

## 红松优树子代生长变异分析及优良材料选择

王芳<sup>1</sup> 杨叶磊<sup>2</sup> 苑长华<sup>3</sup> 王君<sup>1</sup> 魏伟<sup>4</sup> 吴琳<sup>4</sup>  
李奎友<sup>4</sup> 李奎全<sup>4</sup> 陆志民<sup>1</sup> 王元兴<sup>1</sup> 杨雨春<sup>1\*</sup>

(1. 吉林省林业科学研究院(吉林省林业生物防治中心站), 长春 130000; 2. 吉林农业大学林学与草学学院, 长春 130118; 3. 抚松县林业局, 白山 134300; 4. 吉林森工露水河林业有限公司, 白山 134300)

**摘要** 为筛选优良红松(*Pinus koraiensis*)种质资源,为国家储备林建设和红松造林推广提供材料,以吉林森工露水河林业有限公司初级红松种子园中优良个体的子代为材料,对19年生218个红松优树半同胞家系的树高、胸径、材积进行方差分析、遗传参数估算、一般配合力分析、相关分析和综合评价,筛选优良家系,并在优良家系中筛选优良单株。结果显示:不同家系、区组及家系×区组间的树高、胸径、材积均具有极显著差异( $P<0.01$ );全部红松家系树高平均值为3.22 m,胸径平均值为4.79 cm,材积平均值为0.005 08 m<sup>3</sup>,各性状表型变异系数为25.42%~82.48%,家系遗传力为0.86~0.89,单株遗传力为0.23~0.38;家系PK20的树高、胸径、材积平均值均最大,且亲本的树高、胸径和材积一般配合力均最大,除PK20外,PK33、PK6和PK46亲本各性状的一般配合力均较大;树高、胸径与材积两两性状之间呈极显著正相关。利用多性状综合评价法筛选出10个优良家系(5%入选率),入选家系的树高、胸径和材积均值分别为3.85 m、6.50 cm和0.007 50 m<sup>3</sup>,遗传增益分别为17.30%、31.02%和65.08%,分别高出当地对照均值11.60%、23.81%和62.91%;以同样方法在优良家系中选出10个优良单株(2%入选率),入选单株的树高、胸径和材积均值分别为5.06 m、10.72 cm和0.023 99 m<sup>3</sup>,遗传增益分别为11.86%、17.31%和38.68%,分别高出当地对照均值46.67%、104.19%和420.83%。以生长性状作为选择目标,初选出的优良家系和优良单株可用于良种申报,为红松的遗传改良提供理论基础,同时为林业“双增”提供良种。配合力分析得到的优质亲本,可用于杂交育种产生遗传性较好的子代。

**关键词** 红松;半同胞家系;生长变异;优良材料选择

中图分类号:S722.3 文献标志码:A doi:10.7525/j.issn.1673-5102.2025.05.015

## Variation Analysis of Growth Traits of Offspring and Superior Materials Selection of *Pinus koraiensis*

WANG Fang<sup>1</sup> YANG Yelei<sup>2</sup> YUAN Changhua<sup>3</sup> WANG Jun<sup>1</sup> WEI Wei<sup>4</sup>  
WU Lin<sup>4</sup> LI Kuiyou<sup>4</sup> LI Kuiquan<sup>4</sup> LU Zhimin<sup>1</sup> WANG Yuanxing<sup>1</sup> YANG Yuchun<sup>1\*</sup>

(1. Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences(Jilin Provincial Forestry Biological Control Center Station), Changchun 130000; 2. College of Forestry and Grassland, Jilin Agriculture University, Changchun 130118; 3. Fusong Country Forestry Bureau, Baishan 134300; 4. Jilin Forest Industry Dew River Technology Group Co., Ltd., Baishan 134300)

**Abstract** In order to select the excellent germplasm resources of *Pinus koraiensis* and provide materials for national reserve forests construction and afforestation promotion of *P. koraiensis*, the offspring of superior individuals in the primary *P. koraiensis* seed garden of Jilin Forest Industry Dew River Technology Group Co., Ltd. were used as materials. Analysis of variance, estimation of genetic parameters, analysis of general combining ability, correlation analysis and comprehensive evaluation were performed on tree height ( $H$ ), diameter at breast height ( $D_{BH}$ ) and volume ( $V$ ) of 218 half-sib families with 19-year-old *P. koraiensis*, respectively. The superior families were screened and the superior individuals were selected from the superior families. The results showed

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20230202093NC);国家重点研发计划项目子课题(2022YFD2201002-03)。

第一作者简介:王芳(1988—),女,高级工程师,博士,主要从事林木遗传育种研究。

\* 通信作者:E-mail:yang-yu-chun@163.com。

收稿日期:2024年11月20日。

that there were extremely significant differences in  $H$ ,  $D_{BH}$  and  $V$  among different families, blocks and families $\times$  blocks ( $P < 0.01$ ). The average  $H$  of all *P. koraiensis* families was 3.22 m, the average  $D_{BH}$  was 4.79 cm, and the average  $V$  was 0.005 08 m<sup>3</sup>. The phenotypic variation coefficient of the traits ranged from 25.42% to 82.48%, the family heritability ranged from 0.86 to 0.89, and the individual heritability ranged from 0.23 to 0.38. The average values of  $H$ ,  $D_{BH}$  and  $V$  of family PK20 were the largest, and the general combining ability values of  $H$ ,  $D_{BH}$  and  $V$  of PK20 parent were also the largest. Besides PK20, the general combining ability values of PK33, PK6 and PK46 parents were also larger.  $H$ ,  $D_{BH}$  and  $V$  were significantly positively correlated with each other. Therefore, 10 excellent families were screened out by multi-trait comprehensive evaluation method (5% selection rate). The average  $H$ ,  $D_{BH}$  and  $V$  of the selected families were 3.85 m, 6.50 cm and 0.007 50 m<sup>3</sup>, respectively. The genetic gain was 17.30%, 31.02% and 65.08%, respectively, with 11.60%, 23.81% and 62.91% higher than the local control mean value, respectively. By the same method, 10 excellent individuals were selected from excellent families (2% selection rate). The average  $H$ ,  $D_{BH}$  and  $V$  of the 10 selected individuals was 5.06 m, 10.72 cm and 0.023 99 m<sup>3</sup>, respectively, and the genetic gain was 11.86%, 17.31% and 38.68%, respectively, with 46.67%, 104.19% and 420.83% higher than the local control mean value, respectively. Taking growth traits as the selection target, the initially selected excellent families and individuals could be used for the application of improved varieties, providing a theoretical basis for genetic improvement of *P. koraiensis* and providing improved varieties for the double increase of forestry area and volume. The high-quality parents obtained by combining ability analysis could be used in hybrid breeding to produce offspring with better heredity.

**Key words** *Pinus koraiensis*; half-sib families; growth variation; superior material selection

红松 (*Pinus koraiensis*), 属于松科 (Pinaceae) 松属 (*Pinus*), 常绿乔木, 在我国主要分布于小兴安岭至长白山一带, 在俄罗斯远东、日本和朝鲜也有分布<sup>[1]</sup>。其木材颜色美观, 材质轻软, 结构细腻, 纹理密直通达, 耐腐力强, 是非常珍贵且优良的用材树种。同时, 由于其种子营养丰富, 具有较高的食用、药用和工业价值, 也是我国优良的食用干果树种<sup>[2-3]</sup>。近年来, 红松籽的营养及药用价值已逐渐被市场认可, 产品供不应求, 因此, 许多林业科研工作者开展了以获得高产、稳产红松果实为目标的研究, 主要包括以现有的种源试验林、无性系评比林和种子园为研究对象, 评价筛选结实性状优良的种源<sup>[4-5]</sup>、无性系<sup>[6-9]</sup>、家系<sup>[10-11]</sup>及单株<sup>[10]</sup>, 探究杈干类型<sup>[12-13]</sup>、林分密度<sup>[14-15]</sup>、外源激素<sup>[16]</sup>、枝条针叶特征<sup>[17-19]</sup>及营养元素含量<sup>[20-21]</sup>对红松结实的影响, 成果显著。然而, 随着经济社会的不断发展, 木材供求矛盾日益凸显, 国内珍稀大径材严重短缺。近 10 a, 我国木材对外依存度平均为 51.5%, 木材战略安全形势严峻, 与此同时, 很多国家开始禁止珍贵树种大径级材出口。因此, 我国高度重视, 将木材战略储备提上日程。红松是东北林区非常珍贵的用材树种, 也是国储林建设的主要树种, 在木材供应与储备上发挥着极其重要的作用, 2021 年被列入国家重点保护野生植物名录, 保护等级为二级。然而, 红松培育周期较长, 需要 70 a 左右<sup>[22]</sup>, 因此, 以生长性状为目标, 加快林木生长速度, 缩

短经营周期是红松遗传改良研究的重要内容之一。

林木生长性状主要包括树高、胸径、材积等, 是由遗传因素与环境因素共同决定的, 在红松及其他树种中, 均存在着丰富的变异。李岩等<sup>[23]</sup>以吉林省汪清林业局国家红松良种基地内 30 个 37 年生无性系试验林为研究对象, 探究树高、胸径、枝下高、分枝角、冠幅和材积等生长性状的遗传变异, 结果显示, 不同无性系间各性状差异均显著, 利用遗传参数分析、相关分析及主成分分析等, 筛选出综合表现优良的红松无性系。张秦徽等<sup>[24]</sup>以吉林省三岔子林业局国家红松林木良种基地的 53 个红松子代半同胞家系为材料, 测定生长性状 (树高、地径、胸径、3 m 茎和材积), 筛选出 5 个优良家系, 各性状的现实增益为 3.94%~39.48%。黄桂华等<sup>[25]</sup>研究了 11 年生柚木 (*Tectona grandis*) 无性系的生长性状遗传变异, 结果发现, 7029 无性系的树高、胸径、单株材积、冠幅与对照差异显著, 分别高了 9.21%、18.73%、45.36%、16.38%, 分别是试验林平均值的 1.22、1.32、1.93、1.34 倍。徐永宏等<sup>[26]</sup>对 3 个试验点 3 年生小叶青冈 (*Cyclobalanopsis myrsinifolia*) 的生长性状进行统计分析, 发现各试验点小叶青冈的树高、地径和冠幅在不同家系间均存在极显著差异, 种内变异丰富, 树高最大的家系高出最小家系 27.18%~43.08%。沈汉等<sup>[27]</sup>调查分析了 10 年生香椿 (*Toona sinensis*)

的生长变异情况,结果表明,树高、胸径、材积及树冠圆满度等均存在极显著的种源差异。以上研究均以同一树种内部生长性状存在的变异为基础,评价筛选优良无性系或家系加以应用,但筛选到家系后并没有继续进行单株选择。本研究选取吉林森工露水河林业有限公司初级红松种子园中优良无性系的子代半同胞家系为材料,调查分析218个19年生红松半同胞家系的生长变异,筛选优良家系,并在优良家系中筛选优良单株,筛选出的优良材料具有较高的遗传增益,可为红松高世代种子园营建提供理论基础,为我国国储林建设和林业“双增”提供良种,增加二氧化碳吸收量,促进“双碳”目标的实现。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于吉林省白山市抚松县露水河镇清水河林场39林班6小班(128°1'N,42°30'E),海拔600~800 m,属北温带东亚季风气候,是红松生长适宜的气候区。年平均气温2.9℃,年平均生长期100 d,年平均无霜期110 d,年平均日照时间2 398 h,年平均降水量894 mm,土壤为暗棕壤。

### 1.2 试验材料

试验材料为吉林森工露水河林业有限公司初级红松种子园中优良个体的子代,共218个半同胞家系(PK1~PK218),2000年秋季,采集优良单株的种子,同一无性系的种子混合后播种,培育4 a,苗龄为S2-2(4年生实生苗,圃地自然生长2 a后移栽,移栽后继续培育2 a),2005年5月,于清水河林场39林班6小班造林,营建子代测定林。将露水河林业局当地的红松种子混合播种得到的家系设为对照(CK)。试验地采用完全随机区组设计,根据地形条件设置6个区组,同一区组内光照、水分、坡度、表土厚度等环境因子基本一致。每个区组内各家系设16株双列小区,造林密度为2 m×2 m,周边设置保护行。

### 1.3 试验方法

于2019年9月中旬,对218个19年生红松半同胞家系的树高、胸径进行单株调查,采用塔尺测量树高,采用胸径尺测量胸径,计算单株立木材积,计算公式<sup>[28]</sup>为

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

式中: $g_{1.3} = (3.14D_{BH}^2)/4$ , $D_{BH}$ 表示胸径,单位为m;

$H$ 表示树高,单位为m; $f$ 表示平均实验形数, $f = 0.33$ ; $V$ 表示立木材积,单位为 $m^3$ 。

### 1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2019进行数据整理,计算多性状综合评价的 $Q_i$ 值及各性状亲本的一般配合力值,采用IBM SPSS 21软件进行各性状方差分析、遗传变异参数分析及性状间的相关分析。

树高、胸径和材积的方差分析模型<sup>[10]</sup>为

$$X_{ijk} = \mu + a_i + b_j + ab_{ij} + e_{ijk} \quad (2)$$

式中: $X_{ijk}$ 表示家系 $i$ 在区组 $j$ 中单株 $k$ 的表现型; $\mu$ 表示某一表型的总体平均值; $a_i$ 表示某一表型的家系效应; $b_j$ 表示某一表型的区组效应; $ab_{ij}$ 表示某一表型家系与区组的互作效应; $e_{ijk}$ 表示误差效应。

表型变异系数计算公式<sup>[29]</sup>为

$$P_{CV} = \sigma/\bar{X} \quad (3)$$

式中: $P_{CV}$ 表示表型变异系数; $\sigma$ 表示标准差; $\bar{X}$ 表示总体平均值。

半同胞子代测定中,各性状的家系遗传力及单株遗传力计算公式<sup>[30]</sup>为

$$h_F^2 = BR\sigma_f^2/\sigma_e^2 + R\sigma_b^2 + BR\sigma_i^2 \quad (4)$$

$$h^2 = (\sigma_e^2 + \sigma_b^2 + \sigma_i^2)/4 \quad (5)$$

式中: $h_F^2$ 、 $h^2$ 分别表示某一性状的家系遗传力和单株遗传力; $\sigma_e^2$ 、 $\sigma_b^2$ 、 $\sigma_i^2$ 分别表示某一性状的环境误差方差分量、家系与区组互作的方差分量、家系的方差分量; $B$ 表示有 $B$ 个区组; $R$ 表示 $R$ 株小区。

一般配合力计算公式<sup>[30]</sup>为

$$G_{CA} = \bar{X} - \mu \quad (6)$$

式中: $G_{CA}$ 表示某一亲本的某一特定性状的一般配合力; $\bar{X}$ 表示该亲本所有交配组合子代此特定性状的平均值; $\mu$ 表示若干亲本交配所有交配组合子代此特定性状的平均值。

表型相关分析计算公式<sup>[29]</sup>为

$$r_{ij} = \sigma(i,j)/\sqrt{\sigma_i^2\sigma_j^2} \quad (7)$$

式中: $r_{ij}$ 表示性状 $i$ 与性状 $j$ 之间的相关系数; $\sigma(i,j)$ 表示性状 $i$ 与性状 $j$ 之间的协方差; $\sigma_i^2$ 、 $\sigma_j^2$ 分别表示性状 $i$ 与性状 $j$ 的表型方差。

采用布雷金多性状综合评定法评价各家系和各单株,计算公式<sup>[31]</sup>为

$$Q_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n \alpha_j}, \alpha_j = X_{ij}/X_{jmax} \quad (8)$$

式中: $Q_i$ 表示家系 $i$ 或者单株 $i$ 的综合评价值; $X_{ij}$ 表示家系 $i$ 或单株 $i$ 中 $j$ 性状的平均值; $X_{jmax}$ 表示性状 $j$ 在所有家系或所有单株中的最优值; $n$ 表示参与评

价的性状数量。

遗传增益计算公式<sup>[30]</sup>为

$$\Delta G = WR/\bar{X} \quad (9)$$

式中: $\Delta G$ 表示某一性状的遗传增益; $W$ 表示选择差; $R$ 表示某一性状的遗传力; $\bar{X}$ 表示某一性状的平均值。此处的选择差是所选优良家系或优良单株某一性状的平均值与性状总体平均值的差值,是近似选择差。

## 2 结果与分析

### 2.1 各性状遗传变异

218个红松半同胞家系中,不同家系、区组、家系×区组间的树高、胸径、材积均具有极显著差异

( $P<0.01$ )(表1)。全部红松家系的树高、胸径和材积遗传变异参数见表2,结果显示:树高平均值为3.22 m,变幅为2.33~4.38 m;胸径平均值为4.79 cm,变幅为2.51~7.62 cm;材积平均值为0.005 08 m<sup>3</sup>,变幅为0.001 32~0.012 31 m<sup>3</sup>。树高、胸径和材积的表型变异系数为25.42%~82.48%,其中,材积的表型变异系数最大,为82.48%,之后依次为胸径(44.59%)和树高(25.42%)。各性状家系遗传力较单株遗传力高,家系遗传力为0.86~0.89,单株遗传力为0.23~0.38,树高的家系遗传力和单株遗传力均最大,分别为0.89和0.38,胸径和材积家系遗传力分别为0.87和0.86,单株遗传力分别为0.27和0.23。

表1 红松生长性状方差分析

Table 1 Variance analysis of growth traits of the half-sib families of *Pinus koraiensis*

性状 Traits	变异来源 Variance source	自由度 $d_f$	均方 Mean square	$F$	$P$
树高 Tree height	家系 Families	217	3.791	9.154	<0.01
	区组 Blocks	5	15.082	36.416	<0.01
	家系×区组 Families×Blocks	1 061	2.072	5.004	<0.01
胸径 Diameter at breast height	家系 Families	217	23.680	7.902	<0.01
	区组 Blocks	5	210.864	70.363	<0.01
	家系×区组 Families×Blocks	1 061	12.585	4.199	<0.01
材积 Volume	家系 Families	217	0	7.187	<0.01
	区组 Blocks	5	0.001	45.755	<0.01
	家系×区组 Families×Blocks	1 061	$5.17 \times 10^{-5}$	3.664	<0.01

表2 红松生长性状遗传变异参数

Table 2 Genetic variance parameters of growth traits of the half-sib families of *Pinus koraiensis*

参数 Parameter	树高 Tree height/m	胸径 Diameter at breast height/cm	材积 Volume/m <sup>3</sup>
平均值 Mean	3.22	4.79	0.005 08
变幅 Range	2.33~4.38	2.51~7.62	0.001 32~0.012 31
标准差 Standard deviation	0.82	2.14	0.004 19
表型变异系数 Phenotypic coefficient of variation/%	25.42	44.59	82.48
家系遗传力 $h_f^2$	0.89	0.87	0.86
单株遗传力 $h^2$	0.38	0.27	0.23

### 2.2 各家系性状平均值

218个红松半同胞家系中,不同家系间的树高、胸径和材积差异显著,家系PK20的树高、胸径和材积均最大( $P<0.05$ ),分别为4.38 m、7.62 cm、

0.012 31 m<sup>3</sup>。排名前10的家系树高为3.66~4.38 m,胸径为6.08~7.62 cm,材积为0.007 57~0.012 31 m<sup>3</sup>;除PK20外,家系PK6的树高(3.99 m)、胸径(6.85 cm)和材积(0.009 79 m<sup>3</sup>)也较高(表3)。

表3 红松生长性状平均值  
Table 3 Means of growth traits of the half-sib families of *Pinus koraiensis*

家系 Families	树高 Tree height/m	家系 Families	胸径 Diameter at breast height/cm	家系 Families	材积 Volume/m <sup>3</sup>
PK20	4.38±0.55 <sup>a</sup>	PK20	7.62±2.11 <sup>a</sup>	PK20	0.012 31±0.007 18 <sup>a</sup>
PK98	4.20±0.67 <sup>ab</sup>	PK6	6.85±2.19 <sup>ab</sup>	PK6	0.009 79±0.005 75 <sup>ab</sup>
PK6	3.99±0.79 <sup>ab</sup>	PK46	6.73±1.25 <sup>ab</sup>	PK26	0.009 32±0.008 83 <sup>ab</sup>
PK46	3.97±0.41 <sup>ab</sup>	PK26	6.64±2.51 <sup>ab</sup>	PK64	0.009 13±0.007 19 <sup>ab</sup>
PK64	3.87±0.90 <sup>ab</sup>	PK86	6.53±1.84 <sup>ab</sup>	PK46	0.008 56±0.003 32 <sup>ab</sup>
PK71	3.80±0.97 <sup>ab</sup>	PK3	6.43±1.95 <sup>ab</sup>	PK71	0.008 42±0.007 09 <sup>ab</sup>
PK31	3.77±0.91 <sup>ab</sup>	PK64	6.38±2.61 <sup>ab</sup>	PK72	0.008 38±0.006 65 <sup>ab</sup>
PK69	3.77±0.73 <sup>ab</sup>	PK29	6.30±0.96 <sup>ab</sup>	PK3	0.008 09±0.004 69 <sup>ab</sup>
PK53	3.76±1.01 <sup>ab</sup>	PK98	6.11±1.29 <sup>ab</sup>	PK86	0.007 75±0.004 68 <sup>ab</sup>
PK17	3.66±0.97 <sup>ab</sup>	PK97	6.08±2.32 <sup>ab</sup>	PK97	0.007 57±0.007 83 <sup>ab</sup>
PK65	3.66±0.91 <sup>b</sup>	PK66	6.08±1.75 <sup>ab</sup>	PK17	0.007 57±0.007 46 <sup>ab</sup>
PK26	3.63±0.77 <sup>b</sup>	PK31	6.01±2.04 <sup>ab</sup>	PK53	0.007 55±0.006 59 <sup>ab</sup>
PK72	3.62±1.26 <sup>b</sup>	PK71	5.95±2.93 <sup>ab</sup>	PK31	0.007 48±0.005 14 <sup>ab</sup>
PK3	3.60±0.79 <sup>b</sup>	PK5	5.78±2.38 <sup>b</sup>	PK98	0.007 47±0.004 00 <sup>ab</sup>
PK57	3.59±1.06 <sup>b</sup>	PK72	5.76±3.24 <sup>b</sup>	PK5	0.007 19±0.005 67 <sup>ab</sup>
PK5	3.58±1.01 <sup>b</sup>	PK17	5.72±2.64 <sup>b</sup>	PK66	0.006 94±0.004 05 <sup>ab</sup>
PK66	3.57±0.42 <sup>b</sup>	PK53	5.64±2.76 <sup>b</sup>	PK15	0.006 92±0.006 36 <sup>b</sup>
PK10	3.56±1.05 <sup>b</sup>	PK21	5.64±1.49 <sup>b</sup>	PK57	0.006 80±0.007 06 <sup>b</sup>
PK91	3.55±0.86 <sup>b</sup>	PK48	5.64±1.35 <sup>b</sup>	PK60	0.006 65±0.005 08 <sup>b</sup>
PK48	3.54±0.44 <sup>b</sup>	PK28	5.63±2.27 <sup>b</sup>	PK28	0.006 58±0.006 06

注:每个性状值均由大到小排列,仅列出排在前20的家系;同列不同小写字母表示家系间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Only the top 20 families were listed in the table. Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between the families ( $P<0.05$ ).

### 2.3 一般配合力

218个红松半同胞家系中,母本的树高、胸径和材积生长性状的一般配合力排列前20的家系见表4。树高生长性状一般配合力的绝对值为0~1.16,其中,排名前10的家系分别为PK20(1.16)、PK98(0.97)、PK43(-0.89)、PK33(-0.88)、PK6(0.77)、PK46(0.74)、PK13(-0.69)、PK64(0.65)、PK23(-0.64)和PK16(-0.64)。胸径生长性状一般配合力绝对值为0.01~2.82,排名前10的家系分别为PK20(2.82)、PK33(-2.28)、PK6(2.06)、PK46(1.94)、PK13(-1.90)、PK26(1.85)、PK86(1.74)、PK43(-1.72)、PK3(1.64)和PK16(-1.62)。材积生长性状一般配合力绝对值为0.000 01~0.007 23,排名前10的家系分别为PK20(0.007 23)、PK6(0.004 71)、PK26(0.004 24)、PK64(0.004 05)、PK33(-0.003 76)、PK46(0.003 48)、PK71(0.003 34)、PK16(-0.003 32)、PK72(0.003 30)和PK30(-0.003 27)。

家系PK20亲本的树高、胸径和材积的一般配合力均最大;除PK20外,PK33、PK6和PK46亲本各生长性状的一般配合力也均较大。

### 2.4 生长性状相关性

相关性分析表明,树高、胸径和材积两两性状间均呈极显著正相关关系,其中,胸径与材积的相关性最高,相关系数为0.935;其次为胸径与树高,相关系数为0.908;树高与材积的相关系数最小,为0.837(表5)。

### 2.5 综合评价

由于树高、胸径和材积均呈极显著正相关关系,因此,结合这3个生长性状,对本研究材料进行综合评价分析,入选比例设置为5%时,共有10个优良家系入选,分别为PK20、PK6、PK46、PK64、PK26、PK98、PK71、PK3、PK86、PK72(表6)。在筛选出的优良家系中选择优良单株,入选比例设置为2%时,共10个优良单株入选,分别为PK26-2-1、

表4 亲本不同生长性状的一般配合力

Table 4 General combining ability values of parents with different growth traits

家系 Families	树高 Tree height	家系 Families	胸径 Diameter at breast height	家系 Families	材积 Volume
PK20	1.16	PK20	2.82	PK20	0.007 23
PK98	0.97	PK33	-2.28	PK6	0.004 71
PK43	-0.89	PK6	2.06	PK26	0.004 24
PK33	-0.88	PK46	1.94	PK64	0.004 05
PK6	0.77	PK13	-1.90	PK33	-0.003 76
PK46	0.74	PK26	1.85	PK46	0.003 48
PK13	-0.69	PK86	1.74	PK71	0.003 34
PK64	0.65	PK43	-1.72	PK16	-0.003 32
PK23	-0.64	PK3	1.64	PK72	0.003 30
PK16	-0.64	PK16	-1.62	PK30	-0.003 27
PK83	-0.64	PK64	1.59	PK23	-0.003 22
PK84	-0.61	PK23	-1.53	PK13	-0.003 11
PK71	0.58	PK29	1.51	PK3	0.003 01
PK30	-0.56	PK88	-1.46	PK94	-0.002 76
PK39	-0.55	PK30	-1.46	PK86	0.002 67
PK69	0.55	PK94	-1.40	PK45	-0.002 60
PK31	0.54	PK84	-1.36	PK56	-0.002 54
PK53	0.53	PK45	-1.36	PK17	0.002 49
PK88	-0.50	PK2	-1.34	PK84	-0.002 49
PK65	0.44	PK98	1.32	PK97	0.002 49

注:不同性状一般配合力绝对值由大到小排列。

Note: The absolute value of general combining ability of different traits was listed in a decreasing order.

表5 红松生长性状相关性分析

Table 5 Correlation analysis between growth traits of the half-sib families of *Pinus koraiensis*

性状 Traits	树高 Tree height	胸径 Diameter at breast height
胸径 Diameter at breast height	0.908**	
材积 Volume	0.837**	0.935**

注:\*\*.在0.01水平上极显著相关。

Note:\*\* indicated extremely significant correlation at the 0.01 level.

PK26-1-7、PK20-2-3、PK26-2-6、PK26-1-10、PK20-2-5、PK64-5-1、PK64-1-6、PK64-3-10、PK20-1-2(表6)。入选的10个优良家系树高均值为3.85 m,当地对照的树高均值为3.45 m,高出当地对照11.60%,高出总体均值0.63 m,遗传增益为17.30%;胸径均值为6.50 cm,当地对照的胸径均值为5.25 cm,高出当地对照23.81%,高出总体均值1.71 cm,遗传增益为31.02%;材积均值为0.007 50 m<sup>3</sup>,当地对

照的材积均值为0.004 61 m<sup>3</sup>,高出当地对照62.91%,比总体平均值高0.003 84 m<sup>3</sup>,遗传增益为65.08%。10个优良单株树高均值为5.06 m,高出当地对照46.67%,高出总体均值1.21 m,遗传增益为11.86%;胸径均值为10.72 cm,高出当地对照104.19%,高出总体均值4.19 cm,遗传增益为17.31%;材积均值为0.023 99 m<sup>3</sup>,高出当地对照420.83%,高出总体均值0.015 14 m<sup>3</sup>,遗传增益为38.68%(表7)。

### 3 讨论与结论

红松是我国东北林区非常珍贵的乡土树种,是小兴安岭及长白山林区的主要建群树种,是国储林主要建设树种,因此,进行红松良种选育意义重大。变异是遗传改良的基础,对变异来源、特点及规律的认识有助于准确进行优良遗传材料选择,推动遗传改良进程<sup>[32-33]</sup>。本研究中,树高、胸径和材积在不同家系间均达到极显著差异水平,表明生长性状在红松半同胞家系间存在较为丰富的

表6 各家系生长性状综合评价

Table 6 Comprehensive growth-traits evaluation of each family

家系 Families	综合评价价值 $Q_i$	家系 Families	综合评价价值 $Q_i$	单株 Individuals	综合评价价值 $Q_i$	单株 Individuals	综合评价价值 $Q_i$
PK20	1.732 1	PK31	1.502 5	PK26-2-1	1.709 9	PK20-4-7	1.543 9
PK6	1.614 3	PK53	1.487 6	PK26-1-7	1.709 8	PK20-5-3	1.542 1
PK46	1.576 2	PK17	1.483 7	PK20-2-3	1.650 2	PK64-5-10	1.507 6
PK64	1.570 1	PK97	1.481 2	PK26-2-6	1.606 7	PK64-3-6	1.507 3
PK26	1.567 3	PK66	1.475 6	PK26-1-10	1.606 5	PK64-3-8	1.506 5
PK98	1.538 4	PK5	1.470 2	PK20-2-5	1.572 2	PK71-3-2	1.538 8
PK71	1.527 3	PK29	1.450 3	PK64-5-1	1.552 7	PK6-3-1	1.532 8
PK3	1.524 5	PK69	1.438 4	PK64-1-6	1.551 0	PK20-1-3	1.531 9
PK86	1.508 3	PK65	1.436 3	PK64-3-10	1.549 0	PK20-2-6	1.508 8
PK72	1.504 4	PK37	1.483 6	PK20-1-2	1.545 0	PK72-5-6	1.492 8

注:表中列出的是综合评价价值排列前20的优良家系和优良单株。PK26-2-1表示第26号家系在第2区组中的第1棵树,其他单株的表示模式同PK26-2-1。

Note: The table listed the top 20 excellent families and excellent individuals by a comprehensive evaluation. PK26-2-1 meant the first tree in the second block of PK26, expression pattern of the other individuals was the same as PK26-2-1.

表7 优良家系和优良单株生长性状遗传增益

Table 7 Genetic gains of the growth traits in the superior families and superior individuals

性状 Traits	优良家系 Superior families				优良单株 Superior individuals			
	均值 Means	遗传增益 Genetic gain/%	对照均值 Means of CK	超出对照 Percentage out of CK/%	均值 Means	遗传增益 Genetic gain/%	对照均值 Means of CK	超出对照 Percentage out of CK/%
树高 Tree height/m	3.85	17.30	3.45	11.60	5.06	11.86	3.45	46.67
胸径 Diameter at breast height/cm	6.50	31.02	5.25	23.81	10.72	17.31	5.25	104.19
材积 Volume/m <sup>3</sup>	0.007 50	65.08	0.004 61	62.91	0.023 99	38.68	0.004 61	420.83

变异,与孙佰飞等<sup>[34]</sup>对红松子代及左一凡等<sup>[35]</sup>对马尾松(*Pinus massoniana*)子代的分析结果一致,有必要进一步进行优良家系和优良单株评价选择。

变异系数是衡量群体中性状变异程度的指标,包括表型变异系数和遗传变异系数<sup>[36]</sup>。高变异有利于进行优良家系选择<sup>[37]</sup>。本研究中,材积的表型变异系数最大,为82.48%;胸径的变异系数居中,为42.59%;树高的变异系数最小,为25.42%,这与张秦徽等<sup>[24]</sup>对28年生红松子代半同胞家系和李自敬等<sup>[38]</sup>对23年生长白落叶松(*Larix olgensis*)家系的研究结果相似。遗传参数的估算在林木育种中具有重要作用,可反映数量性状在无限大群体中的某种遗传规律,其中,遗传力是常用的遗传参数之一,代表性状遗传给下一代的能

力<sup>[30]</sup>。本研究中,各性状的遗传力均较大(0.86~0.89),表明红松生长性状受较高强度的遗传控制,有利于优良家系的评价选择,这与贾庆斌等<sup>[22]</sup>对19年生红松家系的研究结果相似。材积性状具有较高的表型变异系数(82.48%)和较高的遗传力(0.86),说明材积的优劣分化比较明显,且受较高强度的遗传控制,因此,以材积性状进行遗传改良具有较强的潜力<sup>[39-40]</sup>。本研究中,红松各性状的单株遗传力小于家系遗传力,这与苏顺德等<sup>[41]</sup>对马尾松和黄寿先等<sup>[42]</sup>对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的研究结果相似。

遗传学上,一般配合力可以反映亲本遗传给子代加性基因的能力,林木遗传改良进程中,根据育种目标,营建种子园无性系的选择或者杂交育种中亲本组合的选择,均可通过一般配合力大小

来确定<sup>[43]</sup>。林业研究中,利用配合力大小进行亲本选择的研究有很多,牛慧敏等<sup>[44]</sup>通过研究8年生杉木的生长性状、木材基本密度和树干碳含量的一般配合力和特殊配合力效应值及相对重要性,联合选择出3211和3215这2个速生高固碳的杂交组合;董琳琳等<sup>[45]</sup>对杂交产生的三倍体白桦的生长和材性性状进行方差、配合力及效应值分析,最终筛选出3个优良父本(F4、F7和F10)、2个优良母本(Q19和Q103)和4个优良杂交组合(Q33×F1、Q103×F10、Q13×F12和Q19×F11)。本研究分别以树高、胸径和材积为指标,筛选出配合力较大的家系亲本,可指导后续根据不同的育种目标进行亲本选择;同时,家系PK20、PK33、PK6和PK46的树高、胸径和材积的一般配合力均较大,因此,这些家系的亲本可作为红松生长性状遗传改良的优良材料<sup>[46]</sup>。

相关分析反映两两表型性状之间的相关关系,可为综合评价及早期选择提供依据<sup>[47]</sup>。本研究中,树高、胸径和材积两两性状之间均呈极显著正相关关系,其中,胸径与材积的相关系数最大(0.935),这与以往很多研究结果相似。欧阳磊<sup>[48]</sup>对柳杉(*Cryptomeria japonica*)种子园半同胞子代进行测定,结果显示,2、3和7年生的树高、胸径和材积等生长性状两两间均呈极显著正相关关系,其中,7年生胸径与7年生材积的相关系数最大,为0.917。李岩等<sup>[23]</sup>评价红松优树无性系及其子代的生长性状,发现无性系和家系间胸径、树高、材积和冠幅均呈极显著正相关。本研究根据相关分析结果,利用综合评价法,以5%的入选率筛选出10个优良家系,入选家系的树高、胸径和材积遗传增益分别为17.30%、31.02%和65.08%,各性状均值分别高出当地对照均值11.60%、23.81%、62.91%,这与洪舟等<sup>[49]</sup>对4年生越南黄花梨(*Dalbergia tonkinensis*)种源家系生长遗传变异分析研究结果相似。以2%的入选率,在优良家系中选择优良单株,入选优良单株树高、胸径和材积的平均值分别为5.06 m、10.72 cm和0.024 14 m<sup>3</sup>,均具有较高的遗传增益,且各性状分别高出当地对照均值46.67%、104.19%和420.83%。筛选出的优良家系和优良单株各生长性状均具有较高的遗传增益,且各性状均值也显著高出当地对照均值,进一步说明本研究对优良家系和优良单株的选择是有意义的。

本研究筛选出的优良家系和优良单株树高、胸径和材积等生长性状具有明显优势,显著高于当地对照,各性状具有较高的遗传力和遗传增益,可为红松高世代种子园营建提供基础材料,为红松生长性状遗传改良及大径级材定向培育提供参考,也可为造林推广应用提供物质材料;通过筛选得到的一般配合力高的亲本若进行杂交试验,可提高子代杂种优势的概率。

本研究的试验材料是19年生红松,林龄较小,仍处于幼龄期,且调查仅测定了树高、胸径和单株材积3个生长指标。今后,要对子代林进行长期的观测,并调查、记录生长指标,以便更加精准地对其进行评价。此外,随着树龄的不断增加,可以增加材性指标、结实指标及抗性指标等,从不同的育种目标出发,评价、筛选优良遗传材料;也应引入更多数据统计与分析方法及分子育种技术,如最佳线性无偏预测法、隶属函数法、基因工程育种、分子标记辅助选择、全基因组选择育种等,最终选育出生长速度快、材质优良、结实量大且抗性强的红松良种。

## 参 考 文 献

- [1] 张志翔. 树木学:北方本[M]. 2版. 北京:中国林业出版社, 2008.  
ZHANG Z X. Dendrology: northern edition [M]. 2nd Ed. Beijing: China Forestry Press, 2008.
- [2] YANG J, CHOI W S, KIM K J, *et al.* Investigation of active anti-inflammatory constituents of essential oil from *Pinus koraiensis* (Sieb. et Zucc.) wood in LPS-stimulated RBL-2H3 cells[J]. *Biomolecules*, 2021, 11(6): 817.
- [3] 王贺. 10个品系红松仁油成分、性质分析及指纹图谱构建[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2021.  
WANG H. Composition, characteristic analysis, and fingerprints construction of 10 pine seed oils[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.
- [4] 马晓雨, 尚福强, 潘丕克, 等. 不同种源红松生长、结实及光合生理特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(1): 57-65.  
MA X Y, SHANG F Q, PAN P K, *et al.* The growth, fruiting and photosynthetic physiology characteristics of *Pinus koraiensis* from different provenances[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(1): 57-65.
- [5] 尚福强, 高源, 马晓雨, 等. 不同种源红松生长性状和结实性状变异分析与评价选择[J]. 种子, 2024, 43(10): 74-84.

- SHANG F Q, GAO Y, MA X Y, *et al.* Variation analysis and evaluation selection of growth and seed traits of *Pinus koraiensis* from different provenances [J]. *Seed*, 2024, 43(10): 74-84.
- [6] 杨圆圆, 张金博, 徐广金, 等. 红松无性系结实性状变异及选择[J]. 种子, 2023, 42(12): 1-8.
- YANG Y Y, ZHANG J B, XU G J, *et al.* Variation and selection of fruit traits of *Pinus koraiensis* clones [J]. *Seed*, 2023, 42(12): 1-8.
- [7] 周雪燕, 高海燕, 李召珉, 等. 基于生长与结实评价红松种子园亲本[J]. 植物研究, 2020, 40(3): 376-385.
- ZHOU X Y, GAO H Y, LI Z M, *et al.* Evaluating parents of *Pinus koraiensis* seeds orchard with growth and fruiting [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2020, 40(3): 376-385.
- [8] 蒋路平, 王景源, 张鹏, 等. 170个红松无性系生长及结实性状变异及选择[J]. 林业科学研究, 2019, 32(1): 58-64.
- JIANG L P, WANG J Y, ZHANG P, *et al.* Variation and selection of growth and fruit traits among 170 *Pinus koraiensis* clones [J]. *Forest Research*, 2019, 32(1): 58-64.
- [9] 韩龙海, 潘凤刚, 刘洪志, 等. 红松种实性状变异及无性系选择[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2021, 22(2): 176-181.
- HAN L H, PAN F G, LIU H Z, *et al.* Variation of cone-and-seed traits and clonal selection of *Pinus koraiensis* [J]. *Journal of Beihua University (Natural Science)*, 2021, 22(2): 176-181.
- [10] 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[J]. 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 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(5): 1679-1686.
- [11] 姜国云, 蒋路平, 宋双林, 等. 红松半同胞家系遗传变异分析及果材兼用优良家系选择[J]. 植物研究, 2018, 38(5): 775-784.
- JANG G Y, JIANG L P, SONG S L, *et al.* Genetic variance analysis and excellent fruit-timber families selection of half-sib *Pinus koraiensis* [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2018, 38(5): 775-784.
- [12] TUAN N T, 沈海龙, 张金虎, 等. 红松杈干类型与林分密度、个体生长指标及丰年株均结实量的关系[J]. 生态学杂志, 2017, 36(4): 925-934.
- TUAN N T, SHEN H L, ZHANG J H, *et al.* Relationships between multi-stem type and stand density, tree growth index and mast year cone yield in *Pinus koraiensis* plantation [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(4): 925-934.
- [13] 张海涛, 薛长坤, 李艳飞, 等. 利用杈干原理促进红松结实技术的应用[J]. 林业科技通讯, 2000(8): 33.
- ZHANG H T, XUE C K, LI Y F, *et al.* The principle of bifurcation was used to promote the application of fruiting technology of *Pinus koraiensis* [J]. *Forest Science and Technology*, 2000(8): 33.
- [14] 王芳, 陆志民, 王君, 等. 不同疏伐密度对红松结实量的影响[J]. 吉林林业科技, 2023, 52(3): 1-4.
- WANG F, LU Z M, WANG J, *et al.* Effects of different thinning densities on cone quantity of *Pinus koraiensis* [J]. *Journal of Jilin Forestry Science and Technology*, 2023, 52(3): 1-4.
- [15] 张金虎. 红松人工林结实的密度效应及其周期结实模型的建立[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- ZHANG J H. The effects of stand density on cone yield and establishment of period cone yield model for Korean pine plantation [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.
- [16] 刘殿辉, 韩瑞龙, 薛添钰, 等. 外源 GA4/7 对红松提早结实的影响[J]. 防护林科技, 2024(6): 52-55.
- LIU D H, HAN R L, XUE T Y, *et al.* Effects of exogenous GA4/7 on early fruiting of *Pinus koraiensis* [J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2024(6): 52-55.
- [17] 谷健. 不同结实特性红松花芽分化期间光合营养生理[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- GU J. Photosynthetic and nutrition physiology of Korean pine with different fruit characteristics during flower bud differentiation [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.
- [18] 殷东生, 张建瑛, 魏晓慧. 红松当年生枝条的性状特征与结实的相关性[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(9): 6-9.
- YIN D S, ZHANG J Y, WEI X H. Relationships between cones bearing and traits of current-year branch of *Pinus koraiensis* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47(9): 6-9.
- [19] 林强, 陆天宇, 沈海龙, 等. 长期结实和不结实红松针叶光合生理参数的差异[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(3): 137-146.
- LIN Q, LU T Y, SHEN H L, *et al.* Analysis of needle photosynthetic index characteristics for long period seed setting and non-setting trees of *Pinus koraiensis* [J]. *Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2023, 47(3): 137-146.
- [20] 殷东生, 张建瑛. 红松结实大年和小年枝叶中碳氮磷质量分数的差异[J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(9):

- 53-57.
- YIN D S, ZHANG J Y. The differential carbon, nitrogen, and phosphorus mass fractions in on and off year branches and leaves of *Pinus koraiensis* fruiting [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(9): 53-57.
- [21] WU H B, ZHANG J Y, RODRÍGUEZ-CALCERRADA J, *et al.* Large investment of stored nitrogen and phosphorus in female cones is consistent with infrequent reproduction events of *Pinus koraiensis*, a high value woody oil crop in Northeast Asia [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13: 1084043.
- [22] 贾庆斌, 刘庚, 赵佳丽, 等. 红松半同胞家系生长性状变异分析与优良家系选择 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2022, 46(4): 109-116.
- JIA Q B, LIU G, ZHAO J L, *et al.* Variation analyses of growth traits in half-sib families of Korean pine and superior families selection [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(4): 109-116.
- [23] 李岩, 朱嘉瑶, 王喜和, 等. 红松优树无性系及其子代的生长评价与选择研究 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(10): 38-46.
- LI Y, ZHU J Y, WANG X H, *et al.* Growth evaluation and selection study of elite clones and its offspring families in *Pinus koraiensis* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(10): 38-46.
- [24] 张秦徽, 王洪武, 姜国云, 等. 红松半同胞家系变异分析及选择研究 [J]. 植物研究, 2019, 39(4): 557-567.
- ZHANG Q H, WANG H W, JIANG G Y, *et al.* Variation analysis and selection of *Pinus koraiensis* half-sib families [J]. Bulletin of Botanical Research, 2019, 39(4): 557-567.
- [25] 黄桂华, 梁坤南, 付强, 等. 11年生柚木无性系遗传变异与优良无性系选择 [J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(8): 18-22.
- HUANG G H, LIANG K N, FU Q, *et al.* Genetic variation and superior clone selection of 11-year-old *Tectona grandis* clones [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(8): 18-22.
- [26] 徐永宏, 杨孟晴, 代丽华, 等. 小叶青冈幼林生长和形质性状家系变异与选择 [J]. 西部林业科学, 2023, 52(6): 1-7.
- XU Y H, YANG M Q, DAI L H, *et al.* Variation and selection of growth and form-quality traits of young *Cyclobalanopsis myrsinifolia* forest [J]. Journal of West China Forestry Science, 2023, 52(6): 1-7.
- [27] 沈汉, 郑成忠, 邱勇斌, 等. 10年生香椿生长与形质性状的种源变异及选择 [J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(3): 597-605.
- SHEN H, ZHENG C Z, QIU Y B, *et al.* Provenance variation and selection in growth, shape, and quality traits of 10-year-old *Toona sinensis* [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(3): 597-605.
- [28] 张振, 张含国, 张磊. 红松自由授粉子代家系生产力年度变异与家系选择 [J]. 植物研究, 2016, 36(2): 305-309.
- ZHANG Z, ZHANG H G, ZHANG L. Age variations in productivity and family selection of open-pollinated families of Korean pine (*Pinus koraiensis*) [J]. Bulletin of Botanical Research, 2016, 36(2): 305-309.
- [29] WANG F, ZHANG Q H, TIAN Y G, *et al.* Comprehensive assessment of growth traits and wood properties in half-sib *Pinus koraiensis* families [J]. Euphytica, 2018, 214(11): 202.
- [30] 陈晓阳, 沈熙环. 林木育种学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- CHEN X Y, SHEN X H. Tree breeding science [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.
- [31] AHMED A K M, JIANG L P, WANG F, *et al.* Variation analysis of growth traits of four poplar clones under different water and fertilizer management [J]. Journal of Forestry Research, 2020, 31(1): 45-55.
- [32] PERSSON T, ANDERSSON B. Genetic variance and covariance patterns of growth and survival in Northern *Pinus sylvestris* [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2003, 18(4): 332-343.
- [33] PALLE S R, SEEVE C M, ECKERT A J, *et al.* Natural variation in expression of genes involved in xylem development in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) [J]. Tree Genetics & Genomes, 2011, 7(1): 193-206.
- [34] 孙佰飞, 张磊, 张含国, 等. 红松半同胞家系生长性状遗传评估及优良家系选择 [J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(6): 1-5.
- SUN B F, ZHANG L, ZHANG H G, *et al.* Genetic evaluation of growth traits in *Pinus koraiensis* half-sib families and selection of elite families [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(6): 1-5.
- [35] 左一凡, 刘青华, 曹森, 等. 3地点马尾松生长与产脂性状家系变异及稳定性研究 [J]. 林业科学研究, 2024, 37(5): 46-53.
- ZUO Y F, LIU Q H, CAO S, *et al.* Family variation and stability of growth and oleoresin traits of *Pinus massoniana* in three sites [J]. Forest Research, 2024, 37(5): 46-53.
- [36] METOUGUI M L, MOKHTARI M, MAUGHAN P J, *et al.* Morphological variability, heritability and correlation

- studies within an argan tree population (*Argania spinosa* (L.) Skeels) preserved *in situ* [J]. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 2017, 7(2):42-51.
- [37] 尚福强, 高源, 马晓雨, 等. 红松优树半同胞家系的遗传变异及优良家系和单株选择[J]. *东北林业大学学报*, 2024, 52(10):1-6.  
SHANG F Q, GAO Y, MA X Y, *et al.* Genetic variation of half-sib families of superior *Pinus koraiensis* trees and selection of superior families and individuals [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2024, 52(10):1-6.
- [38] 李自敬, 李雪峰, 张含国, 等. 长白落叶松优良家系选择的研究[J]. *林业科技*, 2008, 33(4):1-4.  
LI Z J, LI X F, ZHANG H G, *et al.* Study on selection of superior families of *Larix olgensis* [J]. *Forestry Science & Technology*, 2008, 33(4):1-4.
- [39] 程琳, 戴俊, 罗启亮, 等. 14个杉木家系主要用材性状表型多样性分析与评价[J]. *热带亚热带植物学报*, 2022, 30(6):874-883.  
CHENG L, DAI J, LUO Q L, *et al.* Phenotypic diversity analysis and evaluation of main timber traits in 14 families of Chinese fir [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2022, 30(6):874-883.
- [40] 孙晓梅, 张守攻, 董雷鸣. 日本落叶松全双列交配生长性状的遗传分析[J]. *林业科学研究*, 2019, 32(4):11-18.  
SUN X M, ZHANG S G, DONG L M. Genetic analysis of *Larix kaempferi* growth traits in full-diallel crosses [J]. *Forest Research*, 2019, 32(4):11-18.
- [41] 苏顺德, 黄德龙, 魏永平, 等. 马尾松自由授粉家系产脂力遗传变异及选择[J]. *福建林业科技*, 2017, 44(2):1-6.  
SU S D, HUANG D L, WEI Y P, *et al.* Genetic variation and selection of the resin-yielding capacity of open-pollinated families of masson pine [J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2017, 44(2):1-6.
- [42] 黄寿先, 周传明, 朱栗琼, 等. 杉木半同胞家系生长和材性遗传变异研究[J]. *广西植物*, 2004, 24(6):535-539.  
HUANG S X, ZHOU C M, ZHU L Q, *et al.* Study on the genetic variation of growth traits and wood properties for Chinese fir half-sib families [J]. *Guihaia*, 2004, 24(6):535-539.
- [43] 马娟, 朱卫红, 刘京宝, 等. 玉米穗长一般配合力多位点全基因组关联分析和预测[J]. *作物学报*, 2023, 49(6):1562-1572.  
MA J, ZHU W H, LIU J B, *et al.* Multi-locus genome-wide association study and prediction for general combining ability of maize ear length [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(6):1562-1572.
- [44] 牛慧敏, 张振, 邱勇斌, 等. 杉木高世代杂交子代生长与木材性状遗传分析[J]. *森林与环境学报*, 2024, 44(2):120-126.  
NIU H M, ZHANG Z, QIU Y B, *et al.* Genetic analysis of growth and wood character of advanced generation hybrid offspring of Chinese fir [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2024, 44(2):120-126.
- [45] 董琳琳, 张国成, 刘立辉, 等. 白桦四倍体与二倍体杂交的亲本配合力分析[J]. *林业科学*, 2023, 59(9):75-84.  
DONG L L, ZHANG G C, LIU L H, *et al.* Parental combining ability for growth and wood property of hybrids between tetraploid and diploid *Betula platyphylla* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2023, 59(9):75-84.
- [46] 赖佳, 韦树谷, 黄玲, 等. 不结球白菜主要营养品质性状的配合力分析[J]. *北方园艺*, 2021, 10(5):1-7.  
LAI J, WEI S G, HUANG L, *et al.* Combining ability analysis of main nutritional quality traits in non-heading Chinese cabbage [J]. *Northern Horticulture*, 2021, 10(5):1-7.
- [47] 邱妍, 翁启杰, 李梅, 等. 尾叶桉×细叶桉多年生生长及其与材性相关的遗传分析[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(4):1-8.  
QIU Y, WENG Q J, LI M, *et al.* Genetic analysis on multiple-year growth traits and their correlations with wood properties in *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis* crosses [J]. *Forest Research*, 2022, 35(4):1-8.
- [48] 欧阳磊. 柳杉种子园半同胞子代两点测定与选择[J]. *中南林业大学学报*, 2023, 43(3):21-31.  
OUYANG L. Test and selection of the half-sib progenies in the *Cryptomeria fortunei* seed orchards at two sites [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(3):21-31.
- [49] 洪舟, 杨曾奖, 张宁南, 等. 越南黄花梨种源家系生长遗传变异及早期选择[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(1):25-30.  
HONG Z, YANG Z J, ZHANG N N, *et al.* Genetic variation and juvenile selection of growth traits of *Dalbergia tonkinensis* Prain [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 44(1):25-30.