

DOI: 10.5846/stxb201405211041

明安刚,刘世荣,莫慧华,蔡道雄,农友,曾冀,李华,陶怡. 南亚热带红锥、杉木纯林与混交林的碳贮量比较. 生态学报, 2016, 36(1): - .
Ming A G, Liu S R, Mo H H, Cai D X, Nong Y, Zeng J, Li H, Tao Y. Comparison of carbon storage in pure and mixed stands of *Castanopsis hystrix* and *Cunninghamia lanceolata* in subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): - .

南亚热带红锥、杉木纯林与混交林的碳贮量比较

明安刚^{1,2,3}, 刘世荣^{2,*}, 莫慧华^{1,3}, 蔡道雄^{1,3}, 农友^{1,3}, 曾冀^{1,3}, 李华^{1,3},
陶怡^{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:造林再造林作为新增碳汇的一种有效途径,受到国际社会的广泛关注。如何通过改变林分树种组成,优化造林模式提高人工林生态系统碳贮量已成为国内外学者关注的重点。本文通过样方调查和生物量实测相结合的方法,对南亚热带 26 年生红锥纯林(PCH)、杉木纯林(PCL)及红锥×杉木混交林(MCC)生态系统各组分碳含量、碳贮量及其分配特征进行了比较研究。结果表明:杉木、红锥各器官平均碳含量分别为 492.1—545.7 g/kg 和 486.7—524.1 g/kg。相同树种不同器官以及不同树种的相同器官间碳含量差异显著($P < 0.05$)。红锥各器官碳含量的平均值(521.3 g/kg)高于杉木(504.7 g/kg)。不同林分间地被物碳含量大小顺序为 PCH > MCC > PCL;不同树种之间的土壤碳含量差异显著($P < 0.05$),0—100 cm 土壤平均碳含量为 PCL > MCC > PCH。生态系统碳贮量大小顺序为 PCL(169.49 t/hm²) > MCC(141.18 t/hm²) > PCH(129.20 t/hm²),相同组分不同林分以及相同林分的不同组分碳贮量均存在显著差异($P < 0.05$)。造林模式对人工林碳贮量及其分配规律有显著影响,营建混交林有利于红锥生物量和土壤碳的累积,而营建纯林有利于杉木人工林生物量碳的吸收,也有利于土壤碳的固定。因而,混交林的固碳功能未必高于纯林,在选择碳汇林的造林模式时,应以充分考虑不同树种的固碳特性。

关键词:南亚热带;红锥;杉木;纯林;混交林;碳贮量

Comparison of carbon storage in pure and mixed stands of *Castanopsis hystrix* and *Cunninghamia lanceolata* in subtropical China

MING Angang^{1,2,3}, LIU Shirong^{2,*}, MO Huihua^{1,3}, CAI Daoxiong^{1,3}, NONG You^{1,3}, ZENG Ji^{1,3}, LI Hua^{1,3},
TAO Yi^{1,3}

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

Abstract: The focus has been on afforestation and re-afforestation as new methods for improving carbon sequestration, by optimizing the mode of afforestation and adjusting the forest tree species composition. Carbon content and storage of different components, including tree, shrub, herb, litter, and soil layers and their allocations of a 26-year-old *Castanopsis hystrix* (PCH), *Cunninghamia lanceolata* (PCL), and mixed *C. hystrix* × *C. lanceolata* (MCC) stands in subtropical China were studied using quadrat sampling combined with biomass measurements. The results showed that the average carbon content of different organs in *C. lanceolata* and *C. hystrix* were 492.1—545.7 g/kg and 486.7—524.1 g/kg, respectively. Significant

基金项目:“十二五”农村领域国家科技计划项目(2012BAD22B0105);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2014QA033);广西自然科学基金项目(2014GXNSFBA118100);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)

收稿日期:2014-05-21; **网络出版日期:**2015-07-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusr9311@163.com

differences were found among different organs in the same tree species ($P < 0.05$). The average carbon content of *C. hystrix* (539.3 g/kg) was higher than *C. lanceolata*. Carbon content of the ground cover was PCH > MCC > PCL. Soil content in 0—100 cm showed significant differences among the three stands, which was ranked as PCL > MCC > PCH ($P < 0.05$). The carbon storage in the total ecosystem was ranked as PCL (169.49 t/hm²) > MCC (141.18 t/hm²) > PCH (129.20 t/hm²). Significant differences were found among different components in the same stand, and among different stands of the same components ($P < 0.05$). Afforestation significantly affected the carbon storage and allocation in plantations, and the mixed stand benefited from increased carbon biomass and soil carbon for *C. hystrix*; while monoculture stand benefited from the biomass and soil carbon for *C. lanceolata*. Therefore, we should select the afforestation mode based on the carbon accumulation characteristics of tree species regarding carbon sequestration forests, because mixed stands do not always fix more carbon compared with pure forests.

Key Words: Subtropical China; *Castanopsis hystrix*; *Cunninghamia lanceolata*; Pure forest; Mixed forest; Carbon storage

工业革命以来,由于化石燃料的大量燃烧和土地利用方式的改变,大气中 CO₂ 浓度不断升高^[1],CO₂ 的排放、吸收和固定是全球气候变化研究的热点^[2-4]。目前,近 4×10⁹ hm² 森林中储存了 860 Pg 碳,而且每年可以从大气吸收 2.4 Pg 碳,折合 8.8 PgCO₂^[5-8]。因而,作为陆地生态系统的主体,森林在储存 CO₂,调节全球气候、减缓全球气候变化方面具有不可替代的作用^[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 CO₂ 及减缓全球气候变暖等方面发挥着重要作用,并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,需要对不同造林模式的人工林固碳能力与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、不同林龄及不同密度人工林的碳含量、碳贮量及其空间分布格局进行了深入研究^[16-26],发现人工林碳贮量随着林龄的增加而增加^[18,22,26],林分密度对林分碳贮量的影响的研究得出的结论有所不同,方晰等人得出湿地松人工林碳贮量随林龄的增加而增加^[20],而张国庆等人对马尾松人工林碳贮量的研究得出了相反的结论^[21],认为马尾松人工林碳贮量随林龄的增加而减少。这些研究为森林碳汇功能的研究做出了积极贡献。近些年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显著影响,纯林与混交林地上、地下碳贮量都有明显差异,但不同学者的研究得出的结论并不一致^[13,23],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。

红锥 (*Castanopsis hystrix*) 和杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 都是我国南亚热带地区主要造林树种,也是适合在该地区培养大径材的用材树种^[23]。其中,红锥是分布在南亚热带地区珍贵乡土阔叶树种,是替代大面积针叶人工林较为理想的高价值乡土阔叶树种之一^[27]。目前,已有学者对不同林龄红锥人工林和以及红锥与马尾松混交林碳贮量进行了研究^[24, 28],但对红锥纯林及其与杉木混交林碳贮量的比较研究了解甚少。本文对南亚热带中国林科院热林中心林区 26 年生红锥、杉木纯林及其二者混交林生态系统碳贮量及其分配特征进行了比较研究,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人工林生态系统碳库及碳平衡提供基础数据和理论依据,为碳汇林的营建和人工林可持续经营提供科学的理论指导。

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域内的西南部,与北热带北缘毗邻。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 $439.61 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年日照时数 1218—1620 h,年均温 $19.5\text{—}21.0 \text{ }^\circ\text{C}$,极端高温 $40.3 \text{ }^\circ\text{C}$,极端低温 $-1.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温 6000—7600 $^\circ\text{C}$,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—650 m,地带性土壤为花岗岩发育成的山地红壤,土层厚度在 100 cm 以上。

哨平实验场于 1987 年 4 月营造了红锥纯林(PCH)、杉木纯林(PCL)和红锥×杉木混交林(MCC,以下简称混交林)为研究对象,调查当年,3 种林分的林龄均为 26 年,且都是在马尾松(*Pinus massoniana*)人工林皆伐炼山后,经块状整地营建的人工林。造林当年和翌年各进行常规抚育 2 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,混交比例为红锥:杉木=1:1。调查当年,红锥纯林枝叶茂盛,冠幅较大,林分郁闭度高,但林分自然稀疏较多,保留密度较小。但因林冠郁闭较大,林下植被稀少,灌草层盖度为 5%;其次为混交林,盖度为 25%,杉木纯林随保留密度最大,但郁闭度最小,灌草植被盖度最大,达 55%。林下植被灌木主要有红锥、九节(*Psychotria rubra*)、大沙叶(*Pavetta hongkongensis*)、酸藤子(*Embelia laeta*)、玉叶金花(*Mussaenda pubescens*)、草本植物以扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum*)和半边旗(*Pteris semipinnata*)为主要优势种。

2013 年 9 月,在 3 种林分中,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 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 样地,共计 12 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 3 种人工林地概况

Table 1 Situation of three plantations

林分类型 Forest type	地理坐标 Location (lat, long)	土壤类型 Soil type	坡度 Slope/($^\circ$)	海拔 Elevation/m	小地形 Micro relief	坡向 Slope aspect	郁闭度 Canopy density	密度 Density/ (trees/ hm^2)	胸径 DBH/ cm	树高 Tree height/m
红锥纯林 PCH	22 $^\circ$ 2'58"N, 106 $^\circ$ 53'40"E	山地 红壤	31.4 \pm 2.7	274 \pm 24	中坡山地	南坡	0.95	1716.7 \pm 194.2	11.6 \pm 0.6	10.9 \pm 0.8
杉木纯林 PCL	22 $^\circ$ 3'41"N, 106 $^\circ$ 52'08"E	山地 红壤	34.1 \pm 1.8	248 \pm 21	中坡山地	南坡	0.85	2341.7 \pm 450.2	14.3 \pm 1.2	17.2 \pm 1.5
混交林 MCC	红锥 <i>C. hystrix</i> 杉木 <i>C. lanceolata</i> 22 $^\circ$ 3'14"N, 106 $^\circ$ 53'58"E	山地 红壤	32.7 \pm 2.1	241 \pm 18	中坡山地	南坡	0.90	937.5 \pm 197.5 1045.8 \pm 220.8	12.1 \pm 1.4 13.0 \pm 2.7	12.6 \pm 1.8 14.3 \pm 1.8

PCH:红锥纯林 *Castanopsis hystrix*;PCL:杉木纯林 *Cunninghamia lanceolata*;MCC:混交林 mixed *C. hystrix* \times *C. lanceolata*

1.2 研究方法

1.2.1 林木调查及生物量的测定

根据样方每木检尺的结果,用 He 等人该地区建立的红锥生物量方程估算红锥各器官生物量^[24],用康冰等人该地区建立的杉木生物量方程估算样方内杉木各器官生物量^[29]。

1.2.2 林下植被生物量和凋落物现存量的测定

在每个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 样方中,按梅花形布点设置 5 个 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 小样方和 5 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 小样方,记录 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 小样方内灌木和草本植物的种类,并采用“样方收获法”分别测定灌木层和草本层地上和地下部分生物量。在 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 小样方内按未分解、半分解组分分别测定凋落物鲜重。同时,取各组分样品带回实验室在 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,计算干重。

1.2.3 植物和土壤样品的采集

在乔木每木检尺和林下地被物生物量调查的同时,分别采集红锥和杉木不同器官(干、皮、枝、叶和根)灌木层、草本植层和凋落物层样品 4 份,经烘干、粉碎、过筛后以备碳含量的测定。

在每个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 样方中,按梅花形布点挖取 5 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 个土层分别采集土壤样品 400 g 左右,各剖面的同层土样取混合样。将样品带回实

实验室自然风干后碾碎过筛,用于土壤含碳量的测定。同时,用铝盒和 100cm^3 的环刀取样,以用于含水率和土壤容重的测定。

1.2.4 碳含量测定和碳贮量计算

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 Excel2007 和 PS 软件作图。

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

26 年生红锥和杉木各器官碳含量分别在 $492.1\text{—}545.7\text{ g/kg}$ 和 $486.7\text{—}524.1\text{ g/kg}$ 之间(见表 2)。方差分析表明:相同树种不同器官之间碳含量有所不同,除红锥的干和叶以及杉木的皮和叶之间差异不显著外,其它各器官间均存在显著差异 ($P < 0.05$)。不同树种各器官碳含量高低顺序也不尽相同,红锥不同器官碳含量的排列顺序为:树皮 > 树干 > 树叶 > 树枝 > 树根;杉木为:树皮 > 树叶 > 树干 > 树枝 > 树根。不同树种的相同器官碳含量也存在显著差异(树叶除外) ($P < 0.05$),从整体上看,26 年生红锥各器官碳含量的平均值高于杉木。

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, Mean+SD)

树种 Tree species	干 Stem	皮 Bark	枝 Branch	叶 Leaf	根 Root	平均 Average
红锥 <i>C. hystrix</i>	531.4±14.2Ba	545.7± 21.4Aa	512.8±20.4Ca	524.7±15.6 Ba	492.1±16.7Da	521.3±17.7a
杉木 <i>C. lanceolata</i>	502.4±23.4Bb	524.1±13.6Ab	491.6±17.4Cb	518.5±25.3Aa	486.7±19.7Db	504.7± 19.3b

同行中不同大写字母表示相同树种不同器官间差异显著,同列中不同小写字母表示相同器官不同树种间差异显著 ($P < 0.05$)

2.1.2 林下地被物碳含量

对不同林分地被层的不同组分碳含量的测定结果显示,不同林分相同组分碳含量有所差异,表现为红锥纯林 > 混交林 > 杉木纯林,方差分析结果表明:不同林分间灌木层,草本层地上部分和凋落物的未分解部分碳含量差异达显著水平 ($P < 0.05$);3 种人工林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。

2.1.3 土壤层碳含量

从表 3 可知,3 种林分的土壤碳含量均以表土层(0—10 cm)最高,在 $9.18\text{—}12.19\text{ g/kg}$ 之间。随着土层深度的增加,土壤碳含量显著降低 ($P < 0.05$);林分间土壤碳含量在不同土层深度大小顺序有所不同,0—10 cm 和 10—30 cm 土层中,杉木纯林和混交林碳含量均显著高于红锥纯林,而 30—50 cm 和 50—100 cm 土层中,碳含量大小顺序为杉木纯林 > 红锥纯林 > 混交林,但仅有杉木纯林和混交林间碳含量存在显著差异 ($P < 0.05$)。

而相同深度的土层中,不同林分之间的土壤碳含量不同,0—100 cm 土壤平均碳含量均以杉木纯林最高,混交林居次,红锥纯林土壤碳含量最低,红锥纯林与杉木纯林间土壤平均碳含量差异显著 ($P < 0.05$),杉木纯林 0—100 cm 土壤平均含碳量比红锥纯林高出 31.3%,红锥×杉木混交林土壤平均碳含量与杉木纯林和红锥纯林均无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.2 不同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

乔木层生物量和碳贮量均以杉木纯林最大,混交林居次,红锥纯林最小(见表 4)。从表 4 可以看出,红锥

×杉木混交林的生物量和碳贮量分别是杉木纯林的 87.68% 和 89.84%, 却是红锥纯林的 1.09 和 1.08 倍。可见, 对红锥而言, 与杉木营造混交林更有利于乔木生物量的生长和碳素的累积; 而对杉木而言, 营造纯林更有利于林分生物量生长和碳贮量的增加。

表 3 林下植被、凋落物及土壤碳含量

Table 3 Carbon content of understory vegetation, litter and soil component (g/kg)

层次 Layers	组分 Components	红锥纯林 PCH	杉木纯林 PCL	混交林 MCC
灌木层 Shrub layer	地上部分	519.24±13.66a	497.74±15.12c	506.21±9.44b
	地下部分	488.27±12.17a	458.19±10.37c	468.84±8.18b
	平均	503.76±10.43a	477.97±22.20c	487.53±19.81b
草本层 Herb layer	地上部分	458.28±7.74a	437.88±11.42b	441.72±8.43b
	地下部分	425.17±8.13a	398.78±9.38b	392.75±7.58b
	平均	441.73±10.32a	418.33±5.79b	417.24±10.47b
凋落物 Litter layer	未分解	532.18±17.98a	501.39±3.74c	517.13±10.43b
	半分解	474.23±21.35a	389.43±12.28c	437.64±6.78b
	平均	503.21±17.43a	445.41±19.77c	477.39±12.63b
土壤层 Soil layer	0—10cm	9.18±2.54b	11.06±3.17a	12.19±3.22a
	10—30cm	4.79±1.47b	8.44±2.01a	7.66±2.18a
	30—50cm	4.86±1.44ab	5.80±2.24a	4.34±1.19bc
	50—100cm	3.91±1.31ab	4.55±1.16a	3.31±0.74bc
	土壤平均	5.68±2.37bc	7.46±2.90a	6.87±4.00ab

PCH: 红锥纯林 *Castanopsis hystrix*; PCL: 杉木纯林 *Cunninghamia lanceolata*; MCC: 混交林 mixed *C. hystrix* × *C. lanceolata* 下同; 同一行不同字母表示不同林分间碳含量差异显著 ($P < 0.05$)

从图 1 可以看出, 不同林分各器官生物量和碳贮量在乔木层的分配均以树干最高 (59.9%—63.1% 和 60.1%—64.3%), 树干生物量和碳贮量在 3 种林分中的分配顺序为: 红锥纯林 (63.1, 64.3) > 混交林 (61.8, 62.5) > 杉木纯林 (59.9, 60.1); 总体上看, 不同林分各器官在乔木层碳贮量的分配顺序不同, 杉木纯林为: 树干 > 树根 > 树枝 > 树皮 > 树叶; 红锥纯林和混交林为: 树干 > 树根 > 树皮 > 树枝 > 树叶, 红锥和杉木营造混交林减少了枝条在乔木层中的碳分配, 增加了树皮的碳分配, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。

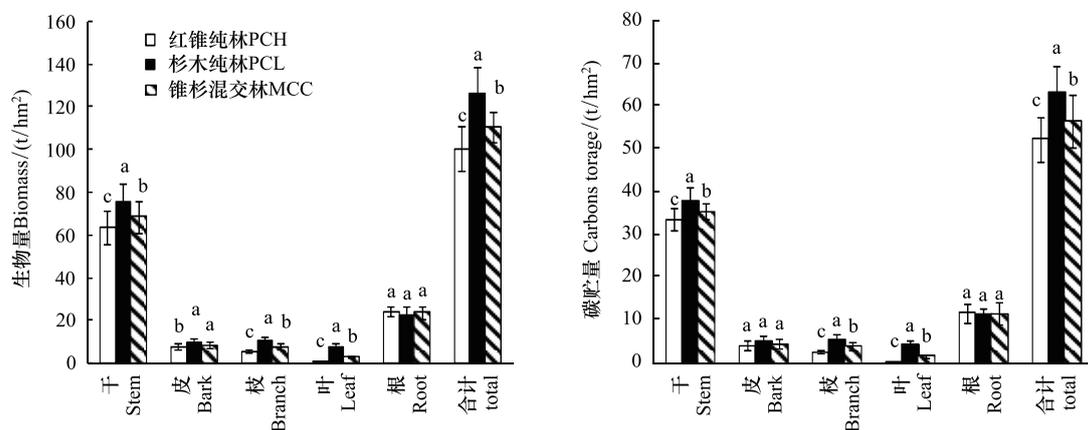


图 1 不同林分乔木层生物量和碳贮量分配

Fig.1 Biomass, carbon storage and the allocation of tree layer in different stands

不同小写字母表示不同林分相同组分生物量, 碳贮量差异显著; PCH: 红锥纯林 *Castanopsis hystrix*; PCL: 杉木纯林 *Cunninghamia lanceolata*; MCC: 混交林 mixed *C. hystrix* × *C. lanceolata*

2.2.2 林下地被物碳贮量及其分配

林下地被物碳贮量包括灌木层、草本层和凋落物层三个层次, 从表 5 可知, 3 种林分地被物碳贮量均较

小,在 1.48—8.56 t/hm²之间。不同林分间相同组分碳贮量存在显著差异($P<0.05$),灌木层,草本层和凋落物层碳贮量大小顺序均为:杉木纯林 > 混交林 > 红锥纯林。

相同林分不同组分碳贮量分配顺序也有所差异,3种林分不同层次碳贮量分配顺序均为:灌木层 > 凋落物层 > 草本层。在灌木层和草本层中,地上部分碳贮量均大于地下部分;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 2.5—3.1 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—30 cm 的表土层,红锥纯林,杉木纯林和混交林 0—30 cm 土碳贮量分别占 0—100 cm 土壤碳贮量的 36.6%,43.9%和 49.1%(见表 4)。

从表 4 可以看出,不同林分间土壤碳贮量差异显著,0—100 cm 土壤碳贮量以杉木纯林最高,混交林林居次,红锥纯林最低。多重比较结果显示各林分见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

红锥纯林,杉木纯林和混交林生态系统碳贮量总量分别是 129.20,169.49,和 141.18 t/hm²,混交林碳贮量显著高于红锥纯林,低于杉木纯林,且差异显著($P<0.05$)。混交林碳贮量总量高于红锥纯林 9.3%,却低于杉木纯林 20.1%。红锥纯林,杉木纯林和混交林生态系统植被碳贮量总量分别为 53.83, 71.62 和 61.34 t/hm²,杉木纯林具有最高植被碳贮量,显著高于红锥纯林,也显著高于混交林(表 4)。

表 4 三种人工林生态系统生物量、碳贮量及其分布

Table 4 biomass, carbon storage and spatial allocation in the three plantation ecosystems/(t/hm²)

层次 Layer	组分 Component	红锥纯林 PCH		杉木纯林 PCL		混交林 MCC	
		生物量 Biomass	碳贮量 Carbon storage	生物量 Biomass	碳贮量 Carbon storage	生物量 Biomass	碳贮量 Carbon storage
乔木层 Tree layer	地上部分	76.43	40.61	103.01	51.97	86.91	45.20
	地下部分	23.84	11.74	22.79	11.09	23.36	11.45
	小计	100.3	52.35	125.8	63.06	110.3	56.65
灌木层 Shrub layer	地上部分	1.24	0.64	8.44	4.20	5.02	2.54
	地下部分	0.18	0.09	2.31	1.06	0.73	0.34
	小计	1.42	0.73	10.75	5.26	5.75	2.88
草本层 Herb layer	地上部分	0.11	0.05	1.44	0.63	0.27	0.12
	地下部分	0.08	0.03	0.96	0.38	0.19	0.08
	小计	0.19	0.08	2.40	1.01	0.46	0.19
凋落物 Litter layer	未分解	0.92	0.49	3.45	1.73	2.23	1.15
	半分解	0.37	0.18	1.42	0.55	1.04	0.46
	小计	1.29	0.67	4.87	2.28	3.28	1.61
土壤层 Soil layer	0—10 cm		12.50		16.26		14.66
	10—30 cm		15.09		26.74		24.56
	30—50 cm		15.53		18.45		14.27
	50—100 cm		32.25		36.42		26.36
	小计		75.37		97.88		79.84
	总计		103.17	129.20	143.81	169.49	119.75

由表 4 可以看出,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 94.9%—98.8% 以上,而灌木层、草本层和凋落物层的碳贮量总和仅占 1.2%—5.1%。各层次碳贮量在生态系统中的分配顺序均为土壤层(56.5%—58.3%) > 乔木层(37.2%—40.5%) > 凋落物层(1.1%—5.0%) > 灌木层(0.6%—3.1%) > 草本层(0.1%—0.6%)。不同林分相同组分碳贮量在生态系统分配有所差异,乔木层碳贮量在生态系统碳分配的大小顺序为红锥纯林(40.5%) > 混交林(40.1%) > 杉木纯林(37.2%),土壤碳贮量的分配顺序为

红锥纯林(58.3%) > 杉木纯林(57.7%) > 混交林(56.5%)。

3 结论与讨论

26年生红锥和杉木各器官碳含量的平均值分别为521.3 g/kg和504.7 g/kg,高于广西26年生楠木(493.1 g/kg)以及28年生秃杉(491.9 g/kg)^[30-31],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]。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不尽相同。可见树种是影响乔木器官碳含量的重要因素之一,这可能与树种本身的生理特性相关。

相比之下,红锥碳含量平均值显著高于杉木,本研究发现,杉木纯林乔木层生物量高出红锥纯林25.4%,但碳贮量仅高出红锥纯林20.5%,这是因为杉木虽然具有较高的生物量,但红锥因具有较高的碳含量,从而减小了与杉木纯林之间碳贮量的差异。

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红锥纯林 > 混交林 > 杉木纯林,这与不同林分间灌草植被及凋落物的组成密切相关,红锥纯林中灌草植被较少,林下植被主要以天然更新的红锥幼苗为主,凋落物以红锥落叶为主要成分,而红锥叶的碳含量较高(524.7 g/kg),因而红锥纯林林下植被和凋落物的碳含量高于杉木纯林和混交林。

不同林分间的土壤碳含量大小顺序为杉木纯林 > 混交林 > 红锥纯林。这与3种林分间地被物碳含量大小顺序恰好相反,但与地被层生物量大小顺序一致。杉木纯林的凋落叶虽然分解较慢,不易将碳素分解进入土壤,但其林下较多的灌草植被及地下凋落物均可较快地增加土壤碳输入。混交林和纯林因郁闭度较大,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杉木纯林。这一结果表明决定土壤有机碳含量的关键因素很可能是林下植被生物量和地下凋落物(主要是死根)的大小,而非地被层碳含量的高低。

本研究表明,不同林分生态系统碳贮量差异显著($P < 0.05$),杉木纯林在3种林分中具有最高的碳贮量,高于混交林碳贮量总量的31.2%。原因有三:一是杉木在前20年生长较快,杉木纯林乔木层生物量的快速生长,迅速增加了植被层生物量碳的累积;二是杉木纯林丰富的灌草植被不仅增加了地被层碳贮量,而且由于凋落物输入的增加,进而增加了土壤碳的累积;三是较轻的自然稀疏强度为乔木层维持了较高的保留密度(表1),也是乔木层碳贮量高于混交林和红锥纯林的重要原因。然而,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,2个主要乔木树种的平均生物量较杉木纯林小,从而导致混交林乔木层生物量碳低于杉木纯林。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^[14, 23-24],影响乔木层生物量生长和碳贮量累积的因素较多,不仅与造林模式有关,还取决于纯林树种的选择和混交林树种的配置方式。

3种人工林中,以红锥纯林碳贮量最小,为135.2 t/hm²,仅相当于杉木纯林和混交林碳贮量的76.2%和91.5%,主要原因有二,一是相对于杉木纯林和混交林,红锥土壤有机碳含量最低,而土壤有机碳含量较小的差异就会引起土壤碳贮量较大的不同,红锥纯林较低的土壤有机碳含量直接导致了红锥纯林较低的土壤碳贮量。其二,红锥纯林自然稀疏严重,保留乔木密度较小,再加上林冠郁闭度高,林下植被和凋落物少,共同导致了其生物量碳的累积。

本研究的结果表明,就红锥和杉木两个树种而言,营造纯林有利于杉木人工林生态系统碳的累积,而不利于红锥生物量的累积,而营造红锥和杉木的混交林有利于红锥生物量碳和土壤碳的累积,而不利于杉木对碳素的吸收和固定。从表1也可以看出,混交林中,红锥胸径及树高生长量均高于红锥纯林中红锥的胸径和树高的生长量,杉木恰好相反,由此可见,造林模式对人工林生物量碳和土壤碳的累积均有影响。就造林后的前26年而言,营林中若选取红锥营建碳汇林,选择混交模式更有利于林分碳的累积;而对杉木而言,营建纯林对碳的吸存更有利。至于26年以后,杉木生长量是否会慢慢进入衰退期,而红锥的生长量在一定时期后会超越

杉木,从而导致后期各林分碳贮量大小顺序开始发生变化,需要进一步观测和研究。但从目前研究的结果来看,至少有一点需要引起人们的关注,无论林分碳贮量发生怎样的变化,营林中对碳汇林造林模式的选择,不仅需要考虑到树种固碳特性,还应选择科学的树种搭配。

参考文献 (References):

- [1] Pope J. How can global warming be traced to CO₂. *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 CO₂ 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] Wu S H, Zhang X Q, Li J Q. Baseline issues for forest-based carbon sink project on Clean Development Mechanism (CDM). *Scientia Silvae Sinicae*, 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] 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.
- [21] 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.
- [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] 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.
- [26] 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.
- [27] 朱积余, 蒋焱, 潘文. 广西红锥优树选择标准研究. *广西林业科学*, 2002, 31(3): 109-113.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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): 151-157.
- [31] Liang H W, Wen Y G, Wen L H, Yin Q C, Huang X Z, Zhou G F. Effects of continuous cropping on the carbon storage of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* short-rotations plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 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.