

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.05.002

尾巨桉杂种 F_1 与抗风性关联的性状分析及其选优

沈 乐, 徐建民*, 李光友, 胡 杨, 伍世杰, 梁国坚, 白惠文

(中国林业科学研究院热带林业科学研究所, 热带林业研究国家林业和草原局重点实验室, 广东广州 510520)

摘要: [目的] 通过对尾巨桉杂种 F_1 抗风性状分析及选优, 为今后桉树抗风良种选育提供依据和奠定基础。[方法] 对 36 个尾叶桉×巨桉杂种 F_1 代的抗风值、生长性状、形质性状和材质性状进行遗传相关性分析, 并根据育种目标分别采用独立淘汰法与主成分分析进行选优。[结果] 尾叶桉×巨桉杂种的抗风性优于母本对照; 抗风值、生长性状和形质性状以及材质性状中的纤维宽在杂种组合间均呈显著或极显著差异, 在区组间均差异不显著。单株材积与材质性状均呈不显著遗传相关, 与木材基本密度、纤维宽、纤维长宽比以及木质素含量间呈显著或极显著表型正相关; 杂种抗风值与生长性状呈不显著遗传负相关及呈极显著表型负相关; 抗风值与纤维长、纤维宽呈显著遗传负相关, 与其他材质性状呈不显著遗传相关, 抗风值与纤维长、纤维宽、纤维长宽比呈显著或极显著表型负相关, 与半纤维素含量呈显著表型正相关。[结论] 尾巨桉杂种的抗风性优于尾叶桉母本, 且杂种的抗风值与纤维长、纤维宽呈显著遗传负相关; 采用独立淘汰法选出 3 个优良抗风杂种组合, 采用主成分分析法选出 7 个生长、材质、形质且抗风兼优的杂种。

关键词: 尾叶桉×巨桉; 抗风值; 生长性状; 材质性状; 形质性状; 主成分分析

中图分类号: S722.3⁺3; S792.39

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)05-0013-08

我国位于太平洋西部, 常受到台风危害, 华南地区是桉树人工林主要栽培区, 83% 的桉树种植在两广、海南和福建东南沿海, 该区域台风登陆频繁^[1], 抗风桉树品种的选育十分必要。早期抗风树种的选择主要用于以保护农田、果园和橡胶林, 以提高农业产量为目的设置防风林带^[2], 包括木麻黄 (*Casuarina*)、松树 (*Pinus*)、相思类 (*Acacia*) 和桉树 (*Eucalyptus*)^[3-5]; 在后期的研究中主要以提高林木木材产量为目的进行林木抗风选育, 主要研究内容为探索影响林木抗风能力的因素。近年来, 国内已逐步开展了桉树抗风遗传相关分析和分子育种研究^[6]。国外涉及林木抗风研究的很大一部分是通过构建林木风倒、风折的模型来研究林木抗风机

理^[7-8]。

影响林木抗风性的因素主要包括地形、立地条件、风力等气象因素和物种特性等, 从林木育种角度, 更多关注树种特性和生物学特性对林木抗风能力的影响, 已有学者对林木生长性状、形质性状、材质性状以及根系等对林木抗风性能的影响展开了研究, 其中, 相关研究表明, 根系数量是决定林木抗风性的主要因子之一^[9]; 浅根系使林木在台风中容易出现倒伏的情况^[10]; 朱成庆^[11]通过研究 27 个桉树无性系表明, 林木的高径比也是影响抗风性的主要因素之一; 国外学者研究发现, 树体较大的树木 (包括胸径和树高) 所受到的风害较严重^[12-13]; 许秀玉等^[14-15]研究表明, 在树体形态、根系与材性等

收稿日期: 2020-05-25 修回日期: 2020-07-08

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项“桉树速生抗风、耐寒优良品种选育研究”(CAFYBB2017ZA001-5); “热带及南亚热带人工林树种良种选育研究”(CAFYBB2018SZ002)

* 通讯作者: 徐建民, 研究员, 博士, 博士生导师. E-mail: jianmxu@163.com

影响因子中,木材材性所占权重最多,木材纤维宽度和弹性模量是影响总风害率的2个最主要指标,其中,纤维宽度是影响树木抗风性的最大因素。另有研究表明,飓风造成的树木死亡率和木材密度存在负相关关系^[16-17]; Francis^[18]同样发现,木材密度越高、弹性模量越大越不容易出现断干和倒伏现象,其中,冠幅、干形和叶片密度等形质性状也是影响抗风性能的主要因素之一。

2017年8月,13号强热带风暴“天鸽”在广东珠海、台山红岭之间登陆,中心附近风力14级。仅隔4d,14号台风“帕卡”又在广东台山东南部沿海登陆,中心附近风力12级,正面袭击了距离海岸线较近的本研究杂种子代测定林。国内针对桉树抗风性的研究中,大多以不同种源和无性系材料进行抗风性调查研究,未对具有完整交配设计的杂交种进行抗风评价,且鲜见木材化学组分与抗风性相关研究的报道。因此,本文依据“天鸽”和“帕卡”双

台风袭击后的风害调查数据,结合尾巨桉杂种生长、形质性状和木材材质性状进行相关分析,阐明尾巨桉杂种的抗风性与生长、形质性状,木材材性及化学组分之间的表型和遗传相关关系,并根据育种目标,采用独立淘汰法和主成分分析进行优选,旨在选出速生、材质优良且抗风的良种,并为今后桉树抗风良种选育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与田间试验铺设

试验林位于广东省江门市新会区罗坑镇(112°52'E, 22°22'N),试验地概况、试验设计和参试材料与参考文献[19]中的一致。尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)杂交组合以尾叶桉(*E. urophylla* S.T. Blake.)为母本、巨桉(*E. grandis* Hill.)为父本,采用6×6析因交配设计获得36个组合杂种(表1)。

表1 尾叶桉和巨桉6×6交配设计的交配列阵图

Table 1 Reciprocal crosses design among six *Eucalyptus urophylla* and six *E. grandis* parents

母本 Female♀	父本 Male♂					
	G5	G8	G9	G10	G19	G24
U2	U2G5	U2G8	U2G9	U2G10	U2G19	U2G24
U8	U8G5	U8G8	U8G9	U8G10	U8G19	U8G24
U15	U15G5	U15G8	U15G9	U15G10	U15G19	U15G24
U21	U21G5	U21G8	U21G9	U21G10	U21G19	U21G24
U55	U55G5	U55G8	U55G9	U55G10	U55G19	U55G24
DU1	DU1G5	DU1G8	DU1G9	DU1G10	DU1G19	DU1G24

1.2 生长、形质性状和材质性状的测定

台风危害前,测定了10.3年生时的生长性状(树高(H)、胸径(DBH))和材质性状材料的取样,调查保存率和形质性状(冠幅和干形)。冠幅以树干为中心,实测南、北2个方向的冠幅直径,取均值。干形分4级评定,1级为主干通直、无分叉或无大枝,得4分;2级为轻微弯曲,少分叉或有小枝,得3分;3级为1个弯曲,2个分叉或有小枝,得2分;4级为树干2个弯曲,有多分叉或2个以上大枝,得1分。单株材积(V, m^3)计算公式如下:

$$V = \pi \times (DBH/2)^2 \times H / 30\,000$$

1.2.1 材质性状材料取样 在5株小区中选取2株

平均木,沿南北方向在胸径处用内径5mm的生长锥钻取木芯。用于测定木材基本密度和纤维特性等材性指标;在样木朝南1.3m处取木质部3cm厚木块,磨成木材粉末过筛,取过40目不过60目粉末作为样品。

1.2.2 材质性状及化学组分的测定 木材基本密度采用排水法测定^[20],木芯经过离析后,采用纤维质量分析仪(FQA-code IDAO2)测定纤维长和纤维宽,并计算纤维长宽比。在6个重复中选择4个重复的样品测定木材的化学组分,样品经丙酮抽提后取绝干样品0.1g,并在样品中加入1.5mL72%硫酸,充分搅拌后加入56mL的去离子水,放置高压灭菌锅120min,使用G3坩埚进行抽滤,并将

坩埚放置 105℃ 烘箱烘 6 h, 烘干前后称质量, 坩埚前后质量差为不溶木素的含量; 另取 10 mL 抽滤得到的溶液, 使用紫外分光光度计测量酸溶木素含量, 剩余抽滤所得溶液用 5 mol·L⁻¹ 的氢氧化钠调至中性, 使用戴安离子色谱 ICS3000 型测量糖类含量^[21-22], 其中, 纤维素含量等于聚葡萄糖含量, 半纤维素含量等于聚阿拉伯糖、聚半乳糖、聚木糖、聚甘露糖 4 种聚糖的总和, 木质素含量等于不溶木素与酸溶木素之和。

1.3 抗风等级测定

风害调查与台风前生长、形质性状和材质性状取样时间仅相隔 15 d, 以 5 级风害等级评估林木受损情况, 估算相应的抗风值 (Wind resistance value; WRV)。I 级, 树干没有明显倾斜 (没有受风害), 得 5 分; II 级, 树干倾斜小于 45 度, 得 4 分; III 级, 树干倾斜大于 45 度, 不可恢复生长, 得 3 分; IV 级, 树干折断高度为树高 1/2 以上, 得 2 分; V 级, 树干折断高度为树高 1/2 以下, 得 1 分。

抗风和干形数据在进行方差分析、遗传参数估算前进行反正弦转换。风害后的保存率 (%) 和各级风害率计算公式如下:

保存率 = (I 级所占的数量 + II 级所占的数量) / 总株数 × 100%

I 级风害率 = I 级所占的数量 / 总株数 × 100%

II 级风害率 = II 级所占的数量 / 总株数 × 100%

III 级风害率 = III 级所占的数量 / 总株数 × 100%

IV 级风害率 = IV 级所占的数量 / 总株数 × 100%

V 级风害率 = V 级所占的数量 / 总株数 × 100%

1.4 选择方法

1.4.1 独立淘汰法选优 以纸浆材为培育目标, 选择单株材积、基本密度、抗风值均大于总体均值的杂种组合作为优良杂种。

1.4.2 主成分分析法选优 使用 R 统计软件对 13 个杂种性状进行主成分分析, 并根据主成分综合得分进行杂种排序, 具体方法参考文献^[23], 其中, 负向选择指标取其倒数使其正向化^[24]。

2 结果与分析

2.1 杂种的抗风表现

由图 1 可知: 尾巨桉杂种的 I 级、II 级风害率和总体保存率均显著高于尾叶桉纯种对照, 杂种的 III、IV、V 级风害率均显著低于对照, 表明杂种遭

受风害时产生的严重损害比对照少, 同时也反应了杂种的抗风表现明显优于纯种对照。将杂种分为 5 个径阶, 4 cm 为 1 个径阶^[25], 计算每个径阶的各级风害率。图 2 表明: 受台风影响, 试验林中杂种个体主要遭受 I 级和 V 级风害, 随着径阶的递增, V 级风害占比逐渐增多, 即个体胸径越大, 越易发生主干折断; 胸径为 26.0~29.9 cm 的林木全部被折断, 胸径为 6.0~9.9 cm 的林木比胸径为 10.0~17.9 cm 的林木更易发生主干折断。

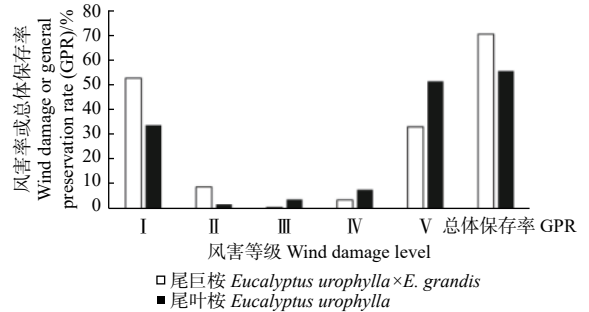


图 1 杂种与母本对照的各级风害率和总体保存率对比
Fig. 1 Comparison of wind damage rate and general preservation rate of hybrids and maternal as controls

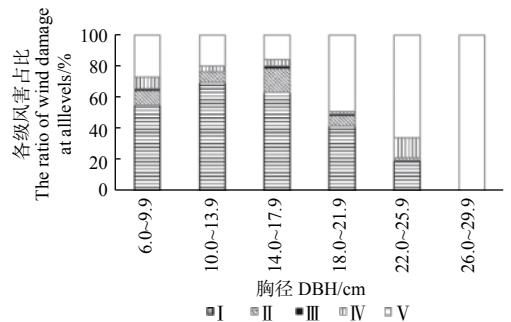


图 2 不同径阶的各级风害占比

Fig. 2 Wind damage rate of different diameter classes

2.2 抗风性、形质、生长性状和材质指标及其化学组分差异性分析

由表 2 可知: 抗风值在杂种组合间差异极显著 ($p < 0.01$), 说明针对抗风性对杂种组合进行选择是可行的; 在区组间差异不显著, 说明田间环境较一致。生长性状与形质性状杂种组合间均呈显著或极显著差异; 材质性状中纤维宽在杂种组合间差异极显著 ($p < 0.01$); 木材基本密度、木质素含量及半纤维素含量在区组间均差异极显著 ($p < 0.01$)。

2.3 生长与材性相关性分析

由表 3 可知: 单株材积与材质性状和化学组分间均呈不显著遗传相关, 与木材基本密度、纤维

表2 杂种 F₁ 各性状方差分析Table 2 Variance analysis of F₁ hybrids from *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* for traits

方差来源 Source	自由度 DF	抗风值 Wind resistance value <i>F</i>	形质性状 Form quality characters			生长性状 Growth traits			材质性状 Wood traits				自由度 DF	化学组分 Chemical composition		
			干形 <i>Stem</i>	冠幅 <i>CR</i>	树高 <i>H</i>	胸径 <i>DBH</i>	单株材积 <i>V</i>	基本密度 <i>BD</i>	纤维长 <i>FL</i>	纤维宽 <i>FW</i>	纤维长宽比 <i>FL/FW</i>	纤维素 <i>C</i>		木质素 <i>L</i>	半纤维素 <i>HC</i>	
																<i>F</i>
杂种 Hybrid	35	1.80**	2.30**	1.66*	1.5*	1.6*	1.7**	1.10	1.07	1.72**	0.96	35	1.04	0.86	0.63	
区组 Block	5	2.18	0.93	1.09	0.5	1.7	0.6	5.20**	1.25	0.75	0.88	3	1.03	4.17**	7.18**	

注:**表示差异极显著($p<0.01$), *表示差异显著($p<0.05$)。下同。
Notes: ** indicated extremely significant differences($p<0.01$), * indicated significant differences ($p<0.05$). The same below.

宽、纤维长宽比以及木质素含量呈显著或极显著表型正相关, 与纤维长呈极显著表型负相关, 与纤维

素、半纤维素含量呈不显著遗传、表型相关。

表3 杂种 F₁ 单株材积与材质性状及化学组分间的遗传、表型相关性Table 3 Genetic and phenotypic correlation between individual volume, wood traits and chemical composition of the F₁ hybrids from *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*

性状 Traits	基本密度 <i>BD</i>	纤维长 <i>FL</i>	纤维宽 <i>FW</i>	纤维长宽比 <i>FL/FW</i>	纤维素 <i>C</i>	木质素 <i>L</i>	半纤维素 <i>HC</i>
单株材积 <i>V</i>							
遗传 Genetic	-0.66	0.81	0.78	0.77	0.99	0.77	0.76
表型 Phenotypic	0.11*	-0.24**	0.12*	0.21**	0.07	0.27**	-0.02

2.4 抗风值与各性状的相关性分析

由表4可知: 杂种抗风值与生长性状呈不显著遗传负相关, 呈极显著表型负相关, 即林木树高、胸径、单株材积越大, 受风害影响越大; 抗风值与形质性状均呈不显著相关, 与纤维长、纤维宽呈显著遗传负相关, 与木材基本密度、纤维长宽比、纤维素含量、木质素含量和半纤维含量呈不显著的

遗传相关; 抗风值与纤维长、纤维宽、纤维长宽比呈显著或极显著的表型负相关, 即纤维长、纤维宽和纤维长宽比越大, 林木遭受的风害越严重, 纤维宽是负向选择指标, 纤维宽与抗风值可同步改良; 抗风值与半纤维素含量呈显著的表型正相关, 与木材基本密度、纤维素含量和木质素含量呈不显著相关。

表4 杂种 F₁ 抗风值与生长、形质、材质性状的遗传、表型相关性Table 4 Genetic and phenotypic correlation between wind resistance value (WRV) and growth, stem-form and wood traits from the F₁ hybrids of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*

性状 Traits	树高 <i>H</i>	胸径 <i>DBH</i>	单株材积 <i>V</i>	基本密度 <i>BD</i>	冠幅 <i>CR</i>	干形 <i>Stem</i>	纤维长 <i>FL</i>	纤维宽 <i>FW</i>	纤维长宽比 <i>FL/FW</i>	纤维素 <i>C</i>	木质素 <i>L</i>	半纤维 <i>HC</i>
抗风值												
遗传 Genetic	-0.20	-0.12	-0.34	0.68	-0.65	0.58	-0.90*	-0.89*	-0.61	-0.78	-0.71	-0.52
WRV												
表型 Phenotypic	-0.24**	-0.29**	-0.32**	0.08	-0.01	0.07	-0.26**	-0.17*	-0.20*	0.06	-0.06	0.13*

2.5 抗风优良杂种选择

2.5.1 独立淘汰法选优 以纸浆材为培育目标, 采用独立淘汰法结合单株材积、木材基本密度和抗风值进行联合选择, 结果(表5)表明: 入选的3个杂种单株材积、木材基本密度和抗风值的变化范围分别为0.121~0.128 m³、0.524~0.567 g·cm⁻³、3.500~4.059。36个杂种单株材积、木材基本密度和抗风

值的变化范围分别为0.050~0.154 m³、0.453~0.633 g·cm⁻³、1.71~4.45, 其中, 2个杂种来自母本U15, 表明该亲本具有良好的育种潜力。

2.5.2 主成分分析法综合选择 经过主成分分析, 前5个主成分的贡献率分别为31.59%、17.62%、12.03%、8.85%、8.05%, 累计代表全部性状的78.14%, 且合计特征值均大于1。根据计算样本相

表5 选优结果

Table 5 Result of superior F₁ hybrids

优良杂种 Superior hybrid	单株材积 <i>V</i> /m ³	基本密度 <i>BD</i> /(g·cm ⁻³)	抗风值 <i>WRV</i>
U2G24	0.126	0.567	4.059
U15G8	0.128	0.524	3.500
U15G19	0.121	0.535	3.750
总平均值 Overall mean	0.114	0.519	3.468

关矩阵的特征向量给出主成分的函数式分别为:

$$Y_1=0.420H+0.471DBH+0.456V-0.211Stem+0.421CR+0.180FL-0.251FW-0.214BD-0.140C$$

$$Y_2=-0.248Stem-0.550FL+0.108FW-0.128BD-0.557(FL/FW)+0.257L+0.456WRV$$

$$Y_3=0.139H+0.164V+0.130Stem-0.160CR-0.233FL+0.276FW+0.305BD-0.616L+0.230C+0.486HC$$

$$Y_4=0.295H+0.106V+0.244Stem+0.243CR-0.120FL-0.267FW-0.320(FL/FW)+0.597C-0.400HC-0.272WRV$$

$$Y_5=0.117V-0.577Stem+0.438FW+0.414BD+0.180(FL/FW)-0.457HC-0.179WRV$$

由上述函数式可知:在第1主成分 Y_1 中,胸径(DBH)的系数最大,其次是单株材积(V)、

冠幅(CR)和树高(H)的系数,表明第1主成分主要反映生长情况的综合指标;第2主成分 Y_2 中,抗风值(WRV)的系数最大,表明第2主成分主要反映抗风综合指标;第3主成分 Y_3 中,半纤维素含量(HC)的系数最大,其次为基本密度(BD),表明第3主成分主要反映木材材质的综合指标;第4主成分 Y_4 中,纤维素(C)的系数最大,表明第4主成分主要反映木材化学性质的综合指标;第5主成分 Y_5 中,纤维宽(FW)的系数最大,其次是基本密度(BD),表明第5主成分主要反映木材物理性质的综合指标。由表6可知:综合得分排名前7的杂种组合为U2G19、U21G19、U21G5、U55G5、U15G5、U8G10、U2G10;生长和冠幅表现(第1主成分值)排名前7名的杂种组合为U2G19、U15G5、U21G19、U55G5、U21G5、DU1G5、U2G10;抗风值表型(第2主成分值)排名前7名的杂种组合为U21G5、U8G5、U55G19、U15G19、U55G9、U8G19、U15G10;木材材质表现(第3、4、5主成分综合得分)排名前7名的杂种组合为U55G24、U8G9、U55G9、U55G8、U15G19、U15G24、U8G10。

表6 F₁杂种排名前7的各主成分值Table 6 Each principal component value (PCV) in the top 7 of F₁ hybrids

优良杂种 Superior hybrid	Y_1	优良杂种 Superior hybrid	Y_2	优良杂种 Superior hybrid	Y_3	优良杂种 Superior hybrid	$Y_{3,4,5}$
U2G19	1.12	U2G19	3.48	U21G5	3.93	U55G24	3.81
U21G19	1.03	U15G5	3.00	U8G5	3.13	U8G9	3.63
U21G5	0.87	U21G19	2.80	U55G19	2.26	U55G9	3.08
U55G5	0.81	U55G5	2.04	U15G19	1.43	U55G8	2.93
U15G5	0.73	U21G5	1.96	U55G9	1.34	U15G19	1.97
U8G10	0.60	DU1G5	1.56	U8G19	1.22	U15G24	1.58
U2G10	0.59	U2G10	1.35	U15G10	1.05	U8G10	1.36

3 讨论

生长性状中的单株材积与基本密度、纤维宽、纤维长宽比及木质素含量呈显著或极显著表型正相关,与纤维长呈极显著表型负相关,与纤维素和半纤维素含量呈不显著遗传正相关。尾赤桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. camaldulensis*)生长性状与基本密度、纤维长呈显著遗传及表型正相关,与纤维宽呈显著负相关^[26];尾细桉(*E. urophylla* × *E. tereticornis*)

的生长性状与基本密度、纤维素含量均呈显著遗传正相关,与半纤维素含量和木质素含量均呈显著遗传负相关^[27];蓝桉(*E. globulus* Labill.)的胸径与纤维素含量和木质素含量分别呈显著的遗传正相关和遗传负相关^[28],以上研究结果与本研究结果不完全一致,不同树种间生长性状与材质性状的相关关系不一致。另有研究表明,亮果桉(*E. nitens* Maiden.)胸径与基本密度在不同地点间的遗传相关模式不

同,在一个地点2个性状呈不显著正相关,另一个地点2个性状呈显著负相关,这表明生长与材质性状间的相关关系可能随着树种和环境的不同而改变^[29]。

抗风值与生长性状呈极显著表型负相关和不显著遗传负相关,表明林木长势越好,抗风能力越差。有学者通过对森林中不同树种抗风能力的研究证明,树木越大越容易遭受风害^[30]。本研究中,胸径为26.0~29.9、6.0~9.9 cm的林木比胸径为10.0~17.9 cm的林木更易发生主干折断。朱成庆^[11]对不同林龄的27个桉树无性系进行抗风性研究,结果表明,1年生幼龄林和5年生中龄林的风害率高于2~3年生的幼龄林。因此,在评价林木抗风能力与树木大小的相关关系时,应特别考虑林分生长阶段的不同抗风性。木材材性也是影响林木抗风性的主要因素之一,许多研究表明,木材物理性质和林木抗风能力具有一定的相关关系^[14-15,31],抗风树种通常木材纤维呈粗短状;也有研究表明,木材基本密度越大,主干损害程度越轻,其抗风能力越强^[17]。本研究中,抗风值与木材基本密度及纤维素、木质素含量相关不显著,可能是因为本次台风风力大,加之林木树木大,其风害类型主要集中在主干折断。

基本密度为木材性质最基本的指标,在育种实践中可考虑优先基本密度的选择^[32],因此,本研究采用独立淘汰法,结合单株材积、木材基本密度和抗风值选出3个优良杂种U2G24、U15G8、U15G19,其中,2个杂种来自同一母本U15;采用主成分分析,选出了主成分综合得分排名前7的杂种组合,分别为U2G19、U21G19、U21G5、U55G5、U15G5、U8G10、U2G10。独立淘汰法选出的杂种U15G19在抗风表现(第2主成分值)中排名第4,在木材材质表现(第3、4、5主成分综合得分)排名中第5。2次选优的结果不完全一致的原因可能为主成分分析中不同主成分的贡献率不同,而采用独立淘汰法所涉及的经济性状较少,并默认赋予相同权重,但采用独立淘汰法注意各个性状的极端表现,可作为特殊的种质资源开发利用。

4 结论

尾巨桉杂种的整体抗风优于尾叶桉母本对照,且杂种的抗风值与纤维长、纤维宽呈显著遗传负相

关。采用独立淘汰法,以纸浆材为选育目标,结合材积、木材基本密度和抗风值选出3个优良杂种,分别为U2G24、U15G8、U15G19。采用主成分分析综合选择,综合表现较好的前7个杂种分别为U2G19、U21G19、U21G5、U55G5、U15G5、U8G10、U2G10。

参考文献:

- [1] 杨慧娟,李 宁,雷 颢.我国沿海地区近54 a台风灾害风险特征分析[J].气象科学,2007,27(4): 413-418.
- [2] 关德新,朱延曜.林带结构与抗风能力关系的理论分析[J].北京林业大学学报,1998,20(4): 122-124.
- [3] 朱教君,姜凤岐.国内外防护林防护成熟的研究概况[J].防护林科技,1993,5(3): 26-30.
- [4] 徐俊森,叶维忠,曾国强,等.沙质海岸后沿木麻黄混交造林效果的试验研究[J].防护林科技,2000(S1): 116-118.
- [5] 叶功富.滨海沙地湿地松与木麻黄混交林构建和调控技术研究[J].林业科学研究,2002,15(4): 463-468.
- [6] 尚秀华.赤桉抗风特性及其重要性状的关联分析[D].北京:中国林业科学研究院,2017.
- [7] Lanquayepoku N, Mitchell S J. Portability of stand-level empirical windthrow risk models[J]. Forest Ecology & Management, 2005, 216(1): 134-148.
- [8] Scott R E, Mitchell S J. Empirical modelling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighbourhood, and stand attributes[J]. Forest Ecology & Management, 2005, 218(1): 193-209.
- [9] 张华林,谢耀坚,李天会,等.不同林分密度桉树幼林抗风性比较研究[J].桉树科技,2009,26(2): 15-20.
- [10] Jim C Y, Liu H T. Storm damage on urban trees in Guangzhou, China[J]. Landscape and Urban Planning, 1997, 38(1-2): 45-59.
- [11] 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.
- [12] Covich A P, Crowl T A, Johnson S L, et al. Tree damage and recovery from Hurricane Hugo in Luquillo experimental forest, Puerto Rico[J]. Biotropica, 1991, 23(4a): 379-385.
- [13] Harcombe P A, Glitzetein J S. Effects of the December 1983 tornado on forest vegetation of the Big Thicket, southeast Texas, USA[J]. Forest Ecology & Management, 1988, 25(3): 269-290.
- [14] 许秀玉,肖 莉,王明怀,等.沿海抗台风树种评价体系构建与选择[J].浙江农林大学学报,2015,32(4): 516-522.
- [15] 许秀玉,王明怀,仲崇禄,等.不同树种木材性质及其抗台风性能[J].浙江农林大学学报,2014,31(5): 751-757.
- [16] Putz F E, Coley P D, Lu K, et al. Uprooting and snapping of trees: structural determinants and ecological consequence[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1983, 13(5): 1011-1020.
- [17] Zimmerman J K, Edwin M, Waide R B, et al. Responses of tree species to hurricane winds in subtropical wet forest in Puerto Rico: im-

- plications for tropical tree life histories[J]. *Journal of Ecology*, 1994, 82(4): 911-922.
- [18] Francis J K. Comparison of hurricane damage to several species of urban trees in San Juan, Puerto Rico[J]. *Journal of Arboriculture*, 2000, 26(4): 189-197.
- [19] 沈乐,徐建民,李光友,等.尾叶桉与巨桉杂种F₁代生长性状遗传分析[J]. *林业科学*, 2019, 55(7): 68-76.
- [20] 徐有明,江泽慧,李丽霞,等.火炬松不同种源纸浆材材性的变异[J]. *林业科学*, 2008, 44(8): 82-89.
- [21] Min D, Li Q, Jameel H, *et al.* Comparison of pretreatment protocols for cellulase-mediated saccharification of wood derived from trigenic low-xylan lines of cottonwood (*P. trichocarpa*)[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(8): 3514-3521.
- [22] Xiang Z, Sen S K, Min D, *et al.* Field-grown trigenic hybrid poplar with modified lignin biosynthesis to improve enzymatic saccharification efficiency[J]. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2017, 5(3): 2407-2414.
- [23] 杨志玲,龚榜初,陈增华,等.锥栗果实经济性状的数量化分析[J]. *林业科学研究*, 2001, 14(1): 90-94.
- [24] 钞小静,惠康.中国经济增长质量的测度[J]. *数量经济技术经济研究*, 2009, 8(6): 75-86.
- [25] 吴富桢.测树学[M].北京:中国林业出版社,1992.
- [26] 朱映安,徐建民,李光友,等.尾叶桉与赤桉正反析因交配杂种F₁材性遗传参数的估算[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(6): 121-129.
- [27] 陈升侃,周长品,翁启杰,等.尾叶桉细叶桉木材密度与生长的联合选择[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(2): 77-82.
- [28] Stackpole D J, Vaillancourt R E, Aguigar M D, *et al.* Age trends in genetic parameters for growth and wood density in *Eucalyptus globulus*[J]. *Tree Genetics & Genomes*, 2010, 6(2): 179-193.
- [29] Hardner C M, Tibbits W N. Inbreeding depression for growth, wood and fecundity traits in *Eucalyptus nite*[J]. *Forest Genetics*, 1998, 51(1): 11-20.
- [30] Everham E M, Brokaw I V L. Forest damage and recovery from catastrophic wind[J]. *Botanical Review*, 1996, 62(2): 113-185.
- [31] Philippe N, Frederik 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.
- [32] 李昌荣,陈健波,郭东强,等.锯材大花序桉生长和材性的综合指数选择[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2019, 43(1): 1-8.

Correlation Analysis and Selection on Wind Resistance and Correlative Characters of *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis* F₁ Hybrids

SHEN Le, XU Jian-min, LI Guang-you, HU Yang, WU Shi-jie, LIANG Guo-jian, BAI Hui-wen

(Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Tropical Forestry Research National Forestry Administration Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] To analyze the wind resistance and select the F₁ hybrids of *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis*, in order to provide the references for eucalyptus's breeding the improved wind-resistant varieties. [Method] Genetic and phenotypic correlation among growth traits, wood traits and wind-resistant of the F₁ hybrids from *E. urophylla*×*E. grandis* were analyzed. And independent culling and principal component analysis were used to select the best hybrid according to the breeding objective. [Result] The wind resistance performance of the hybrids selected was obviously better than that of the control. The wind resistance value, growth traits, form traits and fiber width of wood traits exhibited significant differences ($p<0.05$) or extremely significant differences ($p<0.01$) among cross combinations, and showed no essential differences among blocks. The trait-trait genetic correlations between individual volume and wood traits were not significant. The trait-trait phenotypic correlations between individual volume and basic density, fiber width (FW), ratio of fiber length to fiber width (FL/FW) and lignin were significantly negative. The trait-trait genetic correlations between wind resistance value and growth traits were not significant. The trait-trait phenotypic correlations between wind resistance value and growth traits were significantly positive or extremely significantly positive. The genetic correlations were significantly negative between wind resistance and fiber length (FL), FW. The genetic correlations were not significant between wind resistance and remainder wood traits. The phenotypic correlations were significantly negative between wind resistance and FL, FW, FL/FW, and were significantly positive between wind resistance and hemicellulose, but were not significantly positive between wind resistance and basic density, cellulose, lignin. [Conclusion] The wind resistance performance of hybrids is obviously better than *E. urophylla* parents. The genetic correlations are significantly negative between wind resistance and FL, FW. Three hybrid combinations are selected by using independent culling and comprehensive index methods. And a total of 7 superior cross combinations, which are superior in growth, quality together with morphology, are determined according to principal component analysis.

Keywords: *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis*; wind-resistance value; growth traits; wood traits; form quality characters; principal component analysis

(责任编辑: 徐玉秀)