

## 不同基质配比与根瘤菌处理对花榈木苗期生长的影响\*

曹广华<sup>1</sup> 陈婉颖<sup>2</sup> 戴敏玲<sup>1</sup> 王丛丛<sup>1</sup> 王洪峰<sup>1</sup>  
袁丛军<sup>3</sup> 何春梅<sup>1</sup>

(1. 广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520;

2. 广州市生态园林科技协同创新中心/广州市林业和园林科学研究院, 广东 广州 510405;

3. 贵州省林业科学研究院, 贵州 贵阳 550005)

**摘要** 为筛选适宜花榈木 *Ormosia henryi* 幼苗生长的育苗基质及优化根瘤菌应用技术, 研究以不同基质配比 (进口泥炭土、国产泥炭土、蛭石、珍珠岩、黄泥) 结合根瘤菌处理为变量, 测定其苗期株高、地径、叶片数、叶长叶宽、可溶性糖、硝态氮等生长及生理指标, 并通过隶属函数法综合评价育苗效果。结果表明: 未接种根瘤菌时, 基质 B (进口泥炭土: 蛭石: 珍珠岩 = 2: 1: 1) 综合隶属函数值最高 (0.61), 14 个月生株高净生长量最大 (3.81 cm), 叶长最长 (3.64 cm); 接种根瘤菌后, 基质 A (进口泥炭土: 黄泥 = 1: 1) 综合隶属函数值最高 (0.76), 叶片数最多, 可溶性糖含量最高 (12.93 mg · g<sup>-1</sup>), 同时降低 CAT 与 POD 活性, 增强抗逆性。综上, 基质 A (接种根瘤菌) 与基质 B (未接种根瘤菌) 分别为花榈木高效育苗的最优选择。

**关键词** 花榈木; 基质配比; 根瘤菌; 苗期生长

中图分类号: S723.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2025) 02-0086-10

DOI: 10.20221/j.cnki.2096-2053.202502012

Effects of Different Substrate Proportions and Rhizobia Treatments  
on Seedling Growth of *Ormosia henryi*CAO Guanghua<sup>1</sup> CHEN Wanying<sup>2</sup> DAI Minling<sup>1</sup> WANG Congcong<sup>1</sup>  
WANG Hongfeng<sup>1</sup> YUAN Congjun<sup>3</sup> HE Chunmei<sup>1</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. Guangzhou Collaborative Innovation Center on Science-tech of Ecology and Landscape/Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture, Guangzhou, Guangdong 510405, China; 3. Guizhou Academy of Forestry, Guiyang, Guizhou 550005, China)

**Abstract** To identify suitable growing substrates for *Ormosia henryi* seedlings and optimize rhizobia application techniques, this study evaluated the effects of different substrate formulations (imported peat, domestic peat, vermiculite, perlite, and yellow clay) combined with rhizobia inoculation on seedling growth and physiological parameters, including plant height, ground diameter, leaf number, leaf length and width, soluble sugar content, and nitrate nitrogen content. The seedling cultivation efficacy was comprehensively assessed using

\* 基金项目: 广东省省级科技计划项目 (2024A1111120014), 广州市科技支撑项目 (202307130200)。

第一作者: 曹广华 (1997—), 男, 学士, 主要从事林下经济植物资源利用研究。E-mail: 2077009770@qq.com

通信作者: 何春梅 (1984—), 女, 高级工程师, 主要从事植物资源保护与开发利用研究。E-mail: hcm\_09@163.com

the membership function method. Results indicated that without rhizobia inoculation, substrate B (imported peat : vermiculite : perlite = 2 : 1 : 1) achieved the highest comprehensive membership function value (0.61), along with the maximum net growth in plant height of 14-month-old seedlings (3.81 cm) and the longest leaf length (3.64 cm). When rhizobia were inoculated, substrate A (imported peat : yellow clay = 1 : 1) exhibited the highest comprehensive membership function value (0.76), the greatest leaf number, the highest soluble sugar content ( $12.93 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ), reduced activities of catalase (CAT) and peroxidase (POD), and enhanced stress resistance. In conclusion, substrate A (with rhizobia inoculation) and substrate B (without rhizobia inoculation) are the optimal choices for efficient seedling cultivation of *O. henryi*. This study provides technical and methodological references for high-yield seedling cultivation of *O. henryi*.

**Key words** *Ormosia henryi*; substrate proportion; rhizobia; seedling growth

花榈木 *Ormosia henryi*, 又称花梨木、臭桐柴, 为豆科红豆属常绿乔木。花榈木的根部含有固氮菌, 能够有效改良土壤, 增加土壤肥力, 促进其他植物的生长<sup>[1]</sup>。其木材致密质重, 纹理美丽, 是制作轴承和细木家具的理想材料, 耐高温日灼以及树形优美的特性使其成为了优良的园林绿化树种和防火树种<sup>[2]</sup>。除了生态和园林应用外, 花榈木还具有丰富的药用价值, 其根、枝、叶均可入药, 常用于治疗跌打损伤、腰肌劳损、关节痛等多种疾病; 其根皮和叶还具有治疗骨折和烧烫伤的外用效果<sup>[3]</sup>。由于其稀有性及重要的生态和药用价值, 花榈木在我国被列为国家二级重点保护野生植物<sup>[4]</sup>。

花榈木因材质优良而被过度利用, 自然繁育能力也较低, 致使这一珍贵树种资源稀缺<sup>[5]</sup>。想要缓解其产业链中日益加剧的供需矛盾, 亟需在保护现有花榈木资源的基础上大力发展人工种植。杨柳琴等<sup>[6]</sup>分析花榈木的株高和地径, 得出以  $V$  (黄心土) :  $V$  (桐果皮) = 8 : 2 为基质培育的花榈木苗木株高和地径的生长效果最好。罗旋<sup>[7]</sup>研究不同育苗基质对花榈木容器苗生长及生理特性的影响, 结果显示, 最佳育苗基质配方为 80% 泥炭与 20% 椰糠的混合基质。有研究表明根瘤菌能够将大气中的氮气转化为植物可利用的氨, 促进苜蓿 *Medicago sativa* 增产提质<sup>[8]</sup>。有研究者从花榈木根际土壤及根系中分离得到了多种根瘤菌, 包括 GL-4-1 菌核青霉、根际促生菌 GX2-6 和解磷根瘤菌 XT202016, 实验结果表明, 这些根瘤菌可以明显提高花榈木的结瘤率, 并促进幼苗的生长<sup>[9-11]</sup>。段如雁等<sup>[12-13]</sup>的研究表明, 有根瘤的花榈木在生长和生理特性上显著优于无根瘤的花榈木, 具体表现为苗高、地径、根长、根表面积和

生物量等指标均有显著提升。目前, 前人对花榈木的研究主要集中在生理生化、濒危机制、繁育技术、生长规律以及价值开发利用等方面, 但在不同基质配方上结合根瘤菌处理的研究较少。因此, 本研究旨在通过探究不同基质配比 (2 种泥炭土、珍珠岩、蛭石、黄泥) 与根瘤菌处理, 测定花榈木苗期的株高、地径、叶片数、叶长叶宽、可溶性糖、硝态氮等生长指标, 并分析其对花榈木生长和生理的影响, 以期筛选出在有无接种根瘤菌条件下栽培效果最佳的基质配方, 为花榈木幼苗的高效栽培提供技术与方法参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地设在广东省林业科学研究院温室大棚内, 该地隶属广东省广州市天河区, 位于北纬  $23^{\circ} 12' 0''$ 、东经  $113^{\circ} 22' 10''$ , 地处北回归线以南, 属亚热带季风气候, 全年 4—6 月为雨季, 8—9 月炎热; 年平均降雨量 1 683 mm。温室大棚内年平均温度为  $23^{\circ}\text{C}$ , 平均相对湿度为 70%, 棚内设有自动喷雾系统, 每天早晚各自动浇水 1 次, 每次浇水时长控制在 10 min。

### 1.2 试验材料

1.2.1 苗木 于 2022 年 10 月中旬在广东省惠州市博罗县上庵林场采集花榈木种子, 母树树龄约 60 a, 胸径 35.62 cm, 枝繁叶茂, 未见病虫害, 种子千粒重为 186 g, 平均长度 9.69 mm, 宽度 8.35 mm, 厚度 4.77 mm, 保存于温度为  $4^{\circ}\text{C}$ , 湿度为 25% 的低温低湿储藏箱。取 500 粒花榈木种子去皮处理后, 于 2023 年 1 月播种于穴盘。待种子发芽生长后, 于 2023 年 8 月选取株高为 7.0~7.5 cm, 地径为 1.5~2.0 mm 的健康花榈木幼苗

150株。试验开始于2023年1月,结束于2024年2月,苗木苗龄总计约14个月。

1.2.2 基质 选用2种不同来源的泥炭土(国产和进口)、蛭石、珍珠岩、黄泥为原料,根据不同比例配制育苗基质(表1)。

1.2.3 根瘤菌 选用黑龙江省卫星生物科技有限公司生产的微生物肥料根瘤菌剂,每毫升有效活菌数 $\geq 20 \times 10^9$ 。登记证号为微生物肥(2011)准字0708号;产品标准号为GB20287-362006。

### 1.3 试验设计

以黄泥、蛭石、珍珠岩、两种来源的泥炭土为基质,按体积比配成5种基质A、B、C、D、E(表1)。配制好的育苗基质置于大小一致的花盆内,取样进行理化性质分析。取生长基本一致的花榈木幼苗进行移栽。每种基质各栽种30株,其中15株以浇灌的方式接种根瘤菌。花榈木幼苗生长期间,光照强度控制在75%左右,使用防晒网进行遮荫,及时除杂草,每15d灌施一次2‰水溶肥(复合肥:N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 15-15-15,总养分 $\geq 45\%$ )。定期进行花榈木幼苗生长及生理指标的测定。

表1 育苗基质组成

Table 1 Composition of seedling substrate

处理	基质组成体积比
A	进口泥炭土:黄泥=1:1
B	进口泥炭土:蛭石:珍珠岩=2:1:1
C	国产泥炭土:黄泥=1:1
D	国产泥炭土:蛭石:珍珠岩=2:1:1
E	黄泥

### 1.4 基质理化性状的测定

称量空环刀质量( $W_0$ )及标定体积( $V_0$ ),取风干基质添加到环刀中,称量质量( $W_1$ ),浸泡24h,称量质量( $W_2$ ),将水分自由沥干后再次称量质量( $W_3$ ),测量重复3次。

$$B_D = \frac{W_1 - W_0}{V_0}$$

$$T_p = \left( \frac{W_2 - W_1}{V_0} \right) \times 100$$

$$C_p = \left( \frac{W_3 - W_1}{V_0} \right) \times 100$$

$$A_p = T_p - C_p$$

$$P_R = \frac{A_p}{C_p}$$

式中, $B_D$ 表示容重(Bulk density), $g \cdot cm^{-3}$ ; $T_p$ 表示总孔隙度(Total porosity),%; $C_p$ 表示毛细管孔隙度(Capillary porosity),%; $A_p$ 表示通气孔隙度(Aeration porosity),%; $P_R$ 表示大小孔隙比(Pore ratio)。

### 1.5 生长指标的测定

栽种后每隔1个月用直尺、游标卡尺测量并记录株高和地径,时间持续至次年2月。于次年2月在接种根瘤菌与未接种根瘤菌的不同基质中分别随机选取6株花榈木幼苗统计叶片数,每1株植株选取3片大小一致的叶片用直尺测量其叶长、叶宽。统计苗高、地径净生长量,并计算高径比。

$$H_{DR} = \frac{H}{D}$$

式中, $H_{DR}$ 表示高径比(Height-to-Diameter Ratio), $H$ 表示苗高(cm), $D$ 表示地径(mm)。

### 1.6 生理指标的测定

生理指标的测定参考高俊凤<sup>[14]</sup>主编的《植物生理学实验指导》。

1.6.1 可溶性糖含量测定 运用蒽酮比色法,随机挑选5~6株同一处理的花榈木植株,取大小基本相一致位于植株叶片中间位置的叶片,混合称取0.1g样本,加入1mL蒸馏水研磨成匀浆,倒入有盖离心管中,使用酶标仪进行测定。

酶标仪预热30min以上,调节波长至620nm,分光光度计蒸馏水调零,于620nm处测定吸光值,分别记为 $A_{blank}$ 表示A空白管、 $A_{sample}$ 表示A测定管、 $A_{standard}$ 表示A标准管,并计算 $\Delta A = A_{sample} - A_{blank}$ 、 $\Delta A_{standard} = A_{standard} - A_{blank}$ 。一个样本重复测定3次,求平均值。根据标准管的浓度( $y$ , $mg \cdot mL^{-1}$ )和吸光度 $\Delta A$ 标准( $x$ , $\Delta A$ 标准),建立标准曲线。根据标准曲线,将 $\Delta A$ ( $x$ , $\Delta A$ )带入公式 $y = k \times \Delta A + b$ ,计算样本浓度( $y$ , $mg \cdot mL^{-1}$ )。

1.6.2 硝态氮含量的测定 运用水杨酸法,随机挑选5~6株同一处理的花榈木植株,取大小基本相一致位于植株叶片中间位置的叶片,混合称取0.1g样本,加入1mL蒸馏水研磨成匀浆,倒入有盖离心管中,运用水杨酸法使用分光光度计测定硝态氮含量。

分光光度计预热30min以上,调节波长至410nm,蒸馏水调零,取1mL于1mL玻璃比色皿中测定410nm处吸光值 $A$ ,分别记为 $A_{blank}$ 表示A空白管、 $A_{control}$ 表示A对照管、 $A_{standard}$ 表示A标准

管, 计算  $\Delta A = A_{\text{sample}} - A_{\text{control}}$ 、 $\Delta A_{\text{standard}} = A_{\text{standard}} - A_{\text{blank}}$ 。1 个样本重复测定 3 次, 求平均值。

1.6.3 CAT (过氧化氢酶) 含量测定 运用紫外吸收法, 随机挑选 5~6 株同一处理的花榈木植株, 取大小基本相一致位于植株叶片中间位置的叶片, 混合称取 0.1 g 组织, 加入 1 mL 提取液进行冰浴匀浆。运用 CAT 能够催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  分解, 而  $\text{H}_2\text{O}_2$  在 240 nm 处有特征吸收峰, 因此反应溶液在 240 nm 处的吸光度会随反应时间下降。根据吸光度的变化率计算出 CAT 活性。

实验时酶标仪预热 30 min 以上, 调节波长至 240 nm, 蒸馏水调零。在 96 孔板中加入 10  $\mu\text{L}$  样本和 190  $\mu\text{L}$  工作液, 立即混匀并计时, 记录 240 nm 下初始吸光值  $A_1$  和 1 min 后的吸光值  $A_2$ 。计算  $\Delta A = A_1 - A_2$ 。一个样本重复测定 3 次, 求平均值。

1.6.4 POD (过氧化物酶) 含量测定 运用愈创木酚法, 随机挑选 5~6 株同一处理的花榈木植株, 取大小基本相一致位于植株叶片中间位置的叶片, 混合称取 0.1 g 组织, 加入 1 mL 提取液进行冰浴匀浆。利用 POD 在有过氧化氢存在的条件下, 能使愈创木酚发生氧化, 生成茶褐色物质, 该物质在 470 nm 有最大光吸收这一特性对 POD 含量进行测定。

酶标仪预热 30 min 以上, 调节波长至 470 nm, 蒸馏水调零。在 EP 管中按顺序加入试剂, 立即混匀并计时, 立即吸取 200  $\mu\text{L}$  反应液转移至 96 孔板中, 记录 470 nm 下 30 s 时的吸光值  $A_1$  和 1 min 30 s

后的吸光值  $A_2$ 。计算  $\Delta A = A_2 - A_1$ 。

## 1.7 数据分析

用 Excel 2021 软件进行试验数据整理; 用 SPSS 26.0 软件统计各指标的均值和标准误差, 对所有指标进行 LSD 与 Dunnett 检验差异显著性分析; 用 OriginPro 8. SR3 软件作图; 用模糊数学中的隶属函数方法进行统计分析。

隶属函数值:  $X(f) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。

反隶属函数值:  $X(f) = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。

将各处理不同指标的隶属函数值进行累加, 取其平均值, 即为综合隶属函数值。

## 2 结果与分析

### 2.1 基质的理化性质分析

由表 2 可知, 5 种基质间的容重差异显著 ( $P < 0.05$ ), 其中 E 基质 (黄泥) 的容重最大, 保水性最好; B 基质 (进口泥炭: 珍珠岩: 蛭石 = 2: 1: 1) 容重最小, 基质最疏松, 保水性能最差; D 基质 (国产泥炭: 珍珠岩: 蛭石 = 2: 1: 1) 容重位列第二; A 基质 (进口泥炭: 黄泥 = 1: 1) 容重位列第三。泥炭+珍珠岩+蛭石的基质搭配容重较小, 土质较疏松, 而泥炭土+黄泥的搭配容重较大, 保水性较好, 黄泥单一基质的容重最大, 保水性最好, 但基质透气性不好。B 基质的总孔隙度、毛管孔隙最大, C 基质最小。C 基质的通气孔隙、大小孔隙比最大, B 基质最小。

表 2 花榈木不同基质的理化性质比较

Table 2 Comparison of physical and chemical properties of different substrates of *Ormosia henryi*

基质	容重/(g · cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	毛管孔隙/%	通气孔隙/%	大小孔隙比
A	0.63±0.01c	53.76±0.81ab	42.98±2.07ab	10.78±2.88b	0.25±0.08c
B	0.20±0.01f	57.33±0.41a	47.88±4.46ab	9.49±4.02b	0.21±0.11c
C	0.74±0.04b	36.54±0.86d	12.41±0.64e	24.13±1.36a	1.95±0.21a
D	0.39±0.02d	41.11±2.68d	19.70±1.47d	21.41±4.14a	1.10±0.3b
E	1.14±0.02a	38.19±1.41d	29.26±3.65c	8.93±4.76b	0.32±0.19c

注: 表中同列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 不同处理对地径、株高的影响

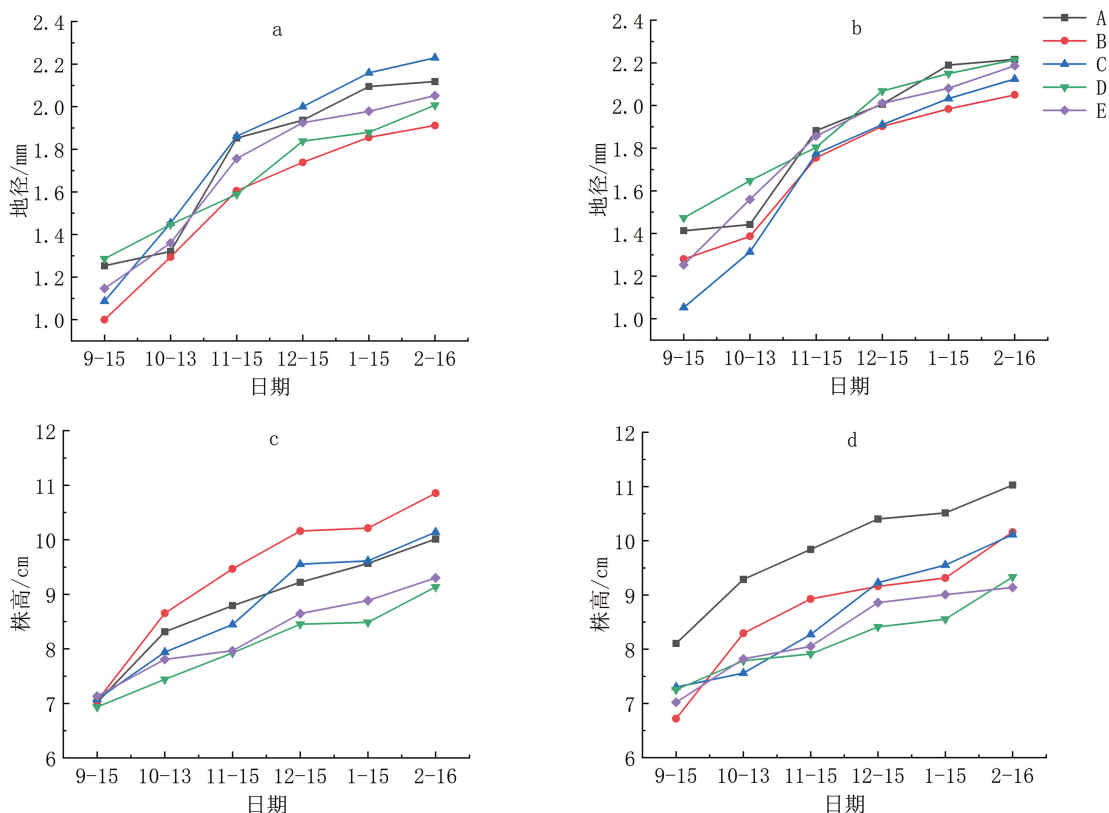
从图 1 可得出, 花榈木地径生长趋势在不同基质中存在差异; 其中基质 A 的生长趋势大致呈现出慢-快-慢, 9—10 月的生长较为缓慢, 10—12 月生长速度迅速加快, 次年 1 月之后地径的生长减缓。对于未接种根瘤菌的花榈木幼苗而言, 基质 C 地径生长趋势最佳; 初次测量时, 基质 C 的地径仅比基

质 B 高 0.09 mm, 但结束测量时基质 B 高 0.32 mm, 在 5 种基质中地径增长量位列第一; 结束测量时基质 B 的地径值在 5 种基质中依旧是最小的。初次测量时, 基质 D 地径最大, 其次为基质 A, 而结束测量时, 基质 D 在 5 种基质中地径值位列第四, 基质 A 地径值仅次于基质 C。对于接种根瘤菌的花榈木幼苗而言, 基质 C 地径长势最佳, 基质 C

初次测量时地径最小, 结束测量时仅比基质 A 地径小 0.09 mm。其次, 基质 E、基质 B 初次测量时相差不大, 结束测量时基质 B 地径是 5 种基质中最小的, 基质 E 地径比基质 B 高 0.14 mm。基质 D 在初次测量时地径最大, 在结束测量时在 5 种基质中位列第二, 基质 A 在初次测量时仅次于基质 D, 结束测量时地径数值在 5 种基质中位列第一。

花榈木幼苗株高生长大致呈现快-慢-快的趋势, 花榈木幼苗的第一个生长高峰出现在 9—10 月, 第二个生长高峰出现在次年 1—2 月。对于没有接种根瘤菌的花榈木幼苗而言, 在初次测量时 5 种基质的株高测量值都相差不大, 结束测量时基

质 B 株高测量值最大, 其次是基质 C。基质 A 与基质 B 株高生长趋势大致相同, 基质 A 在 9—10 月快速增长后, 10 月—次年 2 月大致处于匀速增长。基质 D 与基质 E 株高生长趋势也大致相同, 生长都比较缓慢, 在 5 种基质中株高排名全周期都处于最后。对于接种根瘤的花榈木幼苗而言, 基质 B 株高生长趋势最佳, 基质 B 的株高在初次测量时最小, 结束测量时株高仅次于基质 A, 基质 A 在 9 月初次测量到次年 2 月的株高一直都是 5 种基质中最大的; 基质 C 的株高在 5 种基质中基本上位列第三; 基质 D 与基质 E 株高生长趋势基本趋同, 在 5 种基质中分别位列第四、第五。



注: 基质 A、B、C、D、E 分别为进口泥炭土: 黄泥=1:1、进口泥炭土: 蛭石: 珍珠岩=2:1:1、国产泥炭土: 黄泥=1:1、国产泥炭土: 蛭石: 珍珠岩=2:1:1、黄泥; 图中 a、c 为无根瘤, b、d 为有根瘤; 苗龄为 14 个月。

图 1 不同处理花榈木地径与株高的生长趋势

Figure 1 Growth trend of ground diameter and plant height of *Ormosia henryi* under different treatments

### 2.3 不同处理苗高、地径净生长量及高径比的影响

由表 3 可知, 基质 C 的地径净生长量在有无根瘤菌中都处在 5 种基质里最高, 无根瘤菌 1.14 mm, 有根瘤菌 1.07 mm, 与基质 D 差异显著 ( $P < 0.05$ )。无根瘤菌的 B 基质与 E 基质的平均地径净生长量均为 0.91 mm, 位列 C 基质之后; 基质 D

的地径净生长量在 5 种基质中最低, 仅占最高基质 C 的 63.16%。接种根瘤菌的基质 E 与基质 C 的地径净生长量差异不显著, 仅相差 0.14 mm, 位列第二; 基质 B 与基质 D 的地径净生长量基本一致, 比其余 3 种基质低, 位列第四、第五。

基质 B 的株高净生长量高于其余 4 种基质, 与基质 E 有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 与基质 A 和 C

差异不显著。无根瘤菌的基质 E 株高净生长量表现最差，仅占最高基质 B 的 68.24%。接种根瘤菌的基质 D 的株高净生长量最低，仅有 2.08 cm；基质 E 与基质 D 的株高净生长量基本一致，两种基质仅相差 0.04，位列第四。

高径比越小，苗木生长偏高细；高径比越大，

则苗木偏矮粗。无根瘤菌的基质 B 高径比与其他 4 种基质差异显著 ( $P < 0.05$ )，其余 4 种基质之间差异不显著，基质 E 在 5 种基质中高径比最小。有根瘤菌的基质 A 高径比最大，基质 E 最小，5 种基质中的基质 D、E 之间差异不显著，与其余 3 种基质有显著差异。

表 3 不同处理花榈木苗高、地径净生长量及高径比的表现

Table 3 The performance of height, ground diameter net growth, and height-diameter ratio in *Ormosia henryi* seedlings under different treatments

基质	地径净生长量/mm		株高净生长量/cm		高径比	
	无根瘤菌	有根瘤菌	无根瘤菌	有根瘤菌	无根瘤菌	有根瘤菌
A	0.86±0.32b	0.80±0.27b	2.99±1.97ab	2.92±1.28ab	4.77±1.17b	5.02±0.72a
B	0.91±0.37b	0.77±0.22b	3.81±1.51a	3.44±1.51a	5.74±1.00a	4.99±0.85a
C	1.14±0.32a	1.07±0.37a	3.07±1.37ab	2.81±1.44ab	4.56±0.64b	4.85±0.90a
D	0.72±0.19b	0.74±0.23b	2.20±1.49b	2.08±1.28b	4.59±1.04b	4.25±0.85b
E	0.91±0.19b	0.93±0.20ab	2.17±0.88b	2.12±1.30b	4.52±0.47b	4.21±0.60b

注：表中同列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )；苗龄为 14 个月。

#### 2.4 不同处理对叶片数、叶长、叶宽、长宽比的影响

由图 2 可看出，花榈木幼苗的叶片数为 10~25。在无根瘤菌的基质 C 的叶片数显著高于基质 A、B 与 C ( $P < 0.05$ )；基质 D 的叶片数显著低于其余 4 种基质处理。接种根瘤菌的基质 A 的叶片数与基质 D、E 有显著差异，基质 D 的叶片数显著低于基质 A、B 与 C。

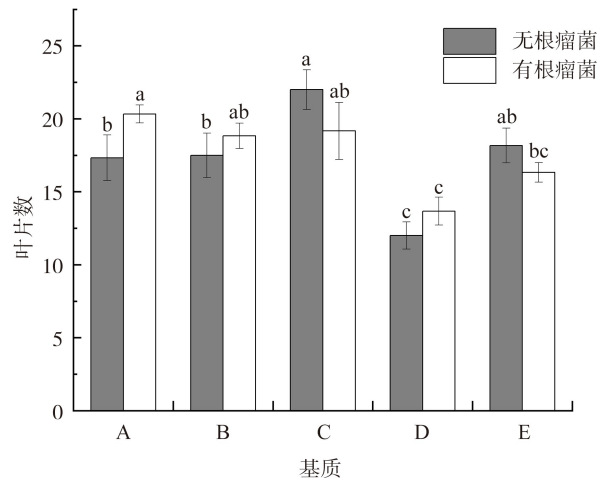
由表 4 可知，花榈木幼苗的叶长为 3~5 cm。无根瘤菌的花榈木幼苗的叶长在 5 种基质之间差异不显著，在基质 B 的叶长相对其余 4 种基质最大，在基质 E 的叶长相对其余 4 种基质最小。接种根瘤菌的基质 A、B 的叶长显著高于基质 C、E ( $P < 0.05$ )。

花榈木幼苗叶宽在 1~2 cm 之间。无根瘤菌的 5 种基质处理下的叶宽处于同一水平，差异不显著；在基质 C 的叶宽最宽，在基质 E 的处理下叶宽最窄。接种根瘤菌的基质 A 的叶宽显著高于基质 E，其余 3 种基质的叶宽差异不显著。

花榈木幼苗在有无根瘤菌的条件下长宽比均差异不显著。

#### 2.5 不同处理对可溶性糖、硝态氮含量的影响

由图 3 可知，试验中花榈木幼苗的可溶性糖含量为 1.97~16.27  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。无根瘤菌的基质 C 的可溶性糖含量最高，为 16.27  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，显著高于其余 4 种基质处理 ( $P < 0.05$ )，基质 E 的可



注：图中颜色相同柱子不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )，苗龄为 14 个月。

图 2 不同处理花榈木幼苗叶片数的表现

Figure 2 The performance of leaf number of *Ormosia henryi* seedlings under different treatments

溶性糖含量最低，为 5.93  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，二者相差高达 10.34  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，基质 C 的可溶性糖含量是基质 E 的 2.74 倍。接种根瘤菌的基质 A 的可溶性糖含量最高，为 12.93  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，显著高于基质 B、D、E；基质 B 的可溶性糖含量最低 (1.97  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )，二者相差 10.96  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，基质 A 的可溶性糖含量是基质 B 的 6.56 倍。基质 A、E 处理中接种根瘤菌有助于提高其可溶性糖含量，其 3 种基质处理接种根瘤菌会降低其可溶性糖含量，基质 B 未接种根瘤菌，可溶性糖含量为 7.40  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，接种根瘤

表4 不同处理花榈木幼苗叶长与叶宽的表现

基质	叶长/cm		叶宽/cm		长宽比	
	无根瘤菌	有根瘤菌	无根瘤菌	有根瘤菌	无根瘤菌	有根瘤菌
A	3.57±0.54a	4.07±0.50a	1.39±0.17a	1.63±0.23a	2.56±0.21a	2.50±0.12a
B	3.64±0.40a	3.88±0.46a	1.40±0.20a	1.59±0.14ab	2.63±0.35a	2.44±0.20a
C	3.63±0.57a	3.28±0.30b	1.49±0.24a	1.40±0.24ab	2.45±0.19a	2.37±0.24a
D	3.55±0.34a	3.65±0.34ab	1.39±0.18a	1.49±0.16ab	2.57±0.19a	2.45±0.23a
E	3.15±0.17a	3.25±0.08b	1.31±0.11a	1.37±0.11b	2.42±0.17a	2.39±0.17a

注：表中同列不同字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )；苗龄为14个月。

菌的可溶性糖含量为  $1.97 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，二者相差  $5.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，未接种是接种的3.76倍。

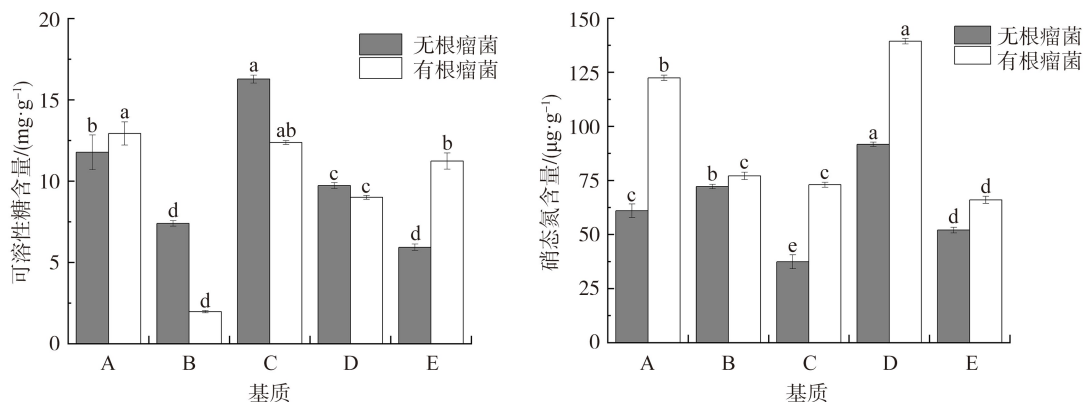
无根瘤菌花榈木的硝态氮含量为  $37.40 \sim 91.17 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，接种根瘤菌花榈木的硝态氮含量为  $66.02 \sim 139.35 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。无根瘤菌的5种不同配比基质处理下的硝态氮含量之间差异显著 ( $P<0.05$ )；基质D的硝态氮含量最高；基质C的硝态氮含量最低，基质D的硝态氮含量是基质C的2.44倍。在接种根瘤菌的条件下，硝态氮含量最高为基质D，显著高于其余4种基质；硝态氮含量最低为基质E，基质D硝态氮含量比基质E高52.62%；基质B的硝态氮含量与基质C差异不显著。接种根瘤菌的硝态氮含量高于未接种根瘤菌的硝态氮含量，基质A未接种根瘤菌硝态氮含量为  $60.98 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，接种后的硝态氮含量为  $122.44 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，提高了50.20%。

## 2.6 不同处理对CAT、POD活性的影响

根据图4可知，无根瘤菌花榈木的CAT活性为  $124.87 \sim 774.69 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ ，接种根瘤菌花榈木的CAT活性为  $84.10 \sim 242.10 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。无根瘤菌的基质A的叶片CAT活性显著高于其他4种基质

( $P<0.05$ )，基质B处理下的CAT活性与基质D差异不显著，基质C与基质E差异不显著，基质A的CAT活性是基质B的6.20倍。在接种根瘤菌的条件下，CAT活性最高为基质A，与剩余4种基质差异显著；除了基质A外，其余基质的CAT活性大致成同一水平，差异不显著；CAT活性最低为基质D，基质A的CAT活性比基质D高65.26%。接种根瘤菌的CAT活性低于未接种根瘤菌的CAT活性，基质A未接种根瘤菌CAT活性为  $774.69 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ ，接种后的活性为  $242.10 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ ，之间相差3.20倍。

无根瘤菌的花榈木的POD活性为  $22866.67 \sim 81013.33 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ ，接种根瘤菌的花榈木的POD活性为  $40180.00 \sim 72618.00 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。无根瘤菌的5种基质的POD活性差异显著 ( $P<0.05$ )，基质A的POD活性最高，显著高于剩余4种基质，基质C的POD活性最低，基质A的POD活性是基质C的3.54倍。在接种根瘤菌的条件下，POD活性最高为基质B，除了基质E外，与剩余3种基质处理下的POD活性差异显著；POD活性最低为基质A；基质A的POD活性与基质D差异不显著，基



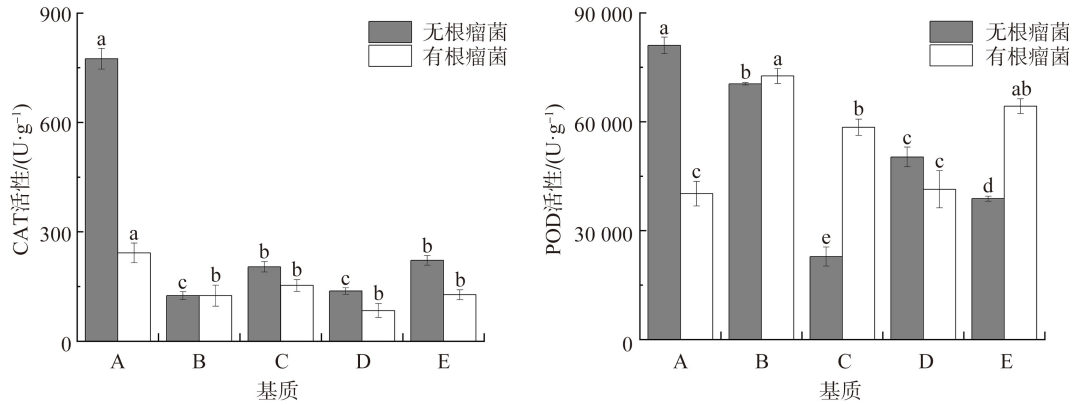
注：图中颜色相同柱子不同字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )，苗龄为14个月。

图3 不同处理花榈木幼苗可溶性糖与硝态氮的表现

Figure 3 The performance of soluble sugar and nitrate nitrogen in different treatments of *Ormosia henryi* seedlings

质 C 的 POD 活性与基质 E 差异不显著。基质 A、基质 D 接种根瘤菌的 POD 活性低于未接种根瘤

菌；基质 B、基质 C 与基质 E 接种根瘤菌的 POD 活性高于未接种根瘤菌。



注：图中颜色相同柱子不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )，苗龄为 14 个月。

图 4 不同处理花榈木幼苗 CAT 与 POD 的表现

Figure 4 The performance of CAT and POD activities in different treatments of *Ormosia henryi* seedlings

## 2.7 综合评价

B 基质 (进口泥炭土:蛭石:珍珠岩=2:1:1) 在未接种根瘤菌的条件下培育花榈木幼苗的效

果最优。A 基质 (进口泥炭土:黄泥=1:1) 在接种根瘤菌的条件下培育花榈木幼苗的效果最优 (表 5-6)。

表 5 不同基质未接种根瘤菌下花榈木生长指标隶属函数值及综合排名

Table 5 Membership function values and comprehensive ranking of growth indices of *Ormosia henryi* seedlings under different substrates without rhizobium inoculation

指标	A 基质	B 基质	C 基质	D 基质	E 基质
地径	0.33	0.45	1.00	0.00	0.45
株高	0.50	1.00	0.55	0.02	0.00
高径比	0.20	1.00	0.03	0.06	0.00
叶片数	0.53	0.55	1.00	0.00	0.62
叶长	0.86	1.00	0.98	0.81	0.00
叶宽	0.47	0.53	1.00	0.44	0.00
可溶性糖	0.56	0.14	1.00	0.37	0.00
硝态氮	0.43	0.64	0.00	1.00	0.27
CAT	1.00	0.00	0.12	0.02	0.15
POD	1.00	0.82	0.00	0.47	0.27
综合隶属函数值	0.59	0.61	0.57	0.32	0.18
排序	2	1	3	4	5

## 3 讨论与结论

苗木的生长状况在很大程度上受到基质理化特性的影响,尤其是容重和孔隙度,因为它们影响植物水分、空气和养分的供应,从而间接影响植物根茎叶的生长发育<sup>[15-16]</sup>。有研究表明,基质的容重为  $0.1 \sim 0.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,总孔隙度为  $54\% \sim 96\%$ 时,植物生长效果较好<sup>[17]</sup>。在本试验中,除了基质 E 容重大于  $0.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,其余 4 种基质容重为

$0.1 \sim 0.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,仅有基质 A 与基质 B 总孔隙度大致为  $54\% \sim 96\%$ ,因此 A 基质与 B 基质为花榈木幼苗提供了良好的生长环境。

掌握苗木生长规律可为育苗生产管理提供理论依据。陈志萍等<sup>[18]</sup>研究指出,花榈木苗木的年生长量呈明显的“慢-快-慢-快-慢”的生长发育节律。速生期在 6 月中下旬至 8 月中下旬;生长后期在 11 月中旬,苗高和地径基本停止生长。试验中,不同基质的生长趋势存在差异,接种根瘤菌



表6 不同基质接种根瘤菌下的花榈木生长指标隶属函数值及综合排名

Table 6 Membership function values and comprehensive evaluation of growth indices of *Ormosia henryi* seedlings inoculated with rhizobia under different substrate conditions

指标	A 基质	B 基质	C 基质	D 基质	E 基质
地径	0.18	0.09	1.00	0.00	0.58
株高	0.62	1.00	0.54	0.00	0.03
高径比	1.00	0.96	0.79	0.05	0.00
叶片数	1.00	0.77	0.83	0.00	0.40
叶长	1.00	0.76	0.03	0.48	0.00
叶宽	1.00	0.83	0.13	0.48	0.00
可溶性糖	1.00	0.00	0.95	0.64	0.84
硝态氮	0.77	0.15	0.10	1.00	0.00
CAT	1.00	0.26	0.44	0.00	0.27
POD	0.00	1.00	0.56	0.04	0.74
综合隶属函数值	0.76	0.58	0.54	0.27	0.29
排序	1	2	3	5	4

的基质 A 地径生长趋势大致为慢-快-慢, 9—10 月的生长较为缓慢, 10—12 月生长速度迅速加快, 次年 1 月之后地径的生长减缓; 株高生长大致呈现快-慢-快的趋势。其中 9—10 月和次年 1—2 月为生长高峰。不同种源花榈木苗期在生长特性上存在差异<sup>[19-20]</sup>, 本试验和陈志萍等的研究结果存在差异, 可能使用了不同种源的花榈木种子, 导致在生长节律上表现出不同的特点。

苗木生长指标一定程度上能够反映苗木的健壮程度, 苗高和地径可直观判断不同基质配比对苗木生长影响的效果<sup>[21]</sup>。试验中, 基质 C 的地径净生长量在有无根瘤菌条件下都是最高值, 与基质 A、B、D 差异显著 ( $P < 0.05$ ); 基质 B 的株高净生长量高于其余 4 种基质, 与基质 D 与 E 差异显著 ( $P < 0.05$ )。进一步证实了不同基质比对花榈木苗期生长有显著影响。叶片是植物进行光合、蒸腾和呼吸作用的重要器官, 叶片的生长发育状态直接关系到植株的生长发育<sup>[22]</sup>。试验中, 在基质 A、B、D 中接种根瘤菌提高了花榈木幼苗的叶片数; 除了基质 C, 其余 4 种基质接种根瘤菌都有助于叶长、叶宽的增长。这可能是因为根瘤菌通过固定大气中的氮气, 增加了植物可利用的氮素, 从而促进了花榈木幼苗叶长、叶宽的生长。

可溶性糖是基因表达的重要调节因子, 也是影响植物生长发育的重要因素, 对维持植物细胞的代谢起着重要的作用<sup>[23-25]</sup>。试验中, 基质 C 在未接种根瘤菌时可溶性糖含量显著高于其他基质, 说明基质 C 可能更适合花榈木生长, 可促进可溶

性糖的合成与积累。而接种根瘤菌后, 基质 A 的可溶性糖含量最高, 基质 B 最低, 可能与根瘤菌的固氮作用及对植物生理代谢的调节有关。硝态氮可被植物直接吸收, 在光合作用中起到辅助能量转化的作用, 能促进植物的生长和发育, 以及提高植物的产量和品质<sup>[25]</sup>。试验中, 根瘤菌接种提高了硝态氮的吸收, 接种根瘤菌的硝态氮含量均高于未接种根瘤菌的硝态氮含量, 其中基质 A 硝态氮含量提高了 50.20%, 表明根瘤菌有助于提高氮素代谢效率。

CAT 是植物细胞重要的保护酶之一, 为细胞提供抗氧化防御机制, 其活性的高低与植物的抗逆性有关。其作用是清除代谢中产生的过氧化氢, CAT 活性总量越低说明苗木受到胁迫越小, 其环境越有利于苗木的生长<sup>[26-27]</sup>。试验中, 接种根瘤菌的 CAT 活性低于未接种根瘤菌的 CAT 活性, 基质 A 未接种根瘤菌 CAT 活性是接种后的 3.20 倍。POD 在植物中具有多种生物学功能, 包括抗氧化、抗逆境、细胞信号传递和木质素生物合成等。苗木中 POD 活性升高表明其遭受的外部环境胁迫加剧, 这种胁迫会触发植物的防御机制, 促使苗木合成大量酶类物质以增强抗逆性<sup>[28]</sup>。试验中, 未接种根瘤菌, 基质 C 处理下的 POD 活性最低, 基质 A 的 POD 活性最高, 是基质 C 的 3.54 倍。基质 A、基质 D 处理下接种根瘤菌的 POD 活性低于未接种根瘤菌的 POD 活性。

综上所述, 为更科学合理地筛选出在有无接种根瘤菌条件下栽培效果最佳的基质配方, 采用

模糊数学中的隶属函数方法对5种基质的生长指标进行综合判定,未接种根瘤菌的基质隶属函数值由大到小依次为基质B、A、C、D、E;接种根瘤菌的基质排序依次为基质A、B、C、E、D。基质A(进口泥炭土:黄泥=1:1)在接种根瘤菌的条件下培育花榈木幼苗效果最优,基质B(进口泥炭土:蛭石:珍珠岩=2:1:1)在未接种根瘤菌的条件下培育花榈木幼苗效果最优。

### 参考文献

- [1] 龙绛雪,曹基武.“材貌双全”的花榈木[J].中国花卉园艺,2020(8):45.
- [2] 姚军,杨波.优良园林绿化树种:花榈木[J].中国城市林业,2007,5(1):65.
- [3] 桂平,龙鹏.珍稀树种花榈木研究进展[J].贵州农业科学,2021,49(7):98-106.
- [4] 韦小丽,孟宪帅,邓兆.珍稀树种花榈木种子繁殖生态学特性与濒危的关系[J].种子,2014,33(1):82-86.
- [5] 刘鹏,何万存,黄小春,等.花榈木研究现状及保护对策[J].南方林业科学,2017,45(3):45-48.
- [6] 杨柳琴,黄彩船,杨忠.不同育苗基质对比对花榈木苗期生长的影响研究[J].农业技术与装备,2022(4):91-92,95.
- [7] 罗旋.育苗基质对红豆树和花榈木容器苗生长及生理的影响[D].贵阳:贵州大学,2020.
- [8] 程波,王健,石红标,等.草甘膦和根瘤菌对紫花苜蓿品质及固氮能力的影响[J].中国草地学报,2021,43(2):47-53.
- [9] 王婷婷,韦小丽,孔德明,等.花榈木种子际促生真菌对其幼苗生理生化及生长指标的影响[J].西部林业科学,2021,50(4):118-124.
- [10] 朱天才,周洁尘,段翔,等.花榈木根际促生菌的筛选鉴定及促生特性[J].中南林业科技大学学报,2023,43(1):43-49.
- [11] 韦秋思,陈华园,刘世男,等.遮阴对花榈木幼苗生长和生理的影响[J].北华大学学报(自然科学版),2023,24(4):513-521.
- [12] 段如雁,韦小丽,安常蓉.接种不同根瘤菌对花榈木幼苗光合生理的影响及促生效应[J].浙江农林大学学报,2018,35(6):1098-1106.
- [13] 段如雁,韦小丽,安常蓉,等.花榈木幼苗接种不同根瘤菌对中度干旱胁迫的生理响应[J].林业科学研究,2018,31(4):61-69.
- [14] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [15] 刘峰,王紫琦,吴文,等.不同基质对比对乌桕容器苗矿质元素和非结构性碳水化合物的影响[J].林业与生态科学,2022,37(3):275-278.
- [16] 张志威,胡冰,陈金辉,等.不同基质对比对顶果木容器苗生长的影响[J].林业与环境科学,2024,40(4):87-98.
- [17] 文中华,刘喜雨,孟军,等.生物炭和腐熟秸秆组配基质对水稻幼苗生长的影响[J].沈阳农业大学学报,2020,51(1):10-17.
- [18] 陈志萍,李从瑞,潘德权,等.花榈木实生苗苗期的生长发育节律[J].贵州农业科学,2014,42(12):191-194.
- [19] 金念情,杨彬,韦小丽,等.不同种源花榈木苗期生长及生理特性比较[J].广西植物,2021,41(12):2051-2060.
- [20] 田蜜,曾祥全,杜丽敏,等.不同种源黑黄檀在海南岛引种的早期测定及适应性分析[J].林业与环境科学,2021,37(3):98-103.
- [21] 武亚敬,毕君,李秋艳,等.油松容器育苗香菇渣基质粒径配方筛选[J].浙江农林大学学报,2015,32(3):483-487.
- [22] 赵燕,董雯怡,李吉跃,等.毛白杨无性系叶面积的回归测算[J].中国农学通报,2010,26(12):94-97.
- [23] 王嘉佳,唐中华.可溶性糖对植物生长发育调控作用的研究进展[J].植物学研究,2014,3(3):71-76.
- [24] 马玥,苏宝玲,韩艳刚,等.岳桦幼苗光合特性和非结构性碳水化合物积累对干旱胁迫的响应[J].应用生态学报,2021,32(2):513-520.
- [25] 李姗,沈成波.调控作物硝态氮代谢和利用的研究进展[J].南京农业大学学报,2022,45(5):848-855.
- [26] 张颖.不同基质对比对容器大叶女贞苗生长与生理指标影响的研究[D].郑州:河南农业大学,2011.
- [27] 邓福春,宋子琪,包晗,等.4种复合型植物生长调节剂对望天树苗木生长生理的影响[J].林业与环境科学,2023,39(3):80-87.
- [28] 卢万义,覃创羿,鲁宗翰,等.不同基质对比对沃柑大苗生长,生理及光合特性的影响[J].中国果树,2023,(3):79-84.