

不同品系土沉香在不同造林方式下的早期生长表现*

肖玲玲¹ 陈水莲¹ 谭瑞坤¹ 赵苗菲¹
张峰² 韩东苗¹ 陈安¹ 林宁¹

(1. 肇庆市农林科学院, 广东 肇庆 526040; 2. 肇庆市林业局林业科技推广站, 广东 肇庆 526040)

摘要 为筛选出适合在粤西地区推广种植的土沉香 *Aquilaria sinensis* 优良易结香品系以及适宜的林分条件, 采用林分与品系双因素完全随机区组试验设计, 选择‘紫棋’‘油叶子’‘糖结’‘凹身’‘西瓜叶’‘金丝油’共6个土沉香易结香品系嫁接苗分别营建纯林, 以及在喜树 *Camptotheca acuminata* 和交趾黄檀 *Dalbergia cochinchinensis* 林下套种, 测定2 a后的树高、地径以及高径比, 分析不同品系生长性状的遗传参数变化, 通过隶属函数法进行生长综合评价。结果表明, 林分、品系及其交互作用对土沉香的树高、地径以及高径比均有显著影响 ($P < 0.05$)。各生长性状在品系水平上受到较高强度的遗传控制 ($h^2 > 0.7$), 且遗传稳定性好。其中, 表现最优的处理为‘凹身’纯林, 其树高、地径分别为144.7 cm、37.26 mm, 显著高于其他组合; 交趾黄檀林下套种‘紫棋’的树高、地径生长量最小, 分别为87.5 cm、14.59 mm; 土沉香苗木的地径与树高、高径比之间存在极显著的相关关系 ($P < 0.01$)。苗木生长综合评价分析表明, ‘凹身’在不同林分下的早期生长表现均较为突出, 适宜在粤西地区推广种植。

关键词 土沉香; 品系; 林分; 粤西地区; 早期评价

中图分类号: S722.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2025) 02-0131-08

DOI: 10.20221/j.cnki.2096-2053.202502019

Early Growth Performance of Different Varieties of *Aquilaria sinensis* under Different Afforestation Methods

XIAO Lingling¹ CHEN Shuilian¹ TAN Ruikun¹ ZHAO Miaofei¹
ZHANG Feng² HAN Dongmiao¹ CHEN An¹ LIN Ning¹

(1. Zhaoqing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Zhaoqing, Guangdong 526040, China;
2. Forestry Science and Technology Promotion Station of Zhaoqing Forestry Bureau, Zhaoqing, Guangdong 526040, China)

Abstract To screen out the excellent and easy-to-form fragrance varieties of *Aquilaria sinensis* and the suitable stand conditions for popularization and planting in western Guangdong, the two-factor randomized block experiment design of stand and variety was adopted. Six easy-to-set strains of *A. sinensis*, including 'Ziqi', 'Youyezi', 'Tangjie', 'Aoshen', 'Xiguaye' and 'Jinsiyou', were selected to construct pure forests by grafting seedlings. The height, ground diameter and height-diameter ratio of *Camptotheca acuminata* and *Dalbergia cochinchinensis* were measured after two years. The genetic variation of each growth trait of different strains was analyzed, and the comprehensive evaluation was carried out by applying the membership function method. The results indicated that stand, varieties and their interaction had significant effects on height, ground diameter and

* 基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目 (〔2022〕GDTK-09), 肇庆市科技计划项目 (2022N002)。

第一作者: 肖玲玲 (1993—), 女, 工程师, 主要从事珍贵树种培育和林地经济研究。E-mail: 771581583@qq.com

通信作者: 陈水莲 (1983—), 女, 高级工程师, 主要从事珍贵树种培育和林地经济研究。E-mail: 104112558@qq.com

height-diameter ratio ($P < 0.05$). The growth traits were under high genetic control at the strain level ($h^2 > 0.7$), and the genetic stability was good. Among them, the treatment combination with the best performance was pure forest of 'Aoshen', and its seedling height and ground diameter were 144.7 cm and 37.26 mm, respectively, which were significantly higher than other treatments. The height and ground diameter growth of *D. cochinchinensis* × 'Ziqi' was the lowest, which were 87.5 cm and 14.59 mm, respectively. There was a significant correlation between the ground diameter of *A. sinensis* seedlings and tree height and height-diameter ratio ($P < 0.01$). The comprehensive evaluation analysis of seedling growth showed that the early growth performance of the 'Aoshen' under different stands was more prominent, which was suitable for planting in western Guangdong.

Key words *Aquilaria sinensis*; varieties; stands; Western Guangdong; early evaluation

土沉香 *Aquilaria sinensis* 为瑞香科沉香属的广东乡土树种之一, 又名白木香、牙香树、女儿香等, 主要分布于我国广东、海南、广西、福建等地的低海拔山地、丘陵以及路边阳处疏林中, 是《中国药典》收录的唯一药用沉香基源植物^[1]。沉香作为一种传统名贵香料和珍稀药材^[2], 位列中国四大香料“沉檀龙麝”之首, 常用于制作高档香料、宗教用品、精细工艺雕刻用品等^[3-4]; 此外, 还具有抗炎、抗菌、抗肿瘤、降血糖等多种药理活性, 在《名医别录》中被称为上品。

由于土沉香生境的改变, 药用沉香的道地性丧失严重。受日益增长的沉香需求和高昂经济价值的驱使, 沉香良种选育和人工诱导结香的研究成为实现土沉香资源保护与可持续利用的有效途径^[5-6]。目前, 对土沉香的研究主要集中在结香机制^[7-9]、沉香药性与分级^[10-11]、快繁技术^[12-13]、外界胁迫生长^[14-15]等方面, 而对良种引种选育方面的研究鲜见报道, 仅有少量关于不同种源、不同立地条件下土沉香的适应性研究^[16-17]。

人工诱导结香的产量和质量与沉香的品系及种植技术密切相关, 树体的营养状况影响结香质量, 树体大小影响结香产量。针对目前土沉香品系繁多、来源不一, 且不同品系生长适应性及结香特性差异较大等现象, 急需开展易结香品系引种选育研究。本文以6种土沉香优良易结香品系为试验材料, 通过分析其不同林分条件下生长2 a后的生长指标与遗传参数, 采用隶属函数法综合评价适宜粤西地区生长的易结香品系以及适宜的林分条件, 为后续推广人工促进结香技术奠定基础。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

试验地位于肇庆市农林科学院金龙水库基地内, 地处肇庆市高要区蛟塘镇金龙水库湖畔 (22°59'N, 112°36'E, 海拔35~60 m)。该地属南亚热带季风气候, 阳光充足、雨量充沛。年平均气温22.0℃, 无霜期超350 d, 年平均降雨量1 647.9 mm, 年平均日照时数1 801.6 h。造林地土壤为砂岩和花岗岩发育而成的赤红壤, 土层厚80 cm以上。林地内常见草本植物有白花鬼针草 *Bidens alba*、臭草 *Melica scabrosa*、广防风 *Epimeredi indica* 等。

1.2 试验材料

试验采用中国林业科学研究院热带林业研究所培育的土沉香易结香品系嫁接苗, 包括“紫棋”“油叶子”“糖结”“凹身”“西瓜叶”“金丝油”。砧木选用生长健壮、长势一致、无病虫害的2 a生土沉香苗, 在离基部10 cm高处截干; 接穗采集自选育的易结香沉香品系母树或其第一代林中生长健壮、芽点饱满的成年植株穗条。

1.3 试验方法

2022年5月进行造林。采用双因素完全随机区组试验设计, 以林分(A)和易结香品系(B)为试验因素。试验地共设3种林分, 林分(A₁)为易结香品系纯林, 郁闭度为0~0.1, 幼苗期无遮阴; 林分(A₂)为4 a生喜树 *Camptotheca acuminata* 林, 郁闭度0.4~0.5; 林分(A₃)为4 a生交趾黄檀 *Dalbergia cochinchinensis* 林, 郁闭度0.7~0.8。供试的易结香品系共有6个, 分别为“紫棋”(B₁)、“油叶子”(B₂)、“糖结”(B₃)、“凹身”(B₄)、“西瓜叶”(B₅)和“金丝油”(B₆)。试验共设置18种处理组合(表1), 每种处理30株, 并设置3次重复。试验地土壤肥力条件相对均匀一致。定植后, 每年3月和9月各进行1次抚育

管理, 包括割灌除草、追肥、抹芽及病虫害防治措施。

2024年5月, 采用每木调查法测量树高和地

径, 树高使用卷尺测量, 精度为0.1 cm; 地径使用游标卡尺测量, 精度为0.01 mm。

表1 林分和土沉香易结香品系双因素试验设计

Table 1 Two-factor experimental design of stand and *Aquilaria sinensis* easy forming fragrance variety

林分 (A)	易结香品系 (B)					
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆
A ₁	A ₁ B ₁	A ₁ B ₂	A ₁ B ₃	A ₁ B ₄	A ₁ B ₅	A ₁ B ₆
A ₂	A ₂ B ₁	A ₂ B ₂	A ₂ B ₃	A ₂ B ₄	A ₂ B ₅	A ₂ B ₆
A ₃	A ₃ B ₁	A ₃ B ₂	A ₃ B ₃	A ₃ B ₄	A ₃ B ₅	A ₃ B ₆

1.4 数据分析

采用 SPSS 22 软件进行统计分析, 用 Excel 2019 软件进行数据整理和图表绘制。运用单因素方差分析不同林分、不同品系对各项生长指标的影响; 运用双因素方差分析林分与品系对各项生长指标的主效应与交互效应的影响, 若处理间差异显著 ($P < 0.05$), 采用 Duncan 法进行多重比较检验; 应用 Pearson 分析不同林分条件下各项生长指标之间的相关性。

采用遗传参数估算的方法, 计算土沉香各生长性状的变异系数与家系遗传力。主要遗传参数估算公式^[18-19]如下。

变异系数: $C_v = S/\bar{X} \times 100\%$;

家系遗传力: $h^2 = 1 - (1/F)$ 。

式中: C_v 为变异系数; \bar{X} 为性状的平均值; S 为性状表型标准差; F 值必须至少达到 5% 统计学显著水平。

采用隶属函数综合求值的方法^[20], 对不同林分下不同品系土沉香生长指标进行适应性综合评

价。通过对各处理生长指标的隶属值进行累加, 再计算隶属平均值, 所得值越大, 对相应条件适应性越强、综合评价越好。具体见计算公式:

$$U_{(X_i)_+} = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min});$$

$$U_{(X_i)_-} = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}).$$

式中: $U_{(X_i)}$ 代表各指标的隶属函数值, 如某一指标与土沉香生长呈正相关, 则用 $U_{(X_i)_+}$ 表示; 如某一指标与土沉香生长呈负相关, $U_{(X_i)_-}$ 表示; X_i 为某处理土沉香 i 指标的平均值; X_{\max} 和 X_{\min} 为所有处理 i 指标中的最大值和最小值。

2 结果与分析

2.1 土沉香主要生长性状指标的方差分析

林分、品系以及二者交互作用对土沉香树高、地径、高径比有显著影响, 结果表明 (表 2), 林分对地径、高径比影响极显著 ($P < 0.01$), 对树高影响不显著; 品系对树高、地径、高径比影响均极显著 ($P < 0.01$); 林分与品系的交互作用对树高、地径、高径比影响均极显著 ($P < 0.01$)。

表2 林分、品系及其二者交互作用对土沉香苗木生长指标的方差分析

Table 2 Variance analysis between stand, variety and their interaction on the growth index of *Aquilaria sinensis*

处理	树高		地径		高径比	
	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
林分	0.017	0.983	20.162	0.000**	36.176	0.000**
品系	14.868	0.000**	29.594	0.000**	11.311	0.000**
林分 * 品系	9.394	0.000**	9.566	0.000**	6.157	0.000**

注: ** 表示极显著 ($P < 0.01$)。

2.2 土沉香生长性状的变异及遗传参数分析

在方差分析的基础上进行遗传参数分析是林木育种中分析遗传变异规律的重要方法^[21]。土沉香各生长性状遗传参数分析结果 (表 3) 表明, 树高、地径、高径比性状均存在不同程度的遗传变

异, 可进一步开展优良品系选择。其中, 地径的表型变异系数最高, 表明品系间地径的差异较大, 且存在丰富变异。树高、地径、高径比的家系遗传力分别为 0.917、0.954、0.881, 表明 3 种生长性状在品系水平上受到较高强度的遗传控制, 且

遗传稳定性好。生长性状指标中地径同时具有较高的表型变异系数和遗传力,表明不同土沉香品系间地径指标优劣分化明显,将地径作为优良品系的选择指标具有更高的遗传改良潜力和稳定性。

表3 生长性状变异及遗传参数分析

Table 3 Analysis of growth character variation and genetic parameters

统计值	树高/cm	地径/mm	高径比
平均值	107.83	2.142	53.01
标准差	27.03	7.25	12.81
变异系数/%	25.07	33.85	24.16
F值	12.072**	21.918**	8.413**
家系遗传力	0.917	0.954	0.881

注:**表示极显著 ($P<0.01$)。

2.3 土沉香主要生长性状指标的多重比较分析

多重比较分析结果表明(表4),林分A₁、

A₂、A₃的树高无显著差异,A₁的地径显著高于A₂、A₃ ($P<0.05$);品系B₄的树高、地径显著高于其他处理;品系B₃、B₅次之;品系B₁、B₂、B₆的树高、地径差异不显著。

品系B₁、B₂、B₃、B₄的树高、地径、高径比在不同林分处理下差异显著,品系B₅的地径在不同林分处理下差异显著,品系B₅、B₆的高径比在不同林分处理下差异显著(表5)。在相同林分处理下,不同品系土沉香的树高、地径、高径比亦呈现显著差异。纯林种植模式下,品系B₄的树高、地径显著高于其他品系;且高径比显著低于B₁、B₃、B₅、B₆。喜树林下套种,品系B₄的树高、地径显著高于B₁、B₂、B₃、B₆;高径比显著低于B₂、B₃。交趾黄檀林下套种,品系B₃的树高显著高于其他品系,地径显著高于B₁、B₂、B₅、B₆;品系B₄的高径比显著低于其他品系。

表4 不同林分下、不同品系土沉香苗木早期生长表现

Table 4 Early growth performance of *Aquilaria sinensis* under different stands and varieties

因素	水平	树高/cm	地径/mm	高径比
林分	A ₁	108.1±30.9a	23.97±8.33a	46.69±9.55c
	A ₂	107.5±21.9a	20.56±5.88b	54.33±10.54b
	A ₃	107.9±27.8a	19.72±6.67b	58.01±15.02a
品系	B ₁	96.6±21.6c	18.61±5.27c	53.88±11.90a
	B ₂	95.3±21.2c	18.27±4.65c	54.70±15.09a
	B ₃	113.8±29.6b	21.64±6.03b	53.52±8.41a
	B ₄	123.8±26.4a	28.81±8.06a	44.22±7.42b
	B ₅	114.3±26.2b	21.12±7.14b	57.70±15.38a
	B ₆	103.2±25.0c	20.06±6.53bc	54.06±12.47a

注:表中数据为“平均值±标准差”;数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

当双因素的交互作用显著时,最优组合并不是从主效应检验中分别选出A、B因素的最优水平,而是直接进行各水平组合平均数的多重比较,选出最优水平组合^[22]。

由表5可知,不同处理2a生土沉香苗木树高生长存在显著差异。树高平均生长量大小排序依次为A₁B₄、A₃B₃、A₂B₄、A₁B₅、A₂B₅、A₃B₆、A₃B₅、A₂B₂、A₃B₄、A₁B₃、A₂B₁、A₂B₆、A₁B₁、A₂B₃、A₁B₆、A₃B₂、A₃B₁、A₁B₂。其中处理A₁B₄、A₃B₃树高生长量显著高于其他处理,平均树高分别为144.7 cm、139.5 cm;处理A₂B₄、A₁B₅次之,分别为122.0 cm、120.3 cm;处理

A₁B₂树高平均生长量最小,仅为82.2 cm。

由表5可知,不同处理2a生土沉香苗木地径生长存在显著差异。地径平均生长量大小排序依次为A₁B₄、A₃B₃、A₂B₄、A₃B₄、A₂B₅、A₁B₅、A₁B₁、A₁B₆、A₁B₂、A₁B₃、A₂B₆、A₂B₁、A₃B₆、A₃B₅、A₂B₂、A₂B₃、A₃B₂、A₃B₁。其中处理A₁B₄地径生长量显著高于其他处理,平均地径分别为37.26 mm;处理A₃B₃、A₂B₄、A₃B₄次之,分别为26.62 mm、24.64 mm、24.51 mm;处理A₃B₁地径平均生长量最小,仅为14.59 mm。

由表5可知,不同处理2a生土沉香苗木高径比生长存在显著差异。高径比大小排序依次为处

表5 林分、品系交互作用下土沉香苗木早期生长表现
Table 5 Early growth performance of *Aquilaria sinensis* under the interaction of stands and varieties

林分	品系	树高/cm	地径/mm	高径比
A ₁	B ₁	99.5±26.7ABc	21.44±5.64Ab	46.89±8.06Bb
	B ₂	82.2±14.2Cd	20.91±4.13Ab	40.29±8.54Bc
	B ₃	103.0±23.6Bc	20.70±5.72Bb	50.92±8.77Bab
	B ₄	144.7±18.6Aa	37.26±6.94Aa	39.68±6.74Bc
	B ₅	120.3±30.5Ab	22.30±6.79ABb	55.28±8.11Ba
	B ₆	98.7±27.5Ac	21.21±5.86Ab	47.08±7.29Bb
A ₂	B ₁	102.9±22.2Abc	19.80±4.10Abc	52.38±6.16Bbc
	B ₂	108.0±21.1Abc	17.99±4.55Bc	62.08±12.36Aa
	B ₃	98.8±23.0Bc	17.60±4.07Cc	57.00±9.70Aab
	B ₄	122.0±18.2Ba	24.64±4.59Ba	50.03±5.11Ac
	B ₅	113.4±17.5Aab	22.96±6.22Aab	51.73±12.17Bbc
	B ₆	100.1±22.0Abc	20.41±7.87Abc	52.79±11.53Bbc
A ₃	B ₁	87.5±10.5Bc	14.59±3.29Bc	62.38±14.39Aa
	B ₂	95.7±20.0Bbc	15.91±4.01Bbc	61.72±12.41Aa
	B ₃	139.5±23.9Aa	26.62±4.40Aa	52.63±5.28ABb
	B ₄	104.8±25.2Cb	24.51±4.40Ba	42.93±7.46Bc
	B ₅	109.3±28.8Ab	18.11±7.67Bb	66.08±20.08Aa
	B ₆	110.7±24.8Ab	18.57±5.68Ab	62.31±13.12Aa

注: 表中数据为“平均值±标准差”; 同列不同大写字母表示同一品系不同林分处理间差异显著 ($P<0.05$); 同列不同小写字母表示同一林分不同品系处理间差异显著 ($P<0.05$)。

理 A₃B₅、A₃B₁、A₃B₆、A₂B₂、A₃B₂、A₂B₃、A₁B₅、A₂B₆、A₃B₃、A₂B₁、A₂B₅、A₁B₃、A₂B₄、A₁B₆、A₁B₁、A₃B₄、A₁B₂、A₁B₄。其中处理 A₁B₄ 高径比值最小, 处理 A₁B₂、A₃B₄ 次之, 处理 A₃B₅ 高径比值最大。

高径比是衡量林分稳定性、反映林木干形和林木生长的指标^[23-24], 高径比值小则苗木粗壮、抗逆性强, 高径比值大则植株高瘦、易遭受风雪灾害^[25]。总体而言, 从各组处理土沉香树高、地径、高径比生长表现来看, 处理 A₁B₄ 树高生长量、地径生长量最大, 高径比最小, 为表现最优的组合, 即纯林种植‘凹身’品系。

2.4 不同林分条件下土沉香苗木生长性状的相关性

采用 Pearson 相关系数法对土沉香各生长指标、林分进行相关性分析。结果表明 (表6), 林分与地径呈极显著负相关, 与高径比呈极显著正相关; 树高与地径呈极显著正相关; 地径与高径比呈极显著负相关; 其余各项指标间的相关性均未达到显著水平。因此, 在土沉香优良品系选育

中, 除了地径, 树高、高径比指标也可作为易结香品系生长状况筛选的重要判断依据。

2.5 不同处理土沉香苗木生长性状的综合评价

采用树高、地径、高径比 3 个关键指标对不同

表6 土沉香苗木各生长因素与林分之间的相关系数

Table 6 The correlation coefficient between the growth factors and the stand of *Aquilaria sinensis*

因素	林分	树高	地径	高径比
林分	1.000			
树高	-0.008	1.000		
地径	-0.192**	0.759**	1.000	
高径比	0.244**	-0.046	-0.616**	1.000

注: **表示极显著 ($P<0.01$)。

处理进行模糊隶属函数分析并排名 (表7)。综合评价最高的处理为 A₁B₄ (纯林种植‘凹身’), 其平均隶属函数值为 1; 综合评价较高的处理为 A₃B₃ (交趾黄檀套种‘糖结’)、A₂B₄ (喜树套种‘凹身’)、A₃B₄ (交趾黄檀套种‘凹身’), 其平均隶属函数值分别为 0.652、0.562、0.559; 综合评价最低的处理为 A₃B₁ (交趾黄檀套种‘紫

棋’)、 A_3B_2 (交趾黄檀套种‘油叶子’), 其平均隶属函数值分别为 0.075、0.146。最高隶属值是最低隶属值的 13.3 倍, 说明各处理之间存在巨大差异。

表 7 不同处理土沉香生长指标的隶属函数值及排序

Table 7 Membership function values and ranking of growth indexes for different treatments of *Aquilaria sinensis*

处理	树高	地径	高径比	平均隶属函数值	排序
A_1B_1	0.277	0.302	0.727	0.435	7
A_1B_2	0.000	0.279	0.977	0.419	9
A_1B_3	0.333	0.269	0.574	0.392	10
A_1B_4	1.000	1.000	1.000	1.000	1
A_1B_5	0.609	0.340	0.409	0.453	6
A_1B_6	0.263	0.292	0.720	0.425	8
A_2B_1	0.331	0.230	0.519	0.360	11
A_2B_2	0.413	0.150	0.152	0.238	15
A_2B_3	0.266	0.133	0.344	0.248	14
A_2B_4	0.636	0.443	0.608	0.562	3
A_2B_5	0.499	0.369	0.544	0.471	5
A_2B_6	0.286	0.256	0.503	0.349	12
A_3B_1	0.085	0.000	0.140	0.075	18
A_3B_2	0.215	0.058	0.165	0.146	17
A_3B_3	0.917	0.531	0.509	0.652	2
A_3B_4	0.362	0.438	0.877	0.559	4
A_3B_5	0.433	0.155	0.000	0.196	16
A_3B_6	0.457	0.176	0.143	0.258	13

3 结论与讨论

引起苗木生长差异的原因包括苗木自身因素和外界环境因素, 自身因素主要为品种自身遗传特性^[26-27]引起的苗木在养分获取、能量同化等方面的能力差异; 外界环境因素主要为气候条件、立地条件、物理胁迫、施肥水平以及管护措施等^[28-30]。

林木遗传测定中常采用遗传参数估计的方法研究分析遗传变异, 变异程度高则性状改良潜力越大, 利于进行优良家系的选择^[31-32]。本研究中土沉香各品系间生长性状受到较高强度的遗传控制, 表型变异系数介于 24.16%~33.85%, 家系遗传力介于 0.881~0.954, 说明遗传因素是影响 2 a 生土沉香品系生长的主要因素, 在家系水平上开展选择能获得较为理想的遗传增益。其中, 地径同时具有较高变异系数与家系遗传力, 说明其在土沉香品系间的表现受环境影响更小, 越能稳定遗传给后代。但本文中土沉香生长性状表现出较强的遗传控制, 也可能与林龄较小有关。相关研

究表明^[33-34], 林木家系间各性状均表现出随林龄增加受遗传因素影响越来越小, 受环境因子的影响越来越大。此外, 土沉香品系在生长性状上品种主效应、品种与林分交互效应均达到极显著水平, 应增加试验点检验品种与林分互作效应结论的可靠性。

土沉香树高、地径、高径比等在品系间的差异均达到极显著水平, 这与我省其他珍贵树种无性系引种研究结果相似^[35-36], 本研究中以‘凹身’树高、地径生长最大; ‘糖结’‘西瓜叶’次之; ‘油叶子’最小。土沉香各项生长指标在不同林分下的差异也达到显著水平, 以纯林种植生长最佳, 且显著高于交趾黄檀、喜树林下套种, 不同混交模式低郁闭度林分有利于土沉香幼树树高、地径的生长, 与张方兰^[37]、杨浪^[38]等研究结果一致, 说明高郁闭度林分往往伴随着低光和低温高湿环境的发生, 不利于土沉香幼树生长发育^[39]。对品系、林分交互作用进行综合评价, 纯林种植‘凹身’隶属值最高, 且极显著高于其他处理; 交趾黄檀套种‘糖结’、喜树套种‘凹身’、交趾黄檀

套种‘凹身’评价次之,但仍显著高于其他处理,从引种试验的早期结果来看,以上4种处理在粤西地区具有较大的推广适用性。

生长表型性状是最直接、最能反映苗木长势的易测量指标,本文对土沉香苗木各生长指标与林分进行相关性分析发现,树高与地径之间呈极显著正相关关系,该研究结果与麦宝莹等^[26]的报道结果一致;树高与高径比相关性不高,地径与高径比呈极显著相关,且高径比随地径的增大而减少,这与严铭海等^[40]、Zhang X 等^[41]研究结果一致,说明土沉香苗期较好的人工控制有效排除了外界不良因子的干扰。一般情况下,苗木各生长性状间具有显著的相关性,所反映的信息存在重叠性,本文经隶属函数法分析,各处理土沉香生长性状综合排序与树高、地径单项指标排序重合度极高,说明树高、地径在评价苗木质量时起至关重要作用,与罗明道等^[42]、韩东苗等^[43]利用主成分分析法评价交趾黄檀苗木质量的研究一致。因此,在林业生产中,当难以测定所有生长表型性状特别是根系相关指标时,可选择树高、胸径作为评价珍贵树种苗木质量的重要指标^[44]。

通过对苗木生长综合指标值的分析,‘凹身’在不同林分下的评价均较高,初步认为其最适合在粤西地区引种。但苗木生长状况除了与品系、林分相关以外,还与植株发育阶段等有关,因此‘凹身’呈现的生长优势可能是苗期生长阶段的短期现象,造林4 a 以上的林木生长状况对土沉香结香技术推广具有更大的影响。因此,由于造林时间较短、种植模式有限,并不能完全反映土沉香各品系生长的总体水平,需要持续观测各处理的生长情况,并进一步开展对比试验,为土沉香易结香品系在粤西地区的引种推广提供参考。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中国药典[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:267.
- [2] 梅文莉,左文健,杨德兰,等. 沉香结香机理,人工结香及其化学成分研究进展[J]. 热带作物学报,2013,34(12):2513-2520.
- [3] 李佩琳,王军,周天明,等. 沉香及其科学鉴定[M]. 海口:海南出版社,2022.
- [4] NAEF R. The volatile and semi-volatile constituents of agatwood, the infected heartwood of *Aquilaria* species: a review[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2011, 26(2): 73-87.
- [5] 林彬,郭运勇,曾祥全,等. 海南省白木香培育现状及发展建议[J]. 热带林业,2019,47(2):44-47.
- [6] DONOVAN D G, PURI R K. Learning from traditional knowledge of non-timber forest products: *Penan benalui* and the autecology of *Aquilaria* in Indonesian Borneo [J]. Ecology and Society, 2004, 9(3): art3.
- [7] 刘高峰,周再知,赵威威,等. 外源 CO₂ 诱导土沉香树体结香效应及生理响应[J]. 林业科学,2023,59(11):95-102.
- [8] 王东光,郭淑红,徐大平,等. 不同处理对土沉香生长和结香的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2023,43(10):28-35.
- [9] 宋晓琛,王西洋,杨光,等. 无机盐与激素混合对土沉香结香的诱导[J]. 林业科学,2020,56(8):121-130.
- [10] 刘园园,王昊,李薇,等. 红土沉香的化学成分及其抗炎活性研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2021,55(4):589-596.
- [11] 潘超美,黄崇才,郑芳昊,等. 药用植物土沉香种苗分级标准的研究[J]. 广州中医药大学学报,2012,29(2):180-184.
- [12] 张玉臣,周再知,梁坤南,等. 不同植物生长调节剂对白木香扦插生根的影响[J]. 林业科学研究,2010,23(2):278-282.
- [13] 汪腾越,周再知,袁珍飞,等. 土沉香组织培养外植体消毒方法的研究[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(3):44-48.
- [14] 杨晓清,周再知,梁坤南,等. 氮素对模拟胁迫下土沉香幼苗抗旱生理的影响[J]. 热带作物学报,2013,34(6):1121-1127.
- [15] 万文生,秦武明,陈卫国,等. 盐分胁迫对土沉香苗木生长和生理指标的影响[J]. 福建林业科技,2012,39(1):100-103.
- [16] 严珍花. 土沉香引种适应性试验初报[J]. 安徽农学通报,2019,25(17):45-46.
- [17] 彭燕琼,冼世庆,冯光钦,等. 茂名地区土沉香引种品种生长情况比较试验初报[J]. 山东林业科技,2015,45(5):56-58.
- [18] 续九如. 林木数量遗传学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:29.
- [19] 贾棚. 遗传力的概念,计算及在林木良种选育中的作用[J]. 山西林业科技,1997(1):39-40,47.
- [20] 洪舟,刘小金,张宁南,等. 不同基质和容器规格对降香黄檀苗期及造林早期生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2022,42(10):22-29,38.
- [21] 王明麻. 林木遗传育种学[M]. 北京:中国林业出版社,2001.
- [22] 明道绪. 田间试验与统计分析[M]. 北京:科技出版社,2008.
- [23] 蔡坚,潘文,王保华,等. 林分密度对湿地松林木干形影响的研究[J]. 广东林业科学,2006,22(2):6-10.

- [24] HESS A F, MINATTI M, COSTA E A, et al. Height-to-diameter ratios with temporal and dendro/morphometric variables for Brazilian pine in south Brazil [J]. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32(1): 191-202.
- [25] 严铭海, 黄清麟, 王金池, 等. 林木高径比研究综述 [J]. *世界林业研究*, 2023, 36(1): 59-65.
- [26] 麦宝莹, 洪舟, 徐大平, 等. 不同家系交趾黄檀种子萌发及幼苗生长差异 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(2): 153-160.
- [27] 彭华贵, 李兆佳, 周志平, 等. 4个杉木品系在广东省天井山林场的生长比较 [J]. *林业与环境科学*, 2017, 33(4): 25-28.
- [28] 贺立静, 贺立红, 谢正生. 光照对土沉香种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. *广东农业科学*, 2011, 38(8): 32-34.
- [29] 王冉, 李吉跃, 张方秋, 等. 不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31(1): 98-106.
- [30] 许平华. 土沉香不同抚育措施对其生长及土壤理化性状的影响分析 [J]. *安徽农学通报*, 2020, 26(4): 60-61.
- [31] 王云鹏, 张蕊, 周志春, 等. 木荷优树自由授粉家系早期生长性状遗传变异动态规律 [J]. *林业科学*, 2020, 56(9): 77-86.
- [32] 张秦徽, 王洪武, 姜国云, 等. 红松半同胞家系变异分析及选择研究 [J]. *植物研究*, 2019, 39(4): 557-567.
- [33] 马茂, 徐开源, 张含国. 日本落叶松无性系树高变异与初步选择 [J]. *林业科技*, 2019, 44(5): 5-7.
- [34] 缪小飞, 张含国, 侯丹, 等. 杂种落叶松家系遗传变异及多点稳定性 [J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46(12): 1-8.
- [35] 韩东苗, 梁远楠, 张丽君, 等. 9种金花茶组植物在肇庆地区引种的早期评价 [J]. *林业与环境科学*, 2018, 34(4): 95-100.
- [36] 陈水莲, 谭瑞坤, 赵苗菲, 等. 粤西黑木相思人工林生长评价 [J]. *林业与环境科学*, 2023, 39(5): 117-121.
- [37] 张方兰, 吴少忠, 徐建辉, 等. 不同郁闭度橡胶林对套种土沉香幼树生长特性的影响 [J]. *林业资源管理*, 2024(1): 143-150.
- [38] 杨浪, 李瑜. 桉树相思混交林郁闭度和立地类型对其林下套种土沉香幼树生长的影响 [J]. *防护林科技*, 2023(4): 55-57, 71.
- [39] 原慧芳, 田耀华, 岳海, 等. 不同遮荫度下土沉香幼苗的生理特性响应 [J]. *热带作物学报*, 2013, 34(2): 314-320.
- [40] 严铭海, 王金池, 黄清麟, 等. 典型中亚热带天然阔叶林林木高径比与胸径及树高关系 [J]. *林业科学研究*, 2022, 35(5): 81-88.
- [41] ZHANG X, WANG H, CHHIN S, et al. Effects of competition, age and climate on tree slenderness of Chinese fir plantations in southern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 458: 117815.
- [42] 罗明道, 洪舟, 李科, 等. 交趾黄檀1年生容器苗分级标准研究 [J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(2): 76-82.
- [43] 韩东苗, 梁承坚, 陈安, 等. 容器规格, 肥料类型和育苗基质对交趾黄檀苗木生长的影响 [J]. *林业与环境科学*, 2022, 38(5): 151-157.
- [44] 潘超美, 黄崇才, 郑芳昊, 等. 药用植物土沉香种苗分级标准的研究 [J]. *广州中医药大学学报*, 2012, 29(2): 180-184.