



### 杉木育种亲本生长和结实性状早期测评与选择

王润辉, 胡德活, 韦如萍, 晏姝, 郑会全

#### 引用本文:

王润辉, 胡德活, 韦如萍, 晏姝, 郑会全. 杉木育种亲本生长和结实性状早期测评与选择[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(2): 195–201.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4457>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 杉木半同胞子代胸径变异和大径材家系选择

Diameter Variation of Chinese Fir Half-sib Progenies and Selection for Large-size Timber Families

热带亚热带植物学报. 2020, 28(5): 513–519 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4205>

#### 滇南亚高山巨桉种源/家系变异及早期选择研究

Variation Analysis and Early Selection for *Eucalyptus grandis* Provenances/Families in Central South Yunnan Province

热带亚热带植物学报. 2017, 25(3): 257–263 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3692>

#### 短枝木麻黄国际种源试验和早期选择

Provenance Characteristics and Early Selection of *Casuarina equisetifolia*

热带亚热带植物学报. 2018, 26(6): 597–603 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3888>

#### 6个粤糖甘蔗亲本及其杂交组合的育种价值评价

Assessment on Breeding Value of Six Yuetang Parents of Sugarcane and Their Cross Combinations

热带亚热带植物学报. 2021, 29(2): 209–215 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4271>

#### 水肥胁迫对尾叶桉无性系生长及叶片变异的影响研究

Effects of Water and Nutrient Stresses on Growth and Leaf Variation of *Eucalyptus urophylla* Clones

热带亚热带植物学报. 2017, 25(3): 218–224 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3666>

向下翻页, 浏览PDF全文

# 杉木育种亲本生长和结实性状早期测评与选择

王润辉, 胡德活, 韦如萍, 晏姝, 郑会全\*

(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, 广州 510520)

**摘要:** 为推进杉木(*Cunninghamia lanceolata*)育种进程, 对广东乐昌市龙山林场和韶关市曲江區国有小坑林场杉木第3代育种园亲本群体的早期(3 a生)生长和结实性状进行分析。结果表明, 同一育种园亲本无性系在生长性状(树高、胸径、单株材积、冠幅)和结实能力上存在显著差异, 生长性状的差异甚至达到极显著水平( $P < 0.01$ ), 表型变异系数、遗传变异系数分别为12.8%~73.5%、6.5%~59.2%, 生长性状重复力也处于较高水平( $\geq 0.70$ ), 利于亲本的再选择。采用最佳线性无偏预测法(BLUP)估算亲本生长性状育种值并进行综合排名(各生长性状育种值排名均在前50%内), 结合结实能力表现, 从龙山育种园和小坑育种园中分别选出生长和结实皆优亲本22和30个, 2处育种园共有的生长和结实皆优亲本有cx836、cx837、cx840、cx845、cx851、cx856、cx859和cx877等。

**关键词:** 杉木; 亲本; 育种值; 早期选择

doi: 10.11926/jtsb.4457

## Early Evaluation and Selection of the Chinese Fir Breeding Parents Based on Growth and Cone Production Traits

WANG Runhui, HU Dehuo, WEI Ruping, YAN Shu, ZHENG Huiquan\*

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

**Abstract:** In order to promote the breeding process of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*), growth and cone production traits of parent clones at 3-year-old in the third generation breeding gardens of Chinese fir in Longshan Forest Farm of Lechang City and Xiaokeng Forest Farm of Qujiang District of Shaoguan City in Guangdong Province were studied. The results showed that all of the growth traits, such as height, diameter at breast height (DBH), individual volume and canopy, varied significantly ( $P < 0.01$ ) among clones in the same breeding garden with phenotypic and genetic variation coefficients ranged from 12.8% to 73.5% and 6.5% to 59.2%, respectively. Furthermore, all of growth traits had high repeatability ( $\geq 0.70$ ), which was beneficial for parent re-selection. The best linear unbiased prediction method (BLUP) was used to estimate the breeding values of each parent clone regarding different growth traits and resulted in a ranking. When selection was made for growth (the breeding values of growth traits were all in the top 50%) and cone production traits, 22 and 30 elite parents were identified from Longshan Breeding Garden and Xiaokeng Breeding Garden respectively, with a common list harboring the clones of cx836, cx837, cx840, cx845, cx851, cx856, cx859 and cx877.

**Key words:** Chinese fir; Parent; Breeding value; Early selection

为提高育种成效, 亲本选择是关键, 但林木育种亲本选择常面临测试群体大、遗传结构复杂、表

型数据含有环境效应, 遗传参数尤其是育种值预测精度不够等问题<sup>[1]</sup>。针对育种值, 目前普遍认为, 利

收稿日期: 2021-06-07

接受日期: 2021-07-28

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2020B020215001); 广东特支计划科技创新青年拔尖人才项目(2014TQ01N140)资助

This work was supported by the Project for Key-Area Research and Development in Guangdong (Grant No. 2020B020215001); and the Project for the Science and Technology Innovation of High-level Talent Youth in Guangdong (Grant No. 2014TQ01N140).

作者简介: 王润辉(1974~), 男, 教授级高级工程师, 主要从事林木遗传育种研究。E-mail: wrh@sinogaf.cn

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhenghq@sinogaf.cn

用最佳线性无偏预测法(best linear unbiased prediction, BLUP)可对种质材料在不平衡环境的育种值进行有效估算,特别是较大程度地剔除了环境效应,使育种值具有更高的准确度<sup>[2-3]</sup>。为运行 BLUP 算法,可采用 SAS、R 等软件操作平台进行<sup>[4-5]</sup>。随着生物统计学的快速发展,还出现了与 R 软件融合运算的 ASReml-R 程序<sup>[6]</sup>。由于 ASReml-R 能开展海量数据的混合模型分析,快速获得各种遗传参数值,尤其适用于 BLUP 运算,很快被学者引用于林木育种研究,并被认为是不错的解决方案<sup>[7-8]</sup>。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是中国特色乡土针叶树种,也是中国亚热带地区最重要的商品用材与生态造林树种之一,其遗传改良研究一直倍受重视<sup>[5,9]</sup>。历时 50 多年的技术攻关,杉木育种已步入到第三代育种阶段,并向更高世代阶段发展。期间,各省区(育种区)根据自身特点与优势及育种目标,分别建立了自己的育种群体,并通过子代测定分析结果对育种亲本进行了选择<sup>[10-11]</sup>。此策略虽可靠有效,但也存在一定不足,包括耗时长、忽视亲本的结实特性等。鉴于此,应对育种亲本测定策略做出一定的调整。Zheng 等<sup>[12]</sup>建议采用当代选择方法对育种园内亲本的性状表现做出预选择,以提高选育成效。在此启示下,本研究以广东杉木第 3 轮遗传改良实施计划为契机,针对广东省乐昌市龙山林场和韶关市曲江區国有小坑林场两处杉木第 3 代育种园亲本群体早期(3 a 生)生长和结实性状进行测定分析,重点应用 ASReml-R 运算方式对系列亲本遗传参数尤其是育种值进行有效估算,进而为育种亲本的早期选择与利用提供依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地包括广东省乐昌市龙山林场杉木第 3 代育种园(简称“龙山育种园”,东经 113°28′、北纬 25°11′、海拔 286.5 m)、韶关市曲江區国有小坑林场杉木第 3 代育种园(简称“小坑育种园”,东经 113°48′、北纬 24°42′、海拔 303 m)。龙山育种园年平均气温 19.6 °C,年均降雨量 1 500 mm,植株株行距 3 m×3 m;小坑育种园年均气温 20.3 °C,年均降雨量 1 530 mm,植株株行距 4 m×4 m。两处育种园土壤均为黄红壤,土层深 1 m 以上,肥力中等偏好。

### 1.2 测定对象

包括龙山育种园和小坑育种园内系列亲本无性系。其中,龙山育种园参试亲本 135 个,嫁接 3 a 生,各亲本均有 5 个嫁接分株(无性系);小坑育种园参试亲本 170 个,嫁接 3 a 生,各亲本均有 5~10 个分株(无性系);两处育种园共有的参试亲本 104 个。育种园同一亲本嫁接分株连续排布,不同亲本在育种园中的位置则是随机分布。

### 1.3 方法

对育种园亲本无性系(3 a 生)每木测量树高( $H$ )和胸径( $D$ ),计算单株材积<sup>[13]</sup>, $V=0.000058777042 \times D^{1.9699831} \times H^{0.89646157}$ ,同时测量东西和南北向冠幅,取平均值。同期调查无性系结实量,每树球果量(结实力)判读采用定量分级法,球果量高记为 5,中等记为 3,少的记为 1。

### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 对数据进行整理分析。采用 R 3.6.0 平台并在 R studio 环境下对生长和结实性状数据进行统计分析,包括方差分析、表型变异系数、遗传变异系数和性状间相关系数等,重复力  $R=1-1/F^{[14]}$  ( $F$  值经方差分析所得)。应用 ggplot2 程序包作性状平行坐标图、基于不同性状的无性系选择韦恩图及无性系育种值分布图分析等。

利用 ASReml 3.0 软件中的 BLUP 方法对杉木育种群体亲本无性系树高、胸径、单株材积、冠幅等生长指标的育种值进行计算,采用无性系单因素统计模型:  $y_{ij}=u+\text{clone}_i+e_{ij}$ ,其中,  $y_{ij}$  为第  $i$  个亲本、第  $j$  个无性系嫁接分株的性状观测值,  $u$  为群体均值,  $\text{clone}_i$  为亲本随机效应,  $e_{ij}$  为第  $i$  个亲本、第  $j$  个无性系嫁接分株随机误差。为进行不同性状育种值排名,对性状育种值进行归一化数据变换,用于可视化分析,变换公式为:  $y=(x-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})$ ,其中,  $x$  为观察值,  $x_{\min}$  为最小值,  $x_{\max}$  为最大值。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同亲本性状的差异分析

从表 1 可见,龙山育种园 3 a 生亲本无性系的平均树高、胸径、单株材积、冠幅分别为 4.9 m、8.2 cm、0.0180 m<sup>3</sup> 和 2.5 m,整体表现优异,但群体内生长性状在不同无性系间仍存在极显著差异

( $P < 0.01$ ), 胸径的表型变异系数(PCV)、遗传变异系数(GCV)均最大, 分别达 29.6%和 59.2%, 单株材积的变异程度相对较低, 其 PCV 和 GCV 分别达 12.8%和 6.5%。此外, 各生长性状的重复力均大于 0.8, 说明无性系的生长表现主要受遗传控制。不同亲本无性系的结实情况也存在较大差异, 多数(65.2%)无性系结实能力较低, 中等结实力无性系有 26 个(19.3%), 高结实力无性系仅 21 个(15.5%)。

小坑育种园亲本无性系的生长性状整体亦表现优良(表 1), 但不同无性系间仍存在显著差异( $P < 0.01$ ), 树高、胸径、单株材积、冠幅的 PCV 均在 22.0%以上, GCV 均高于 7.0%, 其中胸径的 GCV 最高, 达 35.7%, 且各生长性状重复力均较高( $\geq 0.70$ )。此外, 不同无性系的结实情况差异显著, 多数(55.9%)无性系结实能力较低, 但高结实力无性系占比略高于龙山育种园, 达 24.7%。

表 1 杉木育种亲本生长性状的变异分析

Table 1 Variation in growth traits of breeding parents of Chinese fir

地点 Site	性状 Trait	平均 Mean	标准差 Standard deviation	变幅 Range	F	表型变异系数 Phenotypic coefficient of variation (PCV, /%)	遗传变异系数 Genetic coefficient of variation (GCV, /%)	重复力 Repeatability
龙山 Longshan	树高 Height	4.9	1.1	2.0~8.0	5.35**	21.6	15.1	0.81
	胸径 Diameter at breast height	8.2	2.4	2.6~15.1	10.40**	29.6	59.2	0.90
	单株材积 Individual volume	0.018	0.013	0.001~0.080	6.64**	12.8	6.5	0.85
	冠幅 Canopy	2.5	0.6	1.2~4.2	6.73**	24.6	10.8	0.85
小坑 Xiaokeng	树高 Height	3.9	0.8	2.0~7.2	3.57**	22.0	10.3	0.72
	胸径 Diameter at breast height	7.2	2.1	3.2~14.5	4.43**	28.5	35.7	0.77
	单株材积 Individual volume	0.011	0.008	0.001~0.056	3.35**	73.5	30.8	0.70
	冠幅 Canopy	2.0	0.5	0.8~3.7	3.63**	26.5	7.9	0.73

### 2.2 相关分析

对亲本群体生长和结实性状进行相关分析(表 2), 结果表明, 两处育种园亲本无性系的生长性状(树高、胸径、单株材积、冠幅)间均存在极显著的正相关关系( $P < 0.01$ ), 而生长与结实性状间的相关性并不紧密(除小坑育种园无性系冠幅与结实力间呈显著负相关关系外)。

的各亲本育种值排布情况, 还实现了同一亲本无性系不同性状育种值归一化后的同步呈现。两处育种园多数无性系生长性状育种值步调偏一致, 少数无性系生长性状育种值波动较大。

### 2.3 育种值估算

为评估各亲本的育种潜力, 对两处育种园亲本无性系的树高、胸径、单株材积、冠幅性状育种值进行预测, 并对育种值进行归一化处理。从图 1 可见, 基于树高、胸径、单株材积、冠幅等生长性状

基于不同生长性状育种值对两处育种园亲本无性系进行排序, 龙山育种园内树高、胸径、单株材积、冠幅等生长性状育种值同时稳定在前 50%内的无性系有 50 个(占育种园无性系总数的 37%, 下同), 树高、胸径、单株材积育种值同时稳定在前 50%内的无性系则有 56 个, 胸径、单株材积育种值稳定在前 50%内的无性系达 65 个。而在小坑育种园内, 所有生长性状育种值同时稳定在前 50%内的无性系有 46 个(占育种园无性系总数的 27.1%), 树

表 2 杉木育种亲本不同性状间表型相关系数

Table 2 Phenotypic correlation coefficient among morphological traits of breeding parents of Chinese fir

性状 Trait	龙山 Longshan					小坑 Xiaokeng				
	树高 Height	胸径 Diameter at breast height	单株材积 Individual volume	冠幅 Canopy	结实力 Cone production ability	树高 Height	胸径 Diameter at breast height	单株材积 Individual volume	冠幅 Canopy	结实力 Cone production ability
树高 Height	1.00					1.00				
胸径 Diameter at breast height	0.83**	1.00				0.74**	1.00			
单株材积 Individual volume	0.86**	0.95**	1.00			0.82**	0.96**	1.00		
冠幅 Canopy	0.64**	0.78**	0.77**	1.00		0.56**	0.63**	0.61**	1.00	
结实力 Cone production ability	0.08	0.12	0.13	0.05	1.00	0.03	-0.03	-0.01	-0.21*	1.00

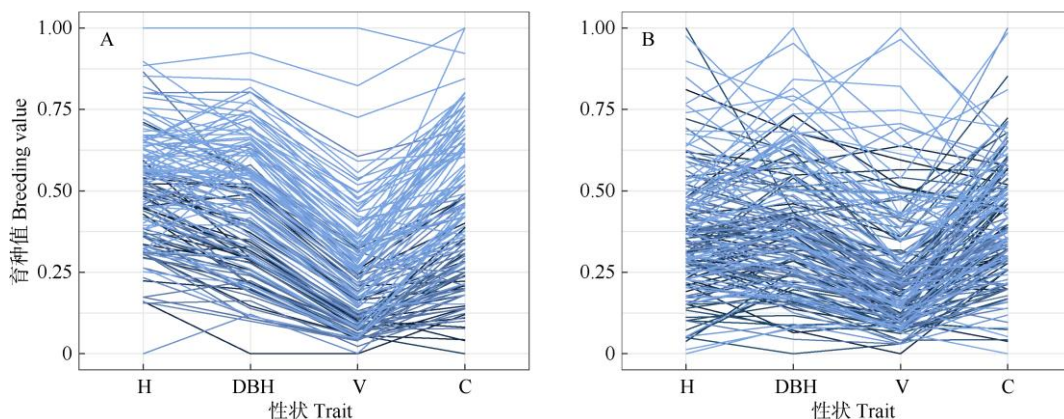


图 1 杉木育种亲本的性状育种值分布。A: 龙山; B: 小坑; H: 树高; DBH: 胸径; V: 单株材积; C: 冠幅。每条曲线代表 1 个亲本无性系。

Fig. 1 Distribution of trait breeding values in Chinese fir breeding parents. A: Longshan; B: Xiaokeng. H: Height; DBH: Diameter at breast height; V: Individual volume; C: Canopy. Each curve represents a parent clone.

高、胸径、单株材积育种值均稳定在前 50% 内的无性系 64 个, 胸径、单株材积的育种值皆处前于 50% 内的无性系则有 74 个。值得注意的是, 两处育种园 4 个生长性状育种值均稳定在前 50% 内的共有无性系总数达 20 个, 树高、胸径、单株材积育种值均处前 50% 的共有无性系则有 26 个; 同时, 胸径单株材积育种值排位前 50% 的共有无性系有 31 个。

### 2.4 育种亲本的早期选择

以树高、胸径、单株材积、结实力为指标性状, 对育种值排名前 50%、结实力中等以上的亲本作聚合选择韦恩图(图 2)。结果表明, 龙山育种园有 22 个亲本的生长(树高、胸径、单株材积)和结实性状皆表现优异(cx544、cx569、cx604、cx606、cx729、cx731、cx835、cx836、cx837、cx839、cx840、cx844、cx845、cx847、cx848、cx851、cx856、cx859、cx860、

cx874、cx875 和 cx877), 而小坑育种园则有 cx27、cx90、cx110、cx268、cx300、cx520、cx531、cx562、cx640、cx708、cx741、cx757、cx765、cx779、cx836、cx837、cx840、cx841、cx845、cx846、cx851、cx855、cx856、cx857、cx859、cx861、cx864、cx868、cx869 和 cx877 等 30 个亲本入选。值得注意的是, 2 处育种园入选的亲本在生长性状方面均具有较高的育种潜力(图 3)。龙山育种园入选亲本的树高、胸径、单株材积平均育种值分别为 0.75、2.39 和 0.0122, 小坑育种园入选亲本的树高、胸径、单株材积平均育种值分别为 0.48、1.24 和 0.0039。这可以理解为, 入选亲本繁育的后代早期性状表现均值将比所有育种亲本繁育的后代性状均值出现较大程度的提升, 且提升幅度可达育种值估测均值。此外, cx836、cx837、cx840、cx845、cx851、cx856、cx859 和 cx877 等 8 个亲本在 2 处育种园中均表现出较好的生长和结实特性。

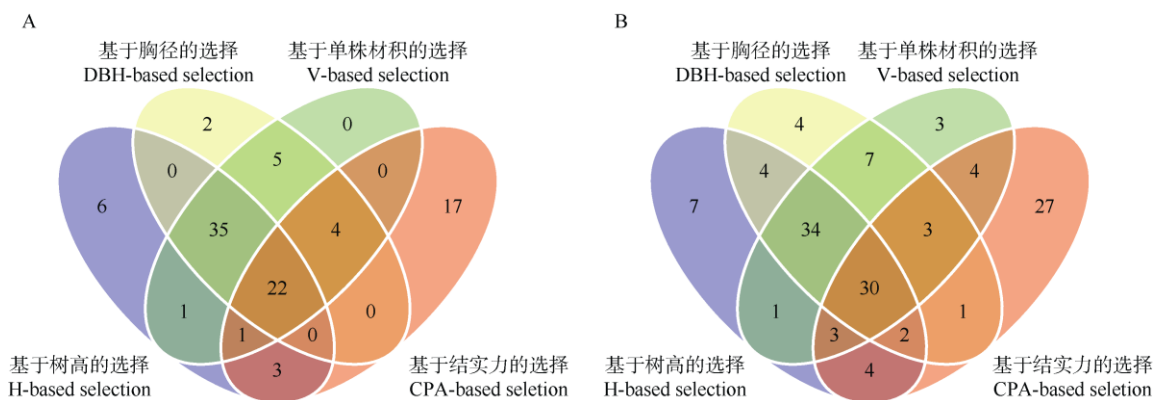


图 2 杉木育种亲本生长和结实性状聚合选择韦恩图。A: 龙山育种园; B: 小坑育种园。

Fig. 2 Venn diagrams of aggregation selection for growth and cone production ability (CPA) traits in Chinese fir breeding parents. A: Longshan; B: Xiaokeng.

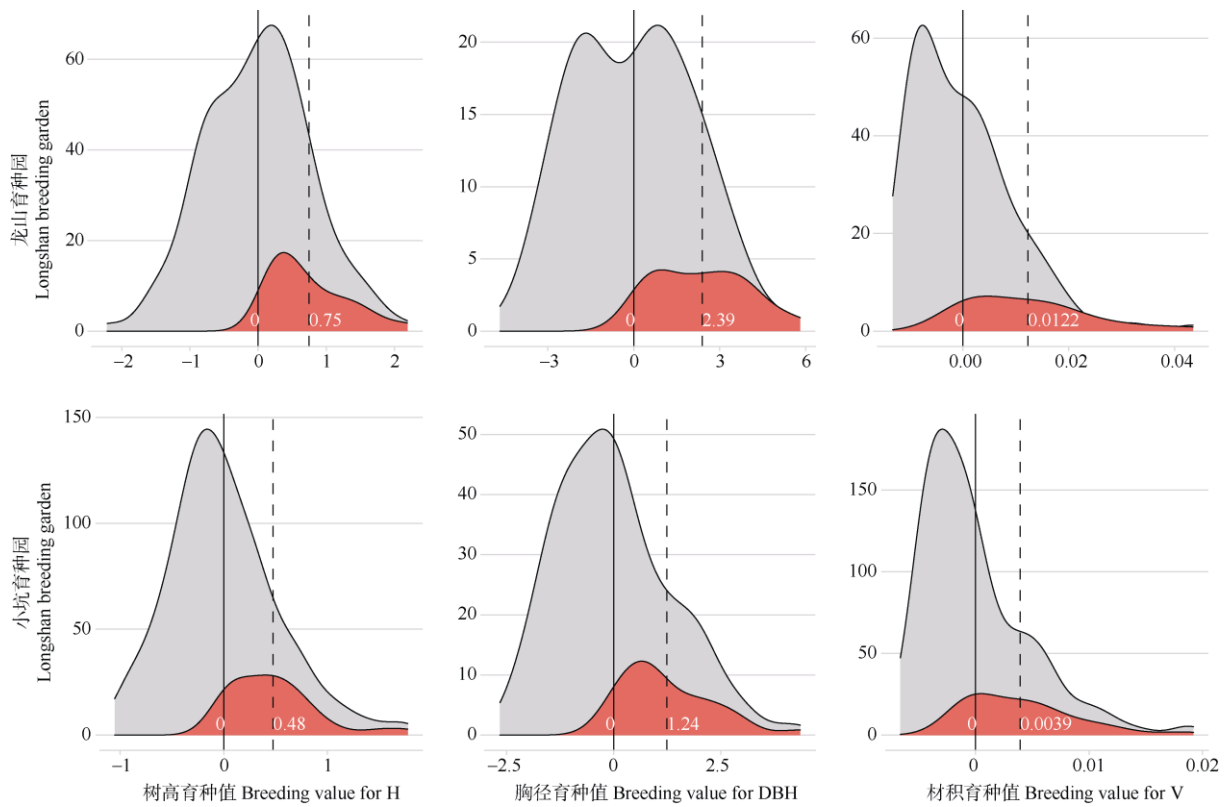


图 3 基于育种值的杉木亲本无性系数量分布。H: 树高; DBH: 胸径; V: 单株材积; 灰色: 所有亲本; 红色: 生长和结实皆优亲本; 实线: 所有亲本育种值均值; 虚线: 生长和结实皆优亲本育种值均值。

Fig. 3 Number distribution of parent clones of Chinese fir based on breeding value. H: Height; DBH: Diameter at breast height; V: Individual volume; Grey: All parents; Red: Parents with excellent growth trait and high CPA; Solid line: Mean breeding value of all parents; Dotted line: Mean breeding value of parents with excellent growth trait and high CPA.

### 3 结论和讨论

林木生长周期长, 开展早期选择有助于提高育种效率。本研究对广东杉木第 3 代育种园亲本群体早期(3 a 生)生长和结实情况进行较为系统地测评, 发现不同亲本无性系在生长性状表现(树高、胸径、单株材积、冠幅)及结实能力方面皆存在较大的差异, 生长性状重复力也均处于较高水平( $\geq 0.70$ ), 利于亲本的再选择。采用 BLUP 方法对各亲本生长性状育种值进行估算并进行综合排名, 结合结实能力表现, 从龙山育种园和小坑育种园中选择筛选出系列生长和结实皆优亲本, 这些亲本显然具有重要的育种价值。

林木遗传测定与遗传评估研究历来受到林木育种工作者的重视, 精确的、系统的林木遗传测定与遗传评估可有效地缩短育种周期, 提高育种效率<sup>[15-17]</sup>。但由于林木遗传测定试验地点有其固有的特点, 试验地误差同质几乎不可能。但程玲等<sup>[18]</sup>

以 36 个基因型火炬松(*Pinus taeda*)在 6 个试验地的种子产量为基础数据, 试图利用 ASReml-R 计算出各地每个基因型的 BLUP 值, 并从试验地划分、试验地评估和林木基因型评估等方面对原始数据、BLUP 数据进行 GGE 双标图分析比较, 结果表明 BLUP 数据具有明显的空间变异, 比原始数据具有更高的产量变异解释能力, 且 BLUP 数据基本解决了环境异质性问题。欧阳芳群等<sup>[2]</sup>针对青海云杉(*Picea crassifolia*)种子园自由授粉子代测定林的树高变异进行分析, 运用 ASReml-R 软件开展了 BLUP 分析, 估算出家系亲本无性系树高育种值并根据家系亲本无性系的育种值成功选出 20 个优良家系, 获得理想的遗传增益。运用 ASReml-R BLUP 方法对红皮云杉(*Picea koraiensis*)进行选育研究, 同样取得较好的效果<sup>[19]</sup>。另外, 郑聪慧等<sup>[20]</sup>将 ASReml-R BLUP 分析法用于冀北地区 4 个试验地点 26 个华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)家系的胸径育种值估算, 为华北落叶松家系选择和应用提供了决策支



持。本研究以广东 2 处杉木第 3 代育种园亲本群体为对象, 对其早期生长性状进行测定, 并通过 ASReml-R BLUP 分析获得了不同亲本不同性状的育种值, 为育种亲本早期测评与选择提供了范例和参考。

对用材林树种而言, 尤其是以建立种子园为重要目标的树种而言, 选育程序不仅要考虑到生长性状的选择, 还需结合种实的产量性状做出综合选择。本研究以育种亲本生长性状(树高、胸径、单株材积)育种值为选择标准, 同时将亲本的结实力作为另一权重指标, 从龙山育种园选出生长和结实兼优的育种亲本 22 个, 从小坑育种园选出生长和结实兼优育种亲本 30 个, 这些亲本有望直接用于高世代种子园建设中。在红松育种园研究中, 同样采用生长与结实相结合方式对红松(*Pinus koraiensis*)亲本进行评价选择, 入选无性系或家系在生长与结实性状方面均获得较高遗传增益<sup>[21-22]</sup>。Imren 等<sup>[23]</sup>则采用多维度决策技术, 在结实选择基础上对欧洲赤松(*P. sylvestris*)种子园亲本生长性状的遗传表现进行再选择, 进而选出更优异的亲本无性系。本研究以最大程度降低环境方差的育种值评估方法对亲本生长性状进行选择, 相关实例鲜有报道。按入选育种亲本平均育种值预测, 2 处育种园入选亲本所繁育的后代其早期性状表现均值将比所有育种亲本所繁育的后代性状均值出现较大幅度的提升。

两处育种园虽在亲本群体的容量和种植株行距方面有所差异, 但利用各自园区的育种值排序结果, 经交叉验证, 这些亲本 cx836、cx837、cx840、cx845、cx851、cx856、cx859 和 cx877 值得关注。

## 参考文献

- [1] WHITE T L, HODGE G R. Predicting Breeding Values with Applications in Forest Tree Improvement [M]. Dordrecht: Springer, 1989. doi: 10.1007/978-94-015-7833-2.
- [2] OUYANG F Q, QI S X, FAN G X, et al. Genetic variation and improved parents selection of open pollination families of *Picea crassifolia* Kom. basing one BLUP method [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci), 2019, 43(6): 53–59. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.201812002. 欧阳芳群, 祁生秀, 范国霞, 等. 青海云杉自由授粉家系遗传变异与基于 BLUP 的改良代亲本选择 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(6): 53–59. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.201812002.
- [3] ALVARADO G, RODRÍGUEZ F M, PACHECO A, et al. META-R: A software to analyze data from multi-environment plant breeding trials [J]. Crop J, 2020, 8(5): 745–756. doi: 10.1016/j.cj.2020.03.010.
- [4] WANG R H, HU D H. Introduction of the application of SAS Proc Mixed in tree breeding trial analysis [J]. Guangdong For Sci Technol, 2011, 27(3): 50–54. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2011.03.009. 王润辉, 胡德活. SAS Proc Mixed 在林木育种试验统计中应用简介 [J]. 广东林业科技, 2011, 27(3): 50–54. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2011.03.009.
- [5] DENG H Y, HU D H, LIN J, et al. Diameter variation of Chinese fir half-sib progenies and selection for large-size timber families [J]. J Trop Subtrop Bot, 2020, 28(5): 513–519. doi: 10.11926/jtsb.4205. 邓厚银, 胡德活, 林军, 等. 杉木半同胞子代胸径变异和大径材家系选择 [J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(5): 513–519. doi: 10.11926/jtsb.4205.
- [6] GILMOUR A R, GOGEL B J, CULLIS B R, et al. ASReml user guide release 3.0 [R]. Hemel Hempstead: VSN International Ltd., 2009.
- [7] BIAN L M, SHI J S, TONG C F, et al. ASReml and its application prospect in tree genetic analysis [J]. Develop For Sci Technol, 2012, 26(4): 9–12. doi: 10.3969/j.issn.1000-8101.2012.04.003. 边黎明, 施季森, 童春发, 等. ASReml 及其在林木遗传分析中的应用前景 [J]. 林业科技开发, 2012, 26(4): 9–12. doi: 10.3969/j.issn.1000-8101.2012.04.003.
- [8] LIN Y Z. R and ASReml-R Statistics [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2017. 林元震. R 与 ASReml-R 统计学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2017.
- [9] CAO S, ZHANG Z J, SUN Y H, et al. Profiling of widely targeted metabolomics for the identification of secondary metabolites in heart-wood and sapwood of the red-heart Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) [J]. Forests, 2020, 11(8): 897. doi: 10.3390/f11080897.
- [10] ZHENG R H, SHI J S, XIAO H, et al. Genetic variation and early selection of growth traits in 8-year-old open-pollinated progenies of the 3rd germplasm of Chinese fir [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci), 2014, 38(6): 38–42. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.06.008. 郑仁华, 施季森, 肖晖, 等. 杉木第 3 代种质资源自由授粉子代生长性状遗传变异及早期选择 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(6): 38–42. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.06.008.
- [11] SHEN B, HE G P, XIAO J J, et al. Genetic variation for main growth traits of family progeny on the third generation seed orchard of *Cunninghamia lanceolata* in Longquan City [J]. S China For Sci, 2021, 49(1): 24–27. doi: 10.16259/j.cnki.36-1342/s.2021.01.006. 沈斌, 何贵平, 肖纪军, 等. 龙泉杉木三代种子园子代林主要生长性状变异研究 [J]. 南方林业科学, 2021, 49(1): 24–27. doi: 10.16259/j.cnki.36-1342/s.2021.01.006.

- [12] ZHENG H Q, HU D H, WANG R H, et al. Assessing 62 Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) breeding parents in a 12-year grafted clone test [J]. *Forests*, 2015, 6(10): 3799–3808. doi: 10.3390/f6103799.
- [13] ZHENG H Q, HU D H, WEI R P, et al. Fast-growing clone selection and wood quality analysis in Chinese fir [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2012, 28(10): 27–31. doi: 10.11924/j.issn.1000-6850.2011-3239.  
郑会全, 胡德活, 韦如萍, 等. 杉木速生无性系选择与材质分析 [J]. *中国农学通报*, 2012, 28(10): 27–31. doi: 10.11924/j.issn.1000-6850.2011-3239.
- [14] XU J R. *Quantitative Genetics in Forestry* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.  
续九如. *林木数量遗传学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [15] WU J Y, LONG Y Z, TONG F P, et al. Genetic test and character evaluation of the half-sib families of *Pinus taeda* L. [J]. *J CS For Univ*, 2006, 26(5): 20–25. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2006.05.004.  
吴际友, 龙应忠, 童方平, 等. 火炬松半同胞家系遗传测定与早期性状评定 [J]. *中南林学院学报*, 2006, 26(5): 20–25. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2006.05.004.
- [16] SUN X M, YANG X Y. Applications and analysis of methods for breeding value prediction in forest trees [J]. *J Beijing For Univ*, 2011, 33(2): 65–71. doi: 10.13332/j.1000-1522.2011.02.020.  
孙晓梅, 杨秀艳. 林木育种值预测方法的应用与分析 [J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(2): 65–71. doi: 10.13332/j.1000-1522.2011.02.020.
- [17] GILMOUR A R. ASReml for testing fixed effects and estimating multiple trait variance components [C]// *Proceeding of the Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics*. NSW, Australia: Dubbo, 1997, 12: 386–390.
- [18] CHENG L, ZHANG X F, ZHANG X X, et al. Forestry multi-environment trial analysis based on BLUP and GGE biplot [J]. *J NW Agric For Univ (Nat Sci)*, 2018, 46(3): 87–93. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.03.011.  
程玲, 张心菲, 张鑫鑫, 等. 基于 BLUP 和 GGE 双标图的林木多地点试验分析 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3): 87–93. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.03.011.
- [19] LING J J, XIAO Y, HU J W, et al. Genotype by environment interaction analysis of growth of *Picea koraiensis* families at different sites using BLUP-GGE [J]. *New For*, 2021, 52(1): 113–127. doi: 10.1007/s11056-020-09785-3.
- [20] ZHENG C H, ZHANG H J, WANG Y Z, et al. An analysis of a regional trial of *Larix principis-rupprechtii* families based on BLUP and GGE biplot [J]. *Sci Silv Sin*, 2019, 55(8): 73–83. doi: 10.11707/j.1001-7488.20190809.  
郑聪慧, 张鸿景, 王玉忠, 等. 基于 BLUP 和 GGE 双标图的华北落叶松家系区域试验分析 [J]. *林业科学*, 2019, 55(8): 73–83. doi: 10.11707/j.1001-7488.20190809.
- [21] JIANG L P, WANG J Y, ZHANG P, et al. Variation and selection of growth and fruit traits among 170 *Pinus koraiensis* clones [J]. *For Res*, 2019, 32(1): 58–64. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2019.01.008.  
蒋路平, 王景源, 张鹏, 等. 170 个红松无性系生长及结实性状变异及选择 [J]. *林业科学研究*, 2019, 32(1): 58–64. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2019.01.008.
- [22] KAVIRIRI D K, LIU X T, FAN Z Y, et al. Genetic variation in growth and cone traits of *Pinus koraiensis* half-sib families in northeast China [J]. *Phyton*, 2020, 89(1): 57–69. doi: 10.32604/phyton.2020.08409.
- [23] IMREN E, KURT R, YUCEDAG C, et al. Selection of superior clones by the multi-dimensional decision-making techniques in Scots pine seed orchard [J]. *J For*, 2021, 8(1): 13–22. doi: 10.18488/journal.101.2021.81.13.22.