

配比施肥对交趾黄檀幼苗生长特性的影响^{*}何亭青^{1,2,3} 洪舟² 徐大平² 麦宝莹³
罗明道³ 彭方仁¹

(1. 南京林业大学 林草学院, 江苏 南京 210037;

2. 中国林业科学研究院 热带林业研究所, 广东 广州 510520;

3. 高明区林业科学研究所, 广东 佛山 528515)

摘要 为了揭示氮磷钾 (NPK) 配比施肥对交趾黄檀 *Dalbergia cochinchinensis* 生长和根系发育的影响, 筛选 NPK 施肥的最佳配方, 以交趾黄檀一年生实生苗为试验材料, 采用“3414”试验设计开展 3 因子 4 水平配方施肥盆栽试验, 比较不同处理下交趾黄檀幼苗生长及根系形态的变化。结果表明: 不同配比氮、磷和钾肥对苗高和茎、叶、总生物量的影响差异性极显著或显著, 但对主根长、根表面积、一级侧根数量的影响无显著性差异; 氮肥和磷肥对地径、根直径、叶面积、根生物量的影响差异性极显著或显著; 磷对苗高、地径, 茎和叶生物量、叶面积、主根长、根表面积、一级侧根数量的影响大于氮和钾; 磷和氮对高径比、根直径的影响程度相当且均大于钾; 氮对根生物量、总生物量的影响程度大于磷和钾。根据主成分分析和苗木质量指数综合评价结果可知, T6 ($N_2P_2K_2$)、T7 ($N_2P_3K_2$)、T10 ($N_2P_2K_3$)、T11 ($N_3P_2K_2$) 均是较为适宜交趾黄檀幼苗生长的施肥组合。施肥能够促进交趾黄檀幼苗生长。交趾黄檀幼苗生长的最佳施肥配方为 $N_3P_2K_2$, 施用量分别为 300, 80, 70 $mg \cdot 株^{-1}$, 即氮的施用量处于较高水平, 磷和钾的施用量处于中等水平时对交趾黄檀幼苗的生长及根系发育效果最好。

关键词 交趾黄檀; 配比施肥; 生长特性; 主成分分析

中图分类号: S725 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2024) 01-0057-12

The Effects of Different Fertilization Treatments on Growth Characteristics
of *Dalbergia cochinchinensis*HE Tingqing^{1,2,3} HONG Zhou² XU Daping² MAI Baoying³
LUO Mingdao³ PENG Fangren¹

(1. College of Forestry and Grassland, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;

2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China;

3. Gaoming District Forestry Science Research Institute, Foshan, Guangdong 528515, China)

Abstract To reveal the effects of nitrogen, phosphorus and potassium (NPK) formula fertilization on the growth and root development of *Dalbergia cochinchinensis*, the optimal formula for NPK fertilization was selected to provide technical support for the seedling breeding of *D. cochinchinensis*. Using 1-year-old

^{*} 基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2020KJCX007), 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目 (CAFYBB2020SZ005)。

第一作者: 何亭青 (1990—), 女, 助理工程师, 主要从事森林培育、造林作业设计, E-mail: 751778326@qq.com。

通信作者: 洪舟 (1981—), 男, 副研究员, 主要从事热带珍贵树种遗传改良研究, E-mail: hzhou1981@sina.com。

D. cochinchinensis seedlings as materials, 3414 orthogonal experimental design was used to study effects of different fertilization treatments on growth and root morphology characteristics of *D. cochinchinensis* seedlings. There were highly significant or significant differences in the effects of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on seedling height, stem, leaf, and total biomass. However, there was an insignificant difference in their effects on the main root length, root surface area, and number of primary lateral roots. There were highly significant or significant differences in the effects of nitrogen and phosphorus fertilizers on ground diameter, root diameter, leaf area, and root biomass. The influences of phosphorus on seedling height, ground diameter, stem and leaf biomass, leaf area, main root length, root surface area, and number of primary lateral roots were greater than that of nitrogen and potassium. The influences of phosphorus on seedling height, ground diameter, stem and leaf biomass, leaf area, main root length, root surface area, and number of primary lateral roots were greater than those of nitrogen and potassium. The influences of phosphorus and nitrogen on height-to-diameter ratio and root diameter were equivalent, which were greater than those of potassium. The impacts of nitrogen on root biomass and total biomass were greater than those of phosphorus and potassium. According to the result of principal component analysis and comprehensive quality evaluation, the treatment of T6 ($N_2P_2K_2$), T7 ($N_2P_3K_2$), T10 ($N_2P_2K_3$), and T11 ($N_3P_2K_2$) were all suitable fertilization combinations for the growth of *D. cochinchinensis* seedlings. The growth of *D. cochinchinensis* seedlings could be promote by fertilization with nitrogen, phosphorus and potassium. The optimum fertilization formula for the growth of *D. cochinchinensis* seedlings is $N_3P_2K_2$ (300 mg N per plant, 80 mg P per plant and 70 mg K per plant). The growth and root development of *D. cochinchinensis* seedlings was the best with a high level of N application and a moderate level of P and K application.

Key words *Dalbergia cochinchinensis*; fertilization; growth characteristics; principal component analysis

交趾黄檀 *Dalbergia cochinchinensis*, 为蝶形花亚科 Papilionoideae 黄檀属 *Dalbergia* 植物, 原产于柬埔寨、泰国、老挝、越南等中南半岛国家, 主要分布在海拔 400~500 m、年均降水量 1 200~1 650 mm 的半落叶常绿森林中, 现存天然林分多为小面积的稀疏块状或点状分布^[1-2]。在我国, 交趾黄檀是名贵的红木用材树种之一, 心材具有质地坚硬、耐腐蚀性强、纹理通直、结构细腻等优良特性, 是高档家具、装饰单板、精美雕刻、乐器等的原料^[3]。目前, 交趾黄檀基本源于东南亚等原产地天然林^[1], 其天然分布区域狭窄且多处于散生状态, 自然更新能力差, 长期的过度利用和乱采滥伐已导致资源严重枯竭, 致使交趾黄檀木材供需矛盾日益突出, 2013 年被《濒危野生动植物种国际贸易公约》列为严格限制采伐与出口的树种^[4], 出口数量急剧减少, 国内市场供不应求。因此, 在国内适宜地区引种培育人工林是缓解交趾黄檀木材供需矛盾的重要途径。

配比施肥是根据林木生长所需不同肥料的规律、栽植土壤的肥力情况, 以及肥料效率所提出

的不同元素以不同配比进行施肥的一种方案和技术^[5]。20 世纪 60 年代以前, 我国多采用经验施肥法, 普遍存在少施、偏施、多施等问题^[6]。21 世纪以来, 苗木配比施肥已经得到林业从业者的普遍重视。在元素施肥研究方面, 众多研究发现, 氮、磷、钾是大量元素, 植物生理活动很大程度受制于它们, 如氮素与植物的生长发育密切相关, 磷素对生物量增加^[7]、促进种子形成^[8]和植物生殖生长有重要作用^[9]。钾素对提高植株的抗逆性、果实的产量和品质等方面效果显著^[10]。

在配比施肥研究方面, 大量试验研究发现, 最佳生长指标、生理指标等对应不同的施肥配方, 应根据生产目的选择合适的配比。李左荣等^[11]对 1 年生樟树 *Camphora officinarum* 的研究结果表明, 最优生物量的施肥配方为 $N(5\text{ g})+P(5\text{ g})+K(0\text{ g})$, 最优树高的施肥配方为 $N(3.64\text{ g})+P(5\text{ g})+K(3.07\text{ g})$, 最优地径的施肥配方为 $N(3.01\text{ g})+P(3.01\text{ g})+K(2.7\text{ g})$, 最优出油率的施肥配方是 $N(3.52\text{ g})+P(5\text{ g})+K(2.76\text{ g})$ 。曹帮华等^[12]在研究配方施肥对三倍体毛白杨 *Populus tomentosa* var.

tomentosa 新无性系 BT-17 号插条苗苗期的生长影响时,发现最佳适合木材生产的配方为 $N(9\text{ g}) + P_2O_5(5\text{ g}) + K_2O_5(5\text{ g})$ 。

交趾黄檀相关报道已见苗木繁育^[13]、栽培技术^[14]、分子遗传学^[15]、引种适应性^[16]及花、叶成分^[17]等方面的研究。而关于施肥配方对交趾黄檀幼苗的生长发育还需进一步探究。本研究采用“3414”试验设计,通过不同配比施肥处理来研究氮磷钾对交趾黄檀幼苗生长的影响,以期找出适合交趾黄檀幼苗生长的一套施肥方案。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

在佛山市高明区林业科学研究所苗圃(东经 $112^{\circ}38'$, 北纬 $50^{\circ}46'$)进行氮磷钾配比施肥试验。试验地属南亚热带季风气候区,日照充足、太阳辐射强、雨量充沛、气候温和而湿润,年总降水量约 2 000 mm,全年几乎无霜^[18]。

1.2 试验材料

于 2018 年 7 月初采集半同胞家系的种子进行催芽播种,8 月移选取健壮且生长一致的幼苗(平均苗高 5.88 cm、地径 0.62 mm)移植到塑料盆(18 cm×16 cm)中培养,育苗基质为泥炭土:黄

心土:珍珠岩:蛭石 = 1:2:1:1 均匀混合,每盆装土 1.2 kg,测得土壤 pH 值为 5.81,有效氮、有效磷和有效钾的质量分数分别是 47.64, 0.975, 36.12 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。幼苗定植后缓苗 2 周后进行施肥处理。

1.3 试验方法

试验采用“3414”设计方案^[19],N、P、K 肥各设 4 个水平(0, 1, 2, 3),0 水平不施肥,2 水平指当地最佳施肥量,1 水平为 2 水平施肥量的 0.5 倍;3 水平为 2 水平施肥量的 1.5 倍(表 1)。采用随机区组设计,每处理重复 4 次,每个重复 10 株苗。每 2 周施 1 次,分 6 次施完。施肥比例为第 1~2 次各施总量的 10%,第 3~6 次各施总量的 20%(表 2)。

表 1 施肥试验因素水平

Table 1 The content of each level of fertilizers

试验水平 Treatment	mg · 株 ⁻¹		
	氮 N	磷 P	钾 K
0	0	0	0
1	100	40	35
2	200	80	70
3	300	120	105

表 2 施肥设计

Table 2 The design of NPK fertilizers

mg · 株⁻¹

编号 No.	处理 Treatment	第 1、2 次氮磷钾施肥设计 N, P and K fertilization for the 1st and 2nd time			第 3~6 次氮磷钾施肥设计 N, P and K fertilization from the 3rd to 6th time		
		尿素 Urea	磷酸二氢钠 NaH ₂ PO ₄	氯化钾 KCl	尿素 Urea	磷酸二氢钠 NaH ₂ PO ₄	氯化钾 KCl
T1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0	0	0	0
T2	N ₀ P ₂ K ₂	0	8.00	7.00	0	16.00	14.00
T3	N ₁ P ₂ K ₂	21.70	8.00	7.00	43.40	16.00	14.00
T4	N ₂ P ₀ K ₂	43.40	0	7.00	86.80	0	14.00
T5	N ₂ P ₁ K ₂	43.40	4.00	7.00	86.80	8.00	14.00
T6	N ₂ P ₂ K ₂	43.40	8.00	7.00	86.80	16.00	14.00
T7	N ₂ P ₃ K ₂	43.40	12.00	7.00	86.80	24.00	14.00
T8	N ₂ P ₂ K ₀	43.40	8.00	0	86.80	16.00	0
T9	N ₂ P ₂ K ₁	43.40	8.00	3.50	86.80	16.00	7.00
T10	N ₂ P ₂ K ₃	43.40	8.00	10.50	86.80	16.00	21.00
T11	N ₃ P ₂ K ₂	65.20	8.00	7.00	130.40	16.00	14.00

编号 No.	处理 Treatment	第 1、2 次氮磷钾施肥设计 N, P and K fertilization for the 1st and 2nd time			第 3~6 次氮磷钾施肥设计 N, P and K fertilization from the 3rd to 6th time		
		尿素 Urea	磷酸二氢钠 NaH ₂ PO ₄	氯化钾 KCl	尿素 Urea	磷酸二氢钠 NaH ₂ PO ₄	氯化钾 KCl
T12	N ₁ P ₁ K ₂	21. 70	4. 00	7. 00	43. 40	8. 00	14. 00
T13	N ₁ P ₂ K ₁	21. 70	8. 00	3. 50	43. 40	16. 00	7. 00
T14	N ₂ P ₁ K ₁	43. 40	4. 00	3. 50	86. 80	8. 00	7. 00

注：氮肥选用尿素（含氮 46%），磷肥选用分析纯磷酸二氢钠，钾肥选用分析纯氯化钾。
Note: Urea (containing 46% nitrogen) was used for nitrogen fertilizer, analytical pure sodium dihydrogen phosphate was used for phosphorus fertilizer, and analytical pure potassium chloride was used for potassium fertilizer.

幼苗上袋后再移苗半个月，待苗木生长稳定后，将肥均匀的洒在容器中苗木的周围。待苗木生长到基质质量降至其饱和质量的 50%~60% 时进行灌水。调查期间及时除草，每隔 2 周施 1 次多菌灵 2 000 倍液进行杀菌。

为保证效果，施肥应选在无烈日或暴雨的天气下进行，提前一天将每种处理（尿素+磷酸二氢钠+氯化钾）称好，全部溶于纯净水中，第二天进行每盆浇施。

1.4 项目测定

在施肥结束 1 个月后，测定以下指标。苗高：使用米尺对供试植株进行苗高测定，将数据记录后计算苗高总增量（数值精确至 0.1 cm）。地径：使用电子游标卡尺对供试植株主干与泥土接壤处地径进行测定，将数据记录后计算总增量（数值精确至 0.1 cm）。叶生长指标：采用 CI-203 手持式激光叶面积仪测定 3 片长势均匀、功能良好的叶片测定生长指标（包含叶长、叶宽、叶面积、周长，数据精确到 0.1 cm，叶面积精确到 0.1 cm²）。生物量：各处理随机 5 株幼苗，清水洗净株体后用滤纸吸干水分。将幼苗的根、茎、叶 3 部分分开称量鲜重，测定完毕后将新鲜的根、茎、叶置于 80 ℃ 的烘箱杀青 20 min 后，65 ℃ 烘干至恒重，后测定干重（所有质量均需精确到 0.01 g）。根系形态特征：WinRHIZORA 植物根系分析系统测得主根长、根表面积、根直径、大于 5 cm 的一级侧根数量。

1.5 数据分析

原始数据采用 WPS 2016 软件进行统计归纳，采用 SPSS 23.0 软件和 Minitab 21.1 软件进行相关性分析、差异显著性分析和主成分分析，采用

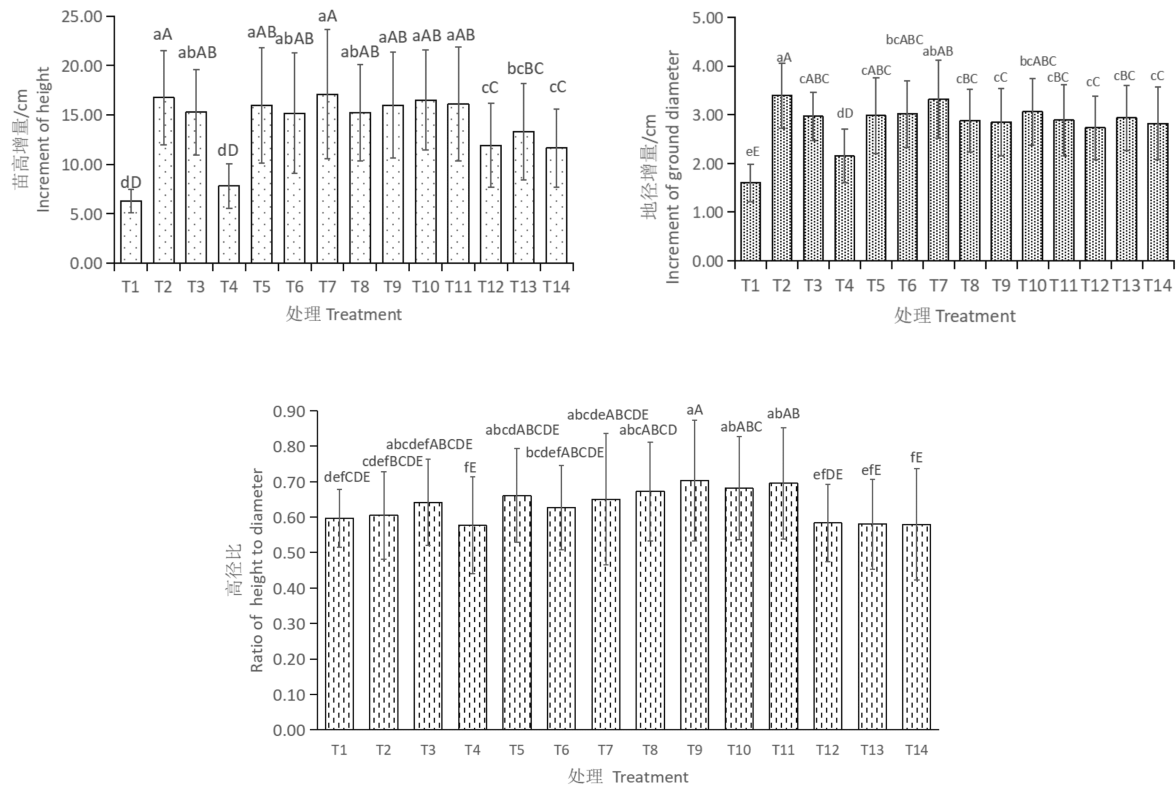
Duncan 进行多重比较^[20]。
苗木质量指数（QI）是在生长层面对苗木综合质量评价的一项重要指标^[21-22]，计算公式为：
$$QI = \frac{\text{苗木总干质量 g}}{\text{苗高 cm} / \text{地径 mm} + \text{茎干质量 g} / \text{根干质量 g}}$$

2 结果与分析

2.1 氮磷钾配比施肥对幼苗生长的影响

N、P、K 对交趾黄檀幼苗苗高增长、地径增长和高径比的影响差异极显著（ $P<0.01$ ）；T7 处理苗高增量最大，T2 处理的地径增量最大，比 CK 分别高 171.57% 和 111.73%，均与 CK 差异极显著（ $P<0.01$ ）。T4 处理的苗高和地径增量最小，仅比 CK 高 24.29% 和 34.07%，苗高增量与 CK 无显著差异（ $P>0.05$ ），地径增量与 CK 差异性显著（ $P<0.05$ ）。高径比中，仅 T4、T14、T13、T12 处理的高径比低于 CK（图 1）。合理的施肥可以明显促进交趾黄檀幼苗的径粗生长。

苗高和地径增量以及高径比随 N、P、K 浓度增加而增加。高 N、高 P 和高 K 均能显著促进苗木高生长。N 肥地径增量方面，N₃ 与 N₀ 差异性极显著，但 N₃ 与 N₁、N₂ 无显著差异；P₃ 与 P₁、P₂、P₃ 差异性极显著；K₃ 与 K₀ 差异性极显著，但与 K₁、K₂ 无显著差异，因此，促进地径增长的最优配方为 N₁P₃K₁。高径比方面，N₃ 与 N₀、N₁ 差异性极显著，与 N₂ 无显著差异；P₃ 与 P₀ 差异性极显著，与 P₁、P₂、P₃ 无显著差异；K₃ 与 K₀、K₁、K₂ 差异性显著。因此，高径最优配方为 N₂P₁K₃。三因素对苗高增量、地径增量影响排序为 P>K>N，对高径比影响排序为 N>P=K（表 3）。



注：不同大、小写字母分别表示不同处理间存在极显著 ($P<0.01$) 或者显著 ($P<0.05$) 差异。
Note: Different uppercase or lowercase letters indicate highly significant ($P<0.01$) or significant differences ($P<0.05$) among different treatments.

图1 不同氮磷钾配比施肥下交趾黄檀幼苗苗高增量、地径增量、高径比比比较
Figure 1 Comparisons on increment of height, ground diameter and ratio of height to diameter of *Dalbergia cochinchinensis* seedlings under different proportion of NPK fertilization.

表3 不同施肥处理下交趾黄檀幼苗苗高增量、地径增量、高径比极差分析和多重比较
Table 3 Range analysis and multiple comparison of height increment, diameter increment and ratio of height and diameter of *Dalbergia cochinchinensis* seedlings under different fertilization treatments

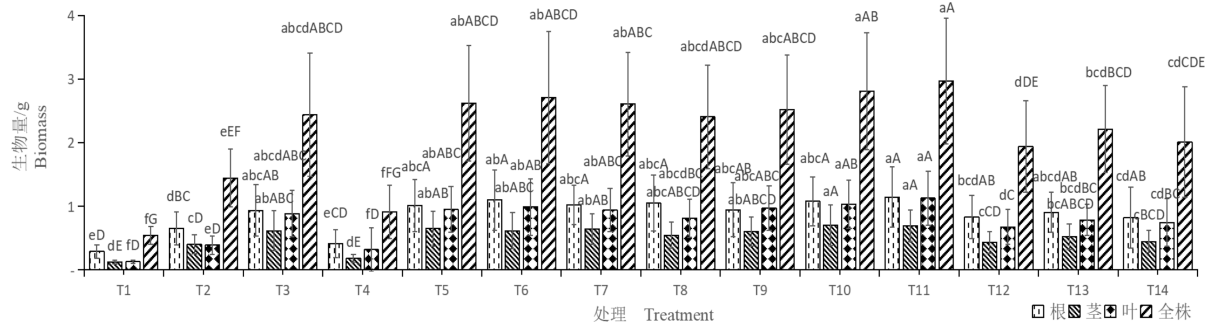
因变量 Variable	元素 Element	水平 0 Level 0	水平 1 Level 1	水平 2 Level 2	水平 3 Level 3	极差 Range
苗高增量 Increment of height	N	11.52cC	13.51bB	14.42bAB	16.10aA	4.57
	P	7.05dC	13.18cB	15.54bA	17.08aA	10.02
	K	10.75cC	13.65bB	14.51bB	16.51aA	5.75
地径增量 Increment of ground diameter	N	2.50aA	2.88bB	2.88bB	2.89bB	0.39
	P	1.88aA	2.84bB	3.00bB	3.32cC	1.44
	K	2.24aA	2.87bB	2.93bB	3.06bB	0.82
高径比 Ratio of height to diameter	N	0.60aA	0.60aA	0.64abAB	0.70bB	0.10
	P	0.59aA	0.61abAB	0.65bB	0.65bB	0.06
	K	0.63aA	0.62aA	0.63aA	0.68bA	0.06

注：不同大、小写字母分别表示不同处理间存在极显著 ($P<0.01$) 或者显著 ($P<0.05$) 差异。
Note: Different uppercase or lowercase letters indicate highly significant ($P<0.01$) or significant differences ($P<0.05$) among different treatments.

2.2 氮磷钾配比施肥对幼苗生物量的影响

N、P、K 对幼苗根生物量、茎生物量、叶生

物量和全株生物量影响差异性极显著 ($P<0.01$) 或差异性显著 ($P<0.05$) (图2)。根生物量、茎生



注：不同大、小写字母分别表示不同处理间存在极显著 ($P<0.01$) 或者显著 ($P<0.05$) 差异。
Note: Different uppercase or lowercase letters indicate highly significant ($P<0.01$) or significant differences ($P<0.05$) among different treatments.

图 2 不同氮磷钾配比处理间交趾黄檀幼苗生长状况比较
Fig. 2 Comparisons on growth performance of *Dalbergia cochinchinensis* seedlings under different fertilizer treatments

表 4 不同施肥处理下交趾黄檀幼苗根、茎、叶和总生物量极差分析和多重比较
Table 4 Range analysis and multiple comparison of root, stem, leaf and total biomass of *Dalbergia cochinchinensis* seedlings under different fertilization treatments

因变量 Variable	元素 Element	水平 0 Level 0	水平 1 Level 1	水平 2 Level 2	水平 3 Level 3	极差 Range
根生物量 Root biomass	N	0.47aA	0.89bB	0.93bBC	1.15cC	0.68
	P	0.35aA	0.89bB	0.98bB	1.02bB	0.67
	K	0.67aA	0.89bAB	0.89bAB	1.08cB	0.41
茎生物量 Stem biomass	N	0.26aA	0.52bB	0.55bB	0.70cC	0.44
	P	0.15aA	0.51bB	0.59bcB	0.64cB	0.49
	K	0.34aA	0.52bB	0.53bB	0.70cC	0.36
叶生物量 Leaf biomass	N	0.56aA	0.78bB	0.85bB	1.13cC	0.57
	P	0.22aA	0.79bB	0.88bB	0.94bB	0.72
	K	0.47aA	0.84bB	0.79bB	1.03cC	0.56
总生物量 Total biomass	N	0.99aA	2.2bB	2.33bB	2.97cC	1.98
	P	0.73aA	2.19bB	2.44bcB	2.61cB	1.88
	K	1.48aA	2.21bB	2.25bB	2.81cC	1.33

注：不同大、小写字母分别表示不同处理间存在极显著 ($P<0.01$) 或者显著 ($P<0.05$) 差异。
Note: Different uppercase or lowercase letters indicate highly significant ($P<0.01$) or significant differences ($P<0.05$) among different treatments.

物量、叶生物量和全株生物量含量均随 N、P、K 浓度增加而增加。T11 处理下，根生物量、叶生物量和全株生物量含量最高，分别比 CK 高 291.04%，772.91% 和 544.74%；而茎生物量含量最高的是 T10 处理，比 CK 高 470.04%（图 2）。N、P、K 三因素对根和总生物量影响的排序为 $N>P>K$ ，对茎和叶生物量影响的排序为 $P>N>K$ （表 4）。

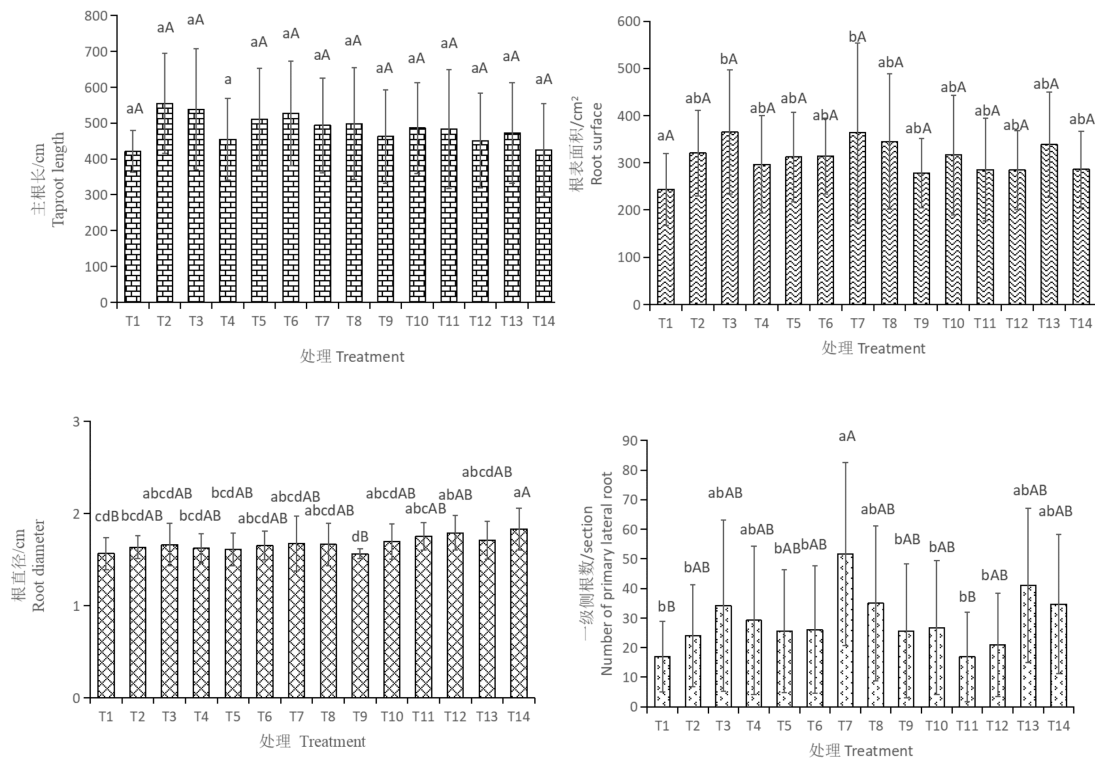
2.3 氮磷钾配比施肥对幼苗根的影响

N 对幼苗根直径的影响差异性显著，P 的影响差异性极显著，K 无显著差异。N、P、K 对幼苗

主根长、根表面积和幼苗一级侧根数的影响无显著差异 ($P>0.05$)（图 3）。主根长随着 N、P、K 浓度增加呈现先增加后减少，T2 处理的主根长最大，比 CK 长 31.89%；根表面积随 N 浓度增加呈现先增大后减少，随 P 和 K 浓度的增大而增加，T3 处理的根表面积最大，比 CK 大 49.91%；根直径随 N 浓度增加而增加，随 P 和 K 浓度增加呈现先增加后减少，T14 处理的根直径最大，比 CK 长 16.56%；一级侧根数随 N 和 K 浓度的增加呈现先增加后减少，随 P 浓度的增加而增加，T14 处理的

根直径最大，比 CK 长 16.56%（图 3）。三因素对主根长影响的排序为 $P>K>N$ ，对根表面积和一级

侧根数量影响排序为 $P>N>K$ ，对根直径的影响排序为 $N=P>K$ （表 5）。



注：不同大、小写字母分别表示不同处理间存在极显著（ $P<0.01$ ）或者显著（ $P<0.05$ ）差异。

Note: Different uppercase or lowercase letters indicate highly significant ($P<0.01$) or significant differences ($P<0.05$) among different treatments.

图 3 不同施肥处理下交趾黄檀幼苗主根长、根表面积、根直径和一级侧根数比较

Figure 3 Comparisons on taproot length, root surface, root diameter, and the number of primary lateral roots of *Dalbergia cochinchinensis* seedlings under different fertilization treatments

表 5 不同施肥处理下交趾黄檀幼苗主根长、根表面积、根直径和一级侧根数极差分析和多重比较

Table 5 Range analysis and multiple comparison of taproot length, root surface, root diameter and the number of primary lateral roots of *Dalbergia cochinchinensis* seedlings under different fertilization treatments

因变量 Variable	元素 Element	水平 0 Level 0	水平 1 Level 1	水平 2 Level 2	水平 3 Level 3	极差 Range
主根长 Taproot length	N	478.39aA	485.59aA	479.99aA	483.72aA	7.20
	P	435.36aA	459.95aA	505.71aA	493.19aA	70.35
	K	446.76aA	451.99aA	502.60aA	486.42aA	55.84
根表面积 Root surface	N	276.50aA	328.28aA	310.98aA	285.75aA	51.78
	P	266.35aA	293.72aAB	319.71abAB	363.74bB	97.39
	K	277.36aA	299.42aA	315.48aA	316.60aA	39.24
根直径 Root diameter	N	1.60aA	1.72bA	1.67abA	1.75bA	0.15
	P	1.60aA	1.75bA	1.66abA	1.67abA	0.15
	K	1.6aA	1.71aA	1.67aA	1.70aA	0.11
一级侧根数 Number of primary lateral roots	N	19.98aA	31.98aA	31.02aA	16.87aA	15.11
	P	22.22aA	27.53aA	28.36aA	51.63bB	29.41
	K	22.98aA	33.59aA	27.81aA	26.69aA	10.61

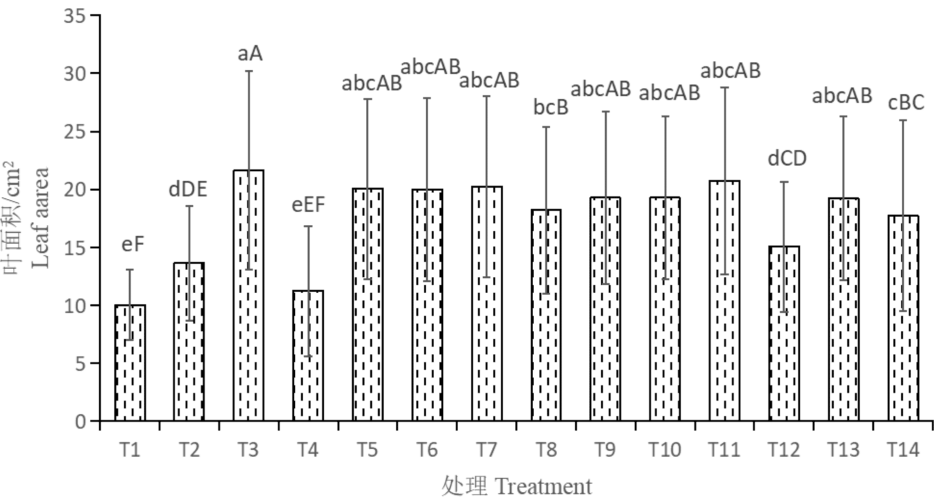
注：不同大、小写字母分别表示不同处理间存在极显著（ $P<0.01$ ）或者显著（ $P<0.05$ ）差异。

Note: Different uppercase or lowercase letters indicate highly significant ($P<0.01$) or significant differences ($P<0.05$) among different treatments.

2.4 氮磷钾配比施肥对幼苗叶面积的影响

N、P、K 对叶面积影响的差异性极显著 ($P<0.01$) (图 4)。不同施肥处理的交趾黄檀幼苗单片叶面积均大于 CK，其中 T3 处理最大，比 CK 大 115.54%。最小的是 T4 处理，仅比 CK 大 11.95% (图 4)。叶面积随 N、P、K 浓度的增加而增大，

说明高浓度 N、P、K 促进叶面积增加。N₃ 与 N₀、N₁、N₂ 差异性极显著；P₃ 与 P₀、P₁ 差异性极显著，与 P₂ 无显著差异；K₃ 与 K₀ 差异性极显著，与 K₁、K₂ 无显著差异。根据极差分析，可知三因素对叶面积影响排序为 P>N>K (表 6)。



注：不同大、小写字母分别表示不同处理间存在极显著 ($P<0.01$) 或者显著 ($P<0.05$) 差异。
Note: Different uppercase or lowercase letters indicate highly significant ($P<0.01$) or significant differences ($P<0.05$) among different treatments.

图 4 不同施肥处理对交趾黄檀幼苗叶面积影响的比较
Figure 4 Comparisons on effects of fertilization on leaf area of *Dalbergia cochinchinensis* seedlings

表 6 不同施肥处理下幼苗叶面积极差分析和多重比较
Table 6 Range analysis and multiple comparison of leaf area of *Dalbergia cochinchinensis* seedlings under different fertilization treatments

元素 Element	水平 0 Level 0	水平 1 Level 1	水平 2 Level 2	水平 3 Level 3	极差 Range
N	11.84aA	18.63bB	18.24bB	20.71cC	8.87
P	10.64aA	17.61bB	18.99bcBC	20.25cC	9.61
K	14.12aA	18.73bB	17.82bB	19.27bB	5.15

注：不同大、小写字母分别表示不同处理间存在极显著 ($P<0.01$) 或者显著 ($P<0.05$) 差异。
Note: Different uppercase or lowercase letters indicate highly significant ($P<0.01$) or significant differences ($P<0.05$) among different treatments.

2.5 氮磷钾配比施肥对交趾黄檀幼苗影响综合分析

2.5.1 氮磷钾配比施肥对幼苗各指标的相关性分析 在配比施肥处理下，各指标之间大多都存在着显著性或极显著性相关关系 (表 7)。苗高增量、地径增量、叶面积和根、茎、叶生物量之间均呈极显著性正相关；主根长仅与苗高增量、地径增量和根表面积呈极显著性正相关；根表面积与苗高增量、地径增量、叶面积呈显著或极显著正相

关；根直径与其他生长指标不存在显著相关性，与主根长呈负相关；长度大于 5 cm 的一级侧根也仅与根表面积呈极显著正相关。
2.5.2 氮磷钾配比施肥对幼苗生长指标主成分分析 3 个初始特征值大于 1 并且各项指标主成分分析累计方差达到 89.99%，表明前 3 个主成分已经较能完整地反映各生长指标对交趾黄檀幼苗苗木质量的影响 (表 8)。通过表 8 分析可得出 3 个主成分的主方程：

表 7 交趾黄檀幼苗各指标相关性分析
Table 7 Correlation analysis of various indicators of *Dalbergia cochinchinensis* seedlings

性状 Traits	苗高增量 Increment of height	地径增量 Increment of ground diameter	根生物量 Root biomass	茎生物量 Stem biomass	叶生物量 Leaf biomass	叶面积 Leaf area	主根长 Taproot length	根表面积 Root surface	根直径 Root diameter
地径增量 Increment of ground diameter	0.92**								
根生物量 Root biomass	0.83**	0.74**							
茎生物量 Stem biomass	0.89**	0.78**	0.96**						
叶生物量 Leaf biomass	0.77**	0.66*	0.96**	0.96**					
叶面积 Leaf area	0.78**	0.70**	0.92**	0.95**	0.95**				
主根长 Taproot length	0.71**	0.69**	0.43	0.50	0.32	0.43			
根表面积 Root surface	0.59*	0.67**	0.49	0.51	0.40	0.57*	0.67**		
根直径 Root diameter	0.06	0.27	0.32	0.21	0.28	0.24	-0.22	0.06	
一级侧根数量 Number of primary lateral roots	0.26	0.42	0.25	0.24	0.22	0.38	0.12	0.75**	0.15

注：*表示相关性显著（ $P<0.05$ ），**表示相关性极显著（ $P<0.01$ ）。
Note: * and ** indicated significant at 0.05 and 0.01 levels.

$Y_1 = 0.37X_1 + 0.35X_2 + 0.37X_3 + 0.38X_4 + 0.35X_5 + 0.01X_6 - 0.34X_7 + 0.29X_8 + 0.53X_9 + 0.66X_{10}$
 $0.37X_6 + 0.25X_7 + 0.28X_8 + 0.09X_9 + 0.43X_{10}$ ；
 $Y_2 = 0.06X_1 + 0.12X_2 - 0.24X_3 - 0.18X_4 - 0.31X_5 - 0.16X_6 + 0.45X_7 + 0.46X_8 - 0.46X_9 + 0.34X_{10}$ ；
 $Y_3 = -0.21X_1 + 0.02X_2 - 0.05X_3 - 0.12X_4 - 0.06X_5 +$

各配比施肥处理组综合得分均高于不施肥组 T1，其中 T3（N1P2K2）综合得分最高，是此法评价中较为适宜交趾黄檀幼苗生长的施肥配比（表 9）。

表 8 不同施肥配比交趾黄檀幼苗各项生长指标主成分提取分析
Table 8 Principal component extraction and analysis of growth indexes for *Dalbergia cochinchinensis* seedlings under different fertilization treatments

成分 Component	总计 Total	方差百分比 Variance percentage	累积/% Accumulate	特征向量值 1 Eigenvector 1	特征向量值 2 Eigenvector 2	特征向量值 3 Eigenvector 3
苗高增量（ X_1 ） Increment of height	6.27	62.70	62.70	0.37	0.06	-0.21
地径增量（ X_2 ） Increment of ground diameter	1.49	14.89	77.60	0.35	0.12	0.02

成分 Component	总计 Total	方差百分比 Variance percentage	累积/% Accumulate	特征向量值 1 Eigenvector 1	特征向量值 2 Eigenvector 2	特征向量值 3 Eigenvector 3
根生物量 (X_3) Root biomass	1. 23	12. 38	89. 98	0. 37	-0. 24	-0. 05
茎生物量 (X_4) Stem biomass	0. 64	6. 48	96. 47	0. 38	-0. 18	-0. 12
叶生物量 (X_5) Leaf biomass	0. 24	2. 40	98. 87	0. 35	-0. 31	-0. 06
叶面积 (X_6) Leaf area	0. 05	0. 57	99. 44	0. 37	-0. 16	0. 0
主根长 (X_7) Taproot length	0. 03	0. 30	99. 75	0. 25	0. 45	-0. 34
根表面积 (X_8) Root surface	0. 01	0. 14	99. 89	0. 28	0. 46	0. 29
根直径 (X_9) Root diameter	0. 01	0. 06	99. 95	0. 09	-0. 46	0. 53
一级侧根 (X_{10}) Number of primary lateral roots	0. 01	0. 04	100	0. 17	0. 34	0. 66

表 9 交趾黄檀生长指标主成分分析						
Table 9 The main components analysis of growth indexes for <i>Dalbergia cochinchinensis</i> seedlings						
编号 No.	处理 Treatment	成分得分 Component score			综合得分 Total score	排序 Rank
		主成分 1PC1	主成分 2PC2	主成分 3PC3		
T1	$N_0P_0K_0$	-5. 07	-3. 68	14. 41	-1. 94	14
T2	$N_0P_2K_2$	-0. 61	-0. 70	0. 04	-0. 48	11
T3	$N_1P_2K_2$	2. 01	1. 64	5. 11	2. 14	1
T4	$N_2P_0K_2$	-3. 17	-2. 25	4. 67	-1. 75	13
T5	$N_2P_1K_2$	0. 98	0. 79	1. 48	0. 92	6
T6	$N_2P_2K_2$	1. 31	0. 94	2. 34	1. 25	3
T7	$N_2P_3K_2$	1. 91	1. 66	4. 84	2. 05	2
T8	$N_2P_2K_0$	0. 79	0. 65	1. 23	0. 74	7
T9	$N_2P_2K_1$	-0. 20	-0. 01	-0. 39	-0. 17	9
T10	$N_2P_2K_3$	1. 30	0. 92	2. 12	1. 21	5
T11	$N_3P_2K_2$	1. 37	0. 79	2. 09	1. 24	4
T12	$N_1P_1K_2$	-0. 92	-0. 97	0. 14	-0. 70	12
T13	$N_1P_2K_1$	0. 67	0. 63	1. 08	0. 65	8
T14	$N_2P_1K_1$	-0. 38	-0. 43	-0. 07	-0. 31	10

2. 5. 3 氮磷钾配比施肥对幼苗质量综合评价 13 个施肥处理组的 QI 均大于不施肥的对照组 T1，说明施肥处理可以显著提高 QI 指数（表 10）。排名

前四的处理为 T11（ $N_3P_2K_2$ ）、T6（ $N_2P_2K_2$ ）、T10（ $N_2P_2K_3$ ）、T7（ $N_2P_3K_2$ ）。N、P、K 浓度都较高；排名最后的 4 名为 T1（ $N_0P_0K_0$ ）、T4

(N₂P₀K₂)、T2 (N₀P₂K₂)，均有某项元素的缺失，说明 3 种元素对于苗木质量的影响均至关重要，缺一不可。

3 结论与讨论

施肥是保障林木质量的必要措施，合理的配比施肥是增强苗木质量的关键因素之一^[23]。本试验结果表明，氮磷钾配比施肥对交趾黄檀一年生幼苗的生长具有促进作用，显著或极显著影响苗高、地径、高径比、生物量、根表面积、根直径和叶面积，但对主根长、根表面积、一级侧根数量的影响无显著性差异。苗高和地径增量、主根长、高径比的影响效应为 P≥K>N，对茎生物量、叶生物量、叶面积、根表面积、一级侧根数量的影响效应为 P≥N>K，对根生物量、总生物量的影响效应为 N>P>K，这与黄景贵等^[24]、周樊等^[5]、蔡艳华等^[25]、李承东等^[9] 认为氮对林木幼苗的苗高、地径、生物量的影响效益大于钾和磷的研究结论不完全一致，这可能是土壤中磷的含量过低，导致磷浓度提高对植株的影响较大。

N、P 和 K3 种元素对植物生长起到极其重要的作用，合理的施肥促进植株的营养生长^[26]。苗高、地径、高径比以及根、茎、叶、总生物量均

随着 N、P、K 浓度的增高而增加，但主根长、根表面积、根直径、一级侧根数整体呈现先增加后降低的趋势，除 3 水平 N 浓度的一级侧根数少于不施肥的外，其他的 3 水平的数值均高于不施肥的，说明高浓度 N、P、K 会抑制根的生长，适宜多施肥引起的负面影响要小于肥料的缺乏，这与韩国英等^[27]、胡厚臻等^[28] 的研究结果一致。

苗木的生长受到植物各个器官的影响，是地上部分和地下部分共同作用的结果。根系生长影响叶片发育，叶片形态的建成反作用于根系的发育，存在彼此之间相互依赖又相互制约的关系^[29]。本试验对不同处理下交趾黄檀幼苗的综合指标进行分析，结果表明各生长指标间相关度均较高，生长指标分别与叶片、根系发育指标相关度高。氮、磷、钾 3 因素对交趾黄檀苗木生长有明显的交互作用，3 因素之间只有达到一个用量和比例平衡才能显著促进苗木的生长。由主成分分析和幼苗质量综合评价结果可知，T6 (N2P2K2) T7 (N2P3K2)、T10 (N2P2K3) 和 T11 (N3P2K2) 均是较为适宜交趾黄檀幼苗生长的施肥组合。

本研究在实验设计等方面仍存在许多局限性，包括生理指标、光合指标等尚未测定，试验周期较短等，在后续的研究中，还当以更加完善的试

表 10 不同氮磷钾配比施肥下交趾黄檀幼苗苗木综合质量指数

Table 10 QI index of each treatment of *Dalbergia cochinchinensis* seedlings under different fertilizer treatments

编号 No.	苗木总干质量/g Total dry weight	高径比 Ratio of height to diameter	茎根比 Ratio of stem to diameter	QI	综合排序 Rank
T1	0.55	0.59	0.47	0.55	14
T2	1.44	0.60	0.70	1.19	12
T3	2.44	0.64	0.70	1.88	9
T4	0.92	0.56	0.62	0.93	13
T5	2.62	0.65	0.67	2.03	6
T6	2.71	0.63	0.59	2.28	2
T7	2.61	0.64	0.63	2.07	4
T8	2.41	0.66	0.57	2.03	5
T9	2.52	0.69	0.69	1.90	8
T10	2.81	0.67	0.67	2.13	3
T11	2.97	0.68	0.66	2.30	1
T12	1.94	0.58	0.55	1.77	11
T13	2.21	0.57	0.60	1.92	7
T14	2.01	0.56	0.62	1.82	10

验方案为支撑,进一步对交趾黄檀配比施肥进行探索,包括交趾黄檀和短期树种混种模式的研究,寻找生态效益和短期经济效益之间最佳的平衡点。

参考文献

- [1] 刘福妹. 基于 SSR 标记的 3 个黄檀属珍贵红木用材树种遗传多样性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [2] 洪舟, 吴培衍, 张金文, 等. 漳州地区交趾黄檀幼龄期生长表现及适应性分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(6): 118-124.
- [3] 李瑞聪. 闽南山地引种交趾黄檀种源初步表现[J]. 绿色科技, 2017(15): 127-129.
- [4] 刘福妹, 韦菊玲, 庞圣江, 等. 不同种源和家系交趾黄檀种子活力及其在广西凭祥的引种表现[J]. 南方农业学报, 2019, 50(1): 110-117.
- [5] 周樊, 陈文静, 曹凡, 等. 配比施肥对薄壳山核桃幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(9): 96-103.
- [6] 丁晓纲, 李吉跃, 张方秋, 等. 林木营养诊断及施肥研究进展[J]. 广东林业科技, 2010, 26(4): 66-71.
- [7] 孟秋实, 秦倩倩, 刘艳红. 氮添加对东北红豆杉幼苗生长发育及生理特征的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(12): 2325-2334.
- [8] 李杨涛, 孟梦, 李莲芳, 等. 施肥和 IBA 对思茅松种子发芽和苗木生长的影响[J]. 西部林业科学, 2019, 48(3): 61-68.
- [9] 李承东. 氮磷钾配比施肥对中国无忧花苗木生长及生理特性的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [10] 郭秀丽, 廖仁财. 不同施肥措施对桉树组培苗生长的影响[J]. 现代园艺, 2023, 46(2): 22-23, 28.
- [11] 李左荣. 樟树施肥及营养诊断的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- [12] 曹帮华, 巩其亮, 齐清. 三倍体毛白杨苗期不同配方施肥效应的研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2004, 35(4): 512-516.
- [13] HONG Z, GUOJ Y, ZHANG N N, et al. Polysaccharide, proline, and anti-oxidation enzyme activities of Thailand rosewood (*Dalbergia cochinchinensis*) seedlings exposed to exponential fertilization[J]. Journal of Forestry Research, 2021, 33: 75-87.
- [14] 黄桂丹, 黄万和, 李学强, 等. 施肥对交趾黄檀幼龄林生长和养分分配的影响[J]. 林业与环境科学, 2022, 38(2): 112-119.
- [15] HONG Z, LI J, LIU X J, et al. The chromosome-level draft genome of *Dalbergia odorifera* [J]. Gigascience, 2020, 9(8): 1-8.
- [16] 吴培衍, 张金文, 何金元, 等. 闽南山地交趾黄檀引种情况及栽培技术[J]. 林业调查规划, 2021, 46(5): 134-138.
- [17] 孔德龙, 梁永婵, 曹春雷, 等. 5 种黄檀属植物挥发物成分分析[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(12): 197-203.
- [18] 中国科学院华南植物园, 佛山市自然资源局高明分局. 高明植物[M]. 北京: 中国林业出版社, 2021.
- [19] 杨秀玲, 董妍君, 亢亚超, 等. 小叶楠幼苗对不同施肥处理的生理响应[J]. 广西林业科学, 2020, 49(2): 197-203.
- [20] 张东为, 赵鑫丹, 戈素芬, 等. 沙棘果实品质的主成分分析及综合评价[J]. 经济林研究, 2023, 41(2): 1-10.
- [21] DICKSON A, LEAF A L, HOSNER J F. Seedling quality-soil fertility relationships of White Spruce, and Red and White Pine in nurseries [J]. Forestry Chronicle, 1960(3): 237-241.
- [22] 李亚麒, 许玉兰, 唐军荣, 等. 氮磷施肥对云南松苗木生长及养分积累的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(1): 115-125.
- [23] 朱海军, 生静雅, 刘广勤, 等. 控释肥对薄壳山核桃容器苗营养生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2015(1): 37-41.
- [24] 黄景贵, 栗春青, 王凌晖, 等. 氮磷钾指数配方施肥对假茅荪幼苗生长和光合特性的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(12): 2691-2699.
- [25] 蔡艳华, 田亨达, 都钧, 等. 不同氮磷钾配比施肥对草莓生长和光合特性的影响[J]. 农业开发与装备, 2018(9): 131-133.
- [26] MURPHY S L, SMUCKER J M. Evaluation of video image analysis and line-intercept methods for measuring root systems of alfalfa and ryegrass [J]. Agron J, 1995, 87: 865-868.
- [27] 韩国英, 刘雷, 尚军, 等. 磷肥对白蜡生长量的影响[J]. 北方园艺, 2011(3): 94-96.
- [28] 胡厚臻, 侯文娟, 潘启龙, 等. 配方施肥对刨花润楠幼苗生长和光合生理的影响[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(6): 39-45.
- [29] 王丹, 李亚麒, 孙继伟, 等. 不同家系云南松苗木生长的异速现象[J]. 植物研究, 2021, 41(6): 965-973.