4.33 $\pm$ 0.04	7.74												
竹叶	6.23 $\pm$ 0.14	4.15	2.91 $\pm$ 0.07	3.79	5.24 $\pm$ 0.19	4.11	2.44 $\pm$ 0.09	3.80	4.54 $\pm$ 0.00	4.10	2.12 $\pm$ 0.00	3.79												
竹根	12.24 $\pm$ 0.09	8.15	5.29 $\pm$ 0.04	6.89	10.89 $\pm$ 0.64	8.54	4.71 $\pm$ 0.28	7.32	9.60 $\pm$ 0.31	8.67	4.15 $\pm$ 0.13	7.42												
竹筴	10.87 $\pm$ 0.25	7.24	5.75 $\pm$ 0.13	7.49	9.97 $\pm$ 0.07	7.82	5.27 $\pm$ 0.04	8.20	7.98 $\pm$ 0.12	7.21	4.22 $\pm$ 0.07	7.55												
竹鞭	17.46 $\pm$ 1.01	11.63	9.81 $\pm$ 0.57	12.78	9.14 $\pm$ 0.45	7.17	5.14 $\pm$ 0.25	7.99	7.04 $\pm$ 0.26	6.35	3.95 $\pm$ 0.15	7.07												
鞭根	5.37 $\pm$ 0.59	3.57	2.12 $\pm$ 0.23	2.76	3.97 $\pm$ 0.20	3.11	1.57 $\pm$ 0.08	2.43	3.50 $\pm$ 0.29	3.16	1.38 $\pm$ 0.11	2.47												
小计	143.93	95.88	74.15	96.63	119.36	93.64	61.30	95.33	99.58	89.93	51.04	91.28												
凋落物层	6.19 $\pm$ 0.35	4.13	2.59 $\pm$ 0.17	3.37	8.11 $\pm$ 0.46	6.36	3.01 $\pm$ 0.18	4.68	11.15 $\pm$ 0.34	10.07	4.88 $\pm$ 0.15	8.72												
合计	150.12	100.00	76.74	100.00	127.47	100.00	64.30	100.00	110.73	100.00	55.91	100.00												

0.4957、0.4841、0.4869、0.4860、0.4816 和 0.4579 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,这可能与老龄竹株光合作用能力减弱有关。

2.2 毛竹林碳贮量

抚育措施不同,毛竹林生物量和碳贮量也存在差异 (表 4)。不同抚育措施下 3 种毛竹林生物量的排列顺序为 $> >$, 分别为 143.93、119.36 和 99.58 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$;凋落物层生物量和碳贮量的排列顺序 $> >$,生物量分别为 11.15、8.11 和 6.19 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,碳贮量分别为 4.88、3.01 和 2.59 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$;碳贮量的排列顺序与生物量的顺序相同,分别为 76.74、64.30 和 55.91 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

不同抚育措施毛竹林的竹秆、竹枝、竹筴生物量和碳贮量的排列顺序为 $> >$,与高强度抚育毛竹林相比,中等抚育强度可提高毛竹木质组织的生物量及碳贮量的分配比例,而低强度抚育则不利于这些木质组织的生物量和碳贮量的分配比例;竹叶、竹鞭、鞭根生物量和碳贮量的排列顺序为 $> >$,竹叶是毛竹光合作用的重要构件,鞭根是毛竹养分吸收最重要的器官,中、低强度经营降低了毛竹竹叶、竹鞭和鞭根生物量和碳贮量的比例;竹根生物

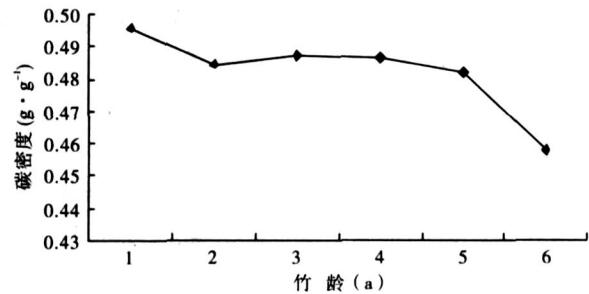


图 1 不同年龄毛竹平均碳密度

Fig 1 *Phyllostachy edulis* average carbon densities in different ages

量和碳贮量的排列顺序为 > > ,竹根是毛竹重要的吸收器官,与鞭根不同,中、低强度抚育有利于毛竹竹根的生物量和碳贮量分配比例的增加。

不同抚育措施毛竹林不同层次生物量和碳贮量也不同。在类型 中,生物量和碳贮量的排列顺序为竹秆 >竹鞭 >竹根 >竹枝 >竹笋 >竹叶 >凋落物 >鞭根,其中地上半部分(竹秆、竹枝、竹叶和凋落物)生物量占 65.25%,碳贮量占 71.19%;类型 中生物量和碳贮量的排列顺序为竹秆 >竹根 >竹枝 >竹笋 >竹鞭 >凋落物 >竹叶 >鞭根,地上部分占 65.29%,碳贮量占 74.08%;类型 的生物量和碳贮量的排列顺序为竹秆 >凋落物 >竹根 >竹枝 >竹笋 >竹鞭 >竹叶 >鞭根,其中地上半部分生物量占 74.60%,碳贮量占 75.48%。可见,中、低强度抚育可以提高地上部分的生物量和碳贮量的分配比例。

2.3 土壤层碳贮量

不同抚育措施下,毛竹林的枯枝落叶和森林动植物残体在数量上不同,造成林地土壤碳含量和碳贮量也不同(表 5)。类型 由于抚育强度最大,对土壤层干扰也最大,导致其 0~60 cm 土层碳密度变异小,为 0.0219~0.0221 g·g⁻¹。类型 、 土壤碳密度随着土层下降而降低,40~60 cm 土层碳密度比 0~20 cm 分别下降 29.45%、20.94%,比 20~40 cm 土层分别下降 43.25%、33.75%,这可能与土温下降和动植物残体数量减少有关。

3种抚育类型毛竹林土壤碳贮量的排列顺序与毛竹林碳贮量的排列顺序存在差异,为 > > ,

分别为 150.64、197.36和 232.56 t·hm⁻²。类型 毛竹林土壤不同层次碳贮量排序为 0~20 cm <20~40 cm <40~60 cm,占土壤碳贮量比例分别为 30.1%、34.65%和 35.25%;类型 0~20 cm 碳贮量最高,20~40和 40~60 cm 碳贮量比较接近,占土壤层碳贮量的比例分别为 42.33%、28.73%和 28.94%;类型 土壤碳贮量随着土壤深度增加而下降,所占比例分别为 41.03%、32.68%和 26.29%。

2.4 毛竹林生态系统碳贮量与分配

由表 6可知,3种抚育类型毛竹林生态系统总碳贮量的排列顺序为 (288.47 t·hm⁻²) > (261.66 t·hm⁻²) > (227.37 t·hm⁻²)。土壤碳贮量占总碳贮量的比例分别为 80.62%、75.43%和 66.25%。毛竹层碳贮量的排列顺序与总碳贮量的排列顺序相反,为 > > ,所占比例分别为 32.61%、23.43%和 17.69%。土壤有机碳是土壤营养物质的重要来源,类型 地上部分生物量和碳贮量最大,比类型 和 消耗了更多的营养物质,因而其土壤碳贮量最低。3种毛竹林生态系统不同层次碳贮量排列顺序均为土壤层 >毛竹层 >凋落物层,类型 、 、 土壤层碳贮量分别为毛竹层的 2.03倍、3.22倍和 4.56倍,表明土壤是毛竹林生态系统碳的主要贮存库。

2.5 毛竹林年固碳量的推算

由表 7可知,不同抚育类型毛竹林不同器官的固碳能力不尽相同,但均以竹秆固碳能力最强,占年总固碳量的比例为 56.47%~59.66%,鞭根的固碳

表 5 土壤层碳密度及碳贮量
Tab 5 Carbon densities and carbon storages in different soil layers

土层 (cm)	容重 (kg·m ⁻³)	碳密度 (g·g ⁻¹)	碳贮量 (t·hm ⁻²)	容重 (kg·m ⁻³)	碳密度 (g·g ⁻¹)	碳贮量 (t·hm ⁻²)	容重 (kg·m ⁻³)	碳密度 (g·g ⁻¹)	碳贮量 (t·hm ⁻²)
0~20	1028.67 ± 23.27	0.0220 ± 0.0001	45.34 ± 0.29	1282.20 ± 26.42	0.0326 ± 0.0003	83.55 ± 0.96	1054.33 ± 84.11	0.0320 ± 0.0010	95.41 ± 3.79
20~40	1182.33 ± 33.24	0.0221 ± 0.0001	52.20 ± 0.23	1372.92 ± 32.18	0.0230 ± 0.0032	56.71 ± 7.74	1295.33 ± 18.66	0.0253 ± 0.0008	76.00 ± 2.32
40~60	1213.17 ± 55.65	0.0219 ± 0.0000	53.10 ± 0.06	1501.92 ± 34.65	0.0185 ± 0.0029	57.11 ± 9.05	1433.83 ± 14.48	0.0212 ± 0.0019	61.15 ± 6.35
合计			150.64			197.36			232.56

表 6 不同抚育类型毛竹林碳贮量与分配
Tab 6 Carbon storage and distribution in different tending *Phyllostachy edulis* forests

类型	毛竹层		凋落物层		土壤层		合计 (t·hm ⁻²)
	(t·hm ⁻²)	比例 (%)	(t·hm ⁻²)	比例 (%)	(t·hm ⁻²)	比例 (%)	
	74.15 ±2.05	32.61	2.59 ±0.17	1.14	150.64 ±0.59	66.25	227.37
	61.30 ±1.95	23.43	3.01 ±0.18	1.15	197.36 ±17.75	75.43	261.66
	51.04 ±0.84	17.69	4.88 ±0.15	1.69	232.56 ±12.46	80.62	288.47

表 7 不同抚育类型毛竹林各组分年净固碳量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
Tab 7 Annual net fixation carbon in different organs in different tending *Phyllostachy edulis* forests

器官	生产力	年固碳量	折合 CO_2 量	生产力	年固碳量	折合 CO_2 量	生产力	年固碳量	折合 CO_2 量
竹秆	36.4363 ± 0.6948	19.2678 ± 0.3674	70.6487 ± 1.3473	30.2497 ± 1.8723	15.9963 ± 0.9901	58.6531 ± 3.6303	22.6977 ± 0.1539	12.0027 ± 0.0814	44.0101 ± 0.2985
竹枝	5.7604 ± 0.0975	2.9249 ± 0.0495	10.7246 ± 0.1815	4.6500 ± 0.3725	2.3610 ± 0.1891	8.6572 ± 0.6935	3.4900 ± 0.0149	1.7721 ± 0.0076	6.4976 ± 0.0278
竹叶	3.1156 ± 0.0718	1.4547 ± 0.0335	5.3339 ± 0.1230	2.6180 ± 0.0971	1.2224 ± 0.0453	4.4820 ± 0.1662	2.2713 ± 0.0020	1.0605 ± 0.0009	3.8886 ± 0.0034
竹根	5.9187 ± 0.0526	2.5583 ± 0.0228	9.3806 ± 0.0834	4.8992 ± 0.4570	2.1177 ± 0.1975	7.7647 ± 0.7243	3.7258 ± 0.0435	1.6104 ± 0.0188	5.9049 ± 0.0690
竹蔸	4.6710 ± 0.0926	2.4701 ± 0.0490	9.0570 ± 0.1796	4.0720 ± 0.1651	2.1533 ± 0.0873	7.8955 ± 0.3201	2.9632 ± 0.0311	1.5670 ± 0.0164	5.7455 ± 0.0603
竹鞭	7.9685 ± 0.4706	4.4772 ± 0.2644	16.4166 ± 0.9696	3.9426 ± 0.1734	2.2152 ± 0.0974	8.1226 ± 0.3573	2.7359 ± 0.1062	1.5670 ± 0.0164	5.6365 ± 0.2188
鞭根	2.4495 ± 0.2721	0.9667 ± 0.1074	3.5447 ± 0.3937	1.7112 ± 0.0777	0.6753 ± 0.0307	2.4762 ± 0.1124	1.3611 ± 0.1146	0.5372 ± 0.0452	1.9697 ± 0.1659
合计	66.3201	34.1198	125.1061	52.1427	26.7413	98.0514	39.2450	20.1169	73.6528

能力最弱,占年总固碳量的比例为 2.52% ~ 2.83%。在 3 种类型毛竹林中,竹鞭年固碳能力的差别最大,类型 竹鞭的固碳能力最高,分别为类型 、 的 1.58 倍和 1.68 倍。 、 和 类毛竹林的年生产力、年固碳量和同化 CO_2 量的排列顺序为 $> >$,年固碳量分别为 34.1198、26.7413 和 $20.1169 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,相当于年同化 CO_2 量 125.1061、98.0514 和 $76.6528 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中类型 毛竹林年同化 CO_2 量为类型 、 的 1.28 倍和 1.63 倍。

3 讨 论

毛竹各器官碳密度为 $0.3947 \sim 0.5619 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$,各器官碳密度高低依次为竹鞭 ($0.5619 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)、竹秆 ($0.5288 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)、竹枝 ($0.5078 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)、竹蔸 ($0.4742 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)、竹叶 ($0.4669 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)、竹根 ($0.4322 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)、鞭根 ($0.3947 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)。这与周国模和姜培坤 (2004) 研究结果基本一致 ($0.4683 \sim 0.5210 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)。毛竹不同器官碳密度的差异,可能与竹林所处地理位置、林分年龄、器官生长速度及其老化程度有关 (田大伦等, 2004)。毛竹同一器官碳密度高低与竹龄关系密切,这与肖复明等 (2007) 研究结果一致,不同竹龄间竹秆、竹枝、竹叶、竹根存在极显著差异 ($P < 0.01$),其原因可能与毛竹特殊的生物学特性、生长规律和抚育措施有关。随着竹龄增加,毛竹平均碳密度有下降趋势,1 ~ 6 年毛竹平均碳密度大小依次为 0.4957、0.4841、0.4869、0.4860、0.4816 和 $0.4579 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$,这可能与老龄竹株光合作用能力减弱有关。

不同抚育条件下, 、 和 类毛竹层碳贮量的排序为 $(76.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}) > (64.30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}) > (55.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$,表明低强度抚育条件下毛竹林地上部分的碳贮量接近于我国森林植被平均碳贮量 ($57.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),高于温带 ($43.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 及暖温带针叶林 ($44.97 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),低于全国热带、亚热带针叶林 ($63.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),而中、高强度抚育的毛竹林的碳贮量高于全国热带、亚热带针叶林 (周玉荣和于振良, 2000),这主要是由于集约经营的抚育模式,极大地提高了竹林生物量和生产力。凋落物层碳贮量的排序为 $(4.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}) > (3.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}) > (2.59 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$,土壤碳贮量排序为 $(232.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}) > (197.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}) > (150.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$ 。3 种类型毛竹林生态系统总碳贮量排序为 $(288.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}) > (261.66 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}) > (227.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$,其中土壤为主要碳贮存库,其所占总碳贮量的比例分别为 80.62%、75.43% 和 66.25%。

森林生态系统的生产力研究的主要内容之一是确定系统同化 CO_2 的能力。毛竹生物器官中,竹秆固碳能力最强,占年总固碳量比例为 56.47% ~ 59.66%,鞭根的固碳能力最弱,占年总固碳量的比例仅 2.52% ~ 2.83%。在 3 种类型毛竹林中,竹鞭年固碳能力的差别最大,类型 竹鞭的固碳能力最高,分别为类型 、 的 1.58 倍和 1.68 倍。 、 和 类毛竹林年固碳量排序为 $(34.1198 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}) > (26.7413 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}) > (20.1169 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$ 。

参考文献

- 陈双林, 萧江华, 薛建辉. 2004 竹林水文生态效应研究综述. 林业科学研究, 17(3): 399-404
- 方精云, 陈安平. 2001 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 43(9): 967-973
- 高志勤, 傅懋毅. 2006 不同毛竹林土壤碳氮养分的季节变化特征. 浙江林学院学报, 22(3): 248-254
- 刘广路, 范少辉, 漆良华, 等. 2008 不同类型毛竹林土壤渗透性研究. 水土保持学报, 22(6): 44-47
- 漆良华, 彭镇华, 张旭东, 等. 2007 退化土地植被恢复群落物种多样性与生物量分配格局. 生态学杂志, 26(11): 1697-1702
- 田大伦, 方 晰, 项文化. 2004 湖南会同杉木人工林生态系统碳素密度. 生态学报, 24(11): 2382-2386
- 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 等. 2007 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, 27(7): 2794-2801
- 徐秋芳, 徐建明, 姜培坤. 2003 集约经营毛竹林土壤活性有机碳库研究. 水土保持学报, 17(4): 15-17
- 中国科学院南京土壤研究所. 1978 土壤理化分析. 上海: 上海科技出版社.
- 周国模, 姜培坤. 2004 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布. 林业科学, 40(6): 20-24
- 周国模, 吴家森, 姜培坤. 2006 不同管理模式对毛竹林碳贮量的影响. 北京林业大学学报, 28(6): 51-55
- 周玉荣, 于振良. 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
- Adu-Bredu S, Hagihara A. 2003 Long-term carbon budget of the above-ground parts of a young hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) stand. *Ecological Research*, 18: 165-175
- Gower ST, Vogel JG, Norman JM, et al. 1997. Carbon distribution and aboveground net primary production in aspen, jack pine, and black spruce stands in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 102: 29-41
- Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, et al. 2001. *Climate Change 2001*. Cambridge: Cambridge University Press
- Kurz WA, Apps MJ. 1999. A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. *Ecological Applications*, 9: 526-547
- Law BE, Sun OJ, Campbell J, et al. 2003. Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine. *Global Change Biology*, 9: 510-524

作者简介 漆良华,男,1976年生,博士,助理研究员。主要从事森林培育、生态恢复等方面研究,发表论文 20 余篇。
E-mail: qilianghua2008@yahoo.com.cn
责任编辑 王 伟