

◆生态环境◆

生态营林桉树人工林林木生长动态分析*

许峻模¹, 温远光^{1,2}, 孙冬婧¹, 陈秋海¹, 邓少虹¹, 黄勇杰¹, 农志^{2,3}, 伍俊廷^{2,3}, 黎祖贺³,
周晓果^{1,2,*}

(1. 广西科学院生态环境研究所, 广西南宁 530007; 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. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西凭祥 532600)

摘要:为阐明轮伐期内不同类型桉树(*Eucalyptus* spp.)人工混交林的生长动态特征及变化规律, 选择于2012年在中国林业科学研究院热带林业实验中心青山实验场采用生态营林制度营造的桉树×降香黄檀混交林(*Eucalyptus* × *Dalbergia odorifera*, MED)、桉树×望天树混交林(*Eucalyptus* × *Parashorea chinensis*, MEP)、桉树×红锥混交林(*Eucalyptus* × *Castanopsis hystrix*, MEC)和桉树纯林(PEU)为研究对象, 设置固定监测样地, 基于桉树第一轮伐期内的3次林分调查(2014、2016、2018年), 分析不同混交林桉树和珍贵树种的胸径、树高、单株材积和林分蓄积量动态变化特征。结果表明, 监测期内, 4种林分类型林木胸径、树高、单株材积和林分蓄积量均随林龄显著增加; 混交林中降香黄檀、红锥及望天树均可显著促进桉树胸径、树高、单株材积及林分蓄积量的生长, 促进作用大小表现为MED>MEC>MEP; 不同混交类型中珍贵树种的胸径、树高、单株材积及林分蓄积量均表现为MEC>MEP>MED, 林分总蓄积量表现为MED(212.0 m³/hm²)>MEC(203.7 m³/hm²)>MEP(184.9 m³/hm²)>PEU(141.1 m³/hm²); 4种类型林分中桉树的胸径、树高、单株材积和林分蓄积量年平均生长量总体表现为MED>MEC>MEP>PEU, 珍贵树种则表现为MEC>MEP>MED。研究表明, 混交可以明显促进桉树的生长, 3种混交林分中桉树的胸径、树高、单株材积及林分蓄积量生长均显著高于桉树纯林, 其中MED林分中桉树的生长更具优势, 珍贵树种的生长则以红锥最优, 望天树次之, 降香黄檀最低。3种混交林均可作为今后桉树混交林经营的参考模式。

关键词:桉树; 珍贵树种; 混交类型; 林分生长; 动态变化

中图分类号: S718.5 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2023)03-0494-10

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20230710.008

收稿日期: 2023-05-05

修回日期: 2023-06-09

* 国家自然科学基金项目(32160358, 31860171)和广西自然科学基金项目(2023GXNSFBA026328, 2023GXNSFAA026415)资助。

【第一作者简介】

许峻模(1993-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事森林培育研究, E-mail: 735129328@qq.com。

【**通信作者】

周晓果(1980-), 女, 博士, 研究员, 主要从事森林生态学研究, E-mail: xgzhou2014@126.com。

【引用本文】

许峻模, 温远光, 孙冬婧, 等. 生态营林桉树人工林林木生长动态分析[J]. 广西科学, 2023, 30(3): 494-503.

XU J M, WEN Y G, SUN D J, et al. Dynamic Analysis of Tree Growth in Ecological Management in *Eucalyptus* Plantation [J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(3): 494-503.

随着全球天然林资源的日益减少,人工林在缓解木材供需矛盾、增加林业收入、保护自然环境等方面扮演着愈加重要的角色^[1]。第九次全国森林资源清查统计数据(未包括中国台湾和香港、澳门特别行政区的数据)显示:广西人工林面积 733.53 万公顷,约占全国森林面积(8 003.10 万公顷)的 1/10,是全国主要的速生丰产林生产基地。全区木材产量超过 3 900 万立方米,桉树以约占全国 5% 的林地面积生产出高于全国 50% 的木材,为保障国家木材安全作出重要贡献(国家林业和草原科学数据共享服务平台)。桉树(*Eucalyptus* spp.)具有生长迅速、适应性强、产量高、用途广、经济效益好等优良特性^[2],是广西种植最广泛的商业用材树种,其面积为 256.05 万公顷,稳居全国首位,每年提供的木材占全国木材产量的 30%^[3],对缓解木材供需矛盾和应对全球气候变化发挥着重要作用^[4]。然而,桉树也是全球争议最大的人工林树种。争议的焦点是桉树人工林的生态环境问题,短周期连栽的人工纯林易引发生态系统的生物多样性降低、立地质量衰退、森林病虫害频发等问题,严重影响森林生态系统功能的发挥^[5]。因此,亟需采取科学的经营措施来提高森林生态系统的恢复速度和质量,维持其生态系统的多样性及稳定性,实现桉树人工林的可持续发展。

基于林业高质量发展助力“双碳”战略的背景下,采取生态营林制度营造混交林可有效解决人工纯林的诸多弊端,并具有显著的增产效应^[6-8]。这源于树种混交可以通过生态位互补,使资源利用率最大化,或宿主特异性疾病易感性降低等,进而提高生态系统的功能^[9]。例如,深根系和浅根系树种混交,可最大限度地利用不同土层的水分和养分^[10];不同冠层结构的喜光与耐阴树种混交,可有效利用空间资源和光能资源^[11];固氮与非固氮树种混交,可有效改善土壤氮素的营养分配^[12];不同物候期的物种构建的群落可在不同阶段充分利用有限的养分^[13]。可见,营造适宜的桉树人工混交林有利于兼顾生态功能与经济效益,对广西乃至全国桉树产业的健康发展具有重要意义。

尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*)作为桉树杂交选育的一个优良品种,因其生长速度快、干形通直、纤维优质、木材密度大、适应性强,在广西丘陵山区普遍种植^[14,15]。总体而言,目前关于桉树人工混交林的生长特性^[16]、生物多样性^[17,18]、土壤理化性

质^[19,20]、土壤酶活性^[21]、土壤微生物^[22]等方面试验已开展诸多研究,然而大多数研究集中于某一林龄的短期效应分析,而基于长期固定监测样地,关于桉树整个轮伐期(6年)生长数据的动态分析却鲜见报道。因此,为了探索桉树适宜的混交生长模式,改善桉树纯林引发的各种生态环境问题,实现桉树人工林质量的精准提升和森林的可持续经营,本研究选取 2012 年采取生态营林制度建立的桉树纯林及其分别与降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)、望天树(*Parashorea chinensis*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)的混交林为研究对象,基于桉树第一轮伐期内 2014、2016、2018 年 3 次林分的调查结果,探究不同混交类型中桉树和珍贵树种的生长动态特征,以期对混交树种的选择和桉树人工林的高质量发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然环境概况

研究区位于中国林业科学研究院热带林业实验中心青山实验场 67 林班(22°10' N, 106°41' E),属于亚热带季风气候区,年平均气温 20.5–21.7 °C,年平均降水量 1 200–1 500 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,但目前已被大面积的人工林取代^[23]。

1.2 样方设置与林分调查

2011 年 11 月,对试验区的 45 hm² 马尾松(*Pinus massoniana*)进行采伐,随后对采伐迹地进行人工清理,于 2012 年 3 月造林,人工挖穴,规格为 50 cm × 50 cm × 30 cm,分别营建桉树纯林(PEU)、桉树 × 降香黄檀混交林(MED)、桉树 × 望天树混交林(MEP)、桉树 × 红锥混交林(MEC)。采取“双龙出海”的模式种植桉树(品种为尾巨桉),即设置宽窄行,窄行的行距为 2 m,宽行的行距为 5 m,行间株距均为 2 m,桉树种植于窄行之间,造林密度为 1 428 株/hm²。混交林中,珍贵乡土树种种植于宽行之间,株数为 714 株/hm²,桉树与珍贵树种混交比例为 2:1。同年在各林分中选择立地条件相对一致的区域,建立长期固定监测样地,样地面积为 20 m × 20 m,每种林分设置 4 个重复,林分环境概况见表 1。分别于 2014、2016、2018 年进行样地林分生长调查,记录林分树种组成、胸径、树高等,2019 年对各林分桉树进行采伐。

表 1 林分环境概况

Table 1 Environmental situation of stand

林分类型 Stand type	海拔/m Altitude/m	坡度 Slope	土壤类型 Soil type	土层厚度/cm Soil depth/cm
Mixed <i>Eucalyptus</i> and <i>D. odorifera</i> plantation (MED)	250 - 270	18° - 25°	Lateritic soil	30 - 40
Mixed <i>Eucalyptus</i> and <i>P. chinensis</i> plantation (MEP)	220 - 270	15° - 23°	Lateritic soil	30 - 40
Mixed <i>Eucalyptus</i> and <i>C. hystrix</i> plantation (MEC)	250 - 270	15° - 25°	Lateritic soil	30 - 40
Pure <i>Eucalyptus</i> plantation (PEU)	200 - 250	15° - 26°	Lateritic soil	30 - 40

1.3 生长量及生长率计算

单株材积(Individual Tree Volume, V)采用实验形数法计算^[24], 计算公式如下:

$$V = g_{1.3} \times (h + 3) \times f_e, \quad (1)$$

式中, $g_{1.3}$ 为胸径断面积(m^2), h 为树高(m), f_e 为实验形数, 取值为 0.4^[24]。

单株年平均生长量(Average Annual Individual Tree Growth Increment, AAITGI)计算公式为

$$AAITGI = \frac{y_2 - y_1}{n \cdot a}, \quad (2)$$

式中, y_2 为期末所有树木的胸径(或树高、单株材积)之和, y_1 为期初所有树木的胸径(或树高、单株材积)之和, n 为林木株数, a 为间隔的年数。

林分蓄积量年平均生长量(Average Annual Volume Increment, AAVI)计算公式为

$$AAVI = \frac{V_2 - V_1}{a}, \quad (3)$$

式中, V_2 为期末的林分蓄积量(m^3/hm^2), V_1 为期初的林分蓄积量(m^3/hm^2), a 为间隔的年数。

年平均生长率使用普雷斯勒公式计算:

$$P_n = \left[\frac{y_a - y_{a-n}}{y_a + y_{a-n}} \right] \cdot \frac{200}{n}, \quad (4)$$

式中, P_n 为 n 年间的年平均生长率, y_a 和 y_{a-n} 分别为 a 和 $a - n$ 年树木的平均胸径(或树高、单株材积、林分蓄积量)。

1.4 数据分析

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同林分平均胸径、树高、蓄积量及其生长量的差异显著性, 显著性水平设置为 $P < 0.05$, 采用 Duncan 法进行多重比较, 以上分析在 R Studio 软件上运行, 采用 Origin 2018 作图。

2 结果与分析

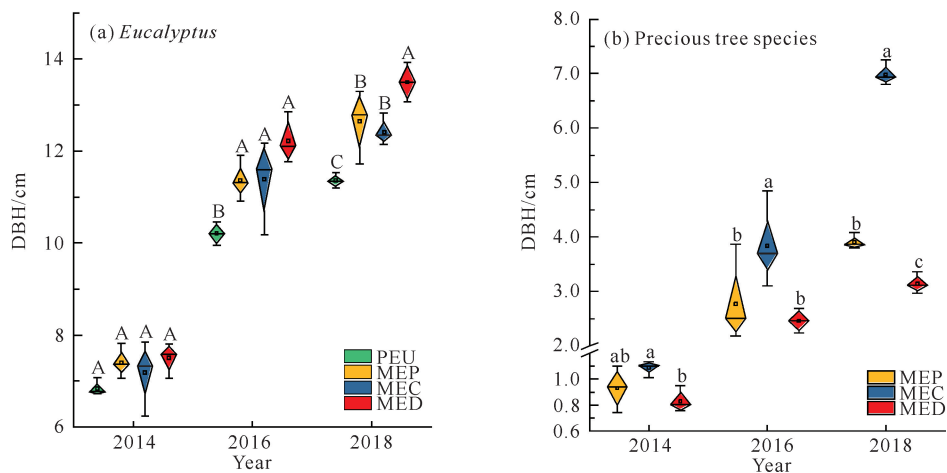
2.1 林分胸径和树高生长的动态变化

由图 1 可知, 监测期 6 年内, 不同类型林分中桉树的胸径均表现为 MED > MEP > MEC > PEU, 其中 3 种混交林分中桉树的胸径在 2016、2018 年均显著高于桉树纯林($P < 0.05$); 2014、2016 年 3 种混交林桉树胸径差异不显著($P > 0.05$), 但在 2018 年时, MED 林分中桉树的胸径显著高于其他两种混交林($P < 0.05$)。2014 - 2018 年, MED、MEC、MEP、PEU 林分中桉树的胸径年平均生长率分别为 9.5%、8.9%、8.7%、8.3%; 与纯林相比, MED 林分中桉树的胸径年平均生长率提高 14.8%, MEC 林分提高程度次之(7.4%), MEP 林分较低(5.2%)。珍贵树种的胸径大小均表现为红锥 > 望天树 > 降香黄檀; 2014、2016 年, 红锥的胸径均显著高于降香黄檀, 而望天树和降香黄檀两者之间差异不显著($P > 0.05$); 2018 年, 3 种珍贵树种的胸径差异达到显著水平($P < 0.05$)。

由图 2 可知, 监测期内不同林分中桉树的树高均表现为 MED > MEC > MEP > PEU。2014 年 MED 林分中桉树的树高显著高于桉树纯林; 2018 年 3 种混交林分中桉树的树高均显著高于桉树纯林($P < 0.05$), 分别是桉树纯林的 1.17、1.13 和 1.12 倍。不同林分中珍贵树种的树高均为红锥最高, 显著高于降香黄檀和望天树($P < 0.05$), 调查期内望天树和降香黄檀树高差异不显著($P > 0.05$)。

2.2 林木单株材积和林分蓄积量的动态变化

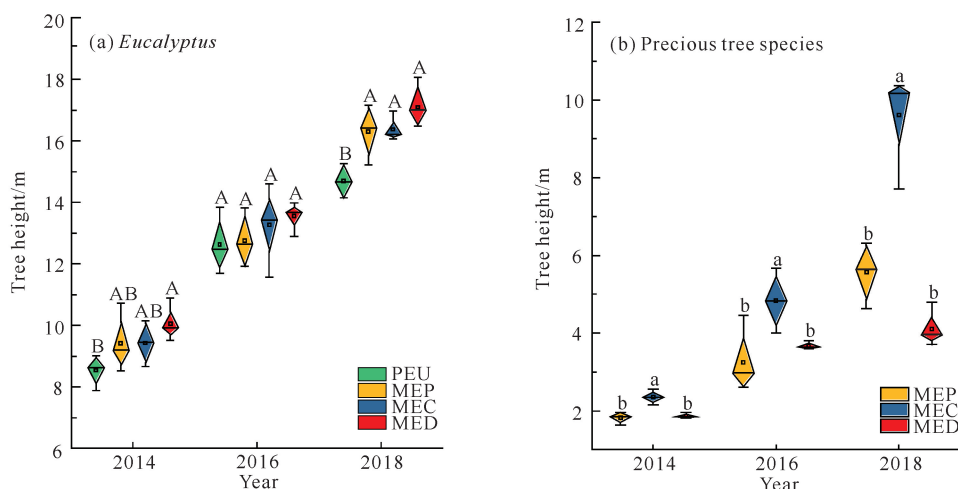
从图 3 可以看出, 不同类型林分中桉树的单株材积总体表现为 MED > MEC > MEP > PEU, 其中 MED 林分中桉树的单株材积均显著高于桉树纯林



(a) Different capital letters indicate significant differences among *Eucalyptus* in different stands of the same year ($P < 0.05$), (b) Different lowercase letters indicate significant differences between precious tree species in different stands in the same year ($P < 0.05$).

图1 不同林分中桉树(a)和珍贵树种(b)胸径生长的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of DBH growth of *Eucalyptus* (a) and precious tree species (b) in different stands



(a) Different capital letters indicate significant differences among *Eucalyptus* in different stands of the same year ($P < 0.05$), (b) Different lowercase letters indicate significant differences between precious tree species in different stands in the same year ($P < 0.05$).

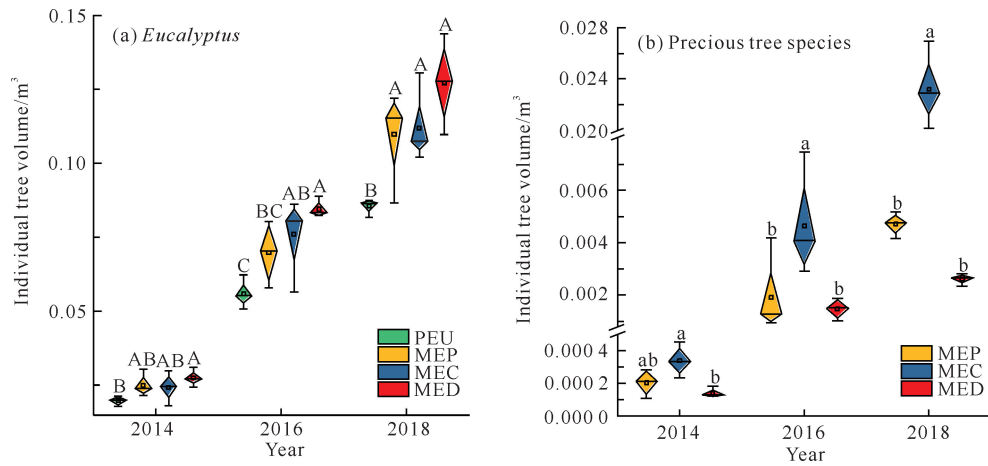
图2 不同林分中桉树(a)和珍贵树种(b)树高生长的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of tree height growth of *Eucalyptus* (a) and precious tree species (b) in different stands

($P < 0.05$)。2014 - 2018 年, 单株材积年平均生长率表现为 MED (21.5%) > MEC (21.4%) > MEP (21.0%) > PEU (20.8%), 与纯林相比, MED、MEC、MEP 林分中桉树的单株材积年平均生长率分别提高了 3.4%、3.2%、1.0%。不同混交林分中珍贵树种的单株材积均为红锥最高, 在 2016 年和 2018 年显著高于降香黄檀和望天树 ($P < 0.05$); 望天树的单株材积略高于降香黄檀, 但两者间差异未达显著水平 ($P > 0.05$)。

从图 4 可以看出, 不同林分中桉树的林分蓄积量总体表现为 MED > MEC > MEP > PEU, 其中 2018

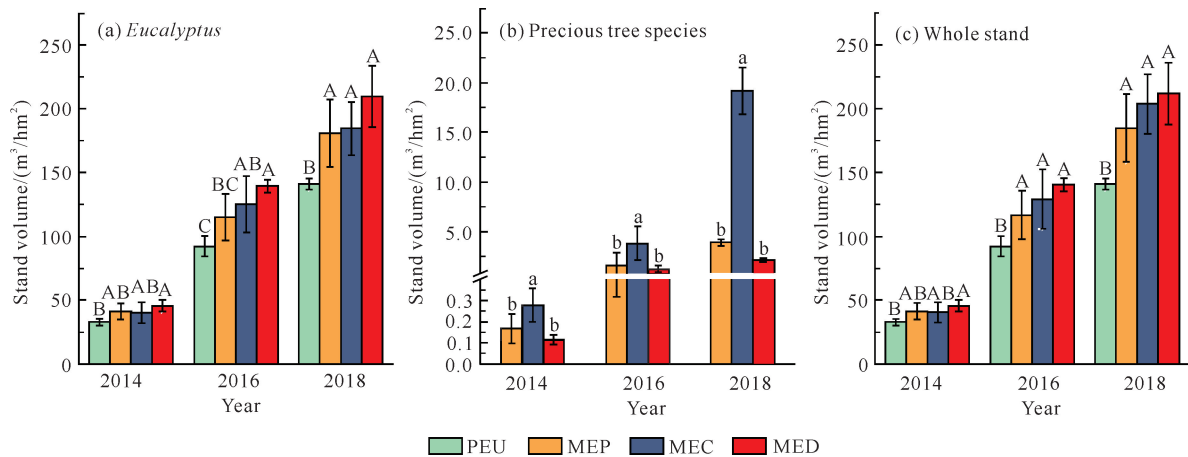
年 3 种混交林中桉树的林分蓄积量均显著高于桉树纯林 ($P < 0.05$), 分别是桉树纯林的 1.49、1.31 和 1.28 倍, 3 种混交林林分之间无显著差异 ($P > 0.05$)。珍贵树种的林分蓄积量均表现为 MEC > MEP > MED, 其中红锥的蓄积量均显著高于望天树和降香黄檀 ($P < 0.05$), 而望天树和降香黄檀间差异不显著 ($P > 0.05$)。全林分总蓄积量仍表现为 MED > MEC > MEP > PEU, 2018 年 3 种混交林的总蓄积量总体均显著高于桉树纯林 ($P < 0.05$), 分别是桉树纯林的 1.50、1.44 和 1.31 倍, 但混交林间无显著差异 ($P > 0.05$)。



(a) Different capital letters indicate significant differences among *Eucalyptus* in different stands of the same year ($P < 0.05$). (b) Different lowercase letters indicate significant differences between precious tree species in different stands in the same year ($P < 0.05$).

图3 不同林分中桉树(a)和珍贵树种(b)单株材积生长的动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of individual tree volume growth of *Eucalyptus* (a) and precious tree species (b) in different stands



Different capital letters in figure (a) and (c) indicated significant differences among *Eucalyptus* in different stands in the same year ($P < 0.05$); different lowercase letters in figure (b) indicate significant differences between precious tree species in different stands in the same year ($P < 0.05$).

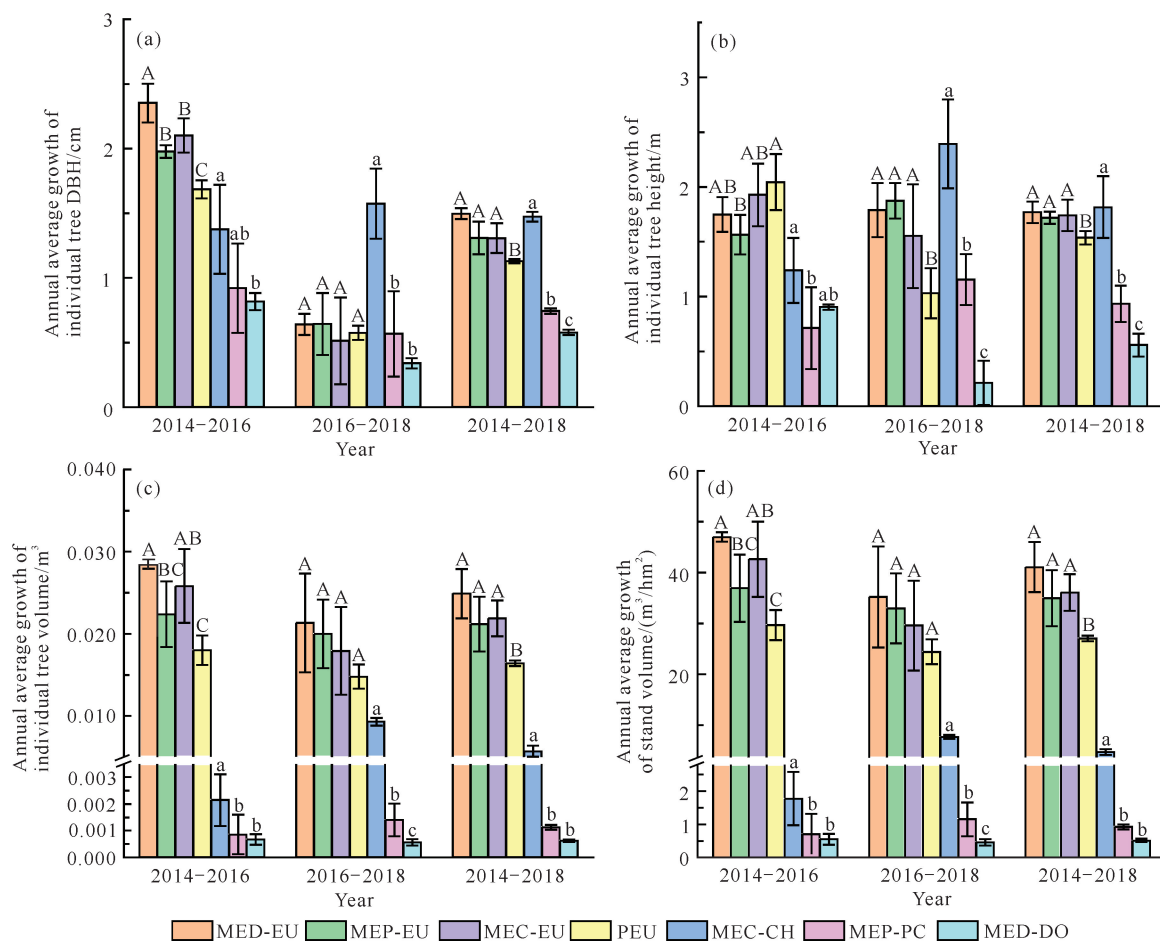
图4 不同林分中桉树(a)、珍贵树种(b)及全林分(c)蓄积量生长的动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of volume growth of *Eucalyptus* (a), precious tree species (b) and whole stand (c) in different stands

2.3 林木和林分生长量的动态变化

由图5可知,2012-2018年监测期内,MED、MEP和MEC林分中桉树的胸径、树高、单株材积及林分蓄积量年平均生长量均显著高于桉树纯林($P < 0.05$)。不同类型林分中桉树在第3-4年(2014-2016年)为速生期,第3-4年桉树的胸径、树高、单

株材积及林分蓄积年平均生长量明显高于第5-6年(2016-2018年);混交林的珍贵树种中红锥的胸径、树高、单株材积及林分蓄积量年平均生长量均显著高于望天树和降香黄檀($P < 0.05$),而望天树和降香黄檀总体间差异不显著($P > 0.05$)。



EU: *Eucalyptus*; DO: *D. odorifera*; PC: *P. chinensis*; CH: *C. hystrix*. Different capital letters in the same column indicate significant differences among *E. urograndis* in different stand types in the same year ($P < 0.05$). Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among precious tree species in different stand types in the same year ($P < 0.05$).

图5 不同类型桉树人工林年平均生长量的动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of average growth increment of different types of *Eucalyptus* plantations

3 讨论

3.1 混交树种对桉树生长的影响

混交林是同一环境中不同树种组成的植物群落。为了提高人工混交林的生产力,需要了解混交林树种间相互作用过程的3种表现方式:竞争、竞争式减弱和促进^[12]。竞争是指当两个或多个植物或种群间相互作用时,其中一个物种对另一个物种产生的负向效应(生长或死亡)。竞争式减弱也称互补性,是指发生在混交林中的种间竞争小于单一纯林中的种内竞争,这源于资源(光、水或养分)需求的差异引起物种间更全面地利用林地资源。促进则是指其中一个物种对另一个物种产生的正向效应^[12]。通常情况下,种间和种内竞争的发生导致混交林林分比单一纯林林分具有更复杂的相互作用,当林分中促进和竞争式减弱产生的积极相互作用主导着竞争相互作用时,混交林

的产量将超过单一纯林。

本研究中,监测期内,4种类型林分中桉树的胸径、树高、单株材积和林分蓄积量年平均生长量呈现一致的规律,总体表现为MED > MEC > MEP > PEU, MED林分中桉树的胸径、树高、单株材积年平均生长量分别为桉树纯林的1.32、1.15、1.52倍, MEC林分分别为桉树纯林的1.16、1.13、1.33倍, MEP林分分别为桉树纯林的1.16、1.12、1.29倍。根据普雷斯勒生长率公式,各生长指标年平均生长率总体同样表现为MED > MEC > MEP > PEU,其中MED、MEC、MEP、PEU林分的胸径年平均生长率分别为9.5%、8.9%、8.7%、8.3%,树高年平均生长率分别为8.7%、9.0%、8.9%、8.8%,单株材积年平均生长率分别为21.5%、21.4%、21.0%、20.8%。这进一步说明桉树与降香黄檀、望天树及红锥混交对桉树生长具有显著促进作用,但作用效果略有差异,一

方面可能与混交林中桉树对林地土壤养分条件的响应有关,另一方面可能与珍贵树种生物生态学特性不同引起树种生态位互补方式存在差异有关。

桉树×降香黄檀混交林中桉树生长最优,这可能与种间氮转移对桉树的生长产生的促进作用有关,即地下氮从豆科树种转移到非豆科树种。氮元素是影响植物生长发育的必需营养元素^[25]。由于土壤养分和化肥使用的限制,生物固氮被认为是增加植物有效土壤N含量的有效途径。豆科/非豆科混交林中豆科树种可以通过共生固氮获得氮源,而非豆科树种可以从林分土壤中氮的有效性增加中获益,因为在与豆科树种混交林分中桉树的氮矿化率高于桉树纯林^[26]。此外,桉树与降香黄檀混交还能加快土壤磷循环,短期内缓解磷营养对桉树的限制后,林分的生物量和氮素利用率较桉树纯林有效提高的结果相一致^[27]。

红锥作为南亚热带地区典型的珍贵乡土阔叶树种之一,生态适应性广,幼龄期耐荫蔽性强。杨嘉麒等^[19]的研究结果表明,桉树与红锥混交有利于桉树胸径、树高和单株材积的生长,同时相比桉树纯林具有更高的土壤养分储量和更好的土壤养分循环机制。磷元素是植物必需的大量元素,在植物的光合作用和生理生化过程中发挥关键作用^[28]。有研究表明,桉树与红锥混交可显著提高土壤中的有效氮和有效磷的含量以及亮氨酸氨基肽酶活性,在一定程度上能缓解土壤氮磷的限制^[21]。本研究发现桉树与红锥混交显著促进了桉树的生长,这与前人的研究结果一致。一方面可能与红锥的速生性提高了桉树的自然整枝能力,即改变了桉树冠层的光合能力,调节碳分配,促进树干生长有关^[29];另一方面可能与红锥树冠冠幅远大于桉树,凋落物量大且易腐烂分解,可有效减少土壤水分蒸发、改善林地表层环境、促进土壤养分循环、提高土壤肥力有关。

桉树与望天树混交同样显著促进了林分中桉树的生长,可能与该混交类型能在一定程度上改善林分小气候、增加物种多样性、提高土壤肥力有关。庞圣江等^[17]研究表明,桉树与望天树混交有利于提高其林下物种的丰富度和多样性水平。部分学者发现望天树与巨尾桉混交可以有效提高土壤微生物代谢活性和功能多样性,促进凋落物和有机质的分解^[30]。李万年等^[31]指出,望天树与巨尾桉混交有利于活化土壤养分,提高微生物群落功能及改善林地土壤结构,是桉树纯林改造较合适的混交类型选择。由此可

见,供试的3种混交树种对桉树的生长作用机制略有不同。笔者推测:降香黄檀以增加桉树氮磷营养来促进桉树生长;红锥通过树冠优势使桉树自然整枝进而促进树干生长,同时提供更多的凋落物,进而促进土壤养分循环;望天树干型通直,树冠较小,冠层空间的互补性使林下散射辐射能、直射辐射能、林下多样性增加,促进凋落物和有机质的分解,提高微生物群落功能进而促进桉树生长。混交树种通过何种主控因素及途径影响桉树的动态生长,仍需从地上-地下耦合关系进一步深入研究。然而相比于桉树纯林,3种混交林分均表现出更大的碳储存能力,按乔木层平均含碳率48%计^[2],乔木层碳储量可提高21-34 t/hm²。若全区以此营林方式推广,按全区桉树人工林面积256万公顷(全国第九次森林资源清查数据)^[3]计,预计可提高5300-8700万吨碳储量,这将有效缓解和应对全球的气候变化,发挥人工林的生态功能与经济效益。

3.2 混交树种的生物生态学特性

本研究区位于广西友谊关国家级森林生态系统定位观测研究站,属于典型的南亚热带季风气候,太阳辐射强烈,热能丰富,雨量充沛,试验地土壤为砖红壤,其水热条件和立地条件均适宜降香黄檀、望天树和红锥的生长^[8]。本研究中,监测期内,各生长指标无论是现存量还是年平均生长量,3种混交林分中珍贵树种的胸径、树高、单株材积及林分蓄积量指标均表现为MEC>MEP>MED。林木和林分的年平均生长量反映其生长水平和速率,是评价树种在不同条件下或不同树种在同一条件下生长快慢的重要指标^[24]。根据普雷斯勒生长率公式,MEC林分中珍贵树种的胸径、树高、单株材积年平均生长率分别为24.3%、20.2%、32.4%,MEP林分分别为20.5%、16.9%、30.6%,MED林分分别为19.4%、12.5%、30.0%。总体而言,不同混交林分中红锥的生长指标显著大于望天树和降香黄檀,而望天树和降香黄檀间差异不显著。这可能是因为红锥是我国南亚热带地区顶级群落建群种,具有生长速度快、适应性强、凋落物量大、固碳能力强及幼龄期耐荫蔽性强等优良特性,喜排水性良好的酸性土壤或轻黏土^[32]。研究区红锥的树冠冠幅远大于望天树和降香黄檀,凋落物量大且易腐烂分解,可有效减少林地内水分蒸发、促进养分循环、增加土壤肥力,为其自身生长创造了良好的水、热、肥环境条件。唐继新等^[33]研究表明,红锥7-12年为胸径连年生量的速生期,4-11年为树高

连年生长量的快速增长期,胸径和树高连年生长量约在第8年达到峰值。本研究结果与其一致,红锥林龄为6年,仍处于林分发育早期的生长优势阶段,表现出胸径和树高年平均生长量随着时间的推移呈快速上升的趋势,第5、6年的年均生长量明显高于第3、4年。

望天树作为我国特有的一级濒危保护植物,树干通直圆满,材质优良,目前望天树的天然林几乎灭绝,营造成功的望天树人工林培育模式势在必行。黄菁等^[34]指出,望天树幼树期喜侧方遮阴,适当的遮阴处理有利于望天树幼苗的生长。韩小美等^[35]研究发现,望天树×尾巨桉混交林中望天树根际土壤含水量、pH值、有机质、全氮、全钾及蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶活性均表现最高,说明望天树×尾巨桉混交林改善了望天树根际土壤的微环境,有利于其幼苗幼树期的生长。本研究调查期内混交林分中望天树的生长优于降香黄檀,一方面可能与望天树相对于降香黄檀更具速生性有关,混交形成的复层林结构为林下望天树幼树创造了适宜的光照条件,为其生长提供了很好的荫蔽作用;另一方面望天树与桉树地上树冠和地下根系的分布形成较好的层次,有利于望天树幼树对光照、水分、养分的利用,提高土壤微生物多样性。该发现进一步证实了桉树×望天树混交林有望达到珍稀树种望天树幼林培育和桉树纯林改造的双重目的。

降香黄檀虽然为固氮树种,但其生长周期较长,完全成材需要40-50年,且根系不够发达^[36]。本研究中,降香黄檀生长相对于红锥和望天树的生长明显缓慢,一方面可能与桉树为速生树种有关,降香黄檀与桉树混交显著促进了林分中桉树的生长,桉树明显的冠层优势可能会使降香黄檀的生长在生长早期受光不足;另一方面试验地里的降香黄檀枝干受藤本植物缠绕较为严重,枝叶舒展受到抑制,制约了降香黄檀的正常生长。因此,在降香黄檀混交林经营中,早期生长阶段应适当进行抚育,减少藤本植物对其生长造成的危害。综上所述,桉树人工混交林中珍贵树种红锥、望天树和降香黄檀3个树种的生长略有差异,快慢程度主要由自身的生物生态学特性决定。

4 结论

监测表明,MED、MEP、MEC、PEU林分胸径、树高、单株材积和林分蓄积量均随林龄增加而增加;4种类型林分中桉树的胸径、树高、单株材积及林分蓄

积量总体表现为MED>MEC>MEP>PEU,珍贵树种均表现为MEC>MEP>MED,林分总蓄积量表现为MED(212.0 m³/hm²)>MEC(203.7 m³/hm²)>MEP(184.9 m³/hm²)>PEU(141.1 m³/hm²);不同类型林分中桉树的胸径、树高、单株材积和林分蓄积量年平均生长量变化呈现一致的规律,总体表现为MED>MEC>MEP>PEU,珍贵树种则表现为MEC>MEP>MED。综上可知,桉树与降香黄檀、红锥及望天树混交均能显著促进桉树的生长,其中MED促进性最强,MEC次之,MEP较低,3种混交林均可作为今后桉树混交林经营的参考模式。

参考文献

- [1] LIU B, LIU Q Q, DARYANTO S, et al. Responses of Chinese fir and Schima superba seedlings to light gradients: implications for the restoration of mixed broadleaf-conifer forests from Chinese fir monocultures [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 419/420: 51-57.
- [2] ZHOU X G, ZHU H G, WEN Y G, et al. Effects of understory management on trade-offs and synergies between biomass carbon stock, plant diversity and timber production in eucalyptus plantations [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 410: 164-173.
- [3] 中国林学会. 桉树科学发展问题调研报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016.
- [4] 温远光, 周晓果, 喻素芳, 等. 全球桉树人工林发展面临的困境与对策 [J]. *广西科学*, 2018, 25(2): 107-116.
- [5] HUANG Y Y, CHEN Y X, CASTRO-IZAGUIRRE N, et al. Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment [J]. *Science*, 2018, 362(6410): 80-83.
- [6] FENG Y H, SCHMID B, LOREAU M, et al. Multispecies forest plantations outyield monocultures across a broad range of conditions [J]. *Science*, 2022, 376(6595): 865-868.
- [7] LIANG J J, CROWTHER T W, PICARD N, et al. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests [J]. *Science*, 2016, 354(6309): aaf8957.
- [8] 温远光, 周晓果, 朱宏光. 桉树生态营林理论、技术与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [9] HECTOR A, BAZELEY-WHITE E, LOREAU M, et al. Overyielding in grassland communities: testing the sampling effect hypothesis with replicated biodiversity experiments [J]. *Ecology Letters*, 2002, 5(4): 502-511.
- [10] BRASSARD B W, CHEN H Y H, CAVARD X, et al. Tree species diversity increases fine root productivity

- through increased soil volume filling [J]. *Journal of Ecology*, 2013, 101: 210-219.
- [11] PRETZSCH H. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 327: 251-264.
- [12] 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.
- [13] LEUCHNER M, MENZEL A, WERNER H. Quantifying the relationship between light quality and light availability at different phenological stages within a mature mixed forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142: 35-44.
- [14] 张培, 庞圣江, 杨保国, 等. 广西西南地区巨尾桉与红椎混交造林试验研究[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(1): 150-155.
- [15] 吴华静, 田丰, 桂凌健, 等. 南宁七坡林场尾巨桉人工林生物量的初步研究[J]. *广西科学院学报*, 2014, 30(4): 233-237.
- [16] 韦宇静, 梁士楚, 黄雅丽, 等. 巨尾桉与几种阔叶树和针叶树碳储量的比较研究[J]. *广西科学院学报*, 2014, 30(4): 229-232.
- [17] 庞圣江, 张培, 贾宏炎, 等. 不同造林模式对桉树人工林林下植物物种多样性的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(9): 44-52.
- [18] 温远光, 杨柳, 朱宏光, 等. 除草剂对桉树×降香黄檀混交林下植物功能群的影响[J]. *广西科学*, 2015, 22(6): 578-585.
- [19] 杨嘉麒, 邓海燕, 张港隆, 等. 4种混交比例对桉树-红椎人工混交林生长和土壤养分的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(11): 90-97.
- [20] SANTOS F M, CHAER G M, DINIZ A R, et al. Nutrient cycling over five years of mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia* on a sandy tropical soil [J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 384: 110-121.
- [21] 邵文哲, 周晓果, 温远光, 等. 桉树与红椎混交对土壤水解酶活性及其化学计量特征的影响[J]. *广西植物*, 2022, 42(4): 543-555.
- [22] YAO X Y, HUI D F, HOU E Q, et al. Differential responses and mechanistic controls of soil phosphorus transformation in *Eucalyptus* plantations with N fertilization and introduced N_2 -fixing tree species [J]. *New Phytologist*, 2023, 237(6): 2039-2053.
- [23] 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.
- [24] 孟宪宇. 测树学[M]. 3版. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [25] THILAKARATHNA M S, PAPADOPOULOS Y A, RODD A V, et al. Nitrogen fixation and transfer of red clover genotypes under legume-grass forage based production systems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 106(2): 233-247.
- [26] KOUTIKA L S, TCHICHELE S V, MARESCHAL L, et al. Nitrogen dynamics in a nutrient-poor soil under mixed-species plantations of eucalypts and acacias [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 108: 84-90.
- [27] YAO X Y, LI Y F, LIAO L N, et al. Enhancement of nutrient absorption and interspecific nitrogen transfer in a *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and *Dalbergia odorifera* mixed plantation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 449: 117465.
- [28] SCHRÖDER J J, SMIT A L, CORDELL D, et al. Improved phosphorus use efficiency in agriculture: a key requirement for its sustainable use [J]. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 822-831.
- [29] RICHARDS A E, FORRESTER D I, BAUHUS J, et al. The influence of mixed tree plantations on the nutrition of individual species: a review [J]. *Tree Physiology*, 2010, 30(9): 1192-1208.
- [30] 李万年, 罗益敏, 黄则月, 等. 望天树人工幼林混交对土壤微生物功能多样性与碳源利用的影响[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(9): 1109-1124.
- [31] 李万年, 黄则月, 赵春梅, 等. 望天树人工幼林土壤微生物量碳氮及养分特征[J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(12): 51-62.
- [32] 唐继新, 朱雪萍, 贾宏炎, 等. 西南桦红椎混交林的生长动态及林木形质分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(1): 97-105.
- [33] 唐继新, 白灵海, 郭文福, 等. 红椎人工林生长规律的初步研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(4): 51-54, 60.
- [34] 黄菁, 魏丽萍, 周会平, 等. 遮荫对望天树生长和生理生化特性的影响[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(2): 74-79.
- [35] 韩小美, 黄则月, 程飞, 等. 望天树人工林根际土壤理化性质及微生物群落特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3365-3375.
- [36] 贾瑞丰. 降香黄檀人工促进心材形成的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.

Dynamic Analysis of Tree Growth in Ecological Management in *Eucalyptus* Plantation

XU Junmo¹, WEN Yuanguang^{1,2}, SUN Dongjing¹, CHEN Qiu hai¹, DENG Shaohong¹,
HUANG Yongjie¹, NONG Zhi^{2,3}, WU Junting^{2,3}, LI Zuhe³, ZHOU Xiaoguo^{1,2* *}

(1. Institute of Eco-Environment Research, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi, 532600, China; 3. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi, 532600, China)

Abstract: In order to clarify the growth dynamic characteristics and variation rules of different types of *Eucalyptus* spp. artificial mixed forests during the rotation period, the *Eucalyptus* × *Dalbergia odorifera* mixed forest (MED), *Eucalyptus* × *Parashorea chinensis* mixed forest (MEP), *Eucalyptus* × *Castanopsis hystrix* mixed forest (MEC) and *Eucalyptus* pure forest (PEU) were selected as the research objects, which were constructed by using the ecological forest management system in Qingshan Experimental Farm of Experimental Center of Tropical Forestry of Chinese Academy of Forestry in 2012. The fixed monitoring plots were set up based on three stand surveys during the first rotation period of *Eucalyptus* (2014, 2016 and 2018). The dynamic change characteristics of DBH, tree height, individual volume and stand volume of *Eucalyptus* and precious tree species in different mixed forests were analyzed. The results showed that during the monitoring period, the DBH, height, individual volume and stand volume of the four stand types increased significantly with the age. In mixed forest, *D. odorifera*, *C. hystrix* and *P. chinensis* all significantly promoted the growth of DBH, tree height, individual tree volume and stand volume of *Eucalyptus*, and the promoting effect was shown as MED > MEC > MEP. The DBH, tree height, individual tree volume and stand volume of precious tree species in different mixed types were shown as MEC > MEP > MED. The whole stand volume was MED (212.0 m³/hm²) > MEC (203.7 m³/hm²) > MEP (184.9 m³/hm²) > PEU (141.1 m³/hm²). The annual average growth of DBH, tree height, individual volume and stand volume of *Eucalyptus* in the four types of stands was MED > MEC > MEP > PEU, while that of precious tree species was MEC > MEP > MED. The results showed that mixing could significantly promote the growth of *Eucalyptus*. The growth of DBH, tree height, individual volume and stand volume of *Eucalyptus* in the three mixed forests were significantly higher than those of *Eucalyptus* pure forest. Among them, the growth of *Eucalyptus* in MED forest was more advantageous. The growth of precious tree species was the best, followed by *P. chinensis*, and the lowest was *D. odorifera*. The three mixed forests can be used as a reference model for the management of *Eucalyptus* mixed forests in the future.

Key words: *Eucalyptus* spp.; precious tree species; mixed type; stand growth; dynamic change

责任编辑:唐淑芬



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxk@gxas.cn

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