

红松优树半同胞子代家系生长、结实及抗病虫能力的变异特征

王芳^{1,2} 王元兴³ 王成录⁴ 张伟娜³ 刘卫胜³ 陆志民² 杨雨春^{2*}

(¹东北林业大学林木遗传育种国家重点实验室, 哈尔滨 150040; ²吉林省林业科学研究院, 长春 130000; ³吉林省露水河林业局, 吉林抚松 134300; ⁴吉林省柳河县林业局, 吉林柳河 135300)

摘要 以吉林省露水河宏伟种子园的 551 个优株 29 年生红松半同胞子代家系为材料, 对其生长性状(树高、胸径、冠幅)、结实性状(连续 7 个结实年份的球果总数)和抗病虫能力进行调查, 利用多性状综合评价的方法, 结合生长、结实和抗病虫能力等 6 个性状, 优选出优良家系和单株。结果表明: 各性状在不同家系间和区组间的差异均达到极显著水平; 各性状的表型变异系数变化范围为 13.9%~61.0%, 极显著的差异与高的变异系数有利于优良家系的评价和选择; 材积、结实量和抗病虫能力的家系遗传力(分别为 0.47、0.52 和 0.48)均大于单株遗传力(分别为 0.37、0.07 和 0.10); 红松家系生长性状、结实性状和抗病虫能力之间呈极显著正相关关系。以 5% 的入选率初步选出 28 个优良家系, 其材积、结实量和抗病虫能力的遗传增益分别为 16.8%、71.4% 和 0.5%; 以 2% 的入选率在优良家系中初步选出 7 个优良单株, 其材积、结实量和抗病虫能力的遗传增益分别为 66.8%、80.9% 和 0.7%。这些初选的优良家系和单株表现出明显优势, 可指导无性系种子园去劣疏伐, 并为高世代种子园的营建提供繁殖材料。

关键词 红松; 半同胞家系; 生长; 结实; 抗病虫能力; 变异

Variation of the growth, fruiting and resistance to disease and insect of the half-sib families of *Pinus koraiensis* superior trees. WANG Fang^{1,2}, WANG Yuan-xing³, WANG Cheng-lu⁴, ZHANG Wei-na³, LIU Wei-sheng³, LU Zhi-min², YANG Yu-chun^{2*} (¹State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; ²Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130000, China; ³Lushuihe Forestry Bureau of Jilin Province, Fusong 134300, Jilin, China; ⁴Liuhe County Forestry Bureau of Jilin Province, Liuhe 135300, Jinlin, China).

Abstract: We investigated the growth traits (tree height, diameter at the breast, crown diameter), fruiting traits (total number of cones in 7 consecutive fruiting years) and resistance to disease and insect of 551 half-sib families of *Pinus koraiensis* superior trees in 29-year-old in Hongwei seed orchard of Lushuihe, Jilin Province, with the method of multi-trait comprehensive evaluation and combining with six traits. The results showed that all the traits were significantly different among different families or blocks. Phenotypic variation coefficient of different traits ranged from 13.9% to 61.0%. The extremely significant difference and high variation coefficients were beneficial for elite families evaluation and selection. The family heritability of volume, seed yield and resistance to disease and insect (the values were 0.47, 0.52, 0.48, respectively) were higher than single plant heritability (the values were 0.37, 0.07, 0.10, respectively). There was a extremely significant positive correlation between growth traits, fruiting traits and resistance to disease and insect. 28 elite families were selected with a selection rate of 5%, with the genetic gains of volume, seed yield and resistance to disease and insect being 16.8%, 71.4% and 0.5%, respectively. Seven elite individuals were selected from the elite families with a selection rate of 2%, with the genetic gains of vol-

本文由吉林省重点科技攻关项目(20170204003N Y)和吉林省林业科学院公益类科研项目(LKY-2018-02)资助 This work was supported by the Key Science and Technology Project of Jilin Province (20170204003N Y) and the Public Welfare Scientific Research Project of Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences (LKY-2018-02).

2019-01-17 Received, 2019-02-28 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 33309797@qq.com

ume, seed yield and resistance to disease and insect being 66.8%, 80.9% and 0.7%, respectively. These elite families and individual plants showed obvious advantages, which could guide the thinning of clonal seed orchards and provide breeding materials for the construction of high-generation seed orchards.

Key words: *Pinus koraiensis*; half-sib family; growth; fruiting; resistance to disease and insect; variance.

红松 (*Pinus koraiensis*) 为松科 (Pinaceae) 松属 (*Pinus*) 常绿乔木, 既是优良的用材树种, 又是珍贵的食用干果和油料树种^[1], 在中国主要分布于长白山系^[2], 是东北三省用材林的重要后备资源^[3]. 红松树干高大通直, 材质优良^[4]; 松仁中含有大量的粗蛋白、粗脂肪、粗纤维等营养物质, 是一种营养价值极高的坚果类食物^[5-6], 此外还含有各种不饱和脂肪酸^[7], 并具有软化血管, 降低胆固醇、美容养颜、防止衰老及抗癌等功效^[8].

在红松遗传改良方面, 由于其生长较慢, 扦插扩繁较难, 优良家系评价选择是红松评价的主要手段与方法^[9]. 基于此, 我国于 20 世纪 80 年代开始营建红松种子园^[1], 目前第一批种子园已经开花结实, 多个以生长、木材性状为评价指标的优良家系、亲本被选出^[10-11], 在生产上产生了巨大的经济效益. 近些年, 随着松树价值和价格的上涨, 红松结实量也越来越受到人们的重视, 一批以生长性状与结实性状联合评价选择的优良红松家系 (无性系) 被选出^[12-14].

植物的抗病虫能力是寄主抵抗病原物和害虫侵染为害的一种特性, 是植物和病原物及害虫在一定外界环境条件下长期斗争所形成的遗传特性, 这种特性具有相对稳定性同时也可以发生变异^[15]. 筛选抗病虫能力强的植物广泛应用于农业生产中, 相关研究主要集中在水稻、小麦^[16]、玉米^[17]、大豆^[17]、棉花^[18]和高粱^[19]等, 是农作物育种的关键, 是保障农作物高产稳产的重要途径^[20]. 林木的抗病虫育种主要集中于茶树、杨树、果树等经济树种的研究中^[15, 21], 而对红松抗病虫选择育种的研究较少, 尤其联合生长、结实及抗病虫害等多性状综合评价选择的研究至今未见报道. 本研究以生长于吉林省露水河红松国家级林木良种基地的 551 个红松优树半同胞家系子代为材料, 对其生长、结实及抗病虫害能力进行调查分析, 利用多性状综合评价对各半同胞家系进行综合评价并对优良家系进行初步筛选, 以期红松的良种选育、初级种子园去劣疏伐提供理论依据和参考数据.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验林地概况及材料来源

试验林位于吉林省白山市抚松县露水河镇宏伟种子园国家级红松良种基地 (42°27'—42°28' N、127°46'—127°47' E). 该基地属北温带东亚季风气候, 海拔 700~800 m, 土壤为暗棕壤, 适宜红松生长; 年均温 4℃, 无霜期 110 d, 年降水量 800 mm, 年蒸发量 1058 mm, 年均日照时数 2352.5 h. 试验材料为红松半同胞子代测定林, 551 个母本 (PK1~PK551) 来源于中国红松全分布区, 通过选优、采穗并定植于宏伟种子园, 子代于 1985 年育苗, 1989 年 5 月营建子代测定林, 采用完全随机区组设计, 4 株小区, 10 次重复, 株行距为 1.5 m×2 m.

1.2 研究方法

2014 年 5 月, 对 29 年生 551 个红松家系的树高、胸径、冠幅进行单株调查, 树高利用 Vitrax IV 超声波测高测距仪直接测定, 胸径利用胸径尺测定, 冠幅是利用卷尺测量的东西、南北两个冠幅, 并计算平均值. 自 2000 年开始, 部分家系开始结实, 调查并记录各家系至 2014 年所有 7 个大量结实年份的球果个数, 将 7 年的球果个数的总和作为各家系的结实量. 根据红松病虫害种类及虫害程度设定抗病虫能力的等级, 采用得分制计算抗病虫害能力 (表 1). 红松立木材积计算公式^[22]如下:

$$V = (H + 3)g_{1.3}f \tag{1}$$

式中: $g_{1.3} = (3.14DBH^2)/4$; H 为树高; DBH 为胸径; f 为红松立木平均实验形数, $f = 0.33$.

1.3 数据处理

所有数据利用 SPSS 19.0 软件进行分析. 树高、胸径、冠幅、材积、结实量和抗病虫能力的方差分析模型均为公式 (2), 结实量与抗病虫能力利用方根转换的方法进行数据处理后进行方差分析.

$$X_{ijk} = \mu + \alpha_i + b_j + ab_{ij} + e_{ijk} \tag{2}$$

式中: X_{ijk} 为家系 i 在区组 j 中的红松单株 k 的表型; μ 为总体平均值; α_i 为家系效应; b_j 为区组效应; ab_{ij} 为区组与家系的互作效应; e_{ijk} 为环境误差.

表 1 红松抗病虫能力得分
Table 1 Score of resistance to disease and insect of *Pinus koraiensis*

病虫害 Disease and insect	抗病虫能力得分 Score of resistance to disease and insect
正常 Normal	2.0
松梢螟 <i>Dioryctria splendidella</i>	1.0
松黄星象 <i>Pissodes nitidus</i>	1.0
L1	1.8
L2	1.6
L3	1.4
L4	1.2
L5	1.0

L1 表示 1/8 以下落针 L1 meant dropping the needles under 1/8; L2 表示 1/8 以上、1/4 以下落针 L2 meant dropping the needles more than 1/8 and less than 1/4; L3 表示 1/4 以上、1/2 以下落针 L3 meant dropping the needles more than 1/4 and less than 1/2; L4 表示 1/2 以上、3/4 以下落针 L4 meant dropping the needles more than 1/2 and less than 3/4; L5 表示 3/4 以上落针 L5 meant dropping the needles more than 3/4.

表型变异系数(PCV)的计算公式^[23]如下：
$$PCV=(SD/\bar{X})\times100\%$$
 (3)
式中:PCV 为表型变异系数;SD 为标准差; \bar{X} 为某一性状总平均值.

各性状的家系遗传力(h_F^2)及单株遗传力(h^2)的计算公式^[24]如下：
$$h_F^2=\sigma_f^2/(\sigma_e^2/BR+\sigma_{\beta}^2/R+\sigma_f^2)$$
 (4)
$$h^2=(\sigma_f^2+\sigma_{\beta}^2+\sigma_e^2)/4$$

式中: h_F^2 为家系遗传力; h^2 为单株遗传力; σ_f^2 、 σ_{β}^2 、 σ_e^2 代表分别家系的方差分量、家系与区组互作的方差分量及环境方差分量; B 表示区组的个数; R 表示小区的个数.

表型相关分析采用的计算公式^[24]如下：
$$r_{p12}=Cov_{p12}/\sqrt{\sigma_{p1}^2\sigma_{p2}^2}$$
 (5)
式中: r_{p12} 是性状 1 与性状 2 的表型相关系数; Cov_{p12} 是两个性状的协方差; σ_{p1}^2 、 σ_{p2}^2 分别为两个性状的表型方差.

采用布雷津多性状综合评定法对各家系进行综合评定^[25],计算公式如下：

$$Q_i=\sqrt{\sum_{j=1}^n a_i} \quad (a_i=X_{ij}/X_{jmax})$$
 (6)
式中: Q_i 为综合评价值; X_{ij} 为某一性状的平均值; X_{jmax} 为某一性状的最优值; n 为评价指标个数.

遗传增益的计算公式^[26]如下：
$$\Delta G=WR/\bar{X}$$
 (7)
式中: ΔG 为某一性状的遗传增益; W 为选择差; R 为某一性状的遗传力; \bar{X} 为某一性状的平均值.

2 结果与分析

2.1 不同性状的方差分析

由表 2 可以看出,各性状在不同家系间、区组间均达到极显著差异;除胸径外,各性状在不同区组与家系互作的组合间的差异均达到极显著水平.

2.2 红松家系各性状变异参数

由表 3 可以看出,551 个红松家系各性状的表型变异系数变化范围为 13.9%~61.0%,其中,材积和结实量的表型变异系数较大,均超过 50%;树高的变异系数最小,为 13.9%;抗病虫能力、冠幅和胸径的变异系数均大于 19.0%.各性状家系遗传力的变化范围为 0.41~0.69,树高的家系遗传力最大,为 0.69,材积、结实量和抗病虫能力的家系遗传力分别为 0.47、0.52 和 0.48;单株遗传力小于家系遗传力,

表 2 551 个红松半同胞家系不同性状的方差分析
Table 2 Variance analysis of different traits among 551 half-sib families of *Pinus koraiensis*

性状 Trait	变异来源 Variation source	df	MS	F	P
树高 H	家系 Family	550	2.509	3.181	0.000
	区组 Block	9	32.013	40.587	0.000
	区组×家系 Block×family	3603	1.502	1.905	0.000
胸径 DBH	家系 Family	550	22.397	1.696	0.000
	区组 Block	9	46.431	3.517	0.000
	区组×家系 Block×family	3603	13.914	1.054	0.052
材积 Volume	家系 Family	550	0.002	1.900	0.000
	区组 Block	9	0.007	5.952	0.000
	区组×家系 Block×family	3603	0.001	1.133	0.000
冠幅 CW	家系 Family	550	2.299	1.903	0.000
	区组 Block	9	75.571	62.562	0.000
	区组×家系 Block×family	3603	1.830	1.515	0.000
结实量 Seed yield	家系 Family	550	15.968	2.104	0.000
	区组 Block	9	124.062	16.348	0.000
	区组×家系 Block×family	3603	10.140	1.336	0.000
抗病虫能力 Resistance to disease and insect	家系 Family	550	0.165	1.938	0.000
	区组 Block	9	2.748	32.249	0.000
	区组×家系 Block×family	3603	0.158	1.852	0.000

H: Tree height; DBH: Diameter at the breast; CW: Crown width. 下同
The same below.

表 3 551 个红松半同胞家系各性状平均值及变异系数
Table 3 Means and coefficients of variation of different traits in 551 *Pinus koraiensis* half-sib families

性状 Trait	平均值 Mean	变幅 Amplitude	标准差 SD	变异系数 Coefficient of variation (%)	h_F^2	h^2
树高 H (m)	8.15	6.27~9.51	1.13	13.9	0.69	0.28
胸径 DBH (cm)	14.49	10.32~18.62	3.76	25.9	0.41	0.36
材积 Volume (m ³)	0.07	0.03~0.11	0.04	54.9	0.47	0.37
冠幅 CW (m)	3.47	2.15~7.00	1.29	37.1	0.47	0.15
结实量 Seed yield (ind)	1.30	0.00~8.60	0.80	61.0	0.52	0.07
抗病虫能力 Resistance to disease and insect	1.87	1.24~2.00	0.36	19.1	0.48	0.10

材积的单株遗传力最大,为 0.37,结实量的单株遗传力最小,为 0.07,抗病虫能力的单株遗传力为 0.10.

2.3 各家系中各性状的平均值

551 个红松半同胞家系中,树高超过 9.00 m 的家系有 13 个,分别为 PK519、PK441、PK411、PK114、PK376、PK532、PK357、PK416、PK226、PK344、PK430、PK378、PK224,树高小于 7.00 m 的家系有 6 个,分别为 PK1、PK21、PK405、PK220、PK316、PK386,剩余家系的树高平均值均在 7.00 ~ 9.00 m. PK315、PK547 和 PK170 的胸径较大,均超过 18.0 cm,而家系 PK1、PK387、PK220 和 PK406 的胸径较小,均不足 11.00 cm. PK315、PK547、PK170、PK431 和 PK224 的材积较大,均超过 0.10 m³,而 PK406 和 PK387 的材积最小,不足 0.03 m³. PK98 和 PK539 的冠幅最大,均在 7.00 m 左右,PK350 的平均冠幅为 5.21 m,小于 3.00 m 的家系有 58 个,其他均在 3.00~5.00 m. 平均结实量大于 5 个球果的家系有 4 个,分别为 PK315、PK207、PK105 和 PK544,25 个家系至今还未结实,结实量为 0.102 个家系没有发生病虫害,抗病虫能力均为满分 2.00. PK237、PK215、PK369、PK233、PK56 和 PK514 的抗病虫能力较差,得分均小于 1.50(表 4).

2.4 不同性状的相关分析

551 个红松半同胞家系所有性状间均呈显著正相关(表 5). 从生长性状来看,树高、胸径、材积和冠幅 4 个性状之间均达到极显著相关水平(相关系数在 0.306~0.969),其中,材积与胸径的相关系数最大,为 0.969. 结实量与 4 个生长性状均呈极显著正相关,与材积的相关系数最大(0.316),然后依次是胸径(0.314)、冠幅(0.277)和树高(0.155). 抗病虫能力与生长和结实性状均呈显著正相关关系,但相关系数较小,均小于 0.100.

2.5 多性状综合评价

由于所有生长性状、结实性状和抗病虫能力之间均达到极显著正相关关系,因此以树高、胸径、材积、冠幅、结实量和抗病虫能力 6 个性状相结合对 551 个半同胞家系进行综合评价. 以 5% 的入选率对 551 个半同胞家系进行综合评价选择, PK315、PK187、PK539、PK547、PK544、PK541、PK520、PK156、PK323、PK534、PK177、PK132、PK146、PK540、PK139、PK46、PK207、PK118、PK431、PK105、PK170、PK296、PK246、PK537、PK377、PK288、PK101 和 PK543 入选(表 6). 在选出的 28 个优良家系中同样利用多性状综合评价方法进行优良单株选择,以 2% 的入选率选出 7 个优良单株,分别为 PK177-2-1、PK118-2-1、PK431-2-1、PK315-10-1、PK246-10-1、PK156-10-1 和 PK246-4-1(表 7).

入选的 28 个家系树高的平均值为 8.62 m,比总平均值提高 0.46 m,遗传增益为 3.9%;胸径的平均值为 16.78 cm,比总平均值提高 2.29 cm,遗传增益为 6.5%;材积的平均值为 0.09 m³,比总平均值提高 0.02 m³,遗传增益为 16.8%;冠幅的平均值为 4.24 m,比总平均值提高 0.77 m,遗传增益为 10.6%;结实量的平均值为 3.02 个,比总体平均值提高 1.74 个,遗传增益为 71.4%;抗病虫能力的均值为 1.89,比总体平均值提高 0.02,遗传增益为 0.5%. 7 个优良单株树高平均值为 9.87 m,比总平均值提高 1.72 m,遗传增益为 5.9%;胸径平均值为 23.73 cm,比总平均值提高 9.24 cm,遗传增益为 23.1%;材积的平均值为 0.19 m³,比总平均值提高 0.12 m³,遗传增益为 66.8%;冠幅的平均值为 6.13 m,比总平均值提高 2.66 m,遗传增益为 11.2%;结实量的平均值为 16.14 个,比总平均值提高 14.86 个,遗传增益为 80.9%;抗病虫能力的平均值为 2.00,比总平均值提高 0.13,遗传增益为 0.7%(表 8).

表 4 各家系中各性状的平均值
Table 4 Mean of each trait in each family

家系 Family	树高 H (m)	胸径 DBH (cm)	材积 Volume (m ³)	冠幅 CW (m)	结实量 Seed yield (ind)	抗病虫能力 Resistance to disease and insect
PK519	9.51±0.86	14.99±2.43	0.069±0.026	3.35±0.83	0.46±0.24	1.71±0.41
PK441	9.38±1.23	15.72±4.82	0.085±0.055	3.82±1.10	1.04±0.52	1.91±0.29
PK411	9.25±1.43	16.00±4.42	0.085±0.051	3.65±0.85	1.93±0.98	1.79±0.43
PK114	9.14±2.00	15.22±3.18	0.077±0.035	3.36±0.63	0.00±0.00	1.89±0.33
PK376	9.10±1.42	15.28±4.83	0.083±0.059	3.59±1.25	1.17±0.89	1.83±0.39
PK532	9.10±1.21	17.10±2.12	0.092±0.005	3.80±0.65	0.00±0.00	1.60±0.23
PK357	9.09±1.33	14.48±4.98	0.074±0.053	3.74±1.02	1.06±0.98	1.86±0.34
PK416	9.09±1.22	11.08±4.03	0.041±0.038	2.78±0.90	0.00±0.00	1.89±0.29
PK226	9.06±2.00	15.48±3.29	0.079±0.037	3.79±0.99	0.54±0.33	1.92±0.28
PK344	9.04±1.68	14.51±3.26	0.065±0.033	3.00±0.70	0.80±0.65	2.00±0.00
PK430	9.03±1.48	13.18±5.84	0.061±0.056	3.49±1.08	0.25±0.21	1.75±0.46
PK378	9.01±0.68	16.27±3.55	0.082±0.038	3.80±1.19	0.60±0.52	1.80±0.41
PK224	9.00±0.86	17.49±3.74	0.100±0.042	3.81±0.83	0.53±0.23	1.82±0.39
PK132	8.99±1.31	15.43±3.60	0.080±0.042	3.72±1.23	4.54±0.35	1.82±0.38
PK450	8.98±1.18	15.95±3.00	0.083±0.030	3.84±1.00	0.41±0.24	1.94±0.24
PK487	8.98±0.97	15.23±3.56	0.074±0.035	3.33±1.08	0.50±0.36	1.94±0.25
PK157	8.98±0.44	16.87±3.49	0.092±0.039	3.86±1.02	0.80±0.24	1.87±0.35
PK288	8.96±1.48	16.18±3.48	0.087±0.045	3.83±1.02	2.47±2.03	1.89±0.32
PK375	8.95±1.79	16.40±4.13	0.090±0.048	3.63±1.14	1.19±0.85	1.71±0.55
PK159	8.94±1.10	17.19±4.25	0.096±0.045	3.60±1.30	1.63±0.10	1.69±0.60
PK351	8.92±1.32	15.02±3.88	0.072±0.037	3.59±1.09	1.78±1.28	1.89±0.32
PK449	8.89±1.17	13.76±3.57	0.061±0.040	3.17±0.12	0.76±0.32	1.94±0.24
PK227	8.87±0.93	16.62±2.83	0.088±0.031	3.99±0.90	0.87±0.28	1.88±0.28
PK435	8.85±1.08	16.87±4.47	0.094±0.047	3.65±1.17	0.81±0.72	1.81±0.40
PK475	8.85±0.90	14.04±3.70	0.063±0.036	3.55±1.37	1.11±0.39	1.79±0.52
PK370	8.84±1.18	13.99±3.50	0.063±0.031	3.32±0.81	0.64±0.42	1.86±0.36
PK452	8.83±1.28	15.22±4.51	0.077±0.049	3.34±0.70	1.16±0.56	1.61±0.49
PK372	8.83±0.92	15.67±3.90	0.080±0.047	3.60±0.96	1.87±1.26	1.90±0.29
.....
PK32	7.09±0.83	14.68±3.54	0.061±0.028	3.67±1.07	0.62±0.16	2.00±0.00
PK185	7.07±0.78	13.53±2.70	0.050±0.022	3.37±0.92	3.86±0.30	2.00±0.00
PK551	7.00±1.53	11.95±2.78	0.040±0.024	3.08±1.31	1.00±0.56	2.00±0.00
PK1	6.93±1.22	10.97±3.09	0.034±0.019	2.96±1.02	0.00±0.00	1.67±0.58
PK21	6.87±0.71	12.28±3.02	0.042±0.020	2.85±0.91	0.08±0.01	1.83±0.39
PK405	6.65±0.65	13.29±3.48	0.055±0.026	3.00±1.07	2.71±1.36	1.74±0.68
PK220	6.63±1.33	10.41±3.32	0.032±0.024	2.69±0.92	0.75±0.12	1.60±0.61
PK316	6.44±1.27	14.66±3.45	0.062±0.026	3.65±0.76	1.56±1.03	1.67±0.50
PK386	6.27±0.71	14.95±3.40	0.070±0.032	3.53±1.15	0.31±0.26	1.92±0.28

表 5 不同性状的相关系数
Table 5 Correlation coefficients among different traits

性状 Trait	树高 H	胸径 DBH	材积 Volume	冠幅 CW	结实量 Seed yield
胸径 DBH	0.580 **				
材积 Volume	0.652 **	0.969 **			
冠幅 CW	0.306 **	0.599 **	0.574 **		
结实量 Seed yield	0.155 **	0.314 **	0.316 **	0.277 **	
抗病虫能力 Resistance to disease and insect	0.092 **	0.058 **	0.059 **	0.047 **	0.028 *

* P<0.05; ** P<0.01.

3 讨 论

红松材质优良,是东北地区重要的用材树种,对其良种选育具有重要意义.遗传和变异是林木良种选育的重要研究内容^[27],其中,变异系数和遗传力是林木数量遗传的两个重要参数,其高低体现了样本的差异情况以及这种差异是否可以稳定遗传^[26,28-29].本研究中各性状的表型变异系数为13.9%~61.0%,材积、结实量和抗病虫能力的家系遗传力分别为0.47、0.52和0.48,表明红松家系的生

表 6 家系的多性状的综合评价 (Q_i)
Table 6 Comprehensive evaluation (Q_i) based on multiple characters of families

家系 Family	Q_i	家系 Family	Q_i	家系 Family	Q_i
PK315	2.38	PK540	2.11	PK101	2.09
PK187	2.18	PK139	2.11	PK543	2.08
PK539	2.16	PK46	2.11	.....	.....
PK547	2.16	PK207	2.10	.....	.....
PK544	2.15	PK118	2.10	.....	.....
PK541	2.14	PK431	2.10	.....	.....
PK520	2.13	PK105	2.10	.....	.....
PK156	2.13	PK170	2.09	PK280	1.74
PK323	2.12	PK296	2.09	PK1	1.70
PK534	2.12	PK246	2.09	PK406	1.68
PK177	2.11	PK537	2.09	PK317	1.68
PK132	2.11	PK377	2.09	PK220	1.68
PK146	2.11	PK288	2.09	PK387	1.59

表 7 优良家系中单株的多性状综合评价 (Q_i)
Table 7 Comprehensive evaluation (Q_i) based on multiple characters of single plant in superior families

单株 Single plant	Q_i	单株 Single plant	Q_i
PK177-2-1	2.42	PK105-8-1	2.28
PK118-2-1	2.31	...	...
PK431-2-1	2.30	...	...
PK315-10-1	2.29	...	...
PK246-10-1	2.29	PK431-8-2	1.46
PK156-10-1	2.29	PK207-8-2	1.46
PK246-4-1	2.29	PK105-9-4	1.45

PK177-2-1 表示第 177 号家系在第 2 区组中的第 1 棵树 PK177-2-1 meant the first tree in the second block of PK177. 其他单株的表示模式同 PK177-2-1 Expression pattern of other single plants was the same as PK177-2-1.

表 8 优良家系和优良单株各性状的遗传增益
Table 8 Genetic gain of each trait in the selected superior families or superior single plants

性状 Trait	优良家系 Superior family		优良单株 Superior single plant	
	平均值 Mean	遗传增益 Genetic gain	平均值 Mean	遗传增益 Genetic gain
		(%)		(%)
树高 H	8.62	3.9	9.87	5.9
胸径 DBH	16.78	6.5	23.73	23.1
材积 Volume	0.09	16.8	0.19	66.8
冠幅 CW	4.24	10.6	6.13	11.2
结实量 Seed yield	3.02	71.4	16.14	80.9
抗病虫能力 Resistance to disease and insect	1.89	0.5	2.00	0.7

长、结实及抗病虫能力受较强的遗传控制,高变异系数、高遗传力有利于优良家系的评价和选择^[30].本研究中的家系遗传力高于单株遗传力,这与马尾松 (*Pinus massoniana*)^[31]、日本落叶松 (*Larix*

kaempferi)^[32]和杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)^[33]的研究结果一致,再一次表明对家系评价选择意义重大.

相关分析可以表明不同指标间的关联程度,对综合评价中指标的选择具有重要意义.本研究中材积与胸径的相关系数最高,达到 0.969,而与树高的相关系数仅 0.652,表明胸径对材积影响更大,这与 Liang 等^[34]对红松的研究结果相同,由于造林密度过大、树龄较大的原因,树高生长已达到缓慢期或者受到抑制.结实量和抗病虫害能力与其他各指标的相关系数也达极显著正相关,表明生长越好,结实量越大,抗病能力越强.总的来说,各指标之间均达到显著正相关,说明本研究所选指标均可用于优良家系的综合评价选择.

育种目标决定育种方法和选择手段,20 世纪末期及 21 世纪初期,木材产量是东北地区红松产业化的重要考察指标,红松良种选育均以生长性状为主^[35-36].但是随着天然林全面禁伐,红松结实性状成为东北地区林业工作者关注的重点,一批以结实为考察指标的优良育种材料被选出^[12].且随着全球气候变化,病虫害逐渐由南向北扩张^[37],抗病虫害育种材料也备受关注.基于此,本研究利用综合生长、结实和抗病虫能力等 6 个指标对红松优良家系进行综合评价,初步筛选 28 个优良家系和 7 个优良单株,入选家系的树高、胸径和材积的遗传增益分别为 3.9%、6.5%和 16.8%,这比梁德洋等^[38]和王璧莹等^[13]对红松的研究结果稍低,可能与本研究中高栽植密度对红松单株生长产生一定影响有关;从结实来看,本研究平均结实量虽然只有 3.02 个,但是初选优良家系结实量的遗传增益为 71.4%,与姜国云等^[12]的研究结果相近,表明结实性状被改良的潜力较大;从抗病虫能力来看,虽然入选家系抗虫能力的遗传增益只有 0.5%,但是抗虫能力均值达到 1.89,其中,90%的家系均达到了 2.0,表明入选家系具有较强的抗病虫能力.从单株选择效果来看,虽然单株遗传力较家系遗传力低,但是由于选择的单株是在优良家系中选择,因此评价选出的优良单株各指标更优秀.入选的优良单株各指标遗传增益均较高,尤其材积和结实量,分别达到 66.8%和 80.9%,这与张振等^[22]研究的结果相同,表明单株选择可以大大提升改良效果,同时生产上也可以选择优良单株直接无性扩繁和利用.

随着林木遗传改良的逐渐深入,高遗传增益材料需求越来越强烈,高世代种子园的营建势在必

行^[9]. 本研究中所选材料可以为改良及二代种子园的营建提供材料, 也可以为良种推广应用提供基础. 伴随技术的发展, 分子育种^[39]与常规良种选育^[40]相结合是种子园发展的必然趋势^[29], 例如在落叶松中已经开展的分子标记辅助育种^[41]、油松 BWB 设计中表型与高密度分子标记结合, 对优良基因进行筛选等^[42]. 红松育种虽然起步较晚, 但是下一步研究应该从以上方面入手, 加速红松良种改良进程.

参考文献

- [1] Zhang Z (张 振), Zhang H-G (张含国), Zhou Y (周 宇), *et al.* Variation of seed characters in Korean pine (*Pinus koraiensis*) multi-clonal populations. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2015, **37**(2): 67-78 (in Chinese)
- [2] Ma J-L (马建路), Zhuang L-W (庄丽文), Chen D (陈 动), *et al.* Geographical distribution of *Pinus koraiensis*. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 1992, **20**(5): 40-47 (in Chinese)
- [3] Liang D-Y (梁德洋), Jin Y-Z (金允哲), Zhao G-H (赵光浩), *et al.* Variance analyses of growth and wood characteristics of 50 *Pinus koraiensis* clones. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2016, **38**(6): 51-59 (in Chinese)
- [4] Qu H-J (屈红军), Hou Q-J (侯庆娟), Zhang R (张冉), *et al.* Effect factors and prediction method of corn production of *Pinus koraiensis*. *Seed* (种子), 2015, **34**(1): 71-73 (in Chinese)
- [5] Li Z-M (李哲敏). Nutrition and health function of pine nut. *Dairy Industry in China* (中国乳业), 2001(7): 23-24 (in Chinese)
- [6] Han N-L (韩宁林). Pine seed resources worthy of attention. *Journal of Forestry Engineering* (林业工程学报), 1996(4): 12-13 (in Chinese)
- [7] Zhen YW, Zhi RN. Effects of unsaturated fatty acids of *Pinus koraiensis* on lipid metabolism and brain function in obese rats. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2008, **30**: 547-550
- [8] Su XY, Wan ZY, Liu JR. In vitro and in vivo antioxidant activity of *Pinus koraiensis* seed extract containing phenolic compounds. *Food Chemistry*, 2009, **117**: 681-686
- [9] Zhao G-H (赵光浩), Leng W-W (冷伟伟), Zhang T (张 腾), *et al.* Variance analysis of growth traits of 51 *Pinus koraiensis* seedling families. *Bulletin of Botanical Research* (植物研究), 2018, **38**(4): 590-596 (in Chinese)
- [10] Sun W-S (孙文生). Study on Management Techniques of Korean pine Seed Orchard for High Genetic Quality and Ample Production of Seeds. PhD Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2006 (in Chinese)
- [11] Wang F, Zhang QH, Tian YG, *et al.* Comprehensive assessment of growth traits and wood properties in half-sib *Pinus koraiensis* families. *Euphytica*, 2018, **214**: 202-216
- [12] Jiang G-Y (姜国云), Jiang L-P (蒋路平), Song S-L (宋双林), *et al.* Genetic variance analysis and excellent fruit-timber families selection of half-sib *Pinus koraiensis*. *Bulletin of Botanical Research* (植物研究), 2018, **38**(5): 775-784 (in Chinese)
- [13] Wang B-Y (王璧莹), Zhao X-Y (赵曦阳), Wang H-W (王洪武), *et al.* Variance analysis of growth characteristics of 30 *Pinus koraiensis* half-sib families. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2019, **47**(4): 8-11 (in Chinese)
- [14] Wang Z-H (王卓晖), Hao X-F (郝雪峰), Hu X-G (胡兴国), *et al.* Family selection of *Pinus koraiensis* based on growth and fructification. *Journal of Beihua University* (北华大学学报), 2019, **20**(1): 26-32 (in Chinese)
- [15] Tan J-C (谭济才), Deng X (邓 欣). Mechanism of plant resistance to disease and insect and selection and breeding of tea trees. *Guizhou Tea* (贵州茶叶), 1994(3): 13-16 (in Chinese)
- [16] Rawat N, Pumphrey MO, Liu S, *et al.* Wheat Fhb1 encodes a chimeric lectin with agglutinin domains and a pore-forming toxin-like domain conferring resistance to Fusarium head blight. *Nature Genetics*, 2016, **48**: 1576-1580
- [17] Steuernagel B, Periyannan SK, Hernandez P, *et al.* Rapid cloning of disease-resistance genes in plants using mutagenesis and sequence capture. *Nature Biotechnology*, 2016, **34**: 652-655
- [18] Li X-L (李雪玲), Li Y (厉 云), Zhang T-Y (张天宇). Resistance screening and identification of cotton cultivars to *Verticillium* wilt disease. *Plant Protection* (植物保护), 2003, **29**(3): 18-20 (in Chinese)
- [19] Dong H-Y (董怀玉), Jiang Y (姜 钰), Xu X-D (徐秀德), *et al.* Identification and screening of excellent germplasm resources of *Sorghum bicolor* resistance to disease and insect. *Rain Fed Crops* (杂粮作物), 2003, **23**(2): 82-84 (in Chinese)
- [20] Tang W-H (唐威华), Leng B (冷 冰), He Z-H (何祖华). Plant resistance to disease and insect. *Plant Physiology Journal* (植物生理学报), 2017, **53**(8): 1333-1336 (in Chinese)
- [21] Yang Y-L (杨燕林), Kai X (开 学), He J-W (和加卫), *et al.* Study on vitality disease resistance and insects pest resistance of fine varieties of raspberry and local wild species. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* (西南农业学报), 2008, **21**(6): 1667-1370 (in Chinese)
- [22] Zhang Z (张 振), Zhang H-G (张含国), Zhang L (张 磊). Age variations in productivity and family selection of open-pollinated families of Korean pine (*Pinus koraiensis*). *Bulletin of Botanical Research* (植物研究), 2016, **36**(2): 305-309 (in Chinese)
- [23] Hai PH, Jansson G, Harwood C, *et al.* Genetic variation in growth, stem straightness and branch thickness in clonal trials of *Acacia auriculiformis* at three contrasting sites in Vietnam. *Forest Ecology and Management*,

- 2008, **255**: 156–167
- [24] Xie X-M (解孝满), Li J-T (李景涛), Zhao H-E (赵合娥). Genetic determination and selection of willow clones at seedling stage. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology* (江苏林业科技), 2008, **35**(3): 6–14 (in Chinese)
- [25] Zhao XY, Xia H, Wang XW, *et al.* Variance and stability analyses of growth characters in half-sib *Betula platyphylla* families at three different sites in China. *Euphytica*, 2016, **208**: 173–186
- [26] Chen X-Y (陈晓阳), Shen X-H (沈熙环). Tree Breeding. Beijing: Higher Education Press, 2005 (in Chinese)
- [27] Mwase WF, Savill PS, Hemery G. Genetic parameter estimates for growth and form traits in common ash (*Fraxinus excelsior* L.) in a breeding seedling orchard at little witten ham in England. *New Forests*, 2008, **36**: 225–238
- [28] Si D-J (司冬晶), Zhang X-X (张鑫鑫), Han D-Y (韩冬云), *et al.* Variance analysis and growth model building of H and DBH of Poplar clones at different sites. *Bulletin of Botanical Research* (植物研究), 2016, **36**(4): 588–595 (in Chinese)
- [29] Yin S-P (尹绍鹏), Zhao G-H (赵国辉), Xia H (夏辉), *et al.* Study on progeny test of half-sibs families in *Larix olgensis*. *Journal of Southwest Forestry University* (西南林业大学学报), 2016, **36**(1): 63–68 (in Chinese)
- [30] Zhang C (张超), Zhang H-G (张含国), Zhu H-Y (朱航勇), *et al.* Carbon storage genetic variation of Japanese larch families and selection of superior families. *Journal of Central South University of Forestry and Technology* (中南林业科技大学学报), 2011, **31**(10): 53–62 (in Chinese)
- [31] Su S-D (苏顺德), Huang D-L (黄德龙), Wei Y-P (魏永平), *et al.* Genetic variation and selection of the resin-yielding capacity of open-pollinated families of masson pine. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology* (福建林业科技), 2017, **44**(2): 1–6 (in Chinese)
- [32] Hou Y-M (候义梅), Li S-Y (李时元), Yang N-Y (杨年友). Research on provenance test of open-pollinated *Larix kaempferi* family. *Hubei Forestry Technology* (湖北林业科技), 2006, **137**(1): 4–7 (in Chinese)
- [33] Huang S-X (黄寿先), Zhou C-M (周传明), Zhu L-Q (朱栗琼), *et al.* Study on the genetic variation of growth traits and wood properties for Chinese fir half-sib families. *Guihaia* (广西植物), 2004, **24**(6): 535–539 (in Chinese)
- [34] Liang DY, Ding CJ, Zhao GH, *et al.* Variation and selection analysis of *Pinus koraiensis* clones in northeast China. *Journal of Forestry Research*, 2018, **29**: 611–622
- [35] Wang G-Y (王国义), Zhang S-H (张淑华), Ning Y-P (宁依萍), *et al.* Synthetic analysis on multi-site determination of filial generation for Korean pine elite tree. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2000, **28**(3): 51–53 (in Chinese)
- [36] Zhang F-S (张福生), Wang G-Y (王国义), Ning Y-P (宁依萍), *et al.* The genetic test of fast-growing characters and hereditary selection for height growth of *Pinus koraiensis* filial generation. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2003, **31**(4): 68–69 (in Chinese)
- [37] Pan L (潘龙), Li Y-X (李永霞), Liu Z-K (刘振凯), *et al.* Isolation and identification of pine wood nematode in *Pinus koraiensis* in Fengcheng, Liaoning Province. *Forest Pest and Disease* (中国森林病虫), 2018, doi: org/10.19688/j.cnki.issn1671-0886.20180021 (in Chinese)
- [38] Liang D-Y (梁德洋), Jin Y-Z (金允哲), Zhao G-H (赵光浩), *et al.* Variance analyses of growth and wood characteristics of 50 *Pinus koraiensis* clones. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2016, **38**(6): 51–59 (in Chinese)
- [39] Qi J-M (祁建民), Zhou D-X (周东新), Wu W-R (吴为人), *et al.* Application of ISSR technology in genetic diversity detection of Jute. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(9): 1473–1477 (in Chinese)
- [40] Jiang Z-H (蒋子涵), Jin G-Z (金光泽). Effects of selective cutting on intra- and interspecies competitions among major tree species in mixed broadleaved-Korean pine forest. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(9): 2179–2186 (in Chinese)
- [41] Yang X-Y (杨秀艳), Sun X-M (孙晓梅), Zhang S-G (张守供), *et al.* Development of EST-SSR markers and genetic diversity analysis of the second cycle elite population in *Larix kaempferi*. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2011, **47**(11): 51–58 (in Chinese)
- [42] Yuan H-W (袁虎威), Wang X-F (王晓飞), Du Q-P (杜清平), *et al.* BWB-assisted plus tree selection and deployment design for bulked progenies of the first-cycle Chinese pine seed orchard. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2017, **39**(11): 28–34 (in Chinese)

作者简介 王芳,女,1988年生,博士研究生.主要从事森林生态研究.E-mail: 842139075@qq.com

责任编辑 杨弘

王芳,王元兴,王成录,等.红松优树半同胞子代家系生长、结实及抗病虫能力的变异特征.应用生态学报,2019, **30**(5): 1679–1686

Wang F, Wang Y-X, Wang C-L, *et al.* Variation of the growth, fruiting and resistance to disease and insect of the half-sib families of *Pinus koraiensis* superior trees. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(5): 1679–1686 (in Chinese)