

DOI: 10.5846/stxb201704030573

明安刚, 刘世荣, 李华, 曾冀, 孙冬婧, 雷丽群, 蒙明君, 陶怡, 明财道. 近自然化改造对马尾松和杉木人工林生物量及其分配的影响. 生态学报, 2017, 37(23): 7833-7842.

Ming A G, Liu S R, Li H, Zeng J, Sun D J, Lei L Q, Meng M J, Tao Y, Ming C D. Effects of close-to-nature transformation on biomass and its allocation in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* plantations. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 7833-7842.

近自然化改造对马尾松和杉木人工林生物量及其分配的影响

明安刚^{1,2,3}, 刘世荣^{2,3,*}, 李 华^{1,3}, 曾 冀^{1,3}, 孙冬婧^{1,3}, 雷丽群^{1,3}, 蒙明君^{1,3}, 陶 怡^{1,3}, 明财道^{1,3}

1 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 凭祥 532600

2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091

3 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 凭祥 532600

摘要: 近自然化改造作为森林新增碳汇的最有希望的选择之一, 将如何通过改变林分结构影响林分生物量和生产力进而影响林分固碳能力和潜力目前尚不清楚, 因此, 了解近自然化改造对人工林生物量及其分配的影响, 对人工林生态系统碳管理具有重要意义。以马尾松近自然化改造林(P(CN))、马尾松未改造纯林(P(CK))、杉木近自然化改造林(C(CN))和杉木未改造纯林(C(CK)) 4 种人工林为研究对象, 采用样方调查和生物量实测的方法, 分析 4 种林分生物量差异, 旨在揭示近自然化改造对马尾松和杉木人工林生物量及其分配的影响。结果表明: 马尾松杉木人工林近自然化改造通过调整林分结构显著提升马尾松和杉木人工林生物量和生产力, 8a 后马尾松和杉木林分生物量分别增加 46.71% 和 37.24%。乔木层生物量在林分生物量总量中占主导地位(95.48%—98.82%), 并对林分生态系统总生物量变化起决定性作用。林分生物量和生产力的增加主要因为近自然化改造改变了林分群落结构, 进而提高了乔木层生产力。研究结果表明, 合理的经营措施不仅可以改善林分结构, 提升林分生产力, 并可为增强植被固碳能力创造有利条件。

关键词: 近自然化改造; 马尾松和杉木人工林; 生物量; 生产力; 分配

Effects of close-to-nature transformation on biomass and its allocation in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* plantations

MING Angang^{1,2,3}, LIU Shirong^{2,3,*}, LI Hua^{1,3}, ZENG Ji^{1,3}, SUN Dongjing^{1,3}, LEI Liqun^{1,3}, MENG Mingjun^{1,3}, TAO Yi^{1,3}, MING Caidao^{1,3}

1 Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, China

2 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang 532600, China

Abstract: Close-to-nature transformation is considered one of the most promising options for creating new forest carbon sinks, but the mechanism by which it influences the biomass by changing the forest structure and thereby influencing the ability and potential of the forest for carbon sequestration remains unclear. Therefore, there is an urgent need to understand these key effects of close-to-nature transformation on the biomass for carbon management in plantation ecosystems. Based on a close-to-nature forest of *Pinus massoniana* plantation (P(CN)) and an unimproved pure stand of *P. massoniana*

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2014QA033); 广西林业科技项目(桂林科字[2016]第 37 号); 广西自然科学基金项目(2014GXNSFBA118100)

收稿日期: 2017-04-03; 修订日期: 2017-09-13

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

(P(CK)), and a close-to-nature stand of *Cunninghamia lanceolata* (C(CN)) and an unimproved pure stand of *C. lanceolata* (C(CK)) as the research objects, the biomass and allocation difference of the four forest types were studied using the method of quadrat sampling combined with biomass measurement, aiming to reveal the influence of close-to-nature transformation on forest biomass and its allocation patterns in *P. massoniana* and *C. lanceolata* plantation. The results indicated that the biomass and productivity of *P. massoniana* and *C. lanceolata* plantations can be significantly increased by close-to-nature transformation, and the biomass of *P. massoniana* and *C. lanceolata* forest stands can be increased by 46.71% and 37.24%, respectively, after 8 years. The biomass of the arborous layer dominates the total biomass (95.48%—98.82%), which plays a vital role in the overall change in forest stand ecosystem biomass. The increase in biomass and productivity in the forest is mainly due to the change in the forest stand community structure, which increases the productivity of the arborous layer. Taken together, the results indicate that reasonable management measures can not only improve stand structure and productivity, but also create favorable conditions that enhance vegetation carbon fixation capacity and potential.

Key Words: close-to-nature transformation; *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* plantations; biomass; productivity; allocation

生物量和生产力是反映人工林群落结构组成的重要指标,较高的林分生物量和生产力是人工林生态系统健康和活力的重要体现。同时,生物量和生产力也是研究人工林生态系统碳循环的基础,是评估人工林固碳潜力的主要内容和反映人工林生态系统的服务功能的重要指标之一^[1-2]。因而,准确测算人工林生物量与生产力,对人工林的健康经营和生态系统碳管理具有重要意义。

当前,人工林生物量受到国内外广泛关注^[3-5],国外近些年报道的树种有辐射松(*Pinus radiata*)、美洲栗(*Castanea americana*)、肯宁南洋杉(*Araucaria cunninghamii*)、夏栎(*Quercus robur*)、蓝桉(*Eucalyptus globulus* subsp. *globulus*)、狄氏黄胆木(*Nauclea diderrichii*)和绵白杨(*Populus tomentosa*)等^[6-12];国内对人工林生物量和生产力早期研究的树种主要是马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、桉树(*Eucalyptus* sp.)等一些用材树种^[13-16],最近10年来报道的主要树种既包括较多的松、杉、桉等传统造林树种^[17-18],还有樟树(*Cinnamomum camphora*)^[19]、小黑杨(*Populus nigra*)^[20]、楠木(*Phoebe zhennan*)^[21]、红椎(*Castanopsis hystrix*)^[22]、米老排(*Mytilaria laosensis*)^[23]、格木(*Erythrophloeum fordii*)^[24]等乡土阔叶树种。

我国亚热带地区,人工林主要以马尾松、杉木和桉树等短周期树种为主导^[25],其中,针叶纯林占72%。人工针叶纯林的树种结构单一,径级结构和垂直结构简单,再加上不合理的经营方式,不仅造成生物多样性锐减,而且降低人工林生物量和生产力,进而影响人工林的固碳能力和潜力^[26-28]。因而,通过疏伐补植的措施将针叶纯林改造成针阔异龄混交的近自然林,正逐渐成为替代大面积针叶人工纯林最有希望的选择途径之一^[29-30]。针叶人工林近自然化改造在提升地力,提高林分生产力、碳储量和物种多样性等方面发挥重要作用^[30-32]。马尾松、杉木人工林经过近自然经营措施(疏伐、补植),如何通过改变林分结构和群落组成改变林分的生物量和生产力,进而影响林分植被碳储量,有待深入研究。

本研究以四种不同经营方式的人工林:马尾松未改造纯林P(CK)、马尾松近自然化改造林P(CN)、杉木未改造纯林C(CK)和杉木近自然化改造林C(CN)为研究对象,通过对不同林分人工林生物量和生产力及其动态变化规律进行研究,弄清近自然经营对马尾松和杉木人工林生物量和生产力的影响及动态,旨在为亚热带人工林生态系统碳管理和可持续经营提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于广西壮族自治区凭祥市中国林业科学研究院热带林业实验中心(简称中国林科院热林中

心)(22°10'N, 106°50'E),是国家林业局管辖的森林生态定位研究站之一。该地区属于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,全年日照时数 1200—1600h;降水充沛,年平均降水 1200—1500mm,主要发生在每年 4—9 月;年蒸发量 1200—1400mm;相对湿度 80%—84%;年平均气温 20.5℃—21.7℃。主要地貌类型以低山丘陵为主;土壤以砖红壤和红壤为主,其次为紫色土;成土母岩主要有泥岩夹砂岩、砾状灰岩、花岗岩和石灰岩等,土层厚度在 80cm 以上,亚热带常绿阔叶林是站区地带性植被。

中国林科院热林中心分布不同类型的人工林近 2 万 hm^2 , 针叶树种主要有马尾松和杉木,乡土阔叶树种主要有大叶栎(*Quercus griffithii*)、格木、红椎、米老排、西南桦(*Betula alnosensis*)和降香黄檀(*Dalbergia lanceolata*),外来树种主要有桉树和柚木(*Tectona grandis*),其中,格木和降香黄檀为固氮树种。而大叶栎为速生阔叶树种,具有较好的天然更新能力。用格木和大叶栎改造马尾松和杉木纯林,既适合短周期用材和大径级珍贵用材的需要,又可以实现乡土阔叶树种的天然更新,达到近自然经营的目的。

1.2 试验林概况

试验林均为 1993 年在杉木采伐迹地上营造的马尾松和杉木纯林,初植密度为 2500 株/ hm^2 ,造林后连续铲草抚育 3 年共 6 次,第 7 年透光伐抚育,第 11 年第一次抚育间伐,保留密度 1200 株/ hm^2 。2007 年开始实施近自然化改造,主要改造措施是在保护天然更新的同时,对马尾松纯林进行疏伐(保留密度为 600 株/ hm^2),2008 年初,在疏伐后的马尾松和杉木林下 1:1 均匀补植大叶栎和格木,补植乡土树种密度为 600 株/ hm^2 (格木和大叶栎密度均为 300 株/ hm^2),形成总密度为 1200 株/ hm^2 的针阔异龄混交林。同时保留与总密度一致(1200 株/ hm^2)的未实施近自然改造的马尾松和杉木纯林为对照。4 种林分均设置 4 个重复。目前,被改造的林分已经郁闭,已演替成具有明显复层结构的针阔异龄混交林。2016 年调查结果显示,马尾松、杉木及补植的大叶栎和格木全部存活,大叶栎平均胸径和平均树高分别为 13.7cm 和 14.6m,格木平均胸径和平均树高分别为 5.2cm 和 6.3m。4 种林分基本情况与经营历史见表 1 所示。

表 1 4 种林分基本情况与经营历史

Table 1 Basic information and management history of the four stands

年份 Years	项目 Item	林分类型 Forest types			
		马尾松对照林 Control forest of <i>P. massoniana</i> plantation P(CK)	马尾松改造林 Close-to-nature forest of <i>P. massoniana</i> plantation P(CN)	杉木对照林 Control forest of <i>C. lanceolata</i> plantation C(CK)	杉木改造林 Close-to-nature forest of <i>C. lanceolata</i> plantation C(CN)
1993 年	造林	初植密度 2500 株/ hm^2 , 2 年生容器苗	初植密度 2500 株/ hm^2 , 2 年生容器苗	初植密度 2500 株/ hm^2 , 2 年生容器苗	初植密度 2500 株/ hm^2 , 2 年生容器苗
1993—1995 年	新造林抚育	全铲抚育 6 次	全铲抚育 6 次	全铲抚育 6 次	全铲抚育 6 次
2000 年	透光伐	透光伐	透光伐	透光伐	透光伐
2004 年	生长伐	生长伐, 保留 1200 株/ hm^2	生长伐, 保留 1200 株/ hm^2	生长伐, 保留 1200 株/ hm^2	生长伐, 保留 1200 株/ hm^2
2007 年	强度间伐	不间伐, 保留 1200 株/ hm^2	强度间伐, 保留 600 株/ hm^2	不间伐, 保留 1200 株/ hm^2	强度间伐, 保留 600 株/ hm^2
2008 年	林下补植	不补植	均匀补植大叶栎、格木 各 300 株/ hm^2	不补植	均匀补植大叶栎、格木各 300 株/ hm^2
2009 年	改造林抚育	不抚育	抚育 2 次	不抚育	抚育 2 次

1.3 试验设计

本试验采用单因素两水平的随机区组设计,共设 4 个区组,即为 4 个真重复,每个区组各设置 4 种林分类型,即马尾松近自然化改造林(P(CN))、马尾松未改造纯林(P(CK))、杉木近自然改造林(C(CN))和杉木未改造纯林(C(CK))。4 个林分类型,4 个重复共 16 个试验小区,每个试验小区面积为 0.5 hm^2 ,小区之间的间隔在 100m 以内。

2 研究方法

2.1 乔木生物量的测定

4 种林分涉及到的 4 个主要树种的生物量均采用径级平均木法测定,杉木、马尾松和格木选择热林中心适合本研究的已有的生物量方程进行估算^[17,24,33],并新建大叶栎生物量模型对大叶栎生物量及其各器官进行估算。根据样方每木检尺的调查结果,作出胸径分布图,再对每个树种按径级(2cm)选取标准木 9 株进行乔木生物量测定。样木伐倒后,地上部分按不同器官测定树干、树皮、树枝、树叶的鲜重;地下部分用“全挖法”测定根系的鲜重,收集全部直径>2mm 的根系。同时,按器官采集植物样品 200g 左右,带回实验室在 65℃ 烘箱中烘干至恒重,计算含水率并将各器官的鲜重换算成干重。

根据 9 株标准木生物量的实测数据,建立大叶栎各器官生物量(W)与胸径(D)及胸径平方与树高的乘积(D^2H)之间的相对生长方程,用以估测大叶栎各器官的生物量(表 2)。

表 2 热林中心伏波实验场 1 林班大叶栎单株生物量相对生长方程

Table 2 Biomass allometric equation of *Quercus griffithii* in Compartment 1 of Fubo Forest Farm

器官 Organ	回归方程 Regression equation	样本量 Sample size	判定系数 R^2 Coefficient of determination	F	显著性 Significance
干皮 Stem	$W=0.027(D^2H)-0.125$	9	0.981	379.405	0.000
树枝 Branch	$W=0.013(D^2H)-0.354$	9	0.911	72.487	0.000
树叶 Leaf	$W=0.004(D^2H)+0.169$	9	0.979	332.336	0.000
根系 Root	$W=0.009(D^2H)-0.357$	9	0.863	44.145	0.000
全株 Whole tree	$W=0.054(D^2H)-0.666$	9	0.969	225.052	0.000

W :各器官生物量 Dry weight in different organs; D :胸径 Diameter at breast height; H :树高 Height of tree

2.2 林下植被生物量及凋落物现存量的测定

按“梅花五点法”在每个固定样地布设 5 个 2m×2m 的小样方,记录每个小样方内的植物种名,分地上部分和地下部分,采用“收获法”分别测定其鲜重,同种植物的相同器官取混合样品,凋落物全部测定生物量,取混合样品烘干至恒重后,计算出各组分的干重。

2.3 凋落物产量的测定

在每个样地随机布设 6 个 1m×1m 凋落物收集器,每个月底收集一次凋落物,1 年为 1 个周期,共收集 12 次。每月收集的凋落物样品先按器官(落叶、落枝、落皮、落果和杂物)分别测量鲜重,所选落叶再按树种区分并测定鲜重。然后按树种和器官取样烘干后,计算凋落物干重和全年凋落物产量。

2.4 统计分析

用单因素方差分析(one Way-ANOVA)来检验不同林分、不同组分之间生物量的差异性。用一元回归分析(Simple regression)模拟大叶栎各器官生物量回归方程。用 SPSS 19.0(SPSS, Inc, Chicago, IL)完成统计分析。作图利用 OriginPro 9.0 和 SigmaPlot 10.0 软件完成。

3 结果与分析

3.1 不同林分乔木生长量

表 3 反映了 2016 年,即近自然化改造 8 年后,4 种林分保留的松杉和补植树种的平均树高和平均胸径情况。由表 3 可知,改造后,马尾松和杉木平均胸径显著高于对照林,改造后的马尾松和杉木平均胸径分别高于对照林的 45.0%和 30.4%,可见,近自然化改造显著提高了马尾松和杉木的胸径生长量,但同样是改造 8 年后,马尾松平均胸径高出杉木平均胸径的 44.4%,而四种林分马尾松和杉木的平均树高均无显著差异($P<0.05$),此外,由表 3 我们还可以看出,无论是大叶栎,还是格木,在马尾松和杉木改造林中,平均胸径和平均树

高均无显著差异($P<0.05$),表明,补植树种的生长量并未受到林冠层树种不同的影响。

表 3 2016 年 4 种林分平均胸径和平均树高比较

Table 3 Diameter at breast height (DBH) and tree height of the four stands in 2016

树种 Tree species	项目 Item	林分类型 Forest types			
		马尾松对照林 P(CK)	马尾松改造林 P(CN)	杉木对照林 C(CK)	杉木改造林 C(CN)
马尾松 <i>P. massoniana</i>	平均胸径/cm	22.2±1.3b	32.2±1.6a		
	平均树高/m	16.7±0.5a	17.3±0.7a		
杉木 <i>C. lanceolata</i>	平均胸径/cm			17.1±2.1b	22.3±0.8a
	平均树高/m			17.1±0.4a	17.2±0.4a
大叶栎 <i>Q. griffithii</i>	平均胸径/cm		13.4±1.7a		14.2±1.2a
	平均树高/m		14.8±1.4a		14.4±1.5a
格木 <i>E. fordii</i>	平均胸径/cm		5.1±1.1a		5.3±0.8a
	平均树高/m		6.1±0.4a		6.5±0.6a

数据为平均值±标准误差;同一个指标变量的不同字母代表差异显著($P < 0.05$)

3.2 不同林分生物量及其分配特征

3.2.1 乔木层生物量及其分配特征

图 1 显示了近自然化改造后的第 8 年(2016 年)不同林分乔木层及其各器官生物量情况, P(CK)、P(CN)、C(CK)、C(CN) 乔木层生物量总量分别为 257.1、380.1、97.4、135.5t/hm², 无论是马尾松、还是杉木, 改造林乔木层生物量总量均高于其对照林, 近自然化改造 8 年后, 马尾松和杉木人工林乔木层生物量分别提高 47.8% 和 39.1%。除树皮外, 改造林 P(CN) 和 C(CN) 的树干、树枝、树叶和树根生物量均显著高于其对照林分 P(CK) 和 C(CK)。无论改造与否, 马尾松林乔木生物量 P(CK) 和 P(CN) 均显著高于 C(CK) 和 C(CN)。

由图 2 可以看出, 树干是 4 种林分生物量的主体部分, 在乔木生物量的分配比例最大, 占乔木生物量总量的 55.4%—59.9%, 其次是根系, 再次是枝条和树皮, 叶片的生物量分配最小, 不同林分树枝和树皮的分配比例有所差异, 但树枝和树皮生物量分配比例的差异均不显著($P > 0.05$)。4 种林分乔木层各器官生物量的分配也有所差异, 改造林 P(CN) 和 C(CN) 枝条和叶片生物量的分配显著高于对照林 P(CK) 和 C(CK), 但改造林 P(CN) 和 C(CN) 树干和树皮的生物量分配比例低于对照林 P(CK) 和 C(CK), 表明近自然化改造可以显著促进叶片和枝条的发育, 而减少树干和树皮在林木生物量中的分配。而在不同的树种之间, 无论改造与否, 马尾松林 P(CN) 和 P(CK) 叶片的分配低于杉木林 C(CN) 和 C(CK), 而树皮的分配比例高于杉木林。表明树种不同, 不同器官生物量在林木中的分配比例也存在差异。

3.2.2 地被层生物量及其分配特征

在改造后的第 8 年, P(CK)、P(CN)、C(CK)、C(CN) 4 种林分灌木层生物量总量在 0.287—0.329t/hm² 之间, 除 C(CK) 和 C(CN) 之间存在显著差异外, 其他林分间灌木层生物量总量均无显著差异($P>0.05$), 灌木层地下部分虽然存在显著差异, 但并无明显规律, 地上部分生物量在 4 种林分间均无显著差异(图 3)。表明近

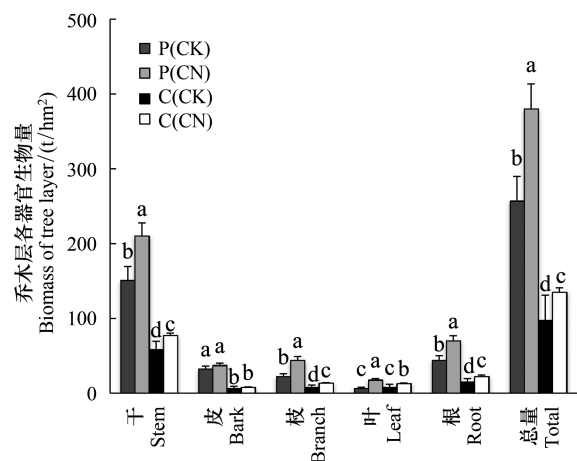


图 1 不同林分乔木层各器官生物量

Fig.1 Biomass of different organs of tree layer in the four stands

不同小写字母表示不同林分相同组分生物量差异显著($P<0.05$); P(CK): 马尾松对照林 Control forest of *P. massoniana* plantation; P(CN): 马尾松改造林 Close-to-nature forest of *P. massoniana* plantation; C(CK): 杉木对照林 Control forest of *C. lanceolata* plantation; C(CN): 杉木改造林 Close-to-nature forest of *C. lanceolata* plantation

自然化改造后第8年,杉木林灌木层生物量有所下降,而马尾松林并无显著变化。

草本层生物量总量在 $0.130\text{--}0.645\text{t}/\text{hm}^2$ 之间。改造之后,马尾松和杉木人工林草本层及各组分生物量均有所降低,且马尾松林差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。在马尾松和杉木林之间,草本层生物量及其各组分生物量也存在显著差异,杉木林 C(CK) 和 C(CN) 草本层生物量显著高于马尾松林 P(CK) 和 P(CN) ($P < 0.05$) (图3)。表明近自然化改造处理和树种均对草本层生物量有显著影响。

近自然化改造实施 8a 后,4 种林分凋落物现存量总量在 $3.370\text{--}4.465\text{t}/\text{hm}^2$ 之间,不同林分间凋落物现存量总量及各组分现存量与对照林 P(CK) 和 C(CK) 之间均无显著差异 ($P > 0.05$),但未分解凋落物和半分解凋落物现存量在马尾松林 P(CK)、P(CN) 和杉木林 C(CK)、C(CN) 之间存在显著差异。马尾松林半分解组分现存量显著高于杉木林,而未分解组分现存量显著低于杉木林 (图3)。表明近自然化改造对马尾松和杉木人工林凋落物现存量总量均无显著影响。

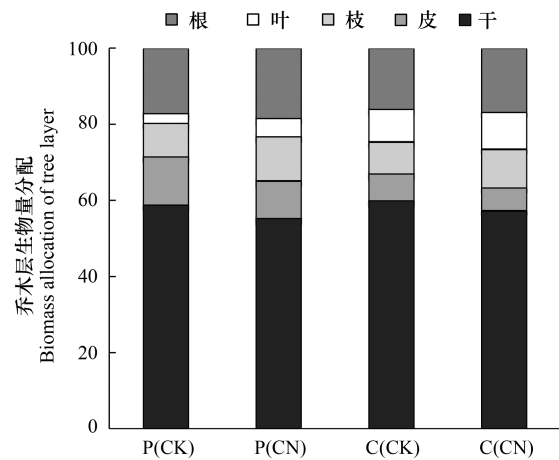


图2 不同林分乔木层各器官生物量分配

Fig.2 Biomass allocation of different organs of tree layer in the four stands

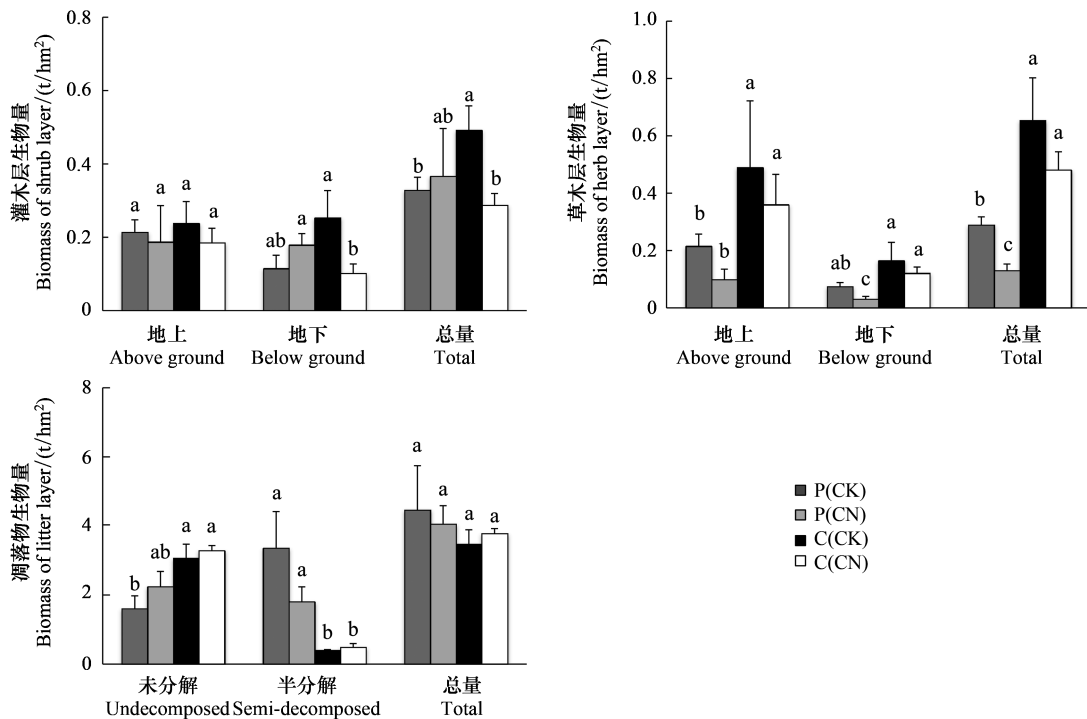


图3 不同林分地被层各器官生物量

Fig.3 Biomass of underground layer in the four stands

3.2.3 林分生物量及其分配

表4显示了2016年4种人工林生态系统和各组分生物量及其分配情况,由表4可以看出,近自然化改造实施8年后,改造林分 P(CN) 和 C(CN) 生态系统生物量总量比对照林 P(CK) 和 C(CK) 分别高出 46.71% 和 37.24%。其中,改造林乔木层生物量比对照林分别高出 47.84% 和 39.08%。而灌木层、草本层生物量和凋落物现存量在改造8年后变化情况不同,或增或减,或无显著变化。表明,近自然化改造可显著提升乔木层生物

量和林分生物量总量。此外,无论改造与否,马尾松林 P(CK)和 P(CN)林分生物量总量也显著高于杉木林 C(CK)和 C(CN)。

4 种林分各组分在生态系统生物量总量中的分配比例,均以乔木层最大,凋落物层居次,灌木层和草本层最小,仅乔木层生物量就占据林分生物量总量的 95.48%—98.82%,而凋落层现存量、灌木层和草本层三者生物量总和仅占林分生物量总量的 1.18%—4.52%。由此可以看出,4 种林分生态系统生物量基本由乔木层主导,乔木层生物量的变化对各林分生态系统生物量总的变化起着决定性的作用。

表 4 不同林分各组分生物量及其分配

Table 4 Biomass and allocation of different components in the four stands

层次 Layer	P(CK)	P(CN)	C(CK)	C(CN)
乔木层 Tree layer	257.13±32.67(98.06)	380.14±33.30(98.82)	97.45±33.63(95.48)	135.53±5.31(96.76)
灌木层 Shrub layer	0.33±0.04(0.13)	0.37±0.10(0.10)	0.49±0.07(0.40)	0.29±0.03(0.21)
草本层 Herb layer	0.29±0.03(0.11)	0.13±0.02(0.03)	0.65±0.15(0.64)	0.48±0.06(0.33)
凋落物层 Litter layer	4.47±1.28(1.70)	4.05±0.53(1.05)	3.47±0.42(3.40)	3.78±0.15(2.70)
生态系统 Ecosystem	262.21±24.70(100.00)	384.69±23.62(100.00)	102.06±14.76(100.00)	140.07±3.45(100.00)

数据为平均值±标准误差;括号内数据为各层次生物量占林分生物量总量的百分比

此外,相同组分生物量的分配在不同林分间也有所差异,各组分生物量分配的差异不仅出现在改造林和对照林之间,同时也出现在马尾松和杉木两个树种之间,近自然化改造增加了乔木层生物量的分配,而降低了地被层(包括灌木层、草本层和凋落物层)生物量的分配,马尾松林乔木层生物量的分配高于杉木林,而地被层生物量的分配低于杉木林。

3.3 不同林分乔木层年净生产力

表 5 显示了 4 种林分 2007 年至 2016 年间乔木层的年净生产力,乔木生产力采用 2007 年至 2016 年共 9 年的年净生物量增量的平均值与年凋落量的加和来计算。由表 5 可以看出,4 种林分乔木层生产力存在显著差异,改造林 P(CN)和 C(CN)高于对照林年净生产力的 56.3%和 26.8%,仅乔木层年平均生物量净增量就分别高于对照林的 92.1%和 64.9%。由此可见,经过近自然化改造,林分乔木生产力大幅提升,且马尾松人工林,近自然化改造对生产力的促进效益更加明显,改造后,乔木生产力提升到改造前的 1.9 倍。

表 5 不同林分年净生产力(2007—2016 年)

Table 5 Annual net productivity in different stands from 2007 to 2016

组分 Component/(t/hm ²)	P(CK)	P(CN)	C(CK)	C(CN)
乔木层 Tree layer	15.2±1.4b	29.2±2.6a	5.7±2.3d	9.4±0.1c
凋落量 Litter fall	10.2±2.2a	10.5±1.8a	9.2±0.7a	9.5±1.1a
合计 Productivity	25.4±3.1b	39.7±3.9a	14.9±2.4d	18.9±1.0c

数据为平均值±标准误差;同一个指标变量的不同字母代表差异显著($P<0.05$)

由表 5 还可以看出,马尾松和杉木人工林近自然化改造后,林分生产力的提高主要归因于乔木生产力的大幅提升。因为各林分年凋落量并无显著差异,而且林分其他组分,诸如灌木层和草本层,因其生物量在林分所占的比例极小,对林分生产力并无显著影响。因而,乔木生物量的快速增长才是林分生产力提升的直接原因。

4 结论与讨论

森林生物量和生产力的影响因素较多,气候、土壤、水热条件、森林类型都会对森林生产力产生影响^[5,34-35],而对人工林来说树种、林龄、造林模式及经营管理活动都会影响到林分的生物量和生产力^[18,36-39],人工林近自然化改造,通过强度间伐和林下补植两种关键措施调整林分的群落结构,必然对生物量产生影响。本研究结果显示近自然化改造 8 年后,马尾松和杉木人工林林分生物量增加了 46.71%和 37.24%,年净生产

力提高 56.3% 和 26.8%。由此看来,近自然化改造对林分生长量的促进效果极为明显,乔木生长量的增加直接增加了林分生物量和生产力。生物量增加的速度加快的主要原因是补植珍贵乡土阔叶树种后,林分结构发生改变,林分的密度结构、树种结构、层次结构发生改变,一方面促使主林层林木生长量和生物量的快速增长,另一方面促进补植树种的快速增长,二者共同促进乔木层和林分生物量的快速增加。此外,本研究还发现,无论改造与否,马尾松人工林乔木生物量都远高于杉木林,主要原因是南亚热带地区是杉木分布的边缘产区,20 年后,林木生长速度已经过了高峰期,甚至生活力开始下降,而马尾松是该地区的乡土树种,作为马尾松的主产区,马尾松在南亚热带地区具有最适宜的生长环境,23 年生的马尾松林正值生长高峰期,因而无论改造与否,马尾松林的乔木生物量远高于杉木林。

从林分生物量的分配上看,林分生物量总量的 95.48%—98.82% 由乔木层贡献,表明,乔木层生物量和生产力的提高对林分生物量增加起着主导作用。而地被层生物量虽然在林分间有显著差异,但由于在林分生物量中所占的比重极小,对林分生物量总量变化的贡献可忽略不计,这与先前的研究结论较为一致^[2-3,20]。这一结果同时反映了人工林林分结构单一,林下植被稀少,乔木层的高度郁闭,限制了林下植被的生长和发育,近自然化改造尽管改善了林分乔木层的结构组成,大幅提升了乔木层的生物量,但对林下植被层生物量的贡献极其有限。

本研究中,4 种林分乔木层生物量的分配顺序为树干 > 树根 > 枝条 > 树皮 > 叶片,这一结果虽然与国内多数树种人工林的结果相似^[2,20,24,40],然而,不同经营模式的林分间,相同树种的相同器官在林分中的分配比例有显著差异,本研究结果发现近自然化改造可以显著促进叶片和枝条的发育,而减少树干和树皮在林木生物量中的分配。这表明,近自然化改造以后,尤其是强度间伐和林下补植的干扰,林分结构得以改善,林木个体获得较好的生长条件和生长空间而快速生长。为增加生态系统光合生产力以满足林木个体生长的需求,林木个体通过增加枝条和叶片的数量(增加叶面积)和比重以达到增加光合生产力的目的。

如上所述,在人工林生物量和生产力的影响因子中,林龄对人工林生物量的影响是非常关键的^[4,41-42]。林龄不仅影响林分生物量的总量,而且影响到林分生物量在各组分的分配^[4]。林分生物量随林龄增长动态变化是反映森林生态系统活力的重要指标,尤其是生态系统长期生物量动态特征的研究,对森林健康程度和人工林可持续经营的研究意义重大^[5,34]。本研究反映的是 2016 年对林分各组分生物量调查的结果,即近自然化改造 8 年后的林分生物量,因而得出的生物量结果是阶段性的,无法代表近自然化改造对林分生物量的影响过程。然而近自然经营对林分生物量的影响是长期的,动态的,尤其是林下灌木层和草本层生物量是往往受林下植被多样性的影响,而光照、林分郁闭度是影响林下植物多样性的重要影响因子^[43]。而且,近自然化改造初期,由于间伐和补植作业对林地的扰动,可能导致林下植被生物量的减少,而后期由于间伐打开了空间,林下植被生物量又开始增加,直至补植树种进入次林层,再次郁闭,林下生物量可能又会下降,因而,林下植被生物量可能呈现一定的波动性。因此,准确认识近自然化改造对林下植被生物量的影响,需要对林分作连年观测,了解其动态变化规律。国内对人工林生物量和生产力的研究大多局限在不同人工林短期生物量和生产力的比较上,或者利用空间代替时间的方法研究生物量和生产力的动态特征,缺乏对人工林生物量生产力的定位观测研究^[23-24,41-42,44-46]。因而,准确而充分的认识近自然经营对人工林生物量及其分配的影响规律,需要开展长期定位观测研究,以便通过生物量动态变化规律深入了解近自然化改造对生物量及生产力的影响。

参考文献 (References):

- [1] Luxmoore R J, Tharp M L, Post W M. Simulated biomass and soil carbon of loblolly pine and cottonwood plantations across a thermal gradient in southeastern United States. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254(2): 291-299.
- [2] Rizvi R H, Dhyani S K, Yadav R S, Singh R. Biomass production and carbon stock of poplar agroforestry systems in Yamunanagar and Saharanpur districts of northwestern India. *Current Science*, 2011, 100(5): 736-742.
- [3] Dossa E L, Fernandes E C M, Reid W S, Ezui K. Above-and belowground biomass, nutrient and carbon stocks contrasting an open-grown and a

- shaded coffee plantation. *Agroforestry Systems*, 2008, 72(2): 103-115.
- [4] Peichl M, Arain M A. Above-and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1/4): 51-63.
- [5] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应(英文). *植物生态学报*, 2000, 24(5): 513-517.
- [6] Bi H Q, Long Y S, Turner J, Lei Y C, Snowdon P, Li Y, Harper R, Zerihun A, Ximenes F. Additive prediction of aboveground biomass for *Pinus radiata* (D. Don) plantations. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(12): 2301-2314.
- [7] Bolte A, Löf M. Root spatial distribution and biomass partitioning in *Quercus robur* L. seedlings: the effects of mounding site preparation in oak plantations. *European Journal of Forest Research*, 2010, 129(4): 603-612.
- [8] Chen C R, Xu Z H, Blumfield T J, Hughes J M. Soil microbial biomass during the early establishment of hoop pine plantation: seasonal variation and impacts of site preparation. *Forest Ecology and Management*, 2003, 186(1/3): 213-225.
- [9] Jacobs D F, Selig M F, Severeid L R. Aboveground carbon biomass of plantation-grown American chestnut (*Castanea dentata*) in absence of blight. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(3): 288-294.
- [10] Kidanu S, Mamo T, Stroosnijder L. Biomass production of Eucalyptus boundary plantations and their effect on crop productivity on Ethiopian highland vertisols. *Agroforestry Systems*, 2005, 63(3): 281-290.
- [11] Lee K H, Jose S. Soil respiration, fine root production, and microbial biomass in cottonwood and loblolly pine plantations along a nitrogen fertilization gradient. *Forest Ecology and Management*, 2003, 185(3): 263-273.
- [12] Onyekwelu J C. Growth, biomass yield and biomass functions for plantation-grown *Nauclea diderrichii* (de wild) in the humid tropical rainforest zone of south-western Nigeria. *Bioresource Technology*, 2007, 98(14): 2679-2687.
- [13] 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.
- [14] 刘茜. 不同龄组马尾松人工林生物量及生产力的研究. *中南林学院学报*, 1996, 16(4): 47-51.
- [15] 温远光, 梁宏温, 招礼军, 周敏毅, 何斌, 王凌晖, 韦善华, 郑白, 刘德杰, 唐再生. 尾叶桉人工林生物量和生产力的研究. *热带亚热带植物学报*, 2000, 8(2): 123-127.
- [16] 温远光, 梁宏温, 蒋海平. 广西杉木人工林生物量及分配规律的研究. *广西农业大学学报*, 1995, 14(1): 55-64.
- [17] 明安刚, 张治军, 谌红辉, 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.
- [18] 杜虎, 曾馥平, 王克林, 宋同清, 温远光, 李春干, 彭晚霞, 梁宏温, 朱宏光, 曾昭霞. 中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化. *生态学报*, 2014, 34(10): 2712-2724.
- [19] 姚迎九, 康文星, 田大伦. 18 年生樟树人工林生物量的结构与分布. *中南林学院学报*, 2003, 23(1): 1-5.
- [20] 江泽慧, 范少辉, 冯慧想, 张群, 刘广路, 宗亦尘. 华北沙地小黑杨人工林生物量及其分配规律. *林业科学*, 2007, 43(11): 15-20.
- [21] 彭龙福. 35 年生楠木人工林生物量及生产力的研究. *福建林学院学报*, 2003, 23(2): 128-131.
- [22] 覃林, 何友均, 李智勇, 邵梅香, 梁星云, 谭玲. 南亚热带红椎马尾松纯林及其混交林生物量和生产力分配格局. *林业科学*, 2011, 47(12): 17-21.
- [23] Ming A G, Jia H Y, Zhao J L, Tao Y, Li Y F. Above-and below-ground carbon stocks in an indigenous tree (*Mytilaria laosensis*) plantation chronosequence in subtropical China. *PLoS One*, 2014, 9(10): e109730.
- [24] 明安刚, 贾宏炎, 田祖为, 陶怡, 卢立华, 蔡道雄, 史作民, 王卫霞. 不同林龄格木人工林碳储量及其分配特征. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 940-946.
- [25] 蔡道雄, 郭文福, 贾宏炎, 卢立华. 南亚热带优良珍贵阔叶人工林的经营模式. *林业资源管理*, 2007, (2): 11-14, 65-65.
- [26] Wang H, Liu S R, Mo J M, Wang J X, Makeshin F, Wolff M. Soil organic carbon stock and chemical composition in four plantations of indigenous tree species in subtropical China. *Ecological Research*, 2010, 25(6): 1071-1079.
- [27] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华. 马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(10): 2323-2331.
- [28] Vesterdal L, Schmidt I K, Callesen I, Nilsson L O, Gundersen P. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(1): 35-48.
- [29] Wang H, Liu S R, Wang J X, Shi Z M, Lu L H, Zeng J, Ming A G, Tang J X, Yu H L. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantations in China. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300: 4-13.
- [30] Carnevale N J, Montagnini F. Facilitating regeneration of secondary forests with the use of mixed and pure plantations of indigenous tree species. *Forest Ecology and Management*, 2002, 163(1/3): 217-227.
- [31] Schütz J P. Development of close to nature forestry and the role of ProSilva Europe. *Zbornik Gozdarstva in Lesarstva*, 2011, (94): 39-42.
- [32] 陆元昌, 张守攻, 雷相东, 宁金魁, 王懿祥. 人工林近自然化改造的理论基础和实施技术. *世界林业研究*, 2009, 22(1): 20-27.
- [33] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华. 南亚热带杉木生态系统生物量和碳素积累及其空间分布特征. *林业科学*, 2009, 45(8): 147-153.
- [34] 巨文珍, 农胜奇. 森林生物量研究进展. *西南林业大学学报*, 2011, 31(2): 78-83, 89-89.

- [35] 林金国, 张兴正, 翁闲. 立地条件对米老排人工林生长和材质的影响. 植物资源与环境学报, 2004, 13(3): 50-54.
- [36] 蔡秀珠. 人为干扰强度对马尾松人工林生物量及其分配的影响. 中南林学院学报, 2006, 26(2): 51-54.
- [37] 崔秋芳, 赵佳宝, 陈家林, 郭二辉, 杨喜田. 不同林龄阶段的松栎混交人工林碳储量研究. 生态环境学报, 2015, 24(12): 1944-1949.
- [38] 方升佐, 李光友, 李同顺, 惠超. 经营措施对青檀人工林生物量及檀皮产量的影响. 植物资源与环境学报, 2001, 10(1): 21-24.
- [39] 郑路, 蔡道雄, 卢立华, 明安刚, 于浩龙, 李忠国. 南亚热带不同树种人工林生物量及其分配格局. 林业科学研究, 2014, 27(4): 454-458.
- [40] 赵金龙, 梁宏温, 温远光, 卢立华, 明安刚, 苏建苗. 马尾松与红锥混交异龄林生物量分配格局. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(2): 60-64, 71-71.
- [41] Cao J X, Wang X P, Tian Y, Wen Z Y, Zha T S. Pattern of carbon allocation across three different stages of stand development of a Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) forest. Ecological Research, 2012, 27(5): 883-892.
- [42] Zhao J L, Kang F F, Wang L X, Yu X W, Zhao W H, Song X S, Zhang Y L, Chen F, Sun Y, He T F, Han H R. Patterns of biomass and carbon distribution across a chronosequence of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) forests. PLoS One, 2014, 9(4): e94966.
- [43] 尤业明, 徐佳玉, 蔡道雄, 刘世荣, 朱宏光, 温远光. 广西凭祥不同年龄红椎林林下植物物种多样性及其环境解释. 生态学报, 2016, 36(1): 164-172.
- [44] 丁贵杰, 王鹏程. 马尾松人工林生物量及生产力变化规律研究 II. 不同林龄生物量及生产力. 林业科学研究, 2002, 15(1): 54-60.
- [45] 段爱国, 张建国, 何彩云, 童书振. 杉木人工林生物量变化规律的研究. 林业科学研究, 2005, 18(2): 125-132.
- [46] 田大伦, 项文化, 闫文德. 马尾松与湿地松人工林生物量动态及养分循环特征. 生态学报, 2004, 24(10): 2207-2210.