DOI: 10.5846/stxb201408181638

明安刚, 刘世荣, 农友,蔡道雄, 贾宏炎, 黄德卫,王群能, 农志.南亚热带 3 种阔叶树种人工幼龄纯林及其混交林碳贮量比较.生态学报,2015, 35(1):0180-0188.

Ming A G, Liu S R, Nong Y,Cai D X, Jia H Y, Huang D W, Wang Q N, Nong Z.Comparison of carbon storage in juvenile monoculture and mixed plantation stands of three common broadleaved tree species in subtropical China.Acta Ecologica Sinica,2015,35(1):0180-0188.

南亚热带 3 种阔叶树种人工幼龄纯林及其混交林碳贮量比较

明安刚[1,2,3], 刘世荣[2,*], 农 友[1,3],蔡道雄[1,3], 贾宏炎[1,3], 黄德卫[1,3],王群能[1,3], 农 志[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 广西友谊关国家森林生态系统定位观测研究站, 凭祥 532600

摘要:如何通过优化造林模式来提高人工林生态系统碳贮量已受到广泛关注。以南亚热带 8 年生格木(*Erythrophleum fordii*)纯林(PE)、红锥(*Castanopsis hystrix*)纯林(PC)、米老排(*Mytilaria laosensis*)纯林(PM)及格木×红锥×米老排混交林(MECM)生态系统为研究对象,对其碳贮量及其分配特征进行了比较研究。结果表明:格木、红锥和米老排不同器官平均碳含量分别为 512.4—561.7 g/kg,474.2—553.4 g/kg 和 512.8—556.3 g/kg。相同树种不同器官之间碳含量差异显著($P<0.05$)。各器官碳含量的平均值大小顺序为格木(539.3 g/kg)> 米老排(532.7 g/kg)> 红锥(515.3 g/kg)。不同林分间,灌木层、草本层和凋落物层碳含量均以米老排纯林最高,混交林(MECM)居次,红锥纯林和格木纯林最低;不同林分之间的土壤碳含量差异显著($P<0.05$),0—10cm,10—30cm,30—50cm 和 50—100cm 土壤碳含量均以米老排纯林最高,红锥纯林居次,格木纯林和混交林(MECM)土壤碳含量最低。生态系统碳贮量大小顺序为米老排(308.0 t/hm^2)> 混交林(182.8 t/hm^2)> 红锥纯林(180.2 t/hm^2)> 格木纯林(135.2 t/hm^2),相同组分不同林分间以及相同林分的不同组分间均存在显著差异($P<0.05$),但混交林与红锥纯林间碳贮量总量无显著差异($P>0.05$)。造林模式对人工林碳贮量及其分配有显著影响,营建混交林有利于红锥和格木地上碳的累积,不利于土壤碳的固定,而营建纯林既有利于米老排生物量碳的吸收,也有利于土壤碳的固定。因而,对碳汇林造林模式的选择,应根据树种固碳特性而定。

关键词:格木;红锥;米老排; 人工幼林;造林模式;碳贮量

Comparison of carbon storage in juvenile monoculture and mixed plantation stands of three common broadleaved tree species in subtropical China

MING Angang[1,2,3], LIU Shirong[2,*], NONG You[1,3], CAI Daoxiong[1,3], JIA Hongyan[1,3], HUANG Dewei[1,3], WANG Qunneng[1,3], NONG Zhi[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: Enhancement of the carbon storage of plantation ecosystems by optimizing afforestation patterns has been

基金项目:国家"十二五"农村领域科技计划项目(2012BAD22B0105); 中国林科院中央级公益性科研院所基本科研业务专项资金项目(CAFYBB2014QA033); 广西自然科学基金青年基金项目(2014jjBA30073);中国林业科学研究院热带林业实验中心主任基金项目(RL2011-02)资助

收稿日期:2014-08-18; **修订日期**:2014-11-05

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

extensively researched. In the present study, we investigated carbon storage and allocation in an 8-year-old *Erythrophleum fordii stand* (*PE*), *a Castanopsis hystrix* stand (PC), a *Mytilaria laosensis* stand (PM), and a mixed *E. fordii* × *C. hystrix* × *M. laosensis* stand (MECM) in subtropical China. We showed that the average carbon contents of different organs in *E. fordii*, *C. hystrix*, and *M. laosensis* ranged from 509.0 g/kg to 572.4 g/kg, 474.2 g/kg to 553.4 g/kg, and 512.8 g/kg to 556.3 g/kg, respectively. We determined significant differences in carbon contents among different organs of the same tree species. Within the same organs, the average carbon contents of different stands were ranked as follows: *E. fordii* (539.3 g/kg) > *M. laosensis* (532.7 g/kg) > *C. hystrix* (515.3 g/kg). In the shrub, herb, and litter layers, the highest carbon contents among the four stands occurred in PM, followed by MECM, PC, and PE. The carbon contents of the 0—10 cm, 10—30 cm, 30—50 cm, and 50—100 cm soil layers differed significantly among the four stands and were the highest in PM, followed by PC, MECM, and PE. The ecosystem carbon storages were ranked as PM (308.0 t/hm^2) > MECM (182.8 t/hm^2) > PC (180.2 t/hm^2) > PE (135.2 t/hm^2). We determined significant differences in average carbon contents within and among stands ($P < 0.05$), but no significant differences in the total ecosystem carbon storage between MECM and PE ($P > 0.05$). Our results indicate that the mode of afforestation can markedly influence the carbon storage and allocation of plantations. In mixed stands, *C. hystrix* and *E. fordii* will benefit from an increase in aboveground biomass carbon, but not from accumulation of soil carbon. On the other hand, in monoculture, *M. laosensis* will benefit from the sequestration of aboveground biomass carbon and from accumulation of soil carbon. Therefore, the afforestation mode for carbon sequestration forests should be selected according to the carbon accumulation characteristics of the representative tree species.

Key Words: *Erythrophleum fordii*; *Castanopsis hystrix*; *Mytilaria laosensis*; young plantations; afforestation mode; carbon storage

工业革命以后,由于化石燃料的大量使用和土地利用方式的变化,大气中 CO_2浓度连年升高[1],CO_2的吸收、固定和排放过程是全球气候变化研究的重要内容[2-4]。当前,世界上近 4×10^9hm^{2}森林中储存了 860Pg 碳,且每年可以从大气吸收 2.4Pg 碳,折合成 CO_2为 8.8Pg[5-8]。因而,作为陆地生态系统的主体,森林在储存 CO_2,调节全球气候、减缓全球气候变暖方面的作用不可替代[9-10]。当前,造林和再造林作为一种新增碳汇的主要途径,已受到学术 界的高度重视[11-13]。人工林在吸收和固定 CO_2及减缓全球气候变暖等方面发挥着重要作用,并日益引起人们的广泛关注。为了更好的利用科学经营的方式减缓全球气候变化,需要对不同经营模式的人工林固碳能力和潜力有深入的认识和科学的评估[14-15]。

最近十年,诸多学者对不同树种人工林的碳含量、碳贮量及其空间分布格局进行了深入研究[16-25],为森林碳汇功能的研究做出了积极贡献。也有学者对不同造林模式的人工林生物量和碳贮量进行了研究,发现造林模式对人工林碳贮量有重要影响,纯林与混交林地上、地下碳贮量都有明显差异,但并未得出一致的结论,He 和 Wang 等人的研究认为红锥×马尾松混交林土壤碳贮量高于马尾松纯林的,也高于红锥纯林[13,24],而何友均等人的研究发现西南桦纯林生态系统碳贮量高于西南桦×红锥混交林[23],由此可见,造林模式对人工林碳贮量的究竟会产生怎样的影响,仍有相当大的不确定性,有进一步研究的必要。

格木(*Erythrophleum fordii*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)和米老排(*Mytilaria laosensis*)是我国南亚热带地区乡土阔叶树种,也是适合在该地区培养大径材的珍优造林树种[23]。其中,格木是我国著名的硬木之一,与蚬木(*Excetrodendron hsiemvu*)、金丝李(*Garcinia paucinervis*)并称为"广西三大硬木";红锥和米老排是分布在南亚热带地区优良速生的用材树种,米老排人工林还具有较强的水源涵养功能[26]。近几年,格木、红锥和米老排 3 个树种人工林发展迅速,逐渐成为南亚热带地区主要的乡土阔叶造林树种。目前,已有学者对不同龄林的格木,米老排和红锥人工林碳贮量的进行了研究,发现林龄对格木、米老排和红锥人工林碳贮量有显著影响,人工林碳贮量随林龄的增加而增加[22-24,27]。但种植模式对 3 种人工林固碳功能和固碳潜力的影响如何,

学术界尚缺乏这方面的了解和认识,急需对不同种植模式的人工林碳贮量进行研究。本文对南亚热带中国林科院热林中心林区 8 年生格木、红锥和米老排幼龄人工纯林和混交林生态系统碳贮量及其分配特征进行了研究,旨在进一步阐明造林模式对人工林固碳能力与潜力影响,为区域尺度上科学评估森林生态系统碳库及碳平衡提供基础数据和理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西凭祥市中国林业科学研究院热带林业实验中心(106°39′50″—106°59′30″ E,21°57′47″—22°19′27″ N),属南亚热带季风气候区的西南部,与北热带北缘毗邻,为湿润半湿润气候。干湿季节明显(10—翌年 3 月份为干季,4—9 月份为湿季),太阳总辐射 439. 61 kJ cm^{-2} a^{-1},年日照时数 1218—1620 h,年均温 20.5—21.7 ℃,极端高温 40. 3℃,极端低温-1.5℃,≥10 ℃积温 6000—7600 ℃,年降水量 1400 mm,相对湿度 80%—84%;地貌类型以低山丘陵为主,海拔 400—650m,地带性土壤为花岗岩发育成的山地红壤,土层厚度在 100cm 以上。

青山实验场于 2005 年 4 月营造了格木,米老排,选取格木纯林(PE),米老排纯林(PM),红锥纯林(PC)和格木×红锥×米老排混交林(MECM,以下简称混交林)为研究对象,4 种林分均是在杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林皆伐炼山后,经块状整地营建的人工幼龄林。造林当年和翌年各抚育 1 次,直至郁闭,目前未曾间伐。各林分初植密度均为 2000 株/hm^2,混交林为行间混交,混交比例为格木:红锥:米老排=1:1:1,4 种人工林中,红锥自然稀疏较多,林下灌草植被丰富,灌草层盖度为 75%;其次为混交林,盖度为 15%,格木米老排纯林灌草盖度均小于 15%。林下植被以杜茎山(*Maesa japonica*)、酸藤子(*Embelia laeta*)、玉叶金花(*Mussaenda pubuscens*)、五节芒(*Miscanthus floridulu*)等。

2013 年 9 月,在 4 种个林分中,选取坡面均匀,人为干扰相对较少的区域,按坡位分别随机设置 4 个 20 m×20 m 样地,共计 16 个样地。对每个样方内的树木进行每木检尺,调查胸径、树高等指标。林分基本情况见表 1。

表 1 不同造林模式人工林的基本特征

Table 1 Basic characteristics of 4 plantations with different afforestation mode

林分类型 Forest type	坡度/(°) Slope	密度/(trees/hm^2) Density	郁闭度 Canopy density	胸径/cm DBH	树高/m Tree height
格木纯林 PE	26.8±2.3	1725±41	0.9	7.1±1.8	6.6±1.2
红锥纯林 PC	31.4±2.7	1548±27	0.7	7.7+2.2	8.4±2.7
米老排纯林 PM	27.1±1.8	1693±36	0.9	13.6±4.8	13.6±2.9
格木×红锥×米老排混交林 MECM	24.4±2.1	1772±47	0.9	9.7±3.6	9.5±3.0

1.2 研究方法

1.2.1 林木调查及生物量的测定

根据每木检尺的结果,作出各林分胸径分布图,依据径级分布情况,在格木、红锥和米老排纯林中按大、中、小 3 个径级分别选取平均木 3 株(每个树种各有 9 株平均木,共选平均木 27 株),将平均木伐倒并挖完全部根系后,按器官分别测定树干、树皮、树枝、树叶和树根的鲜重。同时,按不同器官采集伐倒木的分析样品各 4 份,每份样品 400g,带回实验室在 65 ℃下烘干至恒量,称干质量。计算含水率后,将各器官的鲜质量换算成干质量,各林分乔木各器官生物量按 3 个径级平均木各器官干重与样地株数的乘积的加和进行计算。

1.2.2 林下植被生物量和凋落物现存量的测定

在每个 20 m×20 m 样方中的左上角和右下角选取 2 个 5 m×5 m 小样方,记录小样方内灌木和草本植物的种类,并采用“收获法”测地上和地下部分生物量(每个林分 3 个 20 m×20 m 样方,共 6 个 5 m×5 m 小样方

用于植被生物量的测定)。将同种植物相同器官混合取样 300g 左右,每个植物样品取 4 份带回实验室在 65 ℃下烘干至恒量,称干质量。计算含水率后,将鲜质量换算成干质量。在每个 20 m×20 m 样方中的 4 个角落各选取 1 个 1 m×1 m 小样方,按未分解、半分解,测定凋落物现存量,并按不同组分取样各 200g 左右,用于含水率和碳含量的测定。

1.2.3　土壤样品的采集

在各样方随机挖取 3 个土壤剖面,按照 0—10 cm、10—30 cm、30—50 cm 和 50—100 cm 将土壤分为 4 个土层(林地土壤厚度>100cm),用环刀取样,测定各土层土壤容重。各土层土样混合,取 200g 用于含碳量的测定。

1.2.4　碳含量测定和碳贮量计算

将植物样品于 65 ℃下烘干,土壤样品置于室内风干,磨碎。植物和土壤样品均采用重铬酸钾-水合加热法测定有机碳含量:

植物碳贮量=有机碳含量×单位面积生物量

土壤碳贮量=土壤有机碳含量×土壤容重×土壤厚度

1.3　数据处理

采用 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析,方差分析和差异显著性检验($\alpha=0.05$)。采用 Excel 和 PS 软件作图。图表数据为平均数±标准误。

2　结果与分析

2.1　不同人工林生态系统各组分碳含量

2.1.1　乔木层碳含量

方差分析表明:相同树种不同器官之间和相同器官不同树种之间均存在显著差异($P<0.05$)。不同树种各器官碳含量高低顺序有所不同,格木不同器官碳含量的排列顺序为:树干 > 树枝 > 树根 > 树皮 > 树叶,红锥为:树皮 > 树叶 > 树干 > 树枝 > 树根,米老排为:树叶 > 树干 > 树根 > 树皮 > 树枝。从整体上看,碳含量的均值为格木(539.3 g/kg)> 米老排(532.7 g/kg)> 红锥(515.3 g/kg)。

表 2　不同树种各器官碳含量

Table 2　Carbon content of different organs in different tree species (g/kg)

器官 Organs	格木 *E. fordii*	红锥 *C. hystrix*	米老排 *M. laosensis*
树干 Stem	561.7±10.2Aa	526.7±14.0Bc	540.2±11.6Bb
树皮 Bark	534.8±8.5Db	553.4±10.0Aa	522.2±9.5Db
树枝 Branch	549.8±7.4Bb	487.1±11.2Cc	512.8±12.6Eb
树叶 Leaf	512.4±9.1Ec	534.8±14.5Bb	556.3±16.0Aa
树根 Root	537.7±5.2Ca	474.6±16.8Dc	531.9±10.1Cb

不同大写字母表示相同树种不同器官间差异显著,不同小写字母表示相同器官不同树种间差异显著

2.1.2　林下地被物碳含量

格木人工林下地被物各层次平均碳含量以凋落物层最高,灌木层居次,草本层最低;灌木层和草本层地上部分碳含量均高于地下部分,未分解的凋落物碳含量高于半分解的碳含量。不同林分间,灌木层、草本层和凋落物层碳含量均以米老排纯林最高,混交林居次,红锥和格木纯林最低,且 4 个林分间地被层含碳量差异多数达到显著水平($P<0.05$)(表 3)。

2.1.3　土壤层碳含量

4 种林分的土壤碳含量均以表土层(0—10 cm)最高,在 20.8—28.1g/kg 之间。随着土层深度的增加,土壤碳含量显著降低($P<0.05$);而相同深度的土层中,不同树种之间的土壤碳含量差异显著($P<0.05$),0—

10cm, 10—30cm, 30—50cm 和 50—100cm 土壤碳含量均以米老排纯林最高,红锥纯林居次,格木纯林和混交林土壤碳含量较低,米老排纯林和红锥纯林 0—100cm 土壤平均含碳量分别是混交林的 1.8 倍和 1.3 倍,而格木纯林和混交林平均土壤碳含量之间无显著差异($P>0.05$)。

表 3 不同林分林下植被和凋落物碳含量

Table 3 Carbon content of understory vegetation and litter component in different stands (g/kg)

层次 Layers	组分 Components	格木纯林 PE	红锥纯林 PC	米老排纯林 PM	混交林 MECM
灌木层 Shrub layer	地上部分	494.4±10.3b	488.7±9.0c	512.5±17.7a	501.3±11.4b
	地下部分	445.8±7.4d	454.9±10.1c	486.3±9.7a	466.6±8.7b
草本层 Herb layer	地上部分	476.3±11.2a	437.5±6.9c	477.1±10.1a	468.7±7.9b
	地下部分	411.5±12.1b	407.8±8.8b	424.7±7.9a	427.8±14.2a
凋落物 Litter layer	未分解	517.2±9.4a	504.1±11.8b	523.8±6.4a	520.4±4.7a
	半分解	471.4±20.3b	452.4±14.7c	490.1±17.2a	473.5±11.8b

PE:格木纯林,PC:红锥纯林,PM:米老排纯林,MECM:格木×红锥×米老排混交林;同一行不同字母表示不同林分间碳含量差异显著($P<0.05$)

表 4 不同林分土壤碳含量

Table 4 Carbon content of soil layer in different stands (g/kg)

土层深度/cm Soil layer	格木纯林 PE	红锥纯林 PC	米老排纯林 PM	混交林 MECM
0—10	21.4±1.4c	25.1±1.8b	28.1±2.7a	20.8±1.7c
10—30	12.7±0.7c	16.8±1.2b	23.2±2.0a	10.4±0.8d
30—50	8.2±0.7c	10.2±0.9b	18.9±1.7a	7.8±0.8c
50—100	5.8±0.4d	8.7±0.7b	10.9±0.9a	7.1±0.7c
土壤平均 Mean	12.0±0.8c	15.2±1.3b	20.3±1.9a	11.5±1.0c

同一行不同字母表示不同林分间碳含量差异显著($P<0.05$)

2.2 格木人工林生态系统各组分碳贮量及其分配

2.2.1 乔木层碳贮量及其分配

乔木层碳贮量以米老排纯林最大,为 87.2 t/hm^2, 混交林居次,红锥纯林碳贮量最小,格木纯林碳贮量较红锥纯林大,但远比混交林低(表 5)。混交林碳贮量是米老排纯林的 45.2%,却分别是格木和红锥纯林的 1.8 和 2.1 倍。可见,对米老排而言,相比与其它阔叶树种混交,营建纯林更有利于乔木生物量的生长和碳素的累积。

表 5 乔木层各器官碳贮量及其分配

Table 5 Carbon storage of different organs in tree layer (t/hm^2)

器官 Organs	格木纯林 PE	红锥纯林 PC	米老排纯林 PM	格木×红锥×米老排混交林 MECM
树干 Stem	10.2 (47.3)	10.8 (54.5)	60.1(68.9)	25.8(63.1)
树皮 Bark	1.8 (8.3)	1.5 (7.7)	5.0 (5.7)	2.9 (7.0)
树枝 Branch	3.7 (17.4)	1.3 (6.6)	4.6 (5.3)	2.9 (7.0)
树叶 Leaf	2.7 (12.6)	1.1 (5.6)	2.7 (3.1)	2.3 (5.5)
树根 Root	3.1 (14.4)	5.1 (25.6)	14.8 (17.0)	7.1 (17.4)
合计 total	21.5 (100.0)	19.8 (100.0)	87.2 (100.0)	41.0(100.0)

括号内数据为各器官碳贮量占乔木碳贮量总量的百分比

不同林分各器官碳贮量在乔木层的分配均以树干最高,树干碳贮量在 4 种林分中的分配顺序为:米老排纯林 > 混交林 > 红锥纯林 > 格木纯林;树根和树皮与树干的分配大小顺序相同。树枝和树叶在乔木层碳贮

量的分配顺序有所不同,格木纯林树枝和树叶碳贮量在乔木层有较高的分配,分别占乔木层碳贮量的 17.4% 和 12.6%。总体上看,不同林分间各器官在乔木层碳贮量的分配顺序不同,格木纯林为:树干 > 树根 > 树枝 > 树叶 > 树皮;红锥和米老排纯林为:树干 > 树根 > 树皮 > 树枝 > 树叶;混交林为:树干 > 树根 > 树皮 = 树枝 > 树叶,混交林中树皮和树枝在乔木中的分配差异不显著(P>0.05)。

2.2.2　林下地被物碳贮量及其分配

从表 6 可知,人工林下地被物碳贮量均较小,在 2.439—11.077 t/hm^{2}之间。相同组分不同林分间以及相同林分的不同组分间均存在显著差异(P < 0.05),灌草层碳贮量大小顺序为:红锥纯林 > 混交林 > 格木纯林 > 米老排纯林,凋落物层为:米老排 > 混交林 > 格木纯林 >红锥纯林;地被层碳贮量总量大小顺序为米老排纯林 > 混交林 > 红锥纯林 > 格木纯林。

表 6　林下地被物碳贮量

Table 6　Carbon storage of ground cover (t/hm^2)

层次 Layers	组分 Components	格木纯林 PE	红锥纯林 PC	米老排纯林 PM	混交林 MECM
灌木层 Shrub layer	地上	0.220±0.073c	0.698±0.159a	0.076±0.012d	0.354±0.037b
	地下	0.094±0.028c	0.295±0.067a	0.019±0.005d	0.164±0.014b
	小计 Subtotal	0.314±0.086c	0.993±0.189a	0.096±0.013d	0.518±0.045b
草本层 Herb layer	地上	0.021±0.008c	2.380±0.681a	0.002±0.001d	1.257±0.242b
	地下	0.030±0.008c	1.513±0.236a	0.001±0.000d	1.307±0.317b
	小计 Subtotal	0.051±0.012c	3.894±0.788a	0.003±0.001d	2.564±0.510b
凋落物层 Litter layer	未分解	1.393±0.237c	0.691±0.087d	6.945±1.144a	2.419±0.314b
	半分解	0.682±0.170c	0.333±0.042d	4.033±1.275a	1.263±0.208b
	小计 Subtotal	2.075±0.284c	1.025±0.109d	10.978±2.087a	3.682±0.481b
地被层总计 The total		2.439±0.441d	5.911±1.004c	11.077±2.090a	6.764±0.913b

同行中不同小写字母表示林分间差异显著(P<0.05)

不同林分各组分碳贮量分配顺序也有所差异,格木纯林和米老排纯林大小顺序为:凋落物层 > 灌木层 > 草本层,红锥纯林为:草本层 > 凋落物层 > 灌木层,而混交林为凋落物层 > 草本层 > 灌木层。在灌木层中,地上部分碳贮量均大于地下部分,但草本层植物地上与地下部分碳贮量差异不显著;凋落物层中,未分解的凋落物碳贮量显著高于半分解的,约为半分解凋落物碳贮量的 2 倍。

2.2.3　土壤碳贮量及其分配

各林分相同土层厚度的土壤平均碳贮量随土层深度增加而降低,变化趋势与土壤碳含量随土层深度的变化一致,土壤碳贮量主要集中在 0—30cm 的表土层,格木纯林,红锥纯林,米老排纯林和混交林 0—30cm 土碳贮量分别占 0—100cm 土壤碳贮量的 44.7%,43.7%,42.0% 和 41.3%(见表 7)。

表 7　不同林分各土层土壤碳贮量

Table 7　Carbon storage in different soil layers in different stand (t/hm^2)

土层深度/cm Soil depth	格木纯林 PE	红锥纯林 PC	米老排纯林 PM	格木×红锥×米老排混交林 MECM
0—10	19.6±1.8c	26.9±2.8b	31.9±3.4a	27.2±3.1b
10—30	30.1±3.5c	40.6±4.1b	56.3±3.9a	28.7±4.7c
30—50	20.1±4.1c	26.4±3.7b	50.0±5.7a	23.8±2.5bc
50—100	41.3±5.5d	60.5±6.3b	71.6±7.1a	55.5±4.7c
合计 Total	111.1±12.7d	154.4±14.5b	209.8±18.4a	135.2±13.3c

同行中不同小写字母表示林分间差异显著(P<0.05)

从表 7 可以看出,不同林分间土壤碳贮量差异显著,0—100cm 土壤碳贮量以米老排纯林最高,红锥纯林居次,格木纯林最低。各土层碳贮量大小顺序为:米老排纯林 > 红锥纯林 > 混交林 > 格木纯林,除红锥纯林

与混交林 0—10cm 和 30—50cm 土层,格木纯林与混交林的 10—30cm 和 30—50cm 土层差异不显著外,其它各土层林分间土壤碳贮量差异均达显著水平($P < 0.05$)。

2.3 人工林生态系统碳贮量及其分配

格木纯林,红锥纯林,米老排纯林和混交林生态系统碳贮量分别是 135.2, 180.2, 308.0 和 182.8 t/hm^2,混交林碳贮量显著高于格木纯林,为格木纯林碳贮量的 1.6 倍,却显著低于米老排纯林,仅为米老排纯林碳贮量的 0.6 倍,而混交林与红锥纯林碳贮量总量无显著差异($P>0.05$)。相比于红锥纯林,混交林有较高的乔木碳贮量,但混交林土壤碳贮量和灌草层碳贮量均低于红锥纯林。可见,米老排纯林在 4 种林分中具有最高的碳贮量,不仅表现在生态系统碳贮量总量上,同时具有最高的植被碳贮量,土壤碳贮量和地被层碳贮量。

乔木层和土壤层为各林分主要碳库,二者占各人工林生态系统碳贮量的 96.3%—98.2%以上,而灌木层、草本层和凋落物层的碳贮量所占比例 < 4%。不同林分相同组分碳贮量在生态系统分配有所不同,乔木层碳贮量在生态系统碳分配的大小顺序为米老排(28.3%)> 混交林(22.4%)> 格木纯林(16.0%)> 红锥纯林(11.0%),土壤碳贮量的分配顺序为:红锥纯林(85.7%)> 格木纯林(82.2%)> 混交林(73.9%)> 米老排纯林(68.1%)。

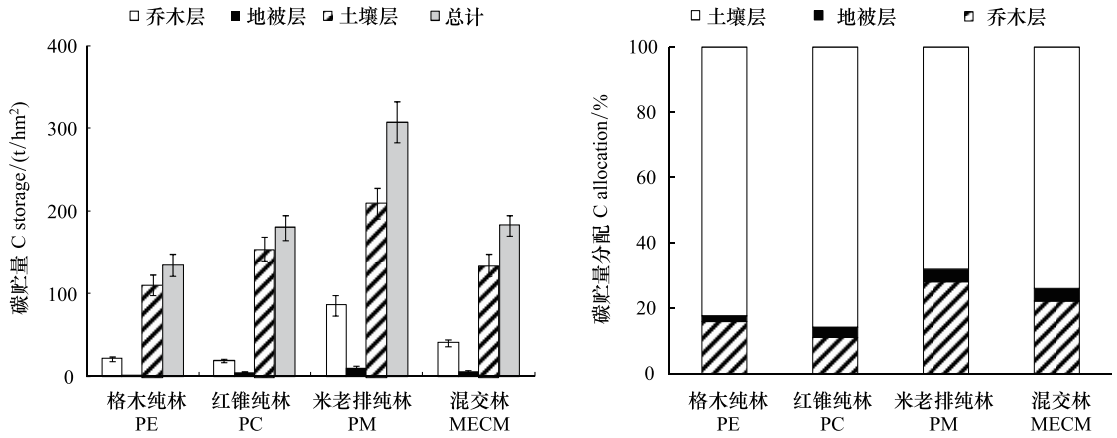

图 1 不同林分生态系统碳贮量及其分配

Fig.1 Carbon storage and allocation of ecosystem in different stands

3 结论与讨论

8 年生格木、红锥和米老排各器官碳含量的平均值分别为 539.3,532.7 g/kg 和 515.3 g/kg,高于广西巨尾桉(*Eucalyptus urophylla*×*E. grandis*)(475.2 g/kg)和杉木(497.0 g/kg)[28-31],也高于国际通用的树木平均碳含量(0.5 g/kg)及热带 32 个树种的平均碳含量(444.0—494.5 g/kg)[32]。相比之下,3 个树种碳含量平均值的大小顺序为格木 > 米老排 > 红锥,可见,即使在同一地区,树木各器官碳含量大小因树种不同而存在差异。另外,相同树种的不同器官碳含量差异显著($P < 0.05$),不同树种之间,各器官碳含量的排列顺序也有所不同。可见树种是影响乔木器官含碳量的重要因素之一,这可能与树种本身的生理特性相关。

不同林分间,灌木层、草本层和凋落物层碳含量的大小顺序为米老排纯林 > 混交林 >红锥纯林 > 格木纯林,这与不同林分间灌草植被及凋落物的组成密切相关,米老排纯林中灌草植被较少,林下植被主要以米老排幼苗为主,凋落物以米老排落叶为主分,而米老排叶的碳含量极高(556.3 g/kg)[28],自然以米老排幼苗为主的林下植被和以米老排凋落叶为主的凋落物层碳含量较其它林分高。

不同林分间的土壤碳含量差异显著($P<0.05$),以米老排纯林最高,红锥纯林居次,格木纯林和混交林土壤碳含量较低。米老排纯林和红锥纯林土壤碳含量较高的主要原因是由于具有较高的土壤碳输入。米老排纯林是通过较多的凋落物增加土壤碳输入,而红锥纯林是因为自然稀疏强度较大,较多的光照条件和较大的

生长空间使得林下植被得以快速生长,丰富的林下灌草植被也增加了其土壤的碳输入。混交林和格木纯林因郁闭度较大,林下植被生长受限,且没有足够的凋落物覆盖,因而缺乏土壤碳源,造成土壤碳含量低于米老排和红锥纯林。

本研究表明,不同林分生态系统碳贮量有所不同,米老排纯林在 4 种林分中具有最高的碳贮量,高于混交林碳贮量总量的 68.5%,一方面是米老排纯林中米老排生长较为迅速,生物量较高,而乔木层在整个植被层碳储量中占的比例较高,这样就增加了植被层碳的累积量;另一方面米老排纯林丰富的凋落物不仅增加了地被层碳贮量,而且由于增加了土壤凋落物的输入,进而增加了土壤碳贮量的累积 ;而混交林由于林分树种组成的改变,引起乔木层生物量生长的变化,3 个主要乔木树种的平均生物量较米老排纯林小,从而导致混交林乔木层生物量碳低于米老排纯林。这一结论与诸多前人研究所得出的混交林的碳贮量大于纯林的结论并不一致[13,23-24],营建纯林与混交林,其林分碳贮量大小,同所选择的造林树种有关,并非混交林固碳能力始终高于纯林。

乔木层和土壤层为各林分主要碳库,二者占格木人工林生态系统碳贮量的 96.3%—98.2%,而灌木层、草本层和凋落物层的碳贮量所占比例 < 4%。不同林分相同组分碳贮量在生态系统分配有所不同,乔木层碳贮量在生态系统碳分配的大小顺序为米老排纯林(28.3%)> 混交林(22.4%)> 格木纯林(16.0%)> 红锥纯林(11.0%),这与明安刚对米老排和格木近熟林乔木层(28 年生)碳贮量在人工林生态系统中的分配结果明显不同(28 年生米老排和 29 年生格木人工林乔木层碳贮量占分别占生态系统碳贮量总量的 51.8% 和 52.4%)[27-28],与 27 年生红锥人工林乔木层碳贮量所占比例(32.8%)也有所不同[33]。这表明人工林碳贮量各组分在生态系统碳贮量总量中的分配与林龄密切相关,随着林龄的增加,乔木层碳贮量在生态系统中的分配也随之增加。

4 种人工林中,格木纯林碳贮量最小,为 135.2 t/hm^2, 仅相当于米老排纯林碳贮量(308.0 t/hm^2)和混交林碳贮量(182.8 t/hm^2)的 43.9%和 74.0%,主要原因有二,一是相对于红锥和米老排,格木生长较慢,生物量生长较慢,因而乔木层碳贮量较小;二是由于格木人工林较低的土壤碳含量,直接减少了土壤碳的累积。

总体上看,乔木层碳贮量大小顺序为米老排纯林 > 混交林 > 红锥纯林 > 格木纯林,而土壤层碳贮量大小顺序为米老排纯林 > 红锥纯林 > 混交林 > 格木纯林,且差异显著(P<0.05)。由此可见,造林模式对人工林碳贮量及其分配有显著影响。如果选用红锥和格木这两个树种营建碳汇林,选用混交模式更有利于地上碳的累积,但不利于土壤碳的固定;而对米老排而言,营建纯林不仅有利于生物量碳的吸收,也有利于土壤碳的累积。因而,对碳汇林造林模式的选择,应根据树种生物学及固碳特性而定。

致谢:中国林业科学研究院热带林业实验中心黄德卫,王群能、农友、于浩龙等参加了野外调查工作,孙冬婧,陶怡、龙涛参加了实验室样品处理和数据整理工作,王晖副研究员和史作民研究员帮助写作,特此致谢。

参考文献(References):

[1] Pope J. How can global warming be traced to CO_2. Scientific America, 2006, 295(6): 124-124.

[2] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.

[3] Caldeira K, Duffy P B. The role of the southern ocean in up take and storage of anthropogenic carbon dioxide. Science, 2000, 287(5453): 620-622.

[4] Norby R J, Luo Y Q. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO_2 and global warming in a multi-factor world. New Phytologist, 2006, 162(2): 281-293.

[5] Brown S. Present and potential roles of forests in the global climate change debate. Unasylva, 1996, 47(185): 3-10.

[6] Lun F, Li W H, Liu Y. Complete forest carbon cycle and budget in China 1999—2008. Forest Ecology and Management, 2012, 264: 81-89.

[7] Hoover C M, Leak W B, Keel B G. Benchmark carbon stocks from old-growth forests in northern New England, USA. Forest Ecology and Management, 2012, 266: 108-114.

[8] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science, 2011, 333(6045): 988-993.

[9] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, Likens G E, Delwiche C C, Botkin D B. The biota and the world carbon budget. Science, 1978, 199(4325): 141-146.

[10] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 1982, 298(5870): 156-159.

[11] 张小全, 李怒云, 武曙红. 中国实施清洁发展机制造林和再造林项目的可行性和潜力. 林业科学, 2005, 41(5): 139-143.

[12] 武曙红, 张小全, 李俊清. CDM 造林或再造林项目的基线问题. 林业科学, 2006, 42(4): 112-116.

[13] 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.

[14] Wang S, Chen J M, Ju W M, Feng X, Chen M, Chen P, Yu G. Carbon sinks and sources in China's forests during 1901—2001. Journal of Environmental Management, 2007, 85(3): 524-537.

[15] Salimon C I, Putz F E, Menezes-Filho L, Anderson A, Silveira M, Brown I F, Oliveira L C. Estimating state-wide biomass carbon stocks for a REDD plan In Acre, Brazil. Forest Ecology and Management, 2011, 262(3): 555-560.

[16] Laclau P. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. Forest Ecology and Management, 2003, 180(1/3): 317-333.

[17] Specht A, West P W. Estimation of biomass and sequestered carbon on farm forest plantations in northern New South Wales, Australia. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(4): 363-379.

[18] 方晰, 田大伦, 项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布. 林业科学, 2002, 38(3): 14-19.

[19] 马明东, 江洪, 刘跃建. 楠木人工林生态系统生物量、碳含量、碳贮量及其分布. 林业科学, 2008, 44(3): 34-39.

[20] 方晰, 田大伦, 项文化, 蔡宝玉. 不同密度湿地松人工林中碳的积累与分配. 浙江林学院学报, 2003, 20(4): 374-379.

[21] 张国庆, 黄从德, 郭恒, 邓彪, 杨和芳. 不同密度马尾松人工林生态系统碳储量空间分布格局. 浙江林业科技, 2007, 27(6): 10-14.

[22] 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.

[23] 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.

[24] He Y J, Qin L, Li Z Y, Liang X Y, Shao M X, Tan L. Carbon storage capacity of monoculture and mixed-species plantations in subtropical China. Forest Ecology and Management, 2013, 295: 193-198.

[25] 王晓丽, 王媛, 石洪华, 彭士涛, 宫立鹏, 覃雪波. 山东省长岛县南长山岛黑松和刺槐人工林的碳储量. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1263-1268.

[26] 郭文福, 蔡道雄, 贾宏炎, 李运兴, 卢志芳. 米老排人工林生长规律的研究. 林业科学研究, 2006, 19(5): 585-589.

[27] 明安刚, 贾宏炎, 陶怡, 陆毅, 于浩龙, 卢立华, 蔡道雄, 史作民. 米老排人工林碳素积累特征及其分配格局. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2730-2735.

[28] 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.

[29] 何斌, 黄寿先, 招礼军, 陈玉萍, 荣蔥, 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): 151-157.

[30] 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.

[31] 梁宏温, 温远光, 温琳华, 殷庆仓, 黄锡泽, 周国福. 连栽对尾巨桉短周期人工林碳贮量的影响. 生态学报, 2009, 29(8): 4242-4250.

[32] Elias M, Potvin C. Assessing inter-and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical tree species. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(6): 1039-1045.

[33] 刘恩, 王晖, 刘世荣. 南亚热带不同林龄红锥人工林碳贮量与碳固定特征. 应用生态学报, 2012, 23(2): 335-340.