

DOI: 10.5846/stxb201304250814

姚利辉, 康文星, 赵仲辉, 何介南. 会同杉木人工林不同生长阶段植物固碳特征. 生态学报, 2015, 35(4): 1187-1197.

Yao L H, Kang W X, Zhao Z H, He J N. Carbon fixed characteristics of plant of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation at different growth stages in Huitong. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1187-1197.

会同杉木人工林不同生长阶段植物固碳特征

姚利辉¹, 康文星^{1,2,3,*}, 赵仲辉^{1,3}, 何介南¹

1 中南林业科技大学, 长沙 410004

2 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004

3 国家野外科学观测研究站, 会同 418307

摘要:为了探讨杉木人工林不同生长阶段的固碳功能,以会同杉木林为研究对象,在定位连续测定林分生物量和碳素含量的基础上,研究了杉木林不同年龄阶段的储存碳量及在各组分的分配和植物固碳能力。结果表明:杉木各器官碳素含量树叶>树皮>树根>树干>树枝,且随着林龄增加而增大;杉木林植被储存碳量为 22.93—86.98 t/hm²,各个层次储存碳量乔木层>林下植被层>枯死物层;乔木层碳素在器官间的相对分配大小依次为树干>树根>树叶>树皮>树枝;树干碳素分配比随着年龄增长而增大,树枝、树叶随年龄增长而减少,树根和树皮虽有波动,但变化较平稳;树枝、树叶、树干、树皮和树根碳积累年均变化都呈单峰形曲线,但波峰出现林龄各有不同;杉木林固碳动态特征可分为固碳功能建立、固碳能力迅速增长、固碳能力最大、固碳能力相对平稳和固碳能力下降等 5 个阶段;杉木林的固碳能力,不仅受不同生长阶段生长发育生物学特性的制约,而且还受林分冠层结构特征以及土壤肥力条件的影响。

关键词:杉木人工林; 碳浓度; 储碳量; 碳分配

Carbon fixed characteristics of plant of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation at different growth stages in Huitong

YAO Lihui¹, KANG Wenxing^{1,2,3,*}, ZHAO Zhonghui^{1,3}, HE Jienan¹

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, Changsha 410004, China

3 National Field Station for Scientific Observation & Experiment in Huitong Hunan, Huitong 418307, China

Abstract: Based on located observations biomass and carbon content carbon of plants from a national key field scientific experimental station in Huitong, carbon storage, carbon allocation characteristics of each component in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations, the ability to stand fixed carbon dynamics in Chinese fir plantation at different ages were studied. The results showed that the carbon content of the Stand components increased with the age, which in the ranked as follow: needle> bark > root > trunk > twig at the same age. Forest carbon storage ranged from 22.93 to 86.98 t/hm², the carbon storage is greater in tree layer than the understory vegetation layer, and the understory vegetation layer is greater than the layer of dead matter. Tree layer of carbon on the relative distribution of organs ranked as trunk> root> leaf> bark> branch. Trunk carbon allocation to increase with age, branches, leaves decrease with age, although the roots and bark fluctuated, the change is relatively stable. The needle, twig, trunk, bark, roots carbon accumulation, the average annual change showed a single peak-shaped curve, but the crest of a different time. The fixed carbon dynamic

基金项目:科技部公益性研究项目(2007-4-15); 国家林业公益性行业科研专项(200704015, 200804030); 国家野外科学观测研究站项目(20080615); 湖南省教育厅重点项目(2011A135)

收稿日期:2013-04-25; **网络出版日期:**2014-04-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kwx1218@126.com

characteristics can be divided into five stages of the fir forest, i.e. the establishment of the function of the fixed carbon, carbon fixation ability to rapidly increase, the ability to achieve maximum fixed carbon, the ability of the fixed carbon is relatively stable, decreased ability of the fixed carbon. The Carbon sequestration in Chinese fir plantations is affected not only by the constraints of the biological characteristics of the different growth stages of growth and development rhythm, but also by the stand canopy structure and soil fertility conditions.

Key Words: Chinese fir plantation; carbon content; carbon storage; carbon distribution

自工业革命以来,人类向大气中排入 CO₂等温室气体迅速增加。大气中 CO₂浓度升高导致全球气候变暖加剧。在此背景下,森林固定大气 CO₂的功能及维持全球碳平衡的作用已成为各国研究热点。近几十年来国外许多学者对热带森林^[1]、温带森林^[2]、乃至全球森林地上部分生物量的碳储量进行了估算^[3]。根据研究,森林生态系统中的平均植物碳密度是草原生态系统植物碳密度的 4 倍,农田生态系统的 16.7 倍^[4]。也有学者从生理学和树种特性角度探讨对植物碳储量的影响,认为喜光性树的固碳能力比阴性树种大^[5]。

我国森林碳储量的研究起步较晚,但取得较大的研究成果,如周玉荣等^[6]估算了中国主要森林生态系统的碳储量。赵敏等^[7]给出中国森林植物碳储量为 3.778 PgC,王效科等^[8-9]估算在 3.255—3.724 PgC 之间。不少学者研究了中国森林碳储量随时间的动态变化,如刘国华^[10]等以 4 次森林资源清查为基础,估算结果分别是 3.75、4.12、4.06 和 4.20 PgC;有些研究者就中国 20 世纪 70 年代到 80 年代森林碳储量下降,80 年代以后森林碳储量呈稳步增长的原因进行较为系统的分析^[11]。森林生态系统是一个非常复杂的系统,基础数据获得的难度及计算方法的不完善,导致在中国森林植被碳储量的估算上,不同学者估算的结果差异较大。

以往森林碳储量动态研究,大多用静态平衡分析法,估计值也多为某一时间点的静态估计,极少用同一块山地的不同时段实测值进行综合分析。本文以湖南会同“国家野外科学观测研究站”的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林为研究对象,利用 20a 定位连续测定数据,研究了不同年龄阶段杉木人工林乔木层、林下植被层、凋落物层和土壤中枯死根碳储量以及不同林龄阶段林分固碳能力及其固碳动态特征。其目的为人工林生态系统固碳作用和碳汇功能的评价提供基础数据和科学依据。

1 研究地区概况

本研究在“湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站”第 3 小集水试验区进行。第 3 小集水试验区面积 1.9483 hm²,主流场 230 m,平均宽度 22.6 m,流域形状系数 0.37,平均坡度 25°,坡向 N,海拔高度 280—355 m。

研究地区属于中亚热带季风湿润气候区。年均气温 16.8 °C,年均相对湿度 80%以上,年降雨量 1100—1400 mm。母岩为震旦纪板溪系变质的板(页)岩,风化程度甚深。土层厚度 80 cm 以上,土壤为中有机质厚层黄壤。pH 值 4.5—6.0,表层腐殖质(40.65±1.62) g/kg,0—60 cm 深土层内平均养分含量 N (16.95±0.92) g/kg,P (0.37±0.02) g/kg,K (17.71±0.77) g/kg^[12]。

第 3 小集水试验区原为阔叶次生残林。1966 年炼山、全垦挖穴营造杉木人工林,21 年生后(1987 年),杉木全部皆伐。1988 年春,在采伐迹地,营造第 2 代杉木林(造林密度 2400 株/hm²)。杉木栽上后前 3 年每年春秋两季抚育两次,以后没有进行抚育和间伐管理,任其自然生长。到 2007 年,林龄为 20a,林分密度 2310 株/hm²,林分平均高度 13.8 m,平均胸径 14.1 cm,叶面积指数 7.63,郁闭度 0.9 左右^[13]。

2 研究方法

2.1 生物量测定

第 2 代杉木人工林 7 年生时,设立了 4 块固定标准地(样地面积 667 m²)测定林分生物量。以后的 11、

14、18 和 20 年生时林分生物量测定都在 4 块固定标准地进行的。每次生物量测定,将样地内的林木按克拉大特法分级(5 个生长级)进行每木调查(测定胸径、树高、冠幅)。生物量调查根据林木各生长级的平均测树因子选取各生长级标准木,加上样地所有林木的胸径、树高、冠幅等测树因子分析得出的平均标准木共计 6 株。把 6 株树木连根系挖出。然后在伐倒木上以 1 m 为单位,从树基到树梢分段测其叶、枝、皮、干和根等的鲜重。再分别于各组分中抽取样本,置于恒温箱中烘干至恒重,求出各组分的干物质重。再用相对生长法,建立回归方程,通过检验后,估算样地林木生物量。每次测定生物量的方法,生物量测定时的林分结构、特征及生长状况,用相对生长法建立求算林分生物量的回归方程及相关性分析等^[14-16]。

灌木、草本、凋落物生物量测定:在样地内按 x 型设 5 个 2 m×2 m 的小样方,先调查小样方内灌木和草本的高度、种类等,再把小样方内所有植物(连根系)全部挖出,后把它分开成灌木和草本分别测定其鲜重。凋落物按其分解程度分为 3 层:未分解、分解中和已分解,分别进行收集,测定其凋落物鲜重。然后抽取林下植物和凋落物样品,置于恒温箱中烘干至恒重,求出各组分的干物质重。土壤中根枯死量由于测定的工作量大且又会大量破坏土层,因此本研究按照张小全^[17]的亚热带常绿针叶林细根枯死量与地上凋落物量平均 0.842 的比值来求得。

2.2 测定样品的取样

为了保证取样样品具有代表性,在伐倒标准木上分树干基部、中下、中、中上和上部 5 个区段,每一区段采集相同重量的树干、树皮样品,再把样品混合一起组合成树干、树皮样品;枝分成当年生枝、1 年生枝、2 年生枝、多年生枝,叶也分成当年生叶、1 年生叶、2 年生叶、多年生叶,根分成根头、大根(1 cm≤根径)、粗根(0.2 cm≤根径<1 cm)、细根(根径<0.2 cm)等,分别按它们在叶、枝、根生物量中所占权重抽取叶、枝、根样品。灌木、草本按地上生长部分和根系分别抽取混合样本。林地凋落物分成叶凋落物、枝凋落物、碎屑分别取样(林分 14 年前凋落果很少,所以没有收集凋落果样品)。土壤中枯死根通过挖土壤剖面取样。

2.3 碳素测定

样品经烘干、粉碎、过筛后装瓶待测。植物样品中碳素含量,均采用重铬酸钾氧化-外加热法测定(每样品重复测定 5 次,取平均值)。

2.4 杉木人工林植被系统储碳量和年均固碳能力

根据杉木不同器官、灌木层、草本层和枯死物层生物量与其碳素含量的相乘,求出其相应层的储碳量。乔木层、灌木层、草本层、枯死物层储碳量之和为杉木人工林植被系统储碳量。林分年平均固碳能力估算:首先要计算出林分年净生产力(NPP),由于没有每年测定的林分生物量数据,无法得到林分连年 NPP。本文用后一个林龄时测定的林分生物量减去前一个林龄时测定的林分生物量的差值,再除以相隔时间得到林分在这一年龄阶段的年均 NPP。在求出年均 NPP 基础上,根据其相应的碳素含量计算得到林分年均固碳能力。由于没有每年收集凋落物,根据杉木凋落物一般 2—3a 内完全分解^[18],而本文测定林分生物量每次相隔时间,除 20 年生和 18 年生相隔只有 2a,其余相隔 3a 以上,因此,把一个林龄时测定的凋落物现存量作为这一林龄阶段的年均产生的凋落物量(凋落物尽管不到 3a 可以分解完,但是现存的凋落物仍有可能包括从现在到 2a 多前还没有分解掉的凋落物质,这样处理的估算结果可能比实际偏大)。

所有数据经 Excel 软件处理后,用 SPSS 13.0 软件进行统计分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)、双因素方差分析(two-way ANOVA)和 Duncan 检验比较参数间差异。

3 结果与分析

3.1 植被层各组分碳素含量

从表 1 中看出,同一林龄级杉木叶碳素含量>皮>根>干>枝。表 2 中反映了同一林龄不同杉木器官碳素含量差异,从中看出同一林龄杉木树叶与根、干、枝、皮之间,树枝与皮之间;14、18、20 年生杉木树皮分别与同林龄杉木树干、根之间碳素含量差异显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)。其余杉木某器官与同一林龄杉木其

它器官碳素含量差异不显著($P \geq 0.05$)。

杉木器官碳素含量随着林龄增加而增大(表 1)。同一器官不同林龄时的热值存在差异,但除 20 年与 7 年和 11 年生杉木树皮,18 年与 11 年生杉木树皮。7 年与 20 年生杉木树枝,18 年与 20 年生杉木树叶之间碳素含量差异显著($P < 0.05$),20 年与 7、11、14 年生杉木树叶之间碳素含量差异极显著($P < 0.01$)外,其余各林龄级某器官之间碳素含量差异不显著($P \geq 0.05$)(表 3)。

表 1 不同林龄杉木各组分碳素含量/(g/kg)

Table 1 Carbon content in different component of Chinese Fir Plantation in different ages

树龄/a Stand age	树干 Stem wood	树皮 Stem bark	枝 Twig	叶 Needle	根 Root
7	472.90 ± 14.22(3.01)	481.24 ± 15.16(3.15)	468.37 ± 12.45(2.66)	493.28 ± 16.30(3.30)	473.25 ± 11.27(2.38)
11	473.58 ± 13.61(2.97)	484.59 ± 14.50(2.99)	470.55 ± 11.87(2.52)	497.54 ± 13.74(2.76)	476.87 ± 10.71(2.24)
14	475.73 ± 14.80(3.11)	491.90 ± 15.73(3.20)	473.34 ± 9.72(2.05)	499.29 ± 11.43(2.29)	479.59 ± 12.65(2.64)
18	476.54 ± 15.54(3.26)	496.17 ± 14.46(2.91)	474.23 ± 13.29(2.80)	516.56 ± 13.19(2.57)	482.61 ± 11.38(2.36)
20	478.02 ± 14.73(3.08)	501.63 ± 13.43(2.68)	477.14 ± 10.53(2.20)	529.34 ± 14.94(2.82)	483.61 ± 12.96(2.68)

平均值±标准差,括号内数字为变异系数(%)

杉木器官之间碳素含量差异与器官有机物质组成和功能密切相关。树枝和干是植物体的支持体,这些器官组成以结构形拉力较强的粗纤维等低能有机化合物为主^[19]。树叶是树木光合作用的主要器官,树皮承担着植物体内水分和营养物质运输的功能,这些器官含有较多非结构形的粗脂肪和蛋白质等高能有机化合物^[19]。高能有机化合物一般都是高碳有机化合物^[20]。

杉木器官碳素含量随着林龄增加而增大,因为植物器官随林龄增大木质化程度提高,其组织内的木质素或类木质素含量也可能增加,木质素或类木质素属高碳有机化合物^[20]。杉木器官高碳有机化合物随林龄增大逐渐累积,可能是杉木器官碳素含量随林龄增大而增大的一个重要原因。

从表 4 中看出,同一林龄级,无论是灌木还是草本都是其地上器官碳素含量大于根。同一林龄级草本地地上器官与根的碳素含量存在极显著差异($P < 0.01$);7、11、14、18 年生林分林下灌木地上器官与根碳素含量差异显著($P < 0.05$),20 年生林分林下灌木地上器官与根碳素含量差异极显著($P < 0.01$)。此外,灌木地上器官碳素含量高于草本地地上器官,灌木根高于草本根。

灌木和草本各组分碳素含量随林龄增大而升高。从表 5 看出,7、11 年生分别与 18 年生林分林下灌木地上器官,7、11、14、18 年生分别与 20 年生林分林下灌木地上器官热值差异显著($P < 0.05$);7 年生分别与 18 和 20 年生林分林下灌木根,11 年与 20 年生林分林下灌木根热值差异显著($P < 0.05$)。不同林龄的草本相同器官碳素含量差异性分析见表 5。

林木随着年龄的增长不断长大,林分结构和冠层特征发生了变化,林下空间的生境条件发生了改变,导致灌木和草本种类组成也发生了变化(从 1998 年至 2007 年,杉木林内灌木植物由 22 种下降至 15 种,在 15 种灌木中,有 5 种阴性灌木是后来新增的^[13])。植物种类不同,其有机成分不一样,进而引起其碳素含量也不一样。

以上数据显示,杉木林乔木层植物碳素含量>灌木>草本。这里除了乔木层与林下植被种类不同,其有机成分不同有关外,更为重要的是乔木层植物叶片截获太阳能比灌木和草本多许多^[21]。光能资源充足有利于光合作用积累更多的高能有机物^[22,23],因而有机碳含量高。也就是说这是森林不同层次植物对光能资源利用和对环境的同化能力不同的结果。

从表 6(表中凋落物为地面收集的凋落物即为林褥层,为表格制作方便,把枯死根也列入表中,表 7—8 也相同)可知,同一林龄级不同枯死物碳素含量,具体表现为凋落叶碳素含量>凋落枝>碎屑>枯死根。这是因为凋落物都是乔木、灌木或草本产生的,而乔、灌、草各器官碳素含量都是叶>枝>根,导致它们的枯死物碳素含

表 2 同一林龄不同器官的碳素含量差异分析

Table 2 The carbon content poor of the different organs at the same age

器官 Organs	7 年生 7-year-old			11 年生 11-year-old			14 年生 14-year-old			18 年生 18-year-old			20 年生 20-year-old			
	干 枝	叶	根	干 枝	叶	根	干 枝	叶	根	干 枝	叶	根	干 枝	叶	根	
干 Stem	0	*	0	0	*	0	*	0	*	0	*	0	*	0	*	0
皮 Bark	0	*	0	0	*	0	*	0	*	0	*	0	*	0	*	0
枝 Twig	0	*	0	0	*	0	*	0	*	0	*	0	*	0	*	0
叶 Leaf	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
根 Root	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0 表示不显著 ($P \geq 0.05$), * 表示显著 ($P < 0.05$), ** 表示极显著 ($P < 0.01$)

表 3 不同林龄的同一器官碳素含量差异分析

Table 3 The carbon content poor of the same organ at the different age

树龄/a Stand age	树干 Stem wood						树皮 Stem bark						树枝 Twig						树叶 Needle						树根 Root					
	7	11	14	18	20	7	7	11	14	18	20	7	7	11	14	18	20	7	7	11	14	18	20	7	7	11	14	18	20	7
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0 表示不显著 ($P \geq 0.05$), * 表示显著 ($P < 0.05$), ** 表示极显著 ($P < 0.01$)

表 4 不同林龄阶段灌木和草本的碳素含量/(g/kg)

Table 4 Carbon content in shrubs and herb of Chinese Fir Plantation in different ages

林龄/a Stand age	灌木 Shrubs				草本 Herb			
	地上 Above ground		根系 Root		地上 Above ground		根系 Root	
7	441.59±14.85(3.36) *		429.27± 12.13(2.83) *		381.33± 13.32(3.49) **		352.63± 11.86(3.36) **	
11	446.71± 13.22(2.94) *		431.13± 14.06(3.26) *		394.53±12.93(3.28) **		354.30± 12.08(3.41) **	
14	452.78± 11.94(2.63) *		436.28± 13.74 (3.15) *		403.16± 14.09(3.50) **		362.08± 13.17(3.64) **	
18	459.53± 13.85(3.01) *		440.58± 12.67(2.88) *		412.11± 13.78(3.34) **		367.37± 13.25(3.61) **	
20	466.72± 12.76(2.73) **		446.23± 13.95(3.13) **		421.42± 13.25(3.14) **		370.52± 12.94(3.49) **	

平均值±标准差, 括号内数字为变异系数(%);灌木同一行中的 * 表示它们之间差异显著($P<0.05$), ** 表示它们之间差异极显著($P<0.01$);草本同一行中的 ** 表示它们之间差异极显著($P<0.01$)

表 5 不同林龄阶段灌木和草本的碳素含量差异分析

Table 5 The carbon content poor in shrubs and herb of Chinese Fir Plantation in different ages

林龄/a Stand age	灌木 Shrubs										草本 Herb													
	地上 Above ground					根系 Root					地上 Above ground					根系 Root								
	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20				
7		0	0	*	*	*	0	0	*	*	*	*	*	*	*	*	0	*	*	*	*			
11	0		0	*	*	0		0	0	*	*		0	*	*	*	0		0	*	*			
14	0	0		0	*	0	0		0	0	*	*	0		0	*	*	0		0	0	0		
18	*	*	0		*	*	0	0		0	*	*	*	0		0	*	*	0		0		0	
20	*	*	*	*	*	*	*	0	0		*	*	*	*	0		*	*	*	0	0			0

0 表示不显著($P\geq 0.05$), * 表示显著($P < 0.05$), ** 表示极显著($P<0.01$)

表 6 不同林龄阶段枯死根和地面收集的凋落物的碳素含量/(g/kg)

Table 6 Carbon content in dead roots and forest floor of Chinese Fir Plantation in different ages

林龄/a Stand age	枝凋落物 Litter twig	叶凋落物 Litter needle	碎屑 Detritus	枯死根 Dead roots
7	435.34 ± 13.85(3.18)	441.23 ± 14.78(3.35)	369.82 ± 13.22(3.57)	339.27 ± 12.57(3.71)
11	437.55 ± 14.06(3.21)	444.76 ± 13.56(3.02)	378.10 ± 13.07(3.46)	342.13 ± 13.02(3.81)
14	441.20 ± 13.22(3.00)	448.32 ± 14.62(3.20)	385.38 ± 14.08(3.65)	359.28 ± 13.48(3.75)
18	444.67 ± 13.79 (3.10)	456.33 ± 13.93(3.02)	394.23 ± 14.25(3.61)	372.57 ± 14.03(3.77)
20	452.25 ± 14.25(3.15)	464.22 ± 14.07(3.03)	405.54 ± 14.76(3.64)	389.23 ± 13.87(3.56)

平均值±标准差, 括号内数字为变异系数(%)

表 7 同一林龄的不同凋落物碳素含量差异分析

Table 7 The carbon content poor in dead roots forest floor of Chinese Fir Plantation at the same age

凋落物 Litters	7 年生 7-year-old				11 年生 11-year-old				14 年生 14-year-old				18 年生 18-year-old				20 年生 20-year-old			
	枝	叶	碎屑	根	枝	叶	碎屑	根	枝	叶	碎屑	根	枝	叶	碎屑	根	枝	叶	碎屑	根
枝 Twig	0	*	*	*	0	*	*	*	0	*	*	*	0	*	*	*	0	*	*	*
叶 Leaf	0		*	*	*	0		*	*	*	0		*	*	*	0		*	*	*
碎屑 Detritus	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
根 Root	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

0 表示不显著($P\geq 0.05$), * 表示显著($P < 0.05$), ** 表示极显著($P<0.01$)

量也呈现同样规律。同一林龄级,凋落叶与凋落枝之间碳素含量差异不显著($P\geq 0.05$),凋落叶与碎屑,凋落叶与枯死根,凋落枝与碎屑,凋落枝与枯死根,碎屑与枯死根之间碳素含量差异极显著($P<0.01$)(表 7)。

同一种枯死物碳素含量随林龄增大而增加。因为林内枯死物是乔木、灌木和草本的枝、叶、皮的凋落或根系枯死产生的,它们原来碳素含量随着林分林龄增加而增大。不同林龄的同一种枯死物碳素含量有所差异,如枯死根的碳素含量除 7 与 11 年生之间差异不显著($P\geq 0.05$)外,其余差异极显著($P<0.01$)(不同林龄的

同一种枯死物碳素含量差异性分析见表 8。

表 8 不同林龄阶同一凋落物碳素含量差异分析

Table 8 The carbon content poor in dead roots forest floor of Chinese Fir Plantation at different ages

林龄/a Stand age	枝凋落物 Litter twig					叶凋落物 Litter needle					碎屑 Detritus					枯死根 Dead roots				
	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20
7		0	0	0	*		0	0	*	**		0	*	**	**		0	*	**	**
11	0		0	0	*	0		0	*	**	0		0	*	**	0		*	**	**
14	0	0		0	0	0	0		0	*	0		0	*	**	*	*	*	*	*
18	0	0	0		0	*	*	0		0	*	*	0		*	*	*	*	*	*
20	*	*	0	0		*	*	*	0		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

0 表示不显著 ($P \geq 0.05$), * 表示显著 ($P < 0.05$), ** 表示极显著 ($P < 0.01$)

枯死物各组分碳素含量均低于相应活的(无论是乔木、灌木和草本)各器官。有可能是植物组织在凋落以前,其组织内所含的高碳有机物(高能物质)已向其它的生长部位转移^[24],使得枯死物碳素含量比活的器官低。

3.2 不同年龄阶段杉木林植被系统储碳量及其分配

根据不同林龄的杉木不同器官、灌木层、草本层和枯死物层生物量与其碳素含量的相乘,求出不同年龄阶段杉木林植被层储碳量。从表 9 看出,会同 7—20 年生杉木人工林植被系统储碳量 22.93—86.98 t/hm²。在各个植被层碳库的分配格局中,乔木层储碳量(21.58—83.49 t/hm²)占林分总储碳量的 94.11%—96.04%,林下植被层(1.07—2.05 t/hm²)与枯死物层(0.28—1.44 t/hm²)分别占林分总的 2.36%—4.67%和 1.22%—1.66%。枯死物层虽然储碳量不多,但在森林生态系统碳素流动中具有重要的地位。它实现了碳素从植被碳库向土壤碳库转移,是土壤碳库中碳的主要来源。

表 9 不同林龄杉木人工林植被系统碳素贮量及其分配

Table 9 Carbon storage and spatial distribution of Plant system in Chinese Fir Plantation in different ages

林龄/a Stand age	项目 Item	树干 Trunk	树皮 Bark	树枝 Branch	树叶 needle	根 Root	林下植物 Undergrowth	枯死物 litter	合计 Sum
7	生物量/(t/hm ²)	17.02	5.60	6.37	10.14	6.10	2.65	0.70	48.58
	碳素贮量/(t/hm ²)	8.05	2.69	2.95	5.00	2.89	1.07	0.28	22.93
	碳素分配比/%	35.11	11.73	12.87	21.81	12.60	4.67	1.21	100
11	生物量/(t/hm ²)	39.42	9.68	9.39	12.42	14.00	2.74	1.61	89.26
	碳素贮量/(t/hm ²)	18.67	4.69	4.39	6.18	6.72	1.08	0.57	42.30
	碳素分配比/%	44.14	11.09	10.38	14.61	15.88	2.55	1.35	100
14	生物量/(t/hm ²)	58.32	14.00	11.48	13.86	19.01	2.96	2.56	122.19
	碳素贮量/(t/hm ²)	27.74	6.89	5.39	6.92	9.17	1.26	1.05	58.42
	碳素分配比/%	47.48	11.79	9.23	11.85	15.70	2.16	1.79	100
18	生物量/(t/hm ²)	84.48	19.59	12.62	14.76	24.18	3.99	3.12	162.74
	碳素贮量/(t/hm ²)	40.26	9.72	5.95	7.62	11.84	1.51	1.30	78.20
	碳素分配比/%	51.48	12.43	7.61	9.75	15.14	1.93	1.66	100
20	生物量/(t/hm ²)	96.33	21.83	12.72	14.73	25.65	4.61	3.37	180.16
	碳素贮量/(t/hm ²)	46.05	10.95	6.08	7.80	12.61	2.05	1.44	86.98
	碳素分配比/%	52.94	12.59	6.99	8.97	14.50	2.36	1.65	100

表中生物量数据引自文献^[14-17]

杉木林储碳量在空间分布上,植物生长在地面上器官(包括凋落物)储碳量 19.40—73.20 t/hm²,占林分 82.78%—84.61%,地下根(活的和死的根系)3.53—13.78 t/hm²,占林分 15.39%—17.22%。

乔木层(杉木)碳素在其器官间的相对分配上,树干 8.05—46.05 t/hm²(37.30%—55.16%)>树根 2.89—12.61 t/hm²(13.39%—16.53%)>树叶 5.00—7.80 t/hm²(9.34%—23.17%)>树皮 2.69—10.95 t/hm²(12.46%—13.92%)>树枝 2.95—6.08 t/hm²(7.28%—13.67%)。

树干碳素分配比随着年龄增长而增大,枝、叶随年龄增长而减少,树根和树皮虽有波动,但变化较平稳。乔木层储碳量在各器官分配中的差异以及其随年龄增长的变化,是因为绿色植物通过光合作用生产的有机物质中,有一部分有机物质在其新陈代谢过程中被消耗掉,余下的有机物质则不断积累于树干、树皮、根、枝和叶中。各器官自身生长过程中,枝叶随林龄增大林分郁闭后不断地凋落,限制了有机物质在这个器官中积累,所以枝叶储碳量随林龄增大所占比例减少。根虽有枯损,但随粗根的生长,增加了有机物质在树根中的积累,树皮脱落的损失量较少,因而这两个器官储碳量随年龄增长虽有波动,但变化较平稳。随着树干的不断生长,有机物质在树干中不断积累,储碳量增大,因此,树干储碳量在乔木储碳量中所占比例最大。

3.3 杉木林碳素积累动态特征

3.3.1 年均固碳能力

从表 10 发现,1—7、8—11、12—14、15—18、19—20 年生各林龄阶段,林分年均固定碳素分别为 3.28、5.38、6.26、6.20 和 5.78 t hm⁻² a⁻¹。12—14 年生时的杉木林年均固碳能力最大,分别是 1—7、8—11、15—18、19—20 年生的 1.91、1.16、1.01、1.08 倍;1—7 年生最小,其固碳能力不到 8—11 年生的 60.98%,12—14 年生的 52.41%,15—18 年生的 52.91%,19—20 年生的 56.75%。杉木林分年均固定碳素中,有 71.42%—88.85% (2.85—4.83 t hm⁻² a⁻¹) 是乔木层(杉木)固定的,林下植被层固定其中的 0.56%—4.67% (0.03—0.27 t hm⁻² a⁻¹),年均凋落物储碳量占 8.53%—24.91% (0.28—1.44 t hm⁻² a⁻¹)。

表 10 杉木人工林不同林龄阶段固碳量的动态变化

Table 10 The monthly dynamic of fixed carbon content in various components of Chinese Fir Plantation at different ages

林龄/a Stand age	项目 Item	树干 Trunk	树皮 Bark	树枝 Branch	树叶 Needle	根 Root	林下植物 Under- growth	枯死物 Litter	合计 Sum
1—7	固碳量/(t/hm ²)	8.05	2.69	2.95	5.00	2.89	1.07	0.28	22.93
From 1-year-old to 7-year-old	年平均/(t hm ⁻² a ⁻¹)	1.15	0.38	0.42	0.49	0.41	0.15	0.28	3.28
8—11	固碳量/(t/hm ²)	10.62	2.00	1.44	1.18	3.83	0.12	0.57	19.76
From 8-year-old to 11-year-old	年平均/(t hm ⁻² a ⁻¹)	2.66	0.50	0.36	0.30	0.96	0.03	0.57	5.38
12—14	固碳量/(t/hm ²)	9.07	2.20	1.00	0.74	2.45	0.18	1.05	16.69
From 12-year-old to 14-year-old	年平均/(t hm ⁻² a ⁻¹)	3.02	0.73	0.33	0.25	0.82	0.06	1.05	6.26
15—18	固碳量/(t/hm ²)	12.52	2.83	0.56	0.70	2.67	0.25	1.30	20.83
From 15-year-old to 18-year-old	年平均/(t hm ⁻² a ⁻¹)	3.13	0.71	0.14	0.18	0.67	0.07	1.30	6.20
19—20	固碳量/(t/hm ²)	5.79	1.23	0.13	0.18	0.77	0.54	1.44	10.08
From 19-year-old to 20-year-old	年平均/(t hm ⁻² a ⁻¹)	2.90	0.62	0.07	0.09	0.39	0.27	1.44	5.78

3.3.2 杉木器官碳积累速率的年变化

会同杉木人工林 20 年生内(研究的年份内),乔木层(杉木)年均固碳速率的年变化呈单峰曲线,波峰出现在 14 年生时,14 年生以前年均固碳速率逐年上升,14 年生后逐年下降。乔木层固定的碳分配在树干中积累年均变化,在 18 年生以前随林龄增大而上升,随后开始下降,其年均碳积累速率变化曲线与乔木层相同,只不过高峰期滞后了。树皮年均碳积累速率的变化曲线和乔木层曲线一样,波峰也出现在 14 年生时,但变化幅度比乔木层小。树枝和树叶碳积累速率年变化也呈单峰曲线,但波峰出现在 7 年生时,7 年生后年均碳积累速率不断下降,而且下降幅度较大。树根在林分<11 年生每年碳积累速率以较快速度上升,>11 年生,年均积累速率持续下降,其碳积累速率年变化也呈单峰形曲线,只是波峰出现比乔木层的提早了。

3.3.3 不同生长阶段杉木林固碳动态特征

根据会同杉木人工林不同年龄阶段的储碳量及其器官年均碳积累速率的变化,可以把会同杉木人工林的

固碳特征分为如下几个阶段。

(1) 固碳功能建立阶段

这个阶段林分处于幼林时期(1—5年生)和快速生长初期(6—7年生)。这时期植株个体较小,林冠层叶表面积不大,能进行光合作用的场所小,因此,林分每年生产力不高,固定的碳量较少。这时期林木为了壮大自己有机体并组建群落,首先必须构建增大林分与外界进行物质和能量交换的、制造较多的有机物质的功能器官,所以这个林龄阶段林分的枝、叶生物产量增加速率高于其它器官,使得枝叶碳储量在乔木层碳储量中所占比例较高。而且因植株个体较小,冠层稀疏,光资源充足,故单位叶面积光合效能大。

(2) 固碳能力迅速增长阶段

这个阶段林木处于快速生长时期的中期(8—11年生),树木生命力旺盛,枝叶繁茂,枝叶表面积增大,意味着进行光合作用的面积大大增加了。虽然,林分开始郁闭,林冠层内光资源受到了不同程度的削弱,单位叶面积光合效能有所减少,但进行光合作用的叶面积比以前多,使得整个林分每年固定的碳量快速上升(年均固碳量是1—7年生的1.64倍)。由于林分开始郁闭,已有枝叶凋落,叶枝生长开始受阻,其生产力下降,所以每年枝叶积累的碳量在乔木层积累总量中的比例减少,而树干、皮、根所占比例增大

(3) 固碳能力最大阶段(12—14年生)

这阶段杉木干材高生长快速,林冠层厚度增加,枝叶结构层次增多。尽管冠层内光资源进一步减弱,单位叶面光合效能进一步减少,但由于枝叶结构层增加,进行光合作用的叶面积比以前增大。因此,整个林分每年生物产量和固定的碳进一步增大(年均固碳量是8—11年生的1.16倍)。这个阶段内,树干高生长迅速,每年干材和树皮的生物生产力增加,使得积累在干材和树皮的碳量占乔木层积累总量的比例持续增大。由于冠层厚度增加,枝、叶密度增大,其生存空间进一步受到了限制,故每年积累在枝、叶的碳量又减少了。树干的高生长速生阶段,林木对养分和水分需求量大,土壤的水、肥供需矛盾已显现出来,使根系的生物生产力下降。因此,每年根系积累的碳量开始降低。

(4) 固碳能力相对平稳阶段

这阶段林分处于15—18年生时,杉木进入快速生长后期的干材积累阶段(树干长粗)。这时林冠层经过树干高生长阶段的自然整枝,冠层变得稀疏些,冠内空间环境得到一定的改善。尽管冠层每年枝叶生物产量比前一林龄阶段有所减少,但是,单位叶面积光合效能却有所提高,因此,整个林分的生产力和碳的固定仍保持相对平稳的较高水平(为12—14年生时的99.04%)。这阶段杉木生长的特点,树高增长减弱,枝叶物质生产力较低,但干材蓄积增加较块。因此,每年积累在树干的碳量增长较大,积累在枝叶的碳量较小。这阶段土壤的水、肥供需矛盾依然维持,根系生产力和碳的积累依然是降低的。

(5) 固碳能力下降阶段(18—20年生)

这阶段杉木开始进入成熟期,杉木各器官开始老化,生理功能逐渐衰弱,生产力都有不同程度的降低,尤其是叶、根这些与林分生产物质和吸收养分、水分的器官生理功能迅速减弱。因此,整个林分的生产力和固碳能力开始下降,与15—18年生相比,每年积累在枝叶的碳量下降了一半,树根少了41.79%,树皮少了12.68%,树干也减少了7.35%。

以上分析看出,杉木人工林固碳能力,不仅受杉木不同生长发育阶段生物学特性的制约,而且还受到林分冠层结构特征以及土壤肥力条件的影响。

4 结论与讨论

7年生会同杉木林植被层储碳量(22.93 t/hm²)大大高于7年生长白落叶松(*Larix gmelinii*)林(3.97 t/hm²)^[24],低于8年生秃杉(*Taiwania flousiana*)人工林(29.39 t/hm²)^[25];11年生储碳量(42.30 t/hm²)高于12年生西南桦(*Betula alnoides Hamilt*)纯林(30.03 t/hm²)和西南桦×红椎(*Castanopsis hystrix*)混交林(30.79 t/hm²)^[26];14年生储碳量(58.42 t/hm²)略低于14年生中国热带、亚热带针叶林(63.7 t/hm²)^[6],稍高于14

年生秃杉人工林(57.37 t/hm^2)^[25]和中国森林平均水平(53.07 t/hm^2)^[6];18年生储碳量(78.20 t/hm^2)比17年生长白落叶松林(67.86 t/hm^2)^[24]大;20年生储碳量(86.98 t/hm^2)高于福建20年生马尾松(*Pinus massoniana*)林(56.27 t/hm^2)^[6],以及20年生白落叶松林(60.54 t/hm^2)^[28],远低于20年生广西米老排(*Mytilaria laosensis*)人工林(156.81 t/hm^2)^[27]。

会同杉木人工林7年生年均固定碳量($3.28 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)低于福建7年生杉木林^[28]($3.70 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)和8年生秃杉人工林($4.19 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[25];14年生年均固定碳量($6.26 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)高于广西13年生马尾松×杉木混交林^[29]($5.96 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)和14年生秃杉人工林^[26]($5.07 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$);20年生年均固定碳量($5.78 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)虽低于20年生广西米老排人工林^[27]($9.88 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)和福建20年生杉木林^[28]($7.18 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$),但高于中国森林平均值^[6]($5.15 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。

会同连栽第二代杉木人工林7年和20年生年均固碳能力,分别比福建南平第一代杉木人工林7年和20年生低13.56%和19.50%^[28](湖南会同与福建南平同属于中亚热带,都是杉木中心产区)。尽管本研究林分是采用国家林业局提出的高标准造林技术造的林,营林上也采取集约的经营方式,但林分净生产力和固碳能力仍比福建第一代林差。会同第二代杉木人工林>11年生,每年净积累在根的碳量是持续下降的,这可能是杉木连栽造成土壤肥力衰退引起的后果。如何找到人工林可持续经营的模式,是我国南方广大人工林栽培区营林上迫切需要解决的问题。

会同第二代杉木人工林栽植行间距均匀(造林密度2400株/hm²),>7年生林分开始郁闭,冠层内光资源受到了不同程度的削弱,枝叶生存空间受到限制。因此,>7年生林分每年净积累在枝叶的碳量一直是下降的。同时郁闭的林冠下空间光资源也不足,这种生产结构限制了林下灌木、草本生产力的提高,也就限制了碳的固定和积累。这就是本研究中积累在灌木和草本的碳量只占林分植被层碳贮量2.36%—4.67%的主要原因。众所周知,森林对大气中碳素的固定,是绿色植物通过光合作用进行的。林分光合能力的大小,不仅与接受的有效辐射量有关,而且还取决于叶的光合能力、光合面积与光合时间。在密度过大的林分,进行适当的抚育间伐措施,改善林分的空间结构,把它调整到对光合作用最佳的枝叶空间分布组合,是提高林分固定大气中碳素的一个重要途径。

本研究是在定位连续测定数据的基础上进行的。从而保证了空间尺度上的一致性和时间尺度的连续性,克服了“空间换时间”研究方法的缺陷。真实地反映了林分在不同林龄阶段的固碳能力及其固碳动态过程,研究结果更加逼近实际。但是,本文估算林分净初级生产力时,只估算林分生物量的净增量、每年产生的细根枯死和凋落物量。忽略了挥发和淋溶的有机质、地上消费者采食量、根的采食量、根系分泌物以及共生有机体输送的碳化合物等组分,其结果要低于实际值。此外,细根枯死量估算按照张小全^[17]的亚热带常绿针叶林细根枯死量与地上凋落物量平均0.842的比值来求得。但由于空间的异质性、森林类型不同、同一林分不同生长阶段的根系发育不同等,也可能会带来一定的误差,进而影响林分固碳量的准确估算。因此,如何准确估算某个林分的固碳量,应是今后研究的重点。

参考文献(References):

- [1] Olson J S, Watts J A, Allison L J. Major World Ecosystem Complexes Ranked by Carbon in live Vegetation: A Database. Oak Ridge National Laboratory, TN, NDP-017, 1985.
- [2] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [3] Heath L S, Kauppi P E, Burschel P, Gregor H D, Guderian R, Kohlmaier G H, Lorenz S, Overdieck D, Scholz F, Thomasius H, Weber M. Contribution of temperate forests to the world's carbon budget. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, 70(1-4): 55-69.
- [4] Ajtay G L, Ketner P, Duvigneaud P. Terrestrial primary production and phytomass // *The Global Carbon Cycle*. Chichester: John Wiley & Sons, 1979: 129-181.
- [5] Keeling H C, Baker T R, Martinez R V, Monteagudo A, Phillips O L. Contrasting patterns of diameter and biomass increment across tree functional groups in Amazonian forests. *Oecologia*, 2008, 158(3): 521-534.

- [6] 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.
- [7] 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): 49-54.
- [8] 王效科, 冯宗炜. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力. 生态学杂志, 2000, 19(4): 72-74.
- [9] 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.
- [10] 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): 732-740.
- [11] 徐新良, 曹明奎, 李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究. 地理科学进展, 2007, 26(6): 1-10.
- [12] 田大伦, 盘宏华, 康文星, 方海波. 第二代杉木林养分动态研究. 中南林学院学报, 2001, 21(3): 6-12.
- [13] 杨超, 田大伦, 胡曰利, 闫文德, 方晰, 梁小翠. 连栽杉木林林下植被生物量动态格局. 生态学报, 2011, 31(10): 2737-2747.
- [14] 刘焯章, 田大伦, 康文星, 方海波. 第二代杉木幼林生物量的定位研究. 林业科学, 1997, 33(S2): 61-66.
- [15] 田大伦, 项文化, 闫文德, 康文星. 速生阶段杉木人工林产量结构及生产力的代际效应. 林业科学, 2002, 37(4): 14-18.
- [16] 闫文德, 田大伦, 何功秀. 湖南会同第 2 代杉木人工林乔木层生物量的分布格局. 林业资源管理, 2003, (2): 5-7, 12-12.
- [17] 张小全, 吴可红. 森林细根生产和周转研究. 林业科学, 2001, 37(3): 126-135.
- [18] 方晰, 田大伦, 项文化, 雷丕峰. 杉木人工林凋落物量及其分解过程中碳的释放率. 中南林学院学报, 2005, 25(6): 12-16.
- [19] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. New York: Springer-Verlag, 1975: 119-129.
- [20] Bliss L C. Caloric and lipid content in Alpine Tundra plants. Ecology, 1962, 43(4): 753-757.
- [21] 康文星, 邓湘雯, 赵仲辉. 林冠截留在杉木林生态系统能量转换过程中的作用. 林业科学, 2007, 43(2): 15-20.
- [22] 林承超. 福州鼓山季风常绿阔叶林及其林缘几种植物叶热值和营养成分. 生态学报, 1999, 19(6): 832-836.
- [23] 林永标, 任海, 彭少麟. 鹤山马占相思人工林的能量现存量及能量流动. 生态科学, 2000, 19(2): 1-6.
- [24] 巨文珍, 王新杰, 孙玉军. 长白落叶松林龄序列上的生物量及碳储量分配规律. 生态学报, 2011, 31(4): 1139-1148.
- [25] 何斌, 黄寿先, 招礼军, 陈玉萍, 荣慧, 罗柳娟. 秃杉人工林生态系统碳素积累的动态特征. 林业科学, 2009, 45(9): 51-57.
- [26] 何友均, 覃林, 李智勇, 邵梅香, 梁星云, 谭玲. 西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较. 生态学报, 2012, 32(23): 7586-7594.
- [27] 刘恩, 刘世荣. 南亚热带米老排人工林碳贮量及其分配特征. 生态学报, 2012, 32(16): 5103-5109.
- [28] 尉海东, 马祥庆. 中亚热带不同发育阶段杉木人工林生态系统碳贮量研究. 江西农业大学学报, 2006, 28(2): 239-243.
- [29] 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, 2012, 26(5): 1320-1329.