

## 广西三种阔叶树人工纯林及其与马尾松混交模式的生长评价

蒙兰杨<sup>1</sup>, 唐国强<sup>1\*</sup>, 冯源恒<sup>2</sup>, 李云晶<sup>1</sup>, 杨章旗<sup>2</sup>, 颜燕<sup>1</sup>, 梁君霞<sup>1</sup>, 黄仕焕<sup>1</sup>, 黄永利<sup>1</sup>

(1. 南宁市林业科学研究所, 南宁 530107; 2. 广西壮族自治区林业科学研究院, 南宁 530002)

**摘要:** 黑格、枫香树和荷木是广西重要的乡土阔叶造林树种, 为研究其纯林及其在马尾松林下混交的造林效果, 该研究用这3种阔叶树的1年生容器苗进行纯林和马尾松林下混交造林, 3年后调查分析其树干、树冠生长和树干干形的差异, 并采用层次分析法对其生长情况进行综合评价。结果表明: (1) 纯林模式下黑格、枫香树的树高、胸径较大, 且多干率较低, 树干生长较好, 而林下混交模式下荷木的树高、胸径较大, 树干生长较好。(2) 纯林和马尾松林下混交模式下黑格的冠幅、枝下高和自然整枝能力均较大, 且冠径比相对较小, 其树冠生长较好。纯林模式下枫香树的分杈率、高径比较小, 其树干干形较好, 马尾松林下混交模式下荷木的高径比、倒伏率较小, 其树干干形较好。(3) 生长情况综合评价结果为: 黑格纯林>枫香树纯林>林下荷木>林下黑格>荷木纯林>林下枫香树。因此, 纯林模式下生长情况最好的为黑格, 马尾松林下混交模式下生长情况最好的为荷木。该研究结果为黑格、枫香树和荷木在广西区域内栽培技术研究提供科学依据和理论参考。

**关键词:** 黑格, 枫香树, 荷木, 马尾松, 混交模式, 生长差异及评价

中图分类号: Q948

文献标识码:

文章编号:

## Growth evaluation of three types of pure broad-leaved forests and their mixed stands with *Pinus massoniana* in Guangxi

MENG Lanyang<sup>1</sup>, TANG Guoqiang<sup>1\*</sup>, FENG Yuanheng<sup>2</sup>, LI Yunjing<sup>1</sup>, YANG Zhangqi<sup>2</sup>, YAN Yan<sup>1</sup>,  
LIANG Junxia<sup>1</sup>, HUANG Shihuan<sup>1</sup>, HUANG Yongli<sup>1</sup>

(1. Nanning Forestry Research Institute, Nanning 530107, China; 2. Guangxi Forestry Research Institute, Nanning 530002, China)

**Abstract:** *Albizia odoratissima*, *Liquidambar formosana*, and *Schima superba* are key native broad-leaved tree species for afforestation in Guangxi, China. To assess the afforestation performance of these species in both pure stands and understory mixed stands with *Pinus massoniana*, a field experiment was conducted using one-year-old container-grown seedlings of the three broad-leaved species. Two planting configurations were established: pure stands of each species, and mixed stands where each species was interplanted under *Pinus massoniana* canopies. After three years of growth, differences in trunk growth, crown development, and stem form among the treatments were investigated and analyzed. Additionally, the Analytic Hierarchy Process (AHP) was employed to conduct a comprehensive evaluation of the overall growth performance of each species under different configurations. The results were as follows: (1) In pure stands, *Albizia odoratissima* and *Liquidambar formosana* exhibited superior trunk growth, characterized by greater tree height, larger diameter at breast height (DBH), and a lower ratio of multiple tree trunks. In contrast, *Schima superba* achieved better trunk growth (i.e., greater height and DBH) in the understory mixed stand configuration. (2) Regardless of the planting configuration (pure stand or understory mixed stand with *Pinus massoniana*), *Albizia odoratissima* showed excellent crown development. This was reflected in its larger crown diameter, greater Under-branch height, stronger natural pruning ability, and a relatively smaller Crown-diameter ration. (3) For stem form, *Liquidambar formosana* performed optimally in

**基金项目:** 广西科技重大专项(桂科 AA24263024); 2025 年中央财政和自治区财政林木良种培育补助项目(桂林办场字(2025) 3 号)。

**第一作者:** 蒙兰杨 (1992—), 硕士, 工程师, 主要从事林木遗传育种与栽培研究, (E-mail) 1525270510@qq.com。

**\*通信作者:** 唐国强, 硕士, 高级工程师, 主要从事林木遗传育种与栽培研究, (E-mail) 421720887@qq.com。

pure stands, with a lower probability of bifurcation and a smaller height-diameter ratio. Meanwhile, *Schima superba* displayed better stem form in the understory mixed stands, as evidenced by a smaller Height-diameter ratio and a lower lodging rate. (4) The comprehensive AHP evaluation of growth performance ranked the treatments in the following order: *Albizia odoratissima* (pure forests) > *Liquidambar formosana* (pure forests) > *Schima superba* (understory) > *Albizia odoratissima* (understory) > *Schima superba* (pure forests) > *Liquidambar formosana* (understory). Consequently, *Albizia odoratissima* is identified as the top-performing species in pure stands, while *Schima superba* is the most suitable for understory mixed planting with *Pinus massoniana*. This study provides a scientific basis and theoretical reference for optimizing the cultivation techniques of *Albizia odoratissima*, *Liquidambar formosana*, and *Schima superba* in the Guangxi region.

**Key words:** *Albizia odoratissima*, *Liquidambar formosana*, *Schima superba*, *Pinus massoniana*, mixed planting pattern growth differences and evaluation

广西是我国最大的桉树种植区，2024年我国桉树种植面积达608.88万公顷，其中，广西占50.7%。但大面积的桉树种植存在土壤肥力下降、生物多样性降低、外来植物入侵加剧和水资源紧缺等问题，控制桉树增长数量，减缓桉树的造林速度是当前我国面临的基本形势。因此，寻找桉树替代树种十分迫切（左科举，2023），而黑格（*Albizia odoratissima*）、枫香树（*Liquidambar formosana*）和荷木（*Schima superba*）等广西乡土阔叶树种作为替代树种具有极大的优势。

黑格为豆科（Leguminosae）落叶乔木，又名香合欢、土格木等，为速生树种，其心材颜色深呈栗褐色或巧克力色，木材纹理直、材质坚硬、耐腐、抗虫蛀，是优良的家具、建筑和造船等用材。此外，黑格树皮含单宁，为优质栲胶原料，根系具根瘤，可固氮，对改良土壤有良好作用，是多用途高价值用材树种（罗群凤等，2020；姜英等，2020；李佳男，2024；莫明锋等，2024）。枫香树为金缕梅科（Hamamelidaceae）落叶乔木，又名黑饭木、香枫等，是我国重要的速生优质乡土树种；其木材轻软、纹理通直、易加工，是建筑、家具和胶合板等的理想材料；枫香树全株均可入药，果实可作染料，树脂是塑料及人造革的原料，树叶秋冬季变红或黄，具有良好的观赏价值，并且还在矿山修复、针叶林改造等工程中发挥了重要的生态功能（孙荣喜，2018；黄敏等，2022；原勤勤等，2023）。荷木为山茶科（Theaceae）常绿乔木，又名木荷、荷树，其枝叶繁茂、叶片厚革质且含水量大、含油脂少、燃点较高，萌芽力强，是华南地区典型的乡土防火树种；荷木树干端直、木材白色，细致易加工，是良好的家具和工艺加工用材，也是建筑、器材、国防等特种用材树；荷木也是我国亚热带生态恢复的良好树种（赵秀华等，2015；张燕等，2023；丁德永等，2024）。

纯林对林地土壤养分的利用吸收单一，病虫害易爆发成灾，而混交林的层次多冠层厚，可以充分利用空间和营养，林分的抗性和稳定性较强（童群益等，2004；李方兴等，2016）。马尾松（*Pinus massoniana*）是中国南方地区栽植面积最大和最具代表性的森林类型之一，然而其纯林经营模式存在立地衰退、生产力下降、有害生物猖獗、生态系统脆弱和易发生森林火灾等问题，将马尾松纯林营造为针阔混交林是解决其存在问题的首要有效途径（舒骏等，2013；洪宜聪，2017）。研究表明，与纯林相比，马尾松混交林的土壤碳储量、林分凋落物数量、现存量、土壤有机质质量分数和水源涵养功能均得到提升（殷沙，2015；卢立华，2019；白云星，2021），能够提高林下植物丰富度和多样性（何钦霞等，2025），具有更佳的物种组成及抵御病虫害的能力（王思荣等，2025）。然而，马尾松和不同阔叶树种混交，其相互作用的方向和强度因树种而不同，其树种组成及其比例等因素均可能对林分生物量产生不同的影响（鄢可钰等，2025）。黄茂勋（2019）在马尾松纯林中引入木荷和枫香树形成异龄混交林，结果表明混交林生长效果优于纯林，木荷表现明显好于枫香树。刘国昌（2021）利用枫香树、香樟、闽楠和红楠与马尾松进行混交试验，结果表明枫香树的生长表现最好。林启春（2022）在稀疏马尾松林内套种木荷、枫香树、壳菜果和山乌桕，结果表明枫香树长势最好，其次是木荷。曾春华（2024）对马尾松林间伐后套种阔叶树形成混交林，结果表明间伐每667 m<sup>2</sup>保留马尾松30株+套种木荷、枫香树等阔叶树的改培技术措施能有效促进马尾松和林下阔叶树的生长。王智慧（2025）在不同间伐方式的马尾松成熟林下补植黑格、红椿、闽楠和大叶榉等树种，结果表明黑格单株材积生长量最大，且带状混交的效果最好。综上，黑格、枫香树和荷木与马尾松混交均有较好的效果，其效果与马尾松的间伐强度和郁闭度等相关。目前，有关这3个树种同时营造人工纯林及其与马尾松混交的研究未见报道。因此，本研究以广西中部地区为研究区域，以黑格、枫香树和荷木为研

究材料，分别进行纯林和马尾松林下造林，造林第3年进行调查测定，拟探讨以下问题：（1）3种阔叶树人工纯林及其与马尾松混交模式的特性和树种潜力；（2）在2种造林模式下3种阔叶树其树干生长、树冠生长和树干干形出现差异的原因；（3）最适合纯林和与马尾松混交的树种。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验林概况

试验地位于南宁市林业科学研究所（107° 59' E、23° 10' N），属石灰岩峰林间缓丘宽谷台地地貌，海拔100~159 m之间，属低山和丘陵地带，坡度在5~15°，地势平坦。气候为北热带北缘季风气候，四季温和，冬暖夏凉，年平均气温为21.5℃，≥10℃的年平均积温7697.8℃。1月份最冷，月平均温度为12.3℃，极端最低气温为-3℃，7月份最热，平均气温28.2℃，极端最高温度40.6℃。年平均降雨量1250 mm，雨季多在4—8月份之间，年均蒸发量1613.8 mm，年平均相对湿度79.0%，有霜日年平均3~5 d。土壤为第四纪红土发育成的中至厚层赤红壤。

试验林均位于南宁市林业科学研究所第3林班，纯林试验区和马尾松林下混交试验区位置相近（直线距离800 m）且地形相似，地势平坦，无明显的坡度和坡向，其土壤物理性质见表1、化学性质见表2。其中，纯林试验区（为秋枫、榕树等绿化苗采伐迹地）于2021年5月完成造林，林下混交试验区于2021年3月完成造林；林下试验区位于南宁市林业科学研究所马尾松初级种子园第三大区林下。马尾松初级种子园营建于1986年，海拔100~123 m，面积29.33 hm<sup>2</sup>；建园初始密度为600株/hm<sup>2</sup>，后经过间伐，松树母树密度为150株/hm<sup>2</sup>，树高20~25 m，胸径40~60 cm，郁闭度为0.6。

造林苗木为黑格、枫香树和荷木1年生容器苗，苗高50~80 cm，地径0.5~0.8 cm。纯林试验区和林下混交试验区每个树种均带状（120 m×96 m）种植1.15 hm<sup>2</sup>，造林密度2 m×3 m。造林时和造林后均未施基肥和追肥。造林后每个树种每个试验区的管理措施相同，做好防护措施，防病虫害及人畜破坏。

表1 林下试验区和纯林试验区土壤物理性质

Table 1 Soil physical properties in understory and pure forest experimental areas

林分类型 Stand type	土壤密度 Soil density (g·cm <sup>-3</sup> )	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity (%)	毛管孔隙度 Capillary porosity (%)	总孔隙度 Total porosity (%)
林下试验区 Understory forest experimental areas	1.00	6.49	49.54	56.03
纯林试验区 Pure forest experimental areas	1.08	7.60	48.44	56.04

表2 林下试验区和纯林试验区土壤化学性质

Table 2 Soil chemical properties in understory and pure forest experimental areas

林分类型 Stand type	全钾 Total potassium (g·kg <sup>-1</sup> )	有效锌 Effective zinc (mg·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )	水解性氮 Hydrolyzab le nitrogen (mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphor us (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available Phosphorus (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质 organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Quick-acting potassium (mg·kg <sup>-1</sup> )
林下试验区 Understory forest experimental areas	2.20	0.56	1.52	133.06	0.48	13.06	38.89	53.29
纯林试验区 Pure forest experimental areas	2.93	2.24	1.56	113.55	0.63	43.92	31.80	184.74

### 1.2 数据调查及指标计算

于 2023 年 12 月，在黑格、枫香树和荷木的纯林试验区 and 林下混交试验区随机选出 4 个 30 m×24 m 的样方，共 24 个样方，每个样方 120 株。对样方内所有黑格、枫香树和荷木进行调查，调查的指标有树高 (height, HT)、胸径 (diameter, DHB)、冠幅 (crown diameter, CW, 东西和南北方向最大冠幅直径的平均值)、枝下高 (crown-diameter ratio, HCB, 活枝的最低高度)、分杈高 (bifurcation height, HF, 最低分杈处的高)、多干株数 ( $N_1$ , 有 2 个及以上树干的株数)、分杈树 ( $N_2$ , 有分杈的株数) 和倒伏株数 ( $N_3$ , 树干倒伏或歪斜的株数)。其中，树高、枝下高和分杈高采用 Haglof Vertex IV 测高仪测量，胸径采用胸围尺测量，冠幅采用皮尺测量，分杈株数和倒伏株数采用人工计数。

多干率、分杈率和倒伏率的计算公式如下。

$$P_1 = N_1 / N_0 \times 100 \quad (1)$$

$$P_2 = N_2 / N_0 \times 100 \quad (2)$$

$$P_3 = N_3 / N_0 \times 100 \quad (3)$$

式中： $P_1$  为多干率； $P_2$  为分杈率； $P_3$  为倒伏率； $N_0$  为总株数 (蒙兰杨等, 2023)。

高径比、冠径比和自然整枝能力的计算公式如下。

$$T_1 = HT / DHB \quad (4)$$

$$T_2 = CW / DHB \quad (5)$$

$$T_3 = HCB / HT \quad (6)$$

式中： $T_1$  为高径比； $T_2$  为冠径比； $T_3$  为自然整枝能力 (郭群和闻朝鲜, 2016; 玉宝, 2023; 邵威威和董灵波, 2023)。

### 1.3 生长情况综合评价

采用层次分析法 (AHP) 评价 3 种阔叶树的纯林和林下模式下的生长情况 (于世川等, 2017; 于雷等, 2021)，具体步骤如下：

(1) 建立形质评价体系。构建 AHP 框架，见图 1，其中最高层为生长情况最好；中间层分为 2 个层次，层次 A 为树干生长、树冠生长和树干干形，层次 B 为树高、胸径、多干率、冠幅、枝下高、冠径比、自然整枝能力、分杈率、分杈高、高径比、倒伏率；最低层为纯林模式下的黑格、枫香树、荷木，林下模式下的黑格、枫香树、荷木。

(2) 构建判断矩阵。根据黑格、枫香树和荷木人工林培育目标，向专家请教，对各元素进行评价。将同一层次中两两元素间相对重要性给出一定尺度判断，按照两元素 A 与 B 同等重要、A 比 B 稍重要、A 比 B 重要、A 比 B 明显重要和 A 比 B 极端重要，分别以 1、3、5、7、9 作为标度，以 2、4、6、8 表示相邻判断的中间值，用这些值的倒数表示 2 个元素的反比较，用于构建判断矩阵 (于世川等, 2017; 于雷等, 2021)。

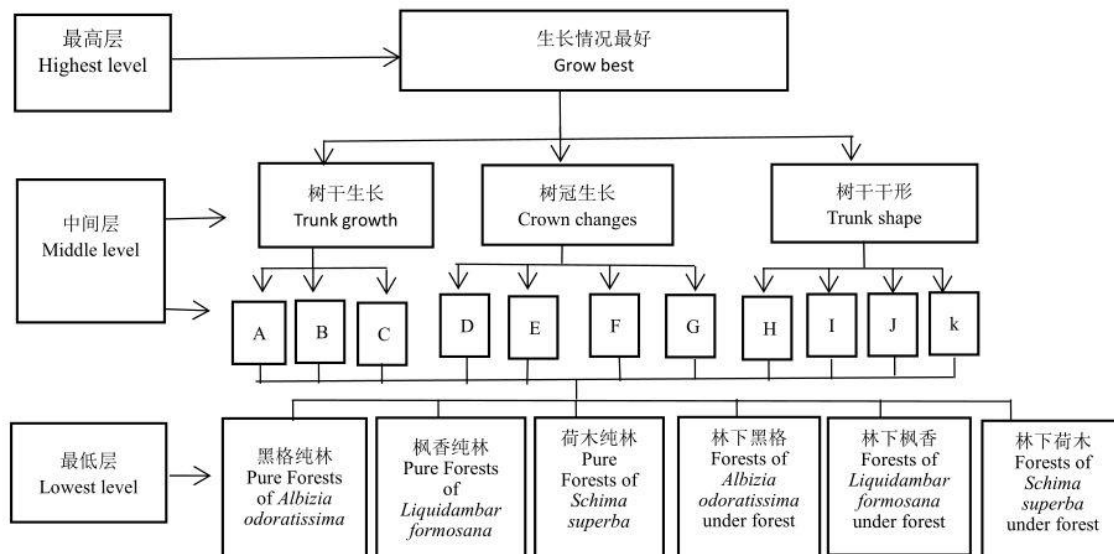
(3) 林木形质综合评价。

$$A_i = \sum_{j=1}^{j=11} X_{ij} W_j \quad (7)$$

$$X_{ij} = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \times 100 \quad (\text{正相关}) \quad \text{或} \quad X_{ij} = (1 - (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})) \times 100 \quad (\text{负相关}) \quad (8)$$

$$W_j = W_{A_n} \times W_{B_m} / 10\,000 \quad (9)$$

式中： $A_i$  为第  $i$  种树种 (纯林或林下混交模式下) 的生长情况综合评价得分 (尤健健等, 2015)； $X_{ij}$  为第  $i$  种树种纯林或林下模式下第  $j$  个指标所对应得分； $W_j$  为第  $j$  个指标的权重； $X$  为第  $i$  种树种纯林或林下混交模式下第  $j$  个指标的平均值； $X_{min}$  为  $j$  指标的 3 树种纯林和林下模式下的随机效应 95% 置信区间的极小值； $X_{max}$  为  $j$  指标的 3 树种纯林和林下模式下的随机效应 95% 置信区间的极大值 (郭艳兰等, 2023)； $W_{A_n}$  为层次 A 对最高层的判断矩阵计算得出  $A_n$  的贡献率 ( $n=1, 2, 3$ )； $W_{B_m}$  为层次 B 指标对  $A_n$  的判断矩阵计算得出  $B_m$  的贡献率 ( $m=1, 2, \dots, 11$ )。



A. 树高; B. 胸径; C. 多干率 D. 冠幅; E. 冠径比; F. 枝下高; G. 自然整枝能力; H. 分枝率; I. 分枝高; J. 高径比; K. 倒伏率。

A. Height; B. Diameter; ;C. Ratio of multiple tree trunks; D. Crown diameter; E. Crown-diameter ration ; F. Under-branch height; G. Natural pruning ability;

H.Probability of bifurcation; I. Bifurcation height; J. Height-diameter ratio; K. Lodging rate.

图 1 3 种阔叶树纯林和林下混交模式生长情况评价体系

Fig. 1 Evaluation system of growth status of pure forests and understory of three broad-leaved tree species

#### 1.4 数据分析

使用 Microsoft office Excel 2007 进行数据录入和整理; 使用 SPSS 23 进行方差分析和 Duncan 多重比较; 使用 SPSSPRO 进行 AHP 层次分析和一致性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 3 个种树纯林及马尾松林下混交的树干生长

方差分析结果表明, 纯林模式下 3 个树种的树高、胸径和多干率均存在显著性差异, 马尾松林下混交模式下 3 个树种的树高、胸径和多干率也均存在显著性差异。纯林模式下, 树高表现为黑格>枫香树>荷木, 胸径表现为枫香树>黑格>荷木, 多干率表现为荷木>枫香树>黑格。马尾松林下混交模式下, 树高和胸径均表现为荷木>黑格>枫香树, 多干率表现为荷木>枫香树>黑格。

t 检验结果 (表 3) 表明, 黑格和枫香树纯林模式下的树高、胸径均显著大于林下混交模式。荷木纯林模式下的树高、胸径均显著小于林下混交模式, 多干率显著高于林下混交模式。因此, 黑格和枫香树纯林模式下的树干生长比林下混交模式下的快, 而荷木纯林模式下的树干生长比林下混交模式下的慢。

表 3 3 种阔叶树纯林及林下种植的树干生长

Table 3 Trunk growth of pure forests and understory of three broad-leaved tree species

指标 Index	树种 Species	纯林 Pure forests	林下 Understory	t	显著性 Significance
树高 Height (m)	黑格 <i>Albizia odoratissi</i>	6.75±1.75a	4.71±1.46b	11.87	0.000
	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	5.34±1.03b	3.68±1.07c	20.69	0.000
	荷木 <i>Schima superba</i>	3.78±0.78c	5.08±1.13a	-15.60	0.000
胸径 Diameter (cm)	黑格 <i>Albizia odoratissi</i>	5.86±2.01b	3.21±1.13b	13.63	0.000
	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	6.29±1.72a	2.73±1.10c	33.92	0.000
	荷木 <i>Schima superba</i>	3.78±1.04c	4.05±1.13a	-2.76	0.006
多干率	黑格	0.69±0.81b	0.47±0.94b	0.34	0.744

Ratio of multiple tree trunks	<i>Albizia odoratissi</i> 枫香树	<i>Liquidambar formosana</i> 荷木	<i>Schima superba</i>		
		10.25±7.17b	2.23±1.71b	2.17	0.073
		72.34±8.18a	9.04±4.59a	13.19	0.000

表中数据为平均值±标准差。表中不同小写字母代表差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

The data in the table is mean ± standard deviation. Different lower-case letters after data represent significant differences ( $P<0.05$ ).

The same below.

## 2.2 3种阔叶树纯林及马尾松林下混交的树冠生长

方差分析结果表明, 纯林模式下3个树种之间的冠幅、冠径比、枝下高和自然整枝能力均存在显著差异; 马尾松林下混交模式下3个树种之间的冠幅、冠径比、枝下高和自然整枝能力也均存在显著差异。纯林模式下, 冠幅表现为枫香树≈黑格>荷木, 冠径比表现为荷木>黑格>枫香树, 枝下高表现为黑格>枫香树>荷木, 自然整枝能力表现为黑格>枫香树≈荷木。林下混交模式下, 冠幅表现为荷木≈黑格>枫香树, 冠径比表现为枫香树>黑格>荷木, 枝下高表现为黑格>荷木>枫香树, 自然整枝能力表现为黑格>枫香树>荷木。此外, 研究中发现, 3个树种在纯林模式下的枝叶均比较茂盛, 但在林下混交模式下有着不同程度的稀疏, 其中稀疏程度最大的为黑格和枫香树, 荷木的稀疏程度最小。

$t$  检验结果(表4)表明, 黑格和枫香树纯林模式下的冠幅显著大于林下混交模式, 冠径比、枝下高和自然整枝能力却显著小于林下混交模式; 荷木纯林模式下的冠径比显著大于林下混交模式, 而枝下高和自然整枝能力显著低于林下混交模式。因此, 黑格和枫香树纯林模式下的冠幅均大于林下混交模式, 3种阔叶树的枝下高和自然整枝能力均小于林下混交模式。

表4 3种阔叶树纯林及林下种植的树冠生长

Table 4 Crown growth of pure forests and understory of three broad-leaved tree species

指标 Index	树种 Species	纯林 Pure forests	林下 Understory	$t$	显著性 Significance
冠幅 Crown diameter (m)	黑格 <i>Albizia odoratissi</i>	2.82±0.84a	2.11±0.71a	11.17	0.000
	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	2.85±0.50a	1.93±0.50b	24.34	0.000
	荷木 <i>Schima superba</i>	2.13±0.43b	2.12±0.47a	0.22	0.827
	黑格 <i>Albizia odoratissi</i>	0.52±0.21b	0.70±0.19b	-11.31	0.000
冠径比 Crown-diameter ration	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	0.50±0.29b	0.83±0.52a	-9.92	0.000
	荷木 <i>Schima superba</i>	0.59±0.16a	0.54±0.11c	3.84	0.000
	黑格 <i>Albizia odoratissi</i>	1.64±0.54a	1.99±0.65a	-6.87	0.000
枝下高 Under-branch height (m)	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	0.34±0.22b	0.50±0.19b	-5.47	0.000
	荷木 <i>Schima superba</i>	0.18±0.14c	0.53±0.19b	-18.21	0.000
	黑格 <i>Albizia odoratissi</i>	0.25±0.11a	0.44±0.14a	-17.80	0.000
自然整枝能力 Natural pruning ability	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	0.06±0.05b	0.14±0.06b	-12.31	0.000
	荷木 <i>Schima superba</i>	0.05±0.05b	0.11±0.05c	-10.96	0.000

## 2.1 3种阔叶树纯林及马尾松林下混交的树干干形

方差分析结果表明, 纯林模式下3个树种之间的分权率、分权高、高径比和倒伏率均存在显著差异, 马尾松林下混交模式下3个树种之间的分权率、分权高、高径比和倒伏率也均存在显著差异。纯林模式下,

分杈率表现为黑格>荷木>枫香树，分杈高表现为黑格>枫香树>荷木，高径比表现为黑格>荷木>枫香树，倒伏率表现为枫香树>黑格>荷木。林下混交模式下，分杈率表现为黑格>荷木>枫香树，分杈高表现为黑格>荷木>枫香树，高径比表现为黑格≈枫香树>荷木，倒伏率表现为枫香树>黑格>荷木。

*t* 检验结果（表 5）表明，黑格纯林模式下的分杈率显著高于林下混交模式，而高径比和倒伏率显著低于林下混交模式；枫香树纯林模式下的分杈高显著高于林下混交模式，高径比和倒伏率显著低于林下混交模式；荷木纯林模式下的分杈率显著高于林下混交模式，而分杈高、高径比显著低于林下混交模式。因此，纯林模式下的高径比显著低于林下混交模式。

表 5 3 种阔叶树纯林及林下种植的树干干形

Table 5 Trunk shape of pure forests and understory of three broad-leaved tree species

指标 Index	树种 Species	纯林 Pure forests	林下 Understory	<i>t</i>	显著性 Significance
分杈率 Probability of bifurcation	黑格 <i>Albizia odoratissi</i>	54.87±1.2a	27.56±10.15a	5.32	0.002
	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	7.55±3.86c	7.30±5.27b	0.08	0.942
	荷木 <i>Schima superba</i>	38.30±1.20b	18.45±7.30ab	4.55	0.006
分杈高 Bifurcation height (m)	黑格 <i>Albizia odoratissi</i>	2.00±0.1.01a	2.09±0.65a	-0.89	0.373
	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	1.67±0.74b	1.01±0.38c	4.30	0.000
	荷木 <i>Schima superba</i>	1.32±0.51c	1.60±0.81b	-2.28	0.025
高径比 Height-diameter ratio	黑格 <i>Albizia odoratissi</i>	1.22±0.34a	1.52±0.37a	-9.68	0.000
	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	0.91±0.32c	1.51±0.59a	-15.87	0.000
	荷木 <i>Schima superba</i>	1.06±0.37b	1.29±0.20b	-12.40	0.000
倒伏率 Lodging rate	黑格 <i>Albizia odoratissi</i>	0b	6.49±4.08a	-5.46	0.012
	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	1.65±0.86a	9.36±5.12a	-2.59	0.041
	荷木 <i>Schima superba</i>	0.38±0.66b	0b	1.00	0.423

## 2.1 3 种阔叶树纯林及林下种植的综合评价

### 2.1.1 构建判断矩阵

林木生长情况评价、树干生长、树冠生长和树干干形的判断矩阵、贡献率、CR 分别见表 6-表 9。各判断矩阵随机一致性比率 CR 分别为 0.002、0、0、0、0，均小于 0.1，说明各判断矩阵具有满意的一致性，可用于权重计算。

表 6 林木生长情况评价判断矩阵

Table 6 Determining matrix of growth status evaluation

指标 Index	树干生长 Trunk growth	树冠生长 Crown growth	树干干形 Trunk shape	贡献率 Relative contribution rate (%)	CR
树干生长 Trunk growth	1	5	3	64.79	
树冠生长 Crown growth	1/8	1	0.5	12.22	0.002
树干干形 Trunk shape	1/5	2	1	22.99	

表 7 树干生长判断矩阵

Table 7 Determining matrix of trunk growth situation

指标 Index	树高 Height	胸径 Diameter	多干率 Ratio of multiple tree trunks	贡献率 Relative contribution rate (%)	CR
树高 Height	1	1	8	47.06	
胸径 Diameter	1	1	8	47.06	0
多干率 Ratio of multiple tree trunks	1/8	1/8	1	5.88	

表 8 树冠生长判断矩阵

Table 8 Determining matrix of Crown growth situation

指标 Index	冠幅 Crown diameter	冠径比 Crown-diameter ration	枝下高 Under-branch height	自然整枝能力 Natural pruning ability	贡献率 Relative contribution rate (%)	CR
冠幅 Crown diameter	1	4	4	1	40.00	
冠径比 Crown-diameter ration	1/4	1	1	1/4	10.00	0
枝下高 Under-branch height	1/4	1	1	1/4	10.00	
自然整枝能力 Natural pruning ability	1	4	4	1	40.00	

表 9 树干干形判断矩阵

Table 9 Determining matrix of Trunk shape situation

指标 Index	分权率 Probability of bifurcation	分权高 Bifurcation height	高径比 Height-diameter ratio	倒伏率 Lodging rate	贡献率 Relative contribution rate (%)	CR
分权率 Probability of bifurcation	1	1	4	1	30.77	
分权高 Bifurcation height	1	1	4	1	30.77	
高径比 Height-diameter ratio	1/4	1/4	1	1/4	7.69	0
倒伏率 Lodging rate	1	1	4	1	30.77	

2.4.2 评价指标权重计算

根据公式 (7)，各指标的权重为表 7、表 8、表 9 中对应的贡献率乘以表 6 中该指标对应的生长情况指标的贡献率并除以 10 000，结果见表 10，可见树高、胸径对林木生长情况的影响最大。

表 10 评价指标权重

Table 10 Relative weight of evaluating indicators

一级指标 First-level indicators	二级指标 Secondary-level indicators	贡献率 Index contribution rate
树干生长 Trunk growth	树高 Height	0.304 9
	胸径 Diameter	0.304 9
	多干率 (负相关) Ratio of multiple tree trunks(negative correlation)	0.038 1
树冠生长 Crown growth	冠幅 Crown diameter	0.048 9
	冠径比 (负相关) Crown-diameter ration(negative correlation)	0.012 2
	枝下高 Under-branch height	0.012 2
	自然整枝能力 Natural pruning ability	0.048 9
树干干形	分权率 (负相关) Probability of bifurcation(negative	0.070 7

Trunk shape	correlation)	
	分杈高 Bifurcation height	0.070 7
	高径比（负相关）Height-diameter ratio(negative correlation)	0.017 7
	倒伏率（负相关）Lodging rate(negative correlation)	0.070 7

### 2.4.3 综合得分计算

根据公式（8）和（9），计算出生长情况综合评价分值（表 11），由表 11 可知，黑格纯林（83.38）> 枫香树纯林（75.17）> 林下荷木（50.50）> 林下黑格（43.18）> 荷木纯林（29.25）> 林下枫香树（20.92）。这表明纯林模式下生长情况最好的为黑格，林下模式下生长情况最好的为荷木；荷木林下模式下的生长情况比纯林模式好。

表 11 综合评价得分  
Table 11 Comprehensive evaluation score

一级指标 First-level 1 indicators	二级指标 Secondary-level indicators	纯林 Pure forests			林下 Understory		
		黑格 <i>Albizia odoratissima</i>	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	荷木 <i>Schima superba</i>	黑格 <i>Albizia odoratissima</i>	枫香树 <i>Liquidamba r formosana</i>	荷木 <i>Schima superba</i>
树干生长 Trunk growth	树高 Height	29.05	16.37	2.34	10.70	1.44	14.03
	胸径 Diameter	25.79	29.16	9.48	5.02	1.25	11.60
	多干率 Ratio of multiple tree trunks	3.78	3.31	0.32	3.79	3.70	3.37
树冠生长 Crown growth	冠幅 Crown diameter	4.47	4.61	1.26	1.16	0.33	1.21
	冠径比 Crown-diameter ration	2.76	2.82	2.56	2.24	1.86	2.71
	枝下高 Under-branch he ight	0.95	0.12	0.02	1.17	0.22	0.24
	自然整枝能力 Natural pruning ability	2.44	0.23	0.12	4.66	1.16	0.81
树干干形 Trunk shape	分杈率 Probability of bifurcation	0.30	6.14	2.34	3.67	6.17	4.80
	分杈高 Bifurcation height	5.86	4.26	2.57	6.30	1.07	3.92
	高径比 Height-diameter ratio	0.91	1.69	1.31	0.15	0.18	0.73
	倒伏率 Lodging rate(negative correlation)	7.07	6.45	6.93	4.62	3.54	7.07
总分 Total score		83.38	75.17	29.25	43.48	20.92	50.50

### 3 讨论

不同树种在进化过程中形成不同的叶片功能性状和生态适应策略，在叶经济谱中，一类植物采取的是“快速投资-收益型”策略，主要特点是叶氮含量高、光合速率大、呼吸速率快和寿命短，如枫香树；另一类植物采取的是“缓慢投资-收益型”策略，主要特点是寿命长，叶氮含量低、光合速率和呼吸速率都偏低，如马尾松；还有一些植物的策略介于“快速投资-收益型”与“缓慢投资-收益型”之间，如荷木、杜英（孙龙，2024；白涵等，2025）。植物的根系存在自我/非自我之间的识别作用，即在遇到非自我根系时，会比遇到自我根系时产生更多的根，而与同种植物竞争有限的空间和资源时，因互相产生抑制作用导致植物根系量比单独生长时要小。本研究中，黑格、枫香树在纯林模式下的生长较好，而在林下混交模式下的生长较差，其主要原因如下：一是马尾松林下的全钾、有效锌、全磷、有效磷和速效钾等含量较低（表2），导致其生长较缓慢；二是黑格、枫香树为落叶及强阳性树种，不耐荫蔽，在林下混交的冠幅变小，树冠较稀疏，光合作用降低，最终生长受到抑制；三是枫香树采取的是“快速投资-收益型”策略，在纯林模式下表现出较强的资源获取能力，生长较快，但在林下混交的适应性较弱，生长较慢。本研究中荷木在纯林模式下的生长较差，而在林下混交模式下的生长较好，其主要原因如下：一是荷木根系可塑性强，存在较强的自我/非自我之间的识别作用，在马尾松林下混交时其根系的生长得到促进，进而对土壤养分元素的吸收能力增强，提高了木荷干物质质量的积累，最终促进了木荷的生长，并在混交林中具有较强的生长竞争优势（姚宝甲等，2017）；二是荷木的萌生能力强，在纯林模式下多干率高（72.34%），在马尾松林下混交多干率低（9.04%），而这些萌生的茎干会与主株竞争空间和养分，导致主株的树干生长变慢（刘常庆等，2014），因而纯林生长较差；三是荷木是常绿树种，采取介于“快速投资-收益型”与“缓慢投资-收益型”之间的策略，在林下混交的适应性较强，树冠的稀疏程度较小，对光合作用的影响较小，耐阴性较强，对生长的影响较小。

生境假说认为，树木萌生更新能力与生长环境有关，生长在林窗下和林窗附近的树木比树冠下的树木具有更多的萌生植株（Miura&Yamamoto, 2003；Daisukeetal et al., 2003；朱万泽等，2007），本研究中3个树种纯林模式下的多干率均大于马尾松林下模式，其中荷木的达到显著水平，其结果与生境假说相吻合；因而这3个树种纯林种植需要及时除去萌生的树干，保证主株的快速生长。本研究中黑格、枫香树和荷木在广西南宁市纯林造林第3年，树高分别是在广西百色市种植的桉树（8.43 m）的80.07%、63.34%和44.84%，胸径分别是桉树（7.07 cm）的82.89%、88.97%和53.46%（岑小妹等，2023），表明黑格在纯林中具备接近桉树的速生潜力，是替代桉树的优选乡土树种。本研究中纯林模式下枫香树的树高和胸径均大于荷木，与邱建能（2024）、林华英（2024）和黄继丰等（2006）的结果相一致。

本研究中，除枫香树林下模式以外，枫香树纯林和其他2个树种纯林和林下模式的冠幅均大于2 m，说明造林第3年其树冠在株间方向（造林密度2 m×3 m，株间距2 m）已出现重叠，开始出现竞争。冠径比一般可作为树木利用空间程度的指标，比值越小的树木对空间的利用程度越高（郭群和闻朝鲜，2016），因而根据表4结果，可说明空间利用程度表现为，纯林：枫香树>黑格>荷木，林下：荷木>黑格>枫香树，枫香树、黑格纯林>林下，荷木林下>纯林。自然整枝能力强弱直接影响木材质量，决定无节材的出材量（玉宝，2023）。本研究中，3个树种林下混交模式下的自然整枝能力和枝下高均大于纯林模式，主要原因为林下光照相对弱，下层枝条更容易枯萎脱落，其结果与西南桦一致（骆丹等，2021）。

本研究中，3个树种的分权率均表现为纯林>林下，主要原因为弱光环境能抑制林木分叉的出现；黑格的分权率最大、其次为荷木，枫香树的分权率最小，因而造林3年后要优先对黑格和荷木进行修枝，特别是纯林，以降低其分权率，提高干形质量。高径比可作为衡量林分稳定性以及评估林木抗雪、结冰、风等稳定性的指标，高径比越小稳定性越大（Opio et al., 2002；邵威威和董灵波，2023）；本研究中高径比表现为纯林<林下，并且黑格、枫香树的倒伏率也表现为纯林<林下，证明了林木的高径比与稳定性成反比这一观点（Bosela et al., 2014），说明这3种阔叶树造林，纯林的稳定性好于林下，纯林模式下枫香树的稳定性最好，林下混交模式下荷木的稳定性最好。本研究中，林下模式的黑格、枫香树的倒伏率较高，需要定期观测，发现倒伏及时扶正。

本研究中的评价指标与于世川等（2017）、于雷等（2021）和蒙兰杨等（2023）相比，减少了通直度和尖削度等指标，新增了多干率和倒伏率指标，原因为本研究中的林分还为幼龄林，通直度和尖削度的意义还不大，而多干率和倒伏率能指导幼龄林期的管理措施。本研究中纯林模式生长最好的为黑格，林下模式生长最好的为荷木，与王智慧（2024）的结果相似。本研究调查数据来源于同一区域试验林，其结果只为初步结论，但对这3个树种在立地条件相同或相似的地域进行栽培仍有一定的实践指导意义。

## 4 结论

本研究结果表明，造林第3年，纯林模式下黑格的树干生长和树冠生长表现最好，综合生长情况最好；而林下模式下荷木的树干生长和树干干形表现最好，综合生长情况最好。

## 参考文献：

- BAI H, HAO MH, HE HJ, et al., 2025. Response of seedling leaf functional traits to simulated nitrogen deposition for the major tree species of northeast China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 61(5): 23-32. [白涵, 郝珉辉, 何怀江, 等, 2025. 东北主要树种幼树叶片功能性状对模拟氮沉降的响应[J]. *林业科学*, 61(5): 23-32.]
- BAI YX, ZHOU YC, ZHANG XY, et al., 2021. Water conservation capacity of litter and soil in mixed plantation of *Pinus massoniana* and broadleaved trees[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 57(11): 24-36. [白云星, 周运超, 张薰元, 等, 2021. 马尾松针阔混交人工林凋落物和土壤水源涵养能力[J]. *林业科学*, 57(11): 24-36.]
- BOŠELA M, KONÔPKA B, ŠEBEŇ V, et al., 2014. Modelling height to diameter ratio — an opportunity to increase Norway spruce stand stability in the Western Carpathians[J]. *Lesnický Casopis*, 60: 71-80.
- CEN XM, TIAN MJ, CHEN Q, et al., 2023. Preliminary study on the differences in the effects of applying two fertilizers on the growth of *Eucalyptus* plantations in the later stage[J]. *South China Agriculture*, 17(2): 94-96. [岑小妹, 田茂靖, 陈茜, 等, 2023. 后期施用两种肥料对桉树人工林生长的影响差异初探[J]. *南方农业*, 17(2): 94-96.]
- DAISUKE K, AKIKO S, KIYOSHI M, 2003. Resprouting ability of *Quercus crispula* seedlings depends on the vegetation cover of their microhabitats[J]. *Journal of Plant Research*, 116: 207-216.
- DING DY, DUAN H, LI M Z, et al., 2024. Analysis of suitable areas of *Schima superba* and prediction of potential suitable areas in China under future climate[J]. *Chinese wild plant resources*, 43(3): 114-123. [丁德永, 段洪, 李咪者, 等, 2024. 木荷适生区分析及未来气候下在中国潜在适生区预测[J]. *中国野生植物资源*, 43(3): 114-123.]
- GUO Q, WEN ZX, 2016. Comparative studies of the crown-shapes, branching structures and growth of 8 willow clones[J]. *South China Forestry Science*, 44(2): 48-51. [郭群, 闻朝鲜, 2016. 8个柳树无性系冠形、主干分枝结构及生长比较研究[J]. *南方林业科学*, 44(2): 48-51]
- GUO YL, MOU DS, ZHAO LX, et al., 2023. Evaluation of cold resistance of 18 wine grape clones introduced from abroad[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 37(1): 161-168. [郭艳兰, 牟德生, 赵连鑫, 等, 2023. 国外引入的18个酿酒葡萄营养系抗寒性评价[J]. *干旱区资源与环境*, 37(1): 161-168.]
- HE QX, HUANG HM, LI QY, et al., 2025. Effects of uneven-aged mixed transformation of *Pinus massoniana* plantation on understory plant diversity and functional groups[J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*: 1-16[2025-10-17]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250408.2006.002>. [何钦霞, 黄海梅, 李济银, 等, 2025. 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/OL]. *生态学杂志*: 1-16[2025-10-17]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250408.2006.002>.]
- HUANG JF, FENG XZ, MO LJ, et al., 2006. Growth and rhizospheric Fertility of 10 native Broad-leaved trees in

- north Guangdong[J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 22(3): 17-21. [黄继丰, 冯学周, 莫罗坚, 等, 2006. 粤北 10 种乡土阔叶树种生长及根际养分比较 [J]. 广东林业科技, 22(3): 17-21.]
- HONG YC, 2017. Stand characteristics and water conservation capacity of *Pinus massoniana* and *Castanopsis fissa* mixed plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 45(4): 53-59. [洪宜聪, 2017. 马尾松闽粤栲异龄复层混交林的林分特征及涵养水源能力[J]. 东北林业大学学报, 45(4): 53-59.]
- HUANG M, HUANG XP, CHEN XC, et al., 2022. Genetic diversity analysis of *Liquidambar formosana* based on ISSR molecular marker[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University ( Natural Science Edition) , 51(4): 524-532. [黄敏, 黄旭萍, 陈孝丑, 等, 2022. 基于 ISSR 分子标记的枫香遗传多样性分析 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 51(4): 524-532.]
- LIN HY, 2024. Afforestation experiment and effectiveness analysis of *Sapium discolor*, *Schima superba*, and *Liquidambar formosana* on preventive logging sites in pine forests[J]. Henan Agriculture, 24: 57-59. [林华英, 2024. 山乌柏、木荷、枫香在松林预防性采伐迹地上的造林试验及成效分析[J]. 河南农业, 24: 57-59.]
- LIN QC, 2022. Preliminary study on the effect of intercropping 4 broad-leaved trees in *Pinus massoniana* Forest[J]. South China Agriculture, 16(22): 71-73. [林启春, 2022. 马尾松林内套作 4 种阔叶树成林效果初探 [J]. 南方农业, 16(22): 71-73.]
- LI JN, OU HB, HUANG L, et al., 2024. Correlation analysis between growth traits and biomass distribution of *Albizia odoratissima*[J]. Chinese Journal Of Tropical Agriculture, 44(4): 18-23. [李佳男, 欧汉彪, 黄玲, 等, 2024. 香合欢幼苗生长性状与生物量分布的相关性分析[J]. 热带农业科学, 44(4): 18-23]
- LI FX, ZHANG YM, YI WD, et al., 2016. Analysis on growth differences between mixed plantations of *Pinus massoniana* and *Schima superba* and their pure plantation [J]. South China Forestry Science, 44(5): 17-20. [李方兴, 张意苗, 易伟东, 等, 2016. 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, 44(5): 17-20.]
- LIU CX, JIN Y, YU JP, et al, 2024. Characteristics of roots prouting trees of *Castanopsis eyrei* and *Schima superba* communities in 1 hm<sup>2</sup> forest plot at Chawan, Gutianshan National Nature Reserve[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 41(5): 573-582+592. [刘常幸, 金毅, 余建平, 等, 2014. 古田山茶园样地甜槠-木荷林根萌特征分析[J]. 浙江大学学报(理学版), 41(5): 573-582+592.]
- LIU GC, 2018. A preliminary report on test forest of four valuable broad-leaved tree species mixed with *Pinus massoniana*[J]. Journal of Fujian forestry science and technology, 45( 3) : 52-56. [刘国昌, 2018. 4 种珍贵阔叶树与马尾松混交试验初报[J]. 福建林业科技, 45( 3) : 52-56.]
- LU LH, GUO WF, CAI DX, et al., 2019. Study on carbon storage of monoculture and mixed plantation of *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 39(7): 78-84. [卢立华, 郭文福, 蔡道雄, 等, 2019. 马尾松与红椎纯林及混交林生态系统碳储量研究[J]. 中南林业科技大学学报, 39(7): 78-84.]
- LUO QF, HU L, TAN JH, et al., 2020. Phenotypic diversity of seeds of *Albizia odoratissima* from Baise district [J]. Journal of Forest and Environment, 40(1): 62-67. [罗群凤, 胡拉, 谭健晖, 等, 2020. 百色地区香合欢种子表型性状变异分析[J]. 森林与环境学报, 40(1): 62-67.]
- LUO D, WANG CS, ZENG J, 2021. Response of growth and branch development of *Betula alnoides* young plantation to light environment[J]. Journal of South China Agricultural University, 42(4): 83-88. [骆丹, 王春胜, 曾杰, 2021. 西南桦幼林生长与枝条发育对光环境的响应[J]. 华南农业大学学报, 42(4): 83-88.]
- JIANG Y, WEI SX, LIN JY, et al., 2020. Analysis on seed phenotypic traits and growth differences of different

- Albizia odoratissima* provenances[J]. Guangxi Forestry Science, 49(1): 66-70. [姜英, 韦钰星, 林建勇, 等, 2020. 香合欢不同种源种子表型性状及生长差异分析[J]. 广西林业科学, 49(1): 66-70.]
- MENG LY, HUANG YL, LIANG JX, et al., 2023. Effects of pruning on the form quality of artificial young forests of *Michelia macclurei*, *Castanopsis hystrix* and *Castanopsis fissa*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 59(9): 106-116. [蒙兰杨, 黄永利, 梁君霞, 等, 2023. 修枝对火力楠、红椎和大叶栎人工幼龄林林木形质的影响[J]. 林业科学, 59(9): 106-116.]
- MIURA M, YAMAMOTO S, 2003. Structure and dynamics of a *Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* population in an old-growth, evergreen, broad-leaved forest: The importance of sprout regeneration[J]. Ecological Research, 18:115-129 .
- MO MF, YANG ZQ, DONG Q, et al., 2024. Analysis on the root sprout ability of the progeny of *Albizia odoratissima* superior tree[J]. Chinese Journal Of Tropical Agriculture, 44(11): 1-6. [莫明锋, 杨章旗, 董琼, 等, 2024. 黑格优树子代林断根萌蘖能力分析[J]. 热带农业科学, 44(11): 1-6.]
- OPIO C, JACOB N, COOPERSMITH D, 2002 . Height to diameter ratio as a competition index for young conifer plantations in northern British Columbia, Canada[J]. Forest Ecology and Management, 137: 245-252.
- QIU JN, 2024. Comparative analysis of afforestation of 8 broad-leaved tree species in the transformation of *Pinus massoniana* forest stands[J]. Modern horticulture, 24: 39-42. [邱建能, 2024. 马尾松林分改造中 8 种阔叶树种造林比较分析[J]. 现代园艺, 24: 39-42.]
- SHAA WW, DONG LB, 2023. Height to diameter ratio model of *Larix gmelinii* in Daxing' anling Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 34(2): 342-348. [邵威威, 董灵波, 2023. 大兴安岭地区兴安落叶松的高径比模型 [J]. 应用生态学报, 34(2): 342-348.]
- SHU J, JIANG B, CHENG XR, et al., 2013. Effect of under planted trees in *Pinus massoniana* plantation on growth and soil nutrients[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 29(10): 82-86. [舒骏, 江斌, 成向荣, 等, 2013. 马尾松复层林伴生树种生长及对土壤养分的影响[J]. 中国农学通报, 29(10): 82-86.]
- SUN RX, 2017. Genetic diversity and phylogeography of *Liquidambar formosana* Hance in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry . [孙荣喜, 2017. 中国枫香树遗传多样性及谱系地理研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院.]
- SUN L, 2024. Nutrient utilization strategies for 4 subtropical tree species[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology. [孙龙, 2024. 亚热带 4 个树种的养分利用策略[D]. 长沙: 中南林业科技大学.]
- SU YP , 2016. Preliminary exploration of intercropping precious tree species under broad-leaved forests in the mountainous areas of southern Fujian[J]. Journal of Green Science and Technology, 5: 21-22. [苏贻攀, 2016. 闽南山地阔叶林下套种珍贵树种初探[J]. 绿色科技, 5: 21-22.]
- TONG QY, XU GF, WANG CD, et al., 2004. Inquiry into target and method for *Pinus massoniana* forest transformation[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 24(5): 41-46. [童群益, 徐高福, 王振懂, 等, 2004. 马尾松林阔叶化改造的目标和方法探讨[J]. 浙江林业科技, 24(5): 41-46.]
- HUANG MX, 2019. Analysis on growth effect of different-age mixed forest formed by replanting evergreen and deciduous broad-leaved tree species in low-benefit *Pinus massoniana* forest[J]. Anhui Agriculture Science Bulletin, 25( 2/3) : 90-91. [黄茂勋, 2019. 马尾松低效林补植常绿落叶阔叶树种形成异龄混交林生长效果分析[J], 安徽农学通报, 25 ( 2/3) : 90-91.]
- WANG SR, YAN YB, DING XL, et al., 2025. Effects of mixed transformation of 30-year-old *Pinus massoniana* pure forest on soil nutrients[J]. Protection Forest Science and Technology, 4: 13-17. [王思荣, 严艳兵, 丁新

- 兰, 等, 2025. 30年生马尾松纯林混交改造对土壤养分的影响[J]. 防护林科技, 4: 13-17.]
- WANG ZH, ZHANG XH, YE XL, et al., 2024. A preliminary study on uneven-Aged mixing patterns of *Cunninghamia lanceolata* and broad-leaved trees[J]. Chinese Journal of tropical agriculture, 44(1): 62-68. [王智慧, 张秀华, 叶小玲, 等, 2024. 杉阔异龄混交模式的初步研究[J]. 热带农业科学, 44(1): 62-68.]
- WANG ZH, CEN ZZ, LIU XL, et al., 2025. Effect of precious species transformation on stand growth in *Pinus massoniana* plantations in the Dry-Hot valley of northwest Guangxi, China[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 45(5): 84-88. [王智慧, 岑祚舟, 刘晓璐, 等, 2025. 桂西北干热河谷区马尾松珍贵化改造对林分生长量的影响[J]. 热带农业科学, 45(5): 84-88.]
- WU KY, PAN P, OUYANG XZ. et al., 2025. Biomass characteristics and influencing factors of different *Pinus massoniana* forest types[J]. Journal of Northeast Forestry University, 53(8): 26-34. [邬可钰, 潘萍, 欧阳勋志, 等, 2025. 不同马尾松林分类型生物量特征及其影响因素[J]. 东北林业大学学报, 53(8): 26-34.]
- YAO JB, CHU XL, ZHOU ZC, et al., 2017. Effects of neighbor competition on growth, fine root morphology and distribution of *Schima superba* and *Cunninghamia lanceolata* in different nutrient environments[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 28(5): 1441-1447. [姚甲宝, 楚秀丽, 周志春, 等, 2017. 不同养分环境下邻株竞争对木荷和杉木生长、细根形态及分布的影响[J]. 应用生态学报, 28(5): 1441-1447.]
- YIN S, ZHAO F, OUYANG XZ, 2015. A comparison on water-holding capacity of forest litter and soil of mixed forests of *Pinus massoniana* and *Schima superba* in different proportions[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 37(3): 454-460. [殷沙, 赵芳, 欧阳勋志, 2015. 马尾松木荷不同比例混交林枯落物和土壤持水性能比较分析[J]. 江西农业大学学报, 37(3): 454-460.]
- YOU JJ, ZHANG WH, DENG L, 2015. Evaluation of the tree form quality of middle-aged plantation under different canopy densities in Huanglong Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 26(7): 1945-1953. [尤健健, 张文辉, 邓磊, 2015. 黄龙山不同郁闭度油松中龄林林木形质评价[J]. 应用生态学报, 26(7): 1945-1953.]
- YUAN QQ, DENG HW, LIU R, et al., 2023. Determination and evaluation of different families of *Liquidambar formosana*[J]. Journal of Temperate Forestry Research, 6(3): 8-14. [原勤勤, 邓煌蔚, 刘儒, 等, 2023. 枫香不同家系测定与评价[J]. 温带林业研究, 6(3): 8-14.]
- YU B, 2023. Characteristics and impact factors of self-pruning in natural *Larix gmelinii* forest[J]. Journal of Zhejiang Agricultural and Forestry University, 40(1): 209-216. [玉宝, 2023. 兴安落叶松天然林自然整枝特征及其影响因子[J]. 浙江农林大学学报, 40(1): 209-216.]
- YU L, JIA WW, CONG PD. 2021. The effect of thinning on form quality of *Pinus koraiensis* plantations[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science Edition), 41(6): 149-159. [于雷, 贾炜玮, 丛培东, 2021. 抚育间伐对红松人工林林木形质的影响 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 41(6): 149-159.]
- YU SC, ZHANG WH, YOU JJ, et al., 2017. Effect of thinning on *Quercus wutaishanica* trees form quality by the analytic hierarchy process in Huanglong Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 53(11): 104-113. [于世川, 张文辉, 尤健健, 等, 2017. 抚育间伐对黄龙山辽东栎林木形质的影响[J]. 林业科学, 53(11): 104-113.]
- ZENG CH, 2024. Analysis on the effect of thinning and interplanting broadleaved trees of *Pinus massoniana* in Changting soil erosion area[J]. Fujian Forestry, 39(1): 37-40. [曾春华, 2024. 长汀水土流失区马尾松林间伐套种阔叶树改造效果分析[J]. 福建林业, 39(1): 37-40.]
- ZHANG Y, YANG LP, YANG G, et al., 2023. Comparison of leaf photosynthetic capacity and water retention capacity of 6 *Schima superba* provenances from Guangxi[J]. Subtropical Agriculture Research, 19(3): 162-169.

[张燕, 杨丽萍, 杨康, 等, 2023. 6个广西种源荷木光合及保水力的比较[J]. 亚热带农业研究, 19(3): 162-169.]

ZHAO XH, ZHAO P, ZHU LW, et al., 2015. Effect of tree height on sap flow, whole-tree transpiration and time lag of *Schima superba*[J]. *Guihaia*, 35(1): 53-60. [赵秀华, 赵平, 朱丽薇, 等, 2015. 不同树高对荷木液流密度、整树蒸腾量和时滞的效应[J]. 广西植物, 35(1): 53-60.]

ZHU WZ, WANG JX, LUO CR, et al, 2007. Progresses of studies on forest sprout regeneration. *Scientia Silvae Sinicae*, 43(9): 74-82. [朱万泽, 王金锡, 罗成荣, 等, 2007. 森林萌生更新研究进展[J]. 林业科学, 43(9): 74-82]

ZUO KJ, 2023. Research on synergistic path of eucalyptus reform and stimulating the growth of rural income in Guangxi based on the theory of "Two Mountains" [J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 38(4): 78-82. [左科举, 2023. 基于“两山”理论的广西桉树改退与农民增收协同路径研究[J]. 广西农学报, 38(4): 78-82.]