

马尾松-湿加松混交林与马尾松纯林生长量及林下植被特征分析

黄欣宇¹, 黄春晖², 聂锦燕¹, 叶锦培¹, 邓文军¹, 蒋维昕²

(1. 苍梧县国有天洪岭林场, 广西 苍梧 545005; 2. 广西大学 林学院, 国家林业和草原局中南速生材繁育重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 对苍梧县国有天洪岭林场 12 年生马尾松 *Pinus massoniana* (桐棉种源)-湿加松 *P. elliottii* × *P. caribaea* 人工混交林及桐棉种源、土贡种源马尾松人工纯林进行调查分析, 研究种源、林分类型对林木生长量以林下植被特征的影响。结果表明: 马尾松-湿加松混交林的树高生长量显著高于桐棉种源、土贡种源马尾松纯林 ($P < 0.05$); 马尾松-湿加松混交林中树木的平均胸径 (14.96 cm) 与土贡种源马尾松纯林 (15.06 cm) 相当, 但显著低于桐棉种源马尾松纯林 (15.90 cm) ($P < 0.05$); 马尾松-湿加松混交林与桐棉种源马尾松纯林在单株材积上无显著差异 ($P > 0.05$), 但优于土贡种源 ($P < 0.05$); 马尾松-湿加松混交林内马尾松的生长显著优于湿加松; 从多样性指标均值看, 混交林灌木层植被的多样性较纯林高。综上, 营造马尾松-湿加松混交林在林分生长及林下植被多样性维持方面均优于马尾松纯林, 且桐棉种源马尾松相对土贡种源马尾松及湿加松均具有显著生长优势。本研究结果为马尾松人工林的经营提供了一定参考。

关键词: 混交林; 纯林; 生长量; 植被特征; 马尾松; 湿加松

中图分类号: S725.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3776 (2022) 04-0030-07

Growth and Understory Vegetation Characters of Mixed Plantation of *Pinus massoniana* and *P. elliottii* × *caribaea* and Pure *P. massoniana* Plantation

HUANG Xin-yu¹, HUANG Chun-hui², NIE Jin-yan¹, YE Jin-pei¹, DENG Wen-jun¹, JIANG Wei-xin²

(1. Cangwu State-owned Tianhongling Forest Farm of Guangxi, Cangwu 545005, Guangxi, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration for Fast-growing Wood Breeding and Cultivation in Central and South China, College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In March 2006, 1-year bare-root seedlings of different provenances of *Pinus massoniana* and *P. elliottii* × *caribaea* were planted under three group on the same slope in State-owned Tianhongling Forest Farm, Cangwu, Guangxi. Stand of pure *P. massoniana* (Tongmian provenance, TM), pure *P. massoniana* (Tugong provenance, TG), mixed TM and *P. elliottii* × *caribaea* (MIX) formed 3 groups. In 2018, quadrat investigations showed that height growth of MIX was significantly higher than that of two pure stands ($P < 0.05$). There was no significant difference of individual tree volume between MIX and TM, but obviously higher than that of TG. Growth of *P. massoniana* was better than that of *P. elliottii* × *caribaea* in the MIX. Shrub layer diversity under MIX had higher values than that under pure stands.

Key words: mixed stand; pure stand; growth; vegetation property; *Pinus massoniana*; *Pinus elliottii* × *P. caribaea*

马尾松 *Pinus massoniana* 是我国南方山地主要的造林树种之一。长期的人工纯林经营导致林分环境恶化、地

收稿日期: 2021-12-14; 修回日期: 2022-05-18

基金项目: 广西自然科学基金 (2018GXNSFBA281110)

作者简介: 黄欣宇, 助理工程师, 从事森林培育研究; E-mail: yue2005@126.com。通信作者: 蒋维昕, 博士, 讲师, 从事林木种质资源与遗传多样性研究; E-mail: jwx_1985@163.com。

力衰退、土壤酸化、生产力低下等诸多问题,而混交林能有效改善林地生态环境、提升林下植被多样性、改良土壤肥力状况,从而促进林木的生长。混交模式和混交比例是决定混交林生产力水平的重要因素,也是营造混交林的技术关键。罗炼平等^[1]对马尾松人工纯林与混交林进行了对比分析,发现混交林中马尾松的树高、胸径、材积年均生长量均显著高于纯林的;马尾松与木荷 *Schima superba*、红锥 *Castanopsis hystrix* 等阔叶树种的混交效应研究表明,适度混交可有效提升林分生物量^[2-5]、林下植被多样性^[6];马尾松混交林(马尾松-杉木 *Cunninghamia lanceolata*、马尾松-杜仲 *Eucommia ulmoides*、马尾松-枫香树 *Liquidambar formosana*)比马尾松纯林在木材蓄积量、林分小气候条件的改善及土壤的有机质含量上均有所提高^[7]。尽管前人对松阔(松树-阔叶树)及松杉(松树-杉木)混交林生长及林下植被进行了诸多研究,但不同松树混交对林分生长及林下植被的影响鲜见报道。湿加松 *Pinus elliottii* × *P. caribaea* 是湿地松 *P. elliottii* 与加勒比松 *P. caribaea* 的种间杂种,经过选育的湿加松杂种具有比亲本产脂量高、生长快及适应性强等优势^[8-9],可作为脂材两用林进行培育^[10-11]。鉴于此,本研究以 1 个马尾松-湿加松混交林和 2 个 12 年生马尾松种源人工纯林为对象,分析相同立地其生长量及林下植被特征差异,以期对马尾松林人工林的合理培育和经营提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于广西壮族自治区梧州市苍梧县国有天洪岭林场 16 林班,地理坐标为 111°12' ~ 111°17' E, 23°42' ~ 23°43' N,属亚热带季风气候,年均气温为 21.3℃,无霜期为 331 d, ≥10℃ 年积温为 7 029℃,年均降水量为 1 503.6 mm,年均相对湿度为 78%。试验区域地形为低山,海拔在 482 m ~ 589 m,坡向东南,坡度为 20° ~ 30°,土壤类型为红壤,质地为黏质壤土,土层厚度在 1 m 以上。试验地前茬树种为杉木人工林,造林材料包括马尾松桐棉种源、土贡种源实生苗以及湿加松实生苗,其中桐棉种源马尾松、湿加松种子来源于广西壮族自治区林业种苗站,土贡种源马尾松种子为天洪岭林场母树林自由授粉种子。造林模式为将同一坡面块区划为 3 块(每块面积约为 1.5 hm²) (图 1、图 2),块状营造马尾松土贡种源纯林(TG)、桐棉种源纯林(TM)、马尾松(桐棉种源)-湿加松混交林(PM-SJ),混交比例为 0.52,混交方式为随机点状混交(即:每行随机混种马尾松和湿加松)。造林时间均为 2006 年 3 月,1 年生裸根苗造林,植穴规格为 30 cm × 40 cm × 30 cm,每穴施基肥为过磷酸钙 0.25 kg,初植株行距 2 m × 3 m,造林后连续三年每年抚育 2 次,主要进行砍草除杂。造林后林分未进行间伐,经林分郁闭与自然稀疏,2018 年,基于样方调查获得林分密度信息见表 1。

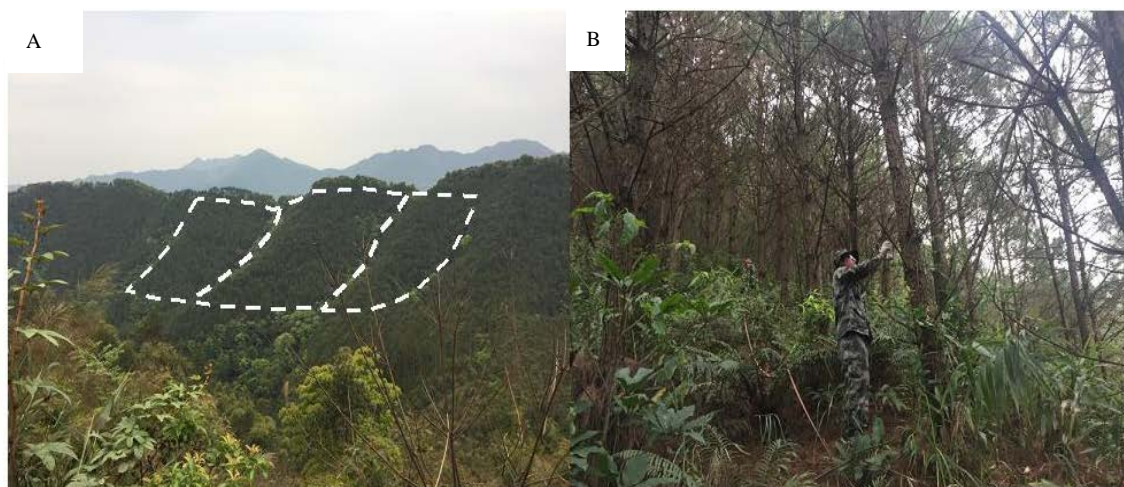
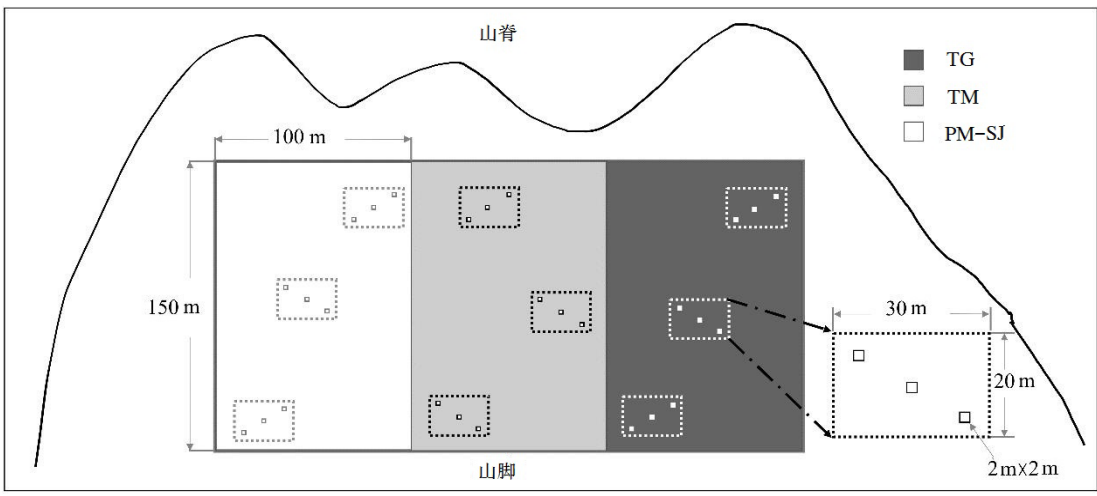


图 1 试验林地远眺(A)及样方调查(B)(2018 年 1 月摄)

Figure 1 Experimental area (A) and investigation of quadrat (B)



注：TG、TM 和 PM-SJ 在每个试验林分（粗实线框）内的上、中、下坡位各设置一个 20 m×30 m 样方（虚线框），各样方内沿对角线设置 3 个 2 m×2 m 样方（细实线框）。

图 2 试验样地设置示意图
Figure 2 The schematic diagram of experimental area

1.2 样地调查

1.2.1 生长量调查 2018 年 1 月，采用样方调查法，在每个林分
的上、中、下坡分别设置一个样方，每个样方面积为 20 m×30 m，
3 个林分共计 9 个样方（图 2），同时记录各样地的经纬度、海拔、
坡位等信息。对样方内目标树种进行每木检尺，测定指标包括树高、
胸径（树高采用可伸缩测高杆进行测定，精度为 10 cm；胸径采用
围径尺测定，精度为 1 mm），并根据测定的树高和胸径估算单株
材积（V）^[12]：

$$V = 0.714\ 265\ 437 \times 10^{-4} \times D^{1.867\ 008} \times H^{0.901\ 463\ 2}$$

1.2.2 林下植被调查 在每个生长量调查样方内沿对角线设置 3 个小样方（2 m×2 m），共计 27 个样方（图 2），
调查样方内的植被，调查内容包括植被种类、数量、平均高、盖度等。

1.3 数据分析

1.3.1 林分生长量差异 采用 Microsoft Excel 2010 进行数据录入和整理，利用统计软件 R 4.0.3 及其扩展包^[13-14]
进行林分间各指标的差异分析及结果绘图，并用 Tukey HSD 法进行多重比较。巢式方差分析模型为： $y_{ijk} = \mu +$
 $\alpha_i + \beta_{j(i)} + \varepsilon_{ijk}$ ，其中： y_{ijk} 表示样方内各植株的观测值， μ 为总体均值， α_i 为林分效应， $\beta_{j(i)}$ 为林分内样方
（坡位）效应， ε_{ijk} 为随机误差。

1.3.2 林下植被多样性 运用物种重要值（IV）、Shannon-Wiener 多样性指数（H'）、Simpson 多样性指数（D）、
Pielou 均匀度指数（J）和物种丰富度指数（S）描述群落的物种多样性特征^[15-16]。

（1）灌、草层重要值（IV）：

- $IV = (\text{相对盖度} + \text{相对密度} + \text{相对频度}) / 3 \times 100\%$
相对盖度 = 样方内某个种的盖度/样方内所有种的总盖度×100%
相对密度 = 样方内某个种的株数/样方内所有种的总株数×100%
相对频度 = 样方内某个种出现的次数/样方内所有种出现的总次数×100%
（2）物种丰富度指数：

表 1 林分密度概况 Table 1 Stand density in 2018		
林分类型		林分密度/（株·hm ⁻² ）
TG		1 150
TM		1 172
PM-SJ	马尾松	505
	湿加松	983
	总计	1 488

(3) Shannon-Wiener 指数:

$$S = n$$
$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

(4) Simpson 指数:

$$D = \sum_{i=1}^S P_i^2$$

(5) Pielou 均匀度指数:

$$E = \frac{H'}{H'_{\max}}$$

上述各式中, n 为样地内个体数量 (丰度) 大于 0 的物种类型总数量; S 为样地中出现的物种数量 $P_i = \frac{n_i}{N}$, n_i 为样地内某个种的个体数量, N 为样地内总个体数量。

2 结果与分析

2.1 林分生长

不同林分及林分内不同坡位单株材积总生长量的方差分析结果见表 2, 对其进一步多重比较结果见表 3。

表 2 不同林分及林分内不同坡位单株生长性状的方差分析 Table 2 ANOVA on tree height, DBH and individual tree volume of different plantations and slope						
指标	变异来源	自由度	III 型 SS	均方	F 值	P 值
树高	林分	2	74.247 62	37.123 81	15.41	2.87 e ⁻⁷
	坡位 (林分)	6	174.073 78	29.012 30	12.04	7.13 e ⁻¹³
胸径	林分	2	115.771 63	57.885 81	4.89	0.007 8
	坡位 (林分)	6	159.379 79	26.563 30	2.24	0.037 5
材积	林分	2	0.029 03	0.014 51	4.53	0.011 2
	坡位 (林分)	6	0.077 23	0.012 87	4.01	0.006 0

表 3 不同林分树高、胸径和材积生长量差异比较 Table 3 The growth difference on H, D and V among the three plantations				
林分类型		树高/m	胸径/cm	单株材积/(m ³ ·株 ⁻¹)
TG		11.459±0.513B	14.771±0.113B	0.079±0.005B
TM		11.718±0.875B	15.992±0.939A	0.089±0.016A
PM-SJ	马尾松	12.511±0.514Aa	15.614±1.107Ba	0.128±0.020ABa
	湿加松	12.057±0.351Aa	14.507±0.584Bb	0.107±0.011ABb

注: 同列中大写字母代表林分间差异极显著 ($P < 0.05$), 小写字母代表混交林内树种间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

由表 2 可知, 3 种林分的平均树高、平均胸径生长量均存在极显著差异, 平均单株材积生长量存在显著差异。多重比较结果表明 (表 3), 树高性状以马尾松-湿加松混交林生长最好, 其次为桐棉种源马尾松纯林, 土贡种源马尾松纯林最差。从胸径来看, 桐棉种源马尾松纯林平均胸径生长量分别显著高于土贡种源马尾松纯林 ($P < 0.05$) 和马尾松-湿加松混交林 ($P < 0.05$)。在单株材积上, 桐棉种源马尾松纯林与马尾松-湿加松混交林无显著差异, 但优于土贡种源马尾松纯林 ($P < 0.05$)。对马尾松-湿加松混交林内两个树种进行对比分析, 发现两者在平均树高生长量上无显著差异, 但在平均胸径上差异显著 ($P < 0.05$), 在平均材积上差异极显著 ($P < 0.01$), 表明混交状态下马尾松的生长量总体优于湿加松的生长量。同时, 混交林中马尾松在平均树高、平均

单株材积生长量上均明显高于桐棉种源和土贡种源马尾松纯林（表 3）。此外，从林分内不同坡位来看，平均树高、平均胸径和平均单株材积 3 个性状在不同坡位间均存在显著或极显著差异（表 2），表明坡位对林分生长有显著影响。

2.2 林下灌木层物种重要值组成

由表 4 可知，不同林分具有不同的优势灌木，在土贡种源马尾松纯林的灌木层中，重要值排名前五位的是玉叶金花 *Mussaenda pubescens*、粗叶榕 *Ficus hirta*、木荷 *Schima superba*、枫香树 *Liquidambar formosana* 和鹅掌柴 *Schefflera heptaphylla*；在桐棉种源马尾松纯林的灌木层中，重要值排名前五位的分别是钩藤 *Uncaria rhynchophylla*、粗叶榕、鹅掌柴、玉叶金花和木荷；在马尾松-湿加松混交林灌木层中，重要值排名前五位的分别是玉叶金花、木荷、黄毛榕 *Ficus esquiroliana*、粗叶榕和鹅掌柴。总体上，玉叶金花、木荷、粗叶榕及鹅掌柴在 3 个林分中均具有相对较高的重要值。

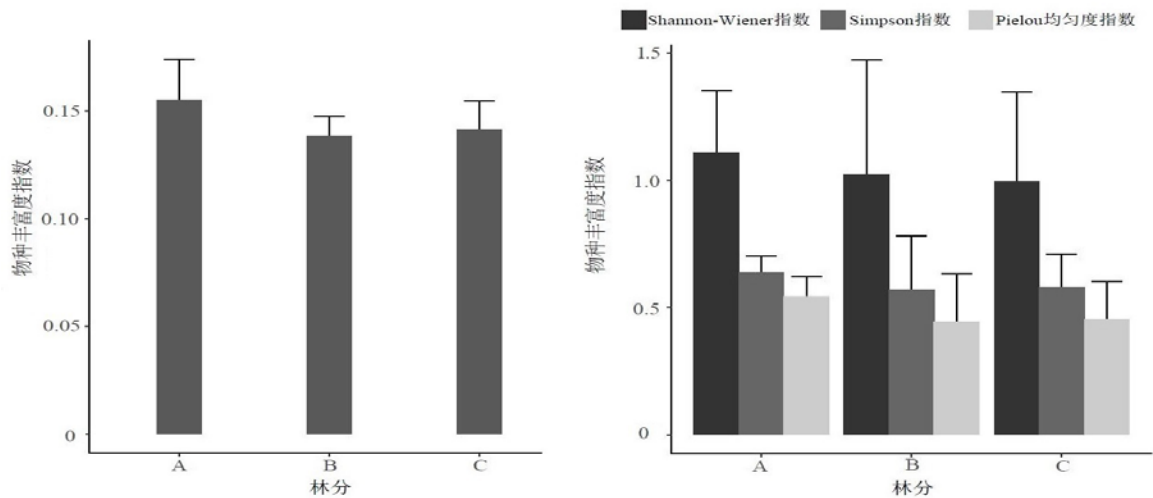
表 4 不同林分林下灌木层物种重要值
Table 4 The important value at shrub layer in different plantations

物种	种要值/%		
	马尾松-湿加松混交林	土贡种源马尾松纯林	桐棉种源马尾松纯林
玉叶金花 <i>Mussaenda pubescens</i>	72.15	81.89	37.89
木荷 <i>Schima superba</i>	55.63	47.15	21.17
粗叶榕 <i>Ficus hirta</i>	25.08	50.84	54.97
鹅掌柴 <i>Schefflera heptaphylla</i>	18.29	22.91	45.86
银柴 <i>Aporosa dioica</i>	6.45	5.33	3.05
野漆 <i>Toxicodendron succedaneum</i>	7.80	9.10	
白叶莓 <i>Rubus innominatus</i>	15.71		3.05
檫木 <i>Padus buergeriana</i>	10.70		12.57
野牡丹 <i>Melastoma malabathricum</i>	10.70		3.05
山莓 <i>Rubus corchorifolius</i>	7.90		4.40
钩藤 <i>Uncaria rhynchophylla</i>	7.80		68.30
黄毛榕 <i>Ficus esquiroliana</i>	37.50		5.82
菝葜 <i>Smilax china</i>		6.27	5.82
草珊瑚 <i>Sarcandra glabra</i>		5.33	6.09
水团花 <i>Adina pilulifera</i>	7.80		3.05
粗叶悬钩子 <i>Rubus alceaefolius</i>	6.45		
杜茎山 <i>Maesa japonica</i>	5.01		
腺柳 <i>Salix chaenomeloides</i>	5.01	5.33	
枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>		25.95	
三桠苦 <i>Melicope pteleifolia</i>		15.17	
烟斗柯 <i>Lithocarpus corneus</i>		13.48	
闽楠 <i>Phoebe bournei</i>		6.68	
厚壳树 <i>Ehretia acuminata</i>		6.27	
细齿叶柃 <i>Eurya nitida</i>		5.33	
红楠 <i>Machilus thunbergii</i>			5.82
独行千里 <i>Capparis acutifolia</i>			5.82
绒毛润楠 <i>Machilus velutina</i>			5.82
九节 <i>Psychotria asiatica</i>			4.40
大头橐吾 <i>Ligularia japonica</i>			3.05

2.3 林下植被多样性

从样地内林下植被物种丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数以及 Pielou 均匀度指数（图 3）来看，林分间均不存在显著差异（ $P > 0.05$ ），但从均值变化整体趋势来看，马尾松-湿加松混交林在物种丰富度

上相对较低,但在 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数及 Pielou 均匀度指数上均高于纯林。桐棉种源和土贡种源马尾松纯林的各项指数均较低且两者基本相当,表明混交林有助于增加林下植被多样性。



注: A 表示马尾松-湿加松混交林; B 表示桐棉种源马尾松纯林; C 表示土贡种源马尾松纯林。

图 3 不同林分林下植物多样性指数

Figure 3 Plant diversity index under different plantations

3 讨论与结论

3.1 讨论

混交林相对于纯林,具有诸多优势,包括提高林分生产率、增加林分稳定性等。在本研究中,相同立地条件下,12 年生的马尾松-湿加松混交林在平均树高生长量上显著高于同龄的桐棉种源和土贡种源马尾松纯林。尽管混交林中马尾松的平均胸径略低于桐棉种源马尾松的,但其平均单株材积与生长表现较好的桐棉种源马尾松无显著差异,这在一定程度上表明了马尾松-湿加松混交林在单位面积林分蓄积上可能具有更大优势。多数研究表明,松-阔混交的生长表现优于纯林的^[1,4,17],本研究结果表明松-松混交对林分生长亦有明显的促进作用。湿加松早期的生长表现总体优于马尾松的^[18],但后期的生长慢于马尾松的^[9],这与本研究结论一致,12 年生湿加松在树高、胸径及单株材积上均小于桐棉种源马尾松。广西宁明桐棉种源马尾松生长表现优良,在以往多地种源试验中表现突出^[12,19-20],是最早通过国家审定的马尾松种源良种之一(良种编号:国 S-SP-PM-003-2002)。而广西苍梧土贡种源马尾松(良种编号:桂 S-SP-PM-013-2012)也表现出较好的生长、产脂力及木材特性^[21-22]。本研究首次对两者在相同立地下的生长表现进行了评价,结果表明,桐棉种源马尾松在生长量上总体优于土贡种源马尾松,进一步证实了桐棉种源马尾松在遗传品质上的优越性。

林下植被对人工林生态系统的多样性、稳定性、物质循环和能量流动等结构和功能的维持起着重要作用^[23-25]。本研究参试林分间在林下植被多样性参数上未检测到显著差异,但混交林下植被在物种丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数以及 Pielou 均匀度指数四个指标上均略高于 2 个马尾松纯林。需要指出的是,一些研究表明林分密度的增加会造成林下植被多样性下降^[26-28],而本研究中马尾松-湿加松混交林的密度(1 489 株·hm⁻²)明显高于 2 个马尾松纯林的(1 172 株·hm⁻²; 1 150 株·hm⁻²),如适度间伐降低密度,马尾松-湿加松混交林林下植被多样性有望更高。除了密度效应,马尾松林乔木层树种混交模式可能还影响林地土壤的理化性质及酶活性,从而改善林地表层土壤状况^[29-30];另一方面,马尾松-湿加松混交林综合了马尾松和湿加松的特征,更易导致生境的异质性,为物种的侵入创造了条件。影响林下植被多样性的机制较为复杂,通常是多因子作用的结果,本研究仅基于单点试验探究了树种、坡位、林分类型对林下植被的影响,在未来的研究中可考虑人工控制不同混交比例、林分密度并结合土壤理化性质、微生物群落差异等,进一步探讨林下植被多样性与

其影响因子之间的关系。

3.2 结论

营造马尾松-湿加松混交林在林分生长及林下植被多样性维持方面均优于马尾松纯林,意味着营造松-松人工混交林有望获得更高的经济和生态效益。桐棉种源马尾松相对土贡种源马尾松及湿加松均具有显著生长优势,表明来自桂西南的桐棉种源马尾松良种在桂东南地区仍具有突出的遗传表现。本研究结果为马尾松人工林经营提供了一定参考。

参考文献:

- [1] 罗炼平,舒文波,聂海泉,等.马尾松土贡种源纯林与混交林生长量和产脂力比较[J].广西林业科学,2013(1):66-70.
- [2] 覃林,何友均,李智勇,等.南亚热带红椎马尾松纯林及其混交林生物量和生产力分配格局[J].林业科学,2011,47(12):17-21.
- [3] 李方兴,张意苗,易伟东,等.马尾松、木荷纯林及混交林的生长差异分析[J].南方林业科学,2016,44(5):17-20.
- [4] 王青天.马尾松纯林改造成混交林效果评价[J].中南林业科技大学学报,2012(12):162-166.
- [5] 何友均,梁星云,覃林,等.南亚热带马尾松红椎人工林群落结构,物种多样性及基于自然的森林经营[J].林业科学,2013,49(4):24-33.
- [6] 黎芳,潘萍,宁金魁,等.马尾松-木荷不同比例混交林林下植被物种组成及其多样性分析[J].西北林学院学报,2016,31(6):34-40.
- [7] 韩锦春,李宏开.马尾松混交林混交模式的多层次综合评判[J].植物生态学报,2000,24(4):498-501.
- [8] 李义良,赵奋成,吴惠姝,等.湿加松亲本间遗传距离与杂种优势的相关性分析[J].林业科学研究,2012,25(2):138-138.
- [9] 沈熙环,黄永权.广东省湿加松良种选育和推广进展[J].林业实用技术,2018(1):74-75.
- [10] 易敬林,覃雯霞,陈元松,等.17.8 a生澳大利亚湿加松在桂中的生长表现[J].林业与环境科学,2018,34(6):112-118.
- [11] 吴东山,韦海,颜培栋,等.林分密度及立地条件对湿加松生长与产脂的影响[J].西南林业大学学报,2018,38(3):51-56.
- [12] 冯源恒,李火根,杨章旗,等.广西马尾松三个优良种源的遗传多样性及生长性状变异分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(6):67-72.
- [13] WICKHAM H. Ggplot2: elegant graphics for data analysis[M/OL]. Springer-Verlag New York, 2016.<https://ggplot2.tidyverse.org>.
- [14] R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing[M/OL]. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2020.<https://www.R-project.org/>.
- [15] 姜俊,刘宪钧,贾宏炎,等.杉木人工林近自然化改造对林下植被多样性和土壤理化性质的影响[J].北京林业大学学报,2019,41(5):174-181.
- [16] 林晗,吴承祯,陈辉,等.杉木-千年桐人工混交林种内种间竞争关系分析[J].森林与环境学报,2014,34(4):316-321.
- [17] 王青天.福建柏与马尾松混交造林模式的环境效应与生长分析[J].西北林学院学报,2013(3):126-130.
- [18] 凌绍明.澳大利亚杂交松在广西引种试验研究[J].广西林业科学,2007,36(4):192-195.
- [19] 刘青华,金国庆,张蕊,等.24年生马尾松生长,形质和木材基本密度的种源变异与种源区划[J].林业科学,2009,45(10):55-61.
- [20] 徐立安,陈天华,王章荣.马尾松种源子代材性变异与制浆造纸材优良种源选择[J].南京林业大学学报(自然科学版),1997,21(2):1-6.
- [21] 温佐吾,谢双喜,齐新民,等.对6个种源马尾松林分生长及经济效益的初步分析[J].山地农业生物学报,1998(06):332-336.
- [22] 廖宝生.马尾松广西优良种源引种试验[J].林业科技开发,1998(2):36-37.
- [23] KERMAVNAR J, KUTNAR L. Patterns of understory community assembly and plant trait-environment relationships in temperate SE European forests[J]. Diversity, 2020, 12(3): 91.
- [24] MOORA M, OPIK M, ZOBEL K, et al. Understory plant diversity is related to higher variability of vegetative mobility of coexisting species[J]. Oecologia, 2009, 159(2): 355-361.
- [25] WHIGHAM D F. Ecology woodland herbs in temperate deciduous forests[J]. Annu Rev Ecol Syst, 2004, 35: 583-621.
- [26] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等.马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响[J].应用生态学报,2009,20(10):2323-2331.
- [27] 张柳桦,齐锦秋,李婷婷,等.林分密度对新津文峰山马尾松人工林林下物种多样性和生物量的影响[J].生态学报,2019,39(15):335-343.
- [28] ALI A, DAID, AKHTAR K, et al. Response of understory vegetation, tree regeneration, and soil quality to manipulated stand density in a *Pinus massoniana* plantation[J]. Glob Ecol Conserv, 2019, 20: e00775.
- [29] 林惠章,郭孝玉,欧阳勋志,等.飞播马尾松纯林补植木荷后土壤酶活性与土壤养分变化[J].东北林业大学学报,2015,43(07):136-139.
- [30] 雷蕾,肖文发,曾立雄,等.三峡库区2种马尾松混交林土壤团聚体酶活性分布特征[J].生态学报,2020,40(17):6179-6188.