

韶关103个尾叶桉无性系早期生长和耐寒性的遗传分析*

吕中跃¹ 杨晓慧² 廖焕琴² 陈新宇²
徐放² 张卫华² 潘文² 杨会肖²

(1. 韶关市国有九曲水林场, 广东 韶关 512600; 2. 广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 以韶关地区尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 103个无性系为研究材料, 采用混合线性模型对尾叶桉7月生树高 (H_7)、18月生胸径 (D_{18})、18月生材积 (V_{18}) 和18月生耐寒性指数 (C_{18}) 性状进行遗传参数估算, 同时通过综合指数选择法对18月生尾叶桉无性系进行早期选择。结果表明: 尾叶桉无性系早期生长较好, D_{18} 、 V_{18} 和 C_{18} 平均值分别为 5.4 cm、1.30 m³ 和 0.37; 尾叶桉 H_7 、 D_{18} 、 V_{18} 和 C_{18} 在无性系间的方差达到了显著或极显著水平, 方差分量在 0.05~1.01 之间, 剩余方差分量介于 0.02~1.76 之间, 其无性系重复力在 0.45~0.94 之间, 单株重复力在 0.14~0.78 之间, 说明尾叶桉无性系的大部分性状不仅受遗传影响, 还受到环境因子的影响。除 C_{18} 与生长性状相关系数不显著外, 生长性状间表型与遗传相关系数均达到极显著水平, 相关系数达 0.8 以上。以 18 月生生长与耐寒性状进行早期选择, 综合评选 9 个优良无性系 ZQUA9、ZQUA22、ZQUA44、LDUB94、ZQUC14、ZQUC17、ZQUA34、LDUC1 和 ZQUD1, 入选无性系的 H_7 、 D_{18} 和 C_{18} 均值分别比对照 (DH3229) 高出 0.32 m, 0.68 cm 和 0.39, 达 13.18%、13.01% 和 136.27%。尾叶桉生长性状在无性系间存在显著差异, 且具有较高的遗传稳定性。

关键词 尾叶桉; 耐寒性; 早期生长; 遗传参数

中图分类号: S792.99 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 06-0001-09

Genetic Analysis on Early Growth Traits and Cold Tolerance of 103 *Eucalyptus urophylla* Clones in Shaoguan

LYU Zhongyue¹ YANG Xiaohui² LIAO Huanqin² CHEN Xinyu²
XU Fang² ZHANG Weihua² PAN Wen² YANG Huixiao²

(1. Shaoguan State-owned Forest Farm, Shaoguan, Guangdong 512600, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/ Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract The clones with high quality and cold tolerance were selected based on the genetic evaluation of *Eucalyptus urophylla* clone determination forest in Shaoguan. Using 103 *E. urophylla* clones as research materials, the genetic parameters of 7-month-old height (H_7), 18-month-old diameter at breast height (D_{18}), 18-month-old volume (V_{18}) and 18-month-old cold tolerance index (C_{18}) were estimated using mixed linear model, and the early selection of *E. urophylla* was carried out by using comprehensive index selection method. The average values of D_{18} , V_{18} and C_{18} were 5.4 cm, 1.30 m³ and 0.37, respectively, which showed that the clone trial of *E. urophylla* grew well; The variance of clones for H_7 , D_{18} , V_{18} and C_{18} had significant or extremely significant levels, and the genetic variance components ranged from 0.05 to 1.01, and the residual variance components ranged from 0.02 to

* 基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2016KJCX002、2019KJCX003)。

第一作者: 吕中跃 (1973—), 男, 工程师, 主要从事营林生产、森林病虫害防治工作, E-mail: 269003557@qq.com。

通信作者: 杨会肖 (1981—), 女, 高级工程师, 主要从事林木遗传育种研究, E-mail: hxyang@sinogaf.cn。

1.76. The clonal repeatability ranged from 0.45 to 0.94, and the individual repeatability ranged from 0.14 to 0.78, respectively. It was noticed that most traits of *E. urophylla* clones were affected by not only genetic factors, but also environmental factors. Except that C_{18} had no significant correlations with growth traits, the phenotypic and genetic correlations between growth traits were significant, and the coefficients were above 0.8. Nine excellent clones (ZQUA9, ZQUA22, ZQUA44, LDUB94, ZQUC14, ZQUC17, ZQUA34, LDUC1 and ZQUD1) were selected based on the growth and cold tolerance of 18-month-old. The mean values of H_7 , D_{18} and C_{18} of excellent clones were 0.32 m, 0.68 cm and 0.39 higher than the control (DH3229), and were 13.18%, 13.01% and 136.27%, respectively. Growth among clones were significant difference that could be inheritance stably. Nine superior clones were selected preliminarily, which could provide references for further breeding of *Eucalyptus* clones.

Key words *Eucalyptus urophylla*; cold tolerance; early growth; genetic parameter

桉树属桃金娘科桉属、杯果木属和伞房属树种的统称,桉树及其杂交种在全球热带、亚热带地区广泛引种栽培,其人工林栽培面积约占世界人工林面积的23%^[1]。据第九次森林资源清查,我国桉树人工林面积已达 $547 \times 10^5 \text{ hm}^2$,仅占我国人工林面积的6.87%,但年木材产量却超过了 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为全国商品用材的最大来源,桉树木材生产在保障我国木材安全及战略储备中上发挥了巨大作用。寒害天气能够导致桉树被冻死,给桉树木材生产带来损失。国内外对桉树早期生长和耐寒性研究主要集中在种源家系选择^[2-6]。何旭东等^[2]通过对57个尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* × 细叶桉 *E. tereticornis* 种间杂种的生长和耐寒性进行分析,评选出11个优良杂种和12株优良杂种单株。翁启杰等^[3]对尾叶桉 × 邓恩桉 *E. dunnii* 群体进行研究,认为杂种桉的耐寒性基本不受加性基因控制,生长受中等程度的遗传控制。VOLKER等^[6]对亮果桉 *E. nitens* 和蓝桉 *E. globulus* 的杂种类型和性状进行遗传参数评估,认为种内杂种生长性状表现出中等遗传力水平,种间杂种幼龄期易感染病害以及后期死亡率较高。

尾叶桉原产印度尼西亚及附近岛屿^[7],是热带地区表现优良的速生树种,同时也是桉树杂交育种中重要的亲本树种。由于尾叶桉生长量和木材密度较其他桉属物种更大,其遗传改良对推动桉树育种至关重要。目前造林使用的主要品种仍为20年前通过表型选择的方法筛选出的品种,急需选育出新良种以保证速生林生产的需求,而关于尾叶桉亲本耐寒性改良的报道较少。因此,本文以2019年在韶关地区建立的尾叶桉无性系测定林为研究对象,对尾叶桉早期生长和耐寒指标进行遗传参数估算,

初步评选出在韶关地区早期生长表现优良、耐寒性高的优良无性系,为尾叶桉造林良种选育及亲本遗传改良提供材料和实践依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地设在广东省韶关市浚江区韶关林场(113°60'45"E, 24°91'75"N)。土壤类型为红壤,年均气温20.3℃,年均日照时数1858h,无霜期为305d。多年平均降雨量为1537.4mm,降水主要集中在4—7月,属亚热带季风气候。前茬为松树人工林,机械整地备耕。

1.2 试验材料

参试尾叶桉无性系组培苗共有103个(包括对照DH3229和GL9),均来自广东省林业科学研究所属尾叶桉种质资源库内选育的优良亲本经组培无性系化的材料。

1.3 试验方法

2019年5月营建尾叶桉无性系测定林,试验设计采用随机完全区组,6株行式小区,5次重复,株行距2m×3m。造林前每穴施复混肥1kg。造林当年追复合肥2次,第2年追肥1次,各施复合肥0.25kg。

1.4 生长和耐寒表型观测

2019年12月和2020年11月对试验林7月生树高和18月生胸径进行每木调查,于2021年2月调查冻害(2021年1月7日气温低至0℃,连续5d持续低温,出现霜冻情况)。尾叶桉冻害状况(C_D)分为5个等级:“4”全株叶片受冻,“3”叶片枯死占全株75%,“2”叶片枯死占全株50%,“1”叶片枯死占全株25%,“0”全株及叶片未受冻

害。采用测量杆测量 7 月生的树高 (H_7)，采用胸径尺度取胸高 (1.3 m) 位置的直径 (D_{18})。

1.5 数据分析

根据一元胸径材积方程计算单株材积 (V , m^3)^[8]，18 月生材积公式为 $V_{18} = 0.0179 \times D^{2.468907}$

根据桉树青枯病等级与抗性指数计算耐寒性指数^[9]，公式为 $C_{18} = 1 - C_D / 4$ 。

统计分析利用 R 进行基本描述和多重比较^[10]，利用 ASReml 软件进行遗传参数估算和基因型值预测^[11]。遗传参数估算包括无性系和单株重复力、遗传和表型相关等^[12-13]。

单性状分析使用混合线性模型：

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + B \times C_{ij} + C_j + e_{ijk}$$

式中： Y_{ijk} 为单株观测值， μ 为均值， B_i 为区组效应（固定）， $B \times C_{ij}$ 为区组与无性系交互效应（随机）， C_j 为无性系效应（随机）， e_{ijk} 为残差项。

重复力是指同一基因型的个体在不同时间或不同地点的表型持续稳定程度，其作为一个重要的遗传参数，已在动植物育种中广泛应用并取得了明显的经济效益^[12]。

无性系重复力公式^[12]：

$$R_i^2 = \frac{\sigma_C^2}{\sigma_C^2 + \sigma_{BC}^2 / b + \sigma_e^2 / nb}$$

单株重复力公式^[12]：

$$R_C^2 = \frac{\sigma_C^2}{\sigma_C^2 + \sigma_{BC}^2 + \sigma_e^2}$$

式中： σ_C^2 为无性系方差分量； σ_{BC}^2 为无性系与区组互作的方差分量； σ_e^2 为剩余方差分量； n 为小区株数， b 为区组数量。

表型变异系数公式^[13]：

$$CV_p = \frac{\sigma_p}{\bar{X}} \times 100\%$$

式中： CV_p 表示无性系表型变异系数； σ_p 表示表型标准方差； \bar{X} 表示性状的均值。

遗传相关公式^[12]：

$$r_g = \frac{\text{cov}_{g(12)}}{\sqrt{\sigma_{g1}^2 \times \sigma_{g2}^2}}$$

表型相关公式^[12]：

$$r_p = \frac{\text{cov}_{p(12)}}{\sqrt{\sigma_{p1}^2 \times \sigma_{p2}^2}}$$

式中： $\text{cov}_{g(12)}$ 和 $\text{cov}_{p(12)}$ 表示两个性状之间的遗传协方差和表型协方差； σ_{g1}^2 和 σ_{p1}^2 表示第 1 个性状的遗传方差和表型方差分量； σ_{g2}^2 和 σ_{p2}^2 表示第 2 个性状的遗传方差和表型方差分量。

根据各无性系树高 (H_7)、胸径 (D_{18}) 和耐寒性指数 (C_{18}) 的预测基因型值，计算预测单株树高、胸径值与真实值之间的相关性。采用选择指数法 (I) 对重要性状进行加权计算综合评定值 W_i ， W_i 的权重系数比例为 $H_7 : D_{18} : C_{18} = 2 : 2 : 6$ ，选择早期生长和耐寒性均比对照优良的无性系。

2 结果与分析

2.1 尾叶桉无性系的早期生长和耐寒性表现

尾叶桉各无性系在韶关地区的生长和耐寒性 H_7 、 D_{18} 、 V_{18} 和 C_{18} 平均值分别为 2.40 m、5.40 cm、1.30 m^3 和 0.37，表型变异系数分别为 41.66%、30.42%、61.06% 和 81.08% (表 1)，说明尾叶桉 103 个无性系早期生长和耐寒性指标存在显著差异。进一步对生长和耐寒性性状进行多重比较 (表 2)，可知，对照 DH3229 和 GL9 在韶关试验地表现为中等水平。尾叶桉各无性系树高、胸径和材积有显著差异，生长性状中材积的多重级数最多，树高的多重级数最少。尾叶桉无性系 UA117、UA120、LDUC1、ZQUA9 和 ZQUA22 的 H_7 、 D_{18} 和 V_{18} 生长均较好 (表 2)，其中 H_7 平均值是总体平均值的 135.83%、132.08%、118.75%、118.75% 和 118.75%， D_{18} 平均值是总体平均值的 129.62%、133.33%、112.96%、116.67% 和 116.67%， V_{18} 平均值是总体平均值的 180.00%、185.38%、128.46%、141.54% 和 132.31%。由此可知，UA117、UA120、LDUC1、ZQUA9 和 ZQUA22 的生长和耐寒性早期表现均较优。

2.2 尾叶桉不同性状的重复力估算

对尾叶桉生长 (树高、胸径和材积) 和耐寒性指数进行方差分析及遗传参数估算 (表 3)，可知，各无性系在区组方差达到了显著或极显著水

表 1 韶关地区尾叶桉无性系早期生长和耐寒变异
Table 1 Variation of growth and cold tolerance of *E. urophylla* in Shaoguan

性状 Trait	最小值 Min	最大值 Max	范围 Range	平均值 Mean	方差 σ_p	表型变异系数 /% CV _p
树高 /m H_7	0.10	4.50	4.40	2.40 ± 1.00	1.00	41.66
胸径 /cm D_{18}	0.10	9.20	9.10	5.40 ± 1.60	2.70	30.42
材积 /m ³ V_{18}	0.00	4.30	4.30	1.30 ± 0.80	0.63	61.06
耐寒性指数 C_{18}	0.00	1.00	1.00	0.37 ± 0.30	0.09	81.08

表 2 尾叶桉无性系生长和耐寒性性状多重比较
Table2 Duncan multiple comparison for growth traits and cold tolerance of *E. urophylla* in Shaoguan

无性系 Clone	树高 /m H_7	胸径 /cm D_{18}	材积 /m ³ V_{18}	耐寒性 C_{18}	无性系 Clone	树高 /m H_7	胸径 /cm D_{18}	材积 /m ³ V_{18}	耐寒性 C_{18}
LDUC24	2.13e-o	5.20d-r	1.17g-y	1.00a	LDUA12	2.2d-o	5.20d-r	1.20g-y	0.25i-o
ZQGB7	1.62l-r	3.80q-u	0.51w-y	1.00a	ZQUA3	2.4a-m	5.20d-r	1.13h-y	0.25i-o
ZQGB28	1.37n-r	3.50s-u	0.46y	0.95a-b	ZQUA38	1.89i-q	5.00f-t	1.12h-y	0.25i-o
UA3227	2.92a-f	6.70b-d	2.04b-e	0.75b-c	LDUA29	2.09e-p	4.40k-u	0.92o-y	0.25i-o
UAU6	3.32a	6.70b-d	2.02b-f	0.75b-c	ZQUB49	2.06e-p	4.10o-u	0.76r-y	0.25i-o
ZQUA9	2.85a-h	6.30b-f	1.84b-i	0.75b-c	ZQUA37	2.02f-q	4.90f-t	1.02j-y	0.23j-o
ZQUA22	2.85a-h	6.30b-g	1.72b-n	0.75b-c	LDUD5	2.36b-m	5.10d-r	1.14h-y	0.23j-o
ZQUA44	2.77a-j	5.90b-l	1.71b-o	0.75b-c	LDUB83	2.55a-l	5.80b-n	1.44d-u	0.23j-o
LDUB94	2.82a-i	6.10b-j	1.59d-q	0.75b-c	ZQUA29	2.19d-o	5.20d-r	1.23f-y	0.23j-o
UA196	2.56a-l	5.90b-l	1.53d-s	0.75b-c	ZQUD3	2.65a-k	5.00d-r	1.1h-y	0.23j-o
ZQUC29	2.20d-o	5.60b-o	1.41d-u	0.75b-c	LDUA44	2.36b-m	5.10d-r	1.18g-y	0.21j-o
ZQUA35	2.30c-m	5.40c-p	1.41d-u	0.75b-c	ZQUB23	2.63a-k	5.20d-r	1.16g-y	0.21j-o
ZQUC14	2.64a-k	5.40c-p	1.39d-u	0.75b-c	ZQUC15	2.09e-p	6.00b-l	1.55d-r	0.18k-o
LDUA21	2.08e-p	5.60b-p	1.38d-u	0.75b-c	ZQUA40	2.83a-i	6.30b-f	1.81b-j	0.16k-o
ZQUC17	2.8a-j	5.40c-p	1.27e-x	0.75b-c	ZQUA27	2.58a-k	5.70b-o	1.55d-r	0.16k-o
DH3229	2.42a-m	5.20d-r	1.22g-y	0.75b-c	ZQUB55	1.86j-q	5.20d-r	1.28e-x	0.16k-o
ZQUD39	2.35b-m	4.80f-t	1.01k-y	0.75b-c	ZQUC69	2.41a-m	6.00b-l	1.75b-l	0.15k-o
GC21	1.31o-r	3.40s-u	0.50x-y	0.75b-c	ZQUD35	2.34b-m	5.80b-n	1.49d-s	0.15k-o
ZQUC1	1.78k-q	4.50j-u	0.93n-y	0.688c-d	ZQUC86	2.38b-m	5.20d-r	1.12h-y	0.15k-o
ZQUA6	2.51a-l	5.90b-m	1.55d-r	0.675c-e	ZQUD20	2.31c-m	5.20d-r	1.29e-w	0.13l-o
ZQUA34	2.21d-o	6.00b-l	1.69b-p	0.667c-e	ZQUD5	2.37b-m	5.20d-r	1.24f-x	0.12m-o
ZQUB16	2.38b-m	5.90b-l	1.57d-q	0.65c-f	ZQUB13	2.57a-k	5.10d-r	1.13h-y	0.12m-o
LDUA10	2.50a-l	5.20d-r	1.22g-y	0.65c-f	ZQUB93	2.35b-m	5.10d-r	1.11h-y	0.11m-o
GC17-38C	1.55m-r	3.70r-u	0.54v-y	0.639c-f	ZQUC45	2.17d-o	5.00e-s	1.08i-y	0.1m-o
ZQUB15	2.29c-m	5.40c-q	1.41d-u	0.636c-f	ZQUA14	2.92a-f	6.70b-d	2.04b-e	0.08m-o
UAU9	2.17d-o	5.70b-o	1.44d-u	0.625c-f	UAQA	2.47a-m	5.50c-p	1.4d-u	0.08m-o
ZQGC5	2.21d-o	4.60h-u	1.01k-y	0.583c-g	ZQUC107	3.11a-d	5.80b-n	1.45d-t	0.04n-o
LDUC39	1.94g-q	5.00e-s	1.09i-y	0.556c-h	ZQUA1	2.31c-m	5.30d-r	1.27e-x	0.04n-o
UA322	2.72a-k	6.10b-k	1.76b-k	0.55c-h	ZQUB39	2.79a-j	6.60b-e	2.09b-d	0.00o

无性系 Clone	树高 /m H_7	胸径 /cm D_{18}	材积 /m ³ V_{18}	耐寒性 C_{18}	无性系 Clone	树高 /m H_7	胸径 /cm D_{18}	材积 /m ³ V_{18}	耐寒性 C_{18}
UA120	3.17a-c	7.20a-b	2.41b	0.50c-i	ZQUD8	2.22d-o	6.20b-h	1.93b-g	0.00o
UA117	3.26a-b	7.00a-c	2.34b-c	0.50c-i	LDUC23	3.1a-d	6.20b-h	1.89b-h	0.00o
LDUC1	2.85a-h	6.10b-i	1.67c-p	0.50c-i	UA123	3.2a-c	6.30b-f	1.74b-l	0.00o
ZQUD1	2.87a-g	5.60b-p	1.42d-u	0.50c-i	ZQUC97	2.82a-i	6.10b-k	1.73b-m	0.00o
LDUB96	2.28c-n	5.60b-p	1.36d-u	0.50c-i	UC44	2.58a-k	5.80b-n	1.53d-s	0.00o
UA125	2.36b-m	5.10d-r	1.25f-x	0.50c-i	ZQUA56	2.76a-j	5.90b-l	1.50d-s	0.00o
UA119	2.19d-o	5.10d-r	1.12h-y	0.50c-i	ZQUA4	2.41a-m	5.60b-p	1.42d-u	0.00o
ZQUB33	0.88r	3.20u	0.54v-y	0.50c-i	ZQUC46	2.36b-m	5.50c-p	1.38d-u	0.00o
LDUC26	3.00a-e	5.90b-l	1.48d-t	0.46d-j	GL9	2.55a-l	5.40d-q	1.30e-v	0.00o
ZQUA88	2.60a-k	5.50c-p	1.37d-u	0.41e-k	UA111	2.14e-o	5.30d-r	1.15g-y	0.00o
ZQUC35	2.07e-p	4.70f-u	1.01k-y	0.41e-k	LDUA1	1.92h-q	4.90f-t	1.09i-y	0.00o
ZQUC99	2.83a-i	5.10d-r	1.25f-x	0.40f-l	ZQUA23	1.94g-q	4.60g-u	0.90p-y	0.00o
ZQUD31	2.42a-m	5.60b-o	1.36d-u	0.35g-m	ZQUD14	2.00f-q	4.50i-u	0.81q-y	0.00o
ZQUC16	2.09e-p	5.90b-m	1.49d-s	0.33g-m	ZQUC11	1.93g-q	4.20n-u	0.74s-y	0.00o
UA42	2.08e-p	4.20m-u	0.76s-y	0.33g-m	ZQUB44	3.17a-c	8.10a	3.11a	0.00o
ZQUB70	1.80k-q	4.50i-u	0.93n-y	0.31h-m	ZQUA20	2.78a-j	6.30b-f	1.73b-m	0.00o
LDUD26	2.18d-o	5.10d-r	1.11h-y	0.30h-n	ZQUC44	2.46a-m	6.00b-l	1.62c-p	0.00o
ZQUA15	2.76a-j	4.70f-u	0.96l-y	0.30h-n	LDUD98	2.68a-k	5.70b-o	1.39d-u	0.00o
ZQUA28	2.76a-j	5.60b-p	1.57d-q	0.25i-o	LDUC31	2.00f-q	4.40l-u	0.97k-y	0.00o
LDUB41	2.4a-m	5.70b-o	1.44d-u	0.25i-o	ZQGB12	2.50a-l	4.80f-t	0.94m-y	0.00o
ZQUB58	2.03f-q	5.40c-q	1.30e-v	0.25i-o	ZQUB29	1.16qr	4.00p-u	0.69t-y	0.00o
LDUD17	2.59a-k	5.50c-p	1.29e-w	0.25i-o	LDUB66	1.21p-r	3.40t-u	0.66u-y	0.00o
ZQUA13	2.48a-m	5.20d-r	1.27e-x	0.25i-o					

注：- 省去中间的字母，同列不同小写字母表示无性系间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Note: -It means to leave out the middle lowercase letters, and the different lowercase letters at columns indicates difference among different clones at $P < 0.05$ level.

平。尾叶桉不同性状在无性系间的方差达到了极显著水平，方差分量介于 0.05~1.01 之间，剩余误差方差分量介于 0.02~3.94 之间。 H_7 、 D_{18} 、 V_{18} 和 C_{18} 无性系重复力分别为 0.45、0.48、0.56 和 0.94，单株重复力分别为 0.14、0.16、0.21 和 0.78，说明尾叶桉无性系的大部分性状不仅受中等遗传影响，还受到环境因子的影响。 C_{18} 的单株重复力高达 0.78，受较高度度的加性遗传控制。由此可见，尾叶桉生长和耐寒性指数性状在无性系间方差分量都达到了极显著的水平，估算的重复力符合预期生长，尾叶桉无性系生长性状和耐寒性受中等或较高遗传控制的程度。

2.3 尾叶桉不同性状间相关估算

对韶关地区 103 个尾叶桉无性系的生长和耐寒性指数进行遗传和表型相关分析，结果表明，7 月生树高 (H_7)、18 月生胸径 (D_{18}) 和材积 (V_{18}) 三者之间的表型和遗传相关都达到了极显著水平 (表 4)。其中， H_7 与 D_{18} 、 D_{18} 与 V_{18} 以及 H_7 与 V_{18} 三者之间的表型相关系数分别为 0.79、0.96 和 0.77，加性遗传相关系数分别为 0.86、0.99 和 0.83，表明 H_7 、 D_{18} 和 V_{18} 间存在极强的正遗传相关。值得注意的是， C_{18} 与 H_7 、 D_{18} 与 V_{18} 间的表型和加性遗传相关系数与标准误差大小相似，且表型和遗传相关系数呈现异号，这可能由于尾叶桉生长与抗寒性指数的遗传基础不同。

表3 尾叶桉生长和耐寒性状遗传参数估算
Table 3 Genetic parameter estimates of *E. urophylla* growth and cold tolerance traits

性状 Trait	方差分量 Variance component				无性系重复力 Repeatability	单株重复力 Repeatability
	小区 Plot	无性系 Clone	区组 × 无性系 Block × Clone	剩余误差 Residual		
树高 H_7	0.03*	0.10***	0.01 ^{ns}	0.59***	0.45 ± 0.02	0.14 ± 0.03
胸径 D_{18}	0.04 ^{ns}	0.34***	0.18 ^{ns}	1.76***	0.48 ± 0.01	0.16 ± 0.03
材积 V_{18}	0.06 ^{ns}	1.01***	0.31 ^{ns}	3.94***	0.56 ± 0.04	0.21 ± 0.03
耐寒性指数 C_{18}	0.01 ^{ns}	0.05***	0.01 ^{ns}	0.02***	0.94 ± 0.02	0.78 ± 0.04

注: ***表示 $P < 0.001$, *表示 $P < 0.05$, ns表示不显著。

Note: *** means $P < 0.001$, * means $P < 0.05$, ns means not significant.

表4 尾叶桉不同性状间表型和遗传相关估算
Table 4 Phenotypic and additive genetic correlations among different traits of *E. urophylla*

性状 Trait	树高 H_7	胸径 D_{18}	材积 V_{18}	耐寒性指数 C_{18}
树高 H_7		0.79 ± 0.01***	0.77 ± 0.01***	0.05 ± 0.05
胸径 D_{18}	0.86 ± 0.03***		0.96 ± 0.00**	0.05 ± 0.05
材积 V_{18}	0.83 ± 0.04***	0.99 ± 0.01***		0.05 ± 0.05
耐寒性指数 C_{18}	-0.08 ± 0.12	-0.05 ± 0.12	-0.01 ± 0.11	

注: ***表示 $P < 0.001$ 水平上显著相关。表格右上方为表型相关, 左下方为遗传相关。

Note: *** at 0.001 significance level. Phenotypic correlations are above the diagonal, and additive genetic correlations are below the diagonal.

2.4 尾叶桉各无性系综合选择

尾叶桉为短轮伐纸浆材树种, 因此优良无性系选择主要以木材收获量为主。基于BLUP法预测的尾叶桉无性系 H_7 、 D_{18} 和 V_{18} 的基因型值与实际测量值具有显著的相关关系, 且相关系数均大于 0.96 (图 1)。以 20% 无性系入选率, 选出 H_7 、 D_{18} 、 C_{18} 和综合指数 (W_i) 均优良无性系 (表 5)。根据 H_7 基因型值评选的优良无性系为 UA117、ZQUC107、UA120、UA123、ZQUD1、LDUC23、ZQUA9、ZQUA14、ZQUA40、LDUC26、ZQUA22、LDUC1、ZQUA44、ZQUC97、ZQUC17、ZQUB39、ZQUC14 和 LDUD98, 其树高平均值与对照 (DH3229) 相比高出 0.50 m, 达 20.66%。根据 D_{18} 基因型值评选的优良无性系为 UA120、UA117、ZQUA14、ZQUB44、ZQUA9、ZQUB39、ZQUA40、ZQUA22、UA123、LDUC23、ZQUA34、ZQUA20、LDUC1、ZQUD8、ZQUA44、ZQUC15, 其胸径平均值与对照 (DH3229) 相比高出 1.23 cm, 达 23.52%。根据 C_{18} 基因型值评选的优良无性系为 LDUC24, 其耐寒性指数平均值与对照 (DH3229) 相比高出 0.11, 达 37.93%。综合评选按照 7 月生树高 (H_7)、18 月生胸径 (D_{18})

和 18 月生耐寒性指数 (C_{18}) 的权重比 2 : 2 : 6 进行, 综合评选的优良无性系为 ZQUA9、ZQUA22、ZQUA44、LDUB94、ZQUC14、ZQUC17、ZQUA34、LDUC1 和 ZQUD1, 其生长和耐寒性都较优。入选无性系的 H_7 、 D_{18} 和 C_{18} 的均值比对照 (DH3229) 分别高出 0.32 m, 0.68 cm 和 0.39, 达 13.18%、13.01% 和 136.27%。无性系 UA117 和 UA120 生长性状较好, 而耐寒性较差。作为对照的 DH3229 和 GL9, 其生长量均处于平均水平, 但 DH3229 的耐寒性指数较高。

3 结论与讨论

本研究以韶关地区 103 个尾叶桉无性系为材料, 对无性系 H_7 、 D_{18} 、 V_{18} 和 C_{18} 的遗传变异进行评价。由于林木无性系具有不同的基因型, 且受材料本身来源和选育水平的影响, 不同无性系间的生长存在较大差别^[13]。韶关地区 103 个尾叶桉无性系生长和耐寒性性状在区组、无性系间达到了显著或极显著差异。这与已有报道树高、胸径和材积等生长性状在无性系间的差异显著结果一致^[14-18], 表明尾叶桉无性系存在较好的选择潜力。重复力指同一基因型的生物个体在不同地点

表 5 尾叶桉优良无性系生长表现和基因型值比较

Table 5 Comparison of growth performance and genotype value for different traits in *E. urophylla*

无性系 Clone	生长表现 Growth performance			基因型值 Gene value			综合指数 W_i
	树高 H_7	胸径 D_{18}	耐寒性指数 C_{18}	树高 H_7	胸径 D_{18}	耐寒性指数 C_{18}	
UA117	3.26	7.00	0.50	0.46	1.04	0.11	0.36
UA120	3.17	7.17	0.50	0.42	1.04	0.10	0.35
ZQUA9	2.85	6.32	0.75	0.32	0.72	0.24	0.35
ZQUA22	2.85	6.25	0.75	0.25	0.57	0.24	0.31
ZQUA44	2.77	5.95	0.75	0.24	0.43	0.28	0.30
LDUB94	2.82	6.09	0.75	0.10	0.37	0.27	0.26
ZQUC14	2.64	5.44	0.75	0.21	0.11	0.27	0.23
ZQUC17	2.80	5.41	0.75	0.23	0.06	0.27	0.22
ZQUA34	2.21	6.00	0.67	0.02	0.49	0.18	0.21
LDUC24	2.13	5.17	1.00	-0.10	-0.18	0.40	0.19
LDUC1	2.85	6.14	0.50	0.24	0.48	0.07	0.19
ZQUB16	2.38	5.91	0.65	-0.03	0.33	0.21	0.18
ZQUB44	3.17	8.07	0.00	0.17	0.73	0.00	0.18
ZQUD1	2.87	5.59	0.50	0.35	0.17	0.12	0.17
ZQUC29	2.20	5.61	0.75	-0.04	0.16	0.21	0.15
DH3229	2.42	5.23	0.75	-0.01	-0.13	0.29	0.15
LDUC26	3.00	5.89	0.46	0.26	0.33	0.05	0.14
ZQUA20	2.78	6.32	0.00	0.18	0.48	0.00	0.13
ZQUA35	2.30	5.41	0.75	-0.07	-0.02	0.24	0.12
ZQUA40	2.83	6.29	0.17	0.30	0.63	-0.15	0.10
ZQUA14	2.93	6.66	0.08	0.30	0.77	-0.20	0.09
ZQUD39	2.35	4.80	0.75	-0.02	-0.34	0.27	0.09
LDUA21	2.08	5.59	0.75	-0.28	-0.06	0.24	0.08
UA123	3.20	6.28	0.00	0.42	0.54	-0.22	0.06
LDUD98	2.68	5.66	0.00	0.21	0.09	0.00	0.06
ZQUB39	2.79	6.61	0.00	0.22	0.69	-0.22	0.05
LDUC23	3.10	6.23	0.00	0.34	0.53	-0.22	0.04
ZQUC107	3.11	5.80	0.04	0.43	0.30	-0.23	0.01
ZQUC97	2.82	6.07	0.00	0.23	0.40	-0.21	0.00
ZQUC15	2.09	5.98	0.19	-0.19	0.40	-0.18	-0.07
ZQUD8	2.22	6.21	0.00	-0.14	0.47	-0.30	-0.12
入选群体均值 Mean	2.92	6.46	0.40				
CK (DH3229)	2.42	5.23	0.29				

注：仅列出每个性状排名前 31 的无性系。

Note: only the top 21 clones for each trait were listed.

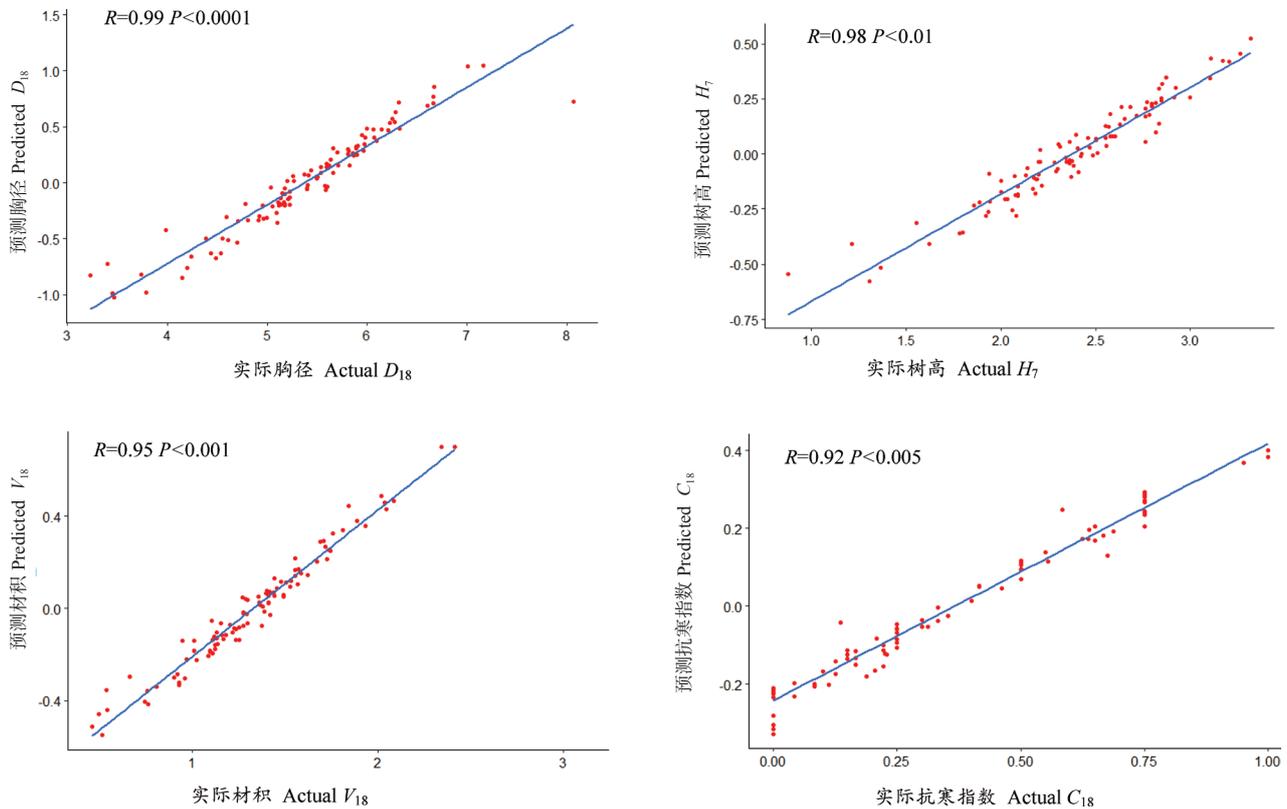


图1 预测的生长和耐寒性指数与实际指标之间的相关性

Fig. 1 Pearson correlation between predicted and original values of *E. urophylla* clones in Shaoguan

或时间的表型持续稳定程度，是一个重要的遗传参数，已在动植物育种中广泛应用并取得了显著的经济效益^[12]。重复力越大，说明性状的遗传效应越强。陈升侃等^[15]通过对22个无性生长性状进行遗传分析，得出桉树无性系各生长性状的重复力在0.86~0.94之间。杨汉波等^[19]通过对6年生的引种桉树种源生长性状进行分析，得出不同桉树树种的单株遗传力在0.70~0.94之间。翁启杰等^[3]通过对尾叶桉 × 邓恩桉 *E. dunnii* 杂种的生长和耐寒性分析得出杂种桉树耐寒性的狭义遗传力较低。而本研究的尾叶桉无性系生长和耐寒性指数的无性系重复力在0.45~0.94之间，单株重复力在0.14~0.78之间，说明生长性状和耐寒性受中等程度遗传，再次验证韶关地区103个尾叶桉无性系选育的有效性。

本研究的尾叶桉无性系树高、胸径和材积性状间的两两相关呈显著或极显著相关，相同年龄的胸径和材积表型和遗传相关系数均较高，分别为0.96和0.99，这与已研究报道的材积与胸径相关性结果一致^[16-17]。翁启杰等^[3]通过对杂种桉相

关性分析，得出8月生耐寒性指数和20月生树高之间的加性遗传相关为负值，而本研究中尾叶桉耐寒性指数与生长性状的表型和遗传相关系数均较小，且未达到显著水平，表明在实际育种中，生长和抗寒性可以独立选择。

评选出生长快、又兼具耐性强的优良无性系是林木良种选育中一项重要的工作。基于基因型值评选是从遗传本质上解析无性系间的差别，基因型综合选择指数法是根据选育目标将所要选择的性状按其相对重要性、遗传力、经济价值和相互之间的遗传相关关系进行适当加权后合并成一个综合指数，简化了选择方法，提高了选择效率^[20]。本研究基于不同性状综合评选出生长和耐寒性都较优的无性系ZQUA9、ZQUA22、ZQUA44、LDUB94、ZQUC14、ZQUC17、ZQUA34、LDUC1和ZQUD1。已有研究表明尾叶桉纯种不耐寒^[3]，而本研究无性系LDUB94、LDUC24、ZQUB16和ZQUC29的耐寒性指数都高于杂种耐寒性(DH3229和GL9)，这些无性系可以为耐寒亲本选择提供材料。

参考文献

- [1] 祁述雄. 中国桉树[M]. 2版, 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [2] 何旭东, 李发根, 翁启杰, 等. 尾叶桉 × 细叶桉杂种生长与耐寒性的联合选择[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(8): 68-71.
- [3] 翁启杰, 赖秋香, 李发根, 等. 尾叶桉 × 邓恩桉早期生长和耐寒性的遗传分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(5): 33-38.
- [4] RAYMOND C A, OWEN J V, RAVENWOOD I C. Genetic variation for frost resistance in a breeding population of *Eucalyptus nitens*[J]. *Silvae Genetica*, 1992, 41(5): 355-362.
- [5] TIBBITS W N, HODGE G R. Genetic parameters for cold hardiness in *Eucalyptus nitens* (Deane&Maiden) Maiden [J]. *Silvae Genetica*, 2003, 52(3-4): 89-97.
- [6] VOLKER P W, POTTS B M, BORRALHO N M G. Genetic parameters of intra-and inter-specific hybrids of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* [J]. *Tree Genetics & Genomes*, 2008, 4(3): 445-460.
- [7] ELDRIDGE K G, DAVIDSON J, HARWOOD C E, et al. Eucalypt domestication and breeding[J]. *Brittonia*, 1996, 48(4): 494-494.
- [8] 贺鹏, 聂峰. 海南省主要人工林树种最优树高曲线研究[J]. 中南林业调查规划, 2019, 38(4): 49-52.
- [9] 李梅, 甘四明, 李发根, 等. 桉属种间杂种生长和抗青枯病的联合选择[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2007(6): 25-28.
- [10] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing [M/OL]. 2014. R for Statistical Computing, Vienna. Available from <http://www.r-project.org/>.
- [11] GILMOUR A, CULLIS B, WELHAM S, et al. An efficient computing strategy for prediction in mixed linear models[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2004, 44(4): 571-586.
- [12] 续九如. 林木数量遗传学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] 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.
- [14] 李光友, 徐建民, 王伟, 等. 杂交桉家系在冷凉区优势评价与遗传分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 55-63.
- [15] 陈升侃, 李昌荣, 许翠娟, 等. 桉树无性系生长遗传分析与选择[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(11): 25-30, 38.
- [16] 杨会肖, 廖焕琴, 杨晓慧, 等. 阳江地区尾叶桉早期生长性状遗传参数估算[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(1): 109-115.
- [17] 王家妍, 方小荣, 黄黎敏, 等. 16个桉树无性系生长和抗风性比较[J]. 广西林业科学, 2019, 48(3): 296-300.
- [18] 陆钊华, 徐建民, 李光友, 等. 93个尾叶桉无性系多性状综合选择研究[J]. 桉树科技, 2010, 27(1): 1-8.
- [19] 杨汉波, 郭洪英, 陈彖, 等. 引种桉树种源生长性状的遗传变异及早期评价[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 109-114;177.
- [20] 刘永红, 杨培华, 樊军锋, 等. 油松优良家系多性状选择方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006(12): 115-120.