

# 马尾松 3 代杂交子代幼林松脂化学组分的 GCA/SCA 分析

董虹妤<sup>1</sup>, 刘青华<sup>1\*</sup>, 周志春<sup>1</sup>, 金国庆<sup>1</sup>, 沈丹玉<sup>1</sup>, 宋新回<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 国家林业局马尾松工程技术研究中心, 浙江省林木育种技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311400; 2. 浙江省淳安县姥山林场, 浙江 淳安 311700)

**摘要:** [目的] 研究马尾松松脂化学组分的一般配合力(GCA)/特殊配合力(SCA)效应, 促进优质脂用马尾松的遗传改良。[方法] 利用设置在浙江省淳安县姥山林场的 5 年生 6×6 半双列遗传交配设计的马尾松 3 代种质幼林, 通过调查各单株生长性状以及测定松脂化学组分, 揭示马尾松松脂化学组分的遗传变异规律及遗传控制方式和它们与生长性状的相关性。[结果] 试验材料共检测出 23 种松脂组分, 单萜类、倍半萜类、二萜类组分含量分别占松脂含量的 7.29%、1.50% 和 91.17%。13 种平均含量高于松脂总量 0.1% 且杂交组间差异显著的马尾松松脂主要组分均表现出显著或极显著的 GCA 效应, 而 SCA 效应较不显著。除去氢枞酸主要受显性基因效应控制, 左旋海松酸/长叶松酸、8,12-枞二烯酸加/显性效应相当外, 其余主要组分均是以加性基因效应占主导地位。各松脂主要组分家系遗传力为 0.655~0.949, 受中度或高度的遗传控制。研究还发现, 马尾松松脂单萜主要组分中  $\alpha$ -蒎烯、蒎烯、 $\beta$ -蒎烯间呈极显著正相关关系, 对其中一种组分的选择可能会带来其它单萜组分的同增或同减。而二萜组分中左旋海松酸/长叶松酸与单萜、倍半萜、二萜组分呈较普遍负相关, 与长叶烯、海松醛、去氢枞酸、8,12-枞二烯酸、枞酸和新枞酸则呈极显著的负相关关系, 对左旋海松酸/长叶松酸的选择将会对大部分松脂组分产生抑制作用。此外, 马尾松多数松脂主要组分与树高、地径相关性并不明显, 松脂化学组分与生长似受不同的遗传机制控制, 两种性状可能相互独立。[结论] 幼龄期马尾松松脂大部分组分具有显著的 GCA 效应, 加性基因效应占主导地位, 受中度或高度遗传控制。树高和地径与松脂各组分含量不相关, 但部分松脂组分间存在显著的相关性。该结果为马尾松脂用性状的改良提供理论依据。

**关键词:** 马尾松; 松脂化学组分; GCA; SCA; 相关

中图分类号: S791.248

文献标识码: A

## GCA/SCA of Oleoresin Compounds for F3 Hybrid Progeny of *Pinus massoniana* Younglings

DONG Hong-yu<sup>1</sup>, LIU Qing-hua<sup>1</sup>, ZHOU Zhi-chun<sup>1</sup>, JIN Guo-qing<sup>1</sup>, SHEN Dan-yu<sup>1</sup>, SONG Xin-hui<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Engineering Research Center of Masson Pine of State

Forestry Administration, Key Laboratory of Tree Breeding of Zhejiang Province, Hangzhou 311400, Zhejiang, China;

2. Laoshan Forest Farm of Chun'an Country, Zhejiang Province, Chun'an 311700, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] To study genetic effects of general combining ability (GCA) and specific combining ability (SCA) of oleoresin components of *Pinus massoniana* for the purpose of genetic improvement of oleoresin-producing *P. massoniana*. [Method] A half diallel cross among 6 *P. massoniana* clones in Laoshan Forest Farm of Zhejiang

收稿日期: 2016-03-04

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAD01B02); 国家自然科学基金项目(31100491); 浙江省农业新品种选育重大科技专项项目重点课题(2012C12908-12); 国家林业公益性行业科研专项(201204307)

作者简介: 董虹妤(1990—), 女, 山东威海人, 在读硕士研究生, 主要从事林木遗传育种研究。

\* 通讯作者: 刘青华, 助理研究员, 博士, 主要从事林木遗传育种研究。E-mail: liuqinghua642@163.com

Province was used to reveal the genetic variation of oleoresin components, the correlation between growth and the content of oleoresin components and the correlation between oleoresin compounds by investigating the growth and the content of oleoresin components of each sample. [Result] Twenty three oleoresin components were identified, the Monoterpenes, Sesquiterpenes and Diterpenes accounted for 7.29%, 1.50% and 91.17% of total oleoresin content. It was found that the genetic effects of GCA were more significant than the genetic effects of SCA in the 13 major oleoresin components with higher average content and significant differences among the combinations. Most major oleoresin components were controlled mainly by the additive gene effects while dehydroabietic acid was controlled mainly the by dominance gene effects and levopimaric acid/palustric acid, 8,12-Abietadienoic acid were controlled by the additive gene effects and the dominance gene effects simultaneously. The 13 major oleoresin components were under moderate or high level genetic control with the full-sib 0.655 ~ 0.949. In addition, higher positive correlations were found between  $\alpha$ -pinene, camphene and  $\beta$ -pinene in monoterpenes, which means the selection of one component can make the same increase or decrease for the other components. However, levopimaric acid/palustric acid in diterpenes were found higher negative correlations with most major oleoresin components of monoterpenes, sesquiterpenes and diterpenes components, and the extremely significant negative correlations were found between levopimaric acid/palustric acid and longifolene, pimaric acid, dehydroabietic acid, 8,12-abietadienoic acid, abietic acid, neoabietic acid, which mean the selection of levopimaric acid/palustric acid will restrain the increase of most major oleoresin components. Meanwhile, it was found that most major oleoresin components and growth traits were hardly relevant. So it is speculated that the two types of traits may be independent and controlled by different genetic mechanism. [Conclusion] Most of oleoresin components had significant GCA effect and were controlled mainly by the additive gene effects. These oleoresin compounds had moderate to strong family heritability. The correlation was not significant between growth and the content of oleoresin compounds, but there were significant among oleoresin compounds, which can be used to determine the optimize improvement strategy for oleoresin trait in *P. massoniana*.

**Keywords:** *Pinus massoniana*; oleoresin components; GCA; SCA; correlation

松脂主要由松香和松节油组成,是一种重要的林产化工原料,广泛应用于医药、造纸、涂料、油墨、合成橡胶、胶黏剂等产业<sup>[1]</sup>。其主要组分与石油冶炼过程中产生的石油树脂功效类似,但在相溶性和色泽等方面却远优于石油树脂,同时,松脂作为一种重要的可再生环保资源,更有利于产业的可持续发展<sup>[2-3]</sup>。研究还发现,松脂及松脂中的化学组分与树体的抗性相关,有助于树体抵御病虫害侵害,如松脂流有助于树体抵御南方松大小蠹(*Dendroctonus frontalis* Zimmermann)入侵<sup>[4-5]</sup>,松脂中的单萜类物质对红脂大小蠹(*D. valens* LeConte)有明显毒杀或避忌作用<sup>[6-7]</sup>,对松材线虫(*Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Burher) Nickle)高抗的马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)松脂中含较高的长叶烯和 $\alpha$ -松油醇等<sup>[8]</sup>。

我国是全球最大的松脂生产国,松脂产量占全世界松脂总产量的60%以上,年产值超过80亿元<sup>[7]</sup>。自上个世纪80年代以来,国内林木育种研究

人员开展了一系列高产脂松树遗传改良工作,并基于相关子代遗传测定林,探究松树产脂力在种源间、家系间和无性系间的遗传变异规律,初步揭示了产脂力所受的遗传控制大小以及产脂力与生长等关系,选育出一批高产脂家系和无性系材料<sup>[9-11]</sup>。然而这些研究主要是以松脂产量的改良为主,对松脂化学组分的研究相对匮乏。松脂中化学组分的种类及含量不同其利用价值也不同,实现松脂化学组分遗传改良以满足各行业不同的松脂需求,日渐成为提升我国松脂产业竞争力的迫切要求。古研等<sup>[12]</sup>、王振洪等<sup>[13]</sup>对马尾松标准样松节油和松香的组分及含量进行了研究,岳水林等<sup>[14]</sup>、尹晓兵等<sup>[15]</sup>探究了马尾松和思茅松(*P. kesiya* Var. *Langbianensis* (A. Chev) Gaussen)松脂化学组分在不同种源间的遗传差异,李彦杰等<sup>[16]</sup>、庄伟瑛等<sup>[17-18]</sup>对湿地松(*P. elliottii* Engelman)松脂化学组分及单萜烯类组分进行了研究,并揭示了湿地松不同组分间的相关关系,这些研究都为推动我国松脂改良奠定了较好

基础。

一般配合力(GCA)和特殊配合力(SCA)作为选配亲本的重要指标,已被广泛应用于林木遗传育种的实践中。通过配合力的研究,可揭示性状的遗传控制方式,用以科学指导有效的遗传改良方案和提高育种效率<sup>[19]</sup>。马尾松是我国南方山地中主要的针叶用材树种和最重要的脂用树种,其松脂产量极大,产脂量约为国内松脂总产量的90%。尽管近年来已对马尾松松脂化学组分及含量进行了大量的研究,但对其松脂化学组分的GCA/SCA研究仍鲜有涉及,松脂各组分遗传控制方式尚不明确,致使育种者无法确定最佳的育种策略以及准确估算遗传改良效果,制约了脂用马尾松遗传改良的进程。此外,马尾松松脂化学组分和生长等性状的相关关系,也是育种者关心的重点问题,若追求优质的松脂性状是以牺牲生长量为代价,在改良松脂性状时应给予慎重考虑。本研究利用设置在浙江省淳安县姥山林场的5年生半双列遗传交配设计子代测定林,对马尾松3代种质幼林松脂组分和生长进行测定与分析,系统研究主要松脂化学组分的GCA/SCA,揭示其所受的遗传控制方式,探究松脂化学组分间及与生长的相关关系,旨为我国优质脂用马尾松遗传改良提供科学有效的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

2007年从浙江省淳安县姥山林场马尾松2代育种群体中选择6个无性系亲本,其中亲本33号(1145×1126)、20号(1103×3412)、40号(5163×5907)、22号(6627×3412)、56号(3412×5907)为1代亲本杂交后代即双亲子代林中优良单株(优树)采穗嫁接的无性系号,亲本44号(种源1123)为种源1123子代中优良单株嫁接形成的无性系号。利用这6个亲本无性系按6×6半双列遗传交配设计(表1)配制15个杂交组合,2008年底收获种子,2009年播种育苗,2010年春在姥山林场营建子代测定林。测定林地处于中亚热带北缘(119°03' E, 29°37' N),海拔高度250~300 m,年平均气温17℃,≥10℃的年积温为5 410℃,年降水量1 430 mm,全年日照时数1 951 h,土壤为山地黄土,立地条件中等。试验林采用完全随机区组设计,10株小区,重复5次。

表 1 马尾松 6×6 半双列交配设计

母本	父本					
	33	20	40	22	56	44
33		×	×	×	×	×
20			×	×	×	×
40				×	×	×
22					×	×
56						×
44						

### 1.2 测定方法

1.2.1 松脂采集及生长调查 2014年9月在每个试验小区内选择4株生长最佳植株(遭受损伤和病虫害的植株除外),测量其树高、地径,在略低于胸径的相同位置采用下降式单刀采脂,剖面与树干成45°角,负荷率约为25%,为减少对幼树伤害,侧沟深入木质部仅2~4 mm,每株取少量新鲜松脂溶于200 μL无水乙醇,密封冷冻保存直至松脂组分测定。

1.2.2 松脂组分测定 采回松脂委托国家林业局经济林产品质量检验检测中心(杭州)进行松脂组分测试。仪器采用美国Agilent Technologies公司产的HP6890GC/5975B气相色谱-质谱联用仪。测定前于样品中加入四甲基氢氧化铵溶液反应,反应液待测。仪器色谱条件为HP-5MS石英毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm);采用程序升温,60℃保持2 min,以2℃·min<sup>-1</sup>升至80℃,保持5 min,再以4℃·min<sup>-1</sup>升到280℃,保持5 min;进样口温度为260℃;进样量1 μL,分流比50:1;载气为高纯氦气;溶剂延迟3 min;MS条件为电离方式EI;电子能量70 eV;传输线温度250℃;离子源温度230℃;扫描的质量范围为30~600 amu。将测定结果通过化学工作站数据处理系统,利用NIST08谱库检索成分、核对并定性。再利用色谱峰面积归一法定量,测得各化学组分在松脂中的相对百分含量。

### 1.3 统计分析

以小区单株测定值为单元,对松脂化学组分进行正态性检验,符合正态分布后进行方差分析,以检验不同杂交组合遗传差异的显著性。方差分析线性模型为: $Y_{ijk} = \mu + B_i + F_j + BF_{ij} + e_{ijk}$ ,其中, $Y_{ijk}$ 为第*i*区组第*j*家系第*k*单株的观测值, $\mu$ 为总平均值, $B_i$ 为第*i*区组效应, $F_j$ 为第*j*家系效应, $BF_{ij}$ 为第*i*家系和第*j*区组的互作效应, $e_{ijk}$ 为机误。若杂交组合效应显著,则按Griffing双列杂交方法IV(随机模型)进行配合力方差分析,配合力方差分析线性模型为: $Y_{ijkl} = \mu + B_i + g_j + g_k + s_{jk} + BF_{ijk} + e_{ijkl}$ ,其中, $g_j$ 、 $g_k$ 、 $s_{jk}$

分别为母本一般配合力效应、父本一般配合力效应和特殊配合力效应,配合力方差分析时母本一般配合力方差和父本一般配合力方差合并为一般配合力方差。按随机模型估算一般配合力/特殊配合力方差分量( $\sigma_g^2/\sigma_s^2$ )及遗传力等参数<sup>[20]</sup>。本试验利用的马尾松3代种质幼林,其部分亲本有亲缘关系,试验林近交系数( $F$ )介于0~1/8之间。为便于统计分析,文中假设近交系数为1/8,上位效应不存在,则加性/显性方差分量( $V_A/V_D$ )计算公式分别为: $V_A \approx [4/(1+F)]\sigma_g^2$ ,  $V_D \approx [4/(1+F)^2]\sigma_s^2$ <sup>[21]</sup>。正态性检验、性状方差分析、配合力方差分析在SAS/STAT(version 9.0)软件中完成,相关性分析在SPSS(version 13.0)软件中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 马尾松松脂化学组分的种类与含量

马尾松松脂包括松香和松节油,松节油主要由单萜和倍半萜组成,松香主要由二萜组成。对马尾松15个杂交组合的松脂化学组分进行分析(图1A

-B),共检出23种组分,其中单萜5种,倍半萜9种,二萜9种。3类组分中,二萜含量最高,约占松脂总量的91.17%,其次是单萜,约占松脂总量的7.29%,倍半萜含量最低,仅占松脂总量的1.50%。

各组分中平均含量高于松脂总量0.1%的大量组分有15种,分别为 $\alpha$ -蒎烯、苈烯、 $\beta$ -蒎烯和柠檬烯、长叶烯、石竹烯、海松醛、海松酸、山达海松酸、异海松酸、左旋海松酸/长叶松酸、去氢枞酸、8,12-枞二烯酸、枞酸和新枞酸,含量分别约占松脂总量的6.63%、0.13%、0.25%、0.08%、0.20%、0.04%、0.04%、0.01%、0.02%、0.57%、0.69%、0.09%、0.01%、0.04%、0.23%、6.63%、1.66%、0.22%、49.74%、3.81%、1.95%、12.54%和14.39%。单萜组分中, $\alpha$ -蒎烯含量最高,约占单萜总量的90.98%。倍半萜组分中,长叶烯和石竹烯含量最高,分别约占倍半萜总量的38.17%和45.80%。二萜组分中,海松酸、山达海松酸、异海松酸为海松酸型树脂酸,左旋海松酸/长叶松酸、枞酸、新枞酸为枞酸型树脂酸,两类树脂酸含量较高,分别约占二萜总量的9.32%和84.09%,约占松脂总量的8.15%和76.67%。

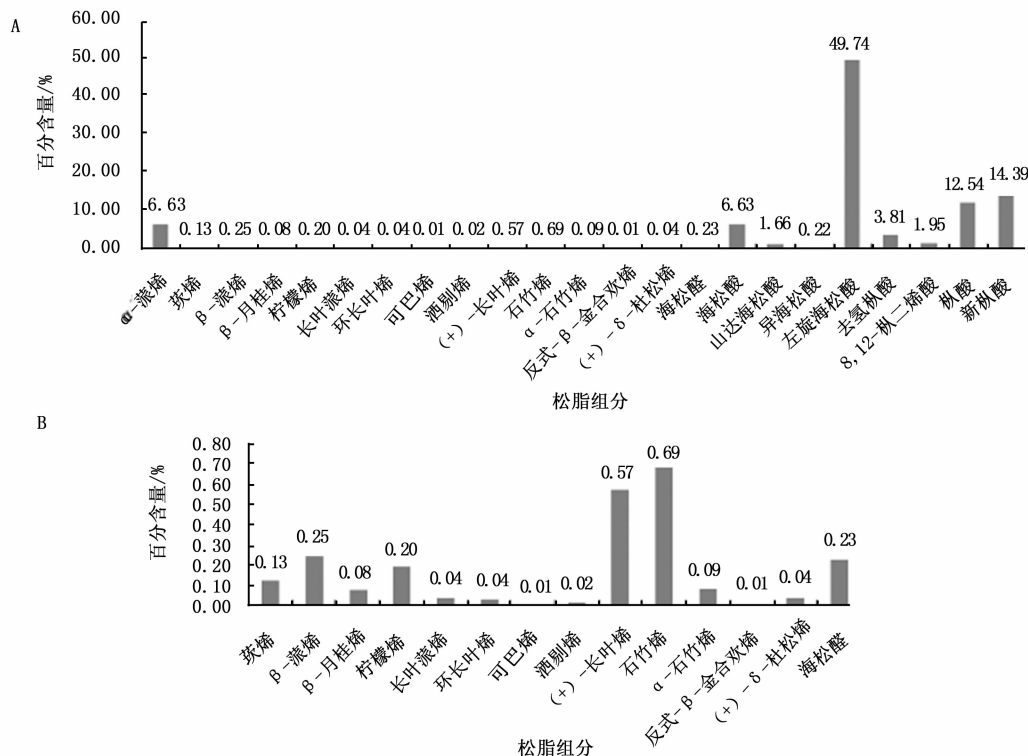


图1 马尾松各松脂组分占松脂总量的百分含量(A)和其中微量组分的百分含量(B)

### 2.2 马尾松松脂主要组分、生长性状遗传变异

对平均含量高于松脂总量0.1%以上的15个马尾松松脂主要组分及生长性状进行方差分析,结果

显示(表2):主要松脂组分中除柠檬烯和异海松酸2种组分外,其余13个组分在杂交组合间的差异均达到显著或极显著水平。马尾松树高、地径在杂交组

合间的差异也均达到极显著水平。该结果表明,新创制的杂交组合在大部分松脂主要组分和生长性状上创造出变异丰富的基本群体,具有较大的选择潜力。

表2 马尾松松脂主要组分、生长性状的方差分析

变异来源	区组	杂交组合	区组×杂交组合	机误	
Mon	aPin	10.465 124 **	2.296 073 **	1.057 550 **	0.524 839
	Cam	0.002 225 **	0.000 803 **	0.000 520 **	0.000 236
	bPin	0.018 675 **	0.013 443 **	0.003 363 **	0.001 905
	Lim	0.047 595 **	0.001 820	0.001 983 **	0.001 033
	Lon	0.335 351 **	0.240 575 **	0.068 069 **	0.061 562
Ses	Car	0.026 549 **	0.110 104 **	0.029 519 **	0.022 866
	Pim	0.320 235 **	0.012 393 **	0.003 609	0.002 738
Die	Pima	3.007 563 **	5.559 072 **	0.770 796 *	0.532 195
	San	0.054 210 **	0.012 676 **	0.009 676 **	0.004 173
	Iso	0.101 983 *	0.042 535	0.032 864	0.035 555
	L/P	618.060 968 **	45.483 553 **	11.666 177	9.130 083
	Deh	26.970 748	3.578 555 **	1.584 123	1.235 686
8-Ab	8-Ab	5.496 039 **	0.456 385 **	0.296 563 **	0.157 515
	Abi	138.525 355 **	18.317 176 **	3.903 244 *	2.735 876
	Neo	8.177 983 **	31.535 631 **	1.878 769	1.603 749
树高	4.955 026 **	2.504 571 **	0.774 199 **	0.248 664	
地径	0.002 412 **	0.001 987 **	0.000 315 **	0.000 074	

注: Mon: 单萆; Ses: 倍半萆; Die: 二萆; aPin:  $\alpha$ -蒎烯; Cam: 莰烯; bPin:  $\beta$ -蒎烯; Lim: 柠檬烯; Lon: 长叶烯; Car: 石竹烯; Pim: 海松醛; Pima: 海松酸; San: 山达海松酸; Iso: 异海松酸; L/P: 左旋海松酸/长叶松酸; Deh: 去氢枞酸; 8-Ab: 8,12-枞二烯酸; Abi: 枞酸; Neo: 新枞酸。下同。区组、杂交组合、区组×杂交组合、机误的自由度分别为4、14、56、225。\*、\*\*表示显著性概率分别为0.05和0.01,下同。

### 2.3 马尾松松脂主要组分的GCA/SCA及相对重要性

根据全同胞的遗传方差理论,性状的GCA、SCA方差分别主要由加性基因效应和显性效应控

制,因此,进行性状的GCA、SCA相对重要性分析,可有效衡量其遗传控制方式,以制定科学准确的育种方案<sup>[22]</sup>。本研究在方差分析结果的基础上,对在杂交组合间存在显著差异的13种松脂主要组分进行了配合力方差分析。结果显示(表3):马尾松13种主要组分的GCA效应普遍达显著或极显著水平,而对于SCA效应,只有 $\beta$ -蒎烯、石竹烯、海松醛、左旋海松酸/长叶松酸、去氢枞酸和枞酸达到显著水平,其余组分无显著的SCA效应。由此可见,影响这些组分的GCA效应在亲本之间存在显著差异,且GCA效应差异性有普遍高于SCA效应差异性的趋势。

进一步分析配合力方差分量,结果显示(表3):主要组分中,除左旋海松酸、去氢枞酸和8,12-枞二烯酸外,其余组分的 $\sigma_g^2$ 普遍高要于 $\sigma_s^2$ 。估算各组分的 $V_A$ 和 $V_D$ 得出,山达海松酸加性基因效应占总效应的百分数为100%,完全受加性基因效应控制; $\alpha$ -蒎烯、莰烯、 $\beta$ -蒎烯、柠檬烯、长叶烯、石竹烯、海松醛、海松酸、枞酸和新枞酸以加性基因控制为主,加性基因效应百分数为61.97%~98.56%;左旋海松酸/长叶松酸和8,12-枞二烯酸受加性基因效应和显性基因效应的共同控制;去氢枞酸主要受显性基因效应控制,显性基因效应百分数为83.80%。表3中各松脂主要组分家系遗传力( $h_f^2$ )为0.655~0.949,处于较高水平,表明这些组分均受到较高的遗传控制,对杂交组合进行选择有望获得较高的遗传增益。

表3 马尾松松脂主要组分的配合力方差分析

变异来源	GCA	SCA	机误	$\sigma_g^2$	$\sigma_s^2$	$V_A$	$V_D$	$h_f^2$	
Mon	aPin	0.238 320 **	0.047 369	0.037 734	0.047 738	0.009 634	0.169 734(84.79)	0.030 449(15.21)	0.771
	Cam	0.000 071 **	0.000 023	0.000 016	0.000 012	0.000 007	0.000 043(64.95)	0.000 023(35.05)	0.705
	bPin	0.001 388 **	0.000 274 *	0.000 123	0.000 278	0.000 152	0.000 990(67.37)	0.000 479(32.63)	0.858
Ses	Lon	0.025 043 **	0.004 798	0.003 369	0.005 061	0.001 429	0.017 996(79.94)	0.004 516(20.06)	0.744
	Car	0.011 382 **	0.002 240 *	0.001 188	0.002 285	0.001 052	0.008 126(70.96)	0.003 326(29.04)	0.792
Die	Pim	0.001 125 **	0.000 339 *	0.000 204	0.000 196	0.000 136	0.000 698(61.97)	0.000 428(38.03)	0.779
	Pima	0.718 269 **	0.033 334	0.030 520	0.171 234	0.002 814	0.608 831(98.56)	0.008 894(1.44)	0.904
	San	0.001 438 **	0.000 187	0.000 297	0.000 285	0.000 000	0.001 013(100.00)	0.000 000(0.00)	0.671
	L/P	3.953 418 **	1.364 451 *	0.694 729	0.647 242	0.669 722	2.301 304(52.09)	2.116 653(47.91)	0.799
	Deh	0.216 546 *	0.158 029 *	0.072 921	0.014 629	0.085 108	0.052 015(16.20)	0.268 984(83.80)	0.655
8-Ab	8-Ab	0.031 688 *	0.017 892	0.012 393	0.003 449	0.005 499	0.012 263(41.37)	0.017 379(58.63)	0.655
	Abi	1.796 884 **	0.424 800 *	0.192 767	0.343 021	0.232 033	1.219 631(62.45)	0.733 339(37.55)	0.851
	Neo	4.226 818 **	0.140 106	0.088 199	1.021 678	0.051 907	3.632 633(95.68)	0.164 052(4.32)	0.949

注:GCA、SCA、机误的自由度分别为5、9、56。( )内为方差分量百分数(%)。

## 2.4 马尾松松脂主要组分间及与生长的相关性

2.4.1 马尾松松脂主要组分间的相关性 本研究对在杂交组合间存在显著差异的 13 种松脂主要组分进行相关性分析,结果显示(表 4):单萜各组分间相关性较强,3 种组分  $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯和  $\beta$ -蒎烯间均存在极显著的正相关关系,相关系数为 0.506 ~ 0.906,其中  $\alpha$ -蒎烯和  $\beta$ -蒎烯的相关性在所有松脂中表现最强,相关系数为 0.906。倍半萜中的长叶烯与石竹烯基本不相关。二萜中枞酸与海松醛、去氢枞

酸、8,12-枞二烯酸呈极显著正相关;去氢枞酸与长叶烯、海松醛呈极显著正相关关系,与 8,12-枞二烯酸呈极显著负相关关系;左旋海松酸/长叶松酸与大多数单萜、倍半萜、二萜组分均呈负相关关系,与长叶烯、海松醛、去氢枞酸、8,12-枞二烯酸、枞酸和新枞酸呈极显著的负相关关系,相关系数为 -0.400 ~ -0.905,表明对左旋海松酸/长叶松酸的选择将会对其它松脂组分产生一定的负向抑制作用。

表 4 马尾松松脂主要组分间的相关性分析

性状	Mon			Ses			Die						
	aPin	Cam	bPin	Lon	Car	Pim	Pima	San	L'P	Deh	8-Ab	Abi	Neo
Mon	aPin												
	Cam	0.906**											
	bPin	0.530**	0.506**										
Ses	Lon	0.042	0.006	0.245									
	Car	-0.014	0.030	-0.285*	0.012								
Die	Pim	0.137	-0.020	0.012	0.081	0.042							
	Pima	0.075	0.061	-0.257*	-0.230*	0.001	0.063						
	San	0.261*	0.208	0.255*	-0.21	-0.381**	0.082	0.293*					
	L/P	-0.271*	-0.111	-0.070	-0.400**	-0.195	-0.441**	-0.129	-0.172				
	Deh	-0.017	-0.082	-0.067	0.422**	0.158	0.544**	-0.182	-0.197	-0.664**			
	8-Ab	0.513**	0.358**	0.268*	0.191	-0.194	0.301**	0.146	0.568**	-0.706**	-0.381**		
	Abi	0.231*	0.066	0.149	0.232*	0.130	0.417**	-0.278*	0.224	-0.905**	0.518**	0.672**	
	Neo	-0.294*	-0.318**	-0.134	0.08	0.187	-0.089	-0.385**	-0.214	-0.519**	0.246*	0.004	0.374**

## 2.4.2 马尾松松脂主要组分与生长性状的相关性

对马尾松 13 种松脂主要组分与生长性状进行相关性分析,结果显示(表 5):松脂主要组分与生长的相关关系并不明显,只有树高与去氢枞酸、枞酸呈极显著的正相关关系,相关系数分别为 0.393 和

0.422,与左旋海松酸/长叶松酸呈极显著负相关关系,相关系数为 -0.441;地径与海松醛呈极显著正相关关系,相关系数为 0.377,其余组分与生长多呈较弱的相关关系。

表 5 马尾松松脂主要组分与生长性状的相关性分析

性状	Mon			Ses			Die						
	aPin	Cam	bPin	Lon	Car	Pim	Pima	San	L/P	Deh	8-Ab	Abi	Neo
树高	-0.019 (0.779)	-0.089 (0.243)	0.187 (0.147)	0.241* (0.000)	0.109 (0.914)	0.211 (0.076)	-0.283* (0.012)	-0.161 (0.083)	-0.441** (0.000)	0.393** (0.000)	0.160 (0.085)	0.422** (0.000)	0.284* (0.036)
地径	0.197 (0.887)	0.127 (0.284)	0.152 (0.080)	0.224 (0.125)	0.002 (0.878)	0.377** (0.000)	-0.014 (0.096)	-0.126 (0.069)	-0.102 (0.230)	0.096 (0.316)	0.143 (0.056)	0.117 (0.125)	-0.253* (0.019)

注:( )内为相关系数。

## 3 讨论

对马尾松 3 代种质幼林松脂化学组分进行测定与分析,共检出 23 种组分,其中单萜、倍半萜、二萜组分含量分别为 7.29%、1.50% 和 91.17%,检出的单萜有  $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、 $\beta$ -月桂烯和柠檬烯,倍半萜有长叶蒎烯、环长叶烯、可巴烯、洒剔烯、长叶烯、石竹烯、 $\alpha$ -石竹烯、反式- $\beta$ -金合欢烯和  $\delta$ -杜松

烯,二萜有海松醛、海松酸、山达海松酸、异海松酸、左旋海松酸/长叶松酸、去氢枞酸、8,12-枞二烯酸、枞酸和新枞酸。

同一松树松脂化学组分成分大致相同,但各个组分的含量在不同群体、个体间表现较大变异<sup>[23-24]</sup>。本研究发现,马尾松 15 种松脂主要组分中的 13 种在杂交组合间存在显著差异,树高、地径在杂交组合间存在极显著差异,这意味着大部分松

脂主要组分和生长性状在杂交组合间存在丰富变异, 具有较大的选择潜力, 有利于优质马尾松的遗传改良。

性状的 GCA、SCA 相对重要性与测定材料、性状及年龄等因素有关。Sprague 等<sup>[25]</sup> 在有关玉米 (*Zea mays* L.) 配合力育种的研究中指出: 一般配合力选择与特殊配合力选择之间具有相对的独立性。对于经过一般配合力测定的材料, 需要进行特殊配合力的选择与测定, 而未经一般配合力测定与选择的材料, 其一般配合力选择比特殊配合力选择更为重要。李力等<sup>[22]</sup>、周志春等<sup>[26]</sup> 对杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 和马尾松的研究进一步支持了该观点。本研究利用的材料是以用材为培育目标的马尾松 3 代新种质, 未经过松脂化学组分的 GCA 选择与测定。13 个松脂主要组分中除左旋海松酸/长叶松酸和 8, 12-枞二烯酸的加/显性效应相当, 去氢枞酸主要受显性基因效应控制外, 其余组分均是以加性基因效应占主导地位, 而山达海松酸则完全受加性基因效应控制, 具有较高的遗传稳定性。因此, 在遗传选择时, 可以基于性状的遗传控制方式及其强弱规律, 对  $\alpha$ -蒎烯、海松酸、山达海松酸、新枞酸等这样含量较高、变异大且加性基因效应较强的松脂组分直接进行亲本选择, 即可获得较为理想的遗传选择效果。此外, 性状的遗传增益和遗传选择效果也受到性状遗传力大小影响, 本研究中 13 个马尾松松脂主要组分的家系遗传力在 0.655 ~ 0.949 之间, 处于较高水平, 受较高的遗传控制, 对杂交组合进行选择有望获得较高的遗传增益。

本研究对马尾松松脂主要组分及其与生长性状的相关性分析发现, 马尾松单萜主要组分中  $\alpha$ -蒎烯、茨烯和  $\beta$ -蒎烯间均呈极显著正相关关系, 对其中一种组分的选择会带来其它单萜组分的同增或同减, 这与岳水林等<sup>[14]</sup> 对马尾松种源松脂组分的研究结果相似, Karanikas 等<sup>[27]</sup> 对地中海白松 (*P. halepensis* Mill.) 松脂组分的研究同样也发现  $\alpha$ -蒎烯与茨烯间存在极显著的正相关关系。而庄伟瑛等<sup>[17-18]</sup> 对湿地松松脂中单萜物质的研究发现, 单萜主要组分  $\beta$ -蒎烯与  $\alpha$ -蒎烯、茨烯呈极显著的负相关, 与本研究结果矛盾, 考虑这可能与试验材料的群体数量、年龄以及环境等因素有关。同时, 研究发现, 马尾松二萜中左旋海松酸/长叶松酸与大部分单萜、倍半萜、二萜组分呈较普遍负相关, 与倍半萜中的长叶烯, 二萜中的海松醛、去氢枞酸、8, 12-枞二烯

酸、枞酸和新枞酸呈极显著的负相关, 对左旋海松酸/长叶松酸的选择将会对大部分松脂组分产生负向抑制作用, 因此, 在育种时应予以均衡考虑。研究还发现, 马尾松松脂主要组分与生长的相关性多不显著, 究其原因可能为松脂主要组分与生长性状受到不同的遗传机制控制, 这两种性状间相互独立, 也可能是由于对试验材料前几代的生长选择, 使其遗传基础变窄, 从而影响了松脂化学组分与生长的相关表现, 具体机制仍需研究探讨。尽管本试验材料为马尾松 3 代种质幼林, 但研究证明部分松脂化学组分由单基因控制, 且在过去的研究中松脂化学组分曾作为基因标志用于鉴定杂种和亲缘关系<sup>[28]</sup>, 因此, 松脂组分含量较为稳定, 可用来预测一些遗传规律。此外, 考虑到松脂化学组分属次生产物, 较易受环境影响, 极有可能存在较强的基因与环境互作效应, 故在下一步研究中作者将继续开展针对马尾松松脂化学组分的多点试验, 以验证和丰富前期结论, 进而为改良马尾松脂用性状奠定理论依据。

## 4 结 论

(1) 对马尾松 3 代种质幼林共检出 23 种松脂化学组分, 其中单萜 5 种, 倍半萜 9 种, 二萜 9 种, 其含量分别为 7.29%、1.50% 和 91.17%。

(2) 平均含量高于松脂总量 0.1% 的 15 种马尾松松脂主要组分中, 除柠檬烯、异海松酸在杂交组合间差异不显著外, 其余 13 种组分均达到显著或极显著水平。13 种杂交组合间差异显著的马尾松松脂主要组分中, 除去氢枞酸主要受显性基因效应控制, 左旋海松酸/长叶松酸、8, 12-枞二烯酸加/显性效应相当外, 其余组分均以加性基因效应占主导地位。各松脂主要组分家系遗传力为 0.655 ~ 0.949, 受中或高度的遗传控制。

(3) 马尾松松脂单萜主要组分中  $\alpha$ -蒎烯、茨烯、 $\beta$ -蒎烯间呈极显著正相关关系, 对其中一种组分的选择可能会带来其它单萜组分的同增或同减。而双萜组分中左旋海松酸/长叶松酸与单萜、倍半萜、双萜组分呈较普遍负相关, 与长叶烯、海松醛、去氢枞酸、8, 12-枞二烯酸、枞酸和新枞酸则呈极显著的负相关关系, 对左旋海松酸/长叶松酸的选择将会对大部分松脂组分产生抑制作用。马尾松多数松脂主要组分与树高、地径相关性并不明显, 松脂化学组分与生长似受不同的遗传机制控制, 两种性状可能相互独立。

## 参考文献:

- [1] Lee H J, Ravn M M, Coates R M. Synthesis and characterization of abietadiene, levopimaradiene, and neoabietadiene; hydrocarbon precursors of the abietane diterpene resin acids[J]. *Tetrahedron*, 2001, 57(29):6155-6177.
- [2] Manninen A M, Utriainen J, Holopainen T, *et al.* Comparing the variation of needle and wood terpenoids in Scots pine provenances [J]. *Can J For Res*, 2002, 28(1):211-228.
- [3] Lieutier F, Day K R, Battwasti A, *et al.* Bark and wood boring insects in living trees in Europe [J]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004:135-176,135-176.
- [4] Tisdale R A, Nebeker T E, Hodger J D. The role of oleoresin flow in the induced response of loblolly pine to a southern pine beetle associated fungus[J]. *Can J Bot*, 2003, 81(4):368-374.
- [5] Roberds R H, Storm B L, Hain F P, *et al.* Estimates of genetic parameters for oleoresin and growth traits in juvenile loblolly pine[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(12):2496-2476.
- [6] Strom B L, Goyer R A, Ingram Jr. 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(1-3):169-178.
- [7] 贾洪敏, 黄大庄, 曹逸霞, 等. 松脂单萜类物质与油松对红脂大小蠹抗性的关系[J]. *东北林业大学学报*, 2008, 36(1):48-50.
- [8] 赵振东, 李冬梅, 胡辉萼, 等. 抗松材线虫病马尾松种源化学成分与抗性机理研究(第II报)[J]. *林产化学与工业*, 2001, 21(1):56-60.
- [9] 李彦杰, 姜景民, 栾启福. 湿地松家系产脂力、树脂密度和松节油含量的测定与遗传分析[J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(4):48-51.
- [10] 刘青华, 金国庆, 王 晖, 等. 马尾松巢式交配子代产脂力、生长和木材密度遗传分析[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(6):715-720.
- [11] 张 谦, 曾令海, 何波祥, 等. 马尾松自由授粉家系产脂力的年度变化及遗传分析[J]. *林业科学*, 2013, 49(1):48-52.
- [12] 古 研, 赵振东, 毕良武, 等. 马尾松松节油标准样品的定值研究[J]. *生物质化学工程*, 2011, 45(1):21-24.
- [13] 王振洪, 商士斌, 宋湛谦, 等. 气相色谱用马尾松松香标准样品的研制[J]. *生物质化学工程*, 2007, 41(6):1-5.
- [14] 岳水林, 荣文琛. 马尾松种源松脂组分的地理变异[J]. *林业科学研究*, 1994, 7(4):431-435.
- [15] 尹晓兵, 耿树香, 马惠芬, 等. 思茅松松脂松节油群体的物理及化学特征[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2005, 29(5):80-84.
- [16] 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.
- [17] 庄伟瑛, 张玉英, 范国荣, 等. 湿地松松脂中单萜类组分研究初报[J]. *江西农业大学学报*, 2008, 30(3):480-498.
- [18] 庄伟瑛, 欧阳道明, 范国荣, 等. 湿地松松脂中单萜类组分研究续报[J]. *江西农业大学学报*, 2009, 31(3):388-392.
- [19] 金国庆, 秦国峰, 刘伟宏, 等. 马尾松生长性状交配效应的遗传分析及杂交组合选择[J]. *林业科学*, 2008, 44(6):28-33.
- [20] 续九如. *林木数量遗传学*[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [21] 孔繁玲. *植物数量遗传学*[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2006.
- [22] 李 力, 施季森, 曹汉洋, 等. 杉木两水平双列杂交亲本配合力分析[J]. *南京林业大学学报*, 2000, 24(5):9-13.
- [23] Jantan I, Ahmad A S, Ahmad I A. Oleoresins of three *Pinus* species from Malaysian pine plantations [J]. *Journal of Essential Oil Research*, 2002, 14(5):327-332.
- [24] Rezzi S, Bighelli A, Castola V, *et al.* Composition and chemical variability of the oleoresin of *Pinus nigra* ssp. *laricio* from Corsica [J]. *Industrial Crops and Products*, 2005, 21(1):71-79.
- [25] Sprague G F, Tatum L A. General and specific combining ability in single crosses of corn[J]. *Journal of American Society of Agronomy*, 1942, 34(4):923-932.
- [26] 周志春, 金国庆, 秦国锋, 等. 马尾松纸浆材重要经济性状配合力及杂种优势分析[J]. *林业科学*, 2004, 40(4):52-57.
- [27] Karanikas C, Walker V, Scaltsoyiannes A, *et al.* High vs. low yielding oleoresin *Pinus halepensis* Mill. trees GC terpenoids profiling as diagnostic tool[J]. *Ann For Sci*, 2010, 67(4):412P1-412P8.
- [28] 张培皋, 吴贯明. *森林遗传学试验新技术*[M]. 北京:中国林业出版社, 1981.

(责任编辑:金立新)