

网络出版时间:2020-08-13 15:49 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2021.02.005  
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20200812.1124.004.html

# 不同混交模式对桉树林分生长、凋落物量和土壤养分的影响

张 培<sup>1</sup>, 庞圣江<sup>1</sup>, 杨保国<sup>1</sup>, 刘士玲<sup>1</sup>, 贾宏炎<sup>1,2</sup>, 陈健波<sup>3</sup>, 郭东强<sup>3</sup>

(1 中国林业科学研究院 热带林业实验中心, 广西 凭祥 532600;

2 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 广西 凭祥 532600;

3 广西林业科学研究院, 广西 南宁 530001)

**[摘 要]** 【目的】研究不同混交模式桉树人工林的林分生长状况、凋落物量和土壤养分含量, 探寻桉树种植业的可持续经营模式。【方法】在广西西南部地区, 选取巨尾桉纯林及其分别与降香黄檀、望天树、格木和红椎混交的试验林为研究对象, 采用典型样地调查法, 测定各树种的胸径、树高、枝下高和冠幅, 计算单株材积和林分蓄积量; 在样地设置 3 个取样点, 采集凋落物和表层土壤(0~20 cm), 测定凋落物量及土壤 pH 值和养分含量。【结果】(1) 混交林巨尾桉的胸径(除巨尾桉+降香黄檀混交林外)、枝下高(除巨尾桉+降香黄檀混交林外)、冠幅和单株材积均显著高于巨尾桉纯林( $P < 0.05$ ), 但树高生长差异性不显著。(2) 不同混交模式中, 巨尾桉蓄积量表现为巨尾桉纯林( $126.89 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > 巨尾桉+红椎混交林( $114.02 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > 巨尾桉+格木混交林( $111.06 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > 巨尾桉+望天树混交林( $109.82 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > 巨尾桉+降香黄檀混交林( $107.23 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ), 混交树种蓄积量表现为红椎( $25.72 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > 望天树( $19.01 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > 格木( $14.85 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > 降香黄檀( $9.35 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ )。 (3) 混交林地凋落物总存量显著高于巨尾桉纯林, 且其半分解层凋落物存量均大于未分解层, 而巨尾桉纯林则相反。(4) 混交林地表层(0~20 cm) 土壤 pH 值及土壤有机质、速效 N、速效 K、全 N、全 P 和全 K 含量均显著高于巨尾桉纯林, 各林分间速效 P 含量差异性不显著。【结论】不同混交模式对桉树林分生长、凋落物量和土壤养分的影响显著。从林分质量和产量的角度考虑, 巨尾桉与红椎混交模式在促进林分生长、提高凋落物量和土壤质量方面更具优势。

**[关键词]** 桉树; 人工林; 林分生长; 凋落物; 土壤养分; 混交模式

**[中图分类号]** S725.2

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2021)02-0031-07

## Effects of different mixing patterns on growth, litter production and soil nutrients in *Eucalyptus* plantations

ZHANG Pei<sup>1</sup>, PANG Shengjiang<sup>1</sup>, YANG Baoguo<sup>1</sup>, LIU Shiling<sup>1</sup>,  
JIA Hongyan<sup>1,2</sup>, CHEN Jianbo<sup>3</sup>, GUO Dongqiang<sup>3</sup>

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

2 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi 532600, China;

3 Guangxi Forestry Science Research Institute, Nanning, Guangxi 530001, China)

**Abstract:** 【Objective】 This paper studied the growth of different tree species, litter production and soil nutrients in *Eucalyptus* plantations with different mixing patterns to provide basis for scientific cultivation and sustainable management of *Eucalyptus* plantations. 【Method】 The single species plantation of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* and its mixed-species plantations with *Dalbergia odorifera*, *Parashorea*

**[收稿日期]** 2020-01-15

**[基金项目]** 广西科技重大专项“桉树用材林质量精准提升关键技术与示范”(桂科 AA17204087-6)

**[作者简介]** 张 培(1984—), 女, 河南漯河人, 工程师, 主要从事林木良种选育与培育研究。E-mail: zhangpei08@126.com

**[通信作者]** 贾宏炎(1968—), 男, 湖南醴陵人, 高级工程师, 主要从事森林培育与生态研究。E-mail: rlzjhy@163.com

*chinensis*, *Erythrophleum fordii* and *Castanopsis hystrix* in Southwest Guangxi were selected. The method of typical plots was used to measure diameter at breast height (DBH), height, height under branches and crown width of each tree species and calculate individual volume and stand volume. Three sampling sites in the center of each plot were selected to collect litter and soil samples at the top with depth of 0—20 cm for measuring soil pH and soil nutrient content. 【Result】 (1) The DBH (except for mixed forest of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* and *Dalbergia odorifera*), height under branch (except for mixed forests of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* and *Dalbergia odorifera*), crown diameter and individual tree volume growth in mixed forests were significantly higher than pure forest ( $P < 0.05$ ), while height growth had no significant difference ( $P > 0.05$ ). (2) Among different mixing patterns, the volumes of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* forests were in the order of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* pure forest ( $126.89 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > mixed forest of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* and *Castanopsis hystrix* ( $114.02 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > mixed forest of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* and *Erythrophleum fordii* ( $111.06 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > mixed forest of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* and *Parashorea chinensis* ( $109.82 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > mixed forest of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* and *Dalbergia odorifera* ( $107.23 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ). The volumes were in the order of *Castanopsis hystrix* ( $25.72 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > *Parashorea chinensis* ( $19.01 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > *Erythrophleum fordii* ( $14.85 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > *Dalbergia odorifera* ( $9.35 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ). (3) Mixed forests had higher total litter stock than pure forest. In mixed forests, semi-decomposed litter layer was thicker than that of undecomposed layer, while it was the opposite in pure forest. (4) Soil pH value and contents of soil organic matter, available N, available K, total N, total P and total K in mixed forests were significantly higher than those of in pure forests, while there was no significant difference in available P among all forests. 【Conclusion】 Different mixing patterns had significant impacts on growth, litter production and soil nutrients of *Eucalyptus plantations*. Considering stand quality and yield, the mixed forests of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* and *Castanopsis hystrix* had more advantages in stand growth, improvement of litter and soil quality.

**Key words:** *Eucalyptus*; plantation; stand growth; litter; soil nutrient; mixing pattern

桉树(*Eucalyptus* spp.)为桃金娘科桉属树种的统称,具有生长迅速、经营周期短和投资收益快的优点,已成为我国亚热带地区重要的造林树种<sup>[1]</sup>。近年来,随着桉树种植业的规模化发展,其造林面积持续增长,已逾 500 万  $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>,极大地促进了当地经济发展。然而,人们仅关注桉树人工林的经济收益,却忽视了长期人工纯林的种植模式及不合理经营造成的林地土壤酸化、生物多样性锐减和林地生产力下降等问题<sup>[3-5]</sup>。研究表明,桉树混交造林不仅有利于增加林木种类组成与林地凋落物,而且可以改善土壤环境。郭祥泉<sup>[6]</sup>研究发现,桉树与马尾松(*Pinus massoniana*)适宜的混交配比有利于桉树胸径、树高和材积生长以及地力恢复。Bristow 等<sup>[7]</sup>研究表明,桉树与金合欢树(*Acacia peregrina*)混交,树种的种间协调和生态互补性更强,可提高林分稳定性。邓海燕等<sup>[8]</sup>研究显示,桉树与团花(*Neolamarckia cadamba*)混交造林,有利于改善林地的土壤结构,提高土壤养分水平。Santos 等<sup>[9]</sup>研究表明,桉

树与马占相思(*Acacia mangium*)混交有利于凋落物积累,且凋落物的分解加速,提高了土壤肥力,并可有效防止地力衰退和维持林地生产力。总体而言,目前关于桉树混交试验研究较多,而对于桉树与乡土珍贵树种混交后林分质量和产量变化方面的研究却鲜见报道。桉树和乡土珍贵树种混交造林可有效利用有限的土地资源、优化树种结构、改善林地土壤肥力、降低病虫害、提升森林整体质量,是实现桉树种植业可持续发展急需解决的重要课题。

本研究在广西西南部林区,选取巨尾桉(*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*)纯林及其分别与降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)、望天树(*Parashorea chinensis*)、格木(*Erythrophleum fordii*)和红椎(*Castanopsis hystrix*)混交的试验林为研究对象,比较不同混交模式下巨尾桉林分生长状况、凋落物现存量 and 土壤养分方面的差异,探讨巨尾桉与乡土珍贵树种混交的林分稳定性、林地质量与维持地力的能力,为探寻桉树种植业的可持续经营模式提供参

考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站热林中心林区(22°04′—22°16′ N, 106°41′—106°48′ E),该地属于亚热带季风气候区,干湿季有明显差异,雨季主要集中于4—10月,年均降雨量1 450 mm,年均气温22 ℃;土壤类型以赤红壤土为主,土层厚度1 m以上。

营林生产资料显示,造林地为马尾松采伐迹地,马尾松皆伐后进行采伐迹地清理,采取免炼山处理,

将采伐剩余物和杂灌木进行带状清理,以避免水土流失。2012年3月开始新造林,在种植带内挖种植穴,规格为50 cm×50 cm×30 cm,带内株行距为2 m×2 m;巨尾桉植穴不施基肥,4种珍贵树种每个植穴施复合肥0.5 kg。采用纯林与行状混交(2行巨尾桉+1行珍贵树种)造林模式,各设置3个重复。巨尾桉采用3个月优良无性系组培苗,4种珍贵树种用1年生实生苗,纯林与混交林的初植密度均为2 500株/hm<sup>2</sup>。造林后1~3年,每年采用块状铲草与割灌除草结合的方式抚育2次,共抚育6次。2018年10月调查试验林地的基本情况,样地信息详见表1。

表 1 不同混交模式桉树人工林样地的基本信息

Table 1 Basic information of *Eucalyptus* plantation sample plots with different mixing patterns

| 样地代码<br>Plots code | 造林面积/hm <sup>2</sup><br>Afforestation area | 海拔/m<br>Altitude | 坡位<br>Slope degree        | 坡向<br>Slope aspect   | 坡度/(°)<br>Slope degree |
|--------------------|--------------------------------------------|------------------|---------------------------|----------------------|------------------------|
| I                  | 7.30                                       | 287.5            | 中上 Upslope and midslope   | 阳坡 Sunny slope       | 24                     |
| II                 | 15.70                                      | 258.9            | 中上 Upslope and midslope   | 阳坡 Sunny slope       | 28                     |
| III                | 11.20                                      | 204.4            | 中 Midslope                | 半阳坡 Half-sunny slope | 19                     |
| IV                 | 11.10                                      | 281.8            | 中上 Upslope and midslope   | 阳坡 Sunny slope       | 23                     |
| V                  | 15.00                                      | 260.2            | 中下 Midslope and downslope | 半阳坡 Half-sunny slope | 22                     |

注: I. 巨尾桉纯林; II. 巨尾桉+降香黄檀混交林; III. 巨尾桉+望天树混交林; IV. 巨尾桉+格木混交林; V. 巨尾桉+红椎混交林。下文同。

Note: I. *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla*, pure forest; II. Mixed forest of *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* and *Dalbergia odorifera*; III. Mixed forest of *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* and *Parashorea chinensis*; IV. Mixed forest of *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* and *Erythrophleum fordii*; V. Mixed forest of *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* and *Castanopsis hystrix*. The same below.

1.2 调查取样

2018年10—11月,采用典型样地的调查方法,在每种混交模式的试验地,各设置面积为600 m<sup>2</sup>(20 m×30 m)的重复样地6个,共计调查30个样地。林木胸径(*D*)检尺采用测树钢围尺测量,树高(*H*)和枝下高采用超声波测高仪(瑞典 Vertex IV 超声波测高仪)测量,冠幅用皮尺测量各树种的南北和东西方向树冠宽度取平均值。各树种的单株材积(*V*)分别采用以下公式<sup>[10-14]</sup>计算:

$$V_{\text{巨尾桉}} = 0.628\ 76 \times 10^{-4} D^{1.821\ 621} H^{0.964\ 36};$$
$$V_{\text{降香黄檀}} = 0.587\ 704\ 2 \times 10^{-4} D^{1.969\ 983\ 1} H^{0.896\ 461\ 57};$$
$$V_{\text{望天树}} = 0.656\ 71 \times 10^{-4} D^{1.694\ 12} H^{1.069\ 769};$$
$$V_{\text{格木}} = 0.667\ 054 \times 10^{-4} D^{1.847\ 954\ 0} H^{0.966\ 575\ 09};$$
$$V_{\text{红椎}} = 0.527\ 64 \times 10^{-4} D^{1.882\ 16} H^{1.009\ 31}。$$

林分蓄积量=每株平均木蓄积量×单位面积保留株数。

在每个样地内再设置3个1 m×1 m小样方进行凋落物取样,将小样方内所有凋落物按半分解层和未分解层收集标记并分别称质量。同时,采用均匀布点的方法,顺坡在样地上、中、下位置选取3

个样点,采集0~20 cm表层土壤均匀混合,取1.00 kg土壤样品装自封袋编号,带回实验室风干,用于土壤理化性质测定。土壤样品分析过程中,土壤pH值采用酸度计测定,有机质含量采用K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>氧化-外加热法测定,速效N用碱解扩散法测定,速效P用HCl-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提-钼锑抗比色法测定,速效K用CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>浸提-火焰光度计法测定,全N采用浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub>消化法-自动凯氏定氮仪(KDY-9830,KETUO)测定,全P采用NaOH熔融-钼锑抗比色-紫外分光光度法测定,全K采用NaOH熔融-火焰光度计法测定,所有的土壤样品上述指标均重复测定3次,结果取平均值<sup>[15]</sup>。

1.3 数据分析

采用Excel 2007进行调查数据初步处理;使用SPSS 20.0软件对各树种生长指标、凋落物量和土壤养分数据进行单因素(One-way ANOVA)方差分析。同时,利用最小显著性差异法(least-significant difference,LSD)对有显著差异的数据进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同混交模式对桉树林木生长的影响

从表 2 可以看出,混交林中巨尾桉的胸径、树高、枝下高、冠幅和单株材积均大于纯林中巨尾桉。纯林中巨尾桉的胸径、枝下高、冠幅和单株材积分别为 14.32 cm、8.58 m、2.89 m 和 0.123 1 m<sup>3</sup>,而 4 种混交林中巨尾桉这 4 个生长指标的平均值较纯林中巨尾桉分别提高了 9.28%,5.59%,18.68%和 5.28%。由于各树种生长特性不同,与巨尾桉混交的 4 种珍贵树种生长亦存在一定差异,这些混交树种

的胸径、树高、枝下高、冠幅和单株材积等生长指标大小均表现为红椎>望天树>格木>降香黄檀。

方差分析表明,混交林中巨尾桉的胸径(除巨尾桉+降香黄檀混交林外)、枝下高(除巨尾桉+降香黄檀混交林外)、冠幅和单株材积均显著高于纯林中巨尾桉( $P<0.05$ ),但各林分间树高生长差异性不显著( $P>0.05$ )。巨尾桉与 4 种珍贵树种混交造林,前者作为速生树种能够迅速占据林冠层上方,后者则处于林冠层下方,这种复层林分结构既充分利用林地空间和光照资源,林分稳定性强,更有利于林木的生长。

表 2 不同混交模式桉树人工林的生长状况  
Table 2 Growth of tree species in *Eucalyptus* plantations with different mixing patterns

| 样地代码<br>Plots code | 树种<br>Tree species                             | 胸径/cm<br>Mean diameter | 树高/m<br>Mean height | 枝下高/m<br>Mean height<br>under branch | 冠幅/m<br>Mean crown | 平均单株材积/m <sup>3</sup><br>Mean individual<br>volume |
|--------------------|------------------------------------------------|------------------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------|
| I                  | 巨尾桉<br><i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i> | 14.32±1.09 a           | 15.28±1.87 a        | 8.58±0.44 a                          | 2.89±0.35 a        | 0.123 1±0.046 9 a                                  |
| II                 | 巨尾桉<br><i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i> | 15.65±1.28 ab          | 15.43±1.90 a        | 9.06±0.61 ab                         | 3.43±0.29 b        | 0.129 6±0.010 4 b                                  |
|                    | 降香黄檀<br><i>Dalbergia odorifera</i>             | 4.63±1.49              | 4.29±1.32           | 1.26±0.32                            | 1.28±0.25          | 0.006 7±0.003 8                                    |
| III                | 巨尾桉<br><i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i> | 16.77±1.21 b           | 15.90±2.35 a        | 9.34±0.69 b                          | 3.73±0.28 b        | 0.132 6±0.019 4 b                                  |
|                    | 望天树<br><i>Parashorea chinensis</i>             | 6.75±0.63              | 6.30±0.71           | 3.45±0.46                            | 2.29±0.28          | 0.011 8±0.002 2                                    |
| IV                 | 巨尾桉<br><i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i> | 16.82±1.16 bc          | 16.25±1.58 a        | 9.82±0.42 b                          | 3.45±0.37 b        | 0.138 1±0.026 4 bc                                 |
|                    | 格木<br><i>Erythrophleum fordii</i>              | 6.25±1.33              | 6.28±1.58           | 3.28±0.68                            | 2.02±0.34          | 0.010 7±0.001 9                                    |
| V                  | 巨尾桉<br><i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i> | 17.18±0.91 c           | 16.42±2.14 a        | 10.72±0.32 c                         | 3.54±0.27 b        | 0.145 6±0.019 3 c                                  |
|                    | 红椎<br><i>Castanopsis hystrix</i>               | 8.72±0.76              | 9.17±0.64           | 3.39±0.79                            | 2.89±0.67          | 0.029 3±0.005 9                                    |

注:同列数据后标不同小写字母表示不同桉树人工林间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among plantations ( $P<0.05$ ), The same below.

### 2.2 不同混交模式对桉树林分蓄积量的影响

由图 1 可知,不同混交模式中,巨尾桉蓄积量表现为巨尾桉纯林(126.89 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>巨尾桉+红椎混交林(114.02 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>巨尾桉+格木混交林(111.06 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>巨尾桉+望天树混交林(109.82 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>巨尾桉+降香黄檀混交林(107.23 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)。混交树种的蓄积量表现为红椎(25.72 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>望天树(19.01 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>格木(14.85 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>降香黄檀(9.35 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>),这可能与混交树种生长速度不同有关。从林分总蓄积量来看,巨尾桉+红椎混交林最高(139.74 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>),比巨尾桉纯林多 12.85 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;巨尾桉+望天树混交林(128.83 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)次之,比巨尾桉纯林多 1.94 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;第三为巨尾桉+格木混交林(125.91 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>),比巨尾桉纯林多 0.98 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;巨尾桉+降香黄檀混交林最小,仅 116.58 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,比巨尾桉

纯林少 10.31 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,说明林分总蓄积量受巨尾桉配植比例和混交树种生长速度的共同影响。

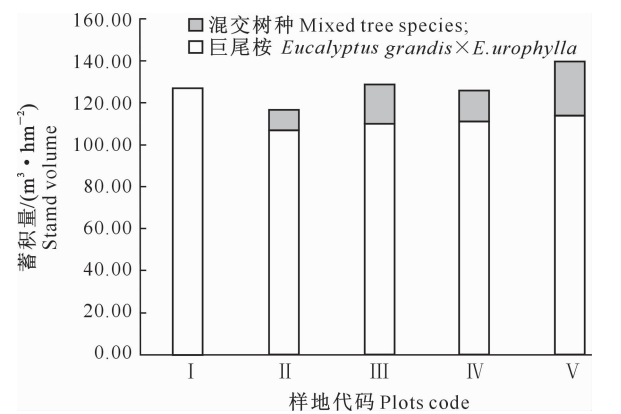


图 1 不同混交模式桉树人工林的林分蓄积量差异  
Fig. 1 Stand volumes of single and mixed species *Eucalyptus* plantations with different mixing patterns  
综上所述,混交林巨尾桉配植比例的减少,造成

巨尾桉蓄积量和出材量有所下降。但巨尾桉与望天树、格木和红椎混交林的林分总蓄积量均高于巨尾桉纯林,而巨尾桉与降香黄檀混交林则略低于巨尾桉纯林,说明巨尾桉与适量的珍贵树种混交造林,前期以经营桉树为主,后期培育高价值的珍贵树种,巨尾桉与珍贵树种以及林下植被形成多层次、更稳定的混交林,最终会收获较大的生态和经济效益。

2.3 不同混交模式对桉树林分凋落物量的影响

表 3 显示,混交林地的凋落物总存量显著高于

巨尾桉纯林( $P<0.05$ ),其大小表现为巨尾桉+红椎混交林( $7\,729.28\text{ kg/hm}^2$ )>巨尾桉+望天树混交林( $7\,271.21\text{ kg/hm}^2$ )>巨尾桉+格木混交林( $6\,558.35\text{ kg/hm}^2$ )>巨尾桉+降香黄檀混交林( $6\,214.74\text{ kg/hm}^2$ )>巨尾桉纯林( $4\,154.91\text{ kg/hm}^2$ )。试验林地的凋落物中,半分解层和未分解层所占比例有所差异,其中混交林的半分解层凋落物存量均大于未分解层,而巨尾桉纯林的半分解层凋落物存量小于未分解层。

表 3 不同混交模式桉树人工林凋落物的现存量

| 样地代码<br>Plots code | 凋落物总存量/<br>( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )<br>Total litter stock | 半分解层 Fermentation layer                                      |                                                 | 未分解层 Litter layer                                            |                                                 |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                    |                                                                     | 凋落物存量/<br>( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )<br>Litter stock | 占总存量比例/%<br>Proportion in<br>total litter stock | 凋落物存量/<br>( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )<br>Litter stock | 占总存量比例/%<br>Proportion in total<br>litter stock |
|                    |                                                                     |                                                              |                                                 |                                                              |                                                 |
| I                  | $4\,154.91\pm192.86\text{ a}$                                       | $1\,818.19\pm158.04\text{ a}$                                | 43.76                                           | $2\,336.72\pm199.38\text{ a}$                                | 56.24                                           |
| II                 | $6\,214.74\pm236.47\text{ b}$                                       | $3\,406.29\pm204.12\text{ b}$                                | 54.81                                           | $2\,808.45\pm214.54\text{ b}$                                | 45.19                                           |
| III                | $7\,271.21\pm256.63\text{ c}$                                       | $3\,944.43\pm231.61\text{ bc}$                               | 53.98                                           | $3\,362.78\pm242.29\text{ bc}$                               | 46.02                                           |
| IV                 | $6\,558.35\pm209.29\text{ b}$                                       | $3\,498.23\pm211.49\text{ b}$                                | 53.34                                           | $3\,060.12\pm204.85\text{ b}$                                | 46.66                                           |
| V                  | $7\,729.28\pm228.68\text{ c}$                                       | $4\,000.85\pm246.70\text{ c}$                                | 52.28                                           | $3\,728.43\pm248.26\text{ c}$                                | 48.72                                           |

2.4 不同混交模式对桉树林分土壤养分的影响

从表 4 可以看出,混交林地(除 II 号样地外)表层(0~20 cm)土壤 pH 值与巨尾桉纯林相比差异显著;巨尾桉纯林的土壤 pH 值最低,仅为 4.77,巨尾桉+降香黄檀、巨尾桉+望天树、巨尾桉+格木和巨尾桉+红椎混交林的土壤 pH 值较巨尾桉纯林地分别提高了 4.82%,10.27%,9.64%和 10.90%。由此可见,桉树纯林的种植模式会造成林地土壤的酸化,树种混交有助于减缓土壤酸化。

从土壤有机质含量来看,巨尾桉混交林的表层土壤有机质含量均显著高于巨尾桉纯林( $P<0.05$ ),表现为巨尾桉+红椎混交林( $27.58\text{ g/kg}$ )>巨尾桉+望天树混交林( $24.27\text{ g/kg}$ )>巨尾桉+格木混交林( $22.81\text{ g/kg}$ )>巨尾桉+降香黄檀混交林

( $20.24\text{ g/kg}$ )>巨尾桉纯林( $16.18\text{ g/kg}$ )(表 4)。

从土壤养分含量来看,混交林地表层(0~20 cm)土壤速效 N、速效 P、速效 K、全 N、全 P 和全 K 含量均高于巨尾桉纯林。巨尾桉+红椎混交林表层土壤的速效 N 和全 N 含量均最高,巨尾桉+望天树混交林略低于巨尾桉+格木混交林,而稍高于巨尾桉+降香黄檀混交林。其他土壤养分含量大小均表现为巨尾桉+红椎混交林>巨尾桉+望天树混交林>巨尾桉+格木混交林>巨尾桉+降香黄檀混交林>巨尾桉纯林。方差分析显示,各林分间土壤速效 P 含量差异不显著,其他养分含量均存在显著差异( $P<0.05$ )。总体来看,巨尾桉纯林的种植模式会造成土壤质量下降,树种混交有利于长期维持土壤质量。

表 4 不同混交模式桉树人工林的土壤养分特征

| Table 4 Soil nutrient characteristics of <i>Eucalyptus</i> plantations with different mixing patterns |                                                        |                                                         |                                                        |                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 样地代码<br>Plot code                                                                                     | pH 值<br>pH value                                       | 有机质/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<br>Organic matter | 速效 N/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<br>Available N | 速效 P/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<br>Available P |
| I                                                                                                     | $4.77\pm0.21\text{ a}$                                 | $16.18\pm2.59\text{ a}$                                 | $96.02\pm12.15\text{ a}$                               | $2.07\pm0.74\text{ a}$                                 |
| II                                                                                                    | $5.00\pm0.14\text{ ab}$                                | $20.24\pm2.44\text{ b}$                                 | $117.29\pm9.39\text{ b}$                               | $2.68\pm1.16\text{ a}$                                 |
| III                                                                                                   | $5.26\pm0.18\text{ b}$                                 | $24.27\pm2.05\text{ bc}$                                | $122.03\pm8.44\text{ b}$                               | $2.83\pm0.91\text{ a}$                                 |
| IV                                                                                                    | $5.23\pm0.24\text{ b}$                                 | $22.81\pm2.51\text{ b}$                                 | $124.08\pm6.80\text{ b}$                               | $2.70\pm0.59\text{ a}$                                 |
| V                                                                                                     | $5.29\pm0.19\text{ b}$                                 | $27.58\pm1.60\text{ c}$                                 | $126.34\pm6.41\text{ b}$                               | $2.88\pm0.62\text{ a}$                                 |
| 样地代码<br>Plot code                                                                                     | 速效 K/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<br>Available K | 全 N/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<br>Total N        | 全 P/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<br>Total P       | 全 K/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<br>Total K       |
| I                                                                                                     | $60.28\pm4.48\text{ a}$                                | $0.89\pm0.10\text{ a}$                                  | $0.18\pm0.03\text{ a}$                                 | $0.62\pm0.12\text{ a}$                                 |
| II                                                                                                    | $67.21\pm3.09\text{ b}$                                | $1.06\pm0.26\text{ ab}$                                 | $0.22\pm0.04\text{ ab}$                                | $0.82\pm0.18\text{ ab}$                                |
| III                                                                                                   | $84.57\pm2.94\text{ c}$                                | $1.08\pm0.14\text{ ab}$                                 | $0.26\pm0.03\text{ b}$                                 | $0.92\pm0.14\text{ b}$                                 |
| IV                                                                                                    | $72.89\pm4.46\text{ b}$                                | $1.18\pm0.13\text{ b}$                                  | $0.23\pm0.02\text{ b}$                                 | $0.87\pm0.10\text{ ab}$                                |
| V                                                                                                     | $87.45\pm2.59\text{ c}$                                | $1.26\pm0.18\text{ b}$                                  | $0.28\pm0.03\text{ b}$                                 | $0.99\pm0.08\text{ c}$                                 |

### 3 讨 论

本试验研究表明,混交林中巨尾桉的胸径、枝下高、冠幅以及单株材积均显著高于纯林中巨尾桉,这与前人研究结果<sup>[16-18]</sup>相似。巨尾桉属于速生树种,与其他树种混交时其长期处于林冠层上方,且造林密度降低,个体间的竞争减弱,加上侧光增强,导致其在资源获取方面有着巨大优势,因而长势较纯林好。各林分间的巨尾桉树高生长差异不显著,究其原因:其一,巨尾桉林龄增长到一定阶段后,树体的呼吸消耗增加,树高生长所需养分供给减少<sup>[19]</sup>;其二,桉树林分生长过程中,可利用的土壤养分降低,最终限制了树高生长。这说明巨尾桉树高生长受其生物学特性和林地肥力的共同影响。

尽管混交林中巨尾桉的配植比例减少,其蓄积量有所下降。但从林分总蓄积量来看,巨尾桉+红椎混交林>巨尾桉+望天树混交林>巨尾桉+格木混交林>巨尾桉纯林>巨尾桉+降香黄檀混交林。巨尾桉与 4 种珍贵树种混交造林时,红椎生长表现最优,这与营造混交林能促进红椎生长的研究结果<sup>[20]</sup>一致,是巨尾桉理想的混交树种。

本研究中,混交林的凋落物总存量显著高于巨尾桉纯林,这与桉树+红椿(*Toona ciliata* Roem)混交林的研究结论相似,但与桉树+檫木(*Sassafras tzumu*)、桉树+台湾桤木(*Alnus formosana*)混交林的研究结果<sup>[21]</sup>不同,这可能与混交树种生长特性、生境对林地凋落物的影响较大有关系。混交林半分解层凋落物存量均大于未分解层,巨尾桉纯林则相反,表明混交林提高了凋落物积累量及其分解速率,而纯林的化感作用会抑制微生物对凋落物的分解<sup>[22]</sup>。调查亦发现,巨尾桉纯林的种植模式在一定程度上会造成林地土壤酸化,混交林有助于减缓土壤酸化,这与其他学者的研究结论<sup>[20,23]</sup>基本一致。有学者研究发现,桉树的次生代谢产物——酚酸类物质是造成土壤酸化的主要原因,使得植物生长受到抑制和土壤微生物多样性减少<sup>[24-25]</sup>。

本研究结果显示,混交林表层土壤有机质含量显著高于巨尾桉纯林,这与桉树+台湾桤木混交林提高了土壤有机质含量的研究结论<sup>[26]</sup>基本一致,即凋落物总存量越大,越有利于提高林地土壤有机质。不同混交模式中,巨尾桉+红椎混交林的土壤速效 N 和全 N 含量最高,土壤 pH 值和其他土壤养分含量,总体表现为巨尾桉+红椎混交林>巨尾桉+望天树混交林>巨尾桉+格木混交林>巨尾桉+降香

黄檀混交林>巨尾桉纯林,但各林分间土壤速效 P 含量差异不显著,这可能与我国南方林区土壤普遍缺 P 有关。可见,巨尾桉+红椎混交林最有利于提高林地土壤肥力。

### 4 结 论

不同混交模式对桉树林分生长、凋落物量和土壤养分影响显著。从林分质量和产量的角度考虑,巨尾桉与红椎混交的造林模式在提高林分稳定性、凋落物量和土壤质量方面更具优势,因此建议当地林业生产中,巨尾桉+红椎混交的种植模式应加以推广应用。

### 〔参考文献〕

- [1] 夏体渊,段昌群,张彩仙,等. 桉树人工林与邻近区域群落土壤肥力研究 [J]. 云南大学学报(自然科学版),2010,32(1):118-123.  
Xia T Y, Duan C Q, Zhang C X, et al. A study on the soil fertility in *Eucalyptus robusta* plantation and their adjacent vegetations [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2010, 32(1): 118-123.
- [2] 谢耀坚. 真实的桉树 [M]. 北京:中国林业出版社,2015.  
Xie Y J. The real *Eucalyptus* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2015.
- [3] 易志军. 桉树人工林生态系统中林木生长、养分平衡与地力维护研究 [D]. 长沙:中南林业科技大学,2002.  
Yi Z J. Tree growth and nutrient balance and site productivity maintenance in ecological system of *Eucalyptus* plantations [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2002.
- [4] 王震洪,段昌群,起联春,等. 我国桉树林发展中的生态问题探讨 [J]. 生态学杂志,1998,17(6):64-68,55.  
Wang Z H, Duan C Q, Qi L C, et al. A preliminary investigation of ecological issues arising in the man-made forest of *Eucalyptus* in China [J]. Chinese Journal of Ecology, 1998, 17(6): 64-68, 55.
- [5] 温远光,刘世荣,陈放. 连栽对桉树人工林下物种多样性的影响 [J]. 应用生态学报,2005,16(9):1667-1671.  
Wen Y G, Liu S R, Chen F. Effects of continuous cropping on understorey species diversity in *Eucalypt* plantations [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(9): 1667-1671.
- [6] 郭祥泉. 尾巨桉与马尾松不同混交处理 3 年生造林研究 [J]. 森林与环境学报,2003,23(4):338-342.  
Guo X Q. Study on the afforestation effect of the different mixed treatment stands of three-year-old for *Eucalptus grandis* var and masson pine [J]. Journal of Forest and Environment, 2003, 23(4): 338-342.
- [7] Bristow M, Vanclay J K, Brooks L, et al. Growth and species interactions of *Eucalyptus pellita* in a mixed and monoculture plantation in the humid tropics of north Queensland [J]. Forest

- Ecology and Management, 2006, 233(2/3): 285-294.
- [8] 邓海燕, 莫晓勇, 梅嘉仪, 等. 桉树人工混交林分生长与土壤养分研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 95-102.
- Deng H Y, Mo X Y, Mei J Y, et al. Growth and soil nutrient of *Eucalyptus* mixed plantations [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(1): 95-102.
- [9] 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.
- [10] 莫晓勇, 余雪标, 朱成庆, 等. 桉树人工林培育的理论和方法 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- Mo X Y, Yu X B, Zhu C Q, et al. Theory and method of *Eucalyptus* plantation cultivation [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005.
- [11] 广西林业勘测设计院. 森林调查手册 [M]. 南宁: 广西科技出版社, 1985.
- Guangxi Forestry Survey and Design Institute. Forest survey manual [M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 1985.
- [12] 洪 舟, 刘福妹, 张宁南, 等. 降香黄檀生长性状家系间变异与优良家系初选 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(4): 106-112.
- Hong Z, Liu F M, Zhang N N, et al. Growth traits variation among families and preliminary selection of superior families in *Dalbergia odorifera* T. Chen [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2018, 42(4): 106-112.
- [13] 郭文福, 蔡道雄, 贾宏炎, 等. 马尾松与红椎等3种阔叶树种营造混交林的生长效果 [J]. 林业科学研究, 2010, 23(6): 839-845.
- Guo W F, Cai D X, Jia H Y, et al. An analysis of the growth and structure of mixed plantations consisted of *Pinus massoniana* and broadleaf species [J]. Forest Research, 2010, 23(6): 839-845.
- [14] 卢立华, 蔡道雄, 何日明, 等. 桂西南不同树种人工林评价研究 [J]. 林业科学研究, 2006, 19(2): 145-150.
- Lu L H, Cai D X, He R M, et al. Evaluation of tree species of plantation in Southwest Guangxi [J]. Forest Research, 2006, 19(2): 145-150.
- [15] 国家林业局. 森林土壤分析方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- State Forestry Administration. Forest soil analysis method [S]. Beijing: China Standard Press, 1999.
- [16] 杨曾奖, 徐大平, 陈文平, 等. 华南地区桉树/相思混交种植的林木生长效应 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 27-32.
- Yang Z J, Xu D P, Chen W P, et al. Growth effect of *Eucalyptus-acacia* mixed plantation in South China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(10): 27-32.
- [17] 张 帅, 陈翠湖, 梁远文, 等. 桂东地区桉树与大叶栎混交造林初步研究 [J]. 中国农学通报, 2017, 33(3): 94-98.
- Zhang S, Chen C H, Liang Y W, et al. Mixed planting of *Eucalyptus grandis*  $\times$  *E. urophylla* and *Castanopsis fissa* in Eastern Guangxi [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(3): 94-98.
- [18] 刘 军. 三年半生灰木莲、香梓楠与尾巨桉混交的初步研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- Liu J. A preliminary study on the mixing of *Manglietia glauca*, *Michelia hedyosperma* and *Eucalyptus robusta* in three and a half years old [D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [19] 何春霞. 树高极限的水分限制机理研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- He C X. Mechanism of hydraulic limitation on tree height [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [20] 卢立华, 汪炳根, 何日明. 立地与栽培模式对红椎生长的影响 [J]. 林业科学研究, 1999, 12(5): 519-523.
- Lu L H, Wang B G, He R M. The effect of site and cultivation model on growth of *Castanopsis hystrix* [J]. Forest Research, 1999, 12(5): 519-523.
- [21] 赵燕波, 纪托末, 张丹桔, 等. 3个树种与巨桉混交土壤理化性质、凋落物量和养分含量特征 [J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(5): 948-953.
- Zhao Y B, Ji T W, Zhang D J, et al. Soil physico-chemical properties, biomass and nutrient contents of forest litter in mixed plantations of *Eucalyptus grandis* and three tree species [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2015, 21(5): 948-953.
- [22] 魏 强, 张广忠, 凌 雷, 等. 甘肃兴隆山主要森林类型凋落物及土壤层的蓄水功能 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(2): 78-84.
- Wei Q, Zhang G Z, Ling L, et al. Water conservation function of litter and soil layer under main forest types in Xinglong mountain of Gansu [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2013, 37(2): 78-84.
- [23] 刘小香, 谢莲莲, 陈秋波, 等. 桉树化感作用研究进展 [J]. 热带农业科学, 2004, 24(2): 54-61.
- Liu X X, Xie L L, Chen Q B, et al. A review of allelopathic researches on *Eucalyptus* [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2004, 24(2): 54-61.
- [24] Liang J, Reynolds T, Wassie A, et al. Effects of exotic *Eucalyptus* spp. plantations on soil properties in and around sacred natural sites in the northern Ethiopian Highlands [J]. AIMS Agriculture and Food, 2016, 1(2): 175-193.
- [25] 张玲玉, 赵学强, 沈仁芳. 土壤酸化及其生态效应 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1900-1908.
- Zhang L Y, Zhao X Q, Shen R F. Soil acidification and its ecological effects [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6): 1900-1908.
- [26] 李艳红, 罗承德, 杨万勤, 等. 桉-栎混合凋落物分解及其土壤动物群落动态 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 25-30.
- Li Y H, Luo C D, Yang W Q, et al. Decomposition of eucalyptus-alder mixed litters and dynamics of soil faunal community [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4): 25-30.