

火炬松第三代半同胞家系与火炬松×加勒比松全同胞家系遗传变异分析*

宁华琪¹ 王博² 陆结芳² 刘天颐²
王金榜¹ 黄少伟²

(1. 英德市林业科学研究所, 广东 英德 513000; 2. 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要 试验以火炬松 (*Pinus taeda*) 第三代半同胞家系及火加松 (火炬松 × 加勒比松 *P. taeda* × *P. caribaea*) 全同胞家系作为研究对象, 参试家系共 20 个, 其中 9 个为火炬松第三代半同胞家系, 11 个为火加松全同胞家系, 另以来自台山市红岭种子园改良代湿地松 (*P. elliottii*) 种子园混合种子为对照 (CK1), 分析了 2 a 和 5 a 生长性状差异。结果表明: (1) 火炬松第三代半同胞家系及火加松全同胞家系的各生长性状与作为对照的湿地松相比均具有明显优势; (2) 火炬松第三代半同胞家系及火加松全同胞家系各项生长性状之间差异不显著; (3) 以 5 a 平均材积为指标, 对 20 个家系进行了优良家系选择, 入选家系分别为 09-15、09-9、44-12-5 和 26- III -4。

关键词 火炬松; 火加松; 遗传变异; 优良家系

中图分类号: S722 文献标识码: A 文章编号: 2096-2053 (2018) 01-0026-06

Genetic Variance of the Third Generation of *Pinus taeda* Half-sib Families and *P. taeda* × *P. caribaea* Hybrid

NING Huagong¹ WANG Bo² LU Jiefang² LIU Tianyi²
WANG Jinbang¹ HUANG Shaowei²

(1. Yingde Institute of Forestry, Yingde, Guangdong 513000, China; 2. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract In this study, the third generation half-sib families of the loblolly pine (*Pinus taeda*) and full-sib families of *P. taeda* × *P. caribaea* were selected as the research object. Nine third generation open-pollinated families of loblolly pine and eleven hybrid families of loblolly pine by *P. caribaea* were studied for growth traits at the age of 2 years and 5 years. Mixed seed from Taishan *P. elliottii* improved seed orchard were used as control (CK1). The main results were as follows: (1) Compared with CK1, both hybrid pine families and *P. taeda* third generation half-sib families held advantage in growth. (2) No significant difference was found between hybrid pine and third generation half-sib families of *P. taeda*. (3) Superior families were selected based on 5-year-old means single tree volume, including 09-15, 09-9 and 44-12-5, 26- III -4.

Key words *Pinus taeda*; *P. taeda* × *P. caribaea*; genetic variation; superior families

* 基金项目: 广东省林业科技创新专项“松树短周期采脂林良种选育、优质栽培及采收加工技术与示范”(2011KJCX013-02)(2012KJCX009-01)。

第一作者: 宁华琪 (1981—), 男, 助理工程师, 主要从事林木生产育种工作, E-mail: 285730289@qq.com。

通信作者: 黄少伟 (1964—), 男, 教授, 主要从事林木遗传育种研究, E-mail: shwhuang@scau.edu.cn。

火炬松 (*Pinus taeda*) 原产地为美国东南部, 现已遍及美国东南部 14 个州, 是当今世界最重要的商品用材针叶树种之一。火炬松广泛引种于许多国家, 如阿根廷、巴西、南非、坦桑尼亚和津巴布韦等国, 在亚洲主要分布区域为中国, 伊朗也有少量引种^[1]。我国从 20 世纪 30 年代开始引种火炬松, 至 80 年代已广泛栽植并建立了火炬松初级种子园, 现已成为我国重要的工业原料和用材树种^[2]。我国火炬松的适生区为南岭北坡至长江流域一带, 在长江流域生长表现尤佳^[3]。广东省引种火炬松较早, 我省北部连山壮族瑶族自治县、乐昌市等地区为火炬松引种栽培适宜区^[4]。

加勒比松 (*P. caribaea*) 生长和发育迅速, 在不同的立地和气候条件下都具有较高的生产力, 对病虫害具有一定的抗性。它在引种地区表现出速生丰产、产脂高、耐旱耐瘠、适应性强、树干较通直、抗风能力较强等优良特性, 成为主要的用材和生产松脂的树种之一^[5]。1927 年至今, 加勒比松先后被引入非洲、南美洲、亚洲、大洋洲的三十多个国家和地区, 生长良好。我国两广南部地区在上世纪 60 年代引种加勒比松, 并相继开展了优树选择和种子园营建, 目前建有初级种子园、一代种子园和改良种子园^[6]。

由于发生了基因重组, 种间杂交是获取优良经济性状的重要途径之一。杂种的许多性状常常表现为双亲的中间性状或偏向于其中一个亲本, 有时某些性状会优于亲本, 而林木种间或种内种源间的杂种还会综合双亲的优良性状^[7]。因此, 林木的杂交育种是林木遗传改良的重要途径之一。近年来, 松类杂交育种已成为国内林木遗传育种

学方面的研究重点之一^[8-12]。本试验中的参试材料火加松 (*P. taeda* × *P. caribaea*) 即为火炬松和加勒比松的杂交种。

生长周期长是限制林木遗传改良研究的主要因素。提高选择效率, 缩短育种周期一直是林木育种工作者的关注点, 对优树和种子园等进行子代测定, 是选择出具有稳定优势的个体和家系的基础工作。其中遗传增益是衡量选择效果的重要指标, 遗传力则是估算遗传增益的基础。火炬松的生长相关表现主要由遗传决定, 针对火炬松树高、胸径、木材密度、木材纤维素含量进行早期选择的最低年龄分别为 5、4、10、11 a^[13], 本试验以 5 a 生单株为供试材料进行优良家系选择, 达到早期选择的最低年龄, 其筛选结果有一定的可靠性。

通过对参试的火炬松第三代半同胞家系和火加松全同胞家系的早期生长性状进行统计分析, 与湿地松 CK1 比较火加松和火炬松第三代半同胞家系的生长特性, 筛选出表现优良的家系。另外还可以对以火炬松为母本、以加勒比松为父本的松树种间杂交杂种优势进行验证。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

广东省英德市火炬松种子园位于英德市区东南方向, 坐标为 113° 45' E, 24° 15' N, 本试验地位于该种子园的 E 试验区, 该地属亚热带季风气候, 气候温和, 年平均气温为 20.7 °C, 最高气温为 38.5 °C, 最低气温为 -3.6 °C, 年积温达 6 200 °C; 雨量充沛, 年均降雨量达 1 917.7 mm。试验地为低丘, 海拔 50 m, 坡度 <15°。土壤为发育在砂页岩

表 1 参试材料名录

Tab. 1 List of materials tested

火加松 <i>P. taeda</i> × <i>P. caribaea</i>			火炬松 <i>P. taeda</i>	湿地松 <i>P. elliottii</i>
母本 Female parent	父本 Male parent	家系编号 Number	家系编号 Number	编号 Number
1	遂 256	09-1	44-12-5	CK1
1	44-2	09-3	26- III -4	
22	遂 256	09-4	15-4-15	
26	遂 256	09-7	28-7-43	
26	河 17	09-8	19-11-44	
26	44-2	09-9	34-1-9	
31	遂 256	09-10	西 2-1-1	
31	44-2	09-12	44-2-6	
外 3	遂 256	09-13	7-15-14	
外 3	44-2	09-15		
16	BH4-3-74	09-16		

岩上的赤红壤,土质瘦瘠粘重,pH值为5.2~6.7。

1.2 试验材料

参试家系共有20个(表1),其中9个是火炬松第二代种子园的自由授粉子代;11个为火加松(火炬松×火加松)杂交子代家系,是来自英德火炬松改良种子园的火炬松和来自湛江林木良种场的加勒比松的杂种子代;以来自广东省台山市红岭种子园改良代湿地松种子园混合种子为对照(CK1)。子代林于2012年春栽植于英德火炬松种子园E区,种植苗木为1a生,平均苗高50cm,施基肥,每隔一年追肥一次。

1.3 试验设计

采用随机完全区组设计(Randomized Complete Block Design),设8次重复,5株行式小区,株行距3m×3m。分别于2013年12月和2017年3月对子代林进行每木调查,测量其胸径(D)及树高(H)。

1.4 数据处理

材积 V : $V=0.375HD^2/10000$

单株遗传力: 火炬松(半同胞)

$$h_s^2 = 4\sigma_F^2 / (\sigma_F^2 + \sigma_{FB}^2 + \sigma_E^2)$$

火加松(全同胞) $h_s^2 = 2\sigma_F^2 / (\sigma_F^2 + \sigma_{FB}^2 + \sigma_E^2)$

$$\text{家系平均遗传力: } h_f^2 = \frac{MS_F - MS_{FB}}{MS_F}$$

$$\text{遗传增益: } \Delta G = \frac{R}{x} \times 100\%$$

$$R = Sh_f^2$$

式中, V —材积/ m^3 ; H —树高/ m ; D —胸径/ cm ^[14]。

运用SAS 8.1软件,以单株数据为单元,对各生长性状进行方差分析,采用Duncan多重比较法进行差异显著性检验,再调用VARCOMP过程用限制性最大似然法(restricted maximum likelihood,

REML)估算方差成分,进而估算遗传力。

2 结果与分析

2.1 不同树种间的生长性状差异分析

通过对3种树种2a以及5a生的树高、胸径、材积进行方差分析,结果表明,不同树种间在2a及5a时的各生长性状均存在显著差异($P<0.05$)。Duncan检验结果表明(表2),在树高、胸径和材积3个指标中,2a和5a生火炬松第三代半同胞家系与火加松之间无显著差异,但都显著($P<0.05$)高于对照CK1。从具体数据分析,2a生的火加松平均树高和平均胸径均大于火炬松第三代半同胞家系,而5a生时,火炬松第三代半同胞家系在树高和胸径方面则大于火加松,且显著($P<0.05$)大于湿地松对照CK1。

2.2 各家系生长性状的变异来源分析

对20个家系进行方差分析,分析其树高和胸径的变异来源。结果表明(表3):不同家系之间,2a生树高和胸径均差异极显著($P<0.01$);而不同区组、区组×家系交互效应在2a生的树高和胸径的差异不显著。5a生不同家系之间的树高和胸径均差异极显著($P<0.01$),同时不同区组间的树高也表现出极显著的差异($P<0.01$),但胸径在不同区组间差异以及区组×家系交互效应不显著。5a生材积在不同的家系及区组间也表现出极显著的差异性($P<0.01$)。随着树龄的增长,家系间胸径生长差异增大,而树高受环境的影响程度变大。

2.3 遗传力估算

分别对火炬松第三代半同胞家系和火加松的2、5a生生长性状进行单株遗传力和家系平均遗传力的估算(表4),其中火炬松第三代半同胞家系的遗传力为狭义遗传力,火加松全同胞家系的

表2 3个树种2、5a生各生长性状差异分析

Tab. 2 Analysis on the difference of growth traits between 2-year and 5-year of 3 tree species

树种 Species	2 a 生		5 a 生		V
	H	D	H	D	
火加松全同胞家系 Full-sib families of <i>P. taeda</i> × <i>P. caribaea</i>	2.440 ± 0.047 a	3.670 ± 0.163 a	5.900 ± 0.189 a	13.250 ± 0.264 a	0.043 ± 0.001 a
火炬松第三代半同胞家系 Third generation half-sib families of <i>P. taeda</i>	2.330 ± 0.035 a	3.650 ± 0.170 a	6.080 ± 0.170 a	13.440 ± 0.300 a	0.044 ± 0.001 a
CK1	1.820 ± 0.041 b	2.640 ± 0.090 b	5.600 ± 0.136 b	10.380 ± 0.209 b	0.023 ± 0.001 b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著。

Note: Data in the table are means ± standard error. The different lowercase letters in the same column in the table show significant differences at the level of $\alpha=0.05$.

表 3 3 个树种 2、5 a 生各生长性状方差分析
Tab. 3 Variance analysis of 3 tree species' growth traits with 2 and 5 years old

指标 Item	变异来源 Source of variation	自由度 Freedom	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	<i>F</i> 值 F-measure	<i>Pr</i> > <i>F</i>
2 a 树高 <i>H</i> of 2 a	区组 Block	7	2.821 6	0.403 1	2.24	0.0305
	家系 Family	20	20.803 2	1.040 2	5.77	<.0001
	区组 × 家系 Block × Family	106	25.290 0	0.238 6	1.32	0.0279
	误差 Error value	446	80.426 8	0.180 3		
	总和 Sum	579	130.019 2			
2 a 胸径 <i>D</i> of 2 a	区组 Block	7	8.369 4	1.195 6	1.04	0.4038
	家系 Family	20	73.381 6	3.669 1	3.19	<.0001
	区组 × 家系 Block × Family	105	140.745 7	1.340 4	1.16	0.1533
	误差 Error value	406	467.697 3	1.152 0		
	总和 Sum	538	694.345 9			
5 a 树高 <i>H</i> of 5 a	区组 Block	7	51.441 0	7.348 7	8.53	<.0001
	家系 Family	20	48.655 0	2.432 8	2.82	<.0001
	区组 × 家系 Block × Family	106	107.847 8	1.017 4	1.18	0.1285
	误差 Error value	433	373.032 5	0.861 5		
	总和 Sum	566	577.882 7			
5 a 胸径 <i>D</i> of 5 a	区组 Block	7	89.487 6	12.783 9	2.23	0.0308
	家系 Family	20	635.596 8	31.779 8	5.55	<.0001
	区组 × 家系 Block × Family	106	488.989 5	4.613 1	0.81	0.9111
	误差 Error value	433	2479.719 3	5.726 8		
	总和 Sum	566	3721.280 2			
5 a 材积 <i>V</i> of 5 a	区组 Block	7	0.007 0	0.001 0	3.01	0.0043
	家系 Family	20	0.028 1	0.001 4	4.20	<.0001
	区组 × 家系 Block × Family	106	0.031 7	0.000 3	0.90	0.7519
	误差 Error value	433	0.144 6	0.000 3		
	总和 Sum	566	0.214 1			

表 4 3 个树种 2、5 a 生各生长性状遗传力估算
Tab. 4 The heritable growth traits of 3 tree species estimation with 2 and 5 years old

树龄 Age	性状 Growth traits	火炬松第三代半同胞家系 The third generation half-sib families of <i>P. taeda</i>		火加松全同胞家系 Full-sib families of <i>P. taeda</i> × <i>P. caribaea</i>	
		单株遗传力 h_s^2	家系平均遗传力 h_r^2	单株遗传力 h_s^2	家系平均遗传力 h_r^2
2 a 生	<i>H</i>	0.25	0.63	0.11	0.53
	<i>D</i>	0.14	0.49	0.13	0.53
	<i>H</i>	0.21	0.59	0.16	0.63
5 a 生	<i>D</i>	0.18	0.64	0.17	0.68
	<i>V</i>	0.13	0.54	0.12	0.58

遗传力则为广义遗传力。结果表明：火炬松第三代半同胞家系和火加松全同胞家系各生长性状的家系平均遗传力均明显大于单株遗传力，其中，火炬松第三代半同胞家系的单株遗传力高于火加松，但家系平均遗传力则不如火加松，2 a 生树高除外。

2.4 优良家系选择及遗传增益

分别对 5 a 生各家系的树高、胸径以及材积进行分析（表 5），结果表明：5 a 生时，树高表现最好的是 09-12 家系，为 6.57 m，但除 CK1、09-1 和 09-08 外，与其他家系无显著差异；胸径最大的是 09-15 家系，为 15.06 cm，显著高于 09-4、09-8、44-2-6 和 CK1 这 4 个家系（ $P<0.05$ ）；5 a 时，材积最大的是 09-15 家系，达到 0.055 4 m³，显著高于 09-4、09-8、7-15-14 和 CK1 这 4 个家系（ $P<0.05$ ）。

以 5 a 生材积和相对应的多重比较结果作为优

良家系筛选标准，09-15、09-9、44-12-5 和 26-III-4 共 4 个家系入选。其中 09-15 和 09-9 为火加松全同胞家系，44-12-5 和 26-III-4 为火炬松第三代半同胞家系。

5 a 生火炬松第三代半同胞家系的 2 个入选家系及火加松全同胞家系的 2 个入选家系，分别以同类型家系各生长性状的总体平均值和 CK1 各性状的平均值作为参照，遗传增益估算结果如表 6 所示，火炬松第三代半同胞家系和火加松全同胞家系以 CK1 为参照的遗传增益明显比以同类型总体平均值为参照的大。

3 结论与讨论

从对不同家系类型的方差分析和 Duncan 检验可以看出，参试的火加松全同胞家系以及火炬松第三代半同胞家系的生长性状总体上均显著优于改良代湿地松，说明在粤北地区杂交育种和多世

表 5 5 a 生 20 个家系各生长指标的 Duncan 检验
Tab. 5 Duncan test of 5-year of 20 families

H		D		V	
家系 Family	5 a 生平均值 Average of 5 a	家系 Family	5 a 生平均值 Average of 5 a	家系 Family	5 a 生平均值 Average of 5 a
09-12	6.57 a	09-15	15.06 a	09-15	0.0554 a
26- III -4	6.34 ab	44-12-5	14.67 ab	09-9	0.0532 ab
西 2-1-1	6.31 ab	26- III -4	14.49 ab	44-12-5	0.0520 ab
09-7	6.30 ab	09-9	14.31 ab	26- III -4	0.0520 ab
44-2-6	6.28 ab	15-4-15	14.19 ab	09-3	0.0517 ab
44-12-5	6.24 ab	09-7	14.18 ab	09-7	0.0502 ab
09-9	6.22 ab	28-7-43	14.16 ab	15-4-15	0.0483 ab
19-11-44	6.13 ab	09-3	14.10 ab	28-7-43	0.0467 ab
09-16	6.12 ab	09-10	13.94 ab	19-11-44	0.0463 ab
09-3	6.11 ab	19-11-44	13.79 ab	09-10	0.0455 ab
15-4-15	6.09 ab	09-13	13.65 ab	34-1-9	0.0432 ab
09-10	6.04 ab	09-1	13.63 ab	西 2-1-1	0.0432 ab
09-15	6.00 ab	34-1-9	13.42 ab	09-12	0.0429 ab
28-7-43	5.98 ab	西 2-1-1	13.32 ab	09-1	0.0428 ab
34-1-9	5.95 ab	09-16	13.28 ab	09-13	0.0425 ab
09-13	5.87 ab	7-15-14	13.20 ab	09-16	0.0419 ab
7-15-14	5.87 ab	09-12	13.17 ab	44-2-6	0.0408 ab
09-4	5.80 ab	09-4	12.84 b	7-15-14	0.0396 b
CK1	5.60 b	44-2-6	12.72 b	09-4	0.0388 b
09-1	5.59 b	09-8	10.40 c	09-8	0.0259 c
09-8	4.63 c	CK1	10.39 c	CK1	0.0238 c

注：表中同列不同小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著。
Note: The different lowercase letters in the same column in the table show significant differences in the level of $\alpha=0.05$.

表 6 5 a 生优良家系的遗传增益值
Tab. 6 Genetic gain of 5 a selected families

生长性状 Growth traits	火炬松第三代半同胞家系 Third generation half-sib families of <i>Pinus taeda</i>		火加松全同胞家系 Full-sib families of <i>P. taeda</i> × <i>P. caribaea</i>	
	以火炬松总体平均值为对比 Comparison of the total average value of loblolly pine	以 CK1 为对比 Contrast with CK1	以火加松总体平均值为对比 Comparison of the total average value of <i>P. taeda</i> × <i>P. caribaea</i>	以 CK1 为对比 Contrast with CK1
<i>H</i>	0.31	4.32	1.89	5.62
<i>D</i>	4.03	35.22	5.24	34.96
<i>V</i>	7.79	96.81	15.37	101.96

代轮回选择对火炬松的遗传改良作用明显，后续可继续进行多地点试验，验证并完善上述结论。

2 a 生时，火加松全同胞家系在平均树高和平均胸径的表现上均优于火炬松第三代半同胞家系，但到 5 a 生时，火炬松第三代半同胞家系的平均树高和平均胸径则反超具有杂种优势的火加松，这说明通过多世代轮回选择，火炬松第三代半同胞家系的生长总体上不亚于或有可能超过杂交种。通过进一步的筛选，有望选育出更高产量和质量

的火炬松优良品系。

通过 Duncan 多重比较，以材积作为选择指标，从 20 个家系中筛选出 4 个优良家系，其中两个火加松家系 09-15 和 09-9 仍然优于 2 个火炬松第三代半同胞家系 44-12-5、26- III -4，说明通过杂交育种产生的后代遗传分化较大，其中的优良家系具备明显的优势，而对于 09-8 这样不具备明显杂种优势的家系则可以探索其欠缺的原因，为以后进行杂交育种提供借鉴。

如何缩短育种周期、提高育种效率，一直是林木遗传领域备受关注的问题。本试验以 5 a 生平均单株材积为指标选择的优良家系，其遗传优势具有较高的稳定性。对火炬松第三代半同胞家系中的 2 个优良家系，可在第二代种子园内单系采种直接推广应用；对火加松两个优良家系，可通过重复制种产生杂种种子，建立插穗圃，扦插育苗进行推广应用。

参考文献

[1] 栾启福. 几种松树杂交选育及其遗传分析[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.

[2] 杨爱银. 15年生火炬松家系引种试验研究[J]. 绿色科技, 2013(7): 64-65.

[3] 黄少伟, 钟伟华, 陈炳铨. 火炬松半同胞子代配合选择的遗传增益估算[J]. 林业科学, 2006, 42(4): 33-37.

[4] 郑永光. 我省火炬松引种栽培区气候生态区划的研究[J]. 广东林业科技, 1995, 11(2): 1-4.

[5] 黄永权, 赵苗成. 广东省加勒比松贵传改良策略的探讨[J]. 广东林业科技, 2000, 13(1): 15-19.

[6] 李义良, 赵奋成, 林昌明, 等. 湿地松、加勒比松人工林优树选择研究[J]. 林业与环境科学, 2015, 31(6): 29-34.

[7] LOPEZ-UPTON J. Early growth, pest incidence, and cold hardiness of loblolly pine, slash pine, and some slash pine hybrids[J]. Silvav Genetica, 1999, 48(6): 303-313.

[8] 赵奋成, 李宪政, 张应中, 等. 湿地松与洪都拉斯加勒比松的杂交效果分析[J]. 林业科学研究, 2006, 19(4): 409-415.

[9] 孙晓梅, 张守攻, 周德义, 等. 落叶松种间及种内和种间杂种家系间的物候变异与早期选择[J]. 林业科学, 2008, 44(1): 77-84.

[10] 金国庆, 秦国峰, 刘伟宏, 等. 马尾松测交系杂交子代生长性状遗传分析[J]. 林业科学, 2008, 44(1): 70-76.

[11] 栾启福, 姜景民, 张建忠, 等. 国外松种间杂交育种及其F1代早期生长评价[J]. 林业科学研究, 2008, 21(3): 314-319.

[12] 张应中, 赵奋成, 林军, 等. 湿加松在粤北山区早期生长表现初报[J]. 林业科学研究, 2007, 20(4): 556-562.

[13] 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]. 中南林业科技大学学报, 2006, 26(5): 20-25.

[14] 黄少伟, 谢维辉. 实用SAS编程与林业试验数据分析[M]. 华南理工大学出版社, 2001: 214-232.