

15 个桉树无性系基因与环境互作研究

付朝阳¹, 邓冬莲², 黎世鑫¹, 黄加宜¹, 马忠才¹, 熊涛^{1*}

(1. 广西国有东门林场, 广西 扶绥 532108; 2. 广西国有七坡林场, 广西 南宁 530219)

摘要: 针对桉树人工林造林树种单一, 为桉树优良无性系选育、开发、测试提供依据和参考, 本研究对 15 个桉树无性系在 3 种不同立地条件下的生长表现进行了对比研究, 对生长性状的基因型和环境互作效应做了系统的分析。结果表明: 无性系 Y9 在 3 种立地条件下表现相对稳定且生长性状优良, 其树高、胸径、材积的基因效应为 2.33、2.36、0.046 8, 要远大于环境效应, 说明生长表现受环境影响较小, 其广泛的适应性和稳定性具有潜在的推广价值, 15 个杂交桉无性系生长性状基因型与环境互作效应强度各不相同, 互作效应大小与方向在无性系与地点间不同而发生变化, 表明了基因型与环境型的复杂性和多样性。在三个点抗风性最好的无性系为 Y7、Y9、Y6、Y15, 沿海台风地区 Y7、Y9、Y6、Y15 具有较大的推广潜力。本研究在一定程度上能为桉树无性系选育、测试、推广提供参考。

关键词: 桉树; 无性系; 基因环境互作; 抗风性

中图分类号: S758.5+2

文献标识码: A

Study on Genotype × Environment Interactions of 15 *Eucalyptus* Clones

FU Chaoyang¹, DENG Donglian², LI Shixin¹, HUANG Jiayi¹, MA Zhongcai¹, XIONG Tao¹

(1. Guangxi Dongmen State-owned Forest Farm, Fusui 532108, Guangxi, China;

2. Guangxi Qipo State-owned Forest Farm, Nanning 530219, Guangxi, China)

Abstract: Growth performance of 15 *Eucalyptus* clones under three different site conditions was evaluated in order to systematically analyze genotype by environment interaction effects for such traits. The results showed that clone Y9 had relatively stable performance and has good growth characteristics under the three site conditions examined. The genetic effects for height, DBH and volume were 2.33, 2.36 and 0.046 8 respectively, and these were much greater than the corresponding environmental effects showing that the growth performance was less affected by environment. The latter situation suggests this clone has wide adaptability and stability, and these characteristics provide potential for extending this clone to other environments. The intensity of genotype by environment interactions for growth traits varied among the 15 hybrid *Eucalyptus* clones examined and also varied between sites, indicating the complexity and diversity of the genotype by environment interactions. Clones Y7, Y9, Y6 and Y15 were the clones with the best wind resistance across the three sites, with these four clones having great potential for promotion and extension in coastal typhoon susceptible areas. The results in this current study provide an important reference for testing, selection, and promotion of improved *Eucalyptus* clones.

Key words: *Eucalyptus*; clones; genotype × environment interaction; wind-resistance

桉树(*Eucalyptus*)由于其速生丰产的优良特性, 是目前重要的人工林造林树种, 也是一种重要的用材树种, 目前我国以广东、广西地区种植面积最大, 占我国桉树人工林面积的 75%^[1]。华南地区当前主要的造林树种是尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*), 有

少量的巨桉(*E. grandis*)、邓恩桉(*E. dunnii*)、粗皮桉(*E. pellita*)、昆士兰桉(*E. cloeziana*)^[2], 西南地区种植的是较耐寒和耐旱的史密斯桉(*E. smithii*)、直杆蓝桉(*E. maidenii*)^[3]。随着发展, 桉树人工无性系造林的问题逐渐凸显出来, 如无性系退化、品种单一、缺

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFD0601202)

作者简介: 付朝阳(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事桉树营林抚育管理工作, E-mail: 361190561@qq.com

*通信作者: 熊涛(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事桉树遗传改良及无性系开发研究, E-mail: 704423155@qq.com

乏抗性等^[4],近年国内学者在杂交育种及优良无性系选育方面做了大量研究,选育出一些优良无性系,广西国有东门林场在中澳合作项目中引种 178 个桉树树种,选育出了 DH 系列优良无性系^[5],在此基础上,东门林场又选育出了大量优良无性系^[6]。桉树无性系推出之前需在不同地区进行生长表型对比试验,桉树生长表现是基因与环境共同作用的结果,分析桉树基因与环境互作程度能有效评价桉树对不同环境的适应性,这对桉树优良无性系选育和推广有重要意义。研究基因与环境互作常用的方法是建立线性模型^[7-8],评价其基因效应、环境效应和互作效应,ALMEIDA 等^[9]通过研究发现尾叶桉核心材比率同时受基因和环境的影响,其中气候因子的影响大于遗传因子;ESTHER 等^[10]对巴西 10 个地点的

桉树无性系进行了对比研究,发现环境对生长量的影响较大,其中温度和降水对桉树的生长影响最大,卢万鸿等^[11]对桉树无性系基因与环境互作的关系进行了初步的定性分析。

本研究通过对 15 个无性系在不同的立地条件下生长表现进行对比,分析环境因素对其生长表现的影响,分析基因与环境互作的强度,评价测试无性系的适应性和稳定性,为优良无性系选育和推广提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地分别设在广西和广东,见表 1。

表 1 试验地地理及气候基本情况

试验点	经度	纬度	海拔/m	坡度/°	土壤类型	土层厚度/cm	年降雨量/mm	年均气温/°C	土壤 pH	气候
东门	107°78'E	22°34'N	185	5~8	赤红壤	>80	1 300.0	21.0	4.5~6.0	北热带季风气候
梧州	111°37'E	23°48'N	51	6~9	红壤	>80	1 650.0	21.4	4.06~4.68	亚热带季风气候
雷州	109°79'E	20°93'N	33	3~5	砖红壤	>100	1 711.6	22.0	4.7~5.5	热带湿润性季风气候

1.2 试验材料

参试材料见表 2,以尾巨桉为对照(CK)。

表 2 参试材料基本情况

序号	中文名	拉丁名称	无性系编号	来源	个数
1	粗尾桉	<i>E.pellita</i> × <i>E.urophylla</i>	Y8	桉树中心*	1
2	尾粗桉	<i>E.urophylla</i> × <i>E.pellita</i>	Y11	桉树中心	1
3	韦塔桉	<i>Eucalyptus wetarensis</i>	Y12	桉树中心	1
4	尾巨桉	<i>E.urophylla</i> × <i>E.grandis</i>	Y1、Y6	桉树中心	2
5	尾细桉	<i>E.urophylla</i> × <i>E.tereticornis</i>	Y2	桉树中心	1
6	尾叶桉	<i>E.urophylla</i>	Y14	桉树中心	1
7	细粗桉	<i>E.tereticornis</i> × <i>E.pellita</i>	Y3、Y4	桉树中心	2
8	细巨桉	<i>E.tereticornis</i> × <i>E.grandis</i>	Y5、Y7	桉树中心	2
9	细韦桉	<i>E.tereticornis</i> × <i>E.wetarensis</i>	Y13、Y15	桉树中心	2
10	细尾桉	<i>E.tereticornis</i> × <i>E.urophylla</i>	Y9、Y10	桉树中心	2
11	尾巨桉(CK)	<i>E.urophylla</i> × <i>E.grandis</i>	Y16	东门林场	1

注:桉树中心为国家林业和草原局桉树研究开发中心的简称。

1.3 试验设计

试验林建设于 2014 年 6 月。采用完全随机区

组设计,共计 4 个重复,每重复 16 个处理,4 行 5 株小区。试验苗木为轻基质组培苗,苗龄为 3~4

个月,平均苗木高度为25~30 cm,地径为 ≥ 0.25 cm。株行距为2 m \times 3 m,造林密度1 667株 hm⁻²,外围种植2行保护行品种为试验多余苗木。

于2017年11月进行林木调查,本文测定时选取每个小区内第2、3行样本每木检尺数据作为统计分析材料样本,即每个重复每个无性系样本数为10株,对树高、胸径每木检尺。根据胸径、树高相关数据来进行无性系单株材积计算。

1.4 数据分析

1.4.1 材积

采用广西林业勘测设计院研制的公式计算单株材积^[12]:

$$\text{单株材积}(V)\text{计算公式: } V=0.000\ 039\ 269D^2H$$

式中: V 表示单株材积 m³, D 表示胸径 cm, H 表示树高 m。

1.4.2 一年多试验方差分析

采用DPS进行对参试无性系3个不同地点进行一年多区域统计分析。

方差分析线性模型^[13]为:

$$Y_{ijk}=\mu+B_i+C_j+(BC)_{ij}+E_{ijk}$$

式中: Y_{ijk} 为第*i*区组*j*品系第*k*个观测值;

μ 为总平均值,固定效应;

B_i 为第*i*个区组($i=1,2,3, \dots$)的固定效应值;

C_j 为第*j*个品系($j=1,2,3, \dots$)的固定效应值;

$(BC)_{ij}$ 为第*i*小区第*j*个品系的随机互作效应值;

E_{ijk} 为第*ij*小区第*k*个单株的机误,

$k=1,2,3, \dots N$ 。

1.4.3 遗传参数估算

遗传方差 σ_g^2 =(无性系间期望均方-机误期望均方)/重复数;环境方差 σ_e^2 =机误;表现方差 σ_p^2 =遗传方差+环境方差= $\sigma_g^2 + \sigma_e^2$

变异系数计算公式^[14-15]:

$$\text{遗传变异系数 GVC}=\sqrt{\sigma_g^2/\mu}\times 100\%;$$

$$\text{表型变异系数: PVC}=\sqrt{\sigma_g^2 + \sigma_e^2/\mu}\times 100\%。$$

以上式中: σ_g^2 为无性系间的方差分量, r 为重

复数; σ_e^2 为误差项分量即环境方差; μ 为平均值。因此,广义遗传力^[16-17]=(无性系间期望均方-机误期望均方)/(无性系间期望均方+(重复数-1)机误期望均方)= σ_g^2/σ_p^2

1.4.4 基因型与环境互作

模型^[18]为: $y_{ijk}=\mu+g_i+e_j+(ge)_{ij}+q_{ijk}$, 式中: y_{ijk} 为第*i*个基因第*j*环境中第*k*个观测值; μ 为总体平均值; g_i 为第*i*个基因效应值; e_j 为第*j*环境效应值; $(ge)_{ij}$ 为基因*i*与环境*j*互作效应值; q_{ijk} 为机误。

1.4.5 风害分析

风害参考朱成庆^[19]、王建忠等^[20]的研究方法。结合本次研究3个试验点实际情况,设4个评判等级,以树高2 m位置与水平垂直夹角 θ 为参试分级,若 $0<\theta\leq 15^\circ$,定为I级; $15<\theta\leq 45^\circ$,定为II级;夹角介于 $45^\circ<\theta<90^\circ$ 和树冠中上部及以上树梢断顶,定为III级; $\theta=90^\circ$ 倒伏和树冠中下部及以下折断定位IV级。

$$\text{风害率}/\%=\frac{\text{某级受害株数}}{\text{调查总株数}}$$

$$\text{总风害率}/\%=\frac{\text{各级受害总株数}}{\text{总调查株数}}$$

$$\text{风害指数}/\%=\frac{\sum(\text{受害级数}\times\text{受害株数})}{\text{总调查株数}\times\text{最高风害级数}}$$

2 结果与分析

2.1 生长性状变异分析

由表3可知,3.5 a生时雷州点的试验林分生长表现最好,该点胸径、树高、材积均值分别达11.9 cm、15.7 m、0.099 5 m³,相对应的变异系数分别为24.2%、20.7%、56.5%;其次是东门点,其胸径、树高、材积均值分别为10.2 cm、15.4 m、0.0731 m³,相对应的变异系数分别为24.8%、20.5%、61.0%;梧州排在最后,胸径、树高、材积均值分别达9.8 cm、12.8 m、0.055 0 m³,相对应的变异系数分别为23.3%、23.3%、59.3%。3个试验点胸径、树高、材积具有丰富的变异。

2.2 一年多点试验方差分析

对每个试验点参试无性系按照重复取均值进行一年多点试验方差分析,自由度确定方法:df 地点内区组=地点数×(区组数-1);df 品种×地点=(品种数-1)×(地点数-1)。结果表明(表 3~4):胸径、树高

和材积在地点内区组、地点、品种、品种和地点间存在差异。试验造林过程中,严格按照随机完全区组设计,所获得的观测数据均符合方差分析要求。3 个点生长具有丰富的变异。

表 3 3.5 a 生桉树无性系试验林表型分析

指标	东门			梧州			雷州		
	DBH/cm	H/m	V/m ³	DBH/cm	H/m	V/m ³	DBH/cm	H/m	V/m ³
均值	10.2±0.11	15.4±0.16	0.073 1±0.001 9	9.8±0.10	12.8±0.13	0.055 0±0.001 5	11.9±0.15	15.7±0.17	0.099 5±0.003 0
标准差	2.5	3.8	0.0446	2.3	3	0.0326	2.9	3.2	0.0562
变幅	14.9	18.2	0.2204	13.2	13.8	0.1975	17.5	18.5	0.2935
变异系数/%	24.8	24.5	61.0	23.3	23.3	59.3	24.2	20.7	56.5

表 4 试验方差分析表

项目	自由 度 df	H			DBH			V		
		均方	F 值	P 值	均方	F 值	P 值	均方	F 值	P 值
地点内区组	9	0.852 6	0.564 2	0.824 4	3.154 9	1.223 4	0.285 7	0.000 5	1.041 9	0.410 3
地点	2	70.610 2	46.721 3	0.000 0**	173.670 8	67.347 9	0.000 0**	0.027 4	56.771 8	0.000 0**
品种	15	14.094 8	9.326 2	0.000 0**	35.386 1	13.722 4	0.000 0**	0.004 2	8.812 5	0.000 0**
品种×地点	30	2.629 2	1.739 7	0.017 7*	4.394 9	1.704 3	0.021 5*	0.000 6	1.215 8	0.022 5*

注:表中“*”表示差异显著,“**”表示差异极显著,风倒木、折断株未参与分析。

2.3 遗传参数分析

对试验林生长性状遗传参数估算,对无性系选择和推广具有重要意义。由表 5 可知,各个性状的变异系数差异很大,但是表型变异系数和遗传变异系数趋势相同,胸径、树高、单株材积表型变异系数分别达 16.09%、17.32%、40.15%,说明单株材积的变异受到胸径和树高的影响。各性状指标之间遗传力值相近,遗传力值说明生长性状变异主要来自各无性系的基因型差异。试验各地点方差控制得较为正常,表型变异系数大于遗传变异系数。材积性状的变异系数明显大于胸径和树高性状,胸径性状最小。

2.4 各无性系 3 个地点树高基因型与环境互作分析

Y6 无性系的基因效应数值最大为 1.95(表 6),在东门、梧州和雷州 3 个地点上的环境效应分别为 0.92、-1.94、1.01;Y8 无性系的基因效应数值最小为-4.26。在 3 个点桉树无性系树高基因型效应与环

境效应中,东门点和雷州点的环境效应为正数值,梧州点的负数值,说明树高因子受环境效应影响较大,不同的立地条件直接影响杂交桉的高生长。

表 5 3 个地点无性系生长性状遗传参数估算

参数	DBH/cm	H/m	V/m ³
表型均值	10.6	15.4	0.073 1
变幅	5.8 ~ 14.8	7.2 ~ 19.7	0.010 4 ~ 0.171 2
表型方差	2.909 5	6.224 0	0.0009
遗传方差	1.398 2	3.645 3	0.0004
环境方差	1.511 3	2.578 7	0.0005
广义遗传力	0.480 6	0.585 7	0.464 7
遗传变异 系数/%	11.16	13.26	27.37
表型变异 系数/%	16.09	17.32	40.15

2.5 各无性系 3 个地点胸径基因型与环境互作分析

Y15 无性系的基因效应数值最大为 0.95, 在东门、梧州和雷州 3 个地点上的环境效应分别为-0.46、-0.80、1.26; Y14 无性系的基因效应数值最小为

-1.84。在 3 个点桉树无性系胸径基因型效应与环境效应中, 雷州点的环境效应为正数值, 东门点和梧州点的负数值, 表明雷州点的无性系的表现受环境影响较高。

表 6 树高、胸径、材积基因型效应与环境互作分析

品系	H				DBH				V			
	东门	梧州	雷州	基因型效应	东门	梧州	雷州	基因型效应	东门	梧州	雷州	基因型效应
Y1	12.59	10.46	14.85	-1.74	8.70	9.33	11.40	-0.76	0.043 2	0.038 7	0.085 0	-0.018 4
Y2	15.42	13.48	15.68	0.49	11.20	10.56	11.79	0.61	0.082 0	0.061 5	0.093 3	0.004 9
Y3	16.60	12.33	14.31	0.04	10.79	9.90	10.35	-0.22	0.086 0	0.056 8	0.074 9	-0.001 4
Y4	13.59	12.59	14.78	-0.72	9.13	10.55	12.06	0.01	0.054 6	0.066 1	0.094 2	-0.002 4
Y5	14.26	12.73	13.62	-0.83	10.81	10.33	11.76	0.39	0.073 4	0.056 3	0.085 5	-0.002 3
Y6	17.27	14.34	17.37	1.95	10.17	9.35	12.40	0.07	0.076 6	0.051 8	0.107 3	0.004 6
Y7	15.33	14.36	17.22	1.26	9.57	10.38	12.42	0.22	0.063 9	0.064 5	0.112 5	0.006 3
Y8	9.22	7.96	13.15	-4.26	7.33	6.76	10.60	-2.34	0.023 0	0.016 3	0.073 6	-0.036 4
Y9	17.87	14.81	17.42	2.33	12.53	12.23	14.03	2.36	0.120 0	0.093 3	0.149 2	0.046 8
Y10	16.41	11.63	14.29	-0.26	10.15	11.75	11.40	0.53	0.077 1	0.070 7	0.079 4	0.001 7
Y11	14.18	12.21	14.44	-0.76	9.56	9.73	11.04	-0.46	0.057 9	0.051 1	0.085 4	-0.009 2
Y12	17.57	13.50	16.59	1.52	10.70	9.34	11.89	0.07	0.085 3	0.051 7	0.095 5	0.003 5
Y13	16.38	13.53	15.96	0.92	10.11	10.10	12.80	0.43	0.074 1	0.057 4	0.116 9	0.008 8
Y14	14.59	8.82	14.84	-1.62	9.04	6.51	10.63	-1.84	0.051 1	0.016 3	0.077 0	-0.025 9
Y15	18.02	13.71	16.24	1.62	11.83	9.78	12.94	0.95	0.107 7	0.056 9	0.117 0	0.019 9
环境效应	0.92	-1.94	1.01		-0.46	-0.80	1.26		-0.002 3	-0.020 0	0.022 4	

2.6 各无性系 3 个地点材积基因型与环境互作分析

由表 6 可知, Y9 无性系材积基因效应数值最大为 0.046 8, 在东门、梧州和雷州 3 个地点上的环境效应分别为-0.002 3、-0.020 0、0.022 4; Y8 无性系的基因效应数值最小为-0.036 4, 在东门、梧州和雷州三个地点上的环境效应分别为 0.023 0、0.016 3、0.073 6。在 3 个点桉树无性系材积基因型效应与环境效应中, 雷州点的环境效应为正数值, 东门点和梧州点的负数值, 此项结果与胸径指标分析结果一致, 充分说明了雷州点的无性系在胸径和材积上表现为受环境影响较高。

2.7 抗风性评价

2.7.1 东门点各无性系风害分析

由表 7 可知, 受 I 级风害最严重无性系为 Y1, 抵抗性最强无性系为 Y15, 其风害率分别为

43.24%、2.63%; 受 II 级风害最严重无性系为 Y10, 其风害率为 23.08%; 受 III 级风害最严重无性系为 Y8, 其风害率为 18.92%; 受 IV 级风害最严重无性系为 Y8, 其风害率高达 70.27%。根据风害指数比较, 在东门点表现最好无性系为 Y15, 其风害指数仅 0.66%, 表现最差无性系为 Y8, 其总风害率达 100%, 风害指数达 88.51%。

2.7.2 梧州点各无性系风害分析

受 I 级风害最严重无性系为对照 CK, 抵抗性最强无性系为 Y9, 其风害率分别为 39.47%、2.63%; 受 II 级风害最严重无性系为 Y14, 其风害为 21.05%; 受 III 级风害最严重无性系为 Y8, 其风害率为 34.48%; 受 IV 级风害最严重无性系为 Y10, 其风害率高达 52.38%。根据风害指数比较, 抗风性由于对照品种有 9 个, 在梧州点表现最好无性系为 Y7,

其风害指数为 7.24%，表现最差无性系为 Y8，其总风害率达 96.55%，风害指数达 80.17%。

2.7.3 雷州点各无性系风害分析

表 7 的数据表明，受 I 级风害最严重无性系为对照 CK，其风害率为 25.00%；受 II 级风害最严重无性系为对照 CK，其风害率为 19.44%；受 III 级风害最严重无性系为 Y1，其风害率为 42.42%；受 IV 级风害最严重无性系为 Y10，其风害率高达 70.00%。根据风害指数比较，抗风性由于对照品种

有 11 个，在雷州点表现最好无性系为 Y7，其风害指数为 12.86%，表现最差无性系为 Y8，其总风害率达 88.14%，风害指数达 77.68%。

总体来看，在三个点抗风性最好的无性系为 Y7、Y9、Y6、Y15，在三个点表现均较差无性系为 Y8、Y10、Y1 等。从地点看，各无性系整体上风害情况表现为雷州>梧州>东门。因此在沿海台风地区可建议种植 Y7、Y9、Y6、Y15 品种，而无性系为 Y8、Y10、Y1 等建议种植在台风少的内陆地区。

表 7 东门、梧州、点桉树无性系风害分析

	X	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13	Y14	Y15	CK
A 东 门	I	43.24	42.11	27.03	30.56	2.94	5	2.86	5.41	13.5	3.85	35.14	8.11	13.79	12.82	2.63	5.56
	II	18.92	2.63	2.7	19.44	5.88	0	11.43	5.41	2.7	23.08	8.11	0	13.79	7.69	0	2.78
	III	8.11	0	2.7	11.11	2.94	0	0	18.92	0	11.54	10.81	5.41	0	2.56	0	2.78
	IV	13.51	10.53	2.7	5.56	8.82	5	0	70.27	5.41	26.92	16.22	2.7	20.69	5.13	0	5.56
A 梧 州	B	83.78	55.26	35.14	66.67	20.59	10	14.29	100	21.6	65.38	70.27	16.22	48.28	28.21	2.63	16.67
	C	39.86	22.37	12.84	31.25	14.71	6.25	6.43	88.51	10.1	48.08	37.16	8.78	31.03	14.1	0.66	10.42
	I	18.42	15	10.81	12	19.35	24.32	5.26	3.45	2.63	4.76	3.13	8.82	9.68	10.53	27.5	39.47
	II	13.16	10	5.41	4	6.45	2.7	0	10.34	5.26	19.05	9.38	9.38	9.68	21.05	10	18.42
A 雷 州	III	18.42	2.5	10.81	12	0	0	7.89	34.48	7.89	19.05	18.75	5.88	22.58	7.89	5	2.63
	IV	21.05	15	15	24	6.45	2.7	0	48.28	5.26	52.38	3.13	8.82	12.9	0	5	7.89
	B	71.05	42.5	45.95	52	32.26	29.73	13.16	96.55	21.1	95.24	34.38	32.35	54.84	39.47	47.5	68.42
	C	46.05	25.63	32.43	38	14.52	10.14	7.24	80.17	14.5	77.38	22.66	19.85	37.1	19.08	20.63	28.95
A 雷 州	I	12.12	21.21	11.11	16	17.24	14.29	8.57	0	9.09	13.33	12.9	0	5.88	6.25	5.88	25
	II	15.15	9.09	3.7	4	6.9	2.86	5.71	3.57	3.03	6.67	9.68	16.13	8.82	3.13	14.71	19.44
	III	42.42	12.12	18.52	12	6.9	0	2.86	10.71	3.03	0	3.23	6.45	8.82	12.5	8.82	2.78
	IV	24.24	18.18	37.04	44	44.83	28.57	5.71	67.86	12.1	70	48.39	22.58	44.12	62.5	17.65	44.44
A 雷 州	B	93.94	60.61	70.37	76	75.86	45.71	22.86	82.14	27.3	90	74.19	45.16	67.65	84.38	47.06	91.67
	C	46.05	37.12	55.56	59	57.76	33.57	12.86	77.68	18.2	76.67	58.87	35.48	56.62	75	33.09	62.5

注：A=风害率(%), B=总风害率(%), C=风害指数, X=无性系号；I=风害 1 级, II=风害 2 级, III=风害 3 级, IV=风害 4 级。

3 结论与讨论

15 个杂交桉无性系在东门、梧州和雷州 3 个地点中，胸径、树高和材积的环境型效应和基因型效应出现了正数值和负数值，该结果充分说明了不同的无性系之间基因型的差异，并且每个无性系对环境的适应性均有一定的差异。互作效应大小与方向在无性系与地点间不同而发生变化，没有两个方向一致且大小相同的效应值，充分表明了基因型与环境型的复杂性和多样性。同一无性系生长性状(胸

径、树高、材积)基因与环境互作效应方向在同一个地点表现一致。各无性系生长表型受基因型效应、环境效应和两个间互作效应控制，不同的无性系之间基因型有差异，并且每个无性系对环境的适应性均有一定的差异。15 个杂交桉无性系生长性状基因型与环境互作效应强度各不相同，互作效应大小与方向在无性系与地点间不同而发生变化，表明了基因型与环境型的复杂性和多样性；但是同一无性系生长性状(胸径、树高、材积)基因与环境互作效应方向在同一个地点表现一致。

三个点联合分析估算试验林分遗传参数，参试

群体胸径、树高、材积均值分别为 10.6 cm、15.4 m、 0.0731 m^3 ; 遗传率分别为 0.480 6、0.585 7、0.464 7; 遗传变异系数分别为 11.16%、13.26%、27.37%; 表型变异系数分别达 16.09%、17.32%、40.15%。参试群体受中等遗传强度控制, 环境对无性系生长影响很大。

各试验点风害对各无性系影响具有一定差异, 各无性系整体上风害情况表现为雷州>梧州>东门, 而在沿海台风地区可建议种植 Y7、Y9、Y6、Y15 品种, 无性系为 Y8、Y10、Y1 等建议种植在台风少的内陆地区; 从整体保存率来看, 东门点最高、其次是梧州、最低为雷州, 这与风害密切相关。

参考文献

- [1] 温远光,周晓果,喻素芳,等.全球桉树人工林发展面临的困境与对策[J].广西科学,2018,25(2):107-116,229.
- [2] 中国林学会.桉树科学发展问题调研报告[M].北京:中国林业出版社,2016.
- [3] 石忠强,蒋云东,周志忠,等.云南桉树研究现状和存在的问题[J].西部林业科学,2015,44(1):152-156.
- [4] 谢耀坚.中国桉树育种研究进展及宏观策略[J].世界林业研究,2011,24(4):50-54.
- [5] 莫继有,吴永富,兰俊.广西东门林场国家桉树良种基地[J].广西林业,2011(8): 43.
- [6] 熊涛,邓冬丽,王建忠,等.赤桉第二代家系遗传变异及早期选择研究[J].中南林业科技大学学报,2017,37(5):31-35.
- [7] DUTKOWSKI G W, SILAVA J C E, GILMOUR A R, et al. Spatial analysis enhances modelling of a wide variety of traits in forest genetic trials[J].Canadian Journal of Forest Research,2006,36(7): 1851-1870.
- [8] YE T Z, JAYAWICKRAMA K J S. Efficiency of using spatial analysis in first-generation coastal Douglas-fir progeny tests in the US Pacific Northwest[J]. Tree Genetics and Genomes, 2008,4(4): 677-692.
- [9] ALMEIDA M N, VIDAURRE G B. Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions[J].Forest Ecology and Management,2020, 458:1-10.
- [10] ESTHER L C S, CAVALCANTE S R, BAPTISTA V G. The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from *Eucalyptus* clones[J]. Forest Ecology and Management, 2020,458:117807.
- [11] 卢万鸿,齐杰,李鹏,等.桉树无性系生长性状的基因型与环境互作初步研究[J].桉树科技,2018,35(2):7-13.
- [12] 吴兵.桉树巢式交配设计杂交子代遗传分析研究[D].南宁:广西大学,2013.
- [13] 苏顺德.28年生马尾松家系试验林遗传变异及选择[J].福建林业科技,2009,36(3):1-4.
- [14] 沈熙环.林木育种学[M].北京:中国林业出版社,1990.
- [15] 陈孝丑.枫香优树14年生子代遗传变异及选择[J].林业科学研究,2015,28(2):183-187.
- [16] 李光友,徐建民,陆钊华,等.尾叶桉二代测定林家系的综合评选[J].林业科学研究,2005,18(1):57-61.
- [17] 徐建民,白嘉雨,甘四明.尾叶桉家系综合选择的研究[J].林业科学研究,1996(6):4-10.
- [18] PIEPHO, H P.Theoretical and Applied Genetics[J]. International Journal of Plant Breeding Research,1995, 90:438-443.
- [19] 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.
- [20] 王建忠,张磊,熊涛等.东门桉树无性系抗风性比较研究[J].林业科技,2015,40(5):1-4.