

文章编号:1673-887X(2026)06-0129-03

广西红椎与马尾松混交造林模式 对林下植物多样性的调控试验

郭燕燕, 黄 云

(广西壮族自治区国有六万林场, 广西壮族自治区 玉林 537000)

摘 要 为探究红椎与马尾松混交造林对林下植物多样性的调控效应,在广西壮族自治区国有六万林场设置了不同混交比例及纯林对照试验。结果表明:混交处理显著提升林下植物多样性,其中 ζ (红椎:马尾松)=(3:7)~(5:5)处理的灌木层Shannon指数较马尾松纯林提高62%以上,呈现“单峰”变化趋势。环境驱动机制分析显示,混交比例通过降低郁闭度、改善林下光照并促进土壤养分积累,间接驱动多样性提升(总效应0.71)。推荐采用 ζ (红椎:马尾松)=(3:7)~(5:5)的同龄行间混交模式,以实现林木生长与生物多样性协同提升。

关键词 红椎;马尾松;混交造林;林下生物;多样性;广西

中图分类号 S718.5

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1673-887X.2026.06.043

Experimental Study on the Regulation of Understory Plant Diversity by the Mixed Forest Planting Model of *Castanopsis hystrix* and *Pinus massoniana* in Guangxi

Guo Yanyan, Huang Yun

(State-owned Liuwan Forest Farm of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Yulin 537000,

Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

Abstract: To investigate the regulatory effect of *Castanopsis hystrix* and *Pinus massoniana* mixed planting on the diversity of understory plants, experiments with different mixed planting ratios and pure forest control were set up at the state-owned Liuwan Forest Farm in Guangxi Zhuang Autonomous Region. The results showed that the mixed planting treatment significantly enhanced the diversity of understory plants. Among them, the Shannon index of the shrub layer in the treatment with ζ (*Castanopsis hystrix*: *Pinus massoniana*)=(3:7)~(5:5) was more than 62% higher than that of the pure *Pinus massoniana* forest, presenting a "single peak" change trend. The analysis of environmental driving mechanisms revealed that the mixed planting ratio indirectly promoted diversity enhancement by reducing canopy density, improving understory light conditions, and promoting soil nutrient accumulation (total effect 0.71). It was recommended to adopt the same-age inter-row mixed planting mode with ζ (*Castanopsis hystrix*: *Pinus massoniana*)=(3:7)~(5:5) to achieve the coordinated improvement of forest growth and biodiversity.

Key words: *Castanopsis hystrix*; *Pinus massoniana*; mixed planting; understory plants; diversity; Guangxi

马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)是我国南方重要的用材树种之一,大面积马尾松纯林经营,导致林下植被退化、土壤养分单一消耗、生物多样性下降及生态服务功能减弱等问题持续加重^[1]。近年来,广西大力推行树种结构调整和森林质量精准提升工程,鼓励采用乡土阔叶树种对针叶纯林进行混交改造,以改善纯林的生态现状。红椎(*Castanopsis hystrix* Hook. f. & Thomson ex A. DC.)具有生长快、材质优、凋落物易分解等特点,是理想的混交伴生树种^[2]。为此,本试验以广西马

尾松人工林为对象,设置不同红椎与马尾松混交比例和混交类型,研究混交造林模式对林下植物多样性的调控效应及其环境驱动机制。

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国有六万林场。此处为亚热带季风气候区,年均温21.5℃,年均降水量1350~1500mm,干湿季分明(5月—9月为雨季)^[3]。土

收稿日期 2026-02-27

作者简介 郭燕燕(1987-),女,广西武宣人,经济师,研究方向为林业工程。

通信作者 黄 云,高级工程师,E-mail:1045142303qq.com。

壤为砂页岩发育而成的赤红壤,土层厚度>80 cm,pH值4.5~5.5。试验前为15 a生马尾松人工纯林采伐迹地,立地条件基本一致,海拔280~340 m,坡度15°~25°。

1.2 试验设计

采用随机区组设计,设置6个造林处理(含2个纯林对照和4个混交处理),另设同龄混交与异龄混交2个亚处理(异龄混交:先栽马尾松5 a后补植红椎)。具体如下: T_1 (CK_1),马尾松纯林(100%马尾松); T_2 (CK_2),红椎纯林(100%红椎); T_3 , ζ (红椎:马尾松)=1:9(株数比); T_4 , ζ (红椎:马尾松)=3:7; T_5 , ζ (红椎:马尾松)=5:5; T_6 , ζ (红椎:马尾松)=7:3。

每种处理设置3个重复样地,样地面积900 m²,样地间设10 m隔离带。造林密度均为1 667株/hm²,同龄混交采用行间混交(2行马尾松1行红椎交替),异龄混交马尾松先定植,5年后在马尾松行间补植红椎。

1.3 林下植被调查

2023年7月—8月(造林后第10年)进行植被调查。在每个样地内设置5个5 m×5 m灌木样方(四角及中心)和5个1 m×1 m草本样方(位于灌木样方内)。记录所有维管植物的种名、株数(丛数)、盖度、平均高度;对灌木层同时记录地径和基径。依据《广西植物志》进行物种鉴定。

1.4 环境因子测定

(1)林分结构参数:对样地内胸径≥5 cm的林木进行每木检尺,计算平均胸径、平均树高、林木密度、混交度(按最近邻体法)和郁闭度(采用冠层分析仪或样点目测法)。

(2)林下光照:使用HemiView冠层分析系统(英国Delta-T公司)于晴天正午拍摄鱼眼照片,计算冠层开放度和光合有效辐射透过率;同时用Li-250A光照计在离地面1.3 m处网格法测定相对光照强度。

(3)土壤样品采集与分析:在每个灌木样方旁按S形布点,用土钻采集0~20 cm、20~40 cm土层样品,同层混合。测定项目包括:pH值(电位法)、有机质(重铬酸钾外加热法)、全氮(凯氏定氮法)、全磷(NaOH熔融-钼锑抗比色法)、全钾(火焰光度法)、碱解氮(碱解扩散法)、速效磷(盐酸-氟化铵法)、速效钾(乙酸铵浸提—火焰光度法)。同时用环刀取原状土测定密度。

(4)凋落物层:在每个样方内随机设置3个30 cm×30 cm小样方,收集凋落物(未分解层和半分解层),65℃烘干称重,测定现存量;测量凋落物厚度。

1.5 数据处理

计算以下多样性指数。

物种丰富度(S):样方内物种数;

Shannon-Wiener 指数:

$$H' = -\sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i). \quad (1)$$

式中: H' 为多样性指数,越大表示物种多样性越高; S 为物种总数; P_i 为第*i*个物种的个体数占比。

Simpson 指数:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2. \quad (2)$$

式中: D 为多样性指数,越大表示多样性越高; S 为物种总数; P_i^2 为该物种占比。

Pielou 均匀度指数:

$$J = H' / \ln S. \quad (3)$$

式中: J 为均匀度指数,越接近1表示物种个体分布越均匀; H' 为Shannon多样性指数; $\ln S$ 为物种数的自然对数,代表最大可能多样性。

使用R4.2.0进行统计分析:单因素方差分析(ANOVA)及Tukey HSD多重比较;以Bray-Curtis距离进行非度量多维尺度分析(NMDS)比较物种组成差异;以冗余分析(RDA)筛选显著影响多样性的环境因子;采用结构方程模型(SEM,lavaan包)解析驱动路径。显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同混交造林模式下林下植物物种组成与多样性特征

共记录林下维管植物86种,隶属47科72属。灌木层优势种为九节(*Psychotria rubra*)、三叉苦(*Evodia lepta*)、玉叶金花(*Mussaenda pubescens*);草本层优势种为淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)。纯马尾松林(T_1)林下以芒萁单优群落为主,物种数仅8~11种;混交林处理(T_3 — T_6)出现较多喜阴耐湿的蕨类和阔叶草本,物种数增加至21~35种。多样性指数计算结果见表1。

表1 不同混交处理下林下植物多样性指数表(均值±标准差)

Tab.1 Diversity indices of understory plants under different mixed-planting treatments

处理	灌木层 丰富度	灌木层 Shannon	草本层 丰富度	草本层 Shannon
T_1	9.3 ± 1.5c	1.32 ± 0.18d	7.0 ± 1.0c	1.04 ± 0.12c
T_2	14.7 ± 2.1b	1.78 ± 0.20bc	11.3 ± 1.5b	1.51 ± 0.18b
T_3	16.0 ± 2.0b	1.85 ± 0.22b	12.7 ± 1.2b	1.58 ± 0.15b
T_4	24.3 ± 3.1a	2.14 ± 0.23a	15.0 ± 2.0a	1.77 ± 0.20ab
T_5	22.7 ± 2.5a	2.07 ± 0.19a	17.3 ± 2.3a	1.89 ± 0.19a
T_6	18.0 ± 2.2b	1.81 ± 0.21b	14.0 ± 1.7ab	1.62 ± 0.17b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);下表同。

由表1可知, ζ (红椎:马尾松)=3:7(T_4)的灌木层Shannon-Wiener指数最高(2.14 ± 0.23),较马尾松纯林(1.32 ± 0.18)提高62.3%($P<0.01$);草本层多样性在 T_5 最高($H'=1.89$)。整体呈“单峰”变化趋势,即中等混交比例[ζ (红椎:马尾松)=3:7~5:5]多样性最大,纯林和极端比例[ζ (红椎:马尾松)=1:9或7:3]多样性较低。异龄

混交林各多样性指标均低于同龄混交林,但差异未达显著水平($P>0.05$)。

2.2 环境因子对不同混交造林模式的响应

不同处理关键环境因子比较结果见表2。由表2可知,不同处理间环境因子差异显著。马尾松纯林(T_1)郁闭度最高(0.92),林下相对光照强度最低(3.2%);混交后郁闭度下降, T_4 和 T_5 处理的冠层开放度分别达到16.8%和21.3%,光照条件明显改善。土壤全氮和速效磷含量随红椎比例增加呈先升后降趋势,在 T_4 达到峰值(全氮1.52 g/kg,速效磷8.43 mg/kg),说明适量红椎混交有利于土壤养分积累。凋落物现存量以红椎纯林(T_2)最高(8.67 t/hm²),混交林介于纯林之间。

表2 不同处理关键环境因子比较表

Tab.2 Comparison of key environmental factors for different treatments

处理	郁闭度	冠层开放度/%	相对光照/%	w(全氮)/(g·kg ⁻¹)	w(速效磷)/(mg·kg ⁻¹)	凋落物厚度/cm
T_1	0.92 ± 0.03a	8.2 ± 1.5c	3.2 ± 0.8d	0.87 ± 0.09c	3.21 ± 0.45d	3.2 ± 0.4b
T_4	0.78 ± 0.04c	16.8 ± 2.1b	11.5 ± 1.7b	1.52 ± 0.12a	8.43 ± 0.97a	4.1 ± 0.5ab
T_5	0.74 ± 0.05c	21.3 ± 2.5a	15.4 ± 2.0a	1.38 ± 0.10ab	7.86 ± 0.84ab	4.5 ± 0.6a

2.3 林下植物多样性的环境驱动机制

结构方程模型路径系数与效应分解结果见表3。

表3 结构方程模型路径系数与效应分解表

Tab.3 Path coefficients of structural equation models and effect decomposition

效应类型	路径	标准化系数	标准误	P值
直接效应	混交比例→郁闭度	-0.74	0.09	<0.001
	混交比例→凋落物质量	0.48	0.11	<0.001
	郁闭度→林下光照	-0.86	0.06	<0.001
	凋落物质量→土壤全氮	0.55	0.10	<0.001
	林下光照→多样性	0.62	0.09	<0.001
间接效应	土壤全氮→多样性	0.41	0.12	<0.001
	混交比例→多样性(直接)	0.09	0.14	0.522
	混交比例→郁闭度→光照→多样性	0.39	—	<0.001
总效应	混交比例→凋落物→全氮→多样性	0.18	—	<0.001
	混交比例→多样性	0.71	—	<0.001
模型拟合	$\chi^2/df=1.84, CFI=0.96, RMSEA=0.07, SRMR=0.05$			

由表3可知,R前两个排序轴累计解释了林下植物

多样性变异的67.8%。显著的环境因子(蒙特卡洛检验, $P<0.05$)依次为:冠层开放度(解释量38.6%)、土壤全氮(24.3%)、凋落物厚度(12.7%)、土壤速效磷(8.2%)。结构方程模型显示:混交比例(红椎占比)通过负向影响郁闭度(路径系数-0.74)正向影响林下光照(0.68),同时通过凋落物质量间接促进土壤全氮(0.55),最终对林下植物多样性产生总的正效应(总效应0.71)。直接效应不显著($P>0.05$),说明混交造林主要通过调控微环境和土壤养分间接提升多样性。

3 结语

本研究表明,红椎与马尾松混交造林可显著提升林下植物多样性,且存在最优混交比例区间。 ζ (红椎:马尾松)=3:7~5:5处理下灌木层Shannon指数较纯松林提升62%以上,支持了“中度干扰假说”在人工混交林中的适用性^[4]。该比例形成了适中的冠层郁闭度和凋落物积累,避免了纯松林极端低光对草本生长的抑制,也防止了纯椎林过厚凋落物物理覆盖限制种子萌发。当 ζ (红椎:马尾松)大于7:3时,光照虽增加但红椎凋落物积累较多(单宁含量高,分解稍慢),可能抑制部分敏感草本更新,导致多样性略有下降。

环境驱动机制方面,林下光照是首要调控因子(解释量38.6%),但单独改善光照并不足以保证多样性提升。 $T_4\zeta$ (红椎:马尾松)=7:3]光照充足而土壤氮素相对较低(红椎幼龄期固氮能力有限),多样性增幅小于 T_4 。这说明针阔混交对多样性的提升是“光—肥”多因子协同作用的结果,混交比例通过调控郁闭度(改变光照)和凋落物质量(影响土壤全氮)间接驱动多样性变化(总效应0.71,直接效应不显著)。

基于以上结果,对广西马尾松人工林近自然化改造提出以下建议:优先采用 ζ (红椎:马尾松)=(3:7)~(5:5)的同龄行间混交模式,造林密度1 500~1 800株/hm²;经营中保留林下枯落物和原生植被,避免全面割灌除草;长期监测种间竞争关系,适时间伐调整。

参考文献

[1] 韦扬春.红椎及马尾松异龄混交林林下幼苗更新的环境效应[J].园艺与种苗,2021(6):20-24.

[2] 黎露,马姜明,莫燕华,等.广西不同林龄马尾松人工林林下木本植物种间联结动态[J].广西科学,2022,29(6):1160-1168.

[3] 李金凤,王晖,黄海梅,等.马尾松与不同阔叶树种混交种植对土壤微生物群落组成和多样性特征的影响[J].广西科学,2024,31(3):439-450.

[4] 何钦霞,黄海梅,李济银,等.马尾松人工林异龄混交改造对林下植物多样性及功能群的影响[J].生态学杂志,2025,44(10):3379-3388.