

DOI: 10.5846/stxb201411242333

黄雪蔓, 尤业明, 蓝嘉川, 刘世荣, 贾宏炎, 朱宏光, 温远光. 不同间伐强度对杉木人工林碳储量及其分配的影响. 生态学报, 2016, 36(1): - .
Huang X M, You Y M, Lan J C, Liu S R, Jia H Y, Zhu H G, Wen Y G. The effect of carbon storage and its allocation in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different thinning intensities. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): - .

不同间伐强度对杉木人工林碳储量及其分配的影响

黄雪蔓^{1,2}, 尤业明^{1,2}, 蓝嘉川^{1,2}, 刘世荣³, 贾宏炎⁴, 朱宏光^{1,2}, 温远光^{1,2,*}

1 广西大学林学院, 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 南宁 530004

2 广西大学林学院, 广西高校林业科学与工程重点实验室, 南宁 530004

3 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

4 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 凭祥 532600

摘要: 间伐改变了林分环境, 影响林木生长及碳储量, 准确评估不同间伐强度对杉木人工林生物量及碳储量的影响对碳汇林业的发展具有重要意义。2013 年, 以中国林业科学研究院热带林业实验中心 1992 年造林并于 2005 年实施三种不同间伐强度 (74%: H, 50%: M 和 34%: L) 的杉木人工林为研究对象, 样地内每木检尺, 实测样木生物量, 并结合杉木群落各组分含碳率的实测值, 对杉木人工林的生物量和碳储量进行估算, 结果表明: H (74%) 显著增加了林木的胸径 ($P < 0.01$), 分别比 M (50%)、L (34%) 和 CK (0%) 增加了 13.65%、20.74% 和 18.37%。三种间伐强度之间树高差异均不显著, 而 CK 的树高均大于三种间伐强度的树高, 分别比 H、M 和 L 增加了 6.64%、15.73% 和 16.70%。与对照相比, H 显著增加了林木的单株生物量 ($P < 0.01$)。对照林地乔木层的碳储量均显著高于其他三种间伐强度的乔木层碳储量 ($P < 0.05$), 而乔木层各器官碳储量大小顺序为: 树干 > 树枝 > 树根 > 树皮 > 树叶; 三种间伐强度和对照处理杉木人工林之间的生态系统碳储量差异性不显著 ($p > 0.05$), 其中乔木层和土壤层为主要碳库, 两者所占总的碳储量超过生态系统总的碳储量的 97.62%。

关键词: 杉木人工林; 间伐强度; 生物量; 碳储量; 分配

The effect of carbon storage and its allocation in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different thinning intensities

HUANG Xueman^{1,2}, YOU Yeming^{1,2}, LAN Jiachuan^{1,2}, LIU Shirong³, JIA Hongyan⁴, ZHU Hongguang^{1,2}, WEN Yuanguang^{1,2,*}

1 State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-Bioresources, College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China

2 Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Forestry Science and Engineering, College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China

3 State Forestry Administration, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

4 Experiment Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, China

Abstract: The stand environment, tree growth, and carbon storage of plantations could be affected by thinning. Thus, to assess the dynamics of the forest ecosystem carbon pool, it is important to determine the changes of carbon storage in plantations after thinning. In 2013, the biomass, and carbon storage and allocation of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different thinning intensities (i.e., H: 74%, M: 50%, and L: 34%) were studied using a biomass survey at the Experiment Center of Tropical Forestry of the Chinese Academy of Forestry. The results showed that the diameter at breast height (DBH) of H was significantly higher ($P < 0.01$) than M, L, and CK (0%), which increased by 13.65%, 20.74%,

基金项目: 国家科技支撑计划 (2012BAD22B01); 国家自然科学基金 (31460121); 广西重大专项计划 (1222005)

收稿日期: 2014-11-24; **修订日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wenyg@263.net

and 18.37%, respectively. There was no difference in the height of trees between the three thinning intensities; however, the height of trees in CK (0%) plots was higher than those in plots of the three thinning intensities, which increased by 6.64%, 15.73%, and 16.70%, for H, M, and L, respectively. The individual biomass with H was significantly higher ($P < 0.01$) than that for M, L, and CK. The carbon storage of the arbor layer in CK was significantly higher ($P < 0.05$) than that in the three thinning intensities, and the carbon storage in different organs was in the order: stem > branch > root > bark > leaf. There was no difference between the carbon storage of *C. lanceolata* plantation ecosystems with the three thinning intensities and CK plots. The arbor and soil layers were the main carbon pools, accounting for more than 97.62%.

Key Words: *Cunninghamia lanceolata*; plantation ecosystems; thinning intensity; biomass; carbon storage; allocation

森林是地球上最重要的陆地生态系统之一,在全球气候变化研究中居重要地位,森林植被生物量约占全球陆地植被生物量的 85%^[1],是评估区域森林碳平衡的重要参数,是衡量森林固碳能力的重要指标,也是表征植物活动的关键变量^[2]。因此,准确估算森林生物量对研究区域陆地生态系统的生产力、营养格局和碳循环等均具有十分重要的意义^[3]。随着世界人工林面积不断增加,人工林生态系统碳循环及生态系统的响应等方面受到广泛重视^[4-6]。而人工林生物量碳储量是最具活力的研究方向。杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方特有的优质速生用材林针叶树种,具有适应性强和经济效益高的特点而被广泛种植。间伐作为森林经营的一种手段,其通过调整林分密度结构,减小林木间竞争,从而促进林下植被的更新与生长,改变土壤肥力,促进林木生长^[7-9]。目前,国内外相关研究大多集中在不同间伐强度对林木生长^[10]、林地土壤养分^[11]、林下植被多样性^[7,12]等的影响,而不同间伐强度对林地碳储量和生物量的影响较为薄弱。本文从不同间伐强度对杉木人工林生物量及碳储量的变化和发展进行研究,旨在揭示不同间伐强度下杉木人工林碳储量及其空间分布特征,为进一步优化杉木人工林高效经营技术,提高林分碳汇功能提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于中国西南边陲的广西壮族自治区凭祥市境内中国林业科学研究院热带林业实验中心青山实验林场(22°10' N, 106°50' E)。该地区属于南亚热带季风气候区域内的西南部,属湿润半湿润气候,干湿季分明。境内光照充足,降水充沛,年平均降水 1400 mm,主要发生在每年 4—9 月;年蒸发量 1261 mm—1388 mm,相对湿度 80%—84%。年平均气温 20.5 °C—21.7 °C,平均月最低温度 12.1 °C,平均月最高温度 26.3 °C;≥10 °C 活动积温 6000 °C—7600 °C。主要地貌类型以低山丘陵为主,地带性土壤以砖红壤为主,主要由花岗岩风化形成。

1.2 研究方法

1.2.1 样方设置

于 2004 年 9 月,在青山实验场 6 林班选择 1992 年种植的杉木林,改造前林地以传统林分经营方式进行林业管护,林分内建立了 12 个(20 × 30) m²固定实验样地,设计 3 组重复实验,每个固定样地分为 6 个 10m × 10m 的样方,以 10m × 10m 的样方为基本单位进行群落生态学调查,对林分本底进行群落样方调查。2005 年,在样地内选择生长较优良的杉木作为目标树,按强度间伐 H(74%)、中度间伐 M(50%)和弱度间伐 L(34%)三种不同间伐强度疏伐去生长不良、干形不优的干扰树。在改造后的人工林内,除了进行补植、修枝、抚育等管理外,2013 年 8 月对间伐 8a 后的杉木林分进行调查,林分样地基本概况如表 1。

1.2.2 样地植被群落调查

调查项目主要包括:

- (1)描述调查人工林群落的外貌特征,测定林分郁闭度情况;
- (2)林下灌、草多样性调查:在每个 10m × 10m 的样方左上角设立一个 5m × 5m 的灌草调查样方,记录小

样方内所有灌木(包括乔木幼树幼苗)和所有草本植物的种名、株数、高度、盖度;藤本植物记录其种名、株数、长度和盖度;对于不认识的植物采集植物标本,带回室内鉴定。

(3)环境因子:记录样方海拔、坡向、坡位、坡度、土壤类型等。

表 1 杉木近自然化人工林分的基本概况(平均值±标准差,n=3)

Table 1 Survey of the experinment stands in the <i>Cunninghamia lanceolata</i> plantations(mean±SD, n=3)						
年份 Year	间伐强度 Thinning intensity	坡向 Aspect	坡位 Site condition	海拔/m Elevation	杉木密度/(株/hm ²) Stand density	郁闭度 Canopy density
2013	强度 H(74%)	NW	上中下	638—726	539±42	0.70
2013	中度 M(50%)	NW	上中下	638—726	1006±35	0.75
2013	弱度 L(34%)	NW	上中下	638—726	1572±142	0.85
2013	对照 CK(0%)	NW	上中下	638—726	1567±33	0.85

1.2.3 乔木和灌草生物量调查

(1)杉木生物量测定采用径阶平均标准木法,首先按 2cm 划分调查杉木的径阶确定标准木的胸径范围,然后在每块样地附近选择平均标准木并伐取 8 株杉木标准木。首先将其伐倒,地上部分按 Monsic 分层切割法杉木地上部分分为干材、上层枝、下层枝、上层叶、下层叶、树皮、枯枝,树干部分以 2m 为一个区段分割,称量各部分鲜重并采样带回室内进行烘干处理。地下部分采用全挖法,按根兜、粗根(直径>2cm)、中根(0.5—2cm)、小根(0.2-0.5cm)和细根(<0.2cm)分解,并称量各部分鲜重并实时记录。

依据相对生长法^[13-14],建立以(D^2H)为自变量,生物量(W)为因变量的线性回归生物量估测方程。Ogawa 发现 D^2H 生物量估算模式可以消除不同的林分间环境因子差异而带来的系统误差,因而能更准确的计算数林木各部分的生物量。鉴于此,本文选用 D^2H 与 W 的关系模型来拟合林木各器官和全树的生物量回归方程。根据调查数据,分别对干、皮、枝、叶、根系等各器官的生物量建立线性回归方程(表 2),用以估算各器官的生物量,杉木单株生物量是将各器官生物量进行加和。林分平均木的单株生物量乘上样地面积上杉木的总株数即可得到林分的总生物量^[15]。林分总生物量除以林分面积,即可得出单位面积林分的生物量。

经统计学检验各器官干、枝、叶、根和整株数学模型的决定系数在 0.940 到 0.993 之间,经 t 检验均达到极显著水平($P<0.01$),说明利用该生物量模型可以较准确的对杉木林分的生物量进行估测。各器官生物量分配率=各器官平均单株生物量干重/平均单株总生物量干重 $\times 100\%$ 。

表 2 杉木人工林生物量估算模型

Table 2 Regression models for arborous layer in Chinese fir plantations				
器官 Organ	拟合方程 Fitted equation	R^2	F	P
干 Stem	$W=28.518+0.01D^2H$	0.977**	252.971	0.000
皮 Bark	$W=3.418+0.001D^2H$	0.957**	133.740	0.000
枝 Branch	$W=5.15-0.003D^2H+1.041\times 10^{-6}(D^2H)^2-3.784\times 10^{-11}(D^2H)^3$	0.940**	20.861	0.007
叶 Leaf	$W=3.730-0.0007236D^2H+2.91\times 10^{-7}(D^2H)^2-1.1139\times 10^{-11}(D^2H)^3$	0.964**	35.635	0.002
根 Root	$W=-0.7731+0.008D^2H-1.699\times 10^{-7}(D^2H)^2+2.711\times 10^{-12}(D^2H)^3$	0.985**	87.931	0.000
整株 Total	$W=20.869+0.027D^2H-3.503\times 10^{-7}(D^2H)^2+3.938\times 10^{-12}(D^2H)^3$	0.993**	182.509	0.000

*, ** 分别表示差异达 0.05、0.01 显著水平, W 单位为 kg, D 的单位为 cm, H 的单位为 m

(2)灌木层、草本层生物量调查是按“品”字型在样地 1、3、5 号小样方左上角各设置 1 个灌木(2 m $\times$ 2 m)和草本及凋落物(1 m $\times$ 1 m)的小样方,采用全挖法实测生物量,收集全部植物个体,灌草分地上、地下两部分,称取样品鲜重并带回实验室,85℃ 恒温下烘干至恒重后称干重。

1.2.4 土壤样品采集与分析

2013 年 8 月,在每个固定样方按“品”字形设采样点,挖取土壤剖面,记录土壤颜色、土层厚度、质地等特征,并按 0—20cm、20—40cm 两层采集土样,然后按四分法混合取土样,带回实验室晾干后过 2 mm 土筛并进

行土壤理化性质测定。将植物样于 85℃ 下烘干,磨碎,土壤和植物样品均采用重铬酸钾外加热法测定其总的有机碳含量。植物碳储量=有机碳含量×单位面积生物量。土壤碳储量=土壤有机碳含量×土壤容重×土壤厚度×单位面积^[16]。

1.3 数据处理

单因素方差分析(one Way-ANOVA)来检验不同间伐强度的土壤理化性质、林下地被物生物量等的差异性。以上所有统计分析均是在统计分析软件 SPSS 19.0 (SPSS, Inc, Chicago, IL) 上完成,显著性差异均是在 $P < 0.05$ 水平上,利用 Sigmaplot 10.0 软件完成作图。

2 结果与分析

2.1 间伐对杉木胸径、树高和单株生物量的影响

间伐处理 8 年后,不同间伐强度杉木平均胸径差异显著($P < 0.01$),大小顺序为:强度间伐(74%)(22.97 ± 0.57) cm > 中度间伐(50%)(19.83 ± 0.76) cm > 弱度间伐(34%)(18.20 ± 0.70) cm,对照样地(CK)杉木的平均胸径为(18.75 ± 0.33) cm,与中度间伐、弱度间伐的胸径差异不显著($p > 0.05$)(图 1)。不同间伐强度杉木树高差异不显著,但是对照样地杉木平均树高(17.57 ± 1.06) m,显著高于弱度间伐和中度间伐($P < 0.05$)(图 1)。强度间伐平均单株杉木生物量(251.89 ± 2.04) kg 显著大于中度间伐(177.93 ± 16.69) kg、弱度间伐(151.37 ± 8.50) kg 和对照样地(185.43 ± 7.14) kg 的平均单株杉木生物量($P < 0.01$)(图 1)。

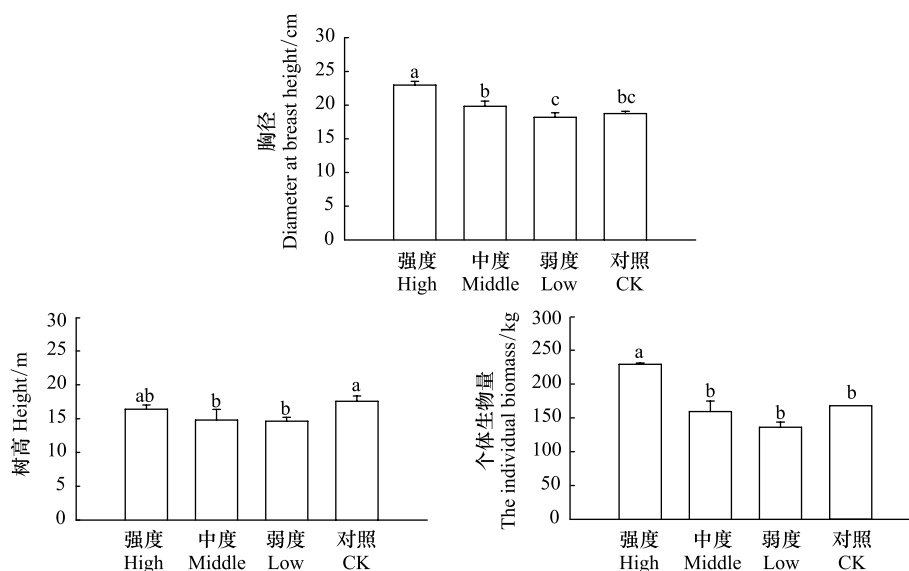


图 1 不同间伐强度杉木人工林胸径、树高和单株生物量情况

Fig.1 The DBH, height and individual tree biomass in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different thinning intensity

2.2 乔木层各器官生物量及其碳储量分配

不同间伐强度的乔木总生物量及碳储量差异显著,且随着间伐强度的降低,生物量和碳储量呈增加趋势。大小顺序均为对照 > 弱度间伐 > 中度间伐 > 强度间伐,其中对照杉木林总生物量(268.00 ± 10.59 t hm^{-2})均显著高于弱度间伐(219.58 ± 14.20 t hm^{-2})、中度间伐(165.38 ± 16.89 t hm^{-2})和强度间伐(126.48 ± 5.52 t hm^{-2})($P < 0.01$);对照杉木乔木层总碳储量(128.25 ± 5.05 t C hm^{-2})均显著高于弱度间伐(105.15 ± 6.79 t C hm^{-2})、中度间伐(79.14 ± 8.05 t C hm^{-2})和强度间伐(60.45 ± 2.64 t C hm^{-2})($P < 0.01$);强度间伐和中度间伐的生物量、碳储量差异不显著($P > 0.05$);不同间伐强度间,乔木各器官生物量及碳储量的变化趋势与总生物量及碳储量基本一致(图 2)。

不同间伐强度杉木各器官生物量分配均以树干最高,占总生物量的 50.06%—56.26%,其次为树根和树

枝,分别占总生物量的 24.89%—25.06%和 7.66%—13.66%,树皮和树叶生物量所占比例最小,分别占总生物量的 5.52%—6.96%和 4.55%—5.61%。不同间伐强度杉木各器官碳储量分配比例大小和顺序和生物量基本一致,均为:树干>树枝>树根>树皮>树叶(图 3)。

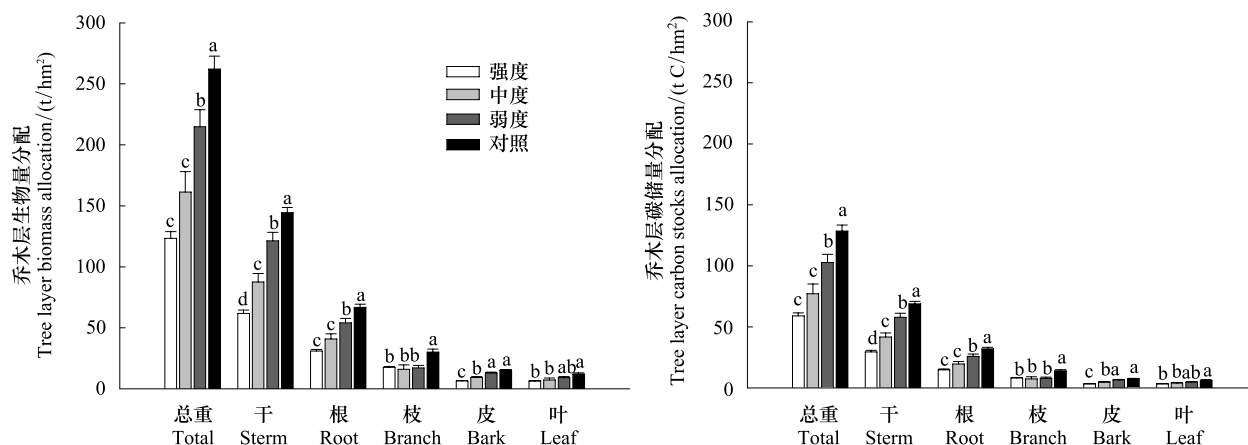


图 2 不同间伐强度杉木人工林乔木层各器官生物量和碳储量

Fig.2 Biomass and carbon storage of different organs in arbor layer in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different thinning intensity

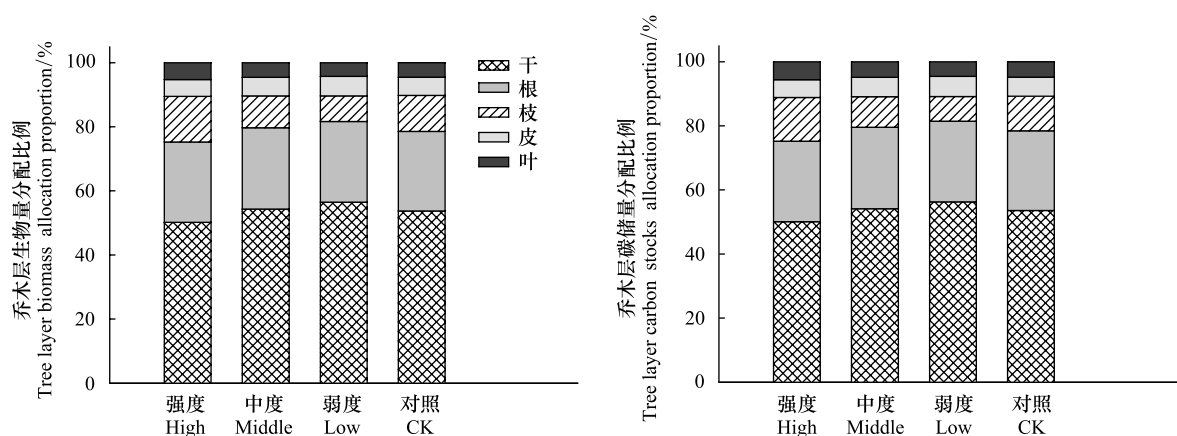


图 3 不同间伐强度杉木人工林乔木层各器官生物量和碳储量分配情况

Fig.3 The biomass and carbon storage allocation of different organs in arbor layer in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different thinning intensity

2.3 不同间伐强度杉木人工林系统碳储量及其分配

不同间伐强度杉木人工林生态系统总碳储量分别为:强度间伐 $239.15 \text{ t C hm}^{-2}$ 、中度间伐 $300.88 \text{ t C hm}^{-2}$ 、弱度间伐 $316.93 \text{ t C hm}^{-2}$ 和对照 $324.73 \text{ t C hm}^{-2}$,各间伐强度杉木人工林生态系统碳储量差异不显著 ($P > 0.05$),对照杉木人工林乔木层碳储量显著高于其他三种间伐强度 ($P < 0.05$),中度间伐杉木人工林生态系统土壤碳储量 ($219.11 \text{ t C hm}^{-2}$) 高于其他间伐强度(强度: $175.05 \text{ t C hm}^{-2}$;弱度: $207.69 \text{ t C hm}^{-2}$) 和对照林地 ($188.59 \text{ t C hm}^{-2}$) (图 4)。不同间伐强度灌木层、草本层碳储量没有差异,对照林地凋落物碳储量显著高于其他三种间伐强度的凋落物碳储量 ($P < 0.01$) (表 4)。所有间伐强度均以乔木层和土壤层为主要碳库,二者占不同间伐强度杉木人工林生态系统碳储量的 97.62% 以上,灌木层、草本层和凋落物层的碳储量所占比例低于 2.38% (图 5)。

表 3 不同间伐强度杉木人工林林下灌木层、草本层、地表凋落物和土壤层的含碳率(%)

层次 Layer	组分 Comment	间伐强度 Thinning intensity			
		强度 High	中度 Middle	弱度 Low	对照 CK
灌木层 Shrub layer	地上	45.60±0.40	46.43±0.38	45.30±0.50	44.87±1.13
	地下	46.43±0.49	46.17±1.36	45.47±1.75	46.40±0.57
草本层 Herb layer	地上	41.33±1.04	40.77±0.78	41.30±0.42	41.00±1.06
	地下	39.70±0.99	40.57±0.52	39.97±0.87	40.33±1.28
地表凋落物 Litter mass		46.77±1.50	46.17±0.27	46.87±0.83	46.93±0.15
土壤层 Soil layer	0—20cm	2.68±0.80	2.48±0.81	2.72±0.50	3.07±0.43
	20—40cm	2.05±0.49	1.83±0.53	2.36±0.59	1.39±0.09
	40—100cm	0.95±0.31	1.85±0.71	1.49±0.37	0.97±0.03

表 4 不同间伐强度杉木人工林下灌木层、草本层和地表凋落物的碳储量(t C/hm²)

层次 Layer	组分 Comment	间伐强度 Thinning intensity			
		强度 High	中度 Middle)	弱度 Low	对照 CK
灌木层 Shrub layer	地上	1.16±0.37a	1.30±0.92a	0.51±0.23a	0.06±0.00a
	地下	0.49±0.12a	0.86±0.62a	0.30±0.10a	0.06±0.00a
	合计	1.65±0.48a	2.16±1.54a	0.81±0.31a	0.12±0.00a
草本层 Herb layer	地上	1.08±0.38b	0.77±0.43b	1.51±0.71ab	2.72±0.17a
	地下	1.20±0.52a	0.86±0.53a	2.70±1.31a	3.13±0.28a
	合计	2.28±0.90ab	1.63±0.96b	4.21±1.31ab	5.85±0.28a
地表凋落物 Litter mass	合计	1.26±0.14b	0.90±0.06c	1.50±0.05ab	1.75±0.06a

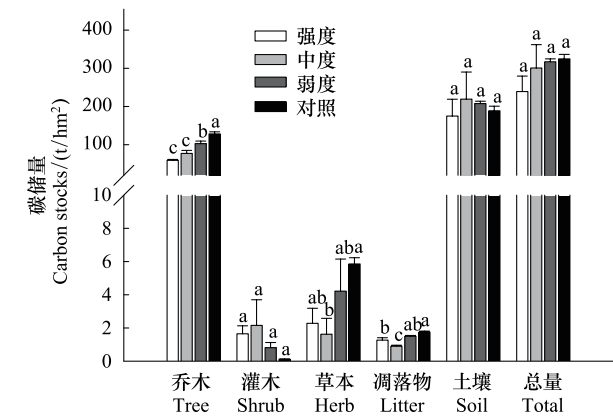


图 4 不同间伐强度杉木人工林生态系统碳储量

Fig. 4 The carbon storage of *Cunninghamia lanceolata* plantations ecosystem with different thinning intensity

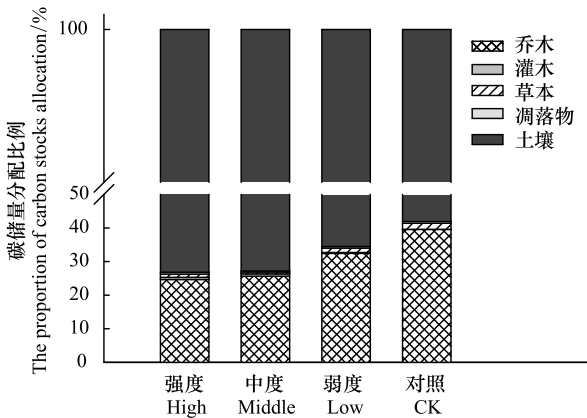


图 5 不同间伐强度杉木人工林生态系统碳储量分配

Fig.5 The carbon storage allocation of *Cunninghamia lanceolata* plantations ecosystem with different thinning intensity

3 讨论

3.1 不同间伐强度对杉木林分生长的影响

间伐处理通过改变林分结构,影响林木的生长。本研究结果表明,间伐 8 年后,不同间伐强度之间的杉木平均胸径存在显著差异,并随着间伐强度的增大,杉木的胸径显著增加,但弱度间伐(34%)与对照相比并不

能显著改变林分的胸径大小。间伐后杉木平均胸径出现明显增大可能与间伐后单株杉木受到的竞争变小,获取的光照更充足,提高了林木的生长速率并有利于主干生物量的积累,这与前期许多研究结果相似^[17-18]。本研究发现间伐处理对树高的生长并无促进作用,相反,间伐后的树高与对照相比均出现下降现象,与对照相比,弱度间伐和中度间伐林分的树高出现了显著下降。这与张水松等^[19]对间伐 20 年杉木生长效应研究结果相似,其认为强度、中度和弱度间伐林分的平均树高及其定期生长量均比对照提高,间伐可有效促进胸径生长但不能有效促进树高生长。导致这一结果的原因可能与间伐后林内空间富余,杉木枝叶器官将向四周空间伸展,这会将根所吸收的大量养分消耗在其中,从而削弱了树干往上生长的速度有关。反之,未间伐林分由于一直保持着高郁闭状态,林木枝叶生长空间小,只能不断往上生长,争夺上端优势,这也可能从侧面验证了本研究中对照林分杉木的树高要高于所有间伐林分。张水松等^[20]对杉木间伐与自然稀疏规律研究得出对照和弱度间伐的自然稀疏起始期高峰期早,稀疏量大,稀疏过程具连续性,这规律也解释了本文弱度间伐后现保留密度与对照相近的原因。一般认为林分密度对单株林木的生物量增长有很大影响,但在本研究的观测周期内,除了强度间伐的杉木林个体生物量显著高于对照外,中度间伐和弱度间伐林分的个体生物量与对照相比均无显著性差异,这可能与本研究的观测时间较短或该间伐强度不能明显影响植物生长有关。

3.2 杉木人工林间伐强度选择

间伐是人工林近自然化改造的必要措施,保留合理的林分密度不仅可以在短期内促进林木生长获取间伐木材,也可以提高大径材的培育速度。不同立地条件、间伐强度以及间伐后持续时间长短均可能影响林木的生长。虽然部分研究发现间伐强度能有效提高林分个体生物量并明显缩短大径材的培育年限,但间伐强度是否可以有效提高林分的总生物量和总材积一直存在较大的争议。针对现有林分,采取何种间伐处理能让人工林可持续经营效果更佳一直是人工林近自然经营的关键技术问题。王怀芳^[21]对福建省 30 年生不同林分密度杉木人工林的生长调查认为从单株材积、蓄积量、出材量和出材质量看,林分密度以 450 株/hm²最佳。本文认为综合各种林分因素,中度间伐(保留株数 1250 株/hm²)是较合理的间伐强度选择,并随着改造林分的生长,林冠郁闭,个体竞争加剧,应及时进行二次间伐改造。张水松等^[19](2005)通过对杉木林不同间伐强度试验 20 年生长效应的研究发现,就生长效果而言,杉木林实行占株数 40%左右的间伐强度为宜,这与本研究的结果相似。

3.3 不同间伐强度对杉木人工林生物量、碳储量及其分配的影响

本研究认为,间伐不仅能明显改变乔木层总生物量和碳储量,而且也能改变乔木层各器官生物量和碳储量的分配情况。随着间伐强度的增大,林分的树干、根、皮和叶总的生物量和碳储量均出现不同程度的减少,从而导致乔木层的总的生物量和碳储量随间伐强度的增大而明显减少。这与许多前期的研究结果一致,认为间伐减少了林分密度,导致林分总的生产力和碳储量下降^[22-23]。但也有一些研究认为间伐后乔木层的碳储量明显增大^[24],这可能与其初植密度较高、间伐强度和树种不同等因素有关。在本研究中,虽然不同间伐强度之间的乔木层、草本层、凋落物层的碳储量出现显著差异,但灌木层、土壤层和整个系统的碳储量在不同间伐强度之间均无显著差异,这与徐金良等^[18](2014)的研究结果相似。此外,在其他一些树种(如:马尾松和日本落叶松)的短期间伐试验中也得到相似结论^[25-26]。但在一些间伐后持续时间较长的试验中,与对照相比,间伐处理显著降低了林分总的碳储量^[27],导致这种结果差异不仅与立地条件、树种和间伐强度有关,间伐后持续时间的长短也可能是导致其结果不一致的主要影响因素,但目前许多研究只是关注间伐后短期内林分总的生物量及其分配格局变化,而缺乏间伐处理对生态系统碳过程影响的长期定点监测研究。本文仅涉及间伐处理对杉木个体生长和生态系统碳储量及其分配方面的研究,而缺少对其土壤碳输入、转化和输出过程方面的研究。生态系统碳过程是一个极其复杂的过程,受生物因素和非生物因素相互作用的影响,系统研究间伐处理对生态系统碳过程影响的潜在调控过程、关键控制因子及其作用机制,将为全面评估间伐处理对生态系统碳过程的影响提供必要基础,但这方面亟需开展长期系统的研究才能加以解决。

参考文献 (References):

- [1] Fang J Y, Chen A P, Zhao S Q, Ci L J. Estimating biomass carbon of China's forests: supplementary notes on report published in Science (291: 2320-2322) by Fang et al. (2001). *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(2): 243-249.
- [2] 赵敏, 周广胜. 基于森林资源清查资料的生物量估算模式及其发展趋势. *应用生态学报*, 2004, 15(8): 1468-1472.
- [3] Brown S L, Schroeder P, Kern J S. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management*, 1999, 123(1): 81-90.
- [4] Laganière J, Angers D A, Paré D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 439-453.
- [5] Li D J, Niu S L, Luo Y Q. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis. *New Phytologist*, 2012, 195(1): 172-181.
- [6] Hu Z H, He Z M, Huang Z Q, Fan S H, Yu Z P, Wang M H, Zhou X H, Fang C M. Effects of harvest residue management on soil carbon and nitrogen processes in a Chinese fir plantation. *Forest Ecology and Management*, 2014, 326: 163-170.
- [7] Taki H, Inoue T, Tanaka H, Makihara H, Sueyoshi M, Isono M, Okabe K. Responses of community structure, diversity, and abundance of understory plants and insect assemblages to thinning in plantations. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(3): 607-613.
- [8] Forrester D I, Collopy J J, Beadle C L, Baker T G. Interactive effects of simultaneously applied thinning, pruning and fertiliser application treatments on growth, biomass production and crown architecture in a young *Eucalyptus nitens* plantation. *Forest Ecology and Management*, 2012, 267: 104-116.
- [9] Saunders M, Tobin B, Black K, Gioria M, Nieuwenhuis M, Osborne B A. Thinning effects on the net ecosystem carbon exchange of a Sitka spruce forest are temperature-dependent. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 157: 1-10.
- [10] Forrester D I, Medhurst J L, Wood M, Beadle C L, Valencia J C. Growth and physiological responses to silviculture for producing solid-wood products from *Eucalyptus* plantations: An Australian perspective. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(9): 1819-1835.
- [11] Tian D L, Peng Y Y, Yan W D, Fang X, Kang W X, Wang G J, Chen X Y. Effects of thinning and litter fall removal on fine root production and soil organic carbon content in Masson pine plantations. *Pedosphere*, 2010, 20(4): 486-493.
- [12] Ma L Y, Li C Y, Wang X Q, Xu X. Effects of thinning on the growth and the diversity of undergrowth of *Pinus tabulaeformis* plantation in Beijing mountainous areas. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(5): 1-9.
- [13] Fournier R A, Luther J E, Guindon L, Lambert M C, Piercey D, Hall R J, Wulder M A. Mapping aboveground tree biomass at the stand level from inventory information: test cases in Newfoundland and Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(10): 1846-1863.
- [14] Ammer C, Wagner S. Problems and options in modelling fine-root biomass of single mature Norway spruce trees at given points from stand data. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32(4): 581-590.
- [15] 温远光, 和太平, 李信贤, 梁宏温, 周君元, 苏允进. 广西合浦隆缘桉海防林生物量和生产力的研究. *广西农业生物科学*, 2000, 19(1): 1-5.
- [16] Bremner J M. Nitrogen-total // Sparks D L, Page A L, Helmke P A, eds. *Methods of Soil Analysis: Part 3, Chemical Methods*. Madison: Soil Science Society of America, 1996: 1085-1121.
- [17] Weiskittel A R, Garber S M, Johnson G P, Maguire D A, Monserud R A. Annualized diameter and height growth equations for Pacific Northwest plantation-grown Douglas-fir, western hemlock, and red alder. *Forest Ecology and Management*, 2007, 250(3): 266-278.
- [18] 徐金良, 毛玉明, 成向荣, 虞木奎. 间伐对杉木人工林碳储量的长期影响. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 1898-1904.
- [19] 张水松, 陈长发, 吴克选, 占有生, 何寿庆. 杉木林间伐强度试验 20 年生长效应的研究. *林业科学*, 2005, 41(5): 56-65.
- [20] 张水松, 陈长发, 何寿庆, 吴克选, 詹有生. 杉木林间伐强度自然稀疏与结构规律研究. *林业科学*, 2006, 42(1): 55-62.
- [21] 王怀芳. 林分密度对 30 年生杉木人工林生长的影响. *亚热带农业研究*, 2012, 8(3): 156-159.
- [22] Kariuki M. Modelling the impacts of various thinning intensities on tree growth and survival in a mixed species eucalypt forest in central Gippsland, Victoria, Australia. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(12): 2007-2017.
- [23] Campbell J, Alberti G, Martin J, Law B E. Carbon dynamics of a ponderosa pine plantation following a thinning treatment in the northern Sierra Nevada. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(2): 453-463.
- [24] 成向荣, 虞木奎, 葛乐, 张春祥, 王婉. 不同间伐强度下麻栎人工林碳密度及其空间分布. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1175-1180.
- [25] 明安刚, 张治军, 湛红辉, 张显强, 陶怡, 苏勇. 抚育间伐对马尾松人工林生物量与碳贮量的影响. *林业科学*, 2013, 49(10): 1-6.
- [26] Lee S K, Son Y, Lee W K, Yang A R, Noh N J, Byun J G. Influence of thinning on carbon storage in a Japanese larch (*Larix kaempferi*) plantation in Yangpyeong, central Korea. *Forest Science and Technology*, 2010, 6(1): 35-40.
- [27] Ruiz-Peinado R, Bravo-Oviedo A, López-Senespleda E, Montero G, Río M. Do thinnings influence biomass and soil carbon stocks in Mediterranean maritime pinewoods? *European Journal of Forest Research*, 2013, 132(2): 253-262.