

红松半同胞家系胸径遗传变异分析与优良家系选择

贾庆彬^{1*} 姚旭东¹ 金桂香¹ 于宏影² 李艳霞³

(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 130033; 2. 国家林业和草原局哈尔滨林业机械研究所, 哈尔滨 150086; 3. 黑龙江省林业科学研究所, 哈尔滨 150081)

摘要 通过分析不同林龄红松(*Pinus koraiensis*)半同胞家系径生长遗传变异,进行优良家系选择,为红松高世代育种群体的组建提供优良材料。该研究以吉林省露水河林业有限公司国家红松良种基地内红松半同胞家系子代测定林为研究对象,分别测量林龄18、23、27、32 a的34个参试家系(包含1个对照)胸径,通过方差分析、Duncan法多重比较等方法比较家系间胸径性状差异性,根据方差分量计算表型与遗传变异系数、家系遗传力等遗传参数,采用BLUP法估算家系育种值,通过TOPSIS法对不同林龄时期参试家系的育种潜力进行综合评价,根据综合排名筛选优良家系。结果显示:林龄18、23、27 a时家系间胸径性状差异不显著($P>0.05$);林龄32 a时,家系间胸径性状差异达显著水平($P<0.05$)。随林龄增长,参试家系间差异由不显著转为显著,表明遗传效应在林木生长过程中逐渐增强。遗传变异系数在不同林龄时期波动较小,表型变异系数随林龄增长逐渐降低。家系遗传力在林龄18~23 a时保持稳定(0.319~0.322),林龄27 a时显著下降至0.238,林龄32 a时期回升至0.346。参试家系育种值随林龄增长总体呈现优化趋势,正值家系数量占比增加。根据TOPSIS法综合评价排名,按15%入选率进行选择,766、774、851、899、853号家系入选,人工选择可获得4.06%的遗传进展。林龄32 a时,优良家系平均胸径值高出对照19.72%,现实增益12.40%、遗传增益4.29%,平均单株材积高出参试家系平均值33.09%。红松优良家系人工选择增益显著,可为今后高世代育种群体的组建提供优良繁育材料,对红松生长性状的遗传改良具有积极意义。

关键词 红松;胸径;遗传变异;家系选择

中图分类号:S722.5 文献标志码:A doi:10.7525/j.issn.1673-5102.2026.01.014

Genetic Variation Analysis of Radial Growth and Superior Family Selection in Korean Pine Half-Sib Families

JIA Qingbin^{1*} YAO Xudong¹ JIN Guixiang¹ YU Hongying² LI Yanxia³

(1. Jilin Provincial Academy of Forestry Science (Jilin Provincial Forestry Biological Control Center Station), Changchun 130033; 2. Harbin Research Institute of Forestry Machinery, National Forestry and Grassland Administration, Harbin 150086; 3. Forestry Research Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150081)

Abstract To analyze the genetic variation in diameter growth among half-sib families of Korean pine (*Pinus koraiensis*) across different stand ages and to select superior families, thereby providing high-quality materials for advanced-generation breeding populations, a progeny test forest was established using half-sib families sourced from the National Korean Pine Seed Orchard at Lushuihe Forestry Co., Ltd., Jilin Province. Diameters at breast height (DBH) of 34 tested families (including one control) were measured at stand ages of 18, 23, 27, and 32 a. Differences in DBH among families were assessed using analysis of variance and Duncan's multiple range test. Genetic parameters, including phenotypic and genetic coefficients of variation and family heritability, were calculated based on variance components. The breeding values of families were estimated using the best linear unbiased prediction method. The breeding potential of families across different stand ages was comprehensively evaluated using the technique for order preference by similarity to ideal solution

基金项目:吉林省自然科学基金面上项目(20220101325JC);国家重点研发计划项目子课题(2017YFD0601103-01)。

第一作者简介:贾庆彬(1987—),博士,副研究员,主要从事林木遗传改良研究。

* 通信作者:E-mail:jqb408@qq.com。

收稿日期:2025年7月1日。

(TOPSIS) method, and superior families were selected based on comprehensive rankings. The results showed that no significant differences in DBH among families were observed at stand ages of 18, 23, and 27 a ($P > 0.05$). However, significant differences emerged at 32 a ($P < 0.05$), indicating that genetic effects gradually strengthened during tree growth. The genetic variation coefficient fluctuated minimally across ages, while the phenotypic variation coefficient decreased with stand age. Family heritability remained stable from 18 to 23 a (0.319–0.322), declined significantly to 0.238 at 27 a, and rebounded to 0.346 at 32 a. The breeding values of families generally improved with age, with an increasing proportion of families exhibiting positive values. Based on TOPSIS rankings and a 15% selection rate, families No. 766, 774, 851, 899, and 853 were selected, achieving a genetic progress of 4.06%. At 32 a, the average DBH of superior families exceeded the control by 19.72%, with realized and genetic gains of 12.40% and 4.29%, respectively. The average individual tree volume of superior families surpassed the mean of tested families by 33.09%. Artificial selection of superior families yielded significant gains, providing high-quality breeding materials for advanced-generation Korean pine breeding populations. This study has positive implications for the genetic improvement of growth traits in Korean pine.

Key words *Pinus koraiensis*; diameters at breast height; genetic variation; family selection

红松(*Pinus koraiensis*)是我国东北地区特有的珍贵乡土树种,其木材质地轻软、纹理通直,具有韧性强、耐腐蚀等特点,是高端建筑装饰、精品家具制造及特种工艺品加工的理想原料,木材的经济价值较高^[1-2]。在林木各项生长性状中,径生长是决定单木材积的关键因素^[3],胸径作为衡量林木生长量与木材产量的核心指标,其遗传改良对于提高林分生产力、缩短大径级用材林的培育周期具有积极意义^[4-6],是林木遗传育种领域重要的研究方向。

目前,基于表型选择与遗传参数估算的传统育种方法对红松生长性状的改良具有显著效果^[7-8]。以往研究结果显示,红松胸径性状表现出中高强度的遗传控制特性^[9],采用家系选择的育种策略进行遗传改良可收获较为稳定的选择增益^[10-11]。尚福强等^[12]对辽宁省丹东地区38年生红松半同胞家系子代林进行的遗传变异分析结果显示,在树高、胸径和单株材积3个生长性状中,胸径受遗传效应的影响程度高于其他性状。王雪来^[13]以吉林省永吉县西阳种子园的20年生红松半同胞家系为研究对象进行家系选择,筛选出的优良家系树高、胸径、材积分别可获得6.23%、11.00%、25.50%的遗传增益。

尽管根据单一年度表型值进行的家系选择已在红松胸径的遗传改良中展现出显著增益,但林木生长性状的表达多具有一定的年龄依赖性^[14-15]。红松作为长周期培育树种,其径生长呈现出较明显的阶段性特征^[16]。传统表型选择的有效性依赖于对遗传、环境及其互作效应的长期解析。

以往,邓厚银等^[17]在杉木(*Cunninghamia lanceolata*)半同胞子代胸径变异和大径材家系选择的研究中发现,不同林龄间胸径相关关系呈现随林龄增长而弱化的趋势,林龄4 a与林龄9 a时遗传相关系数为0.631 9,而与林龄21 a时的相关性则降至0.115 8,林龄4 a与林龄21 a胸径遗传相关性衰减速率为每年4.3%,这意味着早期或者单一年度观测数据支撑的育种决策可能会产生时间偏移误差。孙佰飞等^[18]在林龄25、27、34 a时对117个红松半同胞家系胸径性状进行的连续观测数据显示,在25 a时胸径排名前10的家系中,仅有20%在34 a时仍保持优势地位。目前,红松胸径性状的变异分化随林龄变化呈现出增长或减弱的趋势还未有定论^[19-20],这一现象凸显出多林龄表型追踪对遗传潜力评估的重要性。

本研究以吉林省露水河林业有限公司国家红松良种基地的红松半同胞家系子代测定林为研究对象,分别在林龄18、23、27、32 a对34个参试家系(包含1个对照)的胸径进行测量,对不同林龄时期家系间胸径性状差异性进行比较,估算表型与遗传变异系数、家系遗传力、育种值等遗传参数,采用TOPSIS法(technique for order preference by similarity to ideal solution)对不同林龄时期参试家系的育种潜力进行综合评价,根据综合排名筛选优良家系,保证优良育种材料选择的可靠性,所选家系可为红松高世代育种群体的组建提供优良繁育材料,研究结果对今后红松种子园的升级改造具有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验林概况

红松半同胞家系试验林位于吉林省白山市吉林森工集团露水河林业有限公司国家红松良种基地内(42°28'20"N, 127°47'23"E), 采用3年生红松苗木造林, 1989年定植, 株行距1.5 m×2.0 m, 随机完全区组设计, 参试家系共计34个, 其中包含露水河优良种源对照(CK)1个。试验林设10个区组, 每个区组内每个家系4株, 分别在林龄18、23、27、32 a时, 对各参试家系全部个体的胸径进行测量, 本次试验选取目前保存较为完整的9个区组进行分析。

1.2 数据分析方法

方差分析采用的线性模型:

$$x_{ij} = \bar{x} + F_i + B_j + e_{ij} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为性状测量值; \bar{x} 为家系均值; F_i 为家系效应; B_j 为区组效应; e_{ij} 为随机误差。

变异系数采用以下公式进行计算:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2)$$

式中: C_v 为变异系数; \bar{x} 为性状均值; σ 为标准差。

表型变异系数与遗传变异系数采用以下公式进行计算:

$$C_{v,p} = \frac{\sqrt{\sigma_p^2}}{\bar{x}} \quad (3)$$

$$C_{v,g} = \frac{\sqrt{\sigma_g^2}}{\bar{x}} \quad (4)$$

式中: $C_{v,p}$ 为表型变异系数; $C_{v,g}$ 为遗传变异系数; σ_p^2 为表型方差分量; σ_g^2 为遗传方差分量; \bar{x} 为性状均值^[21]。

家系遗传力采用以下公式进行计算:

$$H^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \sigma_e^2/B} \quad (5)$$

式中: H^2 为家系遗传力; σ_g^2 为遗传方差分量; σ_e^2 为环境方差分量; B 为区组数。

遗传进展采用以下公式进行计算:

$$\Delta G = \frac{H_i \sigma_g}{\bar{x}} \quad (6)$$

式中: ΔG 为遗传进展; H 为家系遗传力的平方根; i 为选择强度; σ_g 为遗传方差分量的平方根; \bar{x} 为性状均值^[22]。

育种值采用BLUP法进行计算, 通用线性混合模型如下:

$$y = X_b + Z_u + e \quad (7)$$

式中: y 为性状调查值向量; b 为固定效应向量; X 为固定效应 b 的关联矩阵; u 为随机效应向量; Z 为随机效应 u 的关联矩阵; e 为随机误差向量^[23]。

现实增益与遗传增益采用以下公式进行计算:

$$G = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\% \quad (8)$$

$$G_h = \frac{SH^2}{\bar{x}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: G 为现实增益; G_h 为遗传增益; S 为选择差; \bar{x} 为性状均值; H^2 为家系遗传力^[24]。

TOPSIS综合评价采用以下方法进行计算:

设有 n 个评价对象、 m 个评价性状, 原始数据可写为矩阵 $X = (X_{ij})_{n \times m}$ 。

对性状进行归一化转换, 即:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_{ij}^2}} \quad (10)$$

归一化得到矩阵 $Z = (Z_{ij})_{n \times m}$, 其各列最大、最小值构成的最优、最劣向量分别记为

$$Z^+ = (Z_{\max 1}, Z_{\max 2}, \dots, Z_{\max m}),$$

$$Z^- = (Z_{\min 1}, Z_{\min 2}, \dots, Z_{\min m}) \quad (11)$$

第 i 个评价对象与最优、最劣方案的距离分别为

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{\max j} - Z_{ij})^2}, D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{\min j} - Z_{ij})^2} \quad (12)$$

第 i 个评价对象与最优方案的接近程度 (C_i , 值越大综合效益越好)^[25] 为

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \quad (13)$$

立木材积以原吉林省林业厅2015年下发的《吉林省立木材积、出材率表》为依据进行估算^[26]。

数据处理过程中涉及的方差分析、Duncan法多重比较、育种值估计、TOPSIS综合评价等均采用R 4.42软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 红松半同胞家系胸径遗传变异分析

对不同林龄时期红松半同胞家系径生长差异性进行比较与分析, 结果显示(表1), 林龄32 a时, 胸径性状在家系间差异达显著水平 ($P < 0.05$), 而林龄18、23、27 a时家系间差异不显著 ($P > 0.05$)。随林龄增长, 参试家系间胸径差异由不显著转为显著, 表明遗传效应在林木生长过程中逐渐增强。区组效应分别在林龄18、32 a时显著, 其他林龄时期不显著。

表1 红松半同胞家系间胸径差异性比较
Table 1 Comparison of DBH differences among half-sib families of Korean pine

| 林龄 Stand age/a | 变异来源 Source of variation | 平方和 SS | 自由度 d_f | 均方 MS | F | P |
|-------------------|-----------------------------|-----------|--------------|----------|-------|--------|
| 18 | 家系 Family | 138.913 | 33 | 4.209 | 1.468 | 0.054 |
| | 区组 Block | 76.170 | 8 | 9.521 | 3.320 | 0.001 |
| | 误差 Error | 757.048 | 264 | 2.868 | | |
| | 总计 Total | 972.131 | 305 | | | |
| 23 | 家系 Family | 262.894 | 33 | 7.966 | 1.475 | 0.052 |
| | 区组 Block | 25.344 | 8 | 3.168 | 0.587 | 0.789 |
| | 误差 Error | 1 425.531 | 264 | 5.400 | | |
| | 总计 Total | 1 713.769 | 305 | | | |
| 27 | 家系 Family | 334.746 | 33 | 10.144 | 1.312 | 0.126 |
| | 区组 Block | 40.271 | 8 | 5.034 | 0.651 | 0.734 |
| | 误差 Error | 2 040.439 | 264 | 7.729 | | |
| | 总计 Total | 2 415.457 | 305 | | | |
| 32 | 家系 Family | 490.650 | 33 | 14.868 | 1.529 | 0.037 |
| | 区组 Block | 583.690 | 8 | 72.961 | 7.504 | <0.010 |
| | 误差 Error | 2 566.903 | 264 | 9.723 | | |
| | 总计 Total | 3 641.243 | 305 | | | |

对不同林龄时期红松半同胞家系胸径遗传变异参数进行估算与分析,结果显示(表2),参试家系胸径变异系数随林龄增长总体呈现下降趋势,表明试验林初期整体离散程度较高,后期趋于稳定。遗传变异系数在不同林龄时期存在一定波动,但变幅较小,遗传效应对性状的贡献相对稳定。表型变异系数随林龄增长逐渐降低,从0.227 9降至0.188 6。家系遗传力在林龄 18~23 a时保持稳定(0.319 至 0.322),林龄 27 a时显著下降至0.238,林龄 32 a时期回升至0.346。林龄 27 a时遗传力降低,主要受该时期环境方差增幅(7.997)超

过遗传方差(0.268)增幅的影响。导致此结果产生的主要原因在于,本次调查的试验林初植密度较大(1.5 m×2 m),随着林龄增长,过高的栽植密度导致个体间对光照、水分、养分的竞争逐步激烈,这种强烈的竞争压力增加了林分内的微环境异质性,从而导致环境方差(σ_e^2)的显著增加,这较大幅度地削弱遗传效应占比。而林龄 32 a时遗传力再次升高则表明,随林龄增长,部分个体在竞争中被淘汰,自然稀疏逐渐释放了生长空间,此时林内环境回归稳定,遗传因素对胸径性状的控制作用持续增强。

表2 红松半同胞家系胸径性状遗传参数估计
Table 2 Estimation of genetic parameters for DBH in half-sib families of Korean pine

| 林龄 Stand age/a | 胸径均值 Mean DBH/cm | 变幅 Variation range/cm | 变异系数 C_v | 遗传方差 σ_g^2 | 表型方差 σ_p^2 | 遗传变异系数 $C_{v,G}$ | 表型变异系数 $C_{v,P}$ | 家系遗传力 H^2 |
|-------------------|---------------------|--------------------------|---------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| 18 | 7.62 | 2.05~12.80 | 0.293 9 | 0.149 | 3.017 | 0.050 7 | 0.227 9 | 0.319 |
| 23 | 12.14 | 4.00~18.70 | 0.261 0 | 0.285 | 5.685 | 0.044 0 | 0.196 4 | 0.322 |
| 27 | 14.55 | 5.10~23.10 | 0.244 2 | 0.268 | 7.997 | 0.035 6 | 0.194 4 | 0.238 |
| 32 | 17.01 | 5.70~30.00 | 0.248 0 | 0.572 | 10.295 | 0.044 5 | 0.188 6 | 0.346 |

对不同林龄时期各家系胸径均值进行排序,采用Duncan法对家系间差异显著的林龄32 a胸径进行多重比较,并对家系育种值进行估算,结果显示(表3),不同林龄时期,参试家系胸径表现出一定差别,其中,774、766、851家系表现较为突出,3个家系在各林龄期均位于参试家系的前5位。多重比较结果显示,林龄32 a时,766、744家系与对照

(CK)及909、757等9个家系差异显著,平均胸径最高的766家系与近半数家系(15个家系)存在显著差异。育种值排序与各家系胸径表现基本保持一致,随林龄增长,参试家系育种值总体呈现优化趋势,正值家系数量有所增加。林龄18 a时,16个家系育种值为正值,占参试家系的47.06%;林龄32 a时正值家系占比提升,占参试家系的52.94%。

表3 红松半同胞家系胸径变异分析与育种值估算

Table 3 Coefficient of variation and breeding value in half-sib families of Korean pine

| 林龄 Stand age 18 a | | | | 林龄 Stand age 23 a | | | | 林龄 Stand age 27 a | | | | 林龄 Stand age 32 a | | | |
|----------------------|---------------------------|---------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------|--------------------------|----------------------|----------------------------|---------------|--------------------------|----------------------|----------------------------|---------------|--------------------------|
| 家系 Family | 均值 Mean/cm | 变异系数 C_v | 育种值 Breeding value | 家系 Family | 均值 Mean/cm | 变异系数 C_v | 育种值 Breeding value | 家系 Family | 均值 Mean/cm | 变异系数 C_v | 育种值 Breeding value | 家系 Family | 均值 Mean/cm | 变异系数 C_v | 育种值 Breeding value |
| 851 | 9.08±1.89 ^a | 0.208 4 | 0.465 3 | 774 | 14.42±2.66 ^a | 0.184 2 | 0.734 5 | 774 | 16.81±3.57 ^a | 0.212 6 | 0.539 2 | 766 | 20.47±5.81 ^a | 0.284 0 | 1.200 2 |
| 774 | 8.79±2.25 ^{ab} | 0.256 1 | 0.371 8 | 766 | 14.26±3.22 ^{ab} | 0.225 7 | 0.684 3 | 766 | 16.73±4.31 ^{ab} | 0.257 7 | 0.518 5 | 774 | 19.63±3.76 ^{ab} | 0.191 5 | 0.907 9 |
| 749 | 8.70±2.05 ^{abc} | 0.235 6 | 0.346 1 | 851 | 13.61±2.55 ^{abc} | 0.187 1 | 0.474 6 | 851 | 16.06±3.29 ^{abc} | 0.204 9 | 0.358 8 | 899 | 18.66±4.41 ^{abc} | 0.236 5 | 0.571 4 |
| 766 | 8.67±2.20 ^{abc} | 0.254 0 | 0.333 1 | 749 | 13.42±3.18 ^{abc} | 0.236 6 | 0.414 1 | 853 | 16.04±3.24 ^{abc} | 0.202 1 | 0.354 6 | 853 | 18.56±3.50 ^{abc} | 0.188 6 | 0.536 5 |
| 712 | 8.61±1.33 ^{abc} | 0.154 7 | 0.314 9 | 853 | 13.34±3.21 ^{abc} | 0.240 3 | 0.386 4 | 908 | 15.98±4.56 ^{abc} | 0.285 6 | 0.340 3 | 851 | 18.27±4.41 ^{abc} | 0.241 3 | 0.437 2 |
| 899 | 8.45±2.46 ^{abcd} | 0.290 6 | 0.265 0 | 899 | 13.25±3.23 ^{abcd} | 0.243 7 | 0.358 6 | 899 | 15.74±4.07 ^{abcd} | 0.258 5 | 0.283 9 | 908 | 18.06±5.24 ^{abcd} | 0.290 3 | 0.365 1 |
| 916 | 8.45±2.33 ^{abcd} | 0.275 5 | 0.264 2 | 727 | 13.22±2.60 ^{abcd} | 0.201 7 | 0.350 3 | 727 | 15.66±3.54 ^{abcd} | 0.225 9 | 0.264 9 | 986 | 18.06±4.87 ^{abcd} | 0.269 8 | 0.365 1 |
| 853 | 8.20±2.65 ^{abcd} | 0.322 6 | 0.183 3 | 944 | 12.76±3.00 ^{abcde} | 0.235 1 | 0.201 7 | 749 | 15.43±3.81 ^{abcd} | 0.247 1 | 0.208 9 | 788 | 17.80±3.76 ^{abcd} | 0.211 5 | 0.274 1 |
| 727 | 8.14±2.12 ^{abcd} | 0.260 9 | 0.165 7 | 908 | 12.50±4.35 ^{abcde} | 0.348 3 | 0.116 1 | 762 | 15.29±3.05 ^{abcd} | 0.199 2 | 0.176 9 | 762 | 17.61±4.10 ^{abcd} | 0.233 1 | 0.209 0 |
| 762 | 7.99±2.13 ^{abcd} | 0.267 0 | 0.116 1 | 916 | 12.48±2.77 ^{abcde} | 0.222 1 | 0.109 2 | 944 | 14.95±3.98 ^{abcd} | 0.266 1 | 0.094 7 | 944 | 17.54±5.11 ^{abcd} | 0.291 6 | 0.185 9 |
| 771 | 7.83±2.42 ^{abcd} | 0.308 5 | 0.067 1 | 762 | 12.35±2.82 ^{abcde} | 0.228 3 | 0.069 9 | 788 | 14.93±3.40 ^{abcd} | 0.227 7 | 0.090 9 | 727 | 17.50±4.60 ^{abcd} | 0.262 9 | 0.170 9 |
| 986 | 7.79±2.43 ^{abcd} | 0.311 5 | 0.053 0 | 712 | 12.29±2.04 ^{abcde} | 0.166 1 | 0.047 8 | 914 | 14.75±3.96 ^{abcd} | 0.268 5 | 0.048 6 | 729 | 17.38±4.35 ^{abcd} | 0.250 4 | 0.129 5 |
| 713 | 7.77±2.26 ^{abcd} | 0.290 7 | 0.046 6 | 729 | 12.26±2.94 ^{abcde} | 0.239 7 | 0.038 0 | 729 | 14.72±3.80 ^{abcd} | 0.257 9 | 0.039 8 | 749 | 17.37±5.03 ^{abcd} | 0.289 3 | 0.125 4 |
| 620 | 7.76±2.20 ^{abcd} | 0.283 5 | 0.044 2 | 717 | 12.07±2.72 ^{abcde} | 0.225 0 | -0.022 9 | 771 | 14.70±2.96 ^{abcd} | 0.201 1 | 0.036 4 | 914 | 17.36±5.33 ^{abcd} | 0.307 1 | 0.120 9 |
| 717 | 7.75±2.30 ^{abcd} | 0.296 6 | 0.040 9 | 914 | 12.06±3.57 ^{abcde} | 0.296 1 | -0.024 4 | 918 | 14.66±3.17 ^{abcd} | 0.216 5 | 0.025 4 | 712 | 17.32±3.46 ^{abcd} | 0.199 5 | 0.109 3 |
| 908 | 7.70±2.86 ^{abcd} | 0.371 6 | 0.025 4 | 713 | 12.05±2.75 ^{abcde} | 0.228 3 | -0.029 2 | 712 | 14.62±2.61 ^{abcd} | 0.178 2 | 0.016 8 | 771 | 17.21±4.88 ^{abcd} | 0.283 4 | 0.072 2 |
| 715 | 7.55±2.43 ^{abcd} | 0.321 4 | -0.023 6 | 788 | 11.92±3.28 ^{abcde} | 0.275 2 | -0.069 4 | 715 | 14.37±3.24 ^{abcd} | 0.225 7 | -0.041 8 | 715 | 17.09±3.84 ^{abcd} | 0.224 6 | 0.029 2 |
| 944 | 7.53±1.69 ^{abcd} | 0.224 0 | -0.028 4 | 909 | 11.90±3.09 ^{abcde} | 0.259 3 | -0.077 2 | 620 | 14.21±3.51 ^{abcd} | 0.246 9 | -0.081 3 | 916 | 17.02±3.08 ^{abcd} | 0.181 0 | 0.004 2 |
| CK | 7.38±2.68 ^{abcd} | 0.363 8 | -0.0761 | 877 | 11.83±2.49 ^{abcde} | 0.210 2 | -0.098 8 | 916 | 14.21±3.11 ^{abcd} | 0.219 2 | -0.081 1 | 918 | 16.91±3.36 ^{abcd} | 0.198 5 | -0.032 9 |
| 757 | 7.23±3.03 ^{abcd} | 0.419 2 | -0.125 9 | 771 | 11.80±3.82 ^{abcde} | 0.323 7 | -0.108 5 | 739 | 14.18±3.37 ^{abcd} | 0.237 5 | -0.088 4 | 717 | 16.76±3.97 ^{abcd} | 0.236 9 | -0.085 8 |
| 863 | 7.18±2.08 ^{abcd} | 0.289 8 | -0.140 8 | 986 | 11.72±4.14 ^{bcde} | 0.352 9 | -0.133 0 | 651 | 14.14±3.27 ^{abcd} | 0.231 1 | -0.096 3 | 739 | 16.66±3.98 ^{abcd} | 0.239 1 | -0.120 7 |
| 924 | 7.17±2.03 ^{abcd} | 0.283 5 | -0.143 4 | 918 | 11.71±2.67 ^{bcde} | 0.228 4 | -0.137 7 | 713 | 14.14±3.43 ^{abcd} | 0.242 9 | -0.098 5 | 713 | 16.64±3.94 ^{abcd} | 0.236 7 | -0.126 9 |
| 909 | 7.16±1.76 ^{abcd} | 0.245 8 | -0.146 7 | 739 | 11.67±3.04 ^{bcde} | 0.260 2 | -0.151 5 | 877 | 14.08±3.17 ^{abcd} | 0.225 2 | -0.113 0 | 818 | 16.63±3.15 ^{abcd} | 0.189 6 | -0.131 6 |
| 877 | 7.15±2.18 ^{abcd} | 0.304 4 | -0.152 5 | 651 | 11.66±4.10 ^{bcde} | 0.351 7 | -0.152 1 | 818 | 14.06±3.70 ^{abcd} | 0.263 2 | -0.116 6 | 620 | 16.40±3.93 ^{abcd} | 0.239 6 | -0.210 2 |
| 729 | 7.14±2.07 ^{abcd} | 0.290 6 | -0.153 4 | 767 | 11.58±2.54 ^{bcde} | 0.219 0 | -0.181 1 | 909 | 14.05±3.50 ^{abcd} | 0.248 9 | -0.118 8 | 651 | 16.21±4.02 ^{abcd} | 0.248 3 | -0.275 2 |
| 739 | 7.12±2.20 ^{abcd} | 0.309 1 | -0.161 4 | 620 | 11.57±3.59 ^{bcde} | 0.310 5 | -0.183 7 | 717 | 13.97±2.76 ^{abcd} | 0.197 3 | -0.139 1 | CK | 15.97±4.85 ^{cd} | 0.303 7 | -0.358 5 |
| 651 | 7.06±2.57 ^{bcd} | 0.363 4 | -0.179 4 | 715 | 11.52±3.75 ^{cde} | 0.325 2 | -0.199 4 | 767 | 13.79±2.95 ^{abcd} | 0.213 7 | -0.180 6 | 909 | 15.91±4.66 ^{cd} | 0.293 1 | -0.379 0 |
| 918 | 6.99±2.21 ^{bcd} | 0.316 8 | -0.200 2 | CK | 11.39±3.33 ^{cde} | 0.292 3 | -0.239 8 | 986 | 13.68±4.58 ^{abcd} | 0.334 9 | -0.207 4 | 757 | 15.68±4.55 ^{cd} | 0.290 1 | -0.458 8 |
| 767 | 6.95±2.03 ^{bcd} | 0.291 9 | -0.214 1 | 757 | 11.36±3.68 ^{cde} | 0.324 3 | -0.250 8 | 757 | 13.51±4.41 ^{bcd} | 0.326 7 | -0.247 1 | 877 | 15.65±3.85 ^{cd} | 0.246 2 | -0.468 8 |
| 788 | 6.94±2.23 ^{bcd} | 0.321 9 | -0.218 4 | 863 | 11.32±3.04 ^{cde} | 0.268 2 | -0.263 0 | CK | 13.50±3.61 ^{bcd} | 0.267 4 | -0.248 9 | 767 | 15.52±3.21 ^{cd} | 0.206 7 | -0.512 8 |
| 818 | 6.90±1.66 ^{bcd} | 0.240 7 | -0.231 1 | 818 | 11.31±2.91 ^{cde} | 0.257 0 | -0.265 4 | 863 | 13.48±3.91 ^{bcd} | 0.289 9 | -0.255 1 | 963 | 15.41±3.66 ^{cd} | 0.237 6 | -0.553 7 |
| 914 | 6.80±2.30 ^{bcd} | 0.338 7 | -0.262 4 | 760 | 11.02±3.47 ^{cde} | 0.315 1 | -0.360 0 | 963 | 13.18±3.15 ^{cd} | 0.239 1 | -0.327 2 | 863 | 15.24±4.43 ^{cd} | 0.290 9 | -0.612 6 |
| 760 | 6.74±2.27 ^{cd} | 0.336 8 | -0.279 8 | 963 | 10.58±3.11 ^{de} | 0.294 4 | -0.501 7 | 924 | 12.59±3.47 ^d | 0.275 7 | -0.466 5 | 924 | 15.13±3.82 ^{cd} | 0.252 8 | -0.648 2 |
| 963 | 6.48±2.22 ^d | 0.343 1 | -0.365 2 | 924 | 10.47±3.13 ^e | 0.299 3 | -0.536 0 | 760 | 12.49±3.86 ^d | 0.309 2 | -0.491 0 | 760 | 14.59±4.18 ^d | 0.286 8 | -0.837 9 |

注:表中均值不同字母代表家系间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters beside mean values indicated statistically significant differences ($P<0.05$).

2.2 红松半同胞家系胸径综合评价与优良家系选择

采用TOPSIS法对不同家系不同林龄时期胸径育种值进行综合评价与分析,结果显示(表4):766、774、851、899、853、749、727、908、762、712家系位列综合排名的前10名,相比其他参试家系,这些家系具有更高的遗传优势。结合各家系胸径表型值多重比较结果(表3)进行综合比较与分析,按15%入选率进行选择,选择强度为1.554,则766、

774、851、899、853号家系入选,遗传进展为0.0406。林龄32 a时,5个家系胸径平均值为19.12 cm,高出对照CK(15.97 cm)19.72%,选择群体胸径相较于参试群体(17.01 cm)可获得12.40%的现实增益及4.29%的遗传增益。5个家系的平均单株材积为0.1814 m³,高出参试家系平均单株材积(0.1363 m³)33.09%,选择增益较为显著。经过以上综合评价与筛选,最终确定766、774、851、899、853家系作为红松半同胞优良家系。

表4 红松半同胞家系不同林龄时期胸径育种值综合排名

Table 4 Comprehensive ranking of breeding values for DBH across different stand ages in half-sib families of Korean pine

| 家系 Family | 最优向量距离 D_i^+ | 最劣向量距离 D_i^- | 接近度 C_i | 排序 Rank | 家系 Family | 最优向量距离 D_i^+ | 最劣向量距离 D_i^- | 接近度 C_i | 排序 Rank |
|--------------|-------------------|-------------------|--------------|------------|--------------|-------------------|-------------------|--------------|------------|
| 766 | 0.110 3 | 1.385 9 | 0.926 3 | 1 | 713 | 0.875 5 | 0.585 8 | 0.400 9 | 18 |
| 774 | 0.136 6 | 1.359 4 | 0.908 7 | 2 | 717 | 0.880 5 | 0.580 7 | 0.397 4 | 19 |
| 851 | 0.356 2 | 1.169 3 | 0.766 5 | 3 | 715 | 0.899 9 | 0.567 8 | 0.386 9 | 20 |
| 899 | 0.404 5 | 1.051 5 | 0.722 2 | 4 | 918 | 0.943 9 | 0.543 4 | 0.365 4 | 21 |
| 853 | 0.417 4 | 1.049 0 | 0.715 4 | 5 | 620 | 0.937 1 | 0.536 2 | 0.364 0 | 22 |
| 749 | 0.521 1 | 0.997 1 | 0.656 8 | 6 | 739 | 0.981 3 | 0.480 4 | 0.328 7 | 23 |
| 727 | 0.551 1 | 0.930 2 | 0.627 9 | 7 | 909 | 1.021 2 | 0.444 7 | 0.303 3 | 24 |
| 908 | 0.612 3 | 0.886 9 | 0.591 6 | 8 | 651 | 1.024 0 | 0.439 2 | 0.300 2 | 25 |
| 762 | 0.660 3 | 0.804 9 | 0.549 3 | 9 | 877 | 1.048 9 | 0.424 8 | 0.288 2 | 26 |
| 712 | 0.693 9 | 0.816 4 | 0.540 6 | 10 | 818 | 1.055 5 | 0.422 4 | 0.285 8 | 27 |
| 944 | 0.707 1 | 0.758 2 | 0.517 4 | 11 | CK | 1.079 9 | 0.381 0 | 0.260 8 | 28 |
| 916 | 0.745 7 | 0.760 1 | 0.504 8 | 12 | 767 | 1.124 9 | 0.343 4 | 0.233 9 | 29 |
| 771 | 0.806 2 | 0.661 8 | 0.450 8 | 13 | 757 | 1.121 3 | 0.336 9 | 0.231 0 | 30 |
| 729 | 0.835 2 | 0.643 5 | 0.435 2 | 14 | 863 | 1.168 1 | 0.301 3 | 0.205 1 | 31 |
| 788 | 0.858 7 | 0.659 8 | 0.434 5 | 15 | 924 | 1.330 7 | 0.192 7 | 0.126 5 | 32 |
| 986 | 0.852 9 | 0.651 7 | 0.433 1 | 16 | 963 | 1.330 4 | 0.159 6 | 0.107 1 | 33 |
| 914 | 0.905 3 | 0.609 8 | 0.402 5 | 17 | 760 | 1.373 9 | 0.121 9 | 0.081 5 | 34 |

3 讨论

遗传变异是林木性状改良的基础,本研究结果显示:红松半同胞家系的胸径性状存在较为丰富的变异,且变异具有一定的林龄动态特性。林龄32 a时,家系间差异首次达到显著水平($P < 0.05$),而前期(林龄18~27 a)未呈现显著遗传分化,该结果反映出红松胸径的遗传效应随林龄增长而逐步显现的特点。这一现象与王云鹏等^[27]对木荷(*Schima superba*)优树自由授粉家系早期生长性状遗传变异动态规律的研究、刘青华^[28]对马尾松(*Pinus massoniana*)生长与材性的遗传变异、基因作用方式及环境影响进行的研究所得结论相

似,以上研究认为林木径生长的变异具有较明显的年龄依赖性,且遗传调控随林龄的增长而增强。分析该结果产生的原因,可能是此次试验林初植密度较大,前期(<20 a)红松半同胞家系生长主要受环境筛选压力主导,随着林分郁闭度提高(23~27 a),竞争胁迫导致遗传潜力差异被环境效应掩盖(遗传力降至0.238);而后期(>30 a)林分完成自然稀疏后,遗传方差占比回升(遗传力0.346),表明遗传调控在生长观测后期占据主导地位。这一点在本研究其他遗传参数的变化趋势中亦有显现,胸径表型变异系数随林龄增长从0.2279降至0.1886,遗传变异系数窄幅波动后呈回升趋势,该结果反映出环境效应对表型变异的影响随林分结

构稳定而减弱,遗传效应对性状表达的影响力逐渐凸显。这与张振等^[29]对红松半同胞家系生产力年度变异与家系选择的研究、王璧莹等^[30]依据生长性状对红松半同胞家系进行的评价与选择所得结论相近。此结果对红松胸径遗传改良的育种实践具有一定的指导意义,传统基于幼龄期(<20 a)胸径表型的选择可能低估遗传潜力,需结合中后期数据优化选择策略,不宜过早进行优良群体选择。在林龄18~23 a时期遗传力稳定(0.319~0.322),但家系差异不显著($P>0.05$),此阶段宜作为扩繁群体初筛期,而非决选节点。27 a时出现的遗传力低谷提示,此阶段需加强环境调控(如疏伐),试验林的密度应能保证林木在选择评估期内有足够的生长空间以保障遗传表达。

林木育种试验林作为具有特殊试验用途的林木种,合理的密度控制是确保获得精准遗传参数、筛选优良遗传资源的关键前提。如因场地或成本限制需设置较高的初植密度,后续管理过程中,应根据林木生长情况制定明确的疏伐计划。当密度过大时,林木的生长潜力受限于资源总量而非其固有的遗传优势,不同基因型之间的表型差异易被竞争压力所掩盖,导致即使遗传上优良的基因型,也可能因为被长期压制而无法充分展现其生长潜力。参试家系中,986家系的表现值得关注,其不同林龄时期胸径排名变化侧面反映出环境压力对遗传表达的影响,此家系在林龄18、23、27 a时排名分别在12、21、28位,而在林龄32 a时,随着林分自然稀疏后环境逐步稳定,观测后期排名升至第7位。尽管此家系后5 a生长迅速,但考虑整体生长表现的稳定性,故此次暂不作为优良家系入选,具体生长潜力有待持续观察以进行综合评价。

育种值是基因中能够稳定传递给子代的加性遗传效应的总和,其估计值代表遗传价值相对于群体均值的高低,可反映参试家系在不同生长阶段的遗传表现和潜力,对育种选择的具体决策具有直接指导作用^[31-32]。相较于单一林龄选择,本研究通过连续4个林龄的育种值追踪,对红松胸径遗传优势的动态表达特征进行分析,避免了单点选择可能高估短期优势基因型的弊端,减少了传统表型值排序易受年度环境波动干扰的影响。值得注意的是,林龄27 a时遗传力的短暂下降并未显著影响参试家系的育种值综合排序,这可能与本研究采用的TOPSIS法整合多时间点数据的抗干

扰能力有关,该方法通过加权不同生长阶段的遗传贡献,可有效降低环境波动对选择结果的影响,使选择兼顾较长发育周期的遗传表现,避免了单一年度评价的时效性偏差。

4 结论

红松胸径遗传改良需建立在对多林龄表型数据的系统性解析基础上,长期观测不仅是分析遗传规律的必要手段,更是实现红松可持续遗传改良的科学基石。本研究表明,红松胸径遗传效应的显著性和稳定性随林龄增长而增强,基于TOPSIS法的多期育种值综合评价可有效提升选择的准确性。筛选出的766、774等优良家系展现出持续速生特性,在材积增益(33.09%)和遗传稳定性方面表现突出,其应用将有效缩短大径材培育周期,为红松高世代育种提供核心种质资源。

参 考 文 献

- [1] 李爽. 红松人工林多目标经营模型[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2025.
LI S. Management models for multi-objectives of Korean pine plantations[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2025.
- [2] 杨文, 陈立新, 段文标, 等. 红松人工林立地质量评价及生长收获效益[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(6): 102-111.
YANG W, CHEN L X, DUAN W B, *et al.* Site quality evaluation and growth harvest benefit of *Pinus koraiensis* plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(6): 102-111.
- [3] 刘云天. 辽东山区红松人工林单木干形及材积模型研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024.
LIU Y T. Study on the stem shape and volume model of planted Korean pine in eastern Liaoning Province [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2024.
- [4] 潘凤刚, 孙佰飞, 张含国, 等. 红松自由授粉子代测定及优良家系选择[J]. 林业科技, 2023, 48(5): 1-5.
PAN F G, SUN B F, ZHANG H G, *et al.* Determination of free-pollinated progeny of *Pinus koraiensis* and selection of excellent families[J]. Forestry Science & Technology, 2023, 48(5): 1-5.
- [5] 谷加存, 楚旭, 王政权. 水曲柳人工林直径生长与培育技术[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(9): 7-9, 57.
GU J C, CHU X, WANG Z Q. Diameter growth of *Fraxinus mandshurica* and its relation to silviculture techniques[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(9):

- 7-9,57.
- [6] 任雲雲,李雪,崔自杰,等.中国大径材人工林培育研究进展[J].世界林业研究,2024,37(3):86-93.
REN Y Y, LI X, CUI Z J, *et al.* Research progress in cultivation of large-diameter timber plantation in China [J]. World Forestry Research, 2024, 37(3):86-93.
- [7] 王雪来,刘晓婷,王力冉,等.生长和木材性状耦合评价红松半同胞家系[J].植物研究,2024,44(4):554-564.
WANG X L, LIU X T, WANG L R, *et al.* Coupling evaluation of growth and wood properties of *Pinus koraiensis* half-sib families[J]. Bulletin of Botanical Research, 2024, 44(4):554-564.
- [8] 魏嘉彤,陈思琪,芦贤博,等.基于生长与木材性状的红松优良种源评价选择[J].北京林业大学学报,2022,44(3):12-23.
WEI J T, CHEN S Q, LU X B, *et al.* Evaluation and selection of excellent provenances of *Pinus koraiensis* based on growth and wood properties[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(3):12-23.
- [9] 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.
- [10] 孙佰飞.红松自由授粉家系生长变异分析及优良家系选择研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2023.
SUN B F. Analysis of growth variation and selection of excellent families of Korean pine in open pollination [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023.
- [11] 贾庆彬,张含国,张磊,等.杂种落叶松家系变异分析与优良家系选择[J].东北林业大学学报,2016,44(4):1-7.
JIA Q B, ZHANG H G, ZHANG L, *et al.* Variation analysis of hybrid larch families and superior families selection [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(4):1-7.
- [12] 尚福强,马晓雨,高源,等.38年生红松优树半同胞子代遗传变异与优良家系选择[J].中南林业科技大学学报,2025,45(3):20-27.
SHANG F Q, MA X Y, GAO Y, *et al.* Genetic variation and superior family selection of half-sib progeny of 38-year-old *Pinus koraiensis* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025, 45(3):20-27.
- [13] 王雪来.基于谱系重建的红松优良家系选择研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2024.
WANG X L. Selection of superior families of *Pinus koraiensis* base on pedigree reconstruction [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024.
- [14] 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.
- [15] 杨瑞轲,金星姬, TIMO P, 等.基于林分生长和径阶分配模型系统的红松人工林经营优化[J].南京林业大学学报(自然科学版),2025,49(4):117-127.
YANG R K, JIN X J, TIMO P, *et al.* Stand-level growth model system with diameter class disaggregation for optimizing the management of Korean pine plantation [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2025, 49(4):117-127.
- [16] 马颢铜.不同树龄红松径向生长的变化规律及主要影响因素[D].哈尔滨:东北林业大学,2024.
MA H T. Changes and impact factors to radial growth of *Pinus koraiensis* with different tree ages [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024.
- [17] 邓厚银,胡德活,林军,等.杉木半同胞子代胸径变异和大径材家系选择[J].热带亚热带植物学报,2020,28(5):513-519.
DENG H Y, HU D H, LIN J, *et al.* Diameter variation of Chinese fir half-sib progenies and selection for large-size timber families [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2020, 28(5):513-519.
- [18] 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.
- [19] 尚福强,王云鹏,马晓雨,等.红松全同胞家系生长性状遗传变异规律及选择[J].西部林业科学,2025,54(1):37-43.
SHANG F Q, WANG Y P, MA X Y, *et al.* Genetic variation and selection of growth traits of full-sib families of *Pinus koraiensis* [J]. Journal of West China Forestry Science, 2025, 54(1):37-43.
- [20] 范迎新,贾炜玮,李凤日,等.帽儿山不同种源人工红松的生长差异性[J].应用生态学报,2024,35(7):1735-1743.
FAN Y X, JIA W W, LI F R, *et al.* Growth difference of planted *Pinus koraiensis* from different provenances in

- Maoer Mountain, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(7): 1735-1743.
- [21] 孙凡, 马彦广, 刘占民, 等. 油松高世代种子园亲本选择策略研究[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(4): 28-39.
SUN F, MA Y G, LIU Z M, *et al.* Parental selection strategies of high generation seed orchard of *Pinus tabulaeformis* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(4): 28-39.
- [22] 袁志发, 常智杰, 郭满才, 等. 数量性状遗传分析[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
YUAN Z F, CHANG Z J, GUO M C, *et al.* Genetic analysis of quantitative traits [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [23] 林元震, 陈晓阳. R 与 ASReml-R 统计分析教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014.
LIN Y Z, CHEN X Y. R & ASReml-R statistical analysis tutorial [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2014.
- [24] 欧阳天林, 朱柯帆, 邱建勋, 等. 木荷种子园自由授粉家系生长遗传变异及初选[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(9): 17-23.
OUYANG T L, ZHU K F, QIU J X, *et al.* Genetic variation and selection of the free-pollinated families in *Schima superba* seed orchard [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(9): 17-23.
- [25] 杨震, 尹娟, 杨莹攀, 等. 植物营养素施加对滴灌玉米生长、品质和水分利用效率的影响及其综合评价[J]. 节水灌溉, 2024(5): 80-87.
YANG Z, YIN J, YANG Y P, *et al.* Effect of plant nutrients on growth, quality and yield of drip-irrigated maize in saline soil and its comprehensive evaluation [J]. Water Saving Irrigation, 2024(5): 80-87.
- [26] 吉林省林业厅. 吉林省林业厅关于下发使用立木材积表和出材率表的通知(吉林资(2015)524号)[A/OL]. (2015-12-09) [2025-06-25]. http://jllc.jl.gov.cn/zsdw/blhgjzrbhq/xh_xxgk_75247/xxgk_zcxx/201606/t20160617_3033525.html.
Jilin Provincial Forestry Department. Notice of Jilin Provincial Forestry Department on issuing the volume table and outturn rate table for standing trees (Jilin (2015) No.524) [A/OL]. (2015-12-09) [2025-06-25]. http://jllc.jl.gov.cn/zsdw/blhgjzrbhq/xh_xxgk_75247/xxgk_zcxx/201606/t20160617_3033525.html.
- [27] 王云鹏, 张蕊, 周志春, 等. 木荷优树自由授粉家系早期生长性状遗传变异动态规律[J]. 林业科学, 2020, 56(9): 77-86.
WANG Y P, ZHANG R, ZHOU Z C, *et al.* Dynamic patterns of genetic variation in early growth traits of the open-pollinated families of *Schima superba* plus tree [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(9): 77-86.
- [28] 刘青华. 马尾松生长与材性的遗传变异、基因作用方式及环境影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
LIU Q H. Genetic variation, gene control pattern and environment effect of growth and wood property in *Pinus massoniana* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [29] 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.
- [30] 王璧莹, 赵曦阳, 王洪武, 等. 依据生长性状对红松半同胞家系的评价选择[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(4): 8-11.
WANG B Y, ZHAO X Y, WANG H W, *et al.* Variance analysis of growth characteristics of 30 *Pinus koraiensis* half-sib families [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(4): 8-11.
- [31] 王润辉, 韦如萍, 晏姝, 等. 福建杉木家系在广东的多地点生长变异和筛选[J]. 热带亚热带植物学报, 2025, 33(3): 253-260.
WANG R H, WEI R P, YAN S, *et al.* Multi-site growth variation and selection of Fujian's Chinese fir families in Guangdong [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2025, 33(3): 253-260.
- [32] 陈兴彬, 刘武阳, 朱柯帆, 等. 信丰杉木第3代种子园自由授粉家系遗传变异及早期选择研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2025, 45(3): 1-6.
CHEN X B, LIU W Y, ZHU K F, *et al.* Genetic variation and early selection of growth traits in open-pollinated progeny of the third generation *Cunninghamia lanceolata* seed orchard in Xinfeng [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2025, 45(3): 1-6.