

## 25 份奇楠沉香无性系的生长变异与综合评价

钟源源<sup>1,3</sup>, 付豪<sup>1,3</sup>, 杨保国<sup>1,3</sup>, 崔之益<sup>2</sup>, 陈乐康<sup>1,3</sup>, 毛纯<sup>4</sup>, 熊俊飞<sup>1,3</sup>,  
赵宏鹏<sup>1,3</sup>, 覃瑶<sup>1,3</sup>, 郝建<sup>1,3\*</sup>

1. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西凭祥 532600; 2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东广州 510520; 3. 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站/崇左凭祥友谊关森林生态系统广西野外科学观测研究站, 广西凭祥 532600; 4. 广西国有七坡林场, 广西南宁 530004

**摘要:** 探究奇楠沉香无性系的生长规律和遗传变异特征, 为奇楠沉香优良无性系早期高效选育提供理论依据, 助力沉香产业提质增效。以中国林业科学研究院热带林业实验中心栽培的 25 份奇楠沉香无性系为研究对象, 通过连续调查 3 a 生长性状等指标, 分析不同无性系的生长表现、适应性以及生长性状变异等早期生长差异和相关性, 综合遗传参数估算和聚类分析, 筛选具有速生、广适性特征的优良无性系。结果表明: 25 份奇楠沉香无性系的树高、地径和保存率均差异显著, 3 a 的平均树高、地径和保存率分别为 134.15 cm、2.89 cm、68.40%, 最大的均为 Qi NYH, 最小的均为 Bo LZ。25 份奇楠沉香无性系造林后树高和地径年生长量存在较大的变幅, 整体表现为种植第 3 年的树高和地径显著提高。25 份奇楠沉香无性系在不同生长时期树高和地径均表现出不同幅度的变异, 地径性状离散大, 变异最为丰富。生长性状 3 a 的广义遗传力均较高且稳定, 均在 0.63 以上。地径、树高和保存率之间呈显著或极显著正相关。通过主成分分析对 25 份奇楠沉香无性系进行综合排名, 按照 20% 的入选率, 入选前 5 名的依次是 Qi NYH、Ao S、Jin SZ、Tu YW、Cuan T。通过聚类分析将 25 份参试无性系分为 4 类, 第 I 类长势较好, 包括 Ao S、Qi NYH、Lan BS、Tu YW、Jin SY、Xi GY、Jin SZ 和 Cuan T, 树高、地径和保存率分别在 158.00 cm、3.00 cm 和 73.00% 以上, 具有较强的后期生长潜力; 第 II 类和第 III 类长势居中; 第 IV 类长势较差, 树高、地径和保存率均较低。通过综合评价得出, 无性系 Qi NYH、Ao S、Jin SZ、Tu YW 和 Cuan T 的树高、地径、年生长量和保存率等均表现较好, 适宜作为综合品质优良的奇楠沉香无性系在凭祥等地进行推广种植。

**关键词:** 奇楠沉香; 无性系; 生长; 遗传变异; 聚类分析

中图分类号: S792.99 文献标志码: A

## Growth Variation and Comprehensive Evaluation of 25 *Aquilaria sinensis* Qi Nan Clones

ZHONG Yuanyuan<sup>1,3</sup>, FU Hao<sup>1,3</sup>, YANG Baoguo<sup>1,3</sup>, CUI Zhiyi<sup>2</sup>, CHEN Lekang<sup>1,3</sup>, MAO Chun<sup>4</sup>,  
XIONG Junfei<sup>1,3</sup>, ZHAO Hongpeng<sup>1,3</sup>, QIN Yao<sup>1,3</sup>, HAO Jian<sup>1,3\*</sup>

1. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi 532600, China; 2. Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 3. Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem National Observation and Research Station / Youyiguan Forest Ecosystem Observation and Research Station of Guangxi, Pingxiang, Guangxi 532600, China; 4. Qipo Forest Farm of Guangxi, Nanning, Guangxi 530004, China

**Abstract:** The study explored the growth regularity and genetic variation characteristics of *Aquilaria sinensis* Qi Nan clones to provide a theoretical basis for selection superior *A. sinensis* Qi Nan clones and application. 25 *A. sinensis* Qi Nan clones cultivated in the Experimental Center of Tropical Forestry of the Chinese Academy of Forestry were inves-

收稿日期 2025-03-14; 接受日期 2025-06-11

基金项目 广西林业科技推广示范项目(桂林科研[2022]第 2 号, No. 2024GXLK32); 广西自然科学基金项目(No. 2024GXNSFBA010421)。

作者简介 钟源源(1994—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 林木良种培育。\*通信作者( Corresponding author): 郝建(HAO Jian), E-mail: xuzhouhaojian@126.com。

tigated, the tree height and basal diameter were measured at 1, 2 and 3 years, respectively. The study analyzed early growth performance, adaptability, growth trait variations among different clones, and the intercorrelations. Comprehensive estimation of genetic parameters and cluster analysis were used to select superior clones. There were significant differences in tree height, basal diameter and preservation rate among the clones. The average tree height, basal diameter and preservation rate at 3 years old was 134.15 cm, 2.89 cm and 68.40%, respectively. The highest was Qi NYH, and the lowest was Bo LZ. There were substantial variations in the annual growth increments of tree height and basal diameter among the clones. Generally, the tree height and basal diameter increased remarkably in the third year. The clones showed different ranges of variation in tree height and basal diameter at different growth stages. The basal diameter showed a high degree of dispersion and the richest variation. The broad-sense heritability of growth traits in 3 years was high and stable, above 0.63. Basal diameter, tree height and preservation rate showed significant or extremely significant positive correlation. Principal component analysis revealed that the clones were comprehensively evaluated and ranked based on the scores. According to the selection rate of 20%, the top five were Qi NYH, Ao S, Jin SZ, Tu YW and Cuan T in turn. The results of cluster analysis showed that the clones were divided into 4 categories. Class I grew better, and had stronger potential for growth in the later period than others, including Ao S, Qi NYH, Lan BS, Tu YW, Jin SY, Xi GY, Jin SZ and Cuan T, with the tree height, basal diameter and preservation rate above 158.00 cm, 3.00 cm and 73.00%, respectively. Class II and Class III grew relatively fast. Class IV grew the slowest with the slowest tree height, basal diameter and preservation rate. Through comprehensive evaluation, Qi NYH, Ao S, Jin SZ, Tu YW and Cuan T clones had the best performance in tree height, basal diameter and preservation rate. They could be popularized and planted as the excellent comprehensive quality of *A. sinensis* Qi Nan clones in Pingxiang and other suitable places.

**Keywords:** *Aquilaria sinensis* Qi Nan; clone; growth; genetic variation; cluster analysis

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.10.010

沉香 [*Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng.] 为瑞香科 (Thymelaeaceae) 沉香属 (*Aquilaria*) 热带及亚热带常绿乔木, 属国家二级珍稀濒危保护植物, 作为名贵药材和高级香料在亚洲、中东和欧洲等地广泛应用已有数百年历史<sup>[1-2]</sup>。野生奇楠沉香被认为是优质沉香的代表, 因其树脂含量高、香气独特而备受市场追捧, 价格比普通沉香高出数百甚至上千倍<sup>[3-4]</sup>。然而, 野生沉香资源因过度采伐濒临枯竭, 人工林培育成为产业可持续发展的关键。

人工栽培奇楠沉香 (*Aquilaria sinensis* Qi Nan) 主要通过嫁接方式获得, 保留了野生奇楠沉香的优良结香性状, 具有结香早、结香快、结香品质高等优良特性<sup>[5-6]</sup>。传统实生繁殖模式结香时间长达 10 a 以上且品质波动显著, 通过无性系选育栽培的奇楠沉香不仅保留了优良母株的遗传特性, 还可显著缩短育种周期, 提升品质一致性, 人工栽培奇楠沉香 3 a 即可进行结香处理<sup>[6-8]</sup>。近年来, 我国南方地区开始大规模人工种植奇楠沉香, 种植面积不断扩大, 沉香优良苗木成为行业内的主流<sup>[8]</sup>。然而, 关于奇楠沉香的描述和鉴定标准及其他研究尚未形成体系, 存在优良种质资源来源不稳定等问题, 在一定程度上制约了结香及其相关产业的进一步发展。奇楠沉香种类繁多

且遗传背景不同, 导致不同无性系的经济差异较大<sup>[9-10]</sup>。因此, 筛选出优良奇楠沉香无性系, 对推进奇楠沉香遗传改良进程和推广种植具有重要意义。本研究以中国林业科学研究院热带林业实验中心 (以下简称“热林中心”) 栽培的 25 份奇楠沉香无性系为研究对象, 通过 3 a 生长期的连续观测, 分析不同无性系的生长、适应性以及生长性状变异等早期生长指标, 系统解析 3 a 生长期内生长性状的遗传变异特征, 构建多维度综合评价体系, 筛选出具有速生、广适性特征的优良无性系。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1.1.1 供试材料 25 份参试奇楠沉香无性系的穗条均于 2020 年 11 月采自一代嫁接母树 (表 1)。选择 1.5 a 生白木香实生容器苗作为砧木, 采用劈接法将奇楠沉香穗条嫁接到白木香上, 待嫁接口愈合, 穗条生长高度达 30~35 cm 时, 选择生长良好、无病虫害、长势一致的嫁接苗出圃种植。

1.1.2 试验地概况 试验地设在广西凭祥市热林中心哨平实验场 (21°57'47"N, 106°59'30"E), 海拔 350 m, 属南亚热带季风气候。干湿季节明显, 4—9 月为雨季, 10 月至翌年 3 月为旱季。年平均气温为 19.5~21.5 °C, ≥10 °C 年积温为 6000~

表 1 25 个参试奇楠沉香无性系基本信息

Tab. 1 Basic information of 25 tested *A. sinensis* Qi Nan clones

无性系编号 Clone No.	无性系代码 Clone code	来源 Source	无性系编号 Clone No.	无性系代码 Clone code	来源 Source
QN01	Jin ShaY	深圳市	QN14	Zi Q	茂名市
QN02	Diao YW	茂名市	QN15	Tang J	茂名市
QN03	Pu TT	茂名市	QN16	Zhi TJ	深圳市
QN04	Ao S	茂名市	QN17	Jian YZ	汕尾市
QN05	Lan BS	惠州市	QN18	Xiao YZ	汕尾市
QN06	Tu YW	茂名市	QN19	You YZ	深圳市
QN07	Xiang SYH	茂名市	QN20	Cuan T	惠州市
QN08	Jin SZ	茂名市	QN21	Tou DL	茂名市
QN09	Da YP	汕尾市	QN22	Hong GJY	茂名市
QN10	Qi NYH	茂名市	QN23	Bo LZ	茂名市
QN11	Jin SY	惠州市	QN24	Kuai C	茂名市
QN12	Jin SYH	茂名市	QN25	Qian LX	茂名市
QN13	Xi GY	茂名市			

7500 °C，年均降水量为 1220~1380 mm。地貌类型以低山丘陵为主，土壤为花岗岩发育成的山地红壤，土层厚度在 100 cm 以上。

## 1.2 方法

1.2.1 试验设计 2021 年 4 月，采用完全随机区组的试验设计，将 25 份奇楠沉香无性系分别编号后随机种植，每份无性系种植 10 株，设置 4 次重复，株行距为 2.0 m×1.5 m。试验设置 4 个区组，每个区组 250 株（10 行×25 株），共计种植 1000 株。

1.2.2 调查研究方法 采用全林分调查方法，分别在 2021、2022、2023 年的 12 月，采用塔尺测量树高，游标卡尺测量地径（嫁接口直径），同时统计死亡植株数量，计算保存率。参照文献[11-12]计算如下参数：

(1) 变异系数：

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\%$$

式中，CV 为变异系数， $\sigma$  为性状标准差， $\bar{X}$  为性状平均值。

(2) 遗传参数估算：

$$h_B^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_p^2}$$

$$C_{Vg} = \frac{\sqrt{\sigma_g^2}}{\bar{X}} \times 100\%$$

$$C_{Ve} = \frac{\sqrt{\sigma_e^2}}{\bar{X}} \times 100\%$$

$$C_{Vp} = \frac{\sqrt{\sigma_p^2}}{\bar{X}} \times 100\%$$

式中， $h_B^2$  为广义遗传力， $C_{Vg}$  为遗传变异系数， $C_{Ve}$  为环境变异系数， $C_{Vp}$  为表型变异系数， $\sigma_g^2$  为遗传方差分量， $\sigma_e^2$  为环境方差分量， $\sigma_p^2$  为表型方差分量， $\bar{X}$  为性状平均值。

## 1.3 数据处理

采用 Excel 2021 软件整理试验数据，利用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差分析、Duncan 多重比较和主成分分析，采用 Origin 2022 软件进行 Pearson 相关分析并制作热图。对 25 个无性系的树高、地径和保存率数据进行无量纲化处理，采用 NTSYSPC 2.1 软件和非加权配对算术平均法（UPGMA）进行聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 25 份奇楠沉香无性系生长表现

由表 2 可知，25 份奇楠沉香无性系的树高和地径差异极显著（ $P < 0.01$ ），保存率差异显著（ $P < 0.05$ ）。第 1、2、3 年树高生长范围分别为 37.22~80.23、55.99~124.31、82.73~184.10 cm，均值分别为 56.97、89.72、134.15 cm。第 3 年树高在均值以上的无性系有 14 个，分别是 QN02、QN03、QN04、QN05、QN06、QN08、QN10、QN11、QN13、QN15、QN16、QN20、QN21、QN25，其中 QN10 的树高显著高于其他无性系，为 184.10 cm；其次是 QN04，为 175.87 cm。QN23

和 QN19 的树高生长最慢, 分别为 82.73 cm 和 89.33 cm。

第 1、2、3 年不同无性系地径的生长范围分别为 0.67~1.38、1.04~2.53、1.69~4.16 cm, 均值分别为 1.03、1.74、2.89 cm。第 3 年地径在均值以上的无性系有 11 个, 分别是 QN02、QN03、QN04、QN05、QN06、QN08、QN10、QN11、QN13、QN20、QN21, 其中 QN10 的地径显著高于其他无性系, 达 4.16 cm; 其次是 QN04, 为 4.12 cm。QN23 和 QN19 的地径生长最小, 分别为 1.69 cm 和 1.70 cm (表 2)。

第 1、2、3 年不同无性系的保存率范围分别为 73.50%~94.50%、59.75%~88.25%、49.50%~83.75%, 均值分别为 85.33%、74.44%、68.40%。第 3 年保存率在 80% 以上的无性系有 4 个, 从高到低依次是 QN10、QN08、QN20、QN04, 并且 QN10 的保存率显著高于其他无性系, 为 83.75%, 保存率最低的是 QN23, 为 49.50%。

## 2.2 25 份奇楠沉香无性系年生长量比较分析

由表 3 可知, 25 份奇楠沉香无性系 3 a 的树高和地径年生长量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 树高和地径生长量随林龄增加而稳步增大。种植第 2 年时, 25 份无性系的树高年生长量在 10.23~60.48 cm 之间, 其中 QN16 (60.48 cm) 和 QN04 (50.69 cm) 的树高年生长量较大, QN19 (10.23 cm) 和 QN23 (10.51 cm) 的树高年生长量最小; 地径年生长量在 0.21~1.20 cm 之间, 其中 QN04 (1.20 cm)、QN10 (1.15 cm)、QN13 (1.04 cm) 和 QN06 (1.00 cm) 的地径年生长量较大, QN19 (0.21 cm) 和 QN23 (0.25 cm) 的地径年生长量最小。种植第 3 年时, 25 份无性系的树高年生长量在 26.74~59.79 cm 之间, 其中 QN10 (59.79 cm) 的树高年生长量最大, QN23 (26.74 cm) 最小; 地径年生长量在 0.65~1.65 cm 之间, 其中 QN04 (1.65 cm)、QN10 (1.64 cm) 和 QN05 (1.63 cm) 的地径年生长量较大, QN23 (0.65 cm) 和 QN19 (0.67 cm) 的地径年生长量较小。25 份奇楠沉香无性系种植后树高和地径年生长量均存在较大的变幅, QN14 和 QN15 种植第 3 年的树高生长量和第 2 年的相似, QN16 种植第 3 年的树高生长量明显比第 2 年少 74.24%, 其余无性系种植第 3 年的树高和地径生长量明显比第 2 年多。

## 2.3 无性系变异分析

由表 4 可知, 不同生长时期 25 份奇楠沉香无

性系的树高、地径均表现出不同幅度的变异。第 1 年时, 25 份无性系的树高变异系数在 5.77%~32.88% 之间, 无性系 QN17 变异最大, 其次是 QN21>QN13>QN22, 变异系数均在 24.00% 以上, QN06 变异最小, 其次是 QN25<QN24<QN01, 变异系数均在 10.00% 以下, 最大和最小变异系数相差 27.11%; 第 2 年时, 树高变异系数在 6.07%~38.00% 之间, 无性系 QN19 变异最大, 其次是 QN22>QN09>QN21, 变异系数均在 35.00% 以上, QN02 变异最小, 其次是 QN06, 变异系数均在 10.00% 以下, 最大和最小变异系数相差 31.93%; 第 3 年时, 树高变异系数在 5.94%~56.29% 之间, 无性系 QN19 变异最大, 其次是 QN09>QN22>QN12, 变异系数均在 36.00% 以上, QN02 变异最小, 其次是 QN06, 变异系数均在 10.00% 以下, 最大和最小变异系数相差 50.98%。

第 1 年时, 25 份无性系的地径变异系数范围在 5.66%~24.96% 之间, QN21 的变异系数最大, 其次是 QN22>QN23>QN13, 变异系数均在 22.00% 以上, QN01 的变异系数最小, 其次是 QN02<QN24<QN10, 变异系数均在 10.00% 以下, 最大和最小变异系数相差 19.30%; 第 2 年时, 地径变异系数范围在 3.64%~55.22% 之间, QN16 变异系数最大, 其次是 QN09>QN22>QN19, 变异系数均在 37.00% 以上, QN06 变异系数最小, 其次是 QN02, 变异系数均在 10.00% 以下, 最大和最小变异系数相差 51.58%; 第 3 年时, 地径变异系数在 3.24%~57.49% 之间, QN09 的变异系数最大, 其次是 QN19>QN22>QN12, 变异系数均在 39.00% 以上, QN06 的变异系数最小, 其次是 QN02, 变异系数均在 10.00% 以下, 最大和最小变异系数相差 54.25% (表 4)。

由此可知, 25 份奇楠沉香无性系的树高和地径均存在较广泛的变异, 选择潜力大, 地径性状离散大, 变异最为丰富, 具有较大的选育能力和更宽的选择基础, 在一定程度上, 大大增加了选出优良单株或优良无性系的可能。

## 2.4 遗传力分析

不同生长时期树高和地径的遗传参数如表 5 所示, 第 1 年时树高和地径的广义遗传力最大, 分别为 0.85 和 0.77; 第 2 年时树高和地径的遗传变异系数与表型变异系数均最大, 树高的环境变异系数最大, 为 28.27%, 而地径的环境变异系数则在第 3 年时最大, 为 28.40%。整体来看, 3 年

表 2 25 份奇楠沉香无性系 3 a 生长表现及保存率

Tab. 2 Growth performance and preservation rate of 3-year-old for 25 *A. sinensis* Qi Nan clones

无性系 Clone	1 a				2 a				3 a			
	树高 Plant height/cm	地径 Basal diameter/cm	保存率 Preservation rate/%	树高 Plant height/cm	地径 Basal diameter/cm	保存率 Preservation rate/%	树高 Plant height/cm	地径 Basal diameter/cm	保存率 Preservation rate/%	树高 Plant height/cm	地径 Basal diameter/cm	保存率 Preservation rate/%
QN01	61.73±3.49 <sup>BCDE</sup>	0.94±0.09 <sup>CDEFGH</sup>	84.25±0.08 <sup>abc</sup>	76.12±17.24 <sup>CDEFG</sup>	1.37±0.33 <sup>CDEFG</sup>	66.75±0.06 <sup>abc</sup>	112.87±16.60 <sup>BCDEFG</sup>	2.31±0.63 <sup>CDE</sup>	58.75±0.07 <sup>abcd</sup>			
QN02	57.49±3.78 <sup>CDEFG</sup>	1.08±0.12 <sup>ABCDE</sup>	81.25±0.08 <sup>abc</sup>	85.97±6.83 <sup>ABCD</sup>	1.76±0.11 <sup>ABCD</sup>	70.75±0.09 <sup>abc</sup>	142.34±8.46 <sup>ABCD</sup>	3.07±0.30 <sup>ABCDE</sup>	70.75±0.09 <sup>abcd</sup>			
QN03	64.75±7.49 <sup>BCD</sup>	1.23±0.21 <sup>ABC</sup>	90.00±0.05 <sup>abc</sup>	99.13±25.37 <sup>ABCD</sup>	2.18±0.71 <sup>AB</sup>	83.00±0.09 <sup>abc</sup>	145.50±41.25 <sup>AB</sup>	3.33±0.99 <sup>ABCD</sup>	75.50±0.20 <sup>abcd</sup>			
QN04	67.73±14.61 <sup>ABC</sup>	1.28±0.31 <sup>AB</sup>	86.50±0.11 <sup>abc</sup>	118.42±38.31 <sup>ABC</sup>	2.48±0.84 <sup>A</sup>	82.75±0.17 <sup>abc</sup>	175.87±63.99 <sup>A</sup>	4.12±1.43 <sup>A</sup>	80.25±0.22 <sup>ab</sup>			
QN05	57.99±7.75 <sup>CDEFG</sup>	1.09±0.16 <sup>ABCDE</sup>	87.00±0.04 <sup>abc</sup>	100.85±14.57 <sup>ABCD</sup>	1.99±0.35 <sup>ABCDE</sup>	83.50±0.09 <sup>ab</sup>	159.04±30.53 <sup>ABCDE</sup>	3.62±0.73 <sup>ABC</sup>	77.25±0.09 <sup>abc</sup>			
QN06	74.97±7.99 <sup>AB</sup>	1.19±0.07 <sup>ABC</sup>	92.50±0.07 <sup>ab</sup>	110.90±4.03 <sup>ABCD</sup>	2.19±0.16 <sup>AB</sup>	83.00±0.06 <sup>abc</sup>	161.36±13.58 <sup>ABC</sup>	3.67±0.12 <sup>ABC</sup>	78.25±0.08 <sup>abc</sup>			
QN07	43.82±6.19 <sup>GHI</sup>	0.77±0.12 <sup>FGH</sup>	83.25±0.11 <sup>abc</sup>	78.03±16.12 <sup>BCDEFG</sup>	1.41±0.31 <sup>BCDEFG</sup>	78.50±0.15 <sup>abc</sup>	127.76±21.36 <sup>ABCD</sup>	2.70±0.71 <sup>BCDE</sup>	70.50±0.15 <sup>abcd</sup>			
QN08	79.18±13.69 <sup>A</sup>	1.18±0.17 <sup>ABC</sup>	90.75±0.07 <sup>ab</sup>	115.53±25.57 <sup>ABC</sup>	2.11±0.51 <sup>ABCD</sup>	84.75±0.11 <sup>ab</sup>	168.63±37.12 <sup>AB</sup>	3.40±0.85 <sup>ABCD</sup>	82.25±0.13 <sup>ab</sup>			
QN09	46.44±8.48 <sup>F</sup>	0.83±0.19 <sup>DEFGH</sup>	73.50±0.12 <sup>c</sup>	68.36±28.11 <sup>DEFG</sup>	1.34±0.49 <sup>DEFG</sup>	59.75±0.20 <sup>c</sup>	100.72±50.09 <sup>CDEFG</sup>	2.13±1.22 <sup>DE</sup>	52.25±0.24 <sup>cd</sup>			
QN10	80.23±6.45 <sup>A</sup>	1.38±0.17 <sup>A</sup>	94.50±0.08 <sup>a</sup>	124.31±23.26 <sup>A</sup>	2.53±0.63 <sup>A</sup>	88.25±0.20 <sup>a</sup>	184.10±37.11 <sup>A</sup>	4.16±1.20 <sup>A</sup>	83.75±0.23 <sup>a</sup>			
QN11	63.34±5.47 <sup>BCD</sup>	1.27±0.13 <sup>AB</sup>	86.00±0.06 <sup>abc</sup>	102.23±19.61 <sup>ABCD</sup>	2.14±0.28 <sup>ABC</sup>	74.25±0.15 <sup>abc</sup>	158.30±30.30 <sup>ABCDE</sup>	3.69±0.63 <sup>ABC</sup>	73.00±0.13 <sup>abcd</sup>			
QN12	47.02±9.84 <sup>EF</sup>	0.80±0.16 <sup>ERGH</sup>	78.75±0.16 <sup>abc</sup>	69.89±20.67 <sup>DEFG</sup>	1.32±0.42 <sup>ERGH</sup>	67.00±0.14 <sup>abc</sup>	99.94±36.93 <sup>DEFG</sup>	2.10±0.83 <sup>DE</sup>	60.75±0.19 <sup>abcd</sup>			
QN13	60.68±13.63 <sup>BCDEF</sup>	1.13±0.30 <sup>ABCD</sup>	84.25±0.14 <sup>abc</sup>	103.17±34.61 <sup>ABCDE</sup>	2.17±0.69 <sup>AB</sup>	76.25±0.22 <sup>abc</sup>	161.01±53.28 <sup>ABCD</sup>	3.74±1.22 <sup>AB</sup>	73.75±0.21 <sup>abcd</sup>			
QN14	45.33±4.67 <sup>GHI</sup>	0.96±0.13 <sup>CDEFGH</sup>	76.25±0.07 <sup>bc</sup>	79.87±15.65 <sup>BCDEFG</sup>	1.56±0.23 <sup>BCDEFG</sup>	69.00±0.11 <sup>abc</sup>	111.68±18.99 <sup>BCDEFG</sup>	2.51±0.48 <sup>BCDE</sup>	60.75±0.09 <sup>abcd</sup>			
QN15	53.95±11.15 <sup>CDEFGH</sup>	1.02±0.22 <sup>BCDEFG</sup>	82.25±0.11 <sup>abc</sup>	95.59±23.39 <sup>ABCD</sup>	1.80±0.43 <sup>ABCD</sup>	74.00±0.11 <sup>abc</sup>	136.31±34.85 <sup>ABCD</sup>	2.69±0.55 <sup>BCDE</sup>	60.00±0.11 <sup>abcd</sup>			
QN16	60.46±9.90 <sup>BCDEF</sup>	1.09±0.19 <sup>ABCDE</sup>	89.75±0.09 <sup>abc</sup>	120.94±66.78 <sup>AB</sup>	1.68±0.39 <sup>BCDEFG</sup>	78.25±0.17 <sup>abc</sup>	151.25±44.15 <sup>ABCDE</sup>	2.85±0.68 <sup>ABCDE</sup>	76.00±0.15 <sup>abcd</sup>			
QN17	37.22±7.13 <sup>I</sup>	0.67±0.22 <sup>H</sup>	76.25±0.14 <sup>bc</sup>	62.70±18.67 <sup>ERGH</sup>	1.08±0.34 <sup>FG</sup>	62.00±0.11 <sup>bc</sup>	107.27±27.36 <sup>CDEFG</sup>	2.09±0.69 <sup>DE</sup>	55.50±0.08 <sup>bcd</sup>			
QN18	41.49±5.44 <sup>HI</sup>	0.75±0.11 <sup>GH</sup>	81.25±0.09 <sup>abc</sup>	59.59±14.50 <sup>ERGH</sup>	1.07±0.30 <sup>FG</sup>	65.00±0.11 <sup>abc</sup>	99.56±36.00 <sup>ERGH</sup>	2.01±0.79 <sup>DE</sup>	60.75±0.19 <sup>abcd</sup>			
QN19	49.87±4.30 <sup>DEFGHI</sup>	0.83±0.12 <sup>ERGH</sup>	89.50±0.07 <sup>abc</sup>	58.88±22.33 <sup>FG</sup>	1.04±0.39 <sup>G</sup>	66.50±0.17 <sup>abc</sup>	89.33±50.29 <sup>FG</sup>	1.70±0.93 <sup>E</sup>	57.75±0.28 <sup>abcd</sup>			
QN20	61.94±7.79 <sup>BCDE</sup>	1.15±0.15 <sup>ABC</sup>	89.25±0.09 <sup>abc</sup>	108.59±17.99 <sup>ABCD</sup>	2.09±0.48 <sup>ABCDE</sup>	85.75±0.10 <sup>ab</sup>	160.72±22.74 <sup>ABCDE</sup>	3.41±0.68 <sup>ABCD</sup>	81.75±0.07 <sup>ab</sup>			
QN21	54.85±13.69 <sup>CDEFGH</sup>	1.15±0.31 <sup>ABC</sup>	83.00±0.07 <sup>abc</sup>	95.73±33.52 <sup>ABCD</sup>	2.08±0.75 <sup>ABCDE</sup>	71.00±0.14 <sup>abc</sup>	151.51±35.67 <sup>ABCDE</sup>	3.38±0.93 <sup>ABCD</sup>	67.50±0.09 <sup>abcd</sup>			
QN22	48.15±11.89 <sup>EF</sup>	1.01±0.25 <sup>BCDEFG</sup>	84.50±0.14 <sup>abc</sup>	69.45±28.31 <sup>DEFG</sup>	1.51±0.57 <sup>BCDEFG</sup>	67.75±0.15 <sup>abc</sup>	105.89±44.84 <sup>CDEFG</sup>	2.39±1.01 <sup>BCDE</sup>	59.50±0.17 <sup>abcd</sup>			
QN23	47.55±11.47 <sup>EF</sup>	0.79±0.16 <sup>ERGH</sup>	87.25±0.14 <sup>abc</sup>	55.99±10.07 <sup>G</sup>	1.04±0.16 <sup>G</sup>	61.25±0.13 <sup>bc</sup>	82.73±16.45 <sup>G</sup>	1.69±0.20 <sup>E</sup>	49.50±0.12 <sup>d</sup>			
QN24	52.81±3.72 <sup>CDEFGH</sup>	1.06±0.09 <sup>BCDEF</sup>	92.00±0.06 <sup>ab</sup>	82.45±17.88 <sup>ABCD</sup>	1.65±0.31 <sup>BCDEFG</sup>	82.25±0.09 <sup>abc</sup>	125.40±25.16 <sup>ABCD</sup>	2.81±0.60 <sup>ABCDE</sup>	76.25±0.11 <sup>abcd</sup>			
QN25	65.39±6.27 <sup>BC</sup>	1.14±0.08 <sup>ABCD</sup>	89.50±0.03 <sup>abc</sup>	100.27±12.96 <sup>ABCD</sup>	1.85±0.27 <sup>ABCD</sup>	79.75±0.04 <sup>abc</sup>	134.69±24.35 <sup>ABCD</sup>	2.80±0.58 <sup>ABCDE</sup>	67.75±0.11 <sup>abcd</sup>			
P 值	<0.01	<0.01	<0.05	<0.01	<0.01	<0.05	<0.01	<0.01	<0.05			
均值	56.97±8.25	1.03±0.17	85.33±0.09	89.72±22.25	1.74±0.42	74.44±0.13	134.15±32.86	2.89±0.76	68.40±0.14			

注：同列不同大写字母表示差异极显著 ( $P<0.01$ )；同列不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different capital letters in the same column indicate extremely significant difference ( $P<0.01$ ); Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

表 3 不同无性系的树高和地径年生长量  
Tab. 3 Height and basal diameter annual growth increment among different clones

无性系 Clone	2a		3a	
	树高 Plant height/cm	地径 Basal diameter/cm	树高 Plant height/cm	地径 Basal diameter/cm
QN01	15.26±13.86 <sup>cd</sup>	0.43±0.25 <sup>efgh</sup>	36.75±6.45 <sup>ab</sup>	0.94±0.36 <sup>abc</sup>
QN02	28.48±10.48 <sup>abcd</sup>	0.68±0.20 <sup>abcde</sup>	56.37±8.89 <sup>ab</sup>	1.32±0.33 <sup>abc</sup>
QN03	34.39±18.32 <sup>abcd</sup>	0.95±0.51 <sup>abcde</sup>	46.36±24.23 <sup>ab</sup>	1.16±0.36 <sup>abc</sup>
QN04	50.69±23.95 <sup>ab</sup>	1.20±0.55 <sup>a</sup>	57.45±26.25 <sup>ab</sup>	1.65±0.60 <sup>a</sup>
QN05	42.86±13.63 <sup>abcd</sup>	0.90±0.23 <sup>abcde</sup>	58.19±18.30 <sup>ab</sup>	1.63±0.42 <sup>a</sup>
QN06	35.93±8.01 <sup>abcd</sup>	1.00±0.15 <sup>abcd</sup>	50.46±9.84 <sup>ab</sup>	1.48±0.11 <sup>ab</sup>
QN07	34.21±11.83 <sup>abcd</sup>	0.64±0.22 <sup>bcdefgh</sup>	49.73±10.74 <sup>ab</sup>	1.29±0.49 <sup>abc</sup>
QN08	36.36±17.38 <sup>abcd</sup>	0.94±0.34 <sup>abcde</sup>	53.10±16.39 <sup>ab</sup>	1.29±0.49 <sup>abc</sup>
QN09	21.92±22.04 <sup>bcd</sup>	0.51±0.33 <sup>cdefgh</sup>	32.37±21.98 <sup>ab</sup>	0.79±0.75 <sup>bc</sup>
QN10	44.08±21.95 <sup>abcd</sup>	1.15±0.50 <sup>ab</sup>	59.79±19.44 <sup>a</sup>	1.64±0.62 <sup>a</sup>
QN11	38.89±14.91 <sup>abcd</sup>	0.87±0.20 <sup>abcde</sup>	56.06±13.77 <sup>ab</sup>	1.55±0.36 <sup>ab</sup>
QN12	22.87±15.45 <sup>bcd</sup>	0.52±0.30 <sup>cdefgh</sup>	30.11±20.56 <sup>ab</sup>	0.79±0.43 <sup>bc</sup>
QN13	42.50±21.17 <sup>abcd</sup>	1.04±0.41 <sup>abc</sup>	57.84±21.91 <sup>ab</sup>	1.58±0.55 <sup>ab</sup>
QN14	34.55±11.49 <sup>abcd</sup>	0.61±0.12 <sup>cdefgh</sup>	31.81±17.33 <sup>ab</sup>	0.95±0.47 <sup>abc</sup>
QN15	41.65±14.01 <sup>abcd</sup>	0.79±0.23 <sup>abcde</sup>	40.72±12.04 <sup>ab</sup>	0.89±0.12 <sup>abc</sup>
QN16	60.48±58.92 <sup>a</sup>	0.59±0.22 <sup>cdefgh</sup>	34.71±25.99 <sup>ab</sup>	1.17±0.30 <sup>abc</sup>
QN17	25.48±12.82 <sup>bcd</sup>	0.41±0.12 <sup>efgh</sup>	44.58±8.75 <sup>ab</sup>	1.02±0.38 <sup>abc</sup>
QN18	19.16±14.16 <sup>bcd</sup>	0.33±0.27 <sup>gh</sup>	39.97±22.83 <sup>ab</sup>	0.94±0.55 <sup>abc</sup>
QN19	10.23±17.89 <sup>d</sup>	0.21±0.29 <sup>h</sup>	30.64±28.79 <sup>ab</sup>	0.67±0.56 <sup>bc</sup>
QN20	46.66±10.51 <sup>abc</sup>	0.94±0.35 <sup>abcde</sup>	52.13±11.27 <sup>ab</sup>	1.32±0.30 <sup>abc</sup>
QN21	40.89±21.03 <sup>abcd</sup>	0.93±0.45 <sup>abcde</sup>	55.78±21.82 <sup>ab</sup>	1.30±0.69 <sup>abc</sup>
QN22	21.30±16.53 <sup>bcd</sup>	0.49±0.33 <sup>defgh</sup>	36.44±23.06 <sup>ab</sup>	0.89±0.54 <sup>abc</sup>
QN23	10.51±8.99 <sup>d</sup>	0.25±0.18 <sup>h</sup>	26.74±14.45 <sup>b</sup>	0.65±0.14 <sup>bc</sup>
QN24	29.64±15.99 <sup>abcd</sup>	0.60±0.26 <sup>cdefgh</sup>	42.95±14.35 <sup>ab</sup>	1.16±0.44 <sup>abc</sup>
QN25	34.88±8.59 <sup>abcd</sup>	0.71±0.20 <sup>abcde</sup>	34.42±18.40 <sup>ab</sup>	0.96±0.43 <sup>abc</sup>

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

的树高和地径广义遗传力均较高且稳定, 无性系生长性状受环境影响较弱, 受遗传控制较强, 其变异性的主要来源是各无性系间的遗传基础差异, 以此进行选择比较可靠。

## 2.5 各生长指标间的相关性分析

由图 1 可知, 不同生长时期各生长指标之间呈显著或极显著正相关, 不同生长时期地径间的相关性系数 ( $r$ ) 均在 0.90 以上, D2 与 D3 间的  $r$  为 0.97, D1 与 D2 间的  $r$  为 0.90, D1 与 D3 间的  $r$  为 0.90; 不同生长时期树高间的  $r$  均在 0.80 以上, H2 与 H3 间的  $r$  为 0.96, H1 与 H2 间的  $r$  为 0.85, H1 与 H3 间的  $r$  为 0.81; 不同生长时期保存率间的  $r$  均在 0.65 以上, P2 与 P3 间的  $r$  为 0.94, P1 与 P2 间的  $r$  为 0.75, P1 与 P3 间的  $r$  为 0.68; 而 P1 与 D2、H2、D3、H3 间的相关性系数均在

0.60 以下。相关性分析结果表明, 树高、地径和保存率 3 个指标之间可以进行间接选择, 可通过选择一个性状同时改善其他性状。

## 2.6 主成分分析

基于 25 份奇楠沉香无性系 3 a 的树高、地径和保存率等进行主成分分析, 结果得到 9 个主成分。由表 6 可知, 提取到特征值  $> 1$  的主成分 1 个, 累积贡献率达 84.16%。由 2.5 相关性分析结果可知, 3 a 的生长指标树高、地径和保存率之间存在显著正相关关系, 说明提取 1 个主成分是合理的。因此, 可用提取到的主成分对 25 份奇楠沉香无性系进行综合评价。

D1、D2、D3 在主成分中的特征向量分别为 0.124、0.126、0.125; H1、H2、H3 在主成分中的特征向量分别为 0.119、0.126、0.127; P1、P2、

表 4 不同生长时期无性系生长性状的变异系数  
Tab. 4 Variation coefficient of clone growth traits at different age stages %

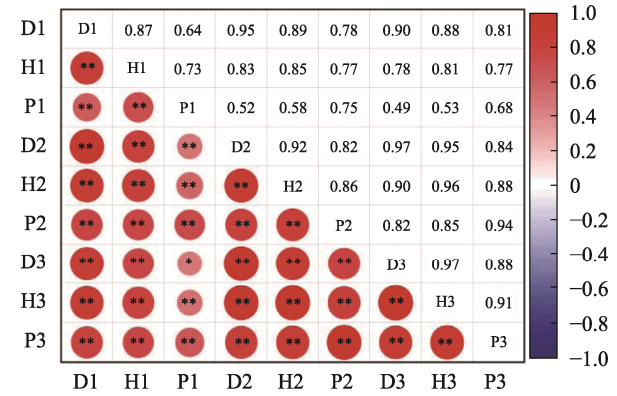
无性系 Clone	1a		2a		3a	
	树高 Plant height	地径 Basal diameter	树高 Plant height	地径 Basal diameter	树高 Plant height	地径 Basal diameter
QN01	9.74	5.66	23.98	22.64	14.71	27.46
QN02	11.09	6.58	6.07	7.95	5.94	9.64
QN03	17.08	11.57	32.79	25.60	28.35	29.76
QN04	24.22	21.56	33.82	32.35	36.39	34.66
QN05	14.27	13.37	17.68	14.45	19.20	20.17
QN06	5.77	10.66	7.11	3.64	8.42	3.24
QN07	15.26	14.13	22.04	20.67	16.72	26.17
QN08	14.22	17.29	23.98	22.13	22.01	25.12
QN09	22.93	18.26	36.53	41.12	49.73	57.49
QN10	12.62	8.04	25.03	18.71	20.16	28.95
QN11	9.98	8.64	13.26	19.18	19.14	17.09
QN12	20.19	20.93	32.07	29.58	36.96	39.65
QN13	26.40	22.47	32.16	33.54	33.09	32.49
QN14	13.11	10.30	14.76	19.59	17.01	18.98
QN15	21.55	20.68	23.82	24.47	25.57	20.32
QN16	17.00	16.38	23.34	55.22	29.19	23.92
QN17	32.88	19.15	31.37	29.79	25.51	33.18
QN18	14.33	13.12	27.92	24.34	36.16	39.11
QN19	14.49	8.62	38.00	37.92	56.29	54.58
QN20	12.66	12.58	23.13	16.57	14.15	19.90
QN21	27.04	24.96	35.97	35.01	23.54	27.53
QN22	24.53	24.69	37.93	40.77	42.34	42.20
QN23	20.77	24.12	15.69	17.99	19.89	11.95
QN24	8.54	7.04	18.49	21.68	20.07	21.37
QN25	6.69	9.59	14.67	12.93	18.08	20.74

表 5 不同生长时期生长性状的遗传参数  
Tab. 5 Genetic parameters of growth traits at different age stages

生长期 Age stage/a	生长性状 Growth trait	广义遗传力 Broad-sense heritability	遗传变异系数 Genotypic coefficient of variation/%	表型变异系数 Phenotypic coefficient of variation/%	环境变异系数 Environment coefficient of variation/%
1	树高	0.85	40.00	21.48	15.66
	地径	0.77	36.90	20.44	17.61
2	树高	0.64	47.01	27.43	28.27
	地径	0.74	52.05	29.19	26.46
3	树高	0.63	43.38	25.41	26.46
	地径	0.69	50.77	29.08	28.40

P3 在主成分中的特征向量分别为 0.095、0.122、0.124。将 3 a 的生长指标树高、地径和保存率进行标准化, 主成分的得分用标准化后的数值乘以主成分的特征向量值, 利用主成分的权重建立主成分综合模型, 计算 25 份奇楠沉香无性系的综合

评价值并进行得分排名(表 7)。由表 7 可知, 综合得分排名从高到低依次为: QN10、QN04、QN08、QN06、QN20、QN03、QN11、QN05、QN13、QN16、QN25、QN21、QN24、QN02、QN15、QN07、QN01、QN22、QN14、QN12、



H1~H3 分别为 1、2、3 a 树高；D1~D3 分别 1、2、3 a 地径；P1~P3 分别为 1、2、3 a 保存率。\*表示显著相关 ( $P<0.05$ )；\*\*表示极显著相关 ( $P<0.01$ )。

H1-H3 are plant heights of 1, 2, and 3 a respectively; D1-D3 are ground diameters of 1, 2, and 3 a respectively; P1-P3 are retention rates of 1, 2, and 3 a, respectively. \* indicates significant correlation ( $P<0.05$ ); \*\* indicates extremely significant correlation ( $P<0.01$ ).

图 1 不同生长时期生长性状相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of growth traits at different age stages

表 6 9 个主成分相关矩阵特征值

Tab. 6 Eigenvalues of correlation matrix for nine principal components

主成分 Principal component	特征值 Eigen value	方差贡献率 Proportion rate/%	累积贡献率 Cumulative proportion rate/%
1	7.58	84.16	84.16
2	0.74	8.20	92.36
3	0.34	3.82	96.18
4	0.14	1.56	97.75
5	0.08	0.88	98.63
6	0.07	0.75	99.37
7	0.04	0.46	99.83
8	0.01	0.11	99.94
9	0.01	0.06	100.00

QN19、QN18、QN09、QN23、QN17。以 20% 的入选率，入选前 5 名依次是 QN10、QN04、QN08、QN06、QN20。

### 2.7 25 份无性系的聚类分析

基于树高、地径和成活率对 25 份奇楠沉香无性系进行聚类分析，随着欧氏距离的提高，类型相近的无性系逐步归为一类。在欧氏距离为 1.22 处，将 25 份奇楠沉香无性系划分为 I、II、III、IV 共 4 个类别（图 2）。I 类有 8 个无性系，包括 QN04、QN10、QN05、QN06、QN11、QN13、QN08、QN20，长势较好，其树高、地径、保存率、年生量以及综合得分等表现较优。QN15

表 7 25 份奇楠沉香无性系主成分分析综合得分排名  
Tab. 7 Principal component analysis composite score ranking of 25 *A. sinensis* Qi Nan clones

无性系 Clone	综合得分 Composite score	排序 Rank
QN10	1.88	1
QN04	1.32	2
QN08	1.24	3
QN06	1.17	4
QN20	0.94	5
QN03	0.79	6
QN11	0.71	7
QN05	0.68	8
QN13	0.64	9
QN16	0.54	10
QN25	0.38	11
QN21	0.25	12
QN24	0.17	13
QN02	0.00	14
QN15	-0.18	15
QN07	-0.48	16
QN01	-0.63	17
QN22	-0.73	18
QN14	-0.76	19
QN12	-1.08	20
QN19	-1.17	21
QN18	-1.31	22
QN09	-1.36	23
QN23	-1.47	24
QN17	-1.54	25

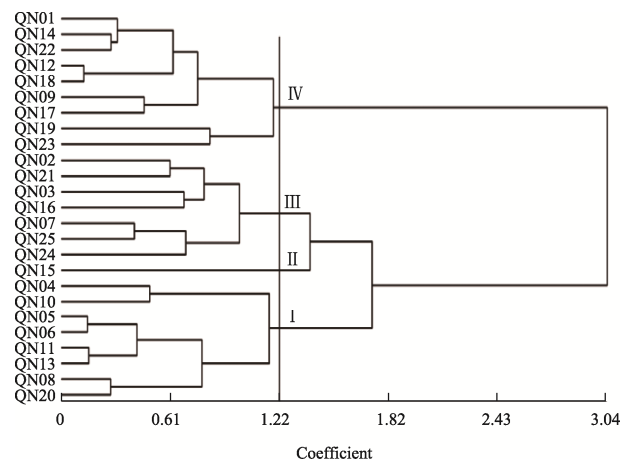


图 2 25 份奇楠沉香无性系生长性状的聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of growth traits of 25 *A. sinensis* Qi Nan clones

单独为 II 类。III 类有 7 个无性系，包括 QN02、QN21、QN03、QN16、QN07、QN25、QN24。II

类和Ⅲ类长势一般, 树高、地径、保存率、年生长量以及综合得分均处于中间水平, 介于第Ⅰ类和第Ⅳ类之间。Ⅳ类有 9 个无性系, 包括 QN01、QN14、QN22、QN12、QN18、QN09、QN17、QN19、QN23, 其树高、地径、保存率、年生长量以及综合得分等表现较差。

### 3 讨论

选用良种和适地适树是有效利用林木资源的关键, 生长发育情况和保存率体现了树种对生态环境的适应性<sup>[10]</sup>。奇楠沉香种类繁多, 不同无性系间遗传背景不同, 在同一生境中, 不同无性系会表现出生长差异和对环境的适应性<sup>[11-13]</sup>。本研究发现, 参试的 25 份奇楠沉香无性系的保存率差异显著, 树高和地径差异极显著, 在凭祥地区种植第 1、2、3 年时的平均保存率分别为 85.00%、74.44%和 68.33%。奇楠沉香无性系在惠州(25 个无性系)<sup>[14]</sup>、潮州(26 个无性系)<sup>[15]</sup>和漳州(25 个无性系)<sup>[16]</sup>等地种植, 同样表现出保存率、苗高和地径的生长差异, 第 1 年时平均保存率分别为 67.80%、70.00%和 91.33%, 说明凭祥的种植表现比惠州和潮州地区的好, 比漳州的差。奇楠沉香无性系在凭祥种植 3 a 的保存率逐年下降, 漳州也表现出逐年下降的趋势(第 2 年和第 3 年的平均保存率分别为 82.47%和 73.12%), 这可能与环境因素<sup>[17]</sup>、奇楠沉香本身的适应性<sup>[18-19]</sup>和抗性<sup>[20-21]</sup>有关。在生产实践中选用良种和适地适树至关重要, 同时, 培育出既能适应多变环境, 又具有强大生命力和抗逆性的奇楠沉香种苗, 可以有效提高引种和推广效率。

无性系变异系数反映了无性系内的变异程度和对生长环境的适应能力, 了解无性系的变异情况将有助于提高优良单株或优良无性系的选育进程<sup>[22-23]</sup>。本研究发现, 不同生长时期, 无性系的树高和地径均表现出较广泛的变异, 说明奇楠沉香无性系具有较大的遗传变异, 这为奇楠沉香优良无性系的选育奠定基础。无性系生长性状受遗传效应和固定环境效应控制较强, 具有较高的遗传稳定性<sup>[24]</sup>。本研究发现, 奇楠沉香无性系 3 a 的生长性状广义遗传力均较高且稳定, 在 0.63 以上, 可见, 奇楠沉香无性系生长性状受环境影响较弱, 受遗传控制较强, 其变异的主要来源是各无性系间的遗传基础的差异, 说明以此进行选择比较可靠。

有研究表明, 以 20.00% 的入选率选择优良无性系造林能获得较大增益, 从而保持优良性状得到稳定遗传<sup>[25-26]</sup>。本研究以 20.00% 的入选率筛选得到长性状优良的 5 个无性系: Qi NYH、Ao S、Jin SZ、Tu YW、Cuan T, 其中 Qi NYH 的综合表现尤为突出, 其树高(184.10 cm)、地径(4.16 cm)和保存率(83.75%)均显著高于其他无性系。聚类分析结果进一步表明, 这 5 个无性系均归属于长势较好的第Ⅰ类, 验证了其遗传稳定性。无性系的生长表现显著受区域环境的影响, 表现出明显的空间异质性<sup>[27]</sup>。与前人的研究进行跨区域对比表明, 本研究筛选得到的 5 个优良无性系中 Qi NYH、Tu YW 和 Cuan T 均在漳州地区表现优异; 而 Ao S、Jin SZ 则分别在惠州、潮州地区的生长表现较好<sup>[14-16]</sup>。入选的 5 个无性系在特定区域表现良好, 是遗传稳定性与环境适配性共同作用的结果<sup>[28]</sup>。此外, You YZ 和 Bo LZ 在多个区域(凭祥、漳州、潮州)表现较差, 可能与遗传缺陷或对特定环境因子的敏感性有关<sup>[17]</sup>。这些研究结果强调了环境与基因型互作的重要性, 进一步验证了“适地适树”原则在奇楠沉香良种推广中的必要性。研究表明, Diao YW 在惠州、潮州和漳州等地的生长表现较好, 但在凭祥的生长表现处于中等水平<sup>[14-16]</sup>, 说明奇楠沉香无性系的生长特性具有显著的区域特异性, Qi NYH、Diao YW 等无性系在特定区域兼具生长优势与遗传稳定性, 可作为区域性主推无性系。需注意的是, 本研究仅评估了奇楠沉香无性系的早期生长性状, 未涉及结香品质和质量、抗病性等长期性状, 未来需结合多阶段观测数据完善评价体系。此外, 区域试验范围有限, 未来需扩大生态梯度测试, 涵盖更多样化的立地条件。同时, 建议开展长期定位观测, 评估无性系在不同生长阶段的稳定性, 为奇楠沉香良种选育提供更全面的科学依据。

### 4 结论

25 份奇楠沉香无性系在广西凭祥种植 3 a 表现出显著的生长性状差异。根据 25 份奇楠沉香无性系在凭祥地区的生长变异特征和遗传力分析, 以地径作为早期性状选择更可靠; 对 25 份奇楠沉香无性系的造林保存率与生长表现等进行主成分和聚类分析, 综合筛选出 Qi NYH、Ao S、Jin SZ、Tu YW 和 Cuan T 5 个无性系, 在凭祥地区生长表现良好且保存率高, 适宜作为奇楠沉香优良无性

系在广西凭祥等地进行选育和推广种植, 并且可作为奇楠沉香无性系结香进一步选优的基础。

## 参考文献

- [1] LIU Y Y, CHEN H Q, YANG Y, ZHANG Z, WEI J H, MENG H, CHEN W P, FENG J D, GAN B C, CHEN X Y, GAO Z H, HUANG J Q, CHEN B, CHEN H J. Whole-tree agarwood-inducing technique: an efficient novel technique for producing high-quality agarwood in cultivated *Aquilaria sinensis* trees[J]. *Molecules*, 2013, 18: 3086-3106.
- [2] LI W, CHEN H Q, WANG H, MEI W L, DAI H F. Natural products in agarwood and *Aquilaria* plants: chemistry, biological activities and biosynthesis[J]. *Natural Product Reports*, 2021, 38(3): 528-565.
- [3] NAEF R. The volatile and semi-volatile constituents of agarwood, the infected heartwood of *Aquilaria* species: a review[J]. *Flavour & Fragrance Journal*, 2011, 26(2): 73-87.
- [4] HOU W C, LIU P W, LIU Y Y, KANG Y, YANG Y, ZHANG Y X, GAO Z H, YU M, FENG J, LV F F, WEI J H. Chi-Nan agarwood germplasms constitute a new chemotype of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 187: 115494.
- [5] YU M, LIU Y Y, FENG J, CHEN D L, YANG Y, LIU P W, YU Z X, WEI J H. Remarkable phytochemical characteristics of Chi-Nan agarwood induced from new-found Chi-Nan germplasm of *Aquilaria sinensis* compared with ordinary agarwood[J]. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2021(1): 5593730.
- [6] YANG L, YANG J L, DONG W H, WANG Y L, ZENG J, YUAN J Z, WANG H, MEI L W, DAI H F. The characteristic fragrant sesquiterpenes and 2-(2-phenylethyl) chromones in wild and cultivated "Qi-Nan" agarwood[J]. *Molecules*, 2021, 26(2): 436.
- [7] PRADEEP S, AKSHAY N, RAJNI P, SNEHA G, BRIJMOHAN S B, RAM K S. Genetic diversity and population structure of endangered *Aquilaria malaccensis* revealed potential for future conservation[J]. *Journal of Genetics*, 2015, 94(4): 697-704.
- [8] 杨云, 刘培卫, 康勇, 陈旭玉, 吕菲菲, 黄良明, 魏建和. 中国奇楠沉香种质资源与代表性种质特征分析[J]. *福建林业科技*, 2023, 50(1): 100-106.  
YANG Y, LIU P W, KANG Y, CHEN X Y, LYU F F, HUANG L M, WEI J H. Germplasm resources investigation and analysis of representative germplasm characteristics of Chi-Nan agarwood in China[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2023, 50(1): 100-106. (in Chinese)
- [9] TAN C S, ISA N M, ISMAIL I, ZAINAL Z. Agarwood induction: current developments and future perspectives[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 122.
- [10] DIAO S, HOU Y M, XIE Y H, SUN X M. Age trends of genetic parameters, early selection and family by site interactions for growth traits in *Larix kaempferi* open-pollinated families[J]. *BMC Genetics*, 2016, 17: 1-12.
- [11] 严艳兵, 张衡, 潘惠新. 美洲黑杨无性系生长和材性性状遗传变异与选择[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(1): 243-254.  
YAN Y B, ZHANG H, PAN H X. Genetic variation and selection of growth and wood properties traits in *Populus deltoides* clones[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(1): 243-254. (in Chinese)
- [12] 王云鹏, 张蕊, 周志春, 黄少华, 马丽珍, 范辉华. 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.  
WANG Y P, ZHANG R, ZHOU Z C, HUANG S H, MA L Z, FAN H H. Dynamic patterns of genetic variation in early growth traits of the open-pollinated families of *Schima superba* plus tree[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, 56(9): 77-86. (in Chinese)
- [13] 杨涛, 邱勇斌, 沈汉, 郑成忠, 张振, 王文月, 金国庆, 周志春. 柏木无性系和家系含碳量的早期评价与优良品系选择[J]. *林业科学*, 2023, 59(9): 85-94.  
YANG T, QIU Y B, SHEN H, ZHENG C Z, ZHANG Z, WANG W Y, JIN G Q, ZHOU Z C. Early evaluation of carbon content of cypress clones and families and selection of superior strains[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2023, 59(9): 85-94. (in Chinese)
- [14] 张启雷, 刘小金, 李小飞, 方小英, 徐大平, 朱士铭, 钟锦祥, 熊咏梅. 25 份奇楠沉香无性系生长与光合生理特征分析[J]. *广西林业科学*, 2024, 53(3): 295-301.  
ZHANG Q L, LIU X J, LI X F, FANG X Y, XU D P, ZHU S M, ZHONG J X, XIONG Y M. Analysis on growths and photosynthetic physiological characteristics of 25 *Aquilaria sinensis* 'Qi Nan' clones[J]. *Guangxi Forestry Science*, 2024, 53(3): 295-301. (in Chinese)
- [15] 张启雷, 刘小金, 李小飞, 方小英, 徐大平, 郑卓江. 奇楠沉香种质资源评价及优良品系早期生长分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(11): 36-43.  
ZHANG Q L, LIU X J, LI X F, FANG X Y, XU D P, ZHENG Z J. Evaluation of *Aquilaria sinensis* 'Qi Nan' germplasm resources and early growth analysis of excellent clones[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(11): 36-43. (in Chinese)
- [16] 吴庆全. 奇楠沉香无性系测定及早期选择[J]. *福建林业科技*, 2024, 51(4): 65-70.  
WU Q Q. Testing and early selection of Qinan agarwood (*Aquilaria sinensis*) [J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2024, 51(4): 65-70. (in Chinese)

- [17] LI Y J, SUONTAMA M, BURDON R D, DUNGEY H S. Genotype by environment interactions in forest tree breeding: review of methodology and perspectives on research and application[J]. *Tree Genetics and Genomes*, 2017, 13(3): 60.
- [18] 王东光, 郭淑红, 徐大平, 张宁南. 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.  
WANG D G, GUO S H, XU D P, ZHANG N N. Effects of different treatments on the growth and agarwood formation of *Aquilaria sinensis*[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(10): 28-35. (in Chinese)
- [19] 潘彩玲, 邓福春, 官秀芳, 梁家铭, 郝静伟, 刘莉, 竺永金, 李开祥, 叶绍明. 4 个奇楠沉香品系苗期不同光处理阶段生理特性和叶片结构比较[J]. *广西林业科学*, 2024, 53(6): 728-737.  
PAN C L, DENG F C, GUAN X F, LIANG J M, HAO J W, LIU L, ZHU Y J, LI K X, YE S M. Comparison on leaf structure and photosynthetic physiological characteristics of four *Aquilaria sinensis* 'Chi-Nan' strains at different light treatment stages at seedling stage[J]. *Guangxi Forestry Science*, 2024, 53(6): 728-737. (in Chinese)
- [20] 代宇佳, 罗晓峰, 周文冠, 陈锋, 帅海威, 杨文钰, 舒凯. 生物和非生物逆境胁迫下的植物系统信号[J]. *植物学报*, 2019, 54(2): 255-264.  
DAI Y J, LUO X F, ZHOU W G, CHEN F, SHUAI H W, YANG W Y, SHU K. Plant systemic signaling under biotic and abiotic stresses conditions[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2019, 54(2): 255-264. (in Chinese)
- [21] 张鹏, 徐谔为, 杨光大, 肖嘉杰, 李小飞, 徐大平, 崔之益. 物理伤害诱导白木香应激反应的生理特征[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(12): 3521-3528.  
ZHANG P, XU A W, YANG G D, XIAO J J, LI X F, XU D P, CUI Z Y. Physiological characteristics of stress response induced by physical injury in *Aquilaria sinensis*[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(12): 3521-3528. (in Chinese)
- [22] 韩东花, 杨桂娟, 肖遥, 王秋霞, 翟文继, 麻文俊, 王军辉, 王良桂. 楸树无性系早期生长变异和优选[J]. *林业科学研究*, 2019, 32(4): 96-104.  
HAN D H, YANG G J, XIAO Y, WANG Q X, ZHAI W J, MA W J, WANG J H, WANG L G. Study on early growth variation of *Catalpa bungei* clones and optimization[J]. *Forest Research*, 2019, 32(4): 96-104. (in Chinese)
- [23] 蓝丽霞, 徐展宏, 孙操稳, 方升佐. 青钱柳种质资源评价及其优良家系和单株筛选[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(5): 42-51.  
LAN L X, XU Z H, SUN C W, FANG S Z. Evaluation on germplasm resources of *Cyclocarya paliurus* and its oriented selection of superior families and trees[J]. *Forest Research*, 2022, 35(5): 42-51. (in Chinese)
- [24] ZHAO X Y, BIAN X Y, LI Z X, WANG X W, YANG C J, LIU G F, JIANG J, KENTBAYEV Y, KENTBAYEVA B, YANG C P. Genetic stability analysis of introduced *Betula pendula*, *Betula kirghisorum*, and *Betula pubescens* families in saline-alkali soil of northeastern China[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, 29(7): 639-649.
- [25] 黄桂华, 梁坤南, 付强, 王先棒, 周再知, 周强, 张绍祥. 11 年生柚木无性系遗传变异与优良无性系选择[J]. *东北林业大学学报*, 2023, 51(8): 18-22, 64.  
HUANG G H, LIANG K N, FU Q, WANG X B, ZHOU Z Z, ZHOU Q, ZHANG S X. Genetic variation and superior clone selection of 11-year-old *Tectona grandis* clones[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, 51(8): 18-22, 64. (in Chinese)
- [26] WU H X. Benefits and risks of using clones in forestry: a review[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2019, 34(5): 352-359.
- [27] BALTUNIS B S, HUBER D A, WHITE T L, GOLDFARB B, STELZER H E. Genetic gain from selection for rooting ability and early growth in vegetatively propagated clones of loblolly pine[J]. *Tree Genetics & Genomes*, 2007, 3(3): 227-238.
- [28] WU H X, IVKOVIC M, GAPARE W J, MATHESON A C, BALTUNIS B S, POWELL M B, MCRAE T A. Breeding for wood quality and profit in *Pinus radiata*: a review of genetic parameter estimates and implications for breeding and deployment[J]. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2008, 38(1): 56-87.