林业科学研究 2015,28(6):804～809
Forest Research

文章编号:1001-1498(2015)06-0804-06

高产脂湿地松松节油成分的遗传变异及综合选择

雷 蕾[1], 潘显强[1,4], 张 露[1*], 艾 卿[2], 李 彬[3], 易 敏[1], 徐正华[1]

(1. 江西农业大学 林学院,江西 南昌 330045; 2. 江西省林木种苗和林场管理局,江西 南昌 330038;
3. 吉安市青原区白云山林场,江西 吉安 343062; 4. 南昌市林业局,江西 南昌 330000)

摘要:通过测定湿地松松脂成分来估算松节油含量及其5种主要成分含量的遗传力和遗传相关,并以186株高产脂湿地松为研究对象,用 Smith-Hazel 综合选择指数法对高产脂湿地松松节油成分进行综合评价,以"核心—主群体"育种系统来选择高产优质脂用湿地松种子园的建园材料。结果表明:湿地松松节油含量及其组分的家系遗传力在0.340 2～0.571 3之间,单株遗传力在0.211 2～0.477 3之间,处于中等水平,有较高的遗传效应。有7个高含油率、高β-蒎烯的单株入选为核心育种群体,获得51.57%的松节油含量和97.89%的β-蒎烯含量的遗传增益,有86个单株入选为育种主群体,获得14.70% 松节油含量、4.22% a-蒎烯、10.26% 莰烯、22.99% β-蒎烯、17.69% 双戊烯、13.49% 月桂烯的现实增益,为我国优质脂松持续改良工作提供了优良材料和理论依据。

关键词:高产脂湿地松;松节油含量;松节油成分;综合选择指数

中图分类号:S791.246 **文献标识码**:A

Genetic Variation and Comprehensive Selection of Turpentine Composition in High-yielding Slash Pine (*Pinus elliottii*)

LEI Lei[1], *PAN Xian-qiang*[1,4], *ZHANG Lu*[1], *AI Qing*[2], *LI Bin*[3], *YI Min*[1], *XU Zheng-hua*[1]

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China;
2. Jiangxi Tree Seedlings and Forestry Administration, Nanchang 330038, Jiangxi, China;
3. Baiyunshan Forest Farm, Ji'an 343062, Jiangxi, China; 4. Nanchang Forestry Bureau, Nanchang 330000, Jiangxi, China)

Abstract: In this study, the heritability and genetic correlation of the contents of *Pinus elliottii* turpentine and its five components were estimated by measuring the resin composition. The Smith-Hazel comprehensive selection index was used for evaluating the turpentine composition of 186 high-yielding slash pine trees, and the high-yielding and good-quality *P. elliottii* plus trees were selected into the seed orchard by "core-master group" breeding system. The results showed that the family heritability and individual heritability of turpentine and its component content of *P. elliottii* were 0.340 2 – 0.571 3 and 0.211 2 – 0.477 3, respectively, indicating that the variation in turpentine and its component contents of *P. elliottii* were controlled genetically at medium level. 7 plus trees with high turpentine (the genetic gain was 51.57%) and high β-pinene (the genetic gain was 97.89%) were selected as the core-breeding population, and 86 plus trees were selected as the master-breeding population as the genetic gain of turpentine, α-pinene, camphene, β-pinene, dipentene, and myrcene were 14.70%, 4.22%, 10.26%, 22.99%, 17.69% and 13.49%. respectively.

Key words: high-yielding slash pine, turpentine, multiple selection index

---

收稿日期: 2014-11-20

基金项目: 江西省林业厅林业科技创新专项(201401)、中央财政林业科技推广示范资金项目([2010]JXTG-9)、广东省森林种质创新与利用重点实验室开放基金(2014-5)、江西省研究生创新资金(YC2015-B028)

作者简介: 雷 蕾(1988—),女,江西南昌,博士研究生,专业:林木遗传育种,E-mail: 13576002992@163.com

* 通讯作者:女,教授,博导,研究方向:林木遗传育种、森林培育,E-mail: zhlu856@163.com

湿地松(*Pinus elliottii*)原产美国,我国于 30 年代开始引种,80 年代在南方各省大面积推广种植,因其适应能力强、产脂量高,今已成为我国最重要的造林和采脂树种[1]。美国 60 年代率先建立了高产脂湿地松种子园,现已完成高产脂湿地松改良工作[2-3]。我国对松脂产量及成分的研究始于 80 年代,现已建立高产脂松种子园[1,4],这些工作为进一步选择高产优质脂松打下了基础。

松节油是松脂中的挥发油,由各种单萜类化合物组成,其含量高低是松脂品质的评价标准之一[5]。国外对松节油成分的研究多以抗虫、抗菌、抗机械创伤等生理性状为主[6-7],这些研究揭示了各成分的生理作用和遗传特性,为我国松节油成分定向选育工作提供了参考。而国内则更加重视其工业用途,β-蒎烯是松节油中最受关注的成分,提高 β-蒎烯在松节油中的含量是目前松脂品质改良研究的热点问题,已在湿地松[8-9]、思茅松[10]等松树上开展定向选育,取得一定成效。此外,对其他松节油组分(如 Δ3-蒈烯、双戊烯)的定向选育工作也有开展[1,10-12];但是,对这些特异成分的改良应当建立在高产脂的基础上,对单一成分改良的同时也应保证其他有潜在价值的成分的遗传多样性,然而目前这些研究的群体并不理想,改良目标与方法较为粗放,没有专门的建立高产特异成分的脂用松树种子园,无法为我国优质脂松的持续改良工作提供理想材料。为填补这一空白,本研究估算了松节油含量及其 5 个主要成分含量的遗传力和遗传相关,以 186 个高产脂湿地松为研究对象,以提高松脂含油率及 β-蒎烯含量为近期目标,以保证其他有潜在价值的成分的遗传多样性为长期育种目标,采用 Smith-Hazel 综合选择指数法对高产脂湿地松松节油成分进行综合评价,以"核心—主群体"育种系统选择出用于建立高产优质脂用湿地松种子园的材料,为我国优质脂松持续改良工作提供优良材料和理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于江西省吉安市青原区白云山林场(26°51′ N,115°11′ E),海拔 90 m,亚热带气候,年均气温 18.6℃,年均降雨 1 646 mm。造林地平坦,丘陵红壤,林地植被主要是芒属(*Miscanthus*)植物、铁芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等。试验林采用随机区组设计,共 113 个美国引进的高产脂湿地松家系,5 个区组(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ),4 株小区,1989 年春育苗,1990 年春造林。现保存有 111 个家系,单株保存率 49.97%,其中Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ区组保存较完好(70.25%)。

1.2　高产脂湿地松的选择

本课题组于 2005 年 5—10 月,对林分内 111 个半同胞家系 1 110 株湿地松每日采脂,按月称量,测定单株年产脂量。利用前期这些数据,采用混合指数法计算育种值,高产脂优良单株的选择根据育种值的大小进行取舍。由于年产脂量具有较高的遗传力,赋予半同胞和个体本身的权重分别为 0.3 和 0.7[13]。单株育种值的计算公式如下:

$$A = 0.3 \times h_f \times (y - \bar{y}) + 0.7 \times h_s \times (y - \bar{y}) + \bar{y}$$

其中,A 为单株的育种值,h_f 为家系遗传力,h_s 为单株遗传力,$\bar{y}$ 为总体观测均值,y 为个体观测值。

根据年产脂量的单株育种值选择了 186 株高产脂湿地松优树,其基本特征如表 1。对照为引种自江西吉安的普通湿地松,平均年产脂量 3.97 kg,平均产脂力(单位长度的产脂量)0.09 kg · cm^{-1},平均树高 11.46 m,平均胸径 20.66 cm,平均育种值 -0.66。

表 1　186 个高产脂湿地松的基本特征

项目	平均值	最大值	最小值	变异系数/%
年产脂量/kg	5.52	7.20	4.55	9.92
产脂力/(kg · cm^{-1})	0.14	0.27	0.11	15.13
树高/m	10.84	13.00	6.50	11.46
胸径/cm	20.23	28.50	11.00	9.90
材积/dm^3	220.45	330.60	107.25	17.91
育种值	4.84	5.53	4.60	—

1.3　松脂化学成分测定

2013 年 7 月、9 月、11 月 3 个月中每月的 1 个晴朗天气下,在 186 株高产脂湿地松树干约离地面 1.8 m 处放置松脂收集器[14],24 h 后用 Parafilm 封口膜(美国产)封口,螺口塑料盖密封,带回实验室,为避免挥发,5 天内分析化学成分,松节油及各化学成分的含量取这 3 天的平均值。

样品处理:将松脂在试管内搅拌均匀,取少量松脂溶于定量无水乙醇中,以酚酞为指示剂,用四甲基氢氧化铵[$(CH_3)_4NOH \cdot 5H_2O$]乙醇溶液滴至微红色,将此上清液直接进行气相色谱和气-质联用仪分析。

气相色谱程序:60℃保持 2 min,5℃ · min^{-1}升

到80℃,再30℃ · min^{-1}升到230℃,最后5℃ · min^{-1}升到260℃,保持10 min。进样量:0.4 μL。

气-质联用仪程序:同气相色谱程序。进样量:0.1 μL。

定性和定量分析:通过化学工作站数据处理系统,各成分分别用NIST08谱库进行检索,用色谱峰面积归一化法,得到松节油主要成分(a-蒎烯、β-蒎烯、莰烯、双戊烯、月桂烯)的相对百分含量,将单萜类和倍半萜类所有组分加起来得到松节油的百分含量。

1.4 松节油及其成分含量的遗传力及相关性

在试验林的第Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ3个区组中随机选择20个家系,每家系随机取3株,于2013年7、9、11中每月的1个晴朗天气下,放置松脂收集器[14],24 h后收回测定其松脂成分,方法同2.3。家系遗传力、单株遗传力、遗传相关系数用HalfsibSS 1.0软件计算[15]。产脂力与松节油及其成分含量的表型相关系数用SAS 8.0软件计算[16]。

1.5 松节油含量及其成分的综合选择

采用Smith-Hazel综合选择指数法对高产脂湿地松松节油成分进行综合评价,采用以下两种权重分配方式分别对松节油成分进行综合选择。

(1)将总分值100的权重分配给松节油含量和β-蒎烯含量,根据综合选择指数的高低排名进行选优,优树将作为高产优质湿地松种子园的核心育种群体。计算公式如下:

$$H_c = w_0 \times \hat{A}_0 + w_2 \times \hat{A}_2$$

(其中,$w_0 = 60$,$w_2 = 40$)

$$I_c = b_0 \times \hat{A}_0 + b_2 \times \hat{A}_2$$

(2)将总分值100的权重分配给松节油含量、a-蒎烯含量、β-蒎烯含量、莰烯含量、双戊烯含量、月桂烯含量,根据综合选择指数的高低排名进行选优,优树将作为高产优质湿地松种子园的育种主群体。计算公式如下:

$$H_b = w_0 \times \hat{A}_0 + w_1 \times \hat{A}_1 + w_2 \times \hat{A}_2 + w_3 \times \hat{A}_3 + w_4 \times \hat{A}_4 + w_5 \times \hat{A}_5$$

(其中,$w_0 = 60$,$w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = 8$)

$$I_b = b_0 \times \hat{A}_0 + b_1 \times \hat{A}_1 + b_2 \times \hat{A}_2 + b_3 \times \hat{A}_3 + b_4 \times \hat{A}_4 + b_5 \times \hat{A}_5$$

$$b_i = V_i^{-1} \times G_i \times w_i$$

$$r^2 = \sigma_I^2 / \sigma_H^2$$

其中,H_c和H_b分别为两种选择方式下的育种值,I_c和I_b分别为两种选择方式下的综合选择指数,$\hat{A}_i$为各性状的育种值,b_i为各性状的偏回归系数,V_i为各性状的表型方差-协方差矩阵,G_i为各性状的遗传方差-协方差矩阵,w_i为赋予各性状的经济权重,r^2为选择准确度系数,$i = 0$、1、2、3、4、5分别代表松节油含量、a-蒎烯含量、β-蒎烯含量、莰烯含量、双戊烯和月桂烯含量。

各性状的育种值计算公式如下:

$$\hat{A}_i = \hat{h} \times (y' - \bar{y}')$$

其中,$\hat{A}_i$为各性状的育种值($i = 0$、1、2、3、4、5),$\hat{h}$为各性状的单株遗传力,y'为各性状实测值,$\bar{y}'$为各性状总体观测均值。

2 结果与分析

2.1 高产脂湿地松松节油成分的变异

测定分析186株高产脂湿地松松脂成分及相关特征值(表2),结果表明:高产脂湿地松的松节油含量较高,平均42.91%,单株变异系数为12.13%。其松节油成分主要是a-蒎烯、β-蒎烯、莰烯、双戊烯、对伞花烯和月桂烯等6种单萜类物质,其中以a-蒎烯和β-蒎烯的含量最多,二者占松节油含量的92.92%,单株变异系数分别为24.10%和33.27%。总体变异系数幅度在24.10～182.57%之间,对伞花烯的含量最低(<0.1%),本研究将其定为痕量,不进行遗传力、育种值的估算。在检测中发现只有个别样品含有少量β-水芹烯(倍半萜类),说明高产脂湿地松松节油成分较单一,几乎不含倍半萜烯,品质极好。

表2 湿地松松节油成分基本特征统计

项目	保留时间/min	化学式	平均值/%	最大值/%	最小值/%	变异系数/%
松节油含量	-	-	42.91	62.40	32.08	12.13
a-蒎烯	5.11	$C_{10}H_{16}$	26.13	44.20	12.28	24.10
莰烯	5.42	$C_{10}H_{16}$	0.39	3.78	0.18	88.14
β-蒎烯	6.15	$C_{10}H_{16}$	13.74	23.81	3.44	33.27
双戊烯	6.38	$C_{10}H_{16}$	0.38	1.70	0.12	50.18
对伞花烯	6.66	$C_{10}H_{14}$	0.04	0.32	0.00	182.57
月桂烯	7.07	$C_{10}H_{16}$	2.23	13.08	0.30	96.81

2.2 产脂力与松节油及其成分含量的遗传相关和表型相关

将松节油含量及其各成分含量进行了遗传相关和表型相关分析(表3),结果表明:高产脂湿地松产脂力与松节油含量显著正相关,与a-蒎烯和β-蒎烯含量极显著遗传正相关。松节油含量与a-蒎烯和β-蒎烯的含量显著或极显著正相关,相关系数为

0.52 和 0.35,遗传相关系数为 0.54 和 0.19。a-蒎烯与 β-蒎烯和月桂烯呈显著或极显著负相关,月桂烯与其他 3 种组分均呈显著或极显著正相关,β-蒎烯与双戊烯呈显著正相关。

表 3　产脂力与松节油及其成分含量的相关性分析

项目		产脂力	松节油	a-蒎烯	莰烯	β-蒎烯	双戊烯
松节油	P	0.287 1*					
	G	0.489 5**					
a-蒎烯	P	0.111 7	0.519 2**				
	G	0.239 5**	0.540 9**				
莰烯	P	0.036 1	0.194 9*	0.016 4			
	G	0.098 3	0.038 8	0.002 5			
β-蒎烯	P	0.172 9	0.356 4**	−0.533 0**	−0.095 4		
	G	0.282 1**	0.187 2*	−0.368 8**	−0.053 7		
双戊烯	P	−0.020 1	0.171 8	−0.164 1	0.126 4	0.207 4*	
	G	0.130 6	0.069 3	−0.040 7	0.199 4*	0.210 0*	
月桂烯	P	−0.004 6	0.092 9	−0.5139**	0.443 2**	0.286 2*	0.339 9*
	G	0.076 3	0.117 1	−0.308 2**	0.318 4**	0.302 4**	0.180 8*

注:P 为表型相关,G 为遗传相关。$P<0.05$ 的为显著相关,记为 *;$P<0.01$ 的为极显著相关,记为 **。

2.3　松节油成分含量遗传力的估算

对松节油含量及其 5 个主要组分的家系遗传力(h_f^2)和单株遗传力(h_s^2)进行了估算(表 4),家系遗传力在 0.340 2 ～ 0.571 3 之间,单株遗传力在0.211 2 ～ 0.477 3 之间,处于中等水平,有较高的遗传效应。松节油含量的家系遗传力和单株遗传力分为别为 0.489 0 和 0.211 2,遗传变异系数 31.32%,通过一定强度的选择可以提高其含量。β－蒎烯的家系遗传力和单株遗传力比松节油含量的遗传力高(0.571 3 和 0.477 3),且遗传变异系数较高(80.37%),有较高的选择效率。因此,估算综合选择指数时赋予松节油含量 60 的值,而赋予 β-蒎烯 20 ～ 40 的值。

表 4　松节油及其组分的遗传力估算

性状	σ_G^2	σ_{G*E}^2	σ_E^2	h_f^2	h_s^2	$GCV/\%$
松节油含量	6.073 3	215.349 3	4 396.737 6	0.489 0	0.211 2	31.32
a-蒎烯含量	0.636 6	335.358 6	138.655 3	0.437 8	0.339 5	6.14
莰烯含量	4.03e－08	9.03e－06	3.12e－05	0.441 5	0.282 3	0.11
β-蒎烯含量	33.623 8	2 210.842 8	577.412 1	0.571 3	0.477 3	80.37
双戊烯含量	9.61e－06	0.002 0	0.003 0	0.340 2	0.350 5	0.56
月桂烯含量	0.119 0	127.855 0	0.901 0	0.428 9	0.366 5	2.68

注:σ_G^2 为遗传方差,σ_{G*E}^2 为互作方差,σ_E^2 为环境方差,h_f^2 为家系遗传力,h_s^2 为单株遗传力,GCV 为遗传变异系数

2.4　松节油成分的综合选择

对 186 个单株的松节油含量及其组分的育种值进行了预测,并根据其育种价值和经济权重计算了其综合选择指数 I_1 和 I_2。综合选择指数 I_1、I_2 最大的单株均是 29Ⅱ④($I_1=572.68$,$I_2=504.25$),最小的是 82Ⅰ③($I_1=-584.572$, $I_2=-530.63$)。

为获得较高的 β－蒎烯的遗传增益,用综合选择指数 I_1 的高低排名,有 7 个单株的 I_1 大于 300,分别是 29Ⅱ④、27Ⅱ①、80Ⅱ④、28Ⅲ③、27Ⅲ①、29Ⅰ①、7Ⅴ①。这 7 个单株的实测年产脂量分别为 6.50 kg、5.25 kg、5.55 kg、5.40 kg、5.30 kg、5.93 kg、6.30 kg,是既高产又高品质的育种好材料。用这 7 个单株作为高产优质脂用湿地松种子园的核心育种群体,可在保证高产脂的基础上,获得 51.57% 的松节油含量的遗传增益 97.89% 的 β-蒎烯含量的遗传增益。

除了 7 个作为核心育种群体的单株以外,为保证松节油成分的遗传多样性,用综合选择指数 I_2 的高低排名,以入选率 50% 来选择,有 86 个单株入选为高产优质脂用湿地松种子园的育种主群体,在高产脂的基础上获得 14.70% 松节油含量、4.22% a-蒎烯、10.26% 莰烯、22.99% β-蒎烯、17.69% 双戊烯、13.49% 月桂烯的现实增益。

3　结论

高产脂湿地松的松节油含量较高(平均 42.91%),成分较单一,主要包括 5 种单萜类组分(a-蒎烯、β-蒎烯、莰烯、双戊烯、和月桂烯)。高产脂

湿地松松节油含量及其5种主要成分的家系遗传力在0.340 2～0.571 3之间,单株遗传力在0.211 2～0.477 3之间,松节油含量的家系遗传力和单株遗传力分为别为0.489 0和0.211 2,β－蒎烯的家系遗传力和单株遗传力分别为0.571 3和0.477 3。计算了186个单株的综合选择指数 I_1 和 I_2,根据综合选择指数 I_1 的高低排名,有7个单株入选为高产优质脂用湿地松种子园的核心育种群体,在高产脂的基础上,获得51.57%的松节油含量的遗传增益和97.89%的β-蒎烯含量的遗传增益;根据综合选择指数 I_2 的高低排名,有86个单株入选为高产优质脂用湿地松种子园的育种主群体,在高产脂的基础上获得14.70% 松节油含量、4.22% a-蒎烯、10.26% 莰烯、22.99% β-蒎烯、17.69% 双戊烯、13.49% 月桂烯的现实增益。

4 讨论

4.1 高产脂湿地松松节油成分特征

本研究的高产脂湿地松松节油成分较对照单一(仅有6种单萜类组分),这可能是产脂量与某些成分相关性高的间接证明,也可能与传统割脂设备简陋,流脂过程中松脂与外界物质反应产生不稳定物质有关。高产脂湿地松松节油含量较普通湿地松高(平均42.91%),松节油含量与产脂力呈显著正相关(r_p^2 = 0.287 1,r_g^2 = 0.489 5),且松节油含量具有中等遗传力(h_f^2 =0.489 0)。a-蒎烯和β-蒎烯含量呈极显著负相关(r_p^2 = －0.533 0,r_g^2 = 0.368 8),这与文献报道相一致[11],这两种组分分别由不同的基因控制合成[17],其合成酶基因在进化上很可能处于竞争关系,一种基因的表达抑制另一种基因的表达,也可能这两个基因由同一种调控基因控制。a-蒎烯与其他4种单萜类成分均呈负相关,而β-蒎烯与其余4种单萜类组分之间呈正相关,通过对高β-蒎烯的优良单株的选择可能可以同时提高双戊烯和月桂烯的含量。

4.2 高含油率湿地松的选择要建立在高产脂的基础上

我国目前的松脂性状改良工作多集中在提高松脂产量,以至于一些地区出现了量高而质劣的现象,严重影响了我国松脂产业在世界的影响力[18]。研究表明松节油含量与产脂量呈正相关,在不降低松脂产量的基础上提高松节油含量是可行的,对优质脂松的改良一定要建立在高产脂的基础上,若不能保证松脂产量,质量改良则毫无意义;同时,对高β-蒎烯含量的选择要建立在高含油率的基础上。本研究以186个高产脂单株为研究对象,这些单株的平均年产脂量为5.28 kg,在此基础上选择高含油率、高β-蒎烯的单株作为高产优质脂用湿地松种子园的建园材料,研究群体具有代表性,能够为我国松树松脂性状的改良工作提供参考。

4.3 选择高β-蒎烯的同时也要考虑其他成分的潜在价值

种子园是有目的的长期遗传改良的最重要途径,其育种群体构建方面,广东省火炬松多世代遗传改良中率先引入"核心—主群体"育种系统[19-20],这种育种策略值得借鉴。由于β-蒎烯是松节油成分中最受关注的成分,本研究用综合选择指数 I_1 的排名前7位的单株入选为高β-蒎烯脂用湿地松种子园的核心育种群体,作为亲本交配产生下一代基本群体,再从中选优作为第二代育种核心群体,保证了较高的β-蒎烯含量的遗传增益(97.89%)。但是,松节油的其他成分也是重要的工业原料,价格同样昂贵,为维持湿地松的遗传多样性,本研究的育种主群体则根据综合选择指数 I_2 的排名进行选择,入选率为50%,降低了β-蒎烯含量的增益,获得了其他成分含量的增益。核心群体同型交配,主群体自由授粉,在市场需求多变而林产品改良滞后的情况下增加了市场竞争力,为我国松脂市场提供了优良的高产优质脂用湿地松材料。

参考文献:

[1] 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(03): 388－392.

[2] 楼浙辉, 舒洪岚. 松树高产脂力遗传改良的研究进展[J]. 江西林业科技, 2002 (5): 40－41.

[3] Liu C, Liu H, Qian Y T, *et al*. The influence of four dual-cure resin cements and surface treatment selection to bond strength of fiber post [J]. International journal of oral science, 2014:1－8.

[4] 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, 2013, 25(6): 773－779.

[5] 脂松香[S]. GB/T 8145－2003.

[6] Ober H K, DeGroote L W. Effects of litter removal on arthropod communities in pine plantations [J]. Biodiversity and Conservation, 2011, 20(6): 1273－1286.

[7] Burkhalter J C, Moon D C, Rossi A M. Diversity and Community Similarity of Arthropods in Response to the Restoration of Former Pine Plantations [J]. Southeastern Naturalist, 2013, 12(1): 121－136.

[8] 庄伟瑛, 彭 林, 季志培, 等. 江西省湿地松优良家系的选择研

究[J]. 江西农业大学学报,1997(03):100 - 105.

[9] 刘乐平, 吴天文, 王希群, 等. 湿地松高产脂繁殖材料选择与利用的研究[J]. 湖北林业科技,2003(01):12 - 14.

[10] 李思广, 付玉嫔, 蒋云东, 等. 40 个高产脂思茅松无性系的松脂化学组成特征[J]. 西部林业科学,2008(02):61 - 65.

[11] 李彦杰, 姜景民, 栾启福. 等. 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.

[12] 耿树香, 尹晓兵, 马惠芬, 等. 高 3-蒈烯思茅松松脂的化学特征[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2005(05):85 - 87.

[13] 窦莲升. 关于"家畜复合育种值简化公式"中系数的讨论[J]. 中国畜牧杂志,1982,04:3 - 5.

[14] 栾启福, 姜景民, 李彦杰. 松脂标准化测试收集仪:中国, ZL 201120294424.5[P].2012 - 05 - 30.

[15] 童春发,卫　巍,尹　辉,等. 林木半同胞子代测定遗传模型分析[J]. 林业科学, 2010(01):29 - 35.

[16] 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, 2001:101 - 113.

[17] Hall DE, Yuen MM, Jancsik S, Quesada AL, *et al*. Transcriptome resources and functional characterization of monoterpene synthases for two host species of the mountain pine beetle, lodgepole pine (Pinus contorta) and jack pine (Pinus banksiana)[J]. BMC Plant Biol. 2013, 13(80):1 - 14.

[18] 刘崇献,江娜娜. 我国脂松香国际贸易现状及对策探讨[J]. 时代经贸, 2013(24):95 - 96.

[19] 刘纯鑫, 刘天颐, 黄少伟,等. 英德火炬松种子园子代在粤北的生长规律研究[J]. 林业科学研究, 2012, 25(5):670 - 676.

[20] 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.