

50 个赤桉家系抗风性与生长、材性性状的相关性

尚秀华, 张沛健, 谢耀坚, 罗建中, 李 超, 吴志华

(国家林业局 桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022)

摘要: 为获得影响赤桉 *Eucalyptus camaldulensis* 家系抗风性能的主要因子, 筛选能生产应用的优良抗风家系, 在连续 3 a 调查 114 个赤桉家系高产抗风家系排序基础上, 选取 50 个赤桉家系为材料, 对其生长性状(树高、胸径、单株材积), 材性性状(木材基本密度、纤维长度、纤维宽度、纤维长宽比), 材性相关的无损指标(Pilodyn 值、应力波值)以及台风风害指数进行了测定和分析。结果表明: 除胸径($P=0.062$), 纤维长宽比($P=0.636$)和树皮厚度($P=0.174$)外, 家系在各性状间差异均达到极显著水平($P<0.01$), 单株、家系遗传力变化范围分别为 0.046~0.885 和 0.077~0.777, 纤维宽度、树高、木材基本密度、应力波值等性状具有高遗传力。各性状变异系数范围为 5.11%~87.57%, 遗传变异系数范围为 1.78%~34.57%, 环境变异系数范围为 4.43%~80.74%, 风害指数和单株材积变异较大, 有利于优良抗风家系的评价选择。相关性分析结果表明: 赤桉纤维长度与木材基本密度、Pilodyn 值、应力波值呈及显著相关, 纤维宽度与生长性状(树高、胸径、单株材积、树皮厚度)呈极显著相关。风害指数与木材纤维长度、纤维长宽比相关性不显著, 与树高、单株材积达极显著相关, 与应力波值、树皮厚度呈显著相关, 与胸径、Pilodyn 值、木材基本密度相关性不显著, 树高、单株材积与风害指数的相关关系在遗传、环境及表型上均高于其他性状。通过综合选择筛选出 5 个优良抗风家系, 分别为家系 2007, 2006, 20027, 2005, 2008, 其遗传增益范围为 0.53~22.39。表 7 参 28

关键词: 林木遗传育种学; 赤桉; 抗风性; 相关性; 遗传分析

中图分类号: S722.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2017)06-1029-09

Wind resistance correlated to growth and wood properties of 50 *Eucalyptus camaldulensis* provenance families

SHANG Xiuhua, ZHANG Peijian, XIE Yaojian, LUO Jianzhong, LI Chao, WU Zhihua

(China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

Abstract: To find the main influencing factors of wind resistance in *Eucalyptus camaldulensis* and to select excellent high-yielding and wind-resistant families for production, this research, based on a three-year successive study of 114 *E. camaldulensis* provenance families, selected 50 of the families as the study material. Growth traits (tree height, diameter at breast height–DBH, and individual volume), wood properties (wood density, fiber length, fiber width, and ratio of fiber length to width), non-destructive wood traits (Pilodyn penetration value and stress-wave value), and wind damage indexes were measured and analyzed using SPSS and Genstat 7.0 Statistics. Results showed that differences in traits were highly significant ($P<0.01$), except for DBH ($P=0.062$), ratio of fiber length to width ($P=0.636$), and bark thickness ($P=0.174$). Single stand heritabilities were 0.046–0.885, and family heritabilities were 0.077–0.777; fiber width (0.684), tree height (0.590), wood density (0.643), and stress-wave value (0.777) also had high heritability. The range of phenotypic variation coefficients was 5.11%–87.57%; coefficients of genetic variation were 1.78% to 34.57%; and coefficients of environmental variation were 4.43% to 80.74%. The variation of wind damage index and individual volume was

收稿日期: 2016-11-22; 修回日期: 2017-03-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31570615); “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0600500)

作者简介: 尚秀华, 助理研究员, 从事林木培育及育种研究。E-mail: shxhhz@163.com。通信作者: 吴志华, 副研究员, 从事林木逆境生理研究。E-mail: wzhu2889@163.com

higher, which was help to the selection of excellent wind-resistant families. The correlation analysis was significant between fiber length and wood properties (wood density ($r = 0.234$), Pilodyn penetration value ($r = -0.169$), and stress-wave value ($r = -0.514$)), and also between fiber width and growth traits (tree height ($r = -0.253$), DBH ($r = -0.323$), and individual volume bark thickness ($r = -0.323$)). Meanwhile, wind damage indexes were significantly correlated to tree height ($r = -0.607$), individual volume ($r = -0.346$), stress-wave value ($r = -0.123$), and bark thickness ($r = -0.120$), but not to wood fiber length, ratio of fiber length to width, DBH, Pilodyn penetration value, or wood density. The genetic relationships among wind damage index and tree height, individual volume were higher than the other characters. Using the comprehensive estimate method, five families: 2007, 2006, 20027, 2005, and 2008, with favorable growth and wind resistance as well as genetic gains ranging from 0.53 to 22.39 were selected. [Ch, 7 tab. 28 ref.]

Key words: forest tree breeding; *Eucalyptus camaldulensis*; wind resistance; correlation; genetic analysis

桉树 *Eucalyptus* 原产澳大利亚, 有 945 个种和变种, 其木材广泛用于纸浆和人造板工业的原料^[1], 是中国华南地区重要造林树种之一, 在木材供应、碳汇供给和生态环境改善等方面发挥着重要作用^[2-3]。沿海的广东、广西、福建等省(区)既是中国人工林主产区^[4], 其人工林面积和蓄积量分别占全国的 22.34% 和 24.62%^[5], 也是中国重要的桉树商品林生产基地^[1]。沿海地区台风频发^[6], 已严重影响桉树及其产业的发展^[7], 亟须选择抗风树种(品系)用于商品林的建设^[1,8]。赤桉 *Eucalyptus camaldulensis* 是桉属中一个较为广泛栽培的树种^[9], 国内主要分布在华南以及云南等区域。赤桉为优质的硬木材, 因其耐高温、干旱, 稍耐碱的特性, 为干热河谷地区解决山地植被恢复的理想树种, 赤桉不但耐旱、耐瘠, 而且抗风抗病能力强, 为中国桉树树种改良的重要遗传材料^[10]。已有的赤桉研究主要集中在木材干燥处理^[11-12]、遗传基因^[13-15]等方面。国内已广泛开展桉树抗风性树种/无性系的选择研究, 但大多集中在生长性状水平上^[6,16-17], 赤桉由于其独特的抗风特性备受关注, 已进行了初步的抗台风研究^[18]。本研究以 50 个 3~4 年生赤桉家系为材料, 研究其林木生长性状、纤维性状及材性性状与抗风性能之间的相关性, 以及获得影响赤桉抗风的主要因子, 为进一步选育优良抗台风桉树品系奠定基础。

1 试验材料与研究方法

1.1 试验林及材料

试验林设在南方国家级林木种苗示范基地(简称种苗基地)内, 位于广东省湛江市遂溪县岭北镇附近, 21°30'N, 111°38'E, 为热带北缘季风气候, 平均遭受 10 级以上台风袭击 2~3 次·a⁻¹, 台风最大风力大于 35 m·s⁻¹^[1]。本研究实验材料为 2012 年 8 月造林的 114 个赤桉家系。试验设计为完全随机区组, 设置 4 个区组重复, 4 株·小区⁻¹, 株行距 2 m × 3 m, 面积约为 1.43 hm²。

1.2 研究方法

1.2.1 赤桉家系树高和胸径的测定 于 2015 年 12 月, 选取 3 年生赤桉 20 个较抗风家系和 30 个弱抗风家系进行树高、胸径调查, 4 个重复, 对存活家系进行每木检尺, 树高利用 Vtrtex IV (瑞典 Haglof) 超声波测高测距仪测定, 胸径利用胸径尺测定。单株材积(V)采用广西林业勘察设计院总结的广西速生桉单株材积计算公式^[19]: $V = C_0 \times D^{[C_1 - C_2 \times (D+H)]} \times H^{[C_3 + C_4 \times (D+H)]}$ 。其中: V 为单株材积; D 为地径; H 为树高; $C_0 = 0.000\ 109\ 154\ 150$; $C_1 = 1.878\ 923\ 70$; $C_2 = 0.005\ 691\ 855\ 03$; $C_3 = 0.652\ 598\ 05$; $C_4 = 0.007\ 847\ 535\ 07$ 。

1.2.2 木芯样品采集及木材性状的测定 对试验林中 1~3 重复区内的各家系存活单株进行木芯的采集, 利用林木生长锥(瑞典 Haglof, 内径 4.3 mm)在每个单株南北方向 1.3 m 处进行木芯采集, 置入标好编号的纸皮信封中, 做好标记后带回实验室进行材性相关性状测定。参照 GB/T 1933-2009《木材密度测定方法》测定各家系的木材基本密度^[20]。采用加拿大 LDA 02 全自动纤维质量分析仪(fiber quality analyzer)对其纤维形态特征长度、宽度、长宽比测定。

1.2.3 Pilodyn 值和应力波值的测定 Pilodyn 是一种间接测定木材密度的无损检测仪器。Pilodyn 测定仪可有效地对立木材性(如强度和密度)间接评估^[21]。采用瑞典 Pilodyn(6J-Forest)仪器(探针直径为 2.5 mm)在立木胸径(高 1.3 m)处测定, 获得立木密度和强度相关的去皮 Pilodyn 值(Pilodyn penetration value)。木

材中应力波的传播速度与木材的物理、力学性能直接相关, 因此通过测量应力波的传播时间或传播速度可确定木材材质的性能^[22]。应力波值以匈牙利 Fakopp 2D 测定仪(Fakopp microsecond timer)测定高 0.2~1.7 m 立木段应力波的传播时间, 重复 5 次, 取平均值。

1.2.4 风害指数的测定 以 1522 号强台风“彩虹”(2015 年 10 月 4 日登陆广东湛江坡头区, 中心最大风力为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 15 级, 为 1949 年以来 10 月份登陆广东的最强台风^[23])对赤桉试验林的风害进行单株林木抗风性评价, 台风风害指数参照王睿等^[24]划分为 6 级: 0 级, 主干没有明显倾斜; 1 级, 主干倾斜与垂直距离小于 30° ; 2 级, 主干倾斜与垂直夹角为 $30^\circ \sim 60^\circ$; 3 级, 主干倾斜与垂直夹角 $60^\circ \sim 90^\circ$; 4 级, 树干倒伏或连根拔起; 5 级, 树干折断。

1.2.5 数据统计与分析 所有数据均值、标准差、 F 值、 P 值以 SPSS 软件分析, 变异系数、相关系数用 Genstat 7.0 软件(VSN, 英国)分析。分别就赤桉家系的生长性状、纤维性状及风害级等指标以 Excel (XP)软件进行数据收集整理, 以 Genstat 7.0 软件分别就赤桉家系生长性状、纤维性状及风害指数等指标以 BLUP(best linear unbiased prediction, BLUP)进行建模分析, 获得家系遗传方差和环境方差, 并分析计算各性状遗传变异系数、环境变异系数、理论表型变异系数、家系遗传力以及各性状间的遗传相关系数等, 再进行家系评选。

$$\text{变异系数: } V_c = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\%; \quad (1)$$

$$\text{遗传变异系数: } V_{gc} = \frac{\sqrt{\delta_g^2}}{\bar{x}} \times 100\%; \quad (2)$$

$$\text{环境变异系数: } V_{ec} = \frac{\sqrt{\delta_e^2}}{\bar{x}} \times 100\%; \quad (3)$$

$$\text{理论表型变异系数: } V_{rc} = \frac{\sqrt{\delta_p^2}}{\bar{x}} \times 100\%。 \quad (4)$$

式(1)~式(4)中: S 为表型标准差, δ_g^2 为遗传方差, δ_e^2 为环境方差, δ_p^2 为表型方差, $\bar{x}$ 为某一性状的平均值。

遗传力估算公式:

$$h_f^2 = \frac{\delta_f^2}{\delta_f^2 + \delta_b^2/b + \delta_e^2/bn}; \quad (5)$$

$$h_s^2 = \frac{\delta_f^2/r}{\delta_f^2 + \delta_b^2 + \delta_e^2}。 \quad (6)$$

式(5)和式(6)中: h_f^2 为家系遗传力, h_s^2 为单株遗传力, δ_f^2 为家系方差, δ_b^2 为家系与区组交互方差, δ_e^2 为机误方差, b 为调和区组数, n 为调和小区均数, r 为授粉系数(r 取 0.3)。

参照黄少伟等^[24]方法进行遗传相关分析, 采用如下公式计算:

$$h_{p12} = \frac{\text{Cov}_{p12}}{\sqrt{\delta_{p1}^2} \sqrt{\delta_{p2}^2}}; \quad (7)$$

$$r_{g12} = \frac{\text{Cov}_{g12}}{\sqrt{\delta_{g1}^2} \sqrt{\delta_{g2}^2}}; \quad (8)$$

$$r_{e12} = \frac{\text{Cov}_{e12}}{\sqrt{\delta_{e1}^2} \sqrt{\delta_{e2}^2}}。 \quad (9)$$

式(7)~式(9)中: Cov_{p12} 为 2 个性状的表型协方差; δ_{p1}^2 , δ_{p2}^2 分别为 2 个性状的表型方差; Cov_{g12} 为 2 个性状的遗传协方差; δ_{g1}^2 , δ_{g2}^2 分别为 2 个性状的遗传方差; Cov_{e12} 为 2 个性状的环境协方差; δ_{e1}^2 , δ_{e2}^2 分别为 2 个性状的环境方差。利用多性状进行主成分法进行家系的评选。

$$\text{遗传增益计算: } \Delta G = \frac{Sh^2}{\bar{x}}。 \quad (10)$$

式(10)中: h^2 为遗传力, S 为表型标准差, $\bar{x}$ 为某一性状群体平均值。

2 结果分析

2.1 不同家系主要生长性状的变异和遗传分析

50 个赤桉家系生长性状均值及变幅见表 1。树高平均值为 9.86 m，最大为 17.90 m，胸径平均值为 10.12 cm，最大值为 17.30 cm，单株材积平均值为 $46.96\times 10^{-3}\text{ m}^3$ ，最大为 $165.60\times 10^{-3}\text{ m}^3$ 。树皮厚度平均值为 0.59 cm，最大为 1.62 cm。方差分析结果(表 2)显示：各家系间树高差异性呈极显著水平($P<0.01$)，胸径、树皮厚度差异性不显著($P=0.062$ ， $P=0.174$)，单株材积间差异性达到显著水平($P<0.05$)。

表 1 50 个赤桉家系各性状平均值及标准差

Table 1 Mean value and standard deviation of 50 <i>Eucalyptus camaldulensis</i> family											
性状	树高/m	胸径/cm	单株材积/ ($\times 10^{-3}\text{ m}^3$)	树皮厚 度/cm	纤维长 度/mm	纤维宽 度/ μm	纤维长 宽比	木材基本密 度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Pilodyn 值/mm	应力波 值/ μs	风害指 数/级
平均值	9.86	10.12	46.96	0.59	0.578	25.43	22.78	0.45	13	489.79	1.85
变幅	1.30~	3.20~	1.90~	0.22~1.62	0.478~	21.30~	18.33~	0.17~0.65	1.5~	322.60~	1.00~5.00
	17.90	17.30	165.60		0.704	30.10	27.95		17.8	655.40	
标准差	3.46	2.82	29.51	0.18	0.039	1.30	1.54	0.04	1.8	48.52	1.62
自由度	326	325	325	323	323	322	323	326	325	312	321

表 2 50 个赤桉家系各性状单因素方差分析

Table 2 Variance analysis of different traits among 50 <i>E. camaldulensis</i> families									
性状	自由度	均方差	<i>F</i>	<i>P</i>	性状	自由度	均方差	<i>F</i>	<i>P</i>
树高	46	3.763	2.52	<0.001	纤维长宽比	46	7.98	0.91	0.636
胸径	46	10.209	1.38	0.062	木材基本密度	46	0.004 473	3.08	<0.001
单株材积	46	1 240.5	1.54	0.020	Pilodyn 值	46	5.287	1.79	0.002
树皮厚度	46	0.037 63	1.22	0.174	应力波值	44	7 424.04	5.05	<0.001
纤维长度	46	0.002 904	2.32	<0.001	风害指数	45	4.863	2.19	<0.001
纤维宽度	46	4.159	3.37	<0.001					

变异系数是衡量各性状指标观测值变异程度。遗传变异系数可反映遗传因素导致性状观测值相对变异程度，遗传变异系数大小可反映家系在该性状中可利用的改良潜力大小^[25]。生长性状(树高、胸径、单株材积、树皮厚度)中变异系数最大为 62.84%(表 3)，变异系数最小的为胸径(27.87%)。遗传力可以体现性状的稳定程度，其值越大则性状越稳定，受环境作用小，选择的效果越好^[26]，从表 3 遗传力分析可以看出：树高家系遗传力小于单株遗传力，胸径、材积、树皮厚度性状家系遗传力大于单株遗传力。单株遗传力为 0.046~0.644，家系遗传力变幅为 0.077~0.590。胸径、材积、树皮厚度性状的单株遗传力

表 3 赤桉家系不同性状的变异系数和遗传参数

Table 3 Variation coefficients and genetic parameters of different traits of <i>E. camaldulensis</i> family								
性状	家系方差 δ_f^2	机误方差 δ_e^2	单株遗传力 h_s^2	家系遗传力 h_t^2	变异系数 V_c / %	遗传变异系 数 I /%	环境变异系 数 V_{E0} /%	理论表型变异 系数 V_{E0} /%
树高	2.279 0	9.516 0	0.644	0.590	35.09	15.26	31.19	34.73
胸径	0.234 0	7.567 0	0.100	0.157	27.87	4.78	27.18	27.59
单株材积	60.700 0	813.000 0	0.232	0.309	62.84	16.59	60.71	62.94
树皮厚度	0.000 4	0.031 5	0.046	0.077	30.51	3.56	30.09	30.30
纤维长度	0.241 2	1.253 6	0.539	0.536	6.75	2.70	6.15	6.72
纤维宽度	0.458 0	1.268 0	0.885	0.684	5.11	2.66	4.43	5.17
纤维长宽比	0.165 4	2.123 5	0.243	0.320	6.76	1.78	6.36	6.61
木材基本密度	0.000 4	0.001 5	0.771	0.643	9.56	4.72	8.62	9.83
Pilodyn 值	0.364 0	2.952 0	0.366	0.425	14.15	4.64	13.21	14.01
应力波值	860.00	1 481.00	0.825	0.777	9.91	5.99	7.86	9.88
风害指数	0.409 0	2.231 0	0.516	0.524	87.57	34.57	80.74	87.83

和家系遗传力均较低($h^2<0.5$)，不宜在早代作出选择。树高遗传力较高，说明树高不易受环境条件的影 响，上下代之间可遗传性强，对育种材料取舍在早期世代进行选择也可取得比较好的效果。从遗传变 异系数看，以单株材积(16.59%)最大，其次是树高(15.26%)；环境变异系数最大的是材积(60.71%)， 理论表型变异系数和通过家系单株的变异系数之间差异很小，说明通过 BLUP 模型计算出的遗传变异系 数、环境变异系数、理论表型变异系数值可靠。进一步说明各家系性状间存在着丰富的遗传变异。

2.2 不同家系材质性状和风害指数的变异和遗传分析

由表 1 可见：在纤维形态性状上，家系的纤维长度平均值为 0.578 mm，变幅为 0.478~0.704 mm； 纤维宽度平均值为 25.43 μm ，变幅为 21.3~30.1 μm ；纤维长宽比平均值为 22.78。赤桉家系的木材基本 密度最大值为 0.653 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，最小值为 0.171 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，平均值为 0.450 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。木材无损指标 Pilodyn 值、 应力波值的平均值分别为 13.00 mm，489.79 μs 。赤桉各家系的风害指数均大于 0 级，风害指数范围 1~ 5 级，平均风害指数为 1.85 级，表明整个林分所有立木均遭受不同程度的风害。方差分析（表 2）显示： 纤维长度、纤维宽度、木材基本密度、Pilodyn 值、应力波值差异极显著($P<0.01$)，纤维长宽比差异不 显著($P=0.636$)。表明赤桉家系间纤维形态、材性指标、风害指数存在显著差异，可进一步筛选生长较 快、材性较好的抗风品系。

对 50 个赤桉家系在不同材质性状和风害指数进行单株遗传力、家系遗传力、遗传变异系数、环境 变异系数、表型变异系数计算，结果如表 3。纤维长度和风害指数 2 个指标的家系遗传力和单株遗传力 值非常接近，纤维宽度、木材基本密度及应力波值的家系遗传力小于单株遗传力，纤维长宽比和 Pilodyn 值家系遗传力大于单株遗传力。单株遗传力值为 0.243~0.885，家系遗传力变幅为 0.320~0.777， 纤维长宽比、Pilodyn 值的单株和家系遗传力值均较低($h^2<0.50$)。纤维宽度、木材基本密度、应力波单 株遗传力较高，分别为 0.885，0.771，0.825，而其家系遗传力也比较高，分别为 0.684，0.643，0.777， 表明这些性状受环境条件的影 响小，上下代之间可遗传性强，可在早期世代进行选择。从遗传变异系数 看，以风害指数最大(34.57%)，纤维长宽比最小(1.78%)，纤维宽度(2.66%)和纤维长度(2.70%)也较 小；环境变异系数最大的也是风害指数(80.74%)，变异较小的是纤维长度(6.15%)和纤维长宽比 (4.43%)，纤维宽度最小(4.43%)；理论表型变异系数与变异系数基本一致，以风害指数(87.83%)最大， 纤维宽度最小(5.17%)。以上说明各性状之间存在丰富的遗传变异，使进一步选择优良抗风家系成为可能。

2.3 风害指数与生长和材质性状的相关性分析

从表 4 可以看出：赤桉纤维长度与材性(木材基本密度、Pilodyn 值和应力波值)均呈极显著性相关， 纤维宽度与生长性状(树高、胸径、单株材积)也呈极显著相关关系。Pilodyn 值、应力波值与木材基本 密度指标之间均呈 0.01 水平上的显著相关性。风害指数与树高、单株材积、树皮厚度、应力波值的 Pierson 相关系数达到 0.05 水平上的显著。进一步根据各家系各性状的 BLUP 模型进行遗传相关分析， 获得如表 5 各性状与风害指数之间的遗传相关、环境相关、表型相关结果。

从表 5 可知：赤桉生长性状(树高、胸径、材积、树皮厚度等)与风害指数在遗传相关上呈极显著负

表 4 50 个家系各性状 Pierson 相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficients among different traits of *Eucalyptus camaldulensis* family

性状	纤维长度	纤维宽度	纤维长宽比	树高	胸径	单株材积	树皮厚度	木材基本密度	Pilodyn 值	应力波值
纤维宽度	0.377**									
纤维长宽比	0.702**	-0.392**								
树高	-0.049	-0.253**	0.140*							
胸径	-0.080	-0.323**	0.168**	0.484**						
单株材积	-0.096	-0.304**	0.137*	0.782**	0.861**					
树皮厚度	-0.081	-0.224**	0.089	0.376**	0.671**	0.620**				
木材基本密度	0.234**	0.075	0.175**	0.036	0.047	0.006	0.075			
Pilodyn 值	-0.169**	-0.093	-0.093	-0.041	0.020	-0.015	-0.029	-0.386**		
应力波值	-0.514**	-0.356**	-0.244**	0.020	-0.017	0.046	0.077	-0.418**	0.343**	
风害指数	0.066	0.109	-0.012	-0.607**	-0.078	-0.346**	-0.120*	0.045	0.059	-0.123*

说明：* 表示 0.05 水平相关显著；** 表示 0.01 水平相关显著。

表 5 风害指数与生长、材性性状遗传、表型、环境相关性

Table 5 The genetic, phenotypic, environmental relevance between wind damage index and growth, wood traits			
性状	遗传相关	表型相关	环境相关
树高	-0.939**	-0.617**	-0.551**
胸径	-0.390**	-0.111*	-0.093
单株材积	-0.924**	-0.342**	-0.277**
树皮厚度	-0.799**	-0.150*	-0.124
纤维长度	-0.062	0.124*	0.159
纤维宽度	0.382**	0.128*	0.064
纤维长宽比	-0.114	-0.039	-0.0468
木材基本密度	0.021	0.043	0.048
Pilodyn 值	-0.531**	0.051	0.139*
应力波值	-0.304**	-0.449**	0.137*

说明：* 表示 0.05 水平相关显著；** 表示 0.01 水平相关显著。

相关；在表型相关上，树高、单株材积与风害指数达到极显著负相关，胸径和树皮厚度与风害指数呈显著负相关；环境相关上，树高和单株材积与风害指数呈极显著负相关，胸径和树皮厚度与风害指数不相关。由此可见：风害指数与赤桉生长性状具有极大的关系，尤其是树高和单株材积极显著影响赤桉的抗风性能，所以树高越高，材积越大，赤桉抗风能力越强。赤桉材性性状中，风害指数与木材纤维长度、纤维长宽比无论是遗传、表型以及环境的相关性不强，而与纤维宽度在遗传、表型的相关性均达 0.01 水平上的显著，其遗传相关系数为 0.382；风害指数与 Pilodyn 值、应力波值的遗传相关性强，均呈显著负相关，但与 Pilodyn 值的表型相关性不明显，而风害指数与木材基本密度在 3 种相关系数中均不显著。Pilodyn 值、应力波值与抗风指数存在显著环境正相关，表明立木赤桉抗风性能与材性性状纤维宽度、Pilodyn 值、应力波值密切相关。

综上所述，树高、单株材积与抗风性能的相关关系在遗传、环境及表型上均高于其他性状，进一步说明树高和单株材积在很大程度上影响赤桉立木的抗风性。这些结果为优良抗风赤桉品系间接选择提供了依据，培育长势好又抗风的优良赤桉新品系是可能的。

2.4 赤桉抗风家系的综合评价

对 50 个家系进行主成分分析，取前 4 个主成分 PC1~PC4，其中，PC1 与各生长性状为正向效应，PC2 与纤维、材性性状呈正向效应，PC3 与纤维性状呈正向效应，PC4 与抗风性能呈负相关效应，因此根据育种目标选择 PC1，PC2，PC3 值大而 PC4 值小的家系，即可获得长势较好而风害较低的优良抗风家系。又由于所研究个体为 3~4 年生赤桉家系，因此将成活率作为重要影响因子考虑在内，先将 PC1，PC2，PC3，PC4 进行等权重计算得分后再与成活率等权重重新计算得分并各家系的秩次排名。以 10% 的入选率对 50 个赤桉家系进行评价选择，获得家系 2007，2006，20027，2005，2008 等 5 个家系(表 6)。家系的性状及遗传增益见表 7。入选的 5 个家系各性状遗传增益范围为 0.53~22.93，其中抗风性能(风害指数负值)最大，为 22.93，其次为树高(14.47)。其中单株材积的平均值为 49.29×10⁻³ m³，高于总平均值 4.96%，增益为 0.53；风害指数的平均值为 1.27 级，低于总平均值 1.85 级的 31.35%，遗传增益为 22.93。

表 6 综合评价排名前 5 的赤桉家系主成分指标值及成活率

Table 6 The top 5 families of <i>Eucalyptus camaldulensis</i> of principal component indices and survival rate					
家系	PC1	PC2	PC3	PC4	成活率/%
2007	0.046	0.828	-0.603	0.157	0.980
2006	-0.111	0.129	-0.468	0.711	0.980
20027	0.878	0.878	-1.026	-1.089	0.980
2005	0.067	0.755	-0.409	0.012	0.980
2008	-0.096	0.114	-0.492	-0.010	0.920

3 讨论

不同赤桉家系的生长及材性性状对抗风性的影响方差分析发现：除胸径、树皮厚度 2 个性状外，生长、材性、风害指数等其余 9 个性状在家系水平上差异显著，表明不同赤桉家系的生长和材性性状不同，抗风能力不同，这与已有的研究结果一致^[27]。变异系数和遗传分析表明，参试家系各性状的变异系

表 7 入选优良抗风家系与 50 个家系各性状平均值比较及遗传增益
Table 7 Comparison of average traits and genetic gain of fine families selected from 50 families

项目	纤维长 度/cm	纤维宽 度/ μm	纤维长 宽比	树高/m	胸径/ cm	单株材积/ ($\times 10^{-3} \text{ m}^3$)	树皮厚 度/cm	木材基本密 度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Pilodyn 值/mm	应力波 值/ μs	风害指 数/级
优树平均值	0.570	25.18	22.67	10.95	10.17	49.29	0.61	0.448	13.12	511.57	1.27
总平均值	0.578	25.43	22.78	9.86	10.12	46.96	0.59	0.447	13.0	489.79	1.85
差值率/%	-1.38	-0.98	-0.48	11.05	0.49	4.96	3.39	0.22	0.92	4.45	-31.35
遗传增益	3.16	2.42	1.83	14.47	3.54	0.53	1.82	4.86	4.97	7.14	-22.93

数较高，表明赤桉具有丰富的遗传变异，遗传改良潜力较大，使得选择生长与抗风性状优良的家系成为可能。遗传力分析表明单株和家系的纤维宽度、应力波值、木材基本密度、树高以及其风害指数等性状均具有中等以上的遗传力。

相关性分析可以体现各性状之间的关系，了解性状间的相关程度，有利于林木育种改良和提高效率。Pierson 相关分析表明：赤桉林木的风害指数主要与树高、单株材积、树皮厚度、应力波值显著相关，与沿海防护林木麻黄 *Casuarina equisetifolia*，相思 *Acacia* spp. 抗风性能的结果一致^[7]。进一步从遗传相关、环境相关、表型相关出发研究各性状基因型、环境因素分别对赤桉抗风性能的影响。赤桉所有生长性状及材性性状中，纤维宽度、Pilodyn 值、应力波值与抗风性能均存在极显著遗传相关性，树高、单株材积与赤桉风害指数存在极显著表型、环境负相关，纤维宽度、应力波值与风害指数存在显著表型相关，Pilodyn 值、应力波值与风害指数存在显著环境相关。表明赤桉生长性状中树高、材积与单株立木风害程度密切相关，其次是胸径和树皮厚度；材性性状中，应力波值与立木抗风性能有关，其次是纤维宽度和 Pilodyn，这与 Pierson 相关性分析结果一致^[28]。罗建中等^[1]在桉树杂交种生长与抗风的遗传变异研究中发现尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 子代的树高、胸径均和抗风能力呈正显著相关。本研究发现：在遗传、环境及表型上，树高、单株材积与抗风性能的相关系数均高于其他性状系数，说明林木抗风性是可以遗传的，树高和单株材积在很大程度上影响赤桉抗风性，表明林木大小是影响其抗风性的主要因子，其次是材性因子，这与 PHILIPPE 等^[28]认为树干大小是决定抗风/风害的重要影响因子之一的结论相符。

遗传增益是评价林木育种效果的重要参数，可以用来表明育成群体超出现有群体的多少来体现育种的成效。本研究利用主成分评价后和成活率进行等权重计算得分，对 50 个赤桉家系排名，最终选出 5 个抗风优良赤桉家系 2007，2006，20027，2005 和 2008。入选的家系抗风能力较强，树高改良效果较好，各性状的平均值均比总平均值有所增加。由于桉树是短周期轮伐树种，本研究采用的 3~4 年生赤桉生长性状、木材性状与风害指数进行联合分析，经 15 级强台风风害检测，其结果极具有代表性，因此，本研究筛选出的 5 个生长较快又抗风的家系可应用于生产实际。

4 参考文献

[1] 罗建中, 谢耀坚, 曹加光, 等. 2 年生桉树杂交种生长与抗风的遗传变异研究[J]. 草业学报, 2009, 18(6): 91 – 97.
LUO Jianzhong, XIE Yaojian, CAO Jiaguang, *et al.* Genetic variation in 2-year eucalypt hybrids' growth and typhoon resistance [J]. *Acta Pratac Sin*, 2009, 18(6): 91 – 97.

[2] LUO Jianzhong, ARNOLD R, LU Wanhong, *et al.* Genetic variation in *Eucalyptus camaldulensis* and *E. tereticornis* for early growth and susceptibility to the gall wasp *Leptocybe invasa* in China [J]. *Euphytica*, 2014, 196(3): 397 – 411.

[3] 杨民胜, 吴志华, 张维耀. 我国环北部湾地区发展桉树的思考[J]. 世界林业研究, 2016, 29(6): 64 – 69.
YANG Minsheng, WU Zhihua, ZHANG Weiyao. Thoughts on eucalypt plantation development strategy in Beibu Gulf Region of China [J]. *Word For Res*, 2016, 29(6): 64 – 69.

[4] 苏月秀, 彭道黎, 吴秀丽, 等. 我国主要林区森林经营现状及经验总结[J]. 林业调查规划, 2012, 37(1): 42 – 45.
SU Yuexiu, PENG Daoli, WU Xiuli, *et al.* Forest management status and experience in main forest regions of China [J]. *For Invent Plan*, 2012, 37(1): 42 – 45.

- [5] 国家林业局. 中国森林资源报告: 第 7 次全国森林资源清查[R]. 北京: 国家林业局, 2009.
- [6] 洪奕丰, 王小明, 周本智, 等. 闽东沿海防护林台风灾害的影响因子[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(4): 781 – 786.
- HONG Yifeng, WANG Xiaoming, ZHOU Benzhi, *et al.* Factors affecting the typhoon damage to coastal shelterbelt forests in eastern Fujian of East China [J]. *Chin J Ecol*, 2012, **31**(4): 781 – 786.
- [7] 吴志华, 李天会, 张华林, 等. 沿海防护林树种木麻黄和相思生长和抗风性状比较研究[J]. 草业学报, 2010, **19**(4): 166 – 175.
- WU Zhihua, LI Tianhui, ZHANG Hualin, *et al.* Studies on growth and wind-resistance traits of *Casuarina* and *Acacia* stands from coastal protection forest [J]. *Acta Pratac Sin*, 2010, **19**(4): 166 – 175.
- [8] 张樟德. 桉树人工林的发展与可持续经营[J]. 林业科学, 2008, **44**(7): 97 – 102.
- ZHANG Zhangde. A review on development situation and sustainable management of eucalypt plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44**(7): 97 – 102.
- [9] JACOBS M R. 桉树栽培[R]. 罗马: 联合国粮食及农业组织, 1979: 442 – 451.
- [10] 徐建民, 白嘉雨, 陆钊华. 华南地区桉树可持续遗传改良与育种策略[J]. 林业科学研究, 2001(6): 587 – 594.
- XU Jianmin, BAI Jiayu, LU Zhaohua. Some sustainable strategies of improvement and breeding for *Eucalyptus* tree species in Southern China [J]. *For Res*, 2001(6): 587 – 594.
- [11] 陈太安. 赤桉干燥预处理与干燥流变特性的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2004.
- CHEN Tai'an. *Study on Preheating and Rheological Behavior of Eucalyptus camaldulensis Lumber Drying* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2004.
- [12] 廖立, 涂登云, 李重根, 等. 热处理对尾赤桉木材物理力学性能的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, **33**(5): 128 – 131.
- LIAO Li, TU Dengyun, LI Chonggen, *et al.* Effects of heat treatment on physical-mechanical properties of *E. urophylla* × *E. camaldulensis* [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2013, **33**(5): 128 – 131.
- [13] 陈鸿鹏, 朱凤云, 吴志华, 等. 赤桉 ACT1 和 ACT2 基因的克隆与生物信息学分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2014, **22**(3): 242 – 249.
- CHEN Hongpeng, ZHU Fengyun, WU Zhihua, *et al.* Cloning and bioinformatics analysis of ACT1 and ACT2 genes from *Eucalyptus camaldulensis* [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2014, **22**(3): 242 – 249.
- [14] 谷振军, 章怀云, 张党权, 等. 赤桉 CCoAOMT 亚家族的基因克隆及可变剪接分析[J]. 林业科学, 2014, **50**(5): 62 – 68.
- GU Zhenjun, ZHANG Huaiyun, ZHANG Dangquan, *et al.* Gene cloning and alternative splicing of CCoAOMT subfamily genes from *Eucalyptus camaldulensis* [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, **50**(5): 62 – 68.
- [15] 陈鸿鹏, 朱凤云, 吴志华, 等. 赤桉 GAPDH 家族基因的克隆及其序列分析[J]. 林业科学研究, 2014, **27**(1): 120 – 127.
- CHEN Hongpeng, ZHU Fengyun, WU Zhihua, *et al.* Cloning and sequence analysis of GAPDH family genes from *Eucalyptus camaldulensis* [J]. *For Res*, 2014, **27**(1): 120 – 127.
- [16] 梁坤南, 白嘉雨. 尾叶桉种源一家系生长与抗风性选择[J]. 林业科学研究, 2003, **16**(6): 700 – 707.
- LIANG Kunnan, BAI Jiayu. Selection on growth and wind-resistance traits for provenances and families of *Eucalyptus urophylla* [J]. *For Res*, 2003, **16**(6): 700 – 707.
- [17] 卢万鸿, 罗建中, 谢耀坚, 等. 桉树幼林抗风特点研究[J]. 桉树科技, 2009, **26**(2): 21 – 25.
- LU Wanhong, LUO Jianzhong, XIE Yaojian, *et al.* Wind-resistance pattern of young eucalypt plantation [J]. *Eucalypt Sci Technol*, 2009, **26**(2): 21 – 25.
- [18] 王睿, 刘卫东, 高灵, 等. 赤桉家系的抗风性状与选择[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, **34**(11): 98 – 106.
- WANG Rui, LIU Weidong, GAO Ling, *et al.* Studied on wind resistance and family selection of *Eucalyptus camaldulensis* [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2014, **34**(11): 98 – 106.
- [19] 岑巨延. 广西桉树人工林二元立木材积动态模型研究[J]. 华南农业大学学报, 2007, **28**(1): 91 – 95.
- CEN Juyan. Study on two-way tree volume dynamic model of *Eucalyptus* plantations in Guangxi [J]. *J South Agric*

- Univ*, 2007, **28**(1): 91 – 95.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB /T 1933–2009 木材密度测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [21] 栾启福, 卢萍, 井振华, 等. Pilodyn 评估杂交松活立木的基本密度及其性状相关分析[J]. 江西农业大学学报, 2011, **33**(3): 548 – 552.
- LUAN Qifu, LU Ping, JING Zhenhua, *et al.* Assessment of wood basic density for standing trees of hybrid pines by Pilodyn and the correlation analysis of several traits [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2011, **33**(3): 548 – 552.
- [22] 管珣, 赵茂程, 王正. 基于应力波技术测试木材材质的研究进展[J]. 林业机械与木工设备, 2013, **41**(2): 15 – 17, 19.
- GUAN Xun, ZHAO Maocheng, WANG Zheng. Research progress in wood material testing based on stress wave technology [J]. *For Mach Woodworking Equip*, 2013, **41**(2): 15 – 17, 19.
- [23] 郭媚媚, 唐洁, 李文辉, 等. 1522 号强台风“彩虹”特征及成因分析[J]. 气象研究与应用, 2016, **37**(3): 69 – 73.
- GUO Meimei, TANG Jie, LI Wenhui, *et al.* Characteristics and cause analysis of No. 1522 severe typhoon “Mujigae” [J]. *J Meteorol Res Appl*, 2016, **37**(3): 69 – 73.
- [24] 黄少伟, 谢伟辉. 实用 SAS 编程与林业试验数据分析[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001.
- [25] WU Yu, MAO Changli. Heritability repetitive force in forest tree breeding and genetic gain concepts and thinking [J]. *Trop Agric Sci Technol*, 2012, **35**(1): 47 – 50.
- [26] 朱成庆. 雷州半岛桉树无性系抗风性的研究[J]. 林业科学研究, 2006, **19**(4): 532 – 536.
- ZHU Chengqing. Study on the wind-resistance traits of *Eucalyptus* clones in Leizhou Peninsula [J]. *For Res*, 2006, **19**(4): 532 – 536.
- [27] 吴志华, 李天会, 张华林, 等. 广东湛江地区绿化树种抗风性评价与分级选择[J]. 亚热带植物科学, 2011, **40**(1): 18 – 23.
- WU Zhihua, LI Tianhui, ZHANG Hualin, *et al.* Study on graduation and comprehensive evaluation of tree species wind-resistance in Zhanjiang, Guangdong Province [J]. *Subtrop Plant Sci*, 2011, **40**(1): 18 – 23.
- [28] PHILIPPE N, FRÉDÉRIK D, DANIEL B. Predicting stem windthrow probability in a northern hardwood forest using a wind intensity bio-indicator approach [J]. *Open J For*, 2012, **2**(2): 77 – 87.