

珍贵乡土树种与桉树混交对生态系统生物量和碳储量的影响^{*}

温远光^{1,2,3*}, 张祖峰¹, 周晓果^{1,3}, 朱宏光^{1,2}, 王 磊¹, 蔡道雄^{2,4}, 贾宏炎^{2,4}, 明安刚^{2,4}, 卢立华^{2,4}

(1. 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 广西南宁 530004; 2. 广西友谊关森林生态系统定位观测研究站, 广西凭祥 532600; 3. 广西科学院生态产业研究院, 广西南宁 530007; 4. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西凭祥 532600)

摘要: 阐明珍贵乡土树种与桉树混交对生态系统生物量和碳储量的影响是精准评估人工林碳源/汇性质和提升人工林质量的重要基础。本研究以 6 年生的桉树纯林(EP)、桉树×红锥混交林(MEC)、桉树×望天树混交林(MEP)为对象, 探讨珍贵乡土树种与桉树混交对生态系统生物量和碳储量的影响及作用机制。结果表明, EP、MEC、MEP 的生态系统生物量和碳储量分别是 135.78, 154.75, 155.24 t/hm² 和 197.89, 225.45, 227.37 t/hm²。方差分析表明, 珍贵乡土树种红锥和望天树与桉树混交显著提高了人工林生态系统的生物量和碳储量, 混交林生态系统生物量比纯林提高 13.97%—14.33%, 而碳储量比纯林提高 13.93%—14.89%。说明红锥和望天树与桉树混交属于促进(Facilitation)或竞争减弱(Competitive reduction)的种间相互作用关系, 种间竞争小于种内竞争, 资源的有效性和利用率提高, 因而促进林分生态系统生物量和碳储量的提高。红锥和望天树与桉树混交可以实现桉树木材生产与其他生态服务的平衡, 是一种较好的经营模式。

关键词: 珍贵乡土树种 桉树 混交林 生物量 碳储量

中图分类号: S718.5 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2020)02-0111-09

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20200421.005



微信扫一扫, 与作者在线交流(OSID)

0 引言

全球气候变化正引起国际社会的广泛关注^[1-2], 并成为全球生态学研究热点之一^[3-4]。森林是陆地生态系统的主体, 是生物圈中巨大的碳库, 具有显著的碳源(排放 CO₂)和碳汇(吸收 CO₂)作用^[5-6]。森林经营是一项缓解气候变化影响的关键措施^[6], 利用森

林的吸碳和储碳功能, 通过造林/再造林等活动, 吸收和固定大气中的 CO₂, 被国际社会公认是应对全球气候变化最为经济、有效的手段^[6-7]。近年来, 为满足对林产品和碳吸收日益增长的需求, 同时避免过度砍伐天然林, 人工林作为造林/再造林的一个主要组成部分正在全球迅速扩大^[8-10]。学术界普遍认为, 热带、温带和北方森林生态系统是碳汇, 然而对于亚热带森林生态系统究竟是碳源还是碳汇一直存在争

^{*} 国家自然科学基金项目(31860171, 31460121), 广西重点研发计划项目(2018AB40007), 广西自然科学基金项目(2017GXNSFAA198114), 广西高等学校重大科研项目(201201ZD001), 广西森林生态与保育重点实验室开放课题(QZKFKT2017-01)和广西林业厅科研项目(桂林科学[2009]第八号)资助。

【作者简介】

温远光(1957—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事森林生态和森林培育学研究, E-mail: wenyg@263.net。

【* * 通信作者】

【引用本文】

温远光, 张祖峰, 周晓果, 等. 珍贵乡土树种与桉树混交对生态系统生物量和碳储量的影响[J]. 广西科学, 2020, 27(2): 111-119.

WEN Y G, ZHANG Z F, ZHOU X G, et al. Effects of Mixing Precious Indigenous Tree Species and *Eucalyptus* on Ecosystem Biomass and Carbon Stocks [J]. Guangxi Sciences, 2020, 27(2): 111-119.

论^[11-13]。亚洲东部亚热带是我国人工林栽培的主要区域,明确其碳源/汇性质对科学发展人工林至关重要。

桉树是世界人工林的重要组成部分,在木材资源供给和应对气候变化等方面扮演着越来越重要的角色^[14]。然而,越来越多的研究发现,桉树高代次纯林连栽存在生态系统生物量、碳储量显著下降的现象,隐藏着巨大的生态环境风险^[15-16]。近年来,虽有多树种人工林相对于单一树种人工林具有更高生物量和碳储量的报道^[17-18],而且发展混交林也成为我国各级政府推进林业高质量发展的重要措施之一^[19],然而也有一些例子表明,在含有固氮树种的混交林中,林分生物量(蓄积量)下降或变化不显著^[20],对珍贵乡土树种与桉树混交对生态系统生物量和碳储量的影响研究极少^[21],尤其是还未明确混交措施驱动生物量和碳储量提升的机制。本研究以桉树纯林、桉树×红锥混交林、桉树×望天树混交林为对象,深入探讨珍贵乡土树种与桉树混交对生态系统生物量和碳储量的影响,进而明确人工林特别是混交林的碳源汇性质,初步阐明混交林生物量和碳储量提升的机制,为混交树种选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域自然环境概况

研究区域位于广西凭祥,属亚热带季风气候区,年均气温 20.5—21.7℃,极端高温 40.3℃,极端低温 -1.5℃,年 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温为 6 000—7 600℃,年均降水量 1 200—1 500 mm,年蒸发量 1 261—1 388 mm,相对湿度 80%—84%。地带性土壤为砖红壤,土层深厚。地带性森林植被为热带雨林、季雨林,但目前已被各种人工林所取代。

1.2 样地设置与群落调查

本研究采取“双龙出海+珍贵乡土树种”混交配置技术,选择的珍贵乡土树种有红锥(*Castanopsis hystrix*)、望天树(*Parashorea chinensis*)。采取“双桉一珍”双带结构,桉树双行种植于窄行,株行距为 2 m×2 m,珍贵乡土树种单行种植于宽行,株行距为 10 m×2 m,桉树的密度为 1 333 株/hm²,珍贵乡土树种的密度为 334 株/hm²,桉树与珍贵乡土树种的比例为 8:2,为种间间距大、株间间距小的配置方式。各样地的土壤均为砖红壤,平均海拔为 244—256 m,各林分均无显著差异。

2018 年 1 月,在 2012 年营造的桉树纯林(*Euca-*

lyptus plantation, EP)、桉树×红锥混交林(mixed *Eucalyptus* and *Castanopsis hystrix* plantation, MEC)、桉树×望天树混交林(mixed *Eucalyptus* and *Parashorea chinensis* plantation, MEP)中,选择代表性地段,设置调查样地,每种林分类型各设置 18 个面积为 600 m²(30 m×20 m)的固定样方。将每个 600 m²样地进一步细分成 6 个 10 m×10 m 的中样方,对胸径 > 2 cm 的林木作每木调查,记录种名,采用胸径尺测量胸径,用测高器测定树高。在每个 600 m²样地随机设置 3 个 5 m×5 m 的小样方,用于调查灌木层植物特征,记录植物种名、个体数、高度和覆盖度等。同时,在每个 600 m²样地随机设置 3 个 2 m×2 m 的小样方,记录草本植物的种名、个体数、高度和覆盖度等。

1.3 群落生物量调查和估算

在群落调查的基础上,按照笔者早期建立的林木器官生物量回归方程(表 1)计算林木的生物量。采用样方法和收获法测定林下灌木层、草本层和凋落物层的生物量,称鲜重后每个组分取鲜样 500 g,带回室内,以 85℃烘干至恒重,进而计算生物量干重。同时,称取植物样品 300 g,带回室内分析,用于测定植物含碳率。

1.4 含碳率的测定及碳储量估算

1.4.1 植物及土壤含碳率的测定

将烘干后的植物样品粉碎后过 0.25 mm 孔径筛,制成待测样品。将自然风干的土壤样品研磨后过 0.25 mm 孔径筛,制成待测样品。采用重铬酸钾氧化-外加热法^[22]测定乔木层、灌木层、草本层、凋落物层植物样品及土壤样品的含碳率,重复 3 次。采用环刀法测定土壤容重(g/cm³)。

1.4.2 碳储量估算

乔木层各组分碳储量(t/hm²)=乔木层各组分单位面积生物量(t/hm²)×乔木层各组分含碳率(%)。 (1)

灌木层地上(地下)部分碳储量(t/hm²)=灌木层地上(地下)单位面积生物量(t/hm²)×灌木层地上(地下)部分含碳率(%)。 (2)

草本层地上(地下)部分碳储量(t/hm²)=草本层地上(地下)单位面积生物量(t/hm²)×草本层地上(地下)部分含碳率(%)。 (3)

林地凋落物层碳储量(t/hm²)=凋落物层生物量(现存量)(t/hm²)×凋落物层含碳率(%)。 (4)

表1 桉树和珍贵乡土树种林木器官生物量回归方程

Table 1 Regression equations of the organ biomass in *Eucalyptus* precious indigenous tree species

树种 Species	组分 Component	异速生长模型 Allometric equations	r	P
桉树 <i>Eucalyptus</i>	干 Stem	$W=0.031 \times (D^2 H)^{0.930}$	0.933	0.000
	皮 Bark	$W=0.005 \times (D^2 H)^{0.907}$	0.964	0.000
	枝 Branch	$W=0.001 \times (D^2 H)^{1.080}$	0.905	0.000
	叶 Leaf	$W=8.128 \times 10^{-5} \times (D^2 H)^{1.196}$	0.918	<0.001
	根 Root	$W=0.004 \times (D^2 H)^{1.030}$	0.949	<0.001
红锥 <i>C. hystrix</i>	干 Stem	$W=0.021 \times (D^2 H)^{0.956}$	0.939	<0.000
	皮 Bark	$W=0.007 \times (D^2 H)^{0.899}$	0.928	<0.000
	枝 Branch	$W=0.037 \times (D^2 H)^{0.752}$	0.908	<0.000
	叶 Leaf	$W=0.037 \times (D^2 H)^{0.583}$	0.925	<0.000
	根 Root	$W=0.003 \times (D^2 H)^{1.048}$	0.908	<0.000
望天树 <i>P. chinensis</i>	干 Stem	$W=0.048 \times (D^2 H)^{0.888}$	0.921	<0.000
	皮 Bark	$W=0.001 \times (D^2 H)^{0.924}$	0.931	<0.000
	枝 Branch	$W=0.031 \times (D^2 H)^{0.679}$	0.928	<0.000
	叶 Leaf	$W=0.028 \times (D^2 H)^{0.698}$	0.825	0.005
	根 Root	$W=0.039 \times (D^2 H)^{0.808}$	0.819	0.006

注:W—生物量,D—胸径,H—树高;r—相关系数,P—显著性

Note:W, biomass; D, diameter at breast height; H, tree height; r, correlation coefficient; P, significance

土壤碳储量按下式计算:

$$S_i = 10^{-2} \times SBD_i \times C_i \times H_i, \quad (5)$$

式中: S_i 为土壤某一层单位面积的土壤碳储量,单位 t/hm^2 ; SBD_i 为第 i 层土壤的容重,单位 g/cm^3 ; C_i 为第 i 层土壤的含碳率,%; H_i 为第 i 层土壤的土层厚度,单位 cm 。

1.5 数据统计分析

应用 SPSS 19.0 对实验数据进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同林分不同层次的生物量、含碳率、碳储量的差异性进行分析,采用 LSD 法进行多重比较。采用独立样本 T 检验对纯林和混交林林分生物量、含碳率、碳储量的差异

性进行检验。所有分析显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。数据绘图由 Sigmaplot 10.0 软件辅助完成。

2 结果与分析

2.1 林分生长

由表 2 可知,不同林分桉树密度无显著差异,珍贵乡土树种间的密度也无显著差异。不同林分桉树的 3 个生长指标胸径、树高和胸高断面积存在显著差异,其中 MEP 的 3 个生长指标均显著高于 EP,与 MEC 差异不显著;MEC 与 EP 的差异也不显著。珍贵乡土树种红锥的胸径、树高和胸高断面积均极显著高于望天树(表 2)。

表 2 不同林分的密度和生长指标(平均值±标准差)

Table 2 Density and growth index of different stands (mean±SD)

林分 Stand	树种 Species	密度 Density (individuals/hm ²)	胸径 DBH (cm)	树高 Height (m)	胸高断面积 Basal area (m ² /hm ²)
EP	桉树 <i>Eucalyptus</i>	1 320±74 ^a	11.81±1.18 ^a	17.10±0.97 ^a	14.60±2.96 ^a
MEC	桉树 <i>Eucalyptus</i>	1 309±75 ^a	12.20±0.86 ^{ab}	17.42±0.70 ^{ab}	15.35±2.11 ^{ab}
	红锥 <i>C. hystrix</i>	321±15 ^{ns}	7.12±0.97 ^{**}	9.25±1.09 ^{**}	1.69±0.44 ^{**}
MEP	桉树 <i>Eucalyptus</i>	1 306±73 ^a	12.76±0.87 ^b	17.88±0.72 ^b	16.81±2.72 ^b
	望天树 <i>P. chinensis</i>	315±18	3.78±1.04	4.87±1.42	0.50±0.27

注:不同小写字母表示不同林分同一指标差异显著($P < 0.05, n = 18$),ns、* * 分别表示珍贵乡土树种间差异不显著($P > 0.05, n = 18$)、差异极显著($P < 0.01, n = 18$)

Note:Different lowercase letters indicate significant difference in the same index of different stands ($P < 0.05, n = 18$),ns and * * indicate non-significant ($P > 0.05, n = 18$) and extremely significant ($P < 0.01, n = 18$), respectively

2.2 植物和土壤的含碳率

由表3和表4可以看出,不同林分不同树种(层次)同一组分含碳率均无显著差异。和植物含碳率不同,不同林分不同层次的土壤含碳率存在显著差异(图1)。在土壤0—20 cm、20—40 cm和40—60 cm

表3 不同林分不同树种各组分含碳率(平均值±标准差,%)

林分 Stand	树种 Species	含碳率 Carbon content				
		干 Stem	皮 Bark	枝 Branch	叶 Leaf	根 Root
EP	桉树 <i>Eucalyptus</i>	47.71±1.54	43.48±1.37	44.68±1.67	48.94±1.61	44.83±2.01
MEC	桉树 <i>Eucalyptus</i>	47.96±1.55	43.92±1.60	44.26±1.90	48.45±1.76	44.81±1.72
	红锥 <i>C. hystrix</i>	47.12±2.44	42.90±1.19	44.71±1.07	48.26±1.21	45.25±1.39
MEP	桉树 <i>Eucalyptus</i>	47.64±1.59	43.29±1.72	44.45±1.83	47.73±2.49	44.36±1.21
	望天树 <i>P. chinensis</i>	47.80±2.46	43.41±1.47	44.80±0.96	49.10±0.77	44.58±1.21

注:不同林分不同树种同一组分含碳率均无显著差异($P>0.05, n=18$)

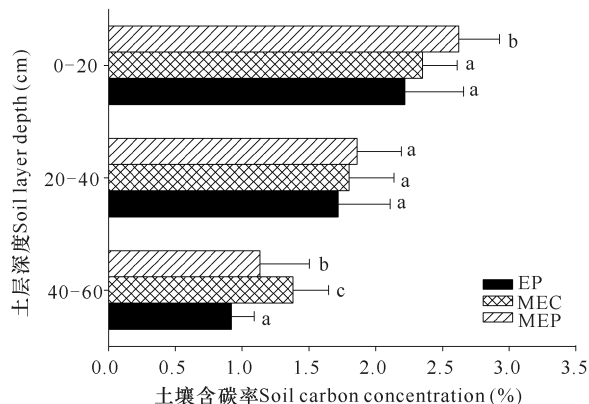
Note: There were no significant differences in carbon content of the same component of different tree species in different stands ($P>0.05, n=18$)

表4 不同林分林下植被和凋落物层的含碳率(平均值±标准差,%)

林分 Stand	灌木层 Shrub layer		草本层 Herb layer		凋落物层 Litter layer
	地上部分 Above-ground	地下部分 Below-ground	地上部分 Above-ground	地下部分 Below-ground	
EP	50.04±1.02	45.87±0.76	51.30±0.65	45.83±0.66	51.38±0.80
MEC	50.35±1.12	46.08±0.83	51.30±0.65	46.10±0.60	51.72±0.59
MEP	50.24±0.78	46.21±0.88	51.46±0.75	46.19±0.86	51.50±0.83

注:不同林分不同树种同一组分含碳率均无显著差异($P>0.05, n=18$)

Note: There were no significant differences in carbon content of the same component of different tree species in different stands ($P>0.05, n=18$)



不同小写字母表示不同林分同一土层深度含碳率差异显著($P<0.05, n=18$)

Different lowercase letters indicate significant difference in soil carbon concentration of the same soil depth layer of different stands ($P<0.05, n=18$)

图1 不同林分土壤不同层次的含碳率

Fig. 1 Soil organic carbon concentration in different layers of different stands

2.3 生态系统生物量及其分配

由表5可以看出,不同林分中桉树的生物量变化

层次中,均以桉树纯林的土壤含碳率最低。方差分析表明,MEP 0—20 cm 土壤层的含碳率显著高于 MEC 和 EP,MEC 和 EP 差异不显著;20—40 cm 土层均无显著差异;而 40—60 cm 土层则表现为 MEC 显著高于 MEP 和 EP,MEP 显著高于 EP(图1)。

为 102.93—118.20 t/hm²,方差分析结果表明,MEP 桉树生物量显著高于 EP,MEP 与 MEC、MEC 与 EP 两两间差异不显著。珍贵乡土树种红锥和望天树的生物量分别是 11.63 t/hm² 和 2.68 t/hm²,红锥生物量显著高于望天树。MEP 和 MEC 乔木层生物量显著高于 EP($P<0.05$),MEP 与 MEC 差异不显著;MEC 与 EP 差异不显著($P>0.05$)(表5)。

3 种林分灌木层的生物量变化为 12.00—12.92 t/hm²,其中地上部分生物量变化为 8.51—9.70 t/hm²,地下部分生物量变化为 3.22—3.51 t/hm²。方差分析表明,3 种林分灌木层及其地上、地下部分生物量均无显著差异($P>0.05$)(表5)。

3 种林分草本层的生物量与灌木层相近,变化为 12.43—13.43 t/hm²,其中地上部分变化为 10.17—11.24 t/hm²,地下部分变化为 1.97—2.75 t/hm²。方差分析表明,MEP 草本层生物量显著高于 MEC ($P<0.05$),与 EP 差异不显著($P>0.05$);MEP 草本层地上部分生物量显著高于 EP($P<0.05$),与

MEC 差异不显著($P>0.05$)(表 5)。

3 种林分凋落物层的现存量变化为 7.46—8.93 t/hm²,方差分析表明,MEP 的枯落物现存量显著高于 EP 和 MEC($P<0.05$),后两者之间差异不显著($P>0.05$)(表 5)。

3 种林分生态系统总生物量变化为 135.78—155.24 t/hm²,以 MEP 最高,其次是 MEC,EP 最低。方差分析表明,两种混交林生态系统的生物量均显著高于 EP,其中 MEC 比 EP 提高 13.97%,MEP 比 EP 提高 14.33%(表 5)。

表 5 不同林分生态系统各组分生物量(平均值±标准差,t/hm²)

Table 5 Biomass of each component of different stand ecosystems (mean±SD,t/hm²)

林分 Stand	乔木层 Tree layer		灌木层 Shrub layer		草本层 Herb layer		凋落物层 Litter layer	总生物量 Total biomass
	桉树 <i>Eucalyptus</i>	珍贵树种 Precious species	地上部分 Above-ground	地下部分 Below-ground	地上部分 Above-ground	地下部分 Below-ground		
EP	102.93±25.20 ^a	—	8.56±4.08 ^a	3.51±0.84 ^a	10.17±1.36 ^a	2.75±1.38 ^b	7.86±0.51 ^a	135.78±25.64 ^a
MEC	110.31±20.08 ^{ab}	11.63±3.26 ^{**}	9.70±5.16 ^a	3.22±0.58 ^a	10.47±1.36 ^{ab}	1.97±1.15 ^a	7.46±0.80 ^a	154.75±21.45 ^b
MEP	118.20±22.82 ^b	2.68±1.74	8.51±4.74 ^a	3.49±0.83 ^a	11.24±1.01 ^b	2.19±0.36 ^{ab}	8.93±0.45 ^b	155.24±24.04 ^b

注:不同小写字母表示不同林分同一层次生物量差异显著($P<0.05,n=18$),**表示珍贵树种生物量间差异极显著($P<0.01,n=18$)

Note:Different lowercase letters indicate significant differences in biomass at the same level in different stands ($P<0.05,n=18$),** indicates significant extreme differences in biomass between precious tree species ($P<0.01,n=18$)

3 种林分生物量在生态系统中的分配如图 2 所示。从图 2 可以看出,乔木层生物量占生态系统总生物量的 75.02%—78.48%;灌木层和草本层生物量相当,分别占 7.73%—9.12%和 8.23%—9.88%;凋落物层的现存量所占比例最小,占 4.92%—5.98%。方差分析表明,MEC 乔木层的生物量比例显著高于 EP($P<0.05$),而 EP 草本层和凋落物层的生物量比例显著高于 MEC($P<0.05$);其余组分之间均无显著差异($P>0.05$)。

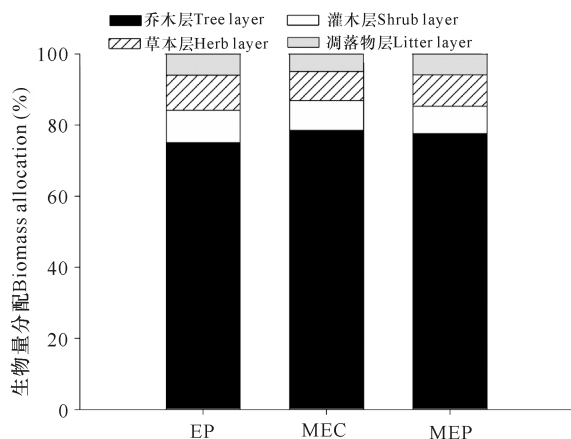


图 2 不同林分生态系统生物量分配

Fig. 2 Biomass allocation in different stand ecosystems

2.4 生态系统碳储量及其分配

由表 6 可以看出,3 种林分桉树的碳储量为 48.09—54.90 t/hm²,以 MEP 最高,其次是 MEC,EP 最低。方差分析表明,3 种林分之间无显著差异。3 种林分灌木层的碳储量为 5.87—6.36 t/hm²,差异不显著,但地上部分碳储量(4.26—4.87 t/hm²)显著高于地下部分(1.48—1.61 t/hm²)(表 6)。草本层碳储量为 6.27—6.80 t/hm²,其中地上部分碳储量为 5.21—5.79 t/hm²,地下部分仅为 0.91—1.26 t/hm²。方差分析结果表明,MEP 草本层碳储量显著高于 MEC,与 EP 差异不显著,EP 与 MEC 的差异也不显著;MEP 草本层的地上部分碳储量显著高于 EP ($P<0.05$),EP 草本层地下部分碳储量显著高于 MEC,其余差异不显著(表 6)。凋落物层碳储量为 3.86—4.60 t/hm²。MEP 凋落物层的碳储量显著高于 EP 和 MEC($P<0.05$),后两者之间差异不显著($P>0.05$)。两种混交林生态系统总生物量碳储量非常接近,MEC 为 73.51 t/hm²,MEP 为 73.41 t/hm²,EP 最小,为 64.50 t/hm²。方差分析表明,混交林生态系统的总生物量碳储量显著高于桉树纯林,而两种混交林之间差异不显著(表 6)。

表 6 不同林分生态系统各组分碳储量(平均值±标准差, t/hm²)Table 6 Carbon stocks of each component in different stand ecosystems (mean±SD, t/hm²)

林分 Stand	乔木层 Tree layer		灌木层 Shrub layer		草木层 Herb layer		凋落物层 Litter layer	总生物量 碳储量 of total biomass	土壤层 Soil layer	生态系统 碳储量 Carbon stock of ecosystem
	桉树 <i>Eucalyptus</i>	珍贵树种 Precious species	地上部分 Above- ground	地下部分 Below- ground	地上部分 Above- ground	地下部分 Below- ground				
EP	48.09± 11.84 ^a	—	4.28± 2.05 ^a	1.61± 0.38 ^a	5.21± 0.70 ^a	1.26± 0.64 ^b	4.04± 0.26 ^a	64.50± 11.94 ^a	133.39± 19.61 ^a	197.89± 23.10 ^a
MEC	51.64± 9.37 ^a	5.38± 1.49 ^{**}	4.87± 2.56 ^a	1.48± 0.27 ^a	5.37± 0.69 ^{ab}	0.91± 0.53 ^a	3.86± 0.42 ^a	73.51± 10.22 ^b	151.93± 16.10 ^b	225.45± 20.44 ^b
MEP	54.90± 10.32 ^a	1.24± 0.80	4.26± 2.36 ^a	1.61± 0.37 ^a	5.79± 0.55 ^b	1.01± 0.16 ^{ab}	4.60± 0.26 ^b	73.41± 10.96 ^b	153.96± 20.61 ^b	227.37± 26.07 ^b

注:不同小写字母表示不同林分同一层次碳储量差异显著($P < 0.05, n = 18$), **表示珍贵树种碳储量间差异极显著($P < 0.01, n = 18$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in carbon stocks at the same level in different stands ($P < 0.05, n = 18$), ** indicates significant extreme differences in carbon stocks between precious tree species ($P < 0.01, n = 18$)

3种林分0—60 cm土壤层的碳储量为133.39—153.96 t/hm²。方差分析表明,混交林显著高于桉树纯林,而混交林之间差异不显著(表6)。

从生态系统总碳储量分析,MEP最高,为227.37 t/hm²;其次是MEC,为225.45 t/hm²;EP最小,为197.89 t/hm²。与土壤层的碳储量变化相似,生态系统总碳储量也是混交林显著高于桉树纯林,而混交林之间差异不显著(表6)。

由图3可知,不同林分生态系统碳储量均以土壤的碳储量比例最高,为67.35%—67.65%;其次为乔木层,为24.23%—25.26%;林下植被和凋落物层的碳储量所占比例较小,分别为5.63%—6.35%和1.72%—2.07%。方差分析表明,除MEC凋落物层的碳储量显著低于MEP和EP外,其余各组分两两之间均无显著差异。

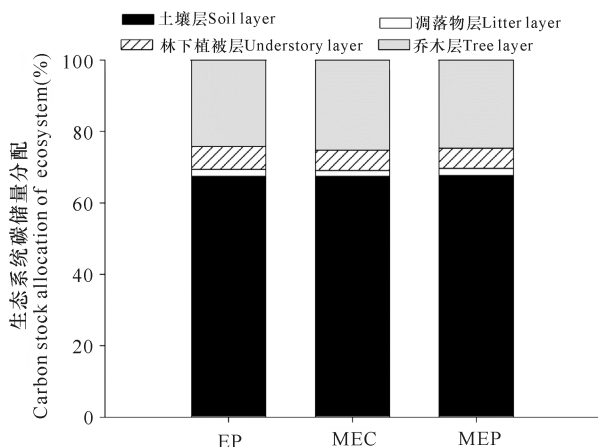


图3 不同林分生态系统碳储量分配

Fig. 3 Allocation of carbon stock in different stand ecosystems

3 讨论

3.1 珍贵乡土树种与桉树混交对生态系统生物量的影响

森林生物量及其分配受到诸多因素的影响,如区域的气候、土壤、林分类型、林分密度和林分年龄等等。在气候、土壤和林分年龄相似或相近的条件下,树种和林分类型起关键作用。Forrester等^[17]对蓝桉(*Eucalyptus globulus*)、黑荆(*Acacia mearnsii*)纯林及混交林的地上部分生物量研究发现,造林后3—4年,混交林的林分蓄积量和地上部分生物量高于纯林。Nouvellon等^[23]在巴西研究6 a生巨桉(*Eucalyptus grandis*)和马占相思(*Acacia mangium*)纯林及其混交林的生物量,结果表明,马占相思纯林的地上生物量最低(105 t/hm²),巨桉和马占相思混交林(混交比例为5:5)居中(122 t/hm²),巨桉纯林最高(139 t/hm²)。在本研究中,两种混交林生态系统的生物量均显著高于桉树纯林,其中,MEC比EP提高13.97%,MEP比EP提高14.33%,支持混交林比纯林有更高的林分生物量的结论。

3.2 珍贵乡土树种与桉树混交对生态系统碳储量的影响

森林生物量与碳储量密切相关,混交林能增加林分生物量,因而也能提高森林生态系统的碳储量。目前,学者们对马尾松(*Pinus massoniana*)纯林与混交林的碳储量开展了大量的研究,基本结论都是混交林的碳储量高于纯林。罗达等^[24]对6 a生马尾松、格木(*Erythrophleum fordii*)纯林及两者混交林碳储量研究指出,混交林的总碳储量(137.75 t/hm²)高于马尾松纯林(131.10 t/hm²)和格木纯林(134.07 t/

hm²)。赖国桢等^[25]对马尾松纯林和马尾松×木荷(*Schima superba*)混交林碳储量研究发现,混交林生态系统的总碳储量显著高于纯林。张国庆^[26]的研究结论也相同,马尾松混交林碳储量显著高于纯林。本研究表明,MEC和MEP生态系统的碳储量显著高于EP,与前人研究结果一致。

3.3 珍贵乡土树种与桉树混交提高生态系统生物量和碳储量的可能机制

Forrester等^[18]认为,混交林树种间的相互作用过程和机理具有3种作用方式,即:竞争(Competition)、竞争减弱(Competitive reduction)和促进(Facilitation),指出当种间竞争大于种内竞争时混交林生物量和生产力小于纯林,当种间竞争小于种内竞争时混交林的生物量和生产力大于纯林,而种间和种内竞争相同时混交林和纯林的生物量和生产力没有差别。在本研究中,研究林分所处的气候、土壤条件相同,林分的经营管理措施相同,因此林分生物量和碳储量的差异主要由不同林分的树种差异所致。本研究表明,MEC和MEP的胸径、树高和胸高断面积均显著高于EP。混交林中桉树的生物量和碳储量也显著高于桉树纯林。这些结果说明,珍贵乡土树种红锥、望天树与桉树混交的种间竞争小于种内竞争,有利于林分生态系统生物量和碳储量的提高。除此之外,混交林生态系统的总生物量、总生物量碳储量、土壤碳储量和生态系统总碳储量均显著高于桉树纯林。纵观国内外相关文献,我们认为珍贵乡土树种红锥、望天树与桉树混交增产的原因主要如下:第一,红锥、望天树与桉树混交能够更充分地利用地上(光照)和地下(水分、养分)空间及资源^[17-18],红锥、望天树为浅根性树种,桉树为深根性树种,前者早期生长较耐阴,后者为强阳性树种,喜光性强,混交树种间的互补作用增加生态位的分化,提高空间和资源的利用效率;第二,红锥、望天树与桉树混交提高和改善了凋落物的数量和质量,提高凋落物分解速率,增加养分的归还量,提高养分的有效性和利用效率^[27-28];第三,红锥、望天树与桉树混交改善土壤微生物群落组成结构和功能,提高土壤有机碳含量和土壤酶活性^[28];第四,红锥、望天树与桉树混交,增加群落的生物多样性,降低病虫害风险^[18];第五,混交林生态系统中,植物-土壤-微生物的协同作用显著提高林分的生物量和碳储量^[29]。此外,本研究采取“双龙出海+珍贵乡土树种”混交配置技术,并采取桉树和珍贵乡土树种以8:2的混交比例,既有效保障桉树的木材生产,

同时也提高了林分生态系统其他服务功能及稳定性,因而,能显著提高混交林的生物量和碳储量。

4 结论

本研究表明,珍贵乡土树种红锥和望天树与桉树混交显著提高人工林生态系统的生物量和碳储量,说明红锥和望天树与桉树混交属于促进或竞争减弱的种间相互作用关系,种间竞争小于种内竞争,资源的有效性及其利用率提高,因而促进林分生态系统生物量和碳储量的提高。珍贵乡土树种与桉树混交可以实现桉树木材生产与其他生态服务的权衡,该经营方式值得推广。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for policymakers of climate change 2007: The physical science basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 刘世荣, 郭泉水, 史作民. 气候变化对中国森林的影响及其适应策略[M]//《生物多样性与气候变化》编委会. 生物多样性与气候变化. 北京: 中国环境科学出版社, 2011: 50-54.
- [3] EVANS S E, WALLENSTEIN M D. Climate change alters ecological strategies of soil bacteria [J]. Ecology Letters, 2014, 17(2): 155-164.
- [4] JANSSON J K, HOFMOCKEL K S. Soil microbiomes and climate change [J]. Nature Reviews Microbiology, 2020, 18: 35-46.
- [5] FELIPE B, VALERIE L, ROBERT J, 等. 气候变化挑战下的森林生态系统经营管理[M]. 王小平, 杨晓军, 刘晶岚, 等, 译. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [6] 刘世荣, 温远光, 蔡道雄, 等. 气候变化对森林的影响与多尺度适应性管理研究进展[J]. 广西科学, 2014, 21(5): 419-435.
- [7] 刘世荣. 气候变化对森林影响与适应性管理[M]//郭建国, 安树青, 冷欣. 现代生态学讲座(VI)——全球气候变化与生态格局和过程. 北京: 高等教育出版社, 2013: 1-24.
- [8] CARLE J, HOLMGREN P. Wood from planted forests [J]. Forest Products Journal, 2008, 58(12): 6-18.
- [9] PAN Y, BIRDSEY R A, FANG J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. Science, 2011, 333: 988-993.
- [10] ZHANG X, LIU S, HUANG Y, et al. Tree species mixture inhibits soil organic carbon mineralization accompanied by decreased r-selected bacteria [J]. Plant

- and Soil, 2018, 431(1/2): 203-216.
- [11] WOODWELL G M. The carbon dioxide question [J]. Scientific American, 1978, 238(1): 34-43.
- [12] CIAIS P, CRAMER W, JARVIS P. Landuse, land-use change and forestry: Summary for policymakers [M]. Cambridge: Cambridge University, 2001: 23-51.
- [13] ZHOU G, LIU S, LI Z, et al. Old-growth forests can accumulate carbon in soils [J]. Science, 2006, 314(5804): 1417-1417.
- [14] 温远光, 周晓果, 朱宏光, 等. 桉树生态营林的理论探索与实践[J]. 广西科学, 2019, 26(2): 159-175.
- [15] 李潮婷, 周晓果, 温远光, 等. 桉树高代次连栽对林下植物、土壤肥力和酶活性的影响[J]. 广西科学, 2019, 26(2): 176-187.
- [16] ZHOU X G, ZHU H G, WEN Y G, et al. Intensive management and declines in soil nutrients lead to serious exotic plant invasion in *Eucalyptus* plantations under successive short-rotation regimes [J]. Land Degradation & Development, 2019, 31(3): 297-310. DOI: 10.1002/ldr. 3449.
- [17] FORRESTER D I, BAUHUS J, COWIE A L, et al. Mixed - species plantations of *Eucalyptus* with nitrogen-fixing trees: A review [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 233(2/3): 211-230.
- [18] FORRESTER D I. Growth responses to thinning, pruning and fertiliser application in *Eucalyptus* plantations: A review of their production ecology and interactions [J]. Forest Ecology and Management, 2013, 310: 336-347.
- [19] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 1-10.
- [20] FORRESTER D I, BAUHUS J, KHANNA P K. Growth dynamics in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 193(1/2): 81-95.
- [21] 温远光, 周晓果, 朱宏光. 桉树生态营林理论、方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] NOUVELLON Y, LACLAU J P, EPRON D, et al. Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil [J]. Tree Physiology, 2012, 32(6): 680-695.
- [24] 罗达, 史作民, 王卫霞, 等. 南亚热带格木、马尾松幼龄人工纯林及其混交林生态系统碳氮储量[J]. 生态学报, 2015, 35(18): 6051-6059.
- [25] 赖国桢, 曹梦, 潘萍, 等. 马尾松木荷不同比例混交林植被碳密度特征[J]. 中南林业科技大学学报: 自然科学版, 2018, 38(2): 108-113.
- [26] 张国庆. 不同经营措施对马尾松人工林生态系统碳储量的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2008.
- [27] HUANG X M, LIU S R, WANG H, et al. Changes of soil microbial biomass carbon and community composition through mixing nitrogen-fixing species with *Eucalyptus urophylla* in subtropical China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 73: 42-48.
- [28] HUANG X M, LIU S R, YOU Y M, et al. Microbial community and associated enzymes activity influence soil carbon chemical composition in *Eucalyptus urophylla* plantation with mixing N₂-fixing species in subtropical China [J]. Plant and Soil, 2017, 414: 199-212.
- [29] REVILLINI D, GEHRING C A, JOHNSON N C. The role of locally adapted mycorrhizas and rhizobacteria in plant-soil feedback systems [J]. Functional Ecology, 2016, 30(7): 1086-1098.

Effects of Mixing Precious Indigenous Tree Species and *Eucalyptus* on Ecosystem Biomass and Carbon Stocks

WEN Yuanguang^{1,2,3}, ZHANG Zufeng¹, ZHOU Xiaoguo^{1,3}, ZHU Hongguang^{1,2}, WANG Lei¹, CAI Daoxiong^{2,4}, JIA Hongyan^{2,4}, MING Angang^{2,4}, LU Lihua^{2,4}

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Guangxi Youyiguang Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi, 532600, China; 3. Institute of Eco-

logical Industry, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 4. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi, 532600, China)

Abstract: To elucidate the effects of precious indigenous tree species mixed with *Eucalyptus* on ecosystem biomass and carbon stocks is an important foundation for accurately evaluating the property of carbon source/sink and improving the quality of plantation. In this study, 6-year-old pure *Eucalyptus* plantations (EP), mixed *Eucalyptus* and *Castanopsis hystrix* plantations (MEC), and mixed *Eucalyptus* and *Parashorea chinensis* plantations (MEP) were selected as the subjects to investigate the effects and mechanisms of mixture of precious tree species with *Eucalyptus* on ecosystem biomass and carbon stocks. The results showed that the ecosystem biomass and carbon stocks of EP, MEC and MEP were 135.78, 154.75, 155.24 t/hm² and 197.89, 225.45, 227.37 t/hm², respectively. Variance analysis showed that mixture of precious indigenous tree species with *Eucalyptus* could significantly improve the biomass and carbon stocks of the artificial forest ecosystem. The biomass of mixed forest ecosystems increased by 13.97%—14.33% over pure forests, while the carbon stocks increased by 13.93%—14.89% over pure forests. These results suggested the mixture of *C. hystrix* and *P. chinensis* with *Eucalyptus* were inter-species interaction relationship of facilitation or competitive reduction. In the mixture plantations, inter-species competition was less than intra-species competition, and the availability and utilization of resources were improved, thus promoting the improvement of biomass and carbon stocks of stand ecosystem. Our results suggest that mixing *C. hystrix* or *P. chinensis* with *Eucalyptus* should be a better management model for the balance between eucalypts wood production and other ecological services.

Key words: precious indigenous tree species, *Eucalyptus*, mixed plantations, biomass, carbon stock

责任编辑:米慧芝



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>