

DOI: 10.5846/stxb201211151603

张蕊, 申贵仓, 张旭东, 张雷, 高升华. 四川长宁毛竹林碳储量与碳汇能力估测. 生态学报, 2014, 34(13): 3592-3601.

Zhang R, Shen G C, Zhang X D, Zhang L, Gao S H. Carbon stock and sequestration of a *Phyllostachys edulis* forest in Changning, Sichuan Province. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3592-3601.

四川长宁毛竹林碳储量与碳汇能力估测

张蕊¹, 申贵仓², 张旭东^{1,*}, 张雷¹, 高升华¹

(1. 林木遗传育种国家重点实验室, 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 环境保护部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 利用生物量法研究了四川长宁毛竹林 (*Phyllostachys edulis*) 碳密度、碳储量及其空间分配格局, 并对毛竹林碳汇能力进行了估算。结果表明: (1) 毛竹立竹各器官的平均含碳率波动范围为 462.37—480.68 g/kg, 不同龄级毛竹各器官含碳率差异不显著。土壤有机碳含量为 15.77 g/kg, 不同土层差异极显著; (2) 毛竹立竹碳储量为 40.92 t/hm², 其中竹竿碳储量所占比例为 51.49%, 竹秆、竹枝、竹叶地上部分碳储量为 26.76 t/hm², 占立竹碳储量的 65.39%, 地上碳储量为地下碳储量的 1.89 倍; (3) 毛竹林总碳储量为 156.57 t/hm², 其中土壤是其最大的碳库, 为 113.54 t/hm², 占总碳储量的 72.52%, 立竹碳储量所占比例为 26.14%, 林下植被碳库最小, 为 0.52 t/hm², 只占总碳储量的 0.33%, 可忽略不计; (4) 毛竹林年生产量为 20.28 t/hm², 年固碳量为 9.43 t/hm², 相当于每年固定 CO₂ 量 34.57 t/hm², 固碳能力较强。

关键词: 毛竹; 碳密度; 碳储量; 碳汇

Carbon stock and sequestration of a *Phyllostachys edulis* forest in Changning, Sichuan Province

ZHANG Rui¹, SHEN Guicang², ZHANG Xudong^{1,*}, ZHANG Lei¹, GAO Shenghua¹

1 State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China

Abstract: Accurate estimation of carbon stock and sequestration of forests is a key in evaluating forest function in CO₂ mitigation in responding to the climatic change because it holds the largest carbon in terrestrial ecosystems. The complex biological and ecological characters of bamboo hinder such an effort, yet there exists an urgent need doing so due to its widespread, fast growth, high productivity, and multiple uses in Southern China. Here we report a comprehensive study on carbon production and storage, with systematic and accurate accounting of carbon density, storage and spatial distribution in a bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest in Sichuan province using the biometric approach. We found that: (1) difference in carbon density among ages and organs in stumpage bamboo was not significant, with a mean of 472.82 g/kg. The range of carbon density of bamboo organs varied from 462.37 to 480.68 g/kg, with a descending order of sheath, rhizome, branch, stem, leaf, root. The soil carbon density was 15.77 g/kg, but varied significantly among layers. The carbon density was 379.96 g/kg and 377.66 g/kg, respectively, in the understory vegetation and the litter. (2) Carbon storage of the bamboo stand was 40.920 t/hm², with 21.07 t/hm² (51.49% of the total). The bamboo leaves contained the smallest amount (1.78 t/hm², or 4.35%). At our study site, the three-year old bamboo had higher proportion than the other aged stems, accounted for 19.91%. Above and belowground carbon accounted for 65.39% and 34.61%, respectively. The carbon storage of stumpage bamboo had the same distribution among various ages and organs. (3) The carbon storage in the top 30 cm was

基金项目: 国家“十二五”农村领域科技计划子课题(2011BAD38B0405); 国家自然科学基金(41301056)

收稿日期: 2012-11-15; 网络出版日期: 2014-02-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhxd@caf.ac.cn

113.54 t/hm²(69.02%)。 (4) The total carbon storage of the stand was 156.57 t/hm², which is partitioned into 113.54 t/hm²(72.52%), 40.92 t/hm²(26.14%) and 0.52 t/hm²(0.33%) in the soil, stumpage bamboo and understory, respectively. Although there is great differences in carbon storage between *P. edulis* and the other bamboos, the spatial distribution seemed similar. (5) Carbon sequestration of *P. edulis* stand was 9.43 t·hm²·a⁻¹, which is equivalent to 34.57 t/hm² of CO₂.

Key Words: *Phyllostachys edulis*; carbon storage; carbon density; carbon sink

森林是陆地生态系统的主体,也是陆地生态系统中最大的碳库^[1],其中森林植被部分碳库占全球植被碳库的 77.10%^[1],森林土壤碳库储存了全球土壤碳储量的 40%左右^[2-3]。森林在增加碳汇、减缓大气 CO₂ 浓度升高中所发挥的作用越来越突出^[4-5]。竹林是一种重要的森林资源,中国素有“竹子王国”之美誉^[6],竹林面积达 538.10 万 hm²,占森林总面积的 2.76%^[7],且每年以 3% 的速度增加^[6]。我国竹林碳储量为 1.99 亿 t,占中国森林资源碳储量总量的 2.54%^[8],且每年都在持续增加^[3,9-10],这表明竹林是一个不断扩大的碳汇。因此,如何科学计算竹林生态系统的碳储量及动态变化,成为制定碳减排政策、评价竹林碳汇功能的关键。已有学者对我国的竹林生态系统进行碳计量,但由于所研究的竹种、区域、抚育措施及研究方法的不同,导致结果存在较大差异^[3,8-11]。因此,使用国际公认的碳计量规范,在林分尺度上对竹林开展分地域、分竹种的详细研究愈加重要,从而可为全国尺度竹林碳储量的计算,区域及国家碳减排政策的制定、碳交易机制的建立提供科学、准确、全面的支撑。

毛竹(*Phyllostachys edulis*)系禾本科刚竹属多年生散生竹^[12],其分布面积为 386.83 万 hm²,占竹林总面积的 71.89%^[7],是我国分布最广、面积最大的竹种,具有生长快、产量高、用途广的特点,是我国南方重要的森林资源。长期以来,人们大多关注毛竹的经济价值,对毛竹生态功能的系统研究较少,尤其对四川盆地中亚热带湿润气候下毛竹林碳汇能力的准确计量尚未见报道。本文使用物量法,系统研究了蜀南盆地毛竹林碳储量与碳汇能力,为更大尺度的碳计量提供基础数据和参考依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省宜宾市长宁县,东经 104°

45',北纬 28°27'。该区域多为低山丘陵,平均海拔 336m。为典型的中亚热带湿润性季风气候,年均气温 17.3℃,最高 40.7℃,最低 -4.2℃。年降雨量 1104mm,平均日照时间 1112h,空气相对湿度大于 80%。主要土壤类型有山地黄壤、紫色土。竹林为当地最主要的森林类型,以毛竹、苦竹(*Pleioblastus amarus*)、硬头黄竹(*Bambusa rigida*)为主。研究区内毛竹平均胸径 9.9cm,平均竹高 13.5m,立竹度为 3708 株/hm²,竹龄多为四度以下。毛竹林的经营方式为集约经营。林下植被主要有红盖鳞毛蕨(*Dryopteris erythrosora*)、凤尾蕨(*Pteris cretica* var. *intermedia*)、蜈蚣草(*Eremochloa ciliaris*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)、乌蕨(*Sphenomeris chinensis*)、瘤足蕨(*Plagiogyria adnata*)、亮毛蕨(*Acystopteris japonica*)、蕨草(*Humulus scandens*)、千金子(*Leptochloa chinensis*)、鸢尾(*Iris japonica*)、南姜(*Alpinia chinensis*)、黄茅(*Heteropogon contortus*)等。

1.2 样地设置

2011 年 2 月初,在研究区内随机设置 3 个 20m×20m 的样地,四周做好标记,对样地内所有立竹进行每株检尺。根据平均胸径和平均竹高选取 1—6 年生的标准竹各 1 株,7 年生及以上的选 1 株,共 21 棵标准竹。调查所得毛竹林分生长状况见表 1。在各样地中均匀设置 12 个 1m×1m 的样方,收集样方内所有枯落物,称重并取样,并在样方上放置自制的 1m×1m 枯落物收集网。

1.3 取样方法

立竹采用平均标准竹法取样。将标准竹连同竹蔸一同挖起,同时挖取标准竹周围 0.5m×0.5m 范围内出现的所有地下鞭根。分别测定竹秆、竹枝、竹叶、竹蔸、竹根和竹鞭六部分鲜重并选取分析样品称重。竹叶、竹枝分层取样,竹秆采用 0.5m 区分段法

取样,四分法取竹笋,分段混合取竹鞭、竹根。现场测定秆、枝、叶总鲜重及分析样品鲜重。笋、鞭、根先用水洗去表层土壤,待自然风干后称重取样。设定

1—6年生的毛竹两年为一个龄级,7年生以上的为一个龄级。各龄级混合后取样。

表 1 毛竹林生长状况

Table 1 Growth status of *P. edulis* stand

竹龄 Age/a	平均胸径 Mean DBH/cm	平均竹高 Mean Height/m	立竹度 Density/(株/hm ²)
1	9.93	14.23	592
2	9.33	13.07	275
3	10.07	13.77	658
4	9.80	13.70	642
5	9.80	12.97	542
6	9.90	12.93	542
7	10.13	14.13	458
平均 Mean	9.85	13.54	
总计 Total			3708

林下植被及枯落物采用样方调查法取样。设置的 12 个枯落物收集网,每月收集 1 次,称重取样,连续收集 1a,以测定枯落物年生产量。林下植被调查于 2011 年 11 月进行,记录设置的 12 个 1m×1m 样方内所有植物的高度、盖度、丛(株)数后收割称重并取样。

土壤采用剖面法取样。在各样地中沿两条对角线,以固定间隔均匀挖取 4 个 1m×1m 的土壤剖面,用环刀每隔 10cm 分层取样,直至土壤母质层。剔除直径大于 2mm 的根系后称重,并带回实验室测定。同时,收集土壤剖面中挖出的所有鞭根,漂洗风干后称重取样,以估算样地内地下鞭根总生物量。

1.4 样品测定

将选取的立竹各器官、林下植被、枯落物及土壤样品,称重后置于 65℃ 恒温箱中,烘干后再称重,并计算植被层生物量,枯落物干重,土壤容重等。立竹各器官、枯落物、林下植被含碳率使用重铬酸钾氧化容量法测定,土壤有机碳使用浓硫酸消煮-重铬酸钾氧化容量法测定^[13]。

1.5 分析方法

1.5.1 现存碳储量

立竹各器官生物量与其含碳率乘积之和为立竹碳储量,林下植被生物量与其含碳率乘积为林下植被碳储量,枯落物干重与含碳率之积为枯落物碳储量,土壤各层容重、有机碳含量、厚度乘积之和为土壤碳储量。立竹、林下植被、枯落物、土壤碳储量总和为毛竹林碳储量。

1.5.2 碳汇估算

本文只估算毛竹林植被层的年固碳量,土壤年固碳量不做计算。因为本研究周期短,土壤碳周转速率慢,碳储量变化量不大,且土壤固碳过程较复杂,不确定性高,故本文未做探讨。根据毛竹林净初级生产力,换算年固碳量,进而评估毛竹林碳汇能力。

由于毛竹林是典型的异龄林分,又是笋竹两用林,每年都有新笋成竹和择伐,使毛竹林分密度永远处于动态平衡。因此,毛竹林净初级生产力可用现存各龄级标准竹连年生长量估算,公式如下:

$$W = W_a + W_b + W_u + W_l = \sum N_i(W_i - W_{i-1}) + \frac{1}{k} \sum N_i(W_i - W_{i-1}) + W_u + W_l$$

式中, W 为毛竹林年净生产量(t/hm²), W_a 为立竹地上部分(竹秆、竹枝、竹叶)年生产量(t/hm²), W_b 为立竹地下部分(竹笋、竹根、竹鞭)年生产量(t/hm²), W_u 为林下植被年生产量(t/hm²), W_l 为枯落物年生产量(t/hm²), N_i 为第 i 龄级立竹株数, W_i 为第 i 龄级标准竹地上部分生物量(t/hm²), i 为龄级, k 为立竹地上、地下现存生物量比率。

1.5.3 数据处理

数据统计分析采用软件 SPSS 20.0,通过 One-way ANOVA 在 95% 置信度水平上,用 LSD 法比较不同处理间的差异显著性。使用软件 Sigmaplot 11.0 作图。

2 结果与分析

2.1 立竹碳储量

2.1.1 立竹各器官生物量

毛竹林立竹生物量的年龄及器官分配格局如图 1 A、B、C 所示。由图可知,研究区内毛竹林各器官总生物量为 87.38 t/hm²,1 至 6 年生各器官累计生物量分别为 14.47、4.53、17.76、14.29、11.44、12.97 t/hm²,7a 以上毛竹各器官累计生物量为 11.92 t/hm²(图 1 A,B)。其中,3 年生毛竹生物量最大,占总生物量的 20.33%,2 年生毛竹生物量最小,只占

5.18%,这是因为样地内 2 年生毛竹立竹度最小。因为毛竹生长有大小年之分,2 年生毛竹成竹当年处于生产量较少的小年,前年干旱出笋量较少,加之竹笋的挖掘,使 2 年生毛竹立竹度明显减小。毛竹各器官生物量差异较大,最高的为竹竿,其次为竹根,竹叶最低(图 1 A),各龄级中竹秆生物量的比重在 47.98%—58.63%之间,竹根的平均比重为 17.68%(图 1 C)。毛竹地上部分(秆、枝、叶)生物量总计 57.31 t/hm²,地下部分(蔸、根、鞭)总计 30.07 t/hm²,地上、地下比为 1.91(图 1 B,C)。

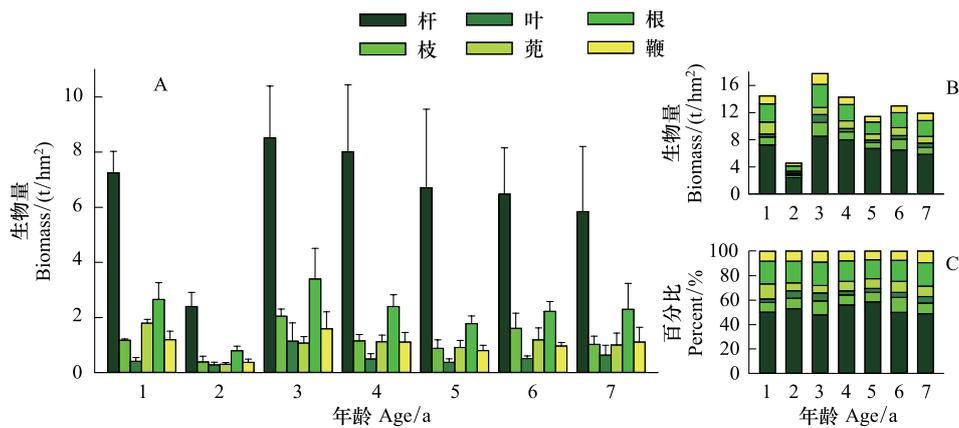


图 1 毛竹各器官生物量

Fig.1 Biomass of organs for *P. edulis*

图 A 为不同年龄毛竹各器官生物量;图 B 为各器官累计生物量;图 C 为各器官生物量所占比重

2.1.2 立竹各器官含碳率

不同龄级毛竹各器官含碳率差异不显著($n=3$,

$P>0.05$),各龄级器官含碳率变化规律不明显(图 2 A)。毛竹不同器官的平均含碳率波动范围为

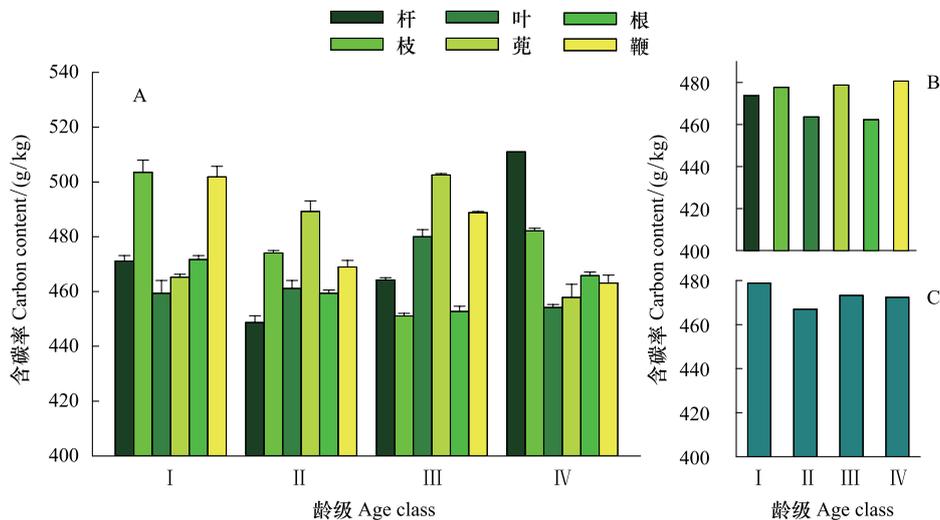


图 2 不同龄级毛竹各器官含碳率

Fig.2 Carbon content of organs for *P. edulis* in varying age classes

图 A 为不同龄级毛竹各器官含碳率;图 B 为各器官平均含碳率;图 C 为各龄级毛竹平均含碳率

462.37—480.68 g/kg(图 2 B),从大到小依次为竹鞭>竹兜>竹枝>竹笋>竹叶>竹根。各龄级毛竹的平均含碳率波动范围为 466.91—478.78 g/kg,由大到小顺序为 I>III>IV>II(图 2 C),说明毛竹含碳率与林龄无明显相关性,随竹龄的增长无明显的变化规律,与前人对毛竹的研究结果相似^[14-15]。这可能是毛竹特有的生物学特性和生长特性所致。

2.1.3 立竹各器官碳储量及其分布

由表 2 可知,研究区内毛竹立竹总碳储量为 40.92 t/hm²,其生物量与碳储量的转换系数为 0.47。碳储量在各年龄的分布中,3 年生毛竹碳储量所占比例最大,达 19.91%,2 年生毛竹因立竹度较小的缘

故,碳储量比例最小,为 5.26%,其余各龄级毛竹碳储量差异不大,占总碳储量的比例在 13.05%—16.81%之间。碳储量在各器官的分布中,各龄级均为竹秆最多,其碳储量总和为 21.07 t/hm²,占总碳储量的一半以上(51.49%)。其次为竹根,所占比例为 17.52%,然后依次为竹枝、竹兜、竹鞭,三者相差不大。竹叶碳储量最少,仅占 4.35%。毛竹立竹地上部分(秆、枝、叶)总的碳储量为 26.76 t/hm²,占总碳储量的 65.39%,地下部分(兜、根、鞭)为 14.16 t/hm²,占总碳储量 34.61%,地上、地下比为 1.89。竹林碳储量在年龄、器官中的分配与生物量基本一致,说明植被的碳储量与生物量具有一定的相关性。

表 2 毛竹不同竹龄各器官碳储量

Table 2 Carbon storage of organs for *P. edulis* in varying ages

竹龄 Age/a	竹秆/(t/hm ²) Stem	竹枝/(t/hm ²) Branch	竹叶/(t/hm ²) Leaf	竹兜/(t/hm ²) Rhizome	竹根/(t/hm ²) Root	竹鞭/(t/hm ²) Sheath	总计/(t/hm ²) Total	比例 Percent/%
1	3.415±0.36	0.589±0.03	0.187±0.06	0.835±0.07	1.251±0.28	0.599±0.15	6.877	16.81
2	1.132±0.24	0.196±0.10	0.13±0.04	0.139±0.03	0.375±0.07	0.185±0.06	2.154	5.26
3	3.823±0.84	0.967±0.12	0.52±0.30	0.526±0.11	1.559±0.51	0.745±0.28	8.146	19.91
4	3.593±1.09	0.546±0.10	0.23±0.08	0.549±0.12	1.103±0.19	0.521±0.16	6.542	15.98
5	3.113±1.32	0.397±0.14	0.17±0.06	0.457±0.13	0.804±0.12	0.390±0.09	5.338	13.05
6	3.007±0.78	0.723±0.25	0.24±0.04	0.597±0.29	1.006±0.16	0.471±0.06	6.050	14.78
7	2.984±1.21	0.494±0.14	0.29±0.16	0.461±0.19	1.071±0.43	0.514±0.24	5.813	14.21
总计 Total	21.068	3.912	1.781	3.564	7.170	3.426	40.920	100.00
比例 Percent/%	51.49	9.56	4.35	8.71	17.52	8.37	100.00	

2.2 林下植被及枯落物碳储量

研究区内毛竹林进行的抚育经营措施较多,林下植被较少,主要以草本植物为主。林下植被生物量为 1.37 t/hm²,平均含碳率为 379.96 g/kg,碳储量为 0.52 t/hm²。湖南会同毛竹林下植被生物量为 1.50 t/hm²,碳储量为 0.63 t/hm²^[14],与本文结果较为接近。而江西大岗山毛竹林下植被总生物量为 4.01 t/hm²,碳储量为 2.98 t/hm²,大于本文研究,主要是大岗山毛竹林为粗放经营,人为干扰较少,林下有灌木分布^[16]。

毛竹枯落物现存量为 4.21 t/hm²,枯落物含碳率为 377.66 g/kg,枯落物现存碳储量为 1.59 t/hm²,这一结果偏高于前人的研究^[14-15,17],这可能与川南特殊的盆地地形与气候有关,研究区内毛竹生长旺盛,近两年天气干旱造成大量竹叶脱落,故枯落物年生产量较高。

2.3 土壤碳储量

由图 4 可知,随着土壤深度的增加,毛竹林土壤各层容重、有机碳含量与碳储量均表现出明显的变化趋势。随着土层的不断加深,毛竹林土壤容重逐渐增大,由 0—10cm 层的 1.05 g/cm³ 增加到 50—60cm 层的 1.40 g/cm³,各层平均容重为 1.26 g/cm³;而毛竹林土壤有机碳含量和碳储量逐渐减小,分别由 0—10cm 层的 29.17 g/kg、30.53 t/hm² 减小到 50—60cm 层的 7.72 g/kg、10.77 t/hm²,土壤平均有机碳含量为 15.77 g/kg,平均碳储量为 18.92 t/hm²。0—10cm 层的土壤容重、有机碳含量和碳储量与其他各层的差异均达到极显著水平($n=12, P<0.01$)。0—30cm 土层内土壤有机碳含量和碳储量随土壤深度增加急剧减少,差异显著,40—60cm 土壤层变化相对平缓,且两个阶段之间差异较大。因此,为了更准确地计算土壤层碳储量,应根据土壤的不同层次采用不同的含碳量作为转换系数。

毛竹 0—10cm 层的土壤有机碳含量最高,为 50—60cm 层的 3.78 倍。毛竹林土壤总碳储量为 113.54 t/hm²,其中 0—10cm 土壤碳储量为 30.53 t/hm²,占土壤总碳储量的 26.89%,0—30cm 土壤碳储

量占总碳储量的 69.02%,这说明毛竹土壤碳储量主要分布于表层,因为土壤有机碳的最主要来源是表层枯落物,并且毛竹地下鞭根系统大部分集中分布在距地表 50cm 的土层内。

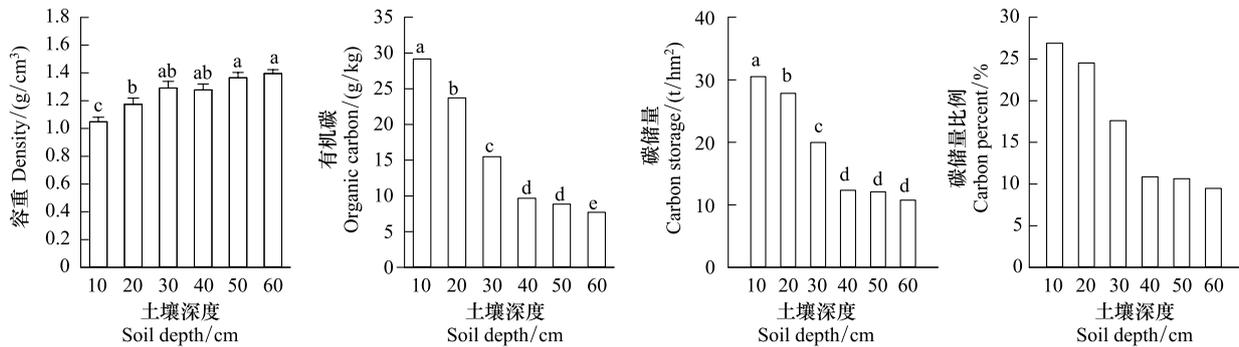


图 3 土壤碳储量

Fig.3 Soil carbon storage

不同字母代表差异显著

2.4 毛竹林碳储量空间分配

毛竹林总碳储量为 156.57 t/hm²,其中土壤碳储量为 113.54 t/hm²,占总碳储量的 72.52%,立竹碳储量为 40.92 t/hm²,占 26.14%,林下植被碳储量为 0.52 t/hm²,占 0.33%,枯落物碳储量为 1.59 t/hm²,占 1.02%。土壤和枯落物碳储量总和占总碳储量的 73.57%,而周国模等研究的浙江临安毛竹这一比值为 67.82%^[15],王兵等研究的江西大岗山毛竹为 63.91%^[16],亚热带广泛分布的杉木林这一比值为 64.62%^[14],本文的结果均高于以上研究,这是因为本文研究区域内毛竹林枯落物年生产量较高,进而碳储量较高,其枯落物碳储量为浙江临安毛竹的 2.42 倍,是江西大岗山的 1.19 倍,较高的枯落物碳

储量,会向土壤输入大量的碳源,因而土壤碳储量也较高。全球森林生态系统中枯落物与土壤碳储量占总碳储量的比例为 76%^[18],本文研究较为接近。

2.5 毛竹林碳汇能力估算

由表 3 可知,毛竹林年净初级生产量为 20.28 t/hm²,相当于年固碳量为 9.43 t/hm²,折合年固定 CO₂ 量为 34.57 t/hm²。其中生态系统植被层年固碳量为 8.26 t/hm²,立竹的年固碳量为 7.74 t/hm²。毛竹林年固碳量最高的部分是立竹地上部分,为 5.06 t/hm²,占毛竹生态系统年总固碳量的 53.69%,最低的是林下植被,年固碳量为 0.52 t/hm²,只占系统年总固碳量的 5.51%。

表 3 毛竹林生产力与碳汇

Table 3 Productivity and carbon sink of *P. edulis* forest

项目 Item	净初级生产力/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹) Net primary productivity	固碳量/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹) Carbon accumulation	固定 CO ₂ 量/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹) CO ₂ accumulation
立竹地上 Bamboo above-ground	10.373	5.062	18.560
立竹地下 Bamboo underground	5.445	2.678	9.820
林下植被 Understory	1.366	0.519	1.903
枯落物 Litter	3.098	1.169	4.286
总计 Total	20.281	9.428	34.569

3 讨论

3.1 毛竹各器官含碳率

含碳率是生物量法估算森林碳储量的关键因

子。以往研究表明浙江临安、湖南会同、江西大岗山、四川宜宾的毛竹各器官含碳率分别为 468.3—521.0 g/kg、445.1—499.1 g/kg、422.2—475.3 g/kg、451.2—531.3 g/kg^[15-17,19],本文所测毛竹各器官含碳

率为 462.37—480.68 g/kg,各研究结果相接近,但也存在一定差异。此外,四川沐川慈竹各器官含碳率为 460.0—510.5 g/kg^[20],华西雨屏区杂交竹为 472.0—513.3 g/kg^[21],四川纳溪孝顺竹为 489.3—522.2 g/kg^[22],四川沐川吊丝单竹为 468.4—509.2 g/kg^[23]。各研究中各个器官的含碳率大小次序也不尽相同。国内外常用的森林树种生物量与碳储量的转换系数是 500 g/kg^[5,24]。由以上研究可以看出,竹子含碳率与含碳率随竹种和器官的不同而有差别,同一竹种在不同区域的含碳率也不相同,且与常用转换系数差别较大。因此,为了科学准确的计量竹林碳汇,必须进行分区域分竹种含碳率的系统研究。

3.2 毛竹生物量的测定

多项研究表明,植被碳储量在不同层次、不同器官中的分配与生物量基本一致,基本成正相关关系。因此生物量的测算一定程度上决定了植被碳储量计算的准确性。竹子特殊的结构与生长习性决定了生物量研究的难度。毛竹为散生竹,林分内不同龄级的立竹共有地下的鞭根系统,因此无法准确区分立竹对应的地下鞭根量。目前大部分学者对立竹鞭根的处理方法有两种,一是以立竹为中心,假定一定面积范围内出现的所有地下鞭根即为该立竹的鞭根量^[25];二是在样地内随机挖取多个样方,以样方内出现的所有鞭根量的均值估算样地内地下鞭根总量^[15-16],法一在立竹密度很大的竹林中无法应用,法二未能区分不同龄级所属鞭根量。本文综合参考了法一、法二,即先用法二测得样地内地下总鞭根量,然后求出样地内所有立竹地上、地下生物量之比,假定各龄级的这一比值不变,结合已测得的各龄级立竹地上生物量,可求出各龄级地下生物量,同理可求得各标准竹对应的地下生物量。一般情况下以法二求得的各龄级地下鞭根生物量为准,若法二测得的值小于法一测得的值时,则以法一值为准。用于测定各龄级立竹对应地下鞭根含碳率样品从法一获得的鞭根中选取。

3.3 毛竹碳储量及其分配格局特征

本文研究所得毛竹立竹总生物量和碳储量分别为 87.372、40.920 t/hm²,与刘应芳对蜀南竹海毛竹林的研究较为接近(80.62、40.88 t/hm²)^[17],而浙江临安毛竹生物量与碳储量分别为 60.65、30.58 t/

hm²^[15],湖南会同毛竹的为 54.67、25.59 t/hm²^[19],江西大岗山毛竹(竹木混交林)的为 40.74、17.05 t/hm²^[16],均小于本文的研究,这可能与不同研究区的气候条件、立竹密度、经营方式及立地条件有关。而吊丝单竹的为 77.786、38.676 t/hm²^[23],慈竹的为 111.70、56.27 t/hm²^[20],孝顺竹的为 6.966、3.570 t/hm²^[22],杂交竹的为 34.179、17.223 t/hm²^[21],苦竹的为 43.92、23.23 t/hm²^[26],不同竹种间立竹碳储量差别较大,这可能与每个竹种的单竹生物量的大小有关。

虽然各研究立竹的碳储量都不相同,但其在器官间的分配格局特征大致相同,均为竹秆所占比例最大,且地上部分所占比例大于地下部分。各毛竹竹秆碳储量的比例都在 50%左右,吊丝单竹、慈竹、孝顺竹、杂交竹和苦竹的分别为 50.46%、62.46%、73.64%、70.12%和 46.19%。地上部分的比例大约在 60%—70%,地下部分的比例约在 40%—30%。但慈竹地上部分和地下比例分别为 81.09%和 18.91%,杂交竹的为 90.96%和 9.04%,孝顺竹的为 92.42%和 7.58%^[15-23,26]。

3.4 毛竹林碳汇能力

以往学者对毛竹林碳储量研究较多,但进一步对其生产力和碳汇能力的研究却很少。毛竹林为典型的异龄林分,每年都有新笋成竹,同时每年都可不定期择伐,竹林生产力在时空上永远处于动态变化中,这就增加了定量研究竹林生态系统生产力的难度。目前学者多采用两种方法近似推算竹林立竹生产力:一是假定每年产生新竹与择伐老竹恰到好处,因而可用现存各龄级立竹生物量数据推算立竹年生产量^[14,27],二是假定每隔一定时期择伐的立竹量占现存量的比例一定,由现存量估算择伐量,进而得知竹林在择伐期内的生产量^[15,20,23,28]。本文推算的毛竹立竹年生产量为 15.82 t/hm²,加上林下植被及枯落物年生产量,毛竹林的年生产量达 20.28 t/hm²,年固碳量 9.43 t/hm²,相当于每年从大气中吸收 CO₂ 的量为 34.57 t/hm²。

本文毛竹的碳汇能力稍高于同地点的苦竹^[29]。由表 4 可知,与亚热带常见的其他树种碳汇能力相比,除中龄的马尾松林外,川南毛竹林的固碳能力均强于其他亚热带常见树种,川南毛竹林固碳能力为浙江临安毛竹林的 1.86 倍,为杉木林的 2.70 倍,楠

木的 2.22 倍,樟树的 1.89 倍,欧美杨的 1.63 倍。由此可见,川南毛竹林生产力更高、固碳能力更强,且为竹笋两用林,经济效益和生态效益都较显著,宜加

大推广营造毛竹碳汇林,使盆地气候下的毛竹林在应对气候变化中发挥更大的碳汇功能。

表 4 不同森林生态系统碳汇能力比较

Table 4 Comparison of carbon sink capacity in different forest ecosystems

森林类型 Forest types	研究地点 Research locations	固碳量/(t·hm ² ·a ⁻¹) Net carbon accumulation	固定 CO ₂ 量/(t·hm ² ·a ⁻¹) Net CO ₂ accumulation	资料来源 Data source
毛竹 <i>Phyllostachys edulis</i>	浙江	5.079	18.623	[15]
吊丝单竹 <i>Dendrocalamopsis vario-striata</i>	浙江	6.446	23.635	[23]
欧美杨 <i>Poplar deltoides</i>	湖南	5.790	21.230	[30]
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	湖南	3.489	12.793	[31]
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	广西	9.072	33.264	[32]
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	湖南	4.980	18.260	[33]
楠木 <i>Phoebe bourmei</i>	四川	4.254	15.598	[34]

4 结论

(1)毛竹各器官的含碳率为 462.37—480.68 g/kg,且竹鞭>竹兜>竹枝>竹笋>竹叶>竹根。毛竹立竹平均含碳率为 472.82 g/kg,不同龄级毛竹各器官含碳率差异不显著,毛竹含碳率与林龄无明显相关性。

(2)毛竹立竹碳储量为 40.92 t/hm²,其中近一半(51.49%)的碳储量位于竹秆中。毛竹立竹地上部分(竹秆、竹枝、竹叶)碳储量达 26.76 t/hm²,占总碳储量的 65.39%,地上碳储量为地下碳储量的 1.89 倍。

(3)毛竹林总碳储量为 156.57 t/hm²,其中土壤碳储量为 113.54 t/hm²,占总碳储量的 72.52%,立竹碳储量为 40.92 t/hm²,占 26.14%,林下植被和枯落物碳储量为 2.11 t/hm²,占 1.35%。

(4)毛竹林年生产量为 20.28 t/hm²,年固碳量为 9.43 t/hm²,相当于每年固定 34.57 t/hm² CO₂。其中立竹部分年固碳量为 7.74 t/hm²,相当于每年固定 28.38 t/hm² CO₂,表明毛竹林固碳能力较强,适宜作为碳汇林推广应用。

致谢:四川省长宁县林业局对野外观测工作给予支持,陈吉泉教授对论文撰写给予指导,特此致谢。

References:

[1] Li H K, Lei Y C, Zeng W S. Forest carbon storage in China estimated using forestry inventory data. *Scientia Silvae Sinicae*,

2011, 47(7): 7-12.

- [2] Marland EG. Marland. The treatment of long-lived, carbon-containing products in inventories of carbon dioxide emissions to the atmosphere. *Environmental Science & Policy*, 2003, 6(2): 139-152.
- [3] Chen X G, Zhang Y P, Zhang X Q, Guo Y. Carbon stock changes in bamboo stands in China over the last 50 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5218-5227.
- [4] Houghton R, Hall F, Goetz S J. Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114 (null): G00E03.
- [5] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [6] Zhou G M, Jiang P K, Xu Q F. Carbon Fixing and Transition in the Ecosystem of Bamboo Stand. Beijing: Science Press, 2010.
- [7] Chinese Ministry of Forestry. Chinese Forest Resource Report; The Seventh Forest Resource Inventory. Beijing: China Forestry Publishing House, 2009.
- [8] Li H K, Lei Y C. Estimation and Evaluation of Forest Biomass Carbon Storage in China. Beijing: China Forestry Press, 2010.
- [9] Wang B, Wei W J, Xing Z K, Li S N, Bai X L. Carbon storage of bamboo forest ecosystem in China. *Ecology and Environment*, 2008, 17: 1680-1684.
- [10] Chen X, Zhang X, Zhang Y, Booth T, He X. Changes of carbon stocks in bamboo stands in China during 100 years. *Forest ecology and management*, 2009, 258(7): 1489-1496.
- [11] Guo Q R, Yang G Y, Du T Z, Shi J M. Carbon Character of Chinese Bamboo Forest. *World Bamboo and Rattan*, 2005, 3(3): 25-28.
- [12] Editorial Committee of China Flora. *Flora of China*, Vol.9, No.1.

- Beijing: Science Press, 1996.
- [13] Lu R K. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [14] Xiao F M, Fan S H, Wang S L, Guan F Y, Yu X J, Shen Z Q. Estimation of the carbon balance in Moso bamboo and Chinese fir plantation ecosystem. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(11): 59-65.
- [15] Zhou G M, Jiang P K. Density, storage and spatial distribution of carbon in *Phyllostachys pubescens* forest. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(6): 20-24.
- [16] Wang B, Yang Q P, Guo Q R, Zhao G D, Fang K. Carbon storage and allocation of *Phyllostachys edulis* forest and evergreen broad-leaved forest in Dagangshan Mountain, Jiangxi. *Guihaia*, 2011, 31(3): 342-348.
- [17] Liu Y F, Huang C D, Chen Q B. Carbon storage and allocation of *Phyllostachys edulis* ecosystem in scenic spot within the southern Sichuan Bamboo Sea. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2010, 28(2): 136-140.
- [18] Dixon R K, Brown S, Houghton R, Solomon A, Trexler M, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science(Washington)*, 1994, 263(5144): 185-189.
- [19] Xiao F M, Fan S H, Wang S L, Xiong C Y, Zhang C, Liu S P, Zhang J. Carbon storage and spatial distribution in *Phyllostachys pubescens* and *Cunninghamia lanceolata* plantation ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2794-2801.
- [20] Wang Y J, Huang C D, Wang X S, Hu T, Zhang G Q. Carbon stock and spatial distribution characteristics of *Neosinocalamus affinis* forest ecosystem. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2009, 36(2): 6-9.
- [21] Liu Z G, Hong Z R. Study on the characteristics of hybrid bamboo carbon stock from converting cropland to forest in the rainy zone of west China. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*. 2011, 39: 10287-10288.
- [22] Shen D Y, Huang C D, Zhang M, Chen Q B. Carbon storage and spatial distribution patterns of *Bambusa multiplex* forest ecosystem in Naxi district of Sichuan Province. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2010, 31(002): 39-42.
- [23] Wang G, Zhou B Z, Li X J, Kong W J, Wen C H, Hu X L. Carbon storage and vertical spatial distribution of *Dendrocalamopsis vario-striata* ecosystem. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2012, 20(1): 72-77.
- [24] Fang J, Chen A, Peng C, Zhao S, Ci L. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [25] Lin X C, Fang W, Li X H, Zhou C P, Zhong X F, Hu C Z. A Study on biomass structure of *Pleioblastus amarus* population. *Journal of Bamboo Research*, 2004, 23(2): 26-29.
- [26] He Y P, Fei S M, Jiang J M. The spatial distribution of organic carbon in *Phyllostachys pubescens* and *Pleioblastus amarus* in Changning county. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2007, 28(5): 10-14.
- [27] Chen H, Hong W, Lan B, Zheng Y S, He D J. Study on biomass and productivity of *Phyllostachys heterocyclus cv pubescens* forest in the north of Fujian. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, 34(S1): 60-64.
- [28] Li J, Huang H D, Zhang G Q. Density, storage and spatial distribution of carbon in *Pleioblastus amarus* forest returned from farmland. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2006, 26(4): 1-4.
- [29] Shen G C, Zhang X D, Zhang L, Gao S H, Zhang R, Zhu W S, Tang S Q. Estimating the Carbon Stock and Carbon Sequestration of the *Pleioblastus amarus* Forest Ecosystem in Southern of Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(3): 78-84.
- [30] Wei Y, Zhang X D, Jiang Z P, Zhou J X, Tang Y X, Wu L X, Huang L L, Gao S H. Study on the seasonal dynamic of net ecosystem exchange over a poplar plantation of Yueyang city in Hu'nan Province. *Forest Research*, 2010, 23(005): 656-665.
- [31] Fang X, Tian D L, Xiang W H. Density, storage and distribution of carbon in Chinese fir plantation at fast growing stage. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(3): 14-19.
- [32] Fang X, Tian D L, Xu C H. Productivity and carbon dynamics of Masson pine plantation. *Journal of Central South Forestry University*, 2003, 23(2): 11-15.
- [33] Lei P F, Xiang W H, Tian D L, Fang X. Carbon storage and distribution in *Cinnamomum camphora* plantation. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(4): 25-30.
- [34] Ma M D, Jiang H, Liu Y J. Biomass, carbon content, carbon storage and their vertical distribution of *Phoebe bourmei* artificial stand. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(3): 34-39.

参考文献:

- [1] 李海奎,雷渊才,曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量. *林业科学*, 2011, 47(7): 7-12.
- [3] 陈先刚,张一平,张小全,郭颖. 过去 50 年中国竹林碳储量变化. *生态学报*, 2008, 28(11): 5218-5227.
- [6] 周国模,姜培坤,徐秋芳. 竹林生态系统中碳的固定与转化. 北京: 科学出版社, 2010:
- [7] 国家林业局. 中国森林资源报告: 第七次全国森林资源清查. 北京: 中国林业出版社, 2009:
- [8] 李海奎,雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [9] 王兵,魏文俊,邢兆凯,李少宁,白秀兰. 中国竹林生态系统的碳储量. *生态环境*, 2008, 17(4): 1680-1684
- [11] 郭起荣,杨光耀,杜天真,施建敏. 中国竹林的碳素特征. *世界竹藤通讯*, 2005, 3(3): 25-28.
- [12] 中国植物志编辑委员会. 中国植物志 1996:
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法中国农业科技出版社, 2000:
- [14] 肖复明,范少辉,汪思龙,官凤英,于小军,申正其. 毛竹、杉木

- 人工林生态系统碳平衡估算. 林业科学, 2010, 46(11): 59-65.
- [15] 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.
- [16] 王兵, 杨清培, 郭起荣, 赵广东, 方楷. 大岗山毛竹林与常绿阔叶林碳储量及分配格局. 广西植物, 2011, 31(3): 342-348.
- [17] 刘应芳, 黄从德, 陈其兵. 蜀南竹海风景区毛竹林生态系统碳储量及其空间分配特征. 四川农业大学学报, 2010, 28(2): 136-140.
- [19] 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.
- [20] 王勇军, 黄从德, 王宪帅, 胡涛, 张国庆. 慈竹林生态系统碳储量及其空间分配特征. 福建林业科技, 2009, 36(2): 6-9.
- [21] 刘正刚, 洪祖荣. 华西雨屏区退耕还林地杂交竹林碳储量特征研究. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 10287-10288.
- [22] 沈迪玉, 黄从德, 张密, 陈其兵. 四川省纳溪区孝顺竹林生态系统碳储量及其空间分配格局. 四川林业科技, 2010, 31(002): 39-42.
- [23] 王刚, 周本智, 李晓靖, 孔维健, 温从辉, 胡晓林. 吊丝单竹林生态系统碳储量及其垂直空间分配特征. 热带亚热带植物学报, 2012, 20(1): 72-77.
- [25] 林新春, 方伟, 李贤海, 周昌平, 钟晓峰, 胡超宗. 苦竹种群生物量结构研究. 竹子研究汇刊, 2004, 23(2): 26-29.
- [26] 何亚平, 费世民, 蒋俊明. 长宁毛竹和苦竹有机碳空间分布格局. 四川林业科技, 2007, 28(5): 10-14.
- [27] 陈辉, 洪伟, 兰斌, 郑郁善, 何东进. 闽北毛竹生物量与生产力的研究. 林业科学, 1998, 34(S1): 60-64.
- [28] 李江, 黄从德, 张国庆. 川西退耕还林地苦竹林碳密度、碳贮量及其空间分布. 浙江林业科技, 2006, 26(4): 1-5.
- [29] 申贵仓, 张旭东, 张雷, 高升华, 张蕊, 朱维双, 唐森强. 蜀南苦竹林生态系统碳储量与碳汇能力估测. 林业科学, 2013, 49(3): 78-84.
- [30] 魏远, 张旭东, 江泽平, 周金星, 汤玉喜, 吴立勋, 黄玲玲, 高升华. 湖南岳阳地区杨树人工林生态系统净碳交换季节动态研究. 林业科学研究, 2010, 23(005): 656-665.
- [31] 方晰, 田大伦, 项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布. 林业科学, 2002, 38(3): 14-19.
- [32] 方晰, 田大伦, 胥灿辉. 马尾松人工林生产与碳素动态. 中南林学院学报, 2003, 23(2): 11-15.
- [33] 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.
- [34] 马明东, 江洪, 刘跃建. 楠木人工林生态系统生物量、碳含量、碳贮量及其分布. 林业科学, 2008, 44(3): 34-39.