火炬松自由授粉子代生长、形质性状和产脂量的遗传变异分析*

李赛楠[1] 杜澄举[1] 周晓煦[2] 蒋开彬[1] 黄少伟[1] 刘天颐[1]
（1. 华南农业大学 / 广东省森林植物种质资源创新与利用重点实验室，广东 广州 510642；2. 广州草木蕃环境科技有限公司，广东 广州 510510）

摘要 为了阐明火炬松 *Pinus taeda* 第三代遗传资源各家系生长、形质性状的遗传变异规律以及与产脂量之间的遗传相关性，调查火炬松第二代种子园6年生自由授粉子代测定林生长性状（树高、胸径、单株材积）和形质性状（轮枝数、分枝粗、分枝角），并利用近红外仪器预测火炬松产脂量。结果为：1）生长性状和形质性状具有较大的遗传改良潜力，其中单株材积变异系数最大，为37.77%，其次为轮枝数，变异系数为34.61%；2）除分枝粗外，各性状均存在显著或极显著的家系效应，单株材积、分枝角、树高、胸径、和轮枝数均受到中高度的遗传控制（h_F^2=0.60~0.83）；3）产脂量与轮枝数表现出中高度的遗传正相关（r_G=0.528 7），与胸径、树高呈遗传负相关（r_G 分别为 –0.735 0，–0.009 6）。该子代测定林生长性状在家系间的差异较大，含有丰富的遗传变异；生长性状受较强的遗传控制，存在选育出材用优良家系的潜力；在今后的性状测定中，应对轮枝数等形质性状加以关注，作为选育高产脂优良品系的参考指标之一；火炬松第二代种子园遗传品质较优，应尽快解决种子园亲本开花结实问题，并开展多地点测定，加快良种的推广应用。

关键词 火炬松；生长性状；形质性状；产脂量；遗传变异
中图分类号：S791.255 **文献标志码**：A **文章编号**：2096-2053（2020）05-0010-06

Genetic Variation Analysis of Growth and Shape Traits and Resin Yield of Free-pollinated Progeny Test Forest in the *Pinus taeda*

LI Sainan[1] DU Chengju[1] ZHOU Xiaoxu[2] JIANG Kaibin[1] HUANG Shaowei[1] LIU Tianyi[1]
(1.South China Agricultural University/Key Laboratory of Innovation and Utilization of Forest Plant Germplasm Resources in Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510642,China; 2. Guangzhou Caomufan Environmental Technology Co.,Ltd., Guangzhou, Guangdong 510510,China)

Abstract To elucidate the genetic variation of growth and shape traits among families of the third generation genetic resources of *Pinus taeda* and their genetic correlation with resin yield. This study investigated the growth traits (tree height, DBH, individual volume) and morphological traits (wheel branch number, branch thickness, branch angle) of 6-year-old free pllinated progeny test forest in the second-generation seed orchard of *P. taeda*, and predicted the resin yield of *P. taeda* using near-infrared instruments. The results are as follows:

* **基金项目**：国家林业局“948”项目（2014-4-72）、（2017YFD0600502-3）。
第一作者：李赛楠（1996—），女，硕士研究生，研究方向为林木遗传育种，E-mail:lsn@stu.scau.edu.cn。
通信作者：刘天颐（1976—），女，副教授，主要从事林木遗传育种、松树遗传改良研究，E-mail:tianyiliu@scau.edu.cn。

1) Growth and morphological traits had great potential for genetic improvement, with the largest coefficient of variation per plant volume of 37.77%, followed by the wheel branch number, with a coefficient of variation of 34.61%. 2) There were significant or extremely significant pedigree effects for each trait except branch thickness, and individual volume, branch angle, tree height, DBH, and wheel branch number were all under moderate to high genetic control (h_F^2 = 0.60 ~ 0.83). 3) Resin yield showed a moderate to high genetic positive correlation with rotation (r_G = 0.528 7) and a genetic negative correlation with DBH and tree height (r_G =−0.735 0, −0.009 6). The growth traits of this progeny test forest were quite different between families and contained abundant genetic variation; the growth traits were under strong genetic control and had the potential to select and breed excellent families for materials; in the future trait determination, attention should be paid to the shape traits such as the wheel branch number, which is one of the reference indicators for the selection and breeding of excellent lines with high resin yield; the genetic quality of the second generation seed orchard of *P. taeda* is better, and the problem of parental flowering and fruiting in the seed orchard should be solved as soon as possible, and multi-site determination should be carried out to accelerate the popularization and application of improved varieties.

Key words *Pinus taeda*; growth traits; shape traits; resin yield; genetic variation

火炬松 *Pinus taeda* 原产美国东南部，是美国南方松中最重要的速生针叶用材树种。它生长迅速，适应性广，容易育苗造林，已成为全球最重要的速生建筑用材和纸浆材针叶树种之一 [1-2]；它自然整枝能力强，富含树脂，松脂产量高，质量好，是优良的采脂树种。我国在 20 世纪 30 年代开始引种火炬松，60 年代末营建了火炬松母树林，70 年代开始进行大批量引种和大面积生产性造林，80 年代初在长江以南的一些省份建立了种子园，90 年代在广东省英德市林业科学研究所建成国内第一个火炬松二代种子园，目前广东火炬松的良种遗传改良正处在第二代向第三代过渡阶段 [3]。

国内外针对火炬松用材林及产脂林从遗传测定 [4-6]、优树选择 [7-10]、密度调控 [11]、产脂量影响因素 [3, 12] 和分子辅助育种 [13-14] 等方面开展了大量研究。但目前为止对火炬松产脂影响因子的研究和概况总结还较少，鲜有对高世代火炬松产脂量与生长（胸径、树高、单株材积）、形质性状（轮枝数、分枝粗、分枝角）相关关系及利用近红外光谱技术预测火炬松产脂量的研究。许建忠 [7] 对 19 年生火炬松第一代种子园的研究表明胸径、树高和材积 3 个主要性状在家系间差异极显著，均具有较高的家系遗传力、受中高度遗传控制，说明各性状的差异主要由遗传因素所致，有较大的改良潜力。王金榜等 [15] 采用下降法“V”字型进行火炬松初级种子园无性系产脂量研究，参试无性系产脂量变异系数为 4.81%~48.97%，受较强的遗传控制，存在选育出高产脂优良无性系的潜力。

在高产优质人工脂用原料林育种中，人工割脂法是测定松树产脂量的传统办法，但这一方法必须破坏树体或者样品本身，存在成本高、效率低、时间长、误差大、具破坏性、易产生污染和重复性差等缺点，难以满足生产和科研的需要。随着火炬松改良进程的发展，有必要对高世代材料研究其产脂量与生长、形质性状的相关关系，探索利用近红外光谱技术预测火炬松产脂量的方法，为进一步促进火炬松良种选育与繁育和高产优质人工脂用原料林的营建提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

火炬松第二代种子园自由授粉子代测定林包含参试家系 9 个，2012 年造林，采用随机完全区组设计，设 8 次重复，5 株单行小区，株行距 3 m × 3 m。

1.2 试验地概况

子代测定林位于广东省英德市林业科学研究所，距英德市区约 50 km，属亚热带季风气候，气候温和，雨量充沛，年均气温 20.7 ℃，绝对最高气温 38.9 ℃，最低气温 −3.6 ℃，年降水量 1 918 mm。土壤呈酸性，pH 值 5.2~6.7 之间，为中黏土红壤。

1.3 子代测定林调查和木芯采集

2018年对子代测定林进行每木调查，测量树高（H）、胸径（$D_{1.3}$）、轮枝数、分枝粗及分枝角。轮枝数选择第三年所生的分枝进行调查统计；分枝粗测量时选取所测分枝最粗处（分枝基部）的直径，所有分枝的平均值作为单株分枝大小的指标；分枝角为分枝与主干之间的角度，以所测分枝与树干之间的角度平均值作为单株的分枝角。

对子代测定林每个单株钻取木芯，用于测定产脂量。钻取高度约在树高1.3 m处，先刮去树干表皮，使用直径为12 mm的生长锥从东至西（平行于地面，尽量避开树结）穿透树干，钻取全木芯。将采集到的木芯做好标记后用保鲜膜包好放入密封袋，待所有木芯样品钻取完毕后，在最短时间内放入-20 ℃冰箱内保存备用。

1.4 产脂量测定

采用黄少伟等[16]利用近红外光谱技术预测火炬松松脂产量的方法，利用采集到的木芯，预测火炬松6年生子代测定林单株产脂量。使用瑞典Perter公司的DA7200型连续固定光栅分析仪和改进的样品杯进行光谱收集，在对样品进行扫描之前，为了减少温度对样品的影响，先将样品放置24 h，仪器使用前预热30 min，待光源稳定后开始采集光谱。

1.5 统计分析

单株材积（V）按公式 $V=0.3750\times H\times D_{1.3}^2/10\,000$ 估算[17]，式中 H 为树高，$D_{1.3}$ 为胸径。以测量的单株数据为单元，采用SAS软件对火炬松子代测定林测定数据进行遗传参数估算，调用GLM过程进行遗传效应显著性分析，调用VARCOMP过程并采用限制性最大似然估计法（residual maximum likelihood，REML）[18]估算方差成分。统计分析时，轮枝数、分枝粗、分枝角和树干通直度经 $X^{1/2}$ 转化[19]。

混合线性模型如下：

$$Y_{ijk}=\mu+B_i+F_j+(\mathrm{BF})_{ij}+\varepsilon_{ijk} \quad \cdots\cdots(1)$$

其中，Y_{ijk} 表示第 i 个区组第 j 个家系的第 k 个观察值，μ 为总体平均值，B_i 为第 i 个区组的区组效应，F_j 为第 j 个家系的家系效应，$(\mathrm{BF})_{ij}$ 为第 j 个家系和第 i 个区组的交互作用，ε_{ijk} 为机误。B_i 为固定效应，F_j 和 $(\mathrm{BF})_{ij}$ 为随机效应。

$$\text{变异系数}\mathrm{CV}(\%)=\frac{\sigma_F}{\bar{X}}\times 100\% \quad \cdots\cdots(2)$$

[18]

其中，σ 为群体标准差，$\bar{X}$ 为群体平均值。

$$\text{单株遗传力}\ h_S^2=\frac{4\sigma_F^2}{\sigma_E^2+\sigma_{FB}^2+\sigma_F^2} \quad \cdots\cdots(3)$$

[19]

其中，σ_F^2 表示家系遗传方差，σ_{FB}^2 表示家系与区组互作方差，σ_E^2 表示随机方差。

$$\text{家系遗传力}\ h_F^2=\frac{4\sigma_F^2}{\frac{\sigma_E^2}{nb}+\frac{\sigma_{FB}^2}{b}+\sigma_F^2} \quad \cdots\cdots(4)$$

[19]

其中，b 表示区组数，n 表示每小区的单株数，由于数据不平衡，采用小区调和平均株数。

$$\text{遗传相关系数}\ r_g=\frac{\mathrm{cov}_a(x,y)}{\sqrt{\sigma_{ax}^2 n\sigma_{ay}^2}} \quad \cdots\cdots(5)$$

[20]

其中，$\mathrm{cov}_a(x, y)$ 为 x 和 y 性状加性遗传协方差，σ_{ax}^2 为 x 性状的加性遗传方差，σ_{ay}^2 为 y 性状的加性遗传方差。

2 结果与分析

2.1 各性状遗传变异分析

6年生子代测定林各生长性状（胸径、树高、单株材积）均存在极显著的家系效应，且性状变异较丰富。胸径、树高、单株材积平均值分别为13.87 cm、6.13 m、0.046 5 m^3，变异系数分别为16.33%、13.62%、37.77%，单株遗传力分别为0.25、0.30、0.19，家系遗传力分别为0.66、0.65、0.60。家系遗传力均大于0.5，受中等偏上的遗传影响。其中胸径个体间变异幅度为5.00~19.40 cm，胸径生长最快个体的生长量是最慢个体的3.88倍，家系遗传力达0.66，受到中高度的遗传控制（表1）。火炬松6年生子代测定林具有较大的家系选择潜力，以胸径生长作为主要选择性状即可取得较好的遗传增益。

形质性状（轮枝数、分枝角）存在极显著的家系效应，分枝角还存在极显著的区组效应，但分支粗在区组、家系间及区组×家系互作效应均不显著。从变异系数看，单株材积（37.77%）变异较大，轮枝数（34.61%）、树干通直度（30.94%）次之。

利用近红外光谱技术预测的火炬松平均单株产脂量为5.97 kg，变异幅度为2.79~8.79 kg，变异系数为16.39%。产脂量具有显著的家系效应，家系遗传力为0.58，受到中度的遗传控制。

表 1 火炬松生长、形质形状和产脂量的遗传变异

Table 1 Genetic variation of growth, shape traits and resin yield of ***Pinus taeda***

变异来源 Sources of variation	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	范围 Range	变异系数 CV/%	区组 Block	家系 Family		区组 × 家系 Block × Family		机误 Error	单株遗传力 Single-tree heritability	家系遗传力 Family mean heritability
				F 值 *F* value	家系遗传方差 σ_F^2	*P* 值 *P* value	家系与区组互作方差 σ_{FB}^2	*P* 值 *P* value			
胸径 /cm DBH	13.87 ± 2.27	5.00~19.40	16.33	0.122 2	0.314 3	0.005 0**	0.000 0	0.615 9	4.777 4	0.25	0.66
树高 /m Height	6.13 ± 0.84	3.50~8.20	13.62	<.000 1**	0.045 4	<.000 1**	0.061 3	0.022 3*	0.494 0	0.30	0.65
单株材积 /m^3 Volume	0.046 5 ± 0.017 5	0.004 2~0.112 2	37.77	0.006 6**	0.000 0	0.008 5**	0.000 0	0.522 0	0.000 3	0.19	0.60
轮枝数 Wheel branch number	11.72 ± 4.06	4.00~26.00	34.61	0.093 2	0.053 2	<.000 1**	0.013 6	0.188 8	0.275 9	0.62	0.83
分枝粗 /cm Branching thickness	32.40 ± 8.62	12.96~62.96	26.61	0.056 1	0.004 6	0.300 1	0.005 7	0.323 2	0.561 8	0.03	0.19
分枝角 /° Branch angle	58.89 ± 8.70	32.00~91.00	14.78	0.001 0**	0.023 9	<.000 1**	0.034 5	0.016 7*	0.247 0	0.31	0.65
产脂量 /kg Resin yield	5.97 ± 0.98	2.79~8.79	16.39	0.038 1	0.061 3	0.011 0*	0.058 7	0.233 5	0.797 0	0.27	0.58

注：区组、家系、区组 × 家系和机误自由度分别为 7、8、52 和 199。“*”，“**”分别表示在 0. 05 和 0. 01 水平差异显著。

Note: the block, family, block × family, and error degrees of freedom were 7, 8, 52, and 199, respectively. “*” , “**” indicate significant difference at 0.05 and 0. 01 level, respectively.

表 2 家系各性状 Ducan’s 多重比较分析结果

Table 2 Duncan’s multiple comparison of traits among families

胸径 DBH		树高 Height		单株材积 Volume		轮枝数 Wheel branch number		分枝角 Branch angle		产脂量 Resin yield	
家系 Family	数值 /cm Value	家系 Family	数值 /m Value	家系 Family	数值 /m^3 Value	家系 Family	数值 Value	家系 Family	数值 /° Value	家系 Family	数值 /kg Value
26-3-4	14.71A	26-3-4	6.43A	26-3-4	0.0538A	44-2-6	14.52A	7-15-14	65.12A	15-4-15	6.42A
44-12-5	14.66A	西 2-1-1	6.42A	44-12-5	0.0519A	19-11-44	14.47A	44-12-5	62.40AB	44-2-6	6.33A
28-7-43	14.32AB	44-12-5	6.37A	19-11-44	0.0491AB	26-3-4	12.71AB	34-1-9	60.20BC	19-11-44	6.16AB
15-4-15	14.18AB	19-11-44	6.32A	15-4-15	0.0482ABC	15-4-15	11.89BC	西 2-1-1	58.11BC	34-1-9	6.06AB
19-11-44	14.15AB	44-2-6	6.13A	28-7-43	0.0478ABC	7-15-14	10.56BC	19-11-44	57.88BC	7-15-14	6.00AB
西 2-1-1	13.53ABC	15-4-15	6.09AB	西 2-1-1	0.0449ABC	34-1-9	10.53BC	26-3-4	57.19C	44-12-5	5.90AB
34-1-9	13.48ABC	34-1-9	6.00AB	34-1-9	0.0437ABC	28-7-43	10.52BC	44-2-6	57.13C	西 2-1-1	5.80AB
7-15-14	13.20BC	28-7-43	5.95AB	7-15-14	0.0398BC	西 2-1-1	10.33C	28-7-43	56.72C	26-3-4	5.63B
44-2-6	12.47C	7-15-14	5.64B	44-2-6	0.0384C	44-12-5	9.89C	15-4-15	56.21C	28-7-43	5.52B

注：不同字母代表差异显著（*P*=0.05）。

Note: different letters indicate significantly difference(*P*=0.05).

2.2 家系间生长、形质性状和产脂量的多重比较分析

采用 Ducan 检验对家系间产脂量、胸径、树高、单株材积、轮枝数和分枝角等性状进行多重比较分析（表 2），分析结果显示，家系 26-3-4 和 44-12-5 胸径显著高于最后两个家系，平均值分别为 14.71 cm、14.66 cm，家系 26-3-4 的胸径是最小家系 44-2-6 的 117.96%，是平均胸径的 106.06%。家系 26-3-4，西 2-1-1，44-12-5，19-11-44 和 44-2-6 的树高显著高于最后 1 个家系，平均值分别为 6.43、6.42、6.37、6.32 和 6.13，家系 26-3-4 的树高是最小家系 7-15-14 的 114.01%，是平均树高的 104.89%。家系 26-3-4 和 44-12-5 的单株材积显著高于最后 2 个家系，平均值分别为 0.0538 m^3、0.0519，家系 26-3-4 的单株材积是最小家系 44-2-6 的 140.10%，是平均单株材积的 115.70%。家系 15-4-15 和 44-2-6 的产脂量显著高于最后 2 个家系，平均值分别为 6.42、6.33 kg，家系 15-4-15 的

表3 产脂量和生长、形质性状的遗传相关

Table 3 Genetic correlation of resin yield and with growth and shape traits

性状 Traits	胸径 DBH	树高 Height	单株材积 Volume	轮枝数 Wheel branch number	分枝角 Branch angle
产脂量 Resin yield	−0.735 0	−0.009 6	−0.435 8	0.528 7	−0.178 0

产脂量是最小家系28-7-43的116.30%，是平均产脂量的107.54%（表2）。

2.3 产脂量和生长、形质性状的遗传相关

产脂量和胸径、树高、单株材积、轮枝数、分枝角等性状遗传相关结果见表3，火炬松产脂量与轮枝数呈遗传正相关（r_G=0.528 7），而与胸径、单株材积、分枝角和树高呈遗传负相关（r_G分别为−0.735 0，−0.432 5，−0.178 0，−0.009 6）。

3 结论与讨论

火炬松第二代种子园建园亲本选自第一代育种群体的子代，入选时树龄为6年。经过多年的观察，火炬松第二代种子园建园亲本普遍存在营养生长旺盛、开花结实率低的现象，这与亲本选择时年龄较小、选择重点为生长性状、单株还未达到开花结实期有关。因此，本次测定只针对第二代种子园中能正常开花结实并收获种子的9个建园亲本，旨在对亲本进行遗传评价，为种子园改建或重建提供参考依据，同时对火炬松的良种选育策略、选育效果进行评估，为后续遗传改良奠定基础。

火炬松6年生子代测定林参试的9个家系，平均胸径、树高和单株材积分别为13.87 cm、6.13 m、0.046 5 m^3，年均胸径、树高和单株材积分别为2.31 cm、1.02 m、0.007 8 m^3。变异系数分别为16.33%、13.62%、37.77%，家系遗传力分别为0.66、0.65、0.60，均在0.5以上，说明该环境条件下依据表型值分别对各性状进行直接选择是有效的。方差分析结果表明：不同家系间的平均胸径、树高、单株材积性状存在极显著差异（P值分别为0.005 0、<.000 1和0.008 5），说明本子代测定林生长性状在家系间的差异较大，含有丰富的遗传变异；生长性状受较强的遗传控制，存在选育出材用优良家系的潜力。采用目前常规造林措施，6年生子代测定林保存率为90%时，木材蓄积量为46.5 $m^3 \cdot hm^{-2}$，远高于《火炬松速生丰产林（LY/T 1824-2009）》行业标准的16.2 $m^3 \cdot hm^{-2}$[21]。本研究子代测定林的年平均生长性状均优于刘天颐等[17]对火炬松8年生第二代核心育种群体的测定结果，其年均胸径、树高、单株材积分别为1.64 cm、0.88 m、0.006 0 m^3，且本子代测定林的平均胸径高于8年生第二代核心育种群体的测定结果（13.11 cm），表明火炬松第二代种子园遗传品质较优，应尽快解决种子园亲本开花结实问题，并开展多地点测定，加快良种的推广应用。

火炬松单株平均产脂量为5.97 kg，变异幅度为2.79~8.79 kg，变异系数为16.39%。家系15-4-15和44-2-6的产脂量显著高于最后2个家系，平均值分别为6.42、6.33 kg。我国是松脂生产大国，产脂量一直是重点关注的性状之一，生产上常用的采脂方法为下降式割皮采脂法，但采用人工定期割脂方法测定产脂量受气候和时间的影响，且存在成本高、效率低、时间长、误差大和重复性差等缺点。本研究利用近红外光谱技术预测火炬松的单株产脂量，家系年平均产脂量为5.52~6.42 kg，预测值偏高，这可能与建模单株与本子代测定林单株存在年龄差异有关，但预测值基本符合正态分布，可对参试材料间的产脂量差异进行评估，实现对火炬松产脂种质资源的快速筛选。

火炬松6年生子代测定林产脂量与轮枝数呈中度的遗传正相关（r_G= 0.528 7），表明轮枝数较多的家系产脂量相对较多。这是因为轮枝数越多，树体的营养面积越大，光合作用就会增强，从而使得松脂产量增加。在今后的性状测定中，应对轮枝数等形质性状加以关注，作为选育高产脂优良品系的参考指标之一。产脂量与胸径、树高呈遗传负相关（r_G分别为−0.735 0，−0.009 6），这与王金榜等[15]对23年生火炬松初级种子园无性系产脂量与胸径、树高的关系研究结果相反，可能因本参试子代测定林年龄较小所致[22]。受测定

林林龄的影响，幼林时期各性状的基因表达未能充分表现，林龄越大基因表达越充分，发育到一定阶段才能作出较可靠的结论[23-24]。

家系各性状 Duncan's 多重比较分析结果显示胸径、树高、单株材积和产脂量高于家系平均值的家系分别有 5、4、5、5 个。这 9 个家系生长性状和形质性状各有优缺点，如家系 26-3-4 的胸径、树高和单株材积 3 个生长性状在 9 个家系中均为最优，但产脂量较低；家系 15-4-15 的生长性状在家系中并无显著优势，但分枝角最小、产脂量最高，应继续开展观察与测定，明确火炬松第三代的性状变异规律。虽然子代测定林家系内仍有个体分化，但家系的平均生长量远高于目前生产用种，对于目前还难以实现无性系化利用的火炬松的良种生产与推广具有积极意义。家系树高、胸径和材积的家系遗传力、单株遗传力等遗传参数有可能随着生长年限的延长而发生变化，因此，应在较长的生长年限再做遗传测定来验证家系性状表现。也可针对不同立地环境开展火炬松家系与环境互作分析，研究不同立地环境下的遗传变异规律。

参考文献

[1] 潘志刚. 15年生火炬松种源试验研究初报[J]. 林业科学, 2000, 36(S1): 70-79.

[2] BRUCE Z. The genetics and breeding of Southern Pine[J]. Forest Science, 1977(2): 2.

[3] 何紫迪, 毛积鹏, 黄少伟, 等. 火炬松无性系产脂量变异及24 h产脂规律分析[J]. 分子植物育种, 2019, 17(8): 2675-2680.

[4] 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]. 中南林学院学报, 2006, 26(5): 20-25.

[5] 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.

[6] 栾启福, 姜景民, 张建忠, 等. 火炬松×加勒比松F1代生长、树干通直度和基本密度遗传和配合力分析[J]. 林业科学, 2011, 47(3): 178-183.

[7] 许建忠. 火炬松家系遗传变异与优良家系选择[J]. 福建林业科技, 2017, 44(1): 1-4.

[8] 刘天颐, 杨会肖, 刘纯鑫, 等. 火炬松基因资源的育种值预测与选择[J]. 林业科学, 2014, 50(8): 60-67.

[9] 梁瑞龙, 项东云, 易平, 等. 湿地松、火炬松优良家系选择[J]. 广西林业科学, 2013, 42(3): 226-230.

[10] 邱文金. 火炬松引种试验及优良家系选择[J]. 福建林业科技, 2005, 32(1): 38-40.

[11] 钟伟华, 陈炳铨, 黄少伟, 等. 火炬松种子园栽植密度的试验研究[J]. 林业科学, 2003, 39(2): 58-63.

[12] 毛积鹏, 何紫迪, 黄少伟, 等. 火炬松人工林松脂产量变异及松脂成分特性分析[J]. 分子植物育种, 2018, 16(22): 7514-7520.

[13] XU S, TAUER C G, NELSON C D. Genetic diversity within and among populations of shortleaf pine (*Pinus echinata* Mill.) and loblolly pine (*Pinus taeda* L.)[J]. Tree Genetics & Genomes, 2008, 4(4): 859-868.

[14] 杨会肖, 刘天颐, 徐斌, 等. 火炬松生长和松脂性状相关候选基因的单核苷酸多样性分析[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(1): 75-81.

[15] 王金榜, 蒋开彬, 刘天颐, 等. 火炬松初级种子园和改良种子园无性系产脂量的变异研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(10): 47-52.

[16] 黄少伟, 刘天颐, 刘纯鑫, 等. 一种用近红外光谱技术预测火炬松松脂产量的方法: 中国, 201410401597.0[P]. 2014-11-12.

[17] 刘天颐, 刘纯鑫, 黄少伟, 等. 火炬松核心育种群体子代生长变异与选择[J]. 林业科学, 2013, 49(2): 27-32.

[18] 黄少伟, 谢维辉, 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: 214-233.

[19] 刘青华, 周志春, 范辉华, 等. 马尾松产脂力与生长性状的家系变异及优良家系早期选择[J]. 林业科学研究, 2013, 26(6): 686-691.

[20] 陈晓阳, 沈熙环. 林木育种学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 20-21.

[21] 国家林业局林产工业规划设计院. LY/T 1824-2009 火炬松速生丰产林[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[22] 阮少宁, 孙小霞, 梁一池. 火炬松速生家系的选择[J]. 广西林业科学, 2003, 32(4): 184-187.

[23] 方乐金, 施季森, 李力, 等. 枫香子代性状的遗传变异分析[J]. 林业科学, 2003, 39(3): 148-152.

[24] 方乐金, 施季森. 不同林龄枫香子代性状变异与家系选择[J]. 林业科技开发, 2010, 24(1): 50-52.