

33 年生福建柏人工林碳库与碳吸存

何宗明¹,李丽红²,王义祥¹,邹双全¹,岳永杰¹,王小国¹

(1. 福建农林大学, 福建 南平 353001; 2. 福建农林大学莘口教学林场, 福建 三明 365002)

摘要:通过对福建三明 33 a 生福建柏和杉木人工林生态系统碳库和碳吸存的研究,结果表明,福建柏人工林碳库总量为 236.317 t/hm²,低于杉木林(244.008 t/hm²),其中地上部分和地下部分碳贮量分别占碳库总量 55.92% 和 44.08%。杉木人工林的林下植被和枯枝落叶层碳贮量分别是福建柏人工林的 1.19 倍和 1.20 倍。福建柏人工林乔木层有机碳年均积累量 11~20 a 阶段达最大值,为 5.576 t/hm²·a⁻¹,而杉木人工林最大值(5.817 t/hm²·a⁻¹)较早出现于 6~10 a 阶段。福建柏人工林乔木层 32 至 33 a 碳净固定量为 9.907 t/hm²·a⁻¹,折算成 CO₂ 为 36.326 t/hm²·a⁻¹,是杉木人工林的 1.54 倍,其中凋落物和死细根碳当年归还量分别为 3.769 t/hm²·a⁻¹ 和 1.647 t/hm²·a⁻¹,分别是杉木人工林的 1.75 倍和 1.31 倍。

关键词:碳库;碳吸存;福建柏;杉木

中图分类号:S718.55⁺4.2

文献标识码:A

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)因其速生丰产,在我国南方林区得到很大规模的发展(俞新妥, 1996),随着杉木连栽地力衰退等问题的出现,寻找既速生丰产又能维持地力,在一定范围内替换杉木的树种,已成为南方林区实现林地可持续经营的重要措施之一^[1~3]。福建柏(*Fokienia hodginsii* Henry et Thomas),又称建柏,是我国的特有种,树形美观,树干通直,生长快,材质好,具有较高的经济、生态和美学价值^[4~6]。由于福建柏和杉木生物学特性较为接近,各地造林实践和研究报道亦认为,在较好立地条件下,杉木生长速度超过福建柏,而在中等或较差的立地条件下,福建柏的生长速度则比杉木快,与杉木、樟树、樟树等组成混交林,还可促进目的树种的生长,显示出福建柏在一定范围内替换杉木的潜力^[2,4,7]。本课题组自 1999 年起,在福建农林大学莘口教学林场小湖工区 1967 年营造的较大面积的福建柏和杉木人工林建立定位观察点,对其凋落物和细根性质及其分解过程养分释放、碳吸存、养

分与能量流及土壤肥力等进行为期 3 a 的研究,或许对福建柏在一定范围内替换杉木的潜力探讨有所裨益。本文通过对福建柏和杉木人工林碳库与碳吸存的比较研究,从碳吸存角度评价福建柏与杉木的差异,同时为建立大尺度空间范围内森林的经营管理和调控措施提供依据。

1 试验地概况

试验地位于三明莘口教学林场小湖工区(117°26'00"E, 26°11'30"N),为武夷山脉东伸支脉,属低山丘陵地貌,海拔高度均<500 m。本地属中亚热带季风型气候。年均气温 19.1℃,无霜期 300 d 左右。年均降水量 1749 mm,年均蒸发量 1585 mm,年均相对湿度 81%,冬、春季多雾。土壤均为砂页岩发育的红壤。

福建柏和杉木人工林前身均为格氏栲(*Castanopsis karwakamii*)、米槠(*Castanopsis carlesii*)等

收稿日期(Received date):2002-11-13; **改回日期**(Accepted):2003-01-15。

基金项目(Foundation item):福建省青年科技人才创新项目(2001J038)、福建省科委重大基础科研项目(2000F004)、高等学校骨干教师资助计划项目和福建省自然科学基金(B0110025)资助。[Supported by the Supporting Project of Innovation for Young Researchers in Fujian Province (2001J038), the Major Project of Basic Research of Fujian Science and Technology Committee (2000F004), the Supporting Project for Key Teachers in Universities of the Ministry of Education, and the Provincial Natural Science Foundation of Fujian, China (B0110025).]

作者简介(Biography):何宗明(1965-),男,福建福清人,博士,副研究员。从事森林培育学和森林生态学研究。[HE Zong-ming (1965-), Male, Born in Fuqing, Fujian, Dr., Associate Researcher, Engaged in silviculture and forest ecology studies. Tel: 0599-8502049, Email: hezm@public.npntt.fj.cn]

为主的天然林,1966年经皆伐劈草炼山,穴状整地,1967年初用福建柏和杉木实生苗营造人工纯林,初植密度均为2505株/hm²,1967~1968年每年5月和9月分别对两种幼林进行除草、松土各2次,1969年进行1次(5月)除草松土,杉木林于当年郁闭,而福建柏林则于1970年郁闭。1980年对两种林分进行卫生伐,1990年对两种林分进行强度为30%~40%(材积)间伐。1999年分别在两种林分中坡地段设置20m×20m标准地各5块,进行相关研究。

福建柏人工林标准地坡向北偏东52°,坡度30°,林分保留密度为975株/hm²,平均胸径21.6cm,平均高21.37m,林分蓄积量为420.713m³/hm²,侧枝数量多,枝下高12.9m,林相整齐,林分郁闭度为0.90。灌木层主要为冬青(*Ilex purpurea*)、粗叶榕(*Ficus hirta*)、杜茎山(*Maesa japonica*)、黄瑞木(*Adinandra millettii*)等,生物量为1.673t/hm²;草本层主要为狗脊(*Woodwardia japonica*)、毛鳞省藤(*Calamus thysanolepis*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等,生物量为1.794t/hm²;林内枯枝落叶层的现存量2.652t/hm²。

杉木人工林标准地坡向北偏东50°,坡度为35°,林分保留密度为1117株/hm²,平均胸径23.3cm,平均高21.89m,林分蓄积量为488.618m³/hm²,侧枝少,枝下高15.35m,林分郁闭度0.85。灌木层主要为粗叶榕(*Ficus hirta*)、悬钩子(*Rubus palmatus*)、毛冬青(*Ilex pubescens*)等,生物量为1.993t/hm²;草本层主要为乌毛蕨(*Blechnum orientale*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、观音座莲(*Angiopteris fokiensis*)等,生物量为2.478t/hm²;林内枯枝落叶层的现存量3.155t/hm²。

2 研究方法

2.1 生物量与净生产量的测定

研究时间为1999年1月~2001年12月。1999年1月分别在33a生福建柏和杉木林内设置20m×20m标准地各5块,进行每木调查,各径级选取1~2株标准木,伐倒后用Monsi分层切割法测定地上部分各器官的生物量,并进行解析木测定,地下部分生物量测定采用全挖法(测定直径>0.2cm根系)和土芯法(测定直径<0.2cm细根)相结合,采用相对生长法(Allometric method)^[8]推算单位面积乔木层各器官生物量;直径<0.2cm细根的年归

还量、净增量、净生产量根据定期土钻取样数据(每2个月取1次,土芯直径为6.8cm,深度100cm,每次每个林分取土芯30个),按McClougherty *et al.* (1982)提出的极差公式计算^[9];收集这两片林分以往调查的生物量等数据,采用相对生长法结合平均木解析木生长数据推算1~33a乔木层各器官的年净生产量;灌木层和草本层以及枯枝落叶层生物量现存量采用样方收获法测定;在每个林分内分别随机布设15个0.5m×1m的尼龙网凋落物收集架,每月底定期收集凋落物带回室内进行各组分生物量的测定。

2.2 植株样品收集及有机碳含量的测定

在生物量测定的同时取植株各组分的混合样品用于化学分析。各种植株样品经烘干、粉碎,贮存在试剂瓶中备用。用重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)容量法测定植株有机碳浓度^[10]。

2.3 土壤样品采集及有机碳浓度测定

在福建柏和杉木人工林的每块标准地中按“S”形随机设定取样点5个,每个取样点按0~20cm,20~40cm,40~60cm,60~80cm,80~100cm分层取样。土样在室内自然风干后过0.149mm筛,用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机碳浓度^[10];同时用环刀法取原状土,带回室内测定土壤容重。

2.4 乔木层有机碳年积累的计算

根据乔木层各器官的年净生产量和碳浓度数据推算1~33a各器官的有机碳年积累量,并将碳素年积累量相近的归为同一阶段,据此把33a生林划分为0~5a,6~10a,11~20a,21~30a和31~33a5个碳素积累阶段。

3 结果

3.1 生态系统碳库的大小与分配

3.1.1 乔木层各器官含碳量及贮量

福建柏与杉木乔木层各器官含碳量见表1。福建柏乔木层总的碳贮量为130.460t/hm²,折合成CO₂同化量为478.353t/hm²,与杉木(130.076t/hm²)相近。福建柏和杉木人工林地上部分碳贮量分别占乔木层的85.71%和81.13%(表1)。

3.1.2 土壤有机碳储量

福建柏人工林土壤总的(0~100cm)有机碳储量为102.818t/hm²(折合成CO₂量为376.999t/hm²),小于杉木人工林(110.296t/hm²)。福建柏和

表 1 乔木层各器官含 C 量及 C 贮量

Table 1 Carbon concentration and carbon storage in different components of the tree layer

器 官	福建柏		杉木	
	含 C 量 (%)	C 贮量 (t/hm ²)	含 C 量 (%)	C 贮量 (t/hm ²)
叶	51.63	2.276	53.68	2.062
枝	52.75	10.476	51.90	4.505
枯枝	51.47	3.859	49.90	0.067
干	59.13	84.490	56.31	83.400
皮	54.59	10.716	56.31	15.503
根桩	53.84	9.691	52.69	9.522
>4 cm 根	53.73	4.903	52.39	9.657
2~4 cm 根	56.48	1.784	51.80	3.159
1~2 cm 根	56.34	0.632	50.91	0.830
0.4~1 cm 根	56.87	0.621	53.39	0.739
0.2~0.4 cm 根	52.08	0.381	51.44	0.350
<0.2 cm 根	50.96	0.631	50.34	0.281
合计		130.460		130.076

杉木人工林土壤有机碳贮量均随深度的增加而减小(图 1)。

3.1.3 生态系统碳库及其分配

福建柏人工林碳库贮量为 236.317 t/hm², 低于杉木林(244.008 t/hm²), 其中地上部分和地下部分碳贮量分别占 55.92% 和 44.08%, 杉木林中地上

部分和地下部分碳贮量分别占 54.13 % 和 45.87 % (图 2)。杉木林中林下植被和枯枝落叶层碳贮量分别是福建柏人工林的 1.19 倍和 1.20 倍(图 2)。

3.2 不同生长阶段乔木层有机碳积累动态

33 a 生福建柏人工林乔木层有机碳年均积累量前 20 a 呈现增加趋势, 最大值亦出现在 11~20 a, 之后逐渐减小; 杉木人工林前 10 a 呈现增加趋势, 6~10 a 达到最大, 随后出现减小趋势(图 3)。0~10 a 福建柏有机碳年均积累量小于杉木, 11~20 a 福建柏和杉木有机碳积累量比较接近, 21~30 a 年福建柏有机碳年均积累量明显大于杉木, 之后出现的趋势与 21-30 a 期间的相似(图 3)。

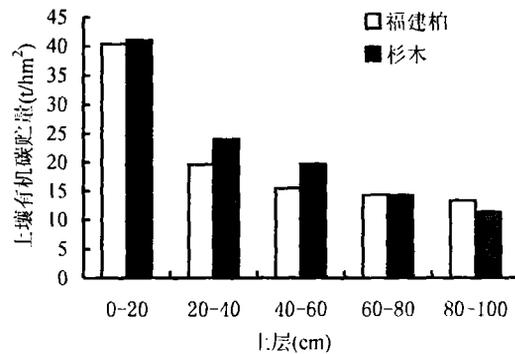


图 1 土壤各层有机碳储量

Fig. 1 Organic carbon storage of different soil layers

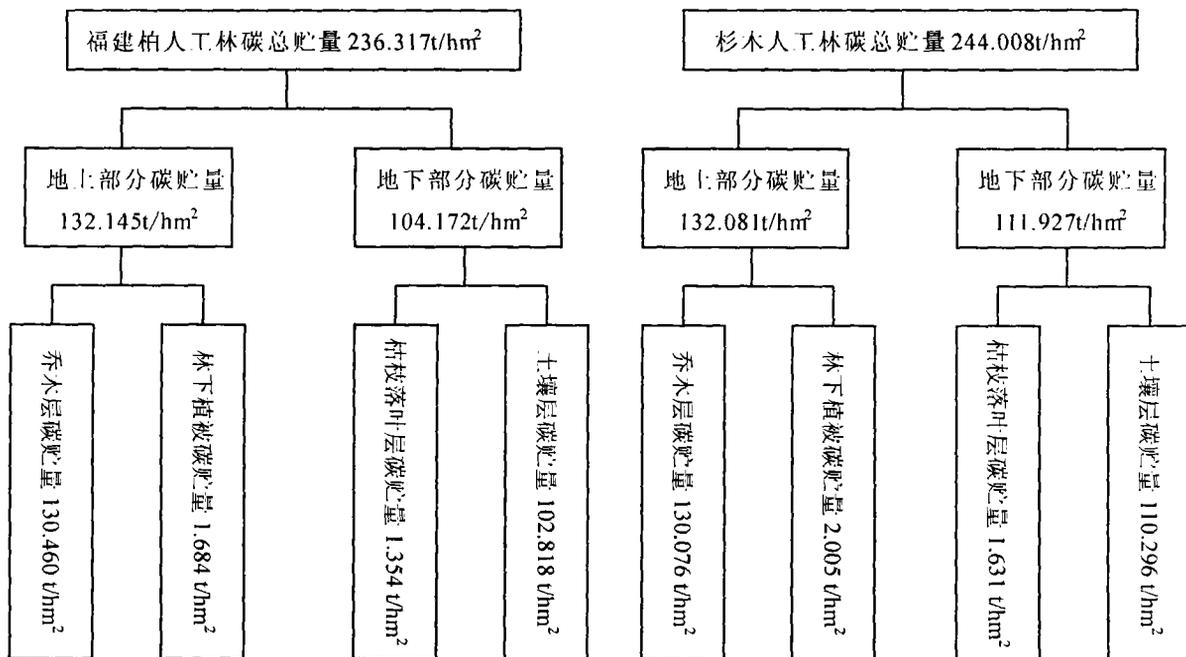


图 2 福建柏人工林碳库数值图

Fig. 2 Numerical chart of carbon stock in the plantation of Fokienia hodginsii

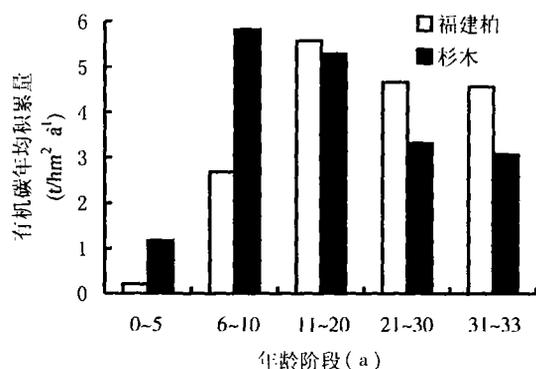


图3 不同生长阶段乔木层有机碳年均积累量
Fig.3 Mean annual accumulation of organic carbon of the tree

3.3 乔木层碳年净固定量

33 a 生福建柏乔木层碳当年净固定量为 $9.907 \text{ t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,折合成 CO_2 量是 $36.326 \text{ t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,是杉木的 1.54 倍(表 2)。乔木层生物量碳当年净积累量占乔木层碳当年净固定量的 45.33%,是杉木的 1.47 倍;其中各组分碳当年积累量为干>根>皮>枝>叶。福建柏人工林中碳当年归还总量是 5.416 t/hm^2 ,占乔木层碳当年净固定量的 55.40%,其中凋落物碳当年归还量占 38.55%,是杉木的 1.75 倍,死细根碳当年归还量占 16.85%,是杉木的 1.31 倍。福建柏和杉木凋落物中叶和枝碳当年归还量分别占凋落物碳当年归还量的 96.18%和 92.42%。

表 2 乔木层碳当年净固定量($\text{t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)

Table 2 Current annual carbon net fixation of the tree layer

项 目	福 建 柏			杉 木			
	干物质量	碳量	折算成 CO_2 量	干物质量	碳量	折算成 CO_2 量	
生物量净增量	叶	-0.106	-0.055	0.202	-0.123	-0.066	0.242
	枝	0.446	0.235	0.862	0.035	0.018	0.066
	干	5.898	3.487	12.786	4.055	2.283	8.371
	皮	0.724	0.395	1.448	0.672	0.378	1.386
	根	0.787	0.429	1.573	0.821	0.431	1.580
小计	7.749	4.491	16.467	5.460	3.045	11.165	
凋落物生产量	叶	5.455	2.724	9.988	2.746	1.372	5.032
	枝	1.865	0.901	3.304	1.285	0.616	2.257
	花	0.198	0.087	0.320	0.078	0.037	0.136
	果	0.117	0.057	0.209	0.247	0.126	0.461
	小计	7.636	3.769	13.820	4.357	2.151	7.886
死细根生产量	3.232	1.647	6.039	2.492	1.254	4.600	
乔木净固定量	18.617	9.907	36.326	12.309	6.450	23.650	

4 讨 论

本研究中福建柏碳贮量(236.317 t/hm^2)低于我国森林生态系统的平均碳贮量(258.83 t/hm^2)^[12],介于暖性针叶林(163.82 t/hm^2)^[12]和温性针叶林(244.16 t/hm^2)^[12]之间,远低于我国针叶林碳贮量(408.00 t/hm^2)^[12],具有一定的地带性特点。福建柏人工林土壤碳贮量为 102.818 t/hm^2 ,低于我国森林土壤平均碳贮量(193.55 t/hm^2)^[12]和世界土壤平均碳贮量(189.00 t/hm^2)^[12],与同处

中纬度的美国大陆土壤碳贮量(108.00 t/hm^2)^[11-12]相近,高于苏南丘陵次生栎林(70.03 t/hm^2)^[15]和杉木人工林(48.64 t/hm^2)^[15]。

福建柏人工林有机碳阶段年均积累量 11~20 a 达到最大值($5.576 \text{ t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$),落后于杉木人工林有机碳阶段(6~10 a)年均积累量最大值($5.817 \text{ t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)的出现。0~10 a 杉木有机碳年均积累量明显大于福建柏,体现了杉木速生的生物学特性。11~33 a 福建柏乔木层有机碳年均积累量大于杉木且减小幅度小于杉木,体现了福建柏生长缓慢但后劲足的生物学特点。

乔木层碳当年净固定量是指乔木层的生物量碳当年积累量和碳当年归还量之和。本研究中福建柏乔木层碳当年净固定量为 $9.907 \text{ t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 高于我国针叶林平均水平 ($7.02 \text{ t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)^[12] 和雾灵山自然保护区针叶混交林 ($7.855 \text{ t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)^[16]; 其中生物量碳当年净积累量为 $4.491 \text{ t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 大于苏南丘陵次生栎林和杉木人工林 ($2.46 \text{ t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)^[15], 但小于碳当年归还量 ($5.416 \text{ t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$), 表明 33 a 生林分处在碳归还阶段。福建柏凋落物碳当年归还量是 $3.769 \text{ t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 高于我国针叶林平均水平 ($2.58 \text{ t/hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)^[12]。福建柏和杉木人工林中叶和枝碳当年归还量占凋落物碳当年归还量的比例大于祁连山青海云杉林 (60.52%, 24.14%)^[17], 表明叶和枝是森林凋落物向土壤归还有机碳的主体。福建柏人工林中以枯死细根形式向土壤归还有机碳占碳年总归还总量的 30.41%, 表明通过枯死细根向土壤归还有机碳是不可忽略的。

参考文献(Reference)::

- [1] Yu Xintuo. Chinese Fir Silviculture. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press, 1996. 1~519. [俞新妥. 杉木栽培学[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1996. 1~519.]
- [2] Sheng Weitong. Soil Degradation and Its Control Techniques for Timber Plantations. In: Sheng Weitong. Research on Site Degradation of Timber Plantation. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1992. 15~19. [盛炜彤. 我国人工林的地力衰退及防治对策[A]. 见: 盛炜彤. 人工林地力衰退研究[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 15~19.]
- [3] Yang Yusheng. Studies on Sustainable Management of Chinese Fir Plantation. Beijing: China Forestry Publishing House, 1998. 1~250. [杨玉盛. 杉木林可持续经营的研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998. 1~250.]
- [4] Zhang Haobai. Fujian Silva [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993. 1~595. [章浩白. 福建森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993. 1~595.]
- [5] Yang Zongwu, Zheng Renhua, Xiao Xiangxi, et al. Valuable Tree Species-*Fokienia hodginsii*. *Forest Science and Technology*, 1998, (7): 21~22. [杨宗武, 郑仁华, 肖祥希, 等. 珍稀树种-福建柏[J]. 林业科技通讯, 1998, (7): 21~22.]
- [6] Chen Zusong. Study on Physical Properties and Mechanical of *Fokienia hodginsii*. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1999, 19 (3): 223~226. [陈祖松. 福建柏人工林木材物理力学性质的研究[J]. 福建林学院学报, 1999, 19 (3): 223~226.]
- [7] Zou Shuangquan. Stand Biomass and Its Distribution of the Mixed *Fokienia hodginsii* and *Sassafras tzumu* Forest. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1998, 18(1): 40~43. [邹双全. 福建柏樟树混交林生物量及分布格局研究[J]. 福建林学院学报, 1998, 18(1): 40~43.]
- [8] Pan Weichou, Tian Dalun, Lei Zhixing, et al. Studies on the Nutrient Cycling in the Chinese Fir Plantations (II) Content, Accumulation Rate and Biological Cycling of Nutrient Elements in the Fast-Growing Chinese Fir Forest in the Hill Regions. *Journal of Central South Forestry Institute*, 1983, 3(1): 1~17. [潘维伟, 田大伦, 雷志星, 等. 杉木林养分循环的研究(二) 丘陵区速生杉木林的养分含量、积累速率和生物循环[J]. 中南林学院学报, 1983, 3(1): 1~17.]
- [9] McLaugherty C A, Aber J D. The Role of Fine Roots in the Organic Matter and Nitrogen Budgets of Two Forested Ecosystems [J]. *Ecology*, 1982, 63: 1481~1490.
- [10] Committee for Agricultural Chemistry of Chinese Society of Soil Science. Conventional Method of Chemical Analysis for Agricultural Soil. Beijing: Science Press, 1983. 272~273. [中国土壤学会农业化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 272~273.]
- [11] Sang Weiguo, Ma Keping, Chen Lingzhi. Primary Study on Carbon Cycling in Warm Temperate Deciduous Broad-Leaved Forest. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(5): 543~548. [桑卫国, 马克平, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林碳循环的初步估算[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 543~548.]
- [12] Zhou Yurong, Yu Zhenliang, Zhao Shidong. Carbon Storage and Budget of Major Chinese Forest Types. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 518~522. [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[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518~522.]
- [13] Dixon R K, Houghton R A, et al. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, 1994, 263: 185~190.
- [14] Sundquist E T. The Global Carbon Dioxide Budget. *Science*, 1993, 259: 935~941.
- [15] Ruan Honghua, Jiang Zhilin, Gao Suming. Preliminary Studies of Carbon Cycling in Three Types of Forests in the Hilly Regions of Southern Jiangsu Province. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16(6): 17~21. [阮宏华, 姜志林, 高苏铭. 苏南丘陵主要森林类型碳循环研究-含量与分布规律[J]. 生态学杂志, 1997, 16(6): 17~21.]
- [16] Zhao Haizhen, Wang Deyi, Zhang Jinglan, et al. The Carbon-Pooling Ability of the Forest in Wuling Mountain Natural Reserve. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2001, 24(4): 43~47. [赵海珍, 王德艺, 张景兰, 等. 雾灵山自然保护区森林的碳汇功能评价[J]. 河北农业大学学报, 2001, 24(4): 43~47.]
- [17] Wang Jinye, Che Kejun, Jiang Zhirong. A Study on Carbon of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains. *Journal of Northwest Forestry University*, 2000, 15(1): 9~14. [王金叶, 车克钧, 蒋志荣. 祁连山青海云杉林碳平衡研究[J]. 西北林学院学报, 2000, 15(1): 9~14.]

Carbon Stock and Carbon Sequestration of a 33-Year-old *Fokienia hodginsii* Plantation

HE Zong-ming¹, LI Li-hong², WANG Yi-xiang¹, ZOU Shuang-quan¹,
YUE Yong-jie¹, and WANG Xiao-guo¹

(1. Forestry College of Fujian Agriculture and Forestry University, Nanping 353001 China;

2. Xinkou Experimental Forest Farm of Fujian Agriculture and Forestry University, Sanming 365002 China)

Abstract: Carbon pool and carbon sequestration of a 33-year-old *Fokienia hodginsii* and a *Cunninghamia lanceolata* plantation ecosystem were studied in Sanming, Fujian, China. The results showed that the amount of the carbon pool of *F. hodginsii* plantation ecosystem was 236.317 t/hm², which was lower than that of *Cunninghamia lanceolata* plantation ecosystem (244.008 t/hm²), with above-ground and under-ground parts accounted for 55.92% and 44.08%, respectively. Carbon storage of undergrowth and forest floor in the *C. lanceolata* plantation was 1.19 and 1.20 times, respectively, as great as those in the *F. hodginsii* plantation. Greatest mean annual accumulation of organic carbon of tree layer of the *F. hodginsii* plantation was 5.576 t/hm²·a⁻¹ during 11 to 20 year-old phrase, while that of *C. lanceolata* plantation was 5.817 t/hm²·a⁻¹, came earlier during 6 to 10 year-old phrase. Current annual carbon net fixation of tree layer of the *F. hodginsii* plantation during 32 to 33 year-old was 9.907 t/hm²·a⁻¹, converted to 36.326 t/hm²·a⁻¹ of CO₂, 1.54 times as great as that of the *C. lanceolata* plantation, of which current annual carbon return by litterfall and dead fine roots was 3.769 t/hm²·a⁻¹ and 1.647 t/hm²·a⁻¹, respectively, and 1.75 and 1.31 times, respectively, as great as those in the *C. lanceolata* plantation.

Key words: carbon stock; carbon sequestration; *Fokienia hodginsii*; Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*)