

赵奋成, 郭文冰, 林昌明, 等. 湿地松自由授粉家系松脂产量性状和生长性状的遗传变异分析 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(4): 90-94.
ZHAO Fencheng, GUO Wenbing, LIN Changming, et al. Genetic variation analysis on oleoresin yield and growth traits of *Pinus elliottii* open-pollinated families[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(4): 90-94.

湿地松自由授粉家系松脂产量性状和生长性状的遗传变异分析

赵奋成¹, 郭文冰¹, 林昌明², 钟岁英², 吴惠姗¹,
李义良¹, 范伟军², 廖仿炎¹, 邓乐平²

(1 广东省林业科学研究院 广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广东 广州 510520;
2 台山市红岭种子园, 广东 江门 529223)

摘要:【目的】生长性状、木材性状和产脂性状是广东湿地松新一轮遗传改良的目标性状。分析湿地松树高、胸径、材积、松脂质量等的表型统计量、遗传力与性状相关性, 为制定多性状遗传改良策略提供理论依据。【方法】以广东省台山市 18 年生的 32 个湿地松自由授粉家系为材料, 收集 24 h 内胸高处的松脂样品, 称质量并调查生长量。利用 Asreml 统计软件估算性状的遗传力和性状间的相关系数。【结果】松脂质量 (m) 呈正偏态分布, 其变异系数高于生长性状的变异系数, 达到 75.04%。转换后的松脂质量 (m_t) 单株狭义遗传力与家系平均遗传力分别为 0.216 1 和 0.600 5。生长性状单株狭义遗传力为 0.252 7~0.415 1, 家系平均遗传力为 0.648 3~0.751 2。树高、胸径和单株材积之间呈极显著遗传正相关 (相关系数为 0.813~0.983, $P<0.001$), 三者与木材密度呈显著的正相关 ($P<0.05$), 但标准误较大; 上述性状与松脂质量的遗传相关均不显著。【结论】在广东选择脂、材性状优良的个体, 应采用家系选择与家系内单株选择的合并选择方法; 在广东现有的湿地松遗传材料中, 对生长量、木材密度和松脂质量做同步改良是可行的。

关键词: 湿地松; 自由授粉家系; 松脂质量; 遗传相关
中图分类号: S722.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2020)04-0090-05

Genetic variation analysis on oleoresin yield and growth traits of *Pinus elliottii* open-pollinated families

ZHAO Fencheng¹, GUO Wenbing¹, LIN Changming², ZHONG Suiying², WU Huishan¹,
LI Yiliang¹, FAN Weijun², LIAO Fangyan¹, DENG Leping²

(1 Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China; 2 Taishan Hongling Seed Orchard, Jiangmen 529223, China)

Abstract: 【Objective】Growth property, wood property and oleoresin trait are target traits in the new round of slash pine (*Pinus elliottii*) genetic improvement. The goal was to analyze phenotypic performance, heritabilities and trait correlations of tree height, diameter at breast height (DBH), individual volume and resin mass, and provide a theoretical basis for developing breeding strategies for multiple traits. 【Method】Thirty-two open-pollinated families of 18-year-old *P.elliottii* in Taishan City of Guangdong Province were tested. Resin samples at breast height were collected for 24 hours, the mass was determined and the amount of growth was measured. The trait heritabilities and correlations between traits were estimated using Asreml. 【Result】The resin mass (m) presented positively skewed distribution, and its coefficient of variation was higher than those of the growth

traits, reaching 75.04%. The individual narrow-sense heritability and family average heritability for transformed resin mass (m_t) were 0.216 1 and 0.600 5. The narrow-sense heritabilities for growth traits ranged from 0.252 7 to 0.415 1, and the family average heritabilities ranged from 0.648 3 to 0.751 2. The genetic correlations among tree height, DBH and individual tree volume were strong with the correlation coefficients from 0.813 to 0.983($P<0.001$), and their genetic correlations with wood density were medium and significantly positive($P<0.05$), while the standard errors were large. No significant correlation was found between resin mass and the above traits. 【Conclusion】 To select individual performing well in oleoresin and wood properties, it is reliable to combine family selection and within-family selection. It's possible to simultaneously improve growth, wood density and resin mass using current genetic materials of *P. elliotii*.

Key words: *Pinus elliotii*; open-pollinated family; resin mass; genetic correlation

湿地松 *Pinus elliotii* 是原产于美国的重要商品林树种, 目前已成为我国南方重要的材用、纸浆用及脂用树种^[1]。为了改良湿地松的材用性状, 前人主要针对湿地松生长、干形、材性等性状开展遗传变异规律研究^[2-9]。美国协作组也注重对湿地松锈病抗性的遗传改良^[10-11]。美国森林遗传研究协作组(The cooperative forest genetics research program, CFGRP) 已进入湿地松的第 4 轮遗传改良阶段, 选择群体包含第 1 代到第 4 代的遗传材料, 改良目标为材积生长与锈病抗性, 改良的湿地松品系材积增益为 40%~55%^[12]。我国的湿地松改良也陆续进入了高世代, 新 1 轮改良目标除了生长和干形性状, 也包括材性、产脂和抗逆等性状。然而, 国内外对湿地松产脂性状遗传分析的报道较少, 同时, 产脂性状与其他性状的相关性也不明确, 这影响了湿地松多性状遗传改良策略的制定。

松树的产脂性状不仅是定向选育工业原料林品系的目标性状, 也是与抗性相关的重要性状。利用打孔安装松脂采集装置的方法, 测量微取样松脂质量是快速评价产脂量的方法, 已广泛应用于湿地松与火炬松 *Pinus taeda* 病虫害抗性的评估^[13]。南方松大小蠹 *Dendroctonus frontalis* 是美国南部破坏性最大的松林害虫, 研究表明, 火炬松微取样松脂质量越大, 对大小蠹的抗性越大^[13], 因此推断树体的松脂流量影响了大小蠹对寄主的选择。Roberds 等^[14]进而利用一块火炬松全同胞家系试验林, 评估了 10~11 年生火炬松微取样松脂质量的遗传参数, 结果表明, 松脂质量受中等遗传控制, 遗传力与生长性状相似, 松脂质量与生长性状的遗传相关呈中等正相关。近年来, Westbrook 等^[15]分析了火炬松松脂质量与树高、胸径的相关性, 发现它们的加性遗传相关性在 3 个地点表现为显著正相关或不相关, 说明松脂质量与生长性状的相关性在不同地点

存在差异。为了解析广东湿地松松脂质量的遗传变异规律及其与生长、木材密度的遗传相关性, 本文以湿地松 32 个半同胞家系为材料, 评估微取样松脂质量、树高、胸径等性状的遗传参数以及性状间的遗传相关性, 为广东湿地松新 1 轮遗传改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料概况

试验材料取自广东省台山市红岭种子园试验区 (22°11'N, 112°49'E) 的湿地松种质资源林^[16], 共 32 个自由授粉家系, 于 1997 年 6 月种植, 株行距 3 m×3 m。试验为随机完全区组设计, 1~4 株单行小区, 15 个区组, 每个家系 40 株。

1.2 性状测定

2015 年 10 月, 利用微量采集装置收集试验林内每株树木的松脂^[13-15], 具体方法: 利用电钻在胸高处钻取采样孔, 直径 1.5 cm, 装入预先称质量 (m_0) 的收集管, 用螺丝与树体固定, 24 h 后取下收集管; 称取松脂与收集管的质量 (m_1), 计算松脂质量 (m): $m=m_1-m_0$ 。2015 年 12 月, 对该种质资源林做每木针刺仪阻力值与木材密度测定, 相关方法参照文献^[16]; 而后, 每木测量树高、胸径, 计算单株材积。

1.3 数据转换与统计分析

利用统计软件 SAS 9.3 对数据做初步的统计分析。正态分布检验采用 UNIVARIATE 语句, 根据偏度和正态检验判断变量是否偏态分布, 以及偏态分布是否严重, 正态检验采用 Goodness-of-fit 的 KS 检验 (Kolmogorov-Smirnov test), 当偏度>1 且 KS 检验的 $P<0.05$ 时, 认为偏态分布较为严重。数据转换后符合偏度接近 0 且 KS 检验的 $P>0.05$, 认为转换后的数据符合正态分布。本文对松脂质量 m 做数据转换, 转换后的松脂质量为 m_t 。

采用 Box-Cox 变换^[17]:

$$m=(m_t^\lambda-1)/\lambda,$$

(1)

式中, λ 为转换参数, 通过检测 0.3~0.6(0.05 递增) 的转换效果, 确定本文松脂质量 m 转换为 m_t 后, λ 为 0.3。

利用统计软件 Asreml 估算各个试验因子的方差分量, 根据方差分量计算研究性状的遗传力、相关系数及标准误^[18]。数据分析的混合线性模型为:

$$y_{ijk}=\mu+b_i+f_j+(bf)_{ij}+e_{ijk},$$

(2)

式中, y_{ijk} 为单株观测值, μ 为群体平均值, b_i 为区组效应, f_j 为家系效应, $(bf)_{ij}$ 为区组与家系的互作效应, e_{ijk} 为误差效应。其中, 区组为固定效应, 其他因素为随机效应。

估算遗传参数采用以下公式^[19-20]:

$$CV=100\sigma_p/\bar{x},$$

(3)

$$h_1^2=4\sigma_f^2/(\sigma_f^2+\sigma_{bf}^2+\sigma_e^2),$$

(4)

$$h_f^2=\sigma_f^2/\left(\sigma_f^2+\frac{n_1}{n_2}\sigma_{bf}^2+\frac{1}{n_2}\sigma_e^2\right),$$

(5)

$$r_g=\text{cov}_g(x,y)/\sqrt{\sigma_g^2(x)\times\sigma_g^2(y)},$$

(6)

$$r_p=\text{cov}_p(x,y)/\sqrt{\sigma_p^2(x)\times\sigma_p^2(y)},$$

(7)

式 (3) 中, CV 为变异系数, σ_p 、 $\bar{x}$ 分别为研究性状的表型标准差和群体平均值; 式 (4) 和式 (5) 中, h_1^2 和 h_f^2 分别为单株狭义遗传力和家系平均遗传力, σ_f^2 、

σ_{bf}^2 和 σ_e^2 分别为家系方差、区组×家系互作方差和误差方差, n_1 和 n_2 分别为小区内和家系内树木数量的调和平均数; 式 (5) 和式 (6) 中, r_g 和 r_p 分别为遗传相关系数和表型相关系数, $\text{cov}_g(x,y)$ 和 $\text{cov}_p(x,y)$ 分别为性状 x 与性状 y 的遗传协方差和表型协方差。遗传协方差等于家系协方差; $\sigma_g^2(x)$ 和 $\sigma_g^2(y)$ 分别为性状 x 和性状 y 的遗传方差, $\sigma_p^2(x)$ 、 $\sigma_p^2(y)$ 分别为性状 x 和性状 y 的表型方差; 表型方差等于遗传方差、家系×区组互作方差及误差方差之和。

2 结果与分析

2.1 湿地松生长性状与松脂质量的描述性统计

比较 18 年生湿地松生长、木材密度与松脂质量性状的变异程度, 结果表明, 木材密度的变异系数最小 (9.60%)^[16], 其次为树高与胸径, 以及相对较大的单株材积 (47.10%), 而变异系数最大的是松脂质量 (75.04%), 说明松脂质量在测定林内个体间存在较大变异 (表 1)。

松脂质量 (m) 的分布呈正偏态分布, 偏度和峰度分别为 1.88 和 1.93, KS 检验 $P<0.01$ 。这与美国本土湿地松^[21] 和幼龄期火炬松的研究结果一致^[14-15], 说明本研究中湿地松群体松脂性状的分布规律与原产地一致。转换后的 m_t 偏度为 0.20, KS 检验 $P>0.05$, 符合正态分布, 在下列遗传分析中采用转换后的数值估算松脂质量的遗传参数。

表 1 18 年生湿地松生长量与松脂质量基本概况
Table 1 The basic information of growth and resin mass of 18-year-old *Pinus elliottii*

项目 Item	树高/m Tree height	胸径/cm Diameter at breast height	单株材积/m ³ Individual tree volume	m (松脂)/g Resin weight
均值 Mean	13.26	20.03	0.22	2.84
最大值 Max.	17.50	33.30	0.68	16.00
最小值 Min.	7.80	11.50	0.05	0.10
标准差 SD	1.51	3.89	0.10	2.13
变异系数/% Coefficient of variation	11.36	19.44	47.10	75.04

2.2 湿地松生长性状与松脂质量的遗传参数估计

由表 2 可知, 在广东省台山市的立地条件下, 18 年生湿地松树高的单株狭义遗传力较大, $h_1^2=0.415\ 1$, 胸径、单株材积与松脂质量 (m_t) 的单株狭义遗传力均相对较小, 在 0.216 1~0.299 8 之间, 4 个性状的家系平均遗传力均高于单株遗传力, 在 0.600 5~0.751 2 之间, 其中树高的家系平均遗传力最高。松脂质量 (m_t) 的单株狭义遗传力与家系平均遗传力分别为 0.216 1 和 0.600 5。总体而言, 在粤

西立地条件下对湿地松进行脂材性状的选择时, 家系选择的可靠性大于单株选择。

2.3 性状间的相关性分析

由表 3 可知, 树高、胸径、单株材积 3 个性状间呈遗传与表型正相关, 相关系数在 0.731~0.983 之间, 而且遗传相关系数高于表型相关系数。树高、胸径、单株材积与木材密度呈遗传与表型正相关, 遗传相关系数在 0.449~0.613 之间, 但标准误也较大。树高、胸径、单株材积与松脂质量呈显著的表型正

表 2 湿地松生长性状与松脂质量的遗传参数估计¹⁾

Table 2 Estimates of genetic parameters for growth traits and resin mass in *Pinus elliotii*

性状 Trait	单株狭义遗传力(h_i^2) Individual narrow-sense heritability	家系平均遗传力(h_f^2) Family average heritability
树高 Tree height	0.415 1±0.142 7	0.751 2±0.071 7
胸径 Diameter at breast height	0.252 7±0.206 3	0.648 3±0.198 7
单株材积 Individual tree volume	0.299 8±0.106 1	0.685 5±0.082 5
松脂质量 Resin mass	0.216 1±0.092 0	0.600 5±0.107 9

1)表中“±”之后的数据为标准误, $n=805$

1) The data after “±” are standard errors, $n=805$

表 3 性状间的加性遗传相关与表型相关系数¹⁾

Table 3 Additive genetic and phenotypic correlation coefficients between traits

性状 Trait	HT	DBH	Vol	Den	m_t
HT		0.731±0.017***	0.783±0.014***	0.324±0.034***	0.084±0.039*
DBH	0.813±0.095***		0.965±0.002***	0.269±0.034***	0.182±0.036***
Vol	0.884±0.063***	0.983±0.011***		0.275±0.034***	0.151±0.037***
Den	0.613±0.248**	0.449±0.306*	0.524±0.283*		-0.007±0.037
m_t	0.095±0.269	0.096±0.288	0.156±0.368	-0.007±0.037	

1) HT为树高,DBH为胸径,Vol为单株材积,Den为木材密度, m_t 为转换的松脂质量;表中“±”之后的数据为标准误;表中右上方数据为表型相关系数,左下方数据为遗传相关系数;“*”、“**”和“***”分别表示达0.05、0.01和0.001水平的显著相关

1) HT: Height of tree; DBH: Diameter at breast height; Vol: Individual tree volume; Den: Wood density; m_t : Transformed resin mass. Data after “±” are standard errors. Upper right data are phenotypic correlation coefficients, and lower left data are genetic correlation coefficients. “*”, “**” and “***” indicate significant correlation at 0.05, 0.01 and 0.001 levels, respectively

相关,相关系数在 0.084~0.182 之间,但遗传相关均不显著。总体而言,在粤西立地条件下,根据湿地松 18 年生生长量进行选择,可间接获得木材密度的增益;并且,同时选择生长与产脂力优良的湿地松家系和个体是可行的。

3 讨论与结论

湿地松的第 1 轮遗传改良以生长量和干形为目标性状,到了高世代改良阶段,社会需求是多元的,导致改良目标也需要多样化。因此,解析湿地松多个性状的遗传特性以及性状间的相关性,对于制定新一轮改良策略具有重要意义。

松脂是工业化学品的重要天然来源之一,广泛应用于合成橡胶、油墨、香料等化工产业^[22]。评价松脂产量性状的方法包括:固定剖面负荷率获得的松脂产量^[23]、每日每厘米刀口松脂产量计算获得的产脂力^[22],以及利用微量采集装置收集测定的松脂质量^[14]。利用微量采集装置收集测定的松脂质量不仅可以反映松树树体的产脂力,还可以间接反映树体对病虫害胁迫的抗性^[14]。本研究分析了湿地松微取样松脂质量的特性,发现松脂质量具有较高的变异

系数,单株材积的变异系数中等,而树高与胸径的变异系数相对较低,这与前人的报道^[14]基本一致。湿地松松脂质量呈正偏态分布,与湿地松^[21]、火炬松^[14-15]的研究结果一致,暗示产脂性状可能受多因素交互作用调控^[14,20]。松脂质量和生长性状的单株遗传力较低,家系遗传力中等,与 Lai 等^[24]报道的江西湿地松的 h_i^2 、 h_f^2 分别为 0.11~0.27、0.41~0.55 基本一致,说明南方地区进行湿地松脂材性状的选择,家系选择的可靠性大于单株选择。

利用本文同一批材料通过针刺仪做去皮直径与木材密度和木材阻力的相关性分析,发现去皮直径与密度呈中度的表型正相关,而遗传相关未达到显著水平^[16]。本研究带皮胸径与木材密度的遗传和表型均呈显著的中等正相关,说明湿地松的生长量与木材材性可做同步正向改良。松脂质量与生长量和木材密度呈弱的表型正相关,而遗传相关不显著,说明选育高产脂湿地松,不会对生长量有负面影响。脂材性状遗传相关未达到显著水平,可能与该地点个体间的竞争有关,前人指出,南方松是不耐阴树种,密度过大时,个体间的竞争影响了树体的抗性^[15]。本研究材料选自 18 年生湿地松,测定时林分

保存率为 63%^[16], 在不做疏伐的情况下, 可能存在密度过大的现象, 因此影响了产脂性状的表现, 这可能也是该地点单株狭义遗传力相对较低的原因之一^[15]。

本研究以湿地松 32 个自由授粉家系为材料, 分析 18 年生湿地松生长、木材密度与松脂产量的性状表现, 为开展湿地松改良的多性状选择建立了高效的方法, 研究结果表明: 1) 湿地松松脂产量性状变异系数高于生长性状与木材密度; 松脂产量的分布呈正偏态分布, 可能受到多因素交互作用调控。2) 粤西立地条件下, 18 年生湿地松树高单株狭义遗传力为 0.415 1, 胸径、单株材积、松脂质量的单株狭义遗传力在 0.216 1~0.299 8; 家系平均遗传力均高于单株狭义遗传力, 4 个性状的家系平均遗传力在 0.600 5~0.751 2, 性状受中等遗传控制。在选择湿地松单性状优良的个体时, 为获得较可靠的选择效果, 宜采用家系选择+家系内单株选择的合并选择方法。3) 生长量与木材密度呈显著的遗传正相关与表型正相关, 遗传相关系数大于表型相关系数, 但遗传相关的误差值也较大, 说明可能存在同时控制生长和木材密度的多效性基因。生长量与松脂质量呈弱的表型正相关, 但遗传相关值接近 0。总之, 在广东湿地松遗传材料中, 可同步改良生长、木材密度和产脂性状。

参考文献:

- [1] 李彦杰, 栾启福, 沈丹玉, 等. 湿地松自由授粉家系松脂组分遗传变异研究[J]. 林业科学研究, 2012, 25(6): 773-779.
- [2] HODGE G R, PURNELL R C. Genetic parameter estimates for wood density, transition age, and radial growth in slash pine[J]. *Can J For Res*, 1993, 23(9): 1881-1891.
- [3] DIETERS M J. Genetic parameters for slash pine (*Pinus elliottii*) grown in south-east Queensland, Australia: Growth, stem straightness and crown defects[J]. *For Genet*, 1996, 3(1): 27-36.
- [4] EMHART V I, MARTIN T A, WHITE T L, et al. Genetic variation in basal area increment phenology and its correlation with growth rate in loblolly and slash pine families and clones[J]. *Can J For Res*, 2006, 36(4): 961-971.
- [5] 赵奋成, 林昌明, 吴惠珊, 等. 湿地松生长性状遗传参数的年度变化趋势[J]. 广东林业科技, 2015, 31(5): 1-7.
- [6] 吴际友, 李志辉, 龙应忠, 等. 湿地松全同胞家系主要经济性状的遗传变异与选择研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(8): 1-4.
- [7] 骆秀琴, 姜笑梅, 殷亚方, 等. 湿地松 15 个家系木材材性遗传变异及优良家系评估[J]. 林业科学研究, 2003(6): 694-699.
- [8] 姜笑梅, 骆秀琴, 殷亚方, 等. 不同湿地松种源木材材性遗传变异的研究[J]. 林业科学, 2002, 38(3): 130-135.
- [9] 吴际友, 龙应忠, 胡蝶梦, 等. 湿地松半同胞家系主要经济性状的遗传变异及其综合选择[J]. 林业科学, 2000, 36(4): 106-109.
- [10] DE SOUZA S M, WHITE T L, HODGE G R, et al. Genetic parameter estimates for greenhouse traits of slash pine artificially inoculated with fusiform rust fungus[J]. *For Sci*, 1991, 37(3): 836-848.
- [11] DIETERS M J, HODGE G R, WHITE T L. Genetic parameter estimates for resistance to rust (*Cronartium quercuum*) infection from full-sib tests of slash pine (*Pinus elliottii*), modelled as functions of rust incidence[J]. *Silvae Genet*, 1996, 45(4): 235-241.
- [12] KIRST M, PETER G, POWELL G, et al. Cooperative forest genetics research program[Z/OL].[2019-10-15]. <http://www.sfrc.ufl.edu/cfgrp/overview.shtml>.
- [13] STROM B L, GOYER R A, INGRAM L L, et al. Oleoresin characteristics of progeny of loblolly pines that escaped attack by the southern pine beetle[J]. *For Ecol Manage*, 2002, 158: 169-178.
- [14] ROBERDS J H, STROM B L, HAIN F P, et al. Estimates of genetic parameters for oleoresin and growth traits in juvenile loblolly pine[J]. *Can J For Res*, 2003, 33(12): 2469-2476.
- [15] WESTBROOK J W, RESENDE M F, MUNOZ P, et al. Association genetics of oleoresin flow in loblolly pine: Discovering genes and predicting phenotype for improved resistance to bark beetles and bioenergy potential[J]. *New Phytol*, 2013, 199(1): 89-100.
- [16] 赵奋成, 郭文冰, 钟岁英, 等. 基于针刺仪测定技术的湿地松木材密度间接选择效果[J]. 林业科学, 2018, 54(10): 172-179.
- [17] BOX G E P, COX D. An analysis of transformations[J]. *J Roy Stat Soc, Series B*, 1964, 26: 211-252.
- [18] 林元震, 陈晓阳. R 与 ASReml-R 统计分析教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014: 36-251.
- [19] 马育华. 植物育种的数量遗传学基础[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982.
- [20] LYNCH M, WALSH B. Genetics and analysis of quantitative traits[M]. Sinauer Associates, Sunderland: Sinauer Associates, Inc., 1998.
- [21] PETERS W J. Variation in oleoresin yielding potential of selected slash pines[J]. *For Sci*, 1971, 17(3): 306-307.
- [22] 尹焕焕, 刘青华, 周志春, 等. 马尾松产脂性状与生长性状的无性系变异及相关性[J]. 林业科学, 2018, 54(12): 82-91.
- [23] 许业洲, 杜超群, 范邦海, 等. 湿地松高产脂家系产脂量与胸径结构差异及其相关关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(8): 7-13.
- [24] LAI M, DONG L, YI M, et al. Genetic variation, heritability and genotype $\times$ environment interactions of resin yield, growth traits and morphologic traits for *Pinus elliottii* at three progeny trials[J]. *Forests*, 2017, 8(11): 409-425.