

不同林龄序列杉木实生林和萌芽林碳储量分配特征

唐学君^{1,2}, 王伟峰³, 罗细芳², 张现武², 张旭东¹

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 国家林业局华东林业调查规划设计院, 杭州 310019; 3. 内蒙古林业科学研究院生态功能与森林碳汇研究所, 呼和浩特 010010)

摘要: 以赣西南杉木实生林和萌芽林为研究对象, 通过野外样地调查和室内化学分析方法, 揭示了不同龄组实生林和萌芽林的碳储量分配特征, 为其可持续经营提供科学依据。结果表明: 不同龄组杉木实生林乔木层碳储量均高于萌芽林乔木层碳储量。杉木实生幼龄林乔木层碳储量为 9.63 t/hm^2 , 中龄林为 42.14 t/hm^2 , 近熟林为 69.15 t/hm^2 , 成熟林为 105.21 t/hm^2 ; 年均固碳量分别为 $1.69, 2.63, 3.01, 3.39 \text{ t/hm}^2$, 不同龄组的树干碳储量分别占整个乔木层的 $50.36\%, 70.60\%, 73.86\%, 77.58\%$ 。杉木萌芽幼龄林乔木层碳储量为 8.42 t/hm^2 , 中龄林为 23.58 t/hm^2 , 近熟林为 48.54 t/hm^2 , 成熟林为 75.26 t/hm^2 ; 年均固碳量分别为 $1.21, 1.57, 2.11, 2.59 \text{ t/hm}^2$, 不同龄组的树干碳储量分别占整个乔木层的 $54.28\%, 66.12\%, 71.92\%, 73.70\%$ 。杉木实生林和萌芽林的土壤碳储量均是中龄林最低, 成熟林最高。实生林各龄组土壤碳储量大小为: 成熟林 (153.21 t/hm^2) > 近熟林 (138.17 t/hm^2) > 幼龄林 (128.30 t/hm^2) > 中龄林 (113.11 t/hm^2)。萌芽林各龄组土壤碳储量大小为: 成熟林 (154.03 t/hm^2) > 近熟林 (138.28 t/hm^2) > 幼龄林 (130.20 t/hm^2) > 中龄林 (117.05 t/hm^2)。在密度相近的情况下, 除幼龄林外, 同一龄组的萌芽林总碳储量均小于实生林。同一龄组实生林和萌芽林的乔木层碳储量均有显著性差异 ($p < 0.05$), 而总碳储量幼龄林与中龄林无显著性差异, 近熟林与成熟林有显著性差异。引起杉木实生林和萌芽林碳储量分配差异性的主要原因是生长规律和经营管理不同。总体而言, 萌芽林的林下植被组成丰富, 灌木层、草本层和凋落物层的固碳能力较强, 在水土保持功能方面要优于实生林。

关键词: 碳储量; 分配特征; 杉木实生林; 杉木萌芽林; 林龄

中图分类号: S718.55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2017)01-0127-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.022

Carbon Storage and Its Allocation Characters of Chinese Fir Seedling Forest and Sprout Forest in Different Stand Ages

TANG Xuejun^{1,2}, WANG Weifeng³, LUO Xifang², ZHANG Xianwu², ZHANG Xudong¹

(1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration,

Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, BeiJing 100019; 2. East China

Forest Inventory and Planning Institute State Forestry Administration, Hangzhou 310019; 3. Research

Institute of Ecological Function and Forest Carbon Sink, Inner Mongolia Academy of Forestry, Hohhot 010010)

Abstract: Combining the field plot survey and laboratory chemical analysis method, Chinese fir seedling forest and sprout forest in southwest of Jiangxi were studied to reveal the carbon storage allocation characters of different stand ages and regeneration pattern, and to provide a scientific basis for the sustainable management of plantations. Our results showed that the carbon storage in tree layer of seedling plantation within different stand ages was generally higher than that of sprout forest. The carbon storage in tree layer of Chinese fir seedling forest within young, mid-mature, nearly mature, mature forest were 9.63 t/hm^2 , 42.14 t/hm^2 , 69.15 t/hm^2 and 105.21 t/hm^2 , respectively, and the average annual amount of carbon sequestration were 1.69 t/hm^2 , 2.63 t/hm^2 , 3.01 t/hm^2 and 3.39 t/hm^2 , and the trunk carbon storage of those accounted for 50.36% , 70.60% , 73.86% and 77.58% of the whole tree layer. The carbon storage in tree layer of Chinese fir sprout forest within young, mid-maturation, nearly mature, mature forest were 8.42 t/hm^2 , 23.58 t/hm^2 , 48.54 t/hm^2 , and 75.26 t/hm^2 , respectively, the annual average amount of carbon storage of those were 1.21 t/hm^2 , 1.57 t/hm^2 , 2.11 t/hm^2 and 2.59 t/hm^2 , and the trunk carbon storage of those accounted for 54.28% , 66.12% , 71.92% and 73.70% of the whole tree layer. The lowest soil carbon sequestration of both Chinese fir

收稿日期: 2016-09-20

资助项目: 国家科技支撑计划项目 (2015BAD07B07, 2015BAD07B04)

第一作者: 唐学君 (1981—), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事森林碳汇计量研究。E-mail: 443196863@qq.com

通信作者: 张旭东 (1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事退化生态系统恢复重建研究。E-mail: zhxdcaif@163.com

seedling forest and sprout forest were found in young forest, and the highest of those were found in mature forest. The ranking order of soil carbon storage of Chinese fir seedling forest were mature forest (153.21 t/hm^2) > nearly mature forest (138.17 t/hm^2) > young forest (128.30 t/hm^2) > mid-maturation forest (113.11 t/hm^2), while that of sprout forest were mature forest (154.03 t/hm^2) > nearly mature forest (138.28 t/hm^2) > young forest (130.20 t/hm^2) > mid-maturation forest (117.05 t/hm^2). Under the condition of the same stand density, the total carbon storage of sprout forest was lower than that of seedling forest except for young forest. There were significant difference of carbon storage within different stand ages between Chinese fir seedling forest and sprout forest ($p < 0.05$), however, the total carbon storage was not significantly different between the young and mid-mature forest, while significant difference was found between nearly and mature forest. Different growth rules and management caused different carbon storage allocation characters between Chinese fir seedling forest and sprout forest. In general, Chinese fir sprout forest were rich in understory species, and the ability for carbon sequestration of shrub, herb and litter layer were stronger, which were better than Chinese fir seedling forest in the aspect of soil and water conservation function.

Keywords: carbon storage; allocation characters; Chinese fir seedling forest; Chinese fir sprout forest; stand age

通过利用陆地生态系统植被和土壤积累有机碳来增加陆地生态系统碳储量,已成为当前和今后调节和控制大气 CO_2 浓度,减缓全球变暖速度的全球性重大策略。由于森林在固碳增汇方面具有无污染、低投入和可持续的优点,因此成为国际社会公认的应对全球气候变化减排措施^[1]。监测森林生态系统碳储量动态变化规律,对于准确了解森林生态系统碳库的大小并制定合理的增汇措施具有重要意义。人工林是森林生态系统的重要组成部分,我国人工林面积占全球人工林面积的 29.23%,是世界人工林第一大国,人工林的可持续经营管理在增加固碳效益方面具有巨大的潜力。据专家估算:1980—2005 年,中国造林活动累计净吸收约 $30.6 \times 10^9 \text{ t CO}_2$,森林管理累计净吸收 $16.2 \times 10^9 \text{ t CO}_2$,减少毁林排放 $4.3 \times 10^9 \text{ t CO}_2$,3 项合计达 $51.1 \times 10^9 \text{ t CO}_2$ ^[2]。森林经营是一项缓解气候变化影响的关键因子,大量的可能采取的策略包括:对已经积累在森林中的碳库进行保护和维持;通过造林提高碳储量;调整森林树种组成及径级分布;推广栽植更具自我恢复能力的树种基因型;栽植具有遮阴、固土及调整水文过程的树种以降低降水和温度变化所造成的影响。因此,森林生态系统(特别是人工林生态系统)的固碳增汇离不开可持续森林管理(Sustainable Forest Management, SFM),可持续森林管理(SFM)综合考虑了森林的经济、社会和环境价值,有助于确保气候变化减缓和适应措施的协同作用,并有助于其他森林管理目标的实现,帮助森林适应不断变化的环境。

杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)是我国亚热带地区的主要人工林树种,地理分布范围很广,面积达 $1.239 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占全国人工林面积的 26.55%,杉木商品材占我国总商品材的 20%~25%^[3]。杉木林生态系统平均生物量约为 36.52 t/hm^2 ,年平均

生产力约为 8.41 t/hm^2 ^[4]。传统杉木栽培以纯林为主,林分结构单一,由于过度砍伐和连栽等不合理经营方式,使杉木人工林与天然林相比持水能力明显下降,水土流失严重,已成为限制杉木人工林可持续经营的主要难点^[5]。综合相关文献资料,可以发现影响杉木多代连栽立地生产力下降的主要原因有:①杉木凋落物发生晚,大量凋落物发生在 14~15 a 前后;②杉木枯死枝叶具宿存特性,10~15 a 期间大部分枯死枝叶在树上,影响枯死枝叶的分解;③杉木凋落物养分含量低,如氮含量只有阔叶树的 30%~50%,因此枯落物养分元素积累低;④凋落物分解速率慢,分解速度在 45%以下,而宿存于树上的枯死枝叶分解速率更慢;⑤杉木为速生树种,尤其在 15 a 前生长量大,吸收养分多,而养分归还少,杉木人工林养分循环速率不及 40%;⑥杉木人工林培育密度较大,15 a 前很少有林下植物生长,20 a 后才有较好的林下植被发育,人工林长期处在单一的群落结构,很难发挥林下植被对地力的维护和改良作用。综合分析,影响杉木林立地生产力水平的主要因素不仅与自身的生物学特性有关,而且也与经营管理方式有关。

更新方式是影响林木生长发育的森林经营管理方式之一,而且也对森林的植被和土壤固碳功能产生重要的影响。杉木更新可采用实生苗造林、插条和伐桩萌芽更新方法,目前生产实践中主要采用实生苗造林的更新方式,由于萌芽更新简单、快捷,不需整地,且萌芽林初期生长迅速,减少了抚育的成本^[6]。也有相关报道表明萌芽林在生物多样性组成、水土保持功能等方面要优于实生林^[7]。在杉木林的固碳研究方面,目前研究大部分都集中在杉木人工林生态系统的碳储特征方面,包括不同组织器官(干、枝、叶、根)对植被含碳量的影响、不同林龄结构对植被固碳速率的影响、不同林下植被组成对土壤固碳的影响、不同林

分密度对植被碳储量的影响以及不同混交林模式对植被和土壤固碳潜力的影响等^[8-10]。而杉木萌芽林的研究大部分集中在林下植被组成、萌芽机理和土壤养分循环等方面^[11-12],对其固碳特征研究方面涉及极少,不同更新方式下杉木林的固碳特征如何,在不同龄组和组分间的碳储量分配特征还缺乏深入的研究。本研究以赣西南不同林龄杉木实生林和萌芽林为研究对象,通过野外样地调查和室内化学分析等方法,从乔木层、灌木层、草本层、凋落物层和土壤层等不同层次进行碳储特征分析,探讨不同更新方式(实生和萌芽)和不同林龄对杉木林固碳特征的综合影响,进而为杉木林的可持续经营提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杉木分布遍及中国整个亚热带,栽培区域达16个省区。东自浙江、福建及台湾山区,西至云南、四川盆地西缘及安宁河流域,南自广东中部和广西中南部,北至秦岭南麓、桐柏山、大别山。杉木垂直分布的幅度随纬度和地形而变化,中心产区主要分布于海拔800~1 000 m以下丘陵山地。分布区内的年平均温度为15~20℃,年降水量800~2 000 mm,产区主要土类为黄壤和红壤^[5]。本研究野外观测样地主要分布在江西省赣州市崇义县,地处113°55′—114°38′ E, 25°24′—25°55′ N之间。研究区属典型的常绿阔叶林生物气候带,适宜各种植物的繁衍,至今保留白垩纪末和第四纪冰期后孑遗的单科单属单种树种银杏(*Ginkgo biloba*)。林下植被主要有盐肤木(*Rhus chinensis*)、南烛(*Vaccinium bracteatum*)、木姜子(*Litsea pungens*)、山苍子(*Litsea cubeba*)、檫木(*Loropetalum chinensis*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、菝葜(*Smilax china*)、麦冬(*Ophiopogon japonicus*)、铁线蕨(*Adiantum capillus*)、凤尾蕨(*Pteris cretica*)、朱砂根(*Ardisia crenata*)、竹叶草(*Oplismenus compositus*)等。

1.2 研究方法

2013年7—8月,在研究区设置杉木人工林标准样地24块,样地分不同龄组和不同更新方式(实生林和萌芽林),每种类型对应龄组的样地重复3次(考虑密度、立地、干扰等因素相对一致),样地面积与森林资源清查固定样地面积一致(水平投影面积为800 m²)。在测定生物量的同时,采集乔木层不同器官、灌木层不同器官、草本层(地上、地下)以及凋落物层(半分解、未分解)各组分的样品,经烘干、粉碎、过筛后,测定其有机碳含量。在每个样地中,沿土壤剖面用环刀(100 cm³)按0—10,10—20,20—30,30—50,50—100 cm分层采集土壤样品,每一层重复取样3

次,把同一层次土壤样品按质量比例混合,然后带回实验室自然风干,粉碎过筛后测定有机碳含量和土壤容重。采用Microsoft Excel 2007、SPSS 18.0进行数据统计分析。

森林生态系统碳库主要包括乔木层碳库、林下植被碳库、枯落物及土壤碳库四大组分,各组分具体关系为:

$$C_F = C_{Tr} + C_{Sb} + C_L + C_S \quad (1)$$

式中: C_F 表示森林生态系统的总碳储量(t/hm²); C_{Tr} 、 C_{Sb} 、 C_L 、 C_S 分别表示乔木、林下植被、凋落物及土壤碳库储量(t/hm²)。

$$C_{Tr} = \sum_{j=l,b,s,r} (f_{i,j}(\text{DBH}, H) \times CF_{i,j}) \times 10000 / AP \quad (2)$$

式中: $f_{i,j}(\text{DBH}, H)$ 是树种*i*, *j*器官(*l*, *b*, *s*, *r*分别代表叶、枝、干、根)生物量异速生长方程; $CF_{i,j}$ 是树种*k*, *j*器官平均含碳量; AP 是样地面积(m²)。

$$C_{Sb} = (B_{Sb} \times CF_{i,j}) \times 10000 / AP \quad (3)$$

式中: B_{Sb} 、 $CF_{i,j}$ 分别表示林下植被*i*、器官*j*的生物量和平均含碳量。

$$C_L = L_i \times CF_i \times 10000 / AP \quad (4)$$

式中: L_i 是样方中枯落物现存量; CF_i 是枯落物的平均含碳量。

$$C_S = \sum_{i=1}^5 \left[\frac{1}{10} \text{SOC}_i \times BD_i \times D_i \times (1 - R_i / 100) \right] \quad (5)$$

式中: C_S 为土壤有机碳储量(t/hm²); SOC_i 是第*i*层(*i*=1, 2, 3, 4, 5分别代表不同土层厚度)土壤有机碳含量(g/kg); BD_i 是第*i*层土壤容重(g/cm³); D_i 是第*i*层土壤的厚度(cm); R_i 是第*i*层土壤中>2 mm砾石百分含量(%)。

2 结果与分析

2.1 不同龄组杉木实生林和萌芽林乔木层碳储量分配特征

由表1和表2可知,不同龄组杉木实生林乔木层碳储量均高于萌芽林乔木层碳储量。随着林龄的增加,各器官的碳储量都在增加,但各器官碳储量占乔木层碳储量的比例有相应的变化。就实生林而言,干碳储量(4.85~81.62 t/hm²)>根碳储量(1.69~10.87 t/hm²)>枝碳储量(1.27~7.09 t/hm²)>叶碳储量(1.82~5.63 t/hm²)。幼龄林乔木层碳储量为9.63 t/hm²,中龄林为42.14 t/hm²,近熟林为69.15 t/hm²,成熟林为105.21 t/hm²;年均固碳量分别为1.69, 2.63, 3.01, 3.39 t/hm²。不同龄组的树干碳储量分别占整个乔木层的50.36%, 70.60%, 73.86%, 77.58%。就萌芽林而言,干碳储量(4.57~55.47 t/hm²)>根碳储量(1.57~9.87 t/hm²)>枝碳储量(1.23~5.64 t/hm²)>叶碳储量(1.05~4.28

t/hm²)。幼龄林乔木层碳储量为 8.42 t/hm², 中龄林为 23.58 t/hm², 近熟林为 48.54 t/hm², 成熟林为 75.26 t/hm²; 年均固碳量分别为 1.21, 1.57, 2.11, 2.59 t/hm²。不同龄组的树干碳储量分别占整个乔木层的 54.28%, 66.12%, 71.92%, 73.70%。实生幼、中、近熟和成熟林的总碳储量分别是萌芽幼、中、近熟和成熟林的 1.14, 1.79, 1.42, 1.40 倍。在同等

立地条件下, 杉木萌芽林比实生林生长低, 萌芽、实生杉木胸径生长量差异不大, 但树高生长量差异明显, 萌芽林低于实生林, 这可能是导致乔木层碳储量差异的主要原因。此外, 萌芽林冠幅、冠长小于实生林, 冠长与树高之比大于实生林, 但枝少叶疏; 萌芽林前期胸径、树高、材积生长均快于实生林, 但速生持续时间短, 衰退早, 最终均低于实生林。

表 1 不同龄组杉木实生林乔木层碳储量分配特征 单位: t/hm²

龄组	干	枝	叶	根	总量
幼龄林	4.85±1.59(50.36)	1.27±0.25(13.19)	1.82±0.37(18.90)	1.69±0.67(17.55)	9.63±2.78(100)
中龄林	29.75±4.62(70.60)	4.24±0.63(10.06)	3.13±0.88(7.43)	5.02±0.86(11.91)	42.14±6.48(100)
近熟林	51.08±11.47(73.86)	6.02±1.15(8.71)	4.52±0.63(6.54)	7.53±1.69(10.89)	69.15±14.45(100)
成熟林	81.62±15.19(77.58)	7.09±0.72(6.74)	5.63±0.58(5.35)	10.87±2.82(10.33)	105.21±17.23(100)

注: 表中数值为平均值±标准差, 括号内的数值为同一龄组内的各器官碳储量占乔木层总碳储量的百分比。下同。

表 2 不同龄组杉木萌芽林乔木层碳储量分配特征 单位: t/hm²

龄组	干	枝	叶	根	总量
幼龄林	4.57±1.92(54.28)	1.23±0.38(14.61)	1.05±0.43(12.47)	1.57±0.51(18.65)	8.42±2.56(100)
中龄林	15.59±4.38(66.12)	2.53±0.87(10.73)	2.12±0.45(8.99)	3.34±1.07(14.16)	23.58±6.64(100)
近熟林	34.91±8.19(71.92)	4.06±1.02(8.36)	3.25±0.73(6.70)	6.32±1.64(13.02)	48.54±11.28(100)
成熟林	55.47±10.31(73.70)	5.64±1.23(7.49)	4.28±0.85(5.69)	9.87±2.38(13.11)	75.26±14.57(100)

2.2 不同龄组杉木实生林和萌芽林土壤碳储量分配特征

由图 1 可知, 杉木实生林和萌芽林的土壤碳储量均是中龄林最低, 成熟林最高。实生林各龄组土壤碳储量大小为: 成熟林(153.21 t/hm²)>近熟林(138.17 t/hm²)>幼龄林(128.30 t/hm²)>中龄林(113.11 t/hm²)。幼龄林各土层土壤碳储量为 16.38~33.76 t/hm²; 中龄林各土层土壤碳储量为 16.53~28.69 t/hm²; 近熟林各土层土壤碳储量为 19.54~34.43 t/hm²; 成熟林各土层土壤碳储量为 21.75~35.85 t/hm²。不同龄组 0—10 cm 土壤碳储量平均为 33.02 t/hm²; 10—20 cm 土壤碳储量平均为 24.76 t/hm²; 20—30 cm 土壤碳储量平均为 18.55 t/hm²; 30—50 cm 土壤碳储量平均为 25.42 t/hm²; 50—100 cm 土壤碳储量平均为 31.45 t/hm²。萌芽林各龄组土壤碳储量大小为: 成熟林(154.03 t/hm²)>近熟林(138.28 t/hm²)>幼龄林(130.20 t/hm²)>中龄林(117.05 t/hm²)。幼龄林各土层土壤碳储量为 16.63~33.66 t/hm²; 中龄林各土层土壤碳储量为 15.42~32.74 t/hm²; 近熟林各土层土壤碳储量为 17.69~38.16 t/hm²; 成熟林各土层土壤碳储量为 20.60~38.04 t/hm²。不同龄组 0—10 cm 土壤碳储量平均为 33.60 t/hm²; 10—20 cm 土壤碳储量平均为 23.58 t/hm²; 20—30 cm 土壤碳储量平均为 17.59 t/hm²; 30—50 cm 土壤碳储量平均为 26.16 t/hm²; 50—100 cm 土壤碳储量平均为 33.96 t/hm²。

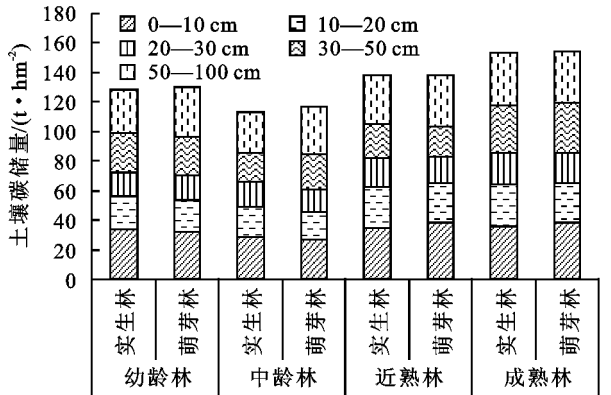


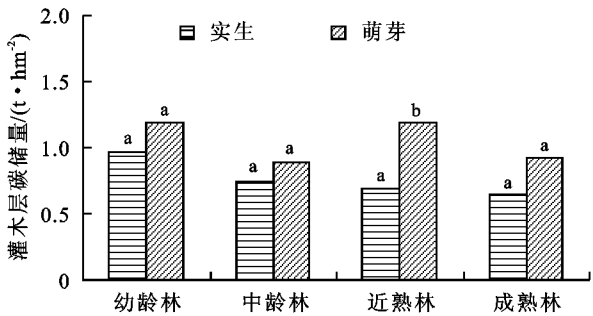
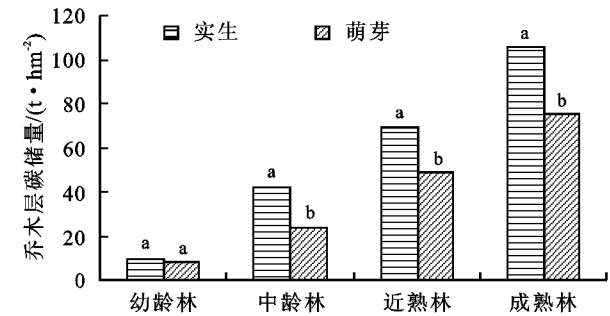
图 1 不同龄组杉木实生林和萌芽林土壤碳储量分配特征

2.3 不同龄组杉木实生林和萌芽林总碳储量分配特征

在幼龄林阶段, 杉木实生林和萌芽林乔木层碳储量无显著性差异, 而在其他龄组之间均存在显著性差异($p<0.05$), 并且是实生林的碳储量高于萌芽林的碳储量(图 2)。萌芽林幼龄林乔木层碳储量为相近密度实生林的 87.44%, 中龄林为实生林的 55.96%, 近熟林为实生林的 70.19%, 成熟林为实生林的 71.53%。除近熟林外, 两种更新方式下的灌木层碳储量均无显著性差异, 萌芽林的灌木层碳储量高于实生林, 并且萌芽林的生物多样性也高于实生林(图 2)。除幼龄林外, 两种更新方式下的草本层碳储量均存在显著性差异($p<0.05$), 萌芽林的草本层碳储量高于实生林(图 3)。凋落物层的碳储量变化规律与草本层类似, 说明萌芽林更有利于生物多样性的形成, 在水土保持功能方面比实生林具有优势(图 3)。林龄与植被、土

壤碳储量间的关系反映了植被和土壤碳储量在林龄增长过程中非同步和非同速的变化趋势。在林龄增长过程中,尽管植被碳储量呈持续增加趋势,土壤碳储量却呈现先减少后增加的趋势,在中龄林阶段最低,表现为有机碳释放状态(图 4)。虽然两种更新方式下的土壤碳储量无显著性差异,但在总碳储量方面,近熟林和成熟林均存在显著性差异(图 4)。其中,萌芽林幼龄林和中龄林总碳储量无显著性差异,而其他龄组之间均有显著性差异。萌芽林的幼、中、近、成熟林总碳储量分别为 141.72,144.42,191.41,234.30 t/hm²,对应固定 CO₂ 的量分别为 519.64,529.54,701.84,859.10 t/hm²;年均固碳量分别为 20.25,9.63,8.32,8.07 t/hm²,对应固定 CO₂ 的量分别为 74.23,35.30,30.51,29.62 t/hm²。土壤碳储量占总碳储量的比例分别为 91.87%,81.06%,

72.24%,65.74%;乔木层碳储量占总碳储量的比例分别为 5.94%,16.32%,25.36%,32.12%;凋落物层碳储量占总碳储量的比例分别为 0.61%,1.02%,1.0%,1.09%;灌木层碳储量占总碳储量的比例分别为 0.83%,0.63%,0.62%,0.39%;草本层碳储量占总碳储量的比例分别为 0.74%,0.97%,0.78%,0.65%。在密度相近的情况下,除幼龄林外,同一龄组的萌芽林总碳储量均小于实生林。有研究表明,在同等立地条件下,杉木萌芽林比实生林生长低近 2 个指数;萌芽、实生杉木胸径生长量差异不大,但树高生长量差异极显著,萌芽林低于实生林;在中等、较差立地,萌芽林产量比实生林低 4%~6%;而在较好的立地,这种差异可达到 19%。因此,除了林龄的影响,另一个影响杉木实生林和萌芽林总碳储量分配差异的重要因素就是立地条件。



注:不同字母表示同一龄组不同更新方式间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2 不同龄组杉木实生林和萌芽林乔木层、灌木层碳储量比较

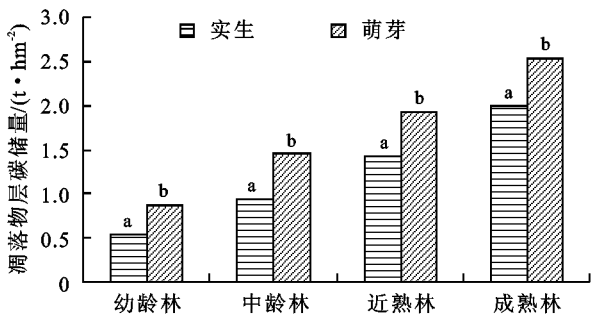
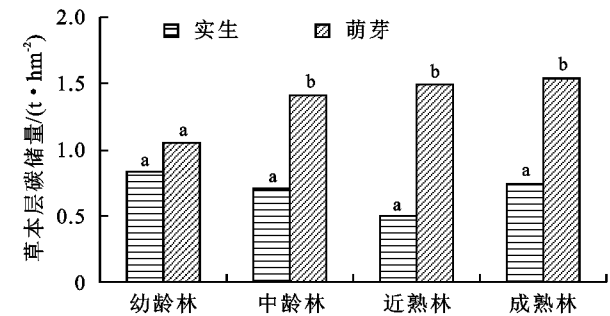


图 3 不同龄组杉木实生林和萌芽林草本层、凋落物层碳储量比较

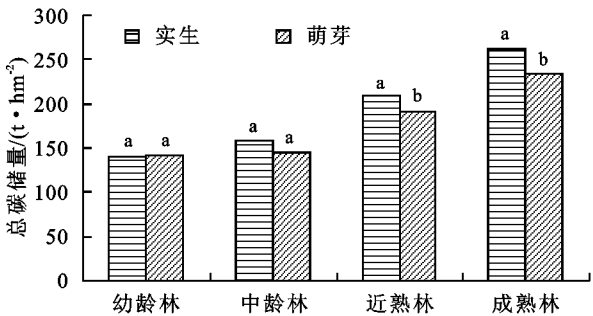
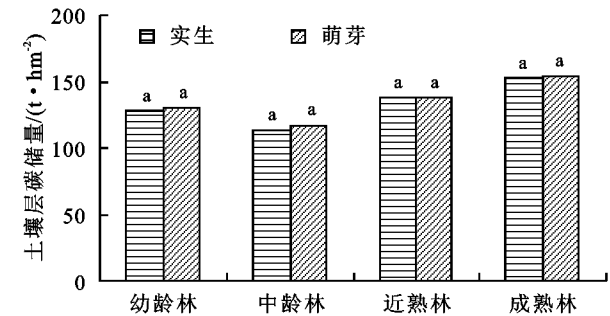


图 4 不同龄组杉木实生林和萌芽林土壤层、总碳储量比较

3 讨论

3.1 林下植被组成对杉木林植被碳储量和土壤碳储量的影响

杉木实生林和萌芽林在林下植被组成方面有一定

的差异,林下植被是人工林生态系统的重要组成部分,在养分循环和地力维护中起重要的作用。一般而言,林下植被生物量对土壤结构无影响,但林下植被组成影响凋落物的存量,凋落物的分解又与土壤有机碳、土

壤理化性质具有显著相关性,因此,杉木纯林地力会随着林龄的增加和凋落物分解的加快得到一定程度的恢复,进而影响杉木林植被碳储量和土壤碳储量^[13]。不同龄林林下植被的生物量差异也很大,这必然也会对杉木林生态系统的总碳储量产生一定影响,不过这种影响会随着林龄的增加而不断减弱,最终乔木层决定着植被碳储量的组成。林龄的变化主要会影响林分的郁闭度和冠层结构,进而影响林下植被组成及碳储量分配格局。田大伦等^[14]、Chen 等^[15]、刘延惠等^[16]研究发现,杉木林从幼林阶段到干材阶段的生长过程中,林下植被生物量表现出波动性的下降趋势,不同发育阶段杉木林林下植被生物量受林分郁闭度和林龄的影响较大。各龄组的土壤有机碳含量在垂直剖面上均表现为沿土层向下减少的趋势,这符合土壤有机碳垂直分布的一般特征。在同一土层中,不同林龄杉木林土壤有机碳含量均表现为成、过熟林最高,中龄林最低^[9]。周纯亮等^[17]研究了不同林龄杉木人工林土壤有机碳含量及其在土壤剖面分布的差异,结果表明:土壤有机碳在各剖面上分布随土层深度增加而呈下降趋势,杉木林土壤有机碳含量随着林龄的增加而增加,但也只在土壤表层呈显著性差异。本研究得到的结果与以上研究结果基本一致,这也表明杉木林采伐迹地的不同经营方式(特别是林下植被组成及其采伐剩余物的处理方式等)是引起林地土壤有机碳含量差异的重要原因,土壤全氮、C/N 和全磷以及它们的共同作用是影响不同龄组杉木林土壤有机碳变化的主导因素,且影响机理不同^[18]。为了明确杉木不同发育阶段各土壤因子对土壤有机碳库的影响作用,王丹等^[19]应用逐步回归分析法建立了土壤有机碳及其影响因子间的回归方程。邓华平等^[20]对豫南不同林龄杉木林生态系统碳储量及其空间动态特征研究表明,5 个林龄阶段(5, 10, 15, 20, 25 a)杉木林生态系统总生物碳储量随着林龄的增加而增加。本研究与其相比,在碳储量及其分配特征和年均固碳量方面存在一定的差异性,这表明了杉木产区分布可能是引起碳储量分配特征的主要原因,不同杉木产区水热条件、土壤养分存在较大的差异性。此外,密度大小、立地条件和更新方式、经营措施等也是影响杉木林碳储量分配特征的重要原因。

3.2 杉木萌芽林更新机制及其对水土保持功能的影响

杉木萌芽林在水土保持功能方面比实生林具有优势,这需从杉木萌芽林的更新机制等方面进行探讨。叶镜中等^[21]研究发现,决定杉木萌芽的生物学基础是来自腋生的休眠芽,休眠芽的数量与萌芽林的生长有直接关系。马祥庆等^[22]对杉木纯林及其混交林采伐迹地上进行免耕萌芽更新研究,结果表明:免耕萌芽更新避免了人工造林炼山、整地对林地的干扰

和破坏,具有显著的水土流失防治效果,并有利于林地土壤肥力的维持和提高林分物种多样性。利用杉木伐根萌芽性强的特性,在采伐后通过人工补植、除萌、松土抚育等营林辅助措施来恢复森林的方法,可以达到在投入少量资金的情况下尽快恢复森林的目的。萌芽更新的杉木林前期生长比实生林要快,而且更新成本低,但后期生长缓慢,难以成大材。所以,杉木萌芽更新只能以生产中小径材为主。第 1 代杉木萌芽林采伐后,虽然其树桩还有一定的萌芽力,但因树桩已老化,土壤肥力减弱,其萌芽条长势明显比第 1 代萌芽林弱。因此,萌芽林采伐后一般不宜再次采用萌芽更新^[23]。在杉木伐桩周围添加强阔叶树的枯枝落叶可以提高杉木伐桩的萌条数,增加萌条高和萌条基径的生长量,有利于提高萌芽林的碳储量。汪传佳^[24]对萌芽更新与其他造林方法进行比较后认为,多代萌芽土壤肥力消耗较大,地力衰退快;2 代以上杉木林及原萌芽林不宜采用萌芽更新,应及时改换树种,恢复地力。但对山高坡陡,易造成水土流失的杉木采伐迹地,实行萌芽更新有利于保持水土、保护生态环境。黄旺志等^[25]研究表明:杉木萌芽率随伐桩直径增加而下降,平均萌芽率可达 90% 以上;萌芽林生长与立地条件和原杉木生长情况有关;萌芽林生长前期快于实生林,但其树高、胸径、材积和生长过程与实生林相差不大。詹承雄^[26]对杉木林采伐迹地上萌芽更新状况进行调查发现,杉木伐桩粗度和高度对杉木萌芽条的数量有显著影响,但对萌芽条长度和直径影响不显著。本研究虽然对杉木萌芽林的更新机制未进行研究,但从研究数据中可以发现一定的规律,即萌芽林在水土保持功能方面要优于实生林。

3.3 杉木萌芽林改造杉阔混交林对增加固碳潜力的影响

人工纯林营造成本较高,而且不利于立地生产力的维持,科学利用杉木萌芽的更新方式尽管可以在短期内保持土壤养分,但从长期增加固碳潜力来讲,萌芽林的固碳潜力不大,需要把杉木萌芽林改造成杉阔混交林来实现。沈启昌^[27]研究了杉木萌芽林改造为木荷杉木混交林后的生长效应,结果表明:林木生长量大幅度提高,林木和林地持水、保水能力增强,林内小气候得到改善,林分水源涵养能力进一步提高,林地生产力得到维护,为今后杉木多代萌芽林和杉木低产林改造提供科学依据。邵可满等^[28]对杉木人工林皆伐迹地进行山核桃与杉木萌芽林复合混交经营试验表明,在复合混交经营模式中山核桃保存率高、生长好,虽然始果期迟,但结实量高。汪炎明^[29]对杉木萌芽林中套种刨花楠进行了研究,在杉木萌芽林中套种刨花楠能够合理利用杉木萌芽条,同时为刨花楠生

长提供较为适宜的生长空间,具有较好的生长效应。刘正忠^[30]研究了杉木林采伐迹地上,通过不炼山、套种火力楠与深山含笑,进行杉木萌芽纯林与混交林的对比试验,9 a 试验结果表明:混交林中杉木的平均胸径、树高、单株材积、地上部分单株生物量分别比杉木萌芽纯林增加 4.04%,8.75%,16.3%,1.43%;混交林的投入产出比高于杉木萌芽纯林,说明本模式是恢复和提高杉木连栽立地生产力的可行方法。巫基有^[31]从枫香和杉木萌芽林混交造林的可行性、混交造林的优势、混交造林技术要点等进行研究认为,杉木 2 代更新时,在保留部分萌条的同时,栽植枫香形成枫杉混交林,具有较好的生态和经济效益。总体来讲,杉木萌芽混交林比萌芽纯林的土壤养分含量有所提高,使土壤理化性状得到很大的改善,并且植被固碳能力显著提升,有利于杉木林的可持续经营。

4 结论

(1)不同龄组杉木实生林乔木层碳储量均高于萌芽林乔木层碳储量,杉木萌芽林幼龄林乔木层碳储量为相近密度实生林的 87.44%,中龄林为实生林的 55.96%,近熟林为实生林的 70.19%,成熟林为实生林的 71.53%。杉木实生幼龄林乔木层碳储量为 9.63 t/hm²,中龄林为 42.14 t/hm²,近熟林为 69.15 t/hm²,成熟林为 105.21 t/hm²;年均固碳量分别为 1.69,2.63,3.01,3.39 t/hm²,不同龄组的树干碳储量分别占整个乔木层的 50.36%,70.60%,73.86%,77.58%。杉木萌芽幼龄林乔木层碳储量为 8.42 t/hm²,中龄林为 23.58 t/hm²,近熟林为 48.54 t/hm²,成熟林为 75.26 t/hm²;年均固碳量分别为 1.21,1.57,2.11,2.59 t/hm²,不同龄组的树干碳储量分别占整个乔木层的 54.28%,66.12%,71.92%,73.70%。

(2)杉木实生林和萌芽林的土壤碳储量均是中龄林最低,成熟林最高。实生林各龄组土壤碳储量大小为:成熟林(153.21 t/hm²)>近熟林(138.17 t/hm²)>幼龄林(128.30 t/hm²)>中龄林(113.11 t/hm²)。萌芽林各龄组土壤碳储量大小为:成熟林(154.03 t/hm²)>近熟林(138.28 t/hm²)>幼龄林(130.20 t/hm²)>中龄林(117.05 t/hm²)。

(3)在密度相近的情况下,除幼龄林外,同一龄组的萌芽林总碳储量均小于实生林。同一龄组实生林和萌芽林的乔木层碳储量均有显著性差异($p < 0.05$),而总碳储量幼龄林与中龄林无显著性差异,近熟林与成熟林有显著性差异。

(4)杉木萌芽林林下植被和凋落物较实生林丰富,在水土保持、土壤养分及生物多样性等方面具有优势。此外,由于受空间异质性、林分密度、人为干扰等方面的影响,很难做到样地完全的代表性。从样地的区域

分布和数量上来讲,本研究选择的样地数量还有待增加,而且在今后研究中要进一步揭示不同更新方式对杉木林生态系统 C—N—H₂O 耦合循环的影响。

参考文献:

- [1] 王伟峰,段玉玺,张立欣,等. 适应全球气候变化的森林固碳计量方法评述[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(3):170-176.
- [2] 魏晓华,郑吉,刘国华,等. 人工林碳汇潜力新概念及应用[J]. 生态学报,2015,35(12):3881-3885.
- [3] 姚利辉,康文星,赵仲辉,等. 会同杉木人工林不同生长阶段植物固碳特征[J]. 生态学报,2015,35(4):1187-1197.
- [4] 王伟峰,段玉玺,张立欣,等. 不同轮伐期对杉木人工林碳固存的影响[J]. 植物生态学报,2016,40(7):669-678.
- [5] 周丽丽,蔡丽平,马祥庆,等. 不同发育阶段杉木人工林凋落物的生态水文功能[J]. 水土保持学报,2012,26(5):249-253.
- [6] 范广阔,邹双全,林开敏,等. 不同更新方式对杉木林土壤肥力的影响[J]. 福建林学院学报,2009,29(3):210-214.
- [7] 徐桂林,方晰,田大伦,等. 杉木林地不同更新方式土壤有机碳垂直分布及储量[J]. 浙江林学院学报,2009,26(3):333-340.
- [8] 兰斯安,杜虎,曾馥平,等. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局[J]. 应用生态学报,2016,27(4):1125-1134.
- [9] 曾伟,江斌,熊彩云,等. 江西省不同林龄杉木碳储量分配格局[J]. 中国农学通报,2015,31(28):1-5.
- [10] 王伟峰,魏晓华,段玉玺,等. 采伐剩余物处理方式对杉木人工林固碳量的长期影响[J]. 水土保持研究,2016,23(6):198-203.
- [11] 李玉平. 不同更新方式杉木林土壤有机碳与土壤呼吸的动态研究[D]. 福州:福建农林大学,2010.
- [12] 田晓萍. 杉木萌芽更新的研究[D]. 福州:福建农林大学,2008.
- [13] 周德明,马玉莹,梅杰. 不同林龄杉木林地土壤特性分析[J]. 土壤通报,2012,43(2):353-356.
- [14] 田大伦,杨超,闫文德,等. 连栽杉木林不同生育阶段林下植被生物量[J]. 林业科学,2011,47(5):145-149.
- [15] Chen G S, Yang Z J, Gao R, et al. Carbon storage in a chronosequence of Chinese fir plantations in southern China[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 300(4):68-76.
- [16] 刘延惠,丁访军,崔迎春,等. 黔中地区不同林龄杉木人工林碳储量及其分配特征[J]. 水土保持学报,2015,29(8):278-283.
- [17] 周纯亮,吴明,刘满强,等. 中亚热带 3 种人工林土壤有机碳含量与碳密度的动态变化[J]. 土壤通报,2010,41(3):568-572.
- [18] 曹小玉,李际平,张彩彩,等. 不同龄组杉木林土壤有机碳和理化性质的变化特征及其通径分析[J]. 水土保持学报,2014,28(4):200-205.
- [19] 王丹,王兵,戴伟. 不同发育阶段杉木林土壤有机碳变化特征及影响因素[J]. 林业科学研究,2009,22(5):667-671.