北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

油松高世代种子园亲本选择策略研究

孙凡 马彦广 刘占民 杨博宁 王辉丽 李伟

Parental selection strategies of high generation seed orchard of *Pinus tabuliformis*

Sun Fan, Ma Yanguang, Liu Zhanmin, Yang Boning, Wang Huili, Li Wei

引用本文:
孙凡, 马彦广, 刘占民, 杨博宁, 王辉丽, 李伟. 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. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230138
Sun Fan, Ma Yanguang, Liu Zhanmin, Yang Boning, Wang Huili, Li Wei. Parental selection strategies of high generation seed orchard of *Pinus tabuliformis*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(4):28–39. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230138

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230138

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于BWB的油松初级种子园混合子代优树选择与配置设计
BWB–assisted plus tree selection and deployment design for bulked progenies of the first–cycle Chinese pine seed orchard
北京林业大学学报, 2017, 39(11): 28–34. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160330

白桦全同胞子代测定及优良家系早期选择
Full–sib progeny test and early selection in superior families of *Betula platyphylla*
北京林业大学学报, 2017, 39(2): 1–8. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160138

不同世代樟子松育种资源遗传评价
Genetic evaluation of breeding resources of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* from different improved generations
北京林业大学学报, 2017, 39(12): 71–78. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170194

截冠处理对种子园樟子松壮龄母树结实的影响
Effects of top pruning on seed setting of aged mother trees in orchard of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*
北京林业大学学报, 2019, 41(8): 48–56. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190178

红松优树无性系及其子代的生长评价与选择研究
Growth evaluation and selection study of elite clones and its offspring families in *Pinus koraiensis*
北京林业大学学报, 2021, 43(10): 38–46. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210080

青海云杉半同胞家系子代测定与亲本评价
Half–sib progeny test and evaluation of parents of *Picea crassifolia*
北京林业大学学报, 2021, 43(4): 17–24. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200370

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230138

油松高世代种子园亲本选择策略研究

孙 凡[1] 马彦广[2] 刘占民[3] 杨博宁[1] 王辉丽[1] 李 伟[1]
（1. 北京林业大学生物科学与技术学院，林木遗传育种全国实验室，林木育种与生态修复国家工程研究中心，北京 100083；
2. 山西省吕梁山国有林管理局油松种子园，山西 临汾 041300；3. 平泉市国有七沟林场，河北 承德 067509）

摘要:【目的】通过油松高世代种子园建园亲本 2 种选择策略的对比与评价，为高世代高产稳产油松建园亲本选择策略的确定提供科学依据。**【方法】**以山西省隰县上庄油松初级种子园自由授粉子代测定林为基本群体，对 42 个油松半同胞家系的生长性状进行遗传变异分析，采用配合选择策略和最优单株直接选择策略筛选油松第二代种子园建园亲本，对比分析两种选择策略下，筛选出的优良单株的各性状平均生长量和平均预期遗传增益。**【结果】**油松半同胞家系间和家系内胸径、树高和材积生长均达到了极显著差异水平（$P < 0.01$），配合选择策略与最优单株直接选择策略分别选出 30 个优良单株，其中有 19 个相同、11 个不同。最优单株直接选择策略所筛选的 11 个特有优良单株的平均胸径、树高和材积生长量分别高出配合选择策略所筛选的 11 个特有优良单株 7.72%、18.56% 和 31.01%，所筛选的 30 个优良单株的平均胸径、树高和材积的预期遗传增益比配合选择策略筛选的 30 个优良单株分别增加了 15.52%、121.78% 和 29.38%。与每一优良家系入选 1 个优良单株的配合选择策略不同，最优单株直接选择策略筛选出的 30 个优良单株中，有 29 个优良单株分属于 19 个优良家系，另外 1 个优良单株（D12）属于非优良家系。**【结论】**配合选择策略会导致部分优良单株资源损失，最优单株直接选择策略更适合用于油松高世代种子园亲本材料的筛选。

关键词：油松；高世代种子园亲本；配合选择；优良单株选择
中图分类号：S722.5 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)04−0028−12
引文格式：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 Fan, Ma Yanguang, Liu Zhanmin, et al. Parental selection strategies of high generation seed orchard of *Pinus tabuliformis*［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(4): 28−39.

Parental selection strategies of high generation seed orchard of *Pinus tabuliformis*

Sun Fan[1] Ma Yanguang[2] Liu Zhanmin[3] Yang Boning[1] Wang Huili[1] Li Wei[1]
(1. School of Biological Sciences and Biotechnology, National Laboratory of Forest Genetic Breeding, National Engineering Research Center of Forest Breeding and Ecological Restoration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. National Forestry Bureau in Lüliang Mountain *Pinus tabuliformis* Seed Orchard, Linfen 041300, Shanxi, China;
3. Pingquan State-owned Qigou Forest Farm, Chengde 067509, Hebei, China)

Abstract: ［**Objective**］ Through the comparison and evaluation of two parental selection strategies in advanced generation seed orchard of *Pinus tabuliformis*, it provides a scientific basis for the parental selection strategy of advanced generation high-yield and stable-yield of *P. tabuliformis*. ［**Method**］ Selecting the open-pollinated progeny test forest of the first-generation seed orchard of *P. tabuliformis* in Shangzhuang, Xi County, Shanxi Province of northern China, as the base population. The genetic variation of growth traits in 42 half-sib families of *P. tabuliformis* was analyzed, the parents of the second generation

收稿日期: 2023−06−07 **修回日期:** 2023−08−21
基金项目: 国家重点研发计划课题（2022YFD2200304）。
第一作者: 孙凡。主要研究方向：针叶树遗传改良。Email: 15662093071@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学生物科学与技术学院。
责任作者: 李伟，博士，教授。主要研究方向：针叶树遗传改良。Email: bjfuliwei@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

seed orchard of *P. tabuliformis* were selected by the combined selection strategy and the direct selection strategy of optimal individual, the average growth and average expected genetic gain of each trait of the superior individuals screened by the two selection strategies were compared and analyzed. [**Result**] There were significant differences ($P < 0.01$) in DBH, tree height and volume growth among and within half-sib families of *P. tabuliformis*. The combined selection strategy and the direct selection strategy of optimal individual separately screened 30 superior individuals, of which 19 were identical and 11 were different. The average DBH, tree height and volume growth of 11 unique superior individuals screened by the direct selection strategy of optimal individual were 7.72%, 18.56% and 31.01% higher than that of the combined selection strategy, respectively, and the average DBH, tree height and volume expected genetic gain of 30 superior individuals screened by the direct selection strategy of optimal individual were 15.52%, 121.78% and 29.38% higher than that of the combined selection strategy, respectively. Different from the combined selection strategy of selecting one superior individual for each elite family, among the 30 superior individuals selected by the direct selection strategy of optimal individual, 29 superior individuals belonged to 19 elite families, and 1 superior individual (D12) belonged to the non-elite family. [**Conclusion**] The combined selection strategy will lead to the loss of some superior individual resources, and the direct selection strategy of optimal individual is more suitable for screening the parental materials of advanced generation seed orchard of *P. tabuliformis*.

Key words: *Pinus tabuliformis*; parents of high generation seed orchard; combined selection; selection of superior individuals

油松（*Pinus tabuliformis*）为我国北方地区特有的乡土针叶树种[1]，广泛分布于山西、河北、河南、辽宁、内蒙古、甘肃等省区[2]，在三北地区大规模国土绿化、脆弱生态系统保护与修复、国家储备林、森林碳汇等国家重大战略过程中发挥重要作用[3]。当前，油松的遗传改良层次普遍较低，正处于初级种子园向高世代种子园的过渡阶段。油松高世代基本群体以种子园半同胞子代林为主，少部分是全同胞子代林，普遍存在参与控制授粉的亲本数量偏少、家系间和家系内单株间遗传变异巨大等问题，需要开展针对油松高世代基本群体特点的亲本选择策略研究。

近年来，配合选择策略已广泛应用于红松（*Pinus koraiensis*）[4]、青海云杉（*Picea crassifolia*）[5]、马尾松（*Pinus massoniana*）[6]、日本落叶松（*Larix kaempferi*）[7]、白桦（*Betula platyphylla*）[8]和枫香（*Liquidambar formosana*）[9]等树种高世代种子园建园亲本选择过程中，最优单株直接选择策略在油松[10]和柏木（*Cupressus funebris*）[11]中也逐渐得到应用。在树种多世代改良中采用配合选择策略，可以延缓近交率发展过快，使高世代种子园种子产量和品质稳固提高[12]。然而，配合选择策略忽略了被淘汰家系中存在遗传品质更优单株资源等情况，造成了大量优良育种资源的损失，从而弱化了油松高世代遗传改良中亲本选择的预期效果。最优单株直接选择策略可以有效避免遗传品质优良单株资源的损失，但单株间存在近交的可能，需要借助分子标记技术鉴别单株间的亲缘关系。

目前，油松第二代种子园建园亲本的选择多采用配合选择策略。袁虎威等[12]在油松初级种子园优树自由授粉子代测定林内，以家系平均材积优势比为指标，选出了 20 个优良家系，并配合单株材积优势比的相对大小选出了 20 个优良单株，材积遗传增益平均值为 0.13%。王建伟[13]采用多性状育种值评选法和综合指数法，从桥山双龙 112 个油松半同胞家系中筛选出 16 个优良家系，并从中配合选择筛选出 70 个优良单株。杨培华等[14]对 142 个油松优树进行半同胞子代测定之后，利用独立淘汰水平法根据数量标准选出了 36 个优良家系，然后从中选出了 263 个优良单株，子代材积增益十分显著。然而，依据 2017 年袁虎威等[10]提出的“油松高育种周期优良种质资源可来源于大规模种子园自由授粉子代人工林中的优良单株”的新思路，可知有必要开展油松高世代种子园建园亲本选择策略的对比分析研究，进一步提高亲本选择效率和选择效果。

本文以上庄油松初级种子园自由授粉子代测定林为基本群体，选用测定林内 42 个油松半同胞家系的生长性状调查数据，对半同胞家系生长性状进行遗传变异分析、遗传参数估算和相关性分析，在此基础上分别采用配合选择策略和最优单株直接选择策略来筛选油松第二代种子园建园亲本，并对比分析二者选择效果，旨在为油松高改良世代亲本的评价选择提供参考依据，加速油松育种改良的换代升级。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验材料

试验地位于山西省隰县上庄油松良种基地(111°12′E, 36°45′N), 地处吕梁山脉南端, 紫荆山东麓, 海拔 1 570 ~ 1 930 m, 年均气温 8 ℃, 年无霜期 120 ~ 140 d, 极端最高气温 32 ℃, 极端最低气温 −21.5 ℃, 最深冻土层 0.91 m, 年降雨量 580 ~ 810 mm, 土壤为山地棕壤, 地形为石质山。供试材料为 1984 年营建的油松第二世代半同胞子代测定林, 种子来源为该良种基地油松初级种子园优良无性系自由授粉种子。试验林采用完全随机区组试验设计, 4 次重复, 每重复小区数 45 个, 包含 45 个家系(表 1), 其中 3 个对照家系 PT43(CK0)、PT40(CK1)和 PT44(CK2)为当地油松天然林分优树子代, 每个小区 5 株, 单株编号 1 ~ 5, 共 900 株, 株行距为 2 m × 2 m 结合 4 m × 2 m, 试验地内管理措施和坡度、坡向等立地条件基本一致。试验林内家系 PT5、PT34 和 PT45 缺失, 对照家系 PT40 缺失 5 株、PT43 缺失 1 株、PT44 缺失 8 株, 剩余家系各缺失 1 ~ 2 株, 选择对照家系 PT43 作为唯一对照。本研究将以半同胞子代测定林为油松第二世代基本群体。

表 1 45 个油松半同胞家系编号和对应亲本无性系

Tab. 1 No. and corresponding parental clones from 45 half-sib families of *P. tabuliformis*

家系号 Family No.	对应亲本无性系 Corresponding parental clone	家系号 Family No.	对应亲本无性系 Corresponding parental clone	家系号 Family No.	对应亲本无性系 Corresponding parental clone
PT1	复1	PT16	关53	PT31	关38
PT2	关24	PT17	初25	PT32	初2
PT3	关14	PT18	关22	PT33	关3
PT4	关4	PT19	复8	PT34	初18
PT5	关44	PT20	复13	PT35	复11
PT6	关28	PT21	关50	PT36	复18
PT7	复12	PT22	关23	PT37	关55
PT8	关6	PT23	关35	PT38	关51
PT9	关1	PT24	关46	PT39	关26
PT10	关17	PT25	关42	PT40	CK1
PT11	关8	PT26	关7	PT41	关11
PT12	复9	PT27	初4	PT42	关5
PT13	关2	PT28	关37	PT43	CK0
PT14	关56	PT29	关29	PT44	CK2
PT15	关9	PT30	关58	PT45	复17

1.2 数据调查与分析方法

2018 年 4 月对试验林 42 个家系(家系 PT5、PT34 和 PT45 缺失)的生长性状进行调查, 测量统计了 781 个单株的胸径和树高。单株材积计算利用

$$V = 0.357\,8 \times \pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 (H+3) \tag{1}$$

式中: V 代表单株材积(m^3), D 代表胸径(cm), H 代表树高(m)[15]。

利用 SPSS 23.0、Excel 2019 统计软件进行 42 个家系胸径、树高、材积性状的方差分析、相关性分析和遗传参数的估算。

各性状单点方差分析的线性模型[16−17]为

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + F_j + BF_{ij} + e_{ijk} \tag{2}$$

式中: Y_{ijk} 代表第 i 区组第 j 家系第 k 单株的观测值, μ 为群体平均值, B_i 代表区组效应, F_j 代表家系效应, BF_{ij} 代表第 i 区组和第 j 家系互作效应, e_{ijk} 代表机误。

家系遗传力(h_F^2)为

$$h_F^2 = \frac{\sigma_F^2}{\frac{\sigma_E^2}{NB} + \frac{\sigma_{FB}^2}{B} + \sigma_F^2} \tag{3}$$

单株遗传力(h^2)为

$$h^2 = \frac{4\sigma_F^2}{\sigma_E^2 + \sigma_{FB}^2 + \sigma_F^2} \tag{4}$$

式中: σ_F^2为家系遗传方差, σ_{FB}^2为家系和区组互作方差, σ_E^2为机误, B 为区组数, N 为小区内单株数[16,18]。

表型变异系数(PCV)为

$$PCV = \frac{\sigma_P}{\overline{X}} \times 100\% \tag{5}$$

遗传变异系数(GCV)为

$$GCV = \frac{\sigma_g}{\overline{X}} \times 100\% \quad (6)$$

式中：σ_P为性状表型标准差，σ_g为性状遗传标准差，$\overline{X}$为性状群体总平均值[19–20]。

一般配合力（GCA）为

$$GCA = X_i - X.. \quad (7)$$

式中：X_i 为家系性状生长量，$X..$为该性状总平均值[21]。

表型相关系数（$r_{P_{xy}}$）为

$$r_{P_{xy}} = \frac{cov(P_{xy})}{\sigma_{P_x}\sigma_{P_y}} \quad (8)$$

遗传相关系数（$r_{g_{xy}}$）为

$$r_{g_{xy}} = \frac{cov(g_{xy})}{\sigma_{g_x}\sigma_{g_y}} \quad (9)$$

式中：$cov(P_{xy})$为性状 x 与性状 y 的表型协方差，$cov(g_{xy})$为性状 x 与性状 y 的遗传协方差；σ_{P_x}和σ_{P_y}分别为性状 x 和性状 y 的表型标准差；σ_{g_x}和σ_{g_y}分别为性状 x 和性状 y 的遗传标准差[22]。

利用布雷金多性状综合评价法[23]对家系与单株进行综合评定，具体公式为

$$Q_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \frac{x_{ij}}{x_{j\max}}} \quad (10)$$

式中：Q_i为综合评价值，x_{ij} 为某一性状的平均值，$x_{j\max}$ 为某一性状的最大值，n 为评价性状的数量。

家系现实遗传增益（G）为

$$G = \frac{x - X}{X} \times 100\% \quad (11)$$

式中：x 为入选家系性状生长量，X 为对照家系性状生长量。

家系预期遗传增益（ΔG_F）[24–25]为

$$\Delta G_F = \frac{(x - \overline{X})h_F^2}{\overline{X}} \times 100\% \quad (12)$$

单株预期遗传增益（ΔG）为

$$\Delta G = \frac{(x_i - \overline{X})h^2}{\overline{X}} \times 100\% \quad (13)$$

式中：x_i 为单株性状表型值[12]。

2　结果与分析

2.1　油松半同胞家系各性状遗传变异分析

对测定林内 42 个油松半同胞家系的胸径、树高和材积作方差分析发现，胸径、树高和材积在半同胞家系间和家系内均呈极显著差异（$P < 0.01$，表 2）。

由图 1 可知：42 个家系中胸径、树高和材积大于对照（PT43）的分别占 83.33%、95.24% 和 85.71%，并且有 34 个家系各性状生长量均超过对照。胸径、树高和材积最大值家系分别为 PT1、PT7 和 PT1，最小值家系分别为 PT29、PT13 和 PT29，各性状最大值依次为最小值的 1.9 倍、1.5 倍和 3.3 倍。

由表 2 可知：生长性状家系遗传力变化范围为

表 2　42 个油松半同胞家系生长性状方差分析与遗传力估算

Tab. 2　Variance analysis and heritability estimation of growth traits from 42 half-sib families of *P. tabuliformis*

生长性状 Growth trait	区组方差 Block variance	家系间方差 Family variance	家系内方差 Within-family variance	家系遗传力 Family heretability	单株遗传力 Individual-tree narrow heretability
胸径 DBH	1.647	2.082**	2.009**	0.035	0.012
树高 Tree height	5.291**	3.264**	2.220**	0.320	0.161
材积 Volume	2.102	2.381**	1.978**	0.169	0.066

注：**表示差异极显著（$P < 0.01$）。Note: ** represents extremely significant difference at 0.01 level.

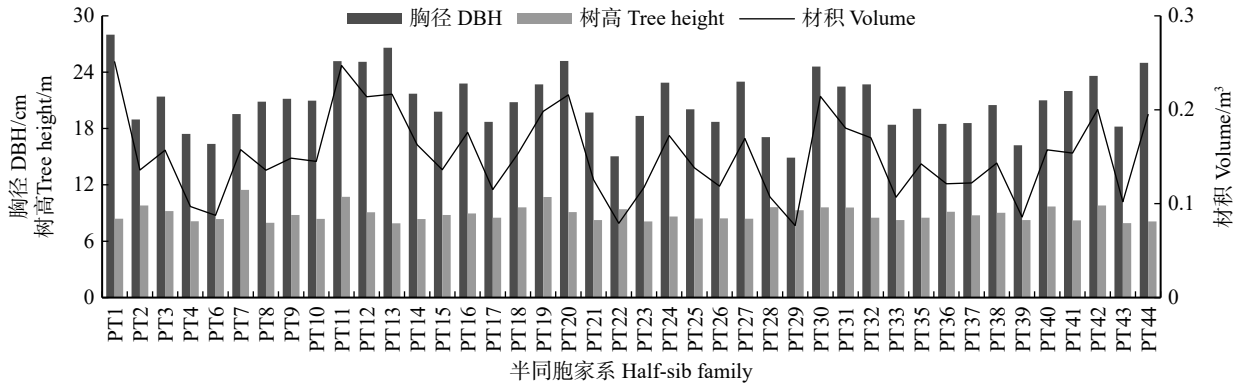


图 1　油松 42 个半同胞家系各性状生长量

Fig. 1　Growth of each trait from 42 half-sib families of *P. tabuliformis*

0.035 ~ 0.320，其中树高家系遗传力最高，材积次之，胸径最低；单株遗传力变化范围为 0.012 ~ 0.161，其中树高单株遗传力最高，材积次之，胸径最低。这表明树高受遗传因素调控的强度较高，而材积和胸径受到较弱的遗传因素调控。

油松半同胞家系生长性状均值和变异系数见表 3。胸径、树高和材积平均值分别为 19.89 cm、8.83 m 和 0.138 1 m^3，变异幅度分别为 11.00 ~ 29.00 cm、7.00 ~ 11.60 m 和 0.037 0 ~ 0.311 8 m^3。油松半同胞家系间材积的遗传变异系数(0.724 1)与表型变异系数(16.075 3)分别高出胸径的遗传变异系数(0.15)与表型变异系数(7.44)3.83 倍和 1.16 倍，高出树高的遗传变异系数(0.34)与表型变异系数(4.17)1.13 倍和 2.84 倍，反映了材积性状变异受环境因素的影响程度相对较高。各性状表型变异系数总体均值为 9.23%。

表 3 42 个油松半同胞家系生长性状均值与变异系数

Tab. 3 Variation coefficients and mean values of growth traits from 42 half-sib families of *P. tabuliformis*

指标 Index	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	材积 Volume/m^3
均值 Mean value	19.89	8.83	0.138 1
变异幅度 Variation range	11.00 ~ 29.00	7.00 ~ 11.60	0.037 0 ~ 0.311 8
遗传标准差 Genetic standard deviation	0.03	0.03	0.001 0
表型标准差 Phenotypic standard deviation	1.48	0.37	0.022 2
遗传变异系数 Coefficient of genetic variation (GCV)/%	0.15	0.34	0.724 1
表型变异系数 Coefficient of phenotypic variation (PCV)/%	7.44	4.17	16.075 3

2.2 油松半同胞家系各生长性状的一般配合力

配合力是在有性繁殖过程中，为获得遗传型更好的子代而提出。一般配合力能反映亲本加性基因的效应，是种子园亲本选择的依据之一[26−27]。42 个油松半同胞家系生长性状一般配合力及排序见表 4。就胸径而言，一般配合力范围为−4.992 ~ 8.108，家系 PT1、PT13、PT20、PT11、PT12、PT44、PT30、PT42、PT27 和 PT24 一般配合力较高，位居前 10；就树高而言，一般配合力范围为−0.933 ~ 2.634，家系 PT7、PT11、PT19、PT2、PT42、PT40、PT28、PT18、PT30 和 PT31 一般配合力较高，位居前 10；就材积而言，一般配合力范围为−0.061 ~ 0.113，家系 PT1、PT11、PT13、PT20、PT30、PT12、PT42、PT19、PT44 和 PT31 一般配合力较高，位居前 10。总体而言，家系 PT1、PT12、PT13、PT20 和 PT44 的胸径和材积一般配合力均较高，家系 PT11、PT30 和 PT42 的胸径、树高和材积一般配合力均较高。

2.3 油松半同胞家系生长性状相关性分析

42 个油松半同胞家系生长性状遗传、表型相关分析结果见表 5，3 个生长性状间在遗传与表型水平上均呈极显著正相关关系。不同生长性状之间的相关性强度存在一定差异，材积与胸径和树高间的遗传相关系数分别为 0.986($P < 0.01$)和 0.785($P < 0.01$)，树高与胸径间的遗传相关系数为 0.828($P < 0.01$)，表明材积与胸径的遗传相关性最强。同理，材积与胸径间的表型相关性最强，表型相关系数为 0.979($P < 0.01$)。

2.4 油松第二代种子园亲本选择策略的对比分析

配合选择策略包括优良家系选择与优良单株选择 2 个环节。在初级种子园优良无性系自由授粉子代测定林内，首先，基于 42 个油松半同胞家系间各生长性状均存在极显著的差异，以胸径和树高为指标对家系进行综合评定，并以各家系 Q_i 值高于对照家系 PT43(1.158)为选择标准，筛选出 30 个优良家系(表 6)，入选率为 71.43%。与对照家系 PT43 相比，入选家系的胸径、树高和材积的现实遗传增益变动范围分别为−6.18% ~ 53.85%、−0.42% ~ 44.54% 和 5.06% ~ 146.25%，平均胸径、树高和材积现实遗传增益依次为 20.24%、14.16% 和 63.82%。与选择群体相比，入选家系的胸径、树高和材积的预期遗传增益变动范围分别为−0.50% ~ 1.43%、−3.38% ~ 9.54% 和−3.79% ~ 13.83%，平均胸径、树高和材积的预期遗传增益依次为 0.35%、0.81% 和 3.54%。然后根据单株 Q_i 值的相对大小，于每一优良家系中选择一个最优单株，共筛选出 30 个优良单株。入选 30 个优良单株按照 Q_i 值的相对大小分别命名为 JD1，JD2，…，JD30，具体信息如表 7 所示。

最优单株直接选择策略仅包括优良单株选择一个环节。为保证最优单株直接选择策略与配合选择策略之间具有可比性，在初级种子园优良无性系自由授粉子代测定林内，根据单株 Q_i 值的相对大小，筛选出 30 个优良单株。入选 30 个优良单株按照 Q_i 值的相对大小分别命名为 D1，D2，…，D30，具体信息如表 8 所示。

表 4　42 个油松半同胞家系生长性状一般配合力及排序

Tab. 4　General combining ability of growth traits and ranking from 42 half-sib families of *P. tabuliformis*

家系号 Family No.	胸径 DBH	排序 Ranking	树高 Tree height	排序 Ranking	材积 Volume	排序 Ranking
PT1	8.108	1	−0.433	28	0.113	1
PT2	−0.925	30	0.967	4	−0.002	27
PT3	1.508	17	0.367	13	0.019	18
PT4	−2.467	37	−0.708	37	−0.041	38
PT6	−3.530	39	−0.483	31	−0.050	39
PT7	−0.359	28	2.634	1	0.019	16
PT8	0.975	21	−0.866	40	−0.002	28
PT9	1.275	18	−0.033	19	0.010	21
PT10	1.071	20	−0.458	30	0.007	22
PT11	5.291	4	1.901	2	0.109	2
PT12	5.208	5	0.242	16	0.076	6
PT13	6.708	2	−0.933	42	0.079	3
PT14	1.808	16	−0.483	32	0.025	15
PT15	−0.092	26	−0.033	20	−0.002	26
PT16	2.908	11	0.117	18	0.038	11
PT17	−1.175	31	−0.333	23	−0.023	34
PT18	0.908	22	0.767	8	0.015	20
PT19	2.808	12	1.867	3	0.060	8
PT20	5.308	3	0.267	15	0.078	4
PT21	−0.192	27	−0.583	33	−0.013	29
PT22	−4.842	41	0.567	11	−0.059	41
PT23	−0.542	29	−0.733	38	−0.021	33
PT24	2.983	10	−0.195	22	0.034	12
PT25	0.158	25	−0.416	27	0.000	25
PT26	−1.181	32	−0.405	26	−0.019	32
PT27	3.108	9	−0.433	29	0.031	14
PT28	−2.817	38	0.792	7	−0.031	35
PT29	−4.992	42	0.467	12	−0.061	42
PT30	4.708	7	0.767	9	0.076	5
PT31	2.575	14	0.762	10	0.042	10
PT32	2.808	13	−0.333	24	0.032	13
PT33	−1.492	35	−0.583	34	−0.031	36
PT35	0.208	24	−0.333	25	0.004	24
PT36	−1.392	34	0.307	14	−0.017	31
PT37	−1.317	33	−0.070	21	−0.016	30
PT38	0.608	23	0.201	17	0.005	23
PT39	−3.675	40	−0.583	35	−0.052	40
PT40	1.108	19	0.867	6	0.019	17
PT41	2.097	15	−0.611	36	0.016	19
PT42	3.708	8	0.967	5	0.062	7
PT43	−1.692	36	−0.900	41	−0.036	37
PT44	5.108	6	−0.733	39	0.057	9

表 5　42 个油松半同胞家系生长性状间相关系数

Tab. 5　Correlation coefficients between growth traits from 42 half-sib families of *P. tabuliformis*

生长性状 Growth trait	胸径 DBH	树高 Tree height	材积 Volume
胸径 DBH	1	0.683**	0.979**
树高 Tree height	**0.828****	1	0.720**
材积 Volume	**0.986****	**0.785****	1

注：加粗数据为遗传相关系数，下划线数据为表型相关系数，**表示相关达极显著水平（$P < 0.01$）。Notes: genetic correlation coefficient is bold, phenotype correlation coefficient is underline, ** represents correlation is extremely significant at 0.01 level.

表 6 油松 30 个优良家系综合评定 Q_i 值与遗传增益估算值

Tab. 6 Q_i value and estimated genetic gain from 30 elite families of *P. tabuliformis*

家系号 Family No.	Q_i	现实遗传增益 Realized genetic gain/%			预期遗传增益 Expected genetic gain/%		
		胸径 DBH	树高 Tree height	材积 Volume	胸径 DBH	树高 Tree height	材积 Volume
PT11	1.355	38.37	35.29	142.45	0.93	6.89	13.36
PT19	1.321	24.73	34.87	94.50	0.49	6.76	7.37
PT1	1.316	53.85	5.88	146.25	1.43	−1.57	13.83
PT30	1.310	35.16	21.01	110.08	0.83	2.78	9.32
PT7	1.303	7.33	44.54	54.43	−0.06	9.54	2.37
PT42	1.303	29.67	23.53	96.42	0.65	3.50	7.61
PT20	1.301	38.46	14.71	111.71	0.93	0.97	9.52
PT12	1.299	37.91	14.39	109.74	0.92	0.88	9.27
PT31	1.280	23.44	20.94	76.92	0.45	2.76	5.18
PT13	1.280	46.15	−0.42	112.49	1.18	−3.38	9.62
PT16	1.263	25.27	12.82	72.50	0.51	0.42	4.63
PT18	1.257	14.29	21.01	50.19	0.16	2.78	1.84
PT24	1.253	25.69	8.88	69.21	0.52	−0.71	4.22
PT3	1.252	17.58	15.97	53.94	0.27	1.33	2.31
PT27	1.247	26.37	5.88	66.15	0.55	−1.57	3.84
PT32	1.246	24.73	7.14	66.87	0.49	−1.21	3.92
PT2	1.238	4.21	23.53	33.19	−0.16	3.50	−0.28
PT9	1.234	16.30	10.92	45.62	0.22	−0.12	1.27
PT38	1.233	12.64	13.87	40.41	0.11	0.73	0.62
PT14	1.226	19.23	5.25	59.56	0.32	−1.75	3.01
PT41	1.226	20.82	3.64	50.96	0.37	−2.21	1.94
PT10	1.216	15.18	5.57	42.29	0.19	−1.66	0.86
PT15	1.214	8.79	10.92	33.57	−0.02	−0.12	−0.23
PT35	1.208	10.44	7.14	39.64	0.04	−1.21	0.53
PT36	1.207	1.65	15.21	18.91	−0.24	1.11	−2.06
PT25	1.204	10.16	6.09	35.49	0.03	−1.51	0.01
PT28	1.204	−6.18	21.32	5.06	−0.50	2.87	−3.79
PT8	1.200	14.65	0.42	33.02	0.17	−3.14	−0.30
PT37	1.195	2.06	10.45	19.77	−0.23	−0.25	−1.95
PT21	1.193	8.24	3.99	23.13	−0.03	−2.11	−1.53

表 7、表 8 显示：配合选择策略与最优单株直接选择策略筛选到 19 个相同的优良单株，并且各自筛选到 11 个特有的优良单株，分别为 JD20、JD21、JD22、JD23、JD24、JD25、JD26、JD27、JD28、JD29、JD30 和 D2、D4、D5、D9、D12、D13、D17、D20、D21、D26、D30。配合选择策略与最优单株直接选择策略所筛选出的优良单株群体的平均 Q_i 值分别为 1.275 和 1.303。从性状生长量来看，配合选择策略入选单株的胸径、树高和材积变动范围分别为 16.70～29.00 cm、7.60～11.30 m 和 0.083 0～0.311 8 m^3，平均值分别为 23.89 cm、9.32 m 和 0.199 6 m^3，依次比总平均值高出 20.09%、5.55% 和 44.53%；最优单株直接选择策略所筛选出的优良单株的胸径、树高和材积变动范围分别为 19.20～29.00 cm、8.40～11.60 m 和 0.148 1～0.311 8 m^3，平均值分别为 24.51 cm、9.91 m 和 0.217 7 m^3，依次比总平均值高出 23.23%、12.23% 和 57.64%。最优单株直接选择策略所筛选 11 个特有优良单株的平均胸径、树高和材积生长量比配合选择策略所筛选的 11 个特有优良单株分别高出 7.72%、18.56% 和 31.01%。采用配合选择策略

表 7　配合选择策略筛选的优良单株

Tab. 7　Superior individuals screening by combined selection strategy

名称 Name	编号 No.	区组 Block	家系号 Family No.	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	材积 Volume/m^3	Q_i
JD1	2	1	PT11	29.00	10.2	0.311 8	1.371
JD2	2	3	PT25	26.10	10.9	0.266 0	1.356
JD3	2	4	PT37	24.50	10.6	0.229 3	1.326
JD4	1	3	PT2	23.80	10.7	0.218 0	1.320
JD5	1	4	PT7	22.30	11.3	0.199 7	1.320
JD6	2	3	PT31	23.10	10.7	0.205 3	1.311
JD7	1	2	PT19	22.70	10.7	0.198 3	1.306
JD8	1	2	PT1	28.00	8.4	0.251 0	1.300
JD9	1	1	PT30	24.60	9.6	0.214 2	1.295
JD10	1	4	PT12	25.50	9.2	0.222 8	1.293
JD11	2	1	PT10	27.00	8.5	0.235 5	1.290
JD12	1	4	PT42	23.60	9.8	0.200 2	1.288
JD13	1	2	PT20	25.20	9.1	0.215 8	1.286
JD14	1	4	PT35	25.20	9.1	0.215 8	1.286
JD15	1	4	PT15	24.90	9.2	0.212 5	1.285
JD16	2	4	PT36	25.80	8.7	0.218 7	1.280
JD17	1	4	PT32	25.70	8.7	0.217 1	1.279
JD18	2	4	PT16	24.40	9.2	0.204 0	1.278
JD19	1	3	PT24	24.40	9.1	0.202 3	1.275
JD20	1	2	PT13	26.60	7.9	0.216 6	1.264
JD21	1	4	PT38	23.30	8.9	0.181 5	1.253
JD22	1	3	PT41	22.70	9.1	0.175 1	1.252
JD23	4	2	PT28	19.60	10.1	0.141 3	1.244
JD24	1	4	PT18	20.80	9.6	0.153 1	1.243
JD25	1	3	PT3	21.40	9.2	0.156 9	1.237
JD26	1	4	PT27	23.00	8.4	0.169 4	1.232
JD27	3	4	PT9	22.20	8.5	0.159 2	1.224
JD28	1	3	PT21	23.00	8.1	0.164 9	1.221
JD29	2	1	PT8	21.50	8.5	0.149 3	1.214
JD30	1	1	PT14	16.70	7.6	0.083 0	1.110

与最优单株直接选择策略筛选出的所有优良单株中，JD1 和 D1 材积生长分别表现最优。

图 2、图 3 显示：配合选择策略所筛选出的 30 个优良单株的胸径、树高和材积的预期遗传增益分别在−0.19% ~ 0.55%、−2.25% ~ 4.50% 和−2.63% ~ 8.31% 之间，最优单株直接选择策略分别在−0.04% ~ 0.55%、−0.79% ~ 5.04% 和 0.48% ~ 8.31% 之间。与配合选择策略所筛选出的优良单株的平均胸径、树高和材积预期遗传增益相比，最优单株直接选择策略分别增加了 15.52%、121.78% 和 29.38%。采用配合选择策略与最优单株直接选择策略筛选出的所有优良单株中，JD1 和 D1 子代材积的预期增益分别表现最为显著。

比较配合选择策略与最优单株直接选择策略筛选出的优良单株的分布情况（表 7、表 8），结果发现：与每一优良家系入选 1 个优良单株的配合选择策略不同，最优单株直接选择策略筛选出的 30 个优良单株分属于 20 个家系，其中有 29 个优良单株分属于 19 个优良家系，有 1 个优良单株 D12 属于非优良家系 PT26，优良单株 D12 的材积预期遗传增益为 2.62%，高于配合选择策略所筛选出的 33.33% 的优良单株。此外，优良家系 PT25、PT12 和 PT7 内各有 2 个

表 8 最优单株直接选择策略筛选的优良单株

Tab. 8 Superior individuals screening by direct selection strategy of optimal individual

名称 Name	编号 No.	区组 Block	家系号 Family No.	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	材积 Volume/m^3	Q_i
D1	2	1	PT11	29.00	10.20	0.311 8	1.371
D2	1	1	PT11	27.00	10.60	0.278 5	1.358
D3	2	3	PT25	26.10	10.90	0.266 0	1.356
D4	2	4	PT11	24.10	10.90	0.226 8	1.331
D5	3	4	PT11	23.80	11.00	0.222 7	1.330
D6	2	4	PT37	24.50	10.60	0.229 3	1.326
D7	1	3	PT2	23.80	10.70	0.218 0	1.320
D8	1	4	PT7	22.30	11.30	0.199 7	1.320
D9	1	3	PT25	23.70	10.70	0.216 1	1.319
D10	2	3	PT31	23.10	10.70	0.205 3	1.311
D11	1	2	PT19	22.70	10.70	0.198 3	1.306
D12	1	2	PT26	22.30	10.80	0.192 8	1.304
D13	3	4	PT7	20.10	11.60	0.165 7	1.301
D14	1	2	PT1	28.00	8.40	0.251 0	1.300
D15	1	1	PT30	24.60	9.60	0.214 2	1.295
D16	1	4	PT12	25.50	9.20	0.222 8	1.293
D17	2	1	PT31	23.80	9.80	0.203 6	1.291
D18	2	1	PT10	27.00	8.50	0.235 5	1.290
D19	1	4	PT42	23.60	9.80	0.200 2	1.288
D20	1	1	PT12	25.30	9.10	0.217 5	1.287
D21	3	4	PT31	26.30	8.70	0.227 3	1.287
D22	1	2	PT20	25.20	9.10	0.215 8	1.286
D23	1	4	PT35	25.20	9.10	0.215 8	1.286
D24	1	4	PT15	24.90	9.20	0.212 5	1.285
D25	2	4	PT36	25.80	8.70	0.218 7	1.280
D26	1	4	PT11	19.20	11.30	0.148 1	1.279
D27	1	4	PT32	25.70	8.70	0.217 1	1.279
D28	2	4	PT16	24.40	9.20	0.204 0	1.278
D29	1	3	PT24	24.40	9.10	0.202 3	1.275
D30	2	4	PT31	23.80	9.20	0.194 1	1.270

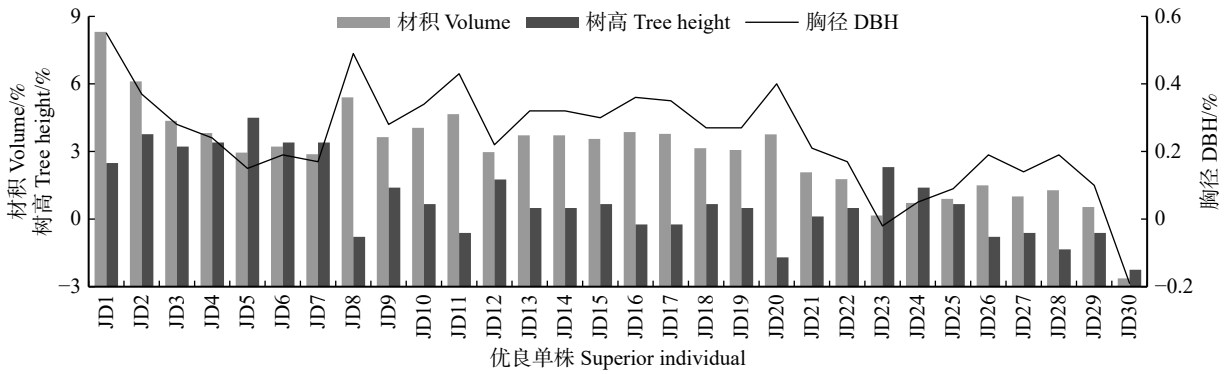


图 2 配合选择策略所筛选 30 个优良单株生长性状预期遗传增益

Fig. 2 Expected genetic gain of growth traits of 30 superior individuals screening by combined selection strategy

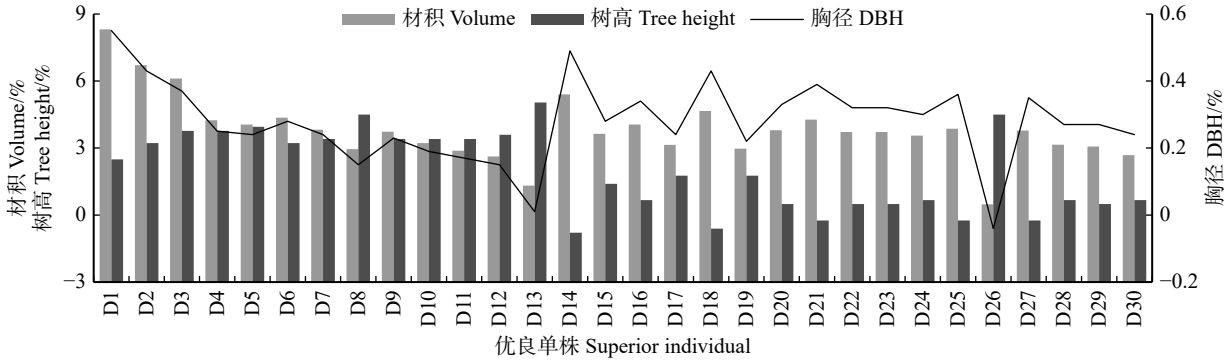


图 3　最优单株直接选择策略所筛选 30 个优良单株生长性状预期遗传增益

Fig. 3　Expected genetic gain of growth traits of 30 superior individuals screening by direct selection strategy of optimal individual

单株入选，优良家系 PT31 内有 4 个单株入选，优良家系 PT11 内入选了 5 个单株。

3　讨　　论

42 个油松半同胞家系的 3 个生长性状方差分析结果表明，油松半同胞家系间和家系内胸径、树高和材积生长差异均达到极显著水平（$P < 0.01$），说明油松各生长性状在家系间和家系内变异丰富，这为优良家系和优良单株的评价选择奠定了基础。各生长性状家系遗传力估算值均小于 0.5，与王建伟[13]、刘永红等[28]的估算结果相比偏低，表明生长性状在家系水平上受低强度遗传控制，这可能与不同试验群体、不同估算方法有关。

油松多用于用材林的营建，材积生长量的增长是其遗传改良工作最重要的育种目标之一[13,29]。值得注意的是，材积虽由胸径与树高计算所得，但材积与胸径相关性更强，遗传相关系数高达 0.986，二者受遗传因素调控的强度与树高相比均较低。因此，直接以材积为指标进行选择改良的潜力相对较小，在筛选油松第二代种子园亲本材料时，可以通过对胸径与树高的联合选择，实现对材积的间接选择，有效地改进育种目标性状。

本研究根据家系综合评价结果，筛选出 30 个优良家系，入选率为 71.43%。入选家系的胸径、树高和材积现实遗传增益变动范围分别为−6.18% ~ 53.85%、−0.42% ~ 44.54% 和 5.06% ~ 146.25%，预期遗传增益变动范围分别为−0.50% ~ 1.43%、−3.38% ~ 9.54% 和−3.79% ~ 13.83%，其亲本材积一般配合力、平均材积现实遗传增益和平均材积预期遗传增益均相对较高，说明根据表型选择的家系在遗传上是优良的。根据单株综合评价结果，配合选择策略与最优单株直接选择策略分别选出 30 个优良单株，其中包括 19 个相同的优良单株和 11 个不同的优良单株。配合选择策略筛选出的优良单株的胸径、树高和材积生长量变动范围分别为 16.70 ~ 29.00 cm、7.60 ~ 11.30 m 和 0.083 0 ~ 0.311 8 m^3。最优单株直接选择策略筛选出的优良单株的胸径、树高和材积生长量变动范围分别为 19.20 ~ 29.00 cm、8.40 ~ 11.60 m 和 0.148 1 ~ 0.311 8 m^3。比较所筛选出的 11 个不同优良单株的平均胸径、树高和材积生长量，结果显示，最优单株直接选择策略比配合选择策略分别高出 7.72%、18.56% 和 31.01%。比较入选优良单株的平均胸径、树高和材积预期遗传增益，结果显示，最优单株直接选择策略比配合选择策略分别增加了 15.52%、121.78% 和 29.38%。生长量与预期遗传增益的比较结果表明：利用最优单株直接选择策略筛选出的 30 个优良单株作为油松第二代种子园建园亲本，改良效果将会更优。除此之外，比较入选优良单株的家系分布发现，最优单株直接选择策略筛选出的优良单株几乎均来自于优良家系，那么从获得优良遗传型的繁琐程度上来说，采用最优单株直接选择策略比采用配合选择策略更加简便。最后，与配合选择策略中每个优良家系只筛选出一个优良单株相区别，最优单株直接选择策略结果显示，优良家系 PT25、PT12、PT7、PT31 和 PT11 内有多个单株入选，并且非优良家系 PT26 内有一单株 D12 入选。结合优良单株的生长量、预期遗传增益和分布情况的对比分析结果发现：采用配合选择策略损失了部分优良单株资源，不利于油松种子园的升级换代。综上所述，最优单株直接选择策略比配合选择策略更适合用于油松第二代种子园建园亲本的筛选。

4　结　　论

42 个油松半同胞家系间和家系内胸径、树高和材积生长均达到了极显著差异水平（$P < 0.01$）。利用布雷金多性状综合评价法进行家系与单株综合评定，配合选择策略与最优单株直接选择策略分别选出 30 个优良单株，其中包括 19 个相同的优良单株和 11 个不同的优良单株。对入选优良单株的生长性

状平均生长量、平均预期遗传增益和分布情况对比分析发现：采用配合选择策略会损失部分优良单株资源，最优单株直接选择策略比配合选择策略更适合用于油松高世代种子园亲本材料的筛选。

参 考 文 献

[1] 荆蓉, 彭祚登. 油松家系群体早期高生长对气候的响应 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 96−102.
Jing R, Peng Z D. Response of early height growth of *Pinus tabuliformis* family population to climate[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(1): 96−102.

[2] 唐兴港, 袁颖丹, 张金池. 气候变化对油松潜在地理分布时空格局的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(9): 1−7.
Tang X G, Yuan Y D, Zhang J C. Simulation of potential spatial-temporal population dynamics of *Pinus tabuliformis* under climate change[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(9): 1−7.

[3] 徐化成. 油松 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1993.
Xu H C. Chinese pine[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993.

[4] 刘宏伟, 王国义, 刘涛. 红松优良家系及优良单株配合选择 [J]. 林业科技, 2019, 44(6): 9−11.
Liu H W, Wang G Y, Liu T. Selection of excellent families and individual plants of *Korean koraiensis*[J]. Forestry Science & Technology, 2019, 44(6): 9−11.

[5] 许娜, 安三平, 王丽芳, 等. 青海云杉半同胞家系遗传变异及二代优树选择 [J]. 甘肃林业科技, 2017, 42(1): 1−5, 20.
Xu N, An S P, Wang L F, et al. Genetic variation and plus trees selection of families of *Picea crassifolia*[J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technolgy, 2017, 42(1): 1−5, 20.

[6] 张振, 余启新, 滕国新, 等. 马尾松三代选择群体生长性状变异及选择研究 [J]. 植物研究, 2017, 37(2): 266−273.
Zhang Z, Yu Q X, Teng G X, et al. Variation and selection of growth character on the young third generation of *Pinus massoniana*[J]. Bulletin of Botanical Research, 2017, 37(2): 266−273.

[7] 张正刚, 马建伟, 靳新春, 等. 日本落叶松自由授粉家系子代测定林分析与选择研究 [J]. 西北林学院学报, 2013, 28(4): 74−79.
Zhang Z G, Ma J W, Jin X C, et al. Analysis and selection of progeny test forest of the open pollinated family of Japanese larch[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(4): 74−79.

[8] 党常顺, 兰士波, 宁晓光. 东北白桦半同胞子代表型变异分析与优良个体选择 [J]. 安徽林业科技, 2014, 40(5): 13−16.
Dang C S, Lan S B, Ning X G. Analysis on the phenotypic variations of the half-sib progeny of *Betula platyphylla* var. *mandshurica* and selection of its fine individuals[J]. Anhui Forestry Science and Technology, 2014, 40(5): 13−16.

[9] 胡文杰, 庞宏东, 胡兴宜, 等. 9 年生枫香的遗传变异和优良家系单株选择 [J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(5): 506−514.
Hu W J, Pang H D, Hu X Y, et al. Genetic variation, excellent family and individual selection of 9-year-old *Liquidambar formosana*[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2018, 26(5): 506−514.

[10] 袁虎威, 王晓飞, 杜清平, 等. 基于 BWB 的油松初级种子园混合子代优树选择与配置设计 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(11): 28−34.
Yuan H W, Wang X F, Du Q P, et al. BWB-assisted plus tree selection and deployment design for bulked progenies of the first-cycle Chinese pine seed orchard[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(11): 28−34.

[11] 王文月, 张振, 金国庆, 等. 两地点 8 年生柏木生长性状家系变异及选择 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2023, 47(2): 42−48.
Wang W Y, Zhang Z, Jin G Q, et al. Family variation and selection of growth traits of eight-year-old *Cupressus funebris* in two sites[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(2): 42−48.

[12] 袁虎威, 梁胜发, 符学军, 等. 山西油松第二代种子园亲本选择与配置设计 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(3): 47−54.
Yuan H W, Liang S F, Fu X J, et al. Parental selection and deployment design in the second- generation seed orchard of Chinese pine in Shanxi Province[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(3): 47−54.

[13] 王建伟. 油松高世代种子园建园材料选择研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
Wang J W. High-generation Chinese pine seed orchard garden construction materials selection study[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008.

[14] 杨培华, 王亚峰, 郭俊荣, 等. 油松第二代无性系种子园营建技术 [J]. 陕西林业科技, 2002(2): 77−79.
Yang P H, Wang Y F, Guo J R, et al. Construction technology of second generation clonal seed orchard of *Pinus tabuliformis*[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2002(2): 77−79.

[15] 张新波, 李悦, 袁虎威, 等. 山西油松天然林分 21 年子代生长性状遗传变异研究 [J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(3): 104−109.
Zhang X B, Li Y, Yuan H W, et al. Genetic variations of growth traits in a 21-year-old stand progeny of Shanxi natural *Pinus tabuliformis* forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(3): 104−109.

[16] 袁承志. 马尾松高世代育种亲本选择和特异种质发掘 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
Yuan C Z. High-generation breeding parent selection and specific germplasm exploration of *Pinus massoniana*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2021.

[17] Liang D Y, Ding C J, Zhao G H, et al. Variation and selection analysis of *Pinus koraiensis* clones in northeast China[J]. Journal of Forestry Research, 2018, 29(3): 611−622.

[18] Diao S, Hou Y M, Xie Y H, et al. Age trends of genetic parameters, early selection and family by site interactions for growth traits in *Larix kaempferi* open-pollinated families[J]. BMC Genetics, 2016, 17(1): 104.

[19] 陈雅丽, 吕东, 赵明, 等. 青海云杉半同胞家系子代测定与亲本评价 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(4): 17−24.

Chen Y L, Lü D, Zhao M, et al. Half-sib progeny test and evaluation of parents of *Picea crassifolia*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(4): 17−24.

[20] 鲍岩. 文冠果半同胞家系主要经济性状变异分析 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
Bao Y. Variation analysis of main economic characters in half-sibling families of yellowhorn (*Xanthoceras sorbifolium* Bunge)[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.

[21] 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. Forest tree breeding[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.

[22] 贾庆彬, 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] Pan Y Y, Li S C, Wang C L, et al. Early evaluation of growth traits of *Larix kaempferi* clones[J]. Journal of Forestry Research, 2018, 29(4): 1031−1039.

[24] 刘宇, 徐焕文, 滕文华, 等. 白桦全同胞子代测定及优良家系早期选择 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(2): 1−8.
Liu Y, Xu H W, Teng W H, et al. Full-sib progeny test and early selection in superior families of *Betula platyphylla*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(2): 1−8.

[25] 王俊青, 赵天宇, 谷凤平, 等. 枫香半同胞家系子代遗传变异与优良家系选择研究 [J]. 西南林业大学学报, 2015, 35(4): 33−38.
Wang J Q, Zhao T Y, Gu F P, et al. Study on the genetic variations of half-sib progeny testing and excellent family selection of *Liquidambar formosana*[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2015, 35(4): 33−38.

[26] 李开隆, 姜静, 姜莹, 等. 白桦 5 × 5 完全双列杂交种苗性状的遗传效应分析 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 82−87.
Li K L, Jiang J, Jiang Y, et al. Analysis of the genetic effects of seed and seedling traits of *Betula platyphylla* in a 5 × 5 complete diallel cross design[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(4): 82−87.

[27] Murtadha M A, Ariyo O J, Alghamdi S S. Analysis of combining ability over environments in diallel crosses of maize (*Zea mays*)[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2018, 17(1): 69−78.

[28] 刘永红, 樊军锋, 杨培华, 等. 油松高世代种子园建立技术研究 [J]. 西北林学院学报, 2005, 20(3): 70−73.
Liu Y H, Fan J F, Yang P H, et al. Studies on establishing techniques of the multi generation clone-orchards of *Pinus tabuliformis*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(3): 70−73.

[29] 马迎, 孙亚莉. 油松营林育苗技术 [J]. 现代农业科技, 2021(22): 113−114.
Ma Y, Sun Y L. Forestation and seedling raising technology of *Pinus tabuliformis*[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2021(22): 113−114.

（责任编辑　范　娟　赵田芸
责任编委　康向阳）