

元宝枫半同胞家系区域试验林幼龄期生长变异及选择

孙涛¹, 韩义¹, 穆艳娟¹, 姚树建¹, 季新月¹, 张锋¹, 张舒新^{1,2}, 宋晨霞^{1,3}, 王艳¹,
彭广伟⁴, 郑岩⁴, 谭好国⁴, 鲁仪增^{1*}

1. 山东省林草种质资源中心, 山东 济南 250102
2. 山东农业大学林学院, 山东 泰安 271018
3. 聊城大学农学与农业工程学院, 山东 聊城 252000
4. 山东高速鸿林工程技术有限公司, 山东 济南 250001

摘要: 研究分析元宝枫不同半同胞家系幼龄期生长性状遗传多样性水平, 进行早期优良家系及单株评价与选择, 提高育种效率, 加速元宝枫遗传改良进程, 为后期元宝枫良种选育奠定基础。以27个3年生元宝枫半同胞家系为试材, 在3个地点营建区域试验林, 测量其株高和地径, 进行多点联合方差分析、生长分析和遗传参数分析; 采用隶属函数评估法对3个区域试验林进行选择, 筛选出优良家系; 以株高和地径均位于前10%为标准, 选择出优良单株。三点联合分析可知27个家系株高和地径在不同试验林间、不同家系间以及不同试验林和家系的交互作用间均存在显著或极显著差异, 不同家系的平均株高为144.38 cm~179.63 cm, 平均地径为17.68 mm~22.32 mm; 株高和地径在3个试验林变异系数范围分别为17.69%~29.49%和16.05%~33.35%, 家系遗传力范围分别为0.275 1~0.691 9和0.456 6~0.723 0, 受较高程度遗传控制。利用隶属函数评估法对3个区域试验林进行选择, 筛选出LNFX002、NMCF010和NXAM090共3个在三地表现均佳的家系, 入选率为11.11%; 3个家系株高和地径的平均选择增益分别为4.88%和8.20%, 平均遗传增益为2.94%和5.01%。3个试验林以各自株高和地径均位于前10%为标准, 共选择出48个优良单株, 入选率为2.93%, 株高平均选择增益和遗传增益分别为44.71%和23.11%, 地径平均选择增益和遗传增益分别为49.43%和30.20%。元宝枫半同胞家系生长性状在不同家系和不同区域间存在着丰富的遗传变异。筛选出的LNFX002、NMCF010和NXAM090家系在山东三地表现均佳, 可考虑作为优良家系在山东及立地条件相似的地区推广。

关键词: 元宝枫; 半同胞家系; 区域试验林; 幼龄期; 生长变异; 选择

中图法分类号: S792.35

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)01-0157-09

Growth Variation and Selection of Half-Sib Families of *Acer truncatum* During the Juvenile Period in Regional Trial Forests

SUN Tao¹, HAN Yi¹, MU Yan-juan¹, YAO Shu-jian¹, JI Xin-yue¹, ZHANG Feng¹,
ZHANG Shu-xin^{1,2}, SONG Chen-xia^{1,3}, WANG Yan¹, PENG Guang-wei⁴,
ZHENG Yan⁴, TAN Hao-guo⁴, LU Yi-zeng^{1*}

1. Shandong Provincial Center of Forest and Grass Germplasm Resources, Jinan 250102, China

2. Forestry College of Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

3. College of Agronomy and Agricultural Engineering/Liaocheng University, Liaocheng 252000, China

4. Shandong Expressway Honglin Engineering Technology Co.,Ltd, Jinan 250001, China

Abstract: This study investigates the genetic diversity of juvenile growth traits among different half-sib families of *Acer truncatum*, evaluates and selects superior families and individual plants at an early stage, improves breeding efficiency, accelerate the genetic improvement process of *A. truncatum*, and lays a solid foundation for future superior variety breeding. Taking 27 three-year-old half-sib families of *A. truncatum* as test materials, this study establishes regional trial forests at three locations, measures their plant height and ground diameter, followed by multi-site combined variance analysis, growth analysis and genetic parameter analysis. This study adopts the membership function evaluation method to select

收稿日期: 2025-05-13

修回日期: 2025-12-26

基金项目: 泰安市农业良种工程“元宝枫新品种定向选育及示范应用”(2023NYLZ03); 科技创新合作项目“元宝枫种质资源收集评价及种质挖掘”(2020KJCX01); 山东省重点研发计划项目课题“元宝枫抗逆高产无性系早期鉴定及神经酸分离纯化技术”(2020LZGC0090301); 山东省自然资源厅“珍贵树种保育利用创新团队项目”(LZYZZ202398); 中央财政林业改革发展资金项目(鲁[2020]TG01号和鲁[2023]TG 018-02号)

第1作者简介: 孙涛(1993-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 林木遗传育种。E-mail: isuntao@163.com

***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail: luyizeng@126.com

superior families across the three trial sites, and screens superior individual plants based on the criterion based on the criterion of ranking within the top 10% for both tree height and ground diameter. Three points joint analysis shows that the 27 families exhibit significant or highly significant differences among trial sites, among families, and in the interaction between trial sites and families. The average plant height of different families ranges from 144.38 cm to 179.63 cm, and the average ground diameter ranges from 17.68 mm to 22.32 mm. The coefficients of variation for plant height and ground diameter in the three trial forests range from 17.69% to 29.49% and from 16.05% to 33.35%, respectively. The family heritability of plant height ranges from 0.275 1 to 0.691 9, and that of ground diameter ranges from 0.4566 to 0.723 0, indicating that these traits are under a relatively strong genetic control. Using the membership function evaluation method, this study selects three superior families (LNFX002, NMCF010, and NXAM090) based on their consistently excellent performance across all three regional trial sites, with a selection rate of 11.11%. The average selection gains of plant height and ground diameter for these three families are 4.88% and 8.20%, respectively, with average genetic gains of 2.94% and 5.01%. Based on the criterion of ranking within the top 10% for both tree height and ground diameter at each trial site, this study selects a total of 48 superior individual plants across the three trial forests, with a selection rate of 2.93%. The average selection gains and genetic gains for plant height are 44.71% and 23.11%, respectively, while those for ground diameter are 49.43% and 30.20%, respectively. The growth traits of half-sib families of *A. truncatum* exhibit abundant genetic variation among different families and regions. The selected families LNFX002, NMCF010, and NXAM090 demonstrate excellent performance across all three trial sites in Shandong Province and can be considered as superior families for promotion in Shandong and regions with similar site conditions.

Keywords: *Acer truncatum*; half-sib families; regional trial forests; juvenile period; growth variation; selection

元宝枫 (*Acer truncatum*) 为无患子科 (Sapindaceae) 槭树属 (*Acer*) 落叶乔木, 自然分布范围较广, 产自吉林、辽宁、内蒙古、河北、山西、山东、江苏北部 (徐州以北地区)、河南、陕西及甘肃等省区, 多分布于海拔 400 m~1 000 m 疏林中^[1], 属于典型的温带树种。作为我国特有木本油料树种, 元宝枫具有很高的观赏、生态和经济价值^[2-4]。元宝枫木材是一种质地优良、密度适中且结构均匀的原料, 具有干缩度适中、尺寸稳定性强、耐磨且加工后表面光洁等特点。其应用范围广泛, 涵盖艺术、工业、军事等多个领域^[5]。据不完全统计, 2018 年人工种植面积已突破了 400 km²^[6], 2020 年我国就在山东、四川、陕西等 11 个省 (市、区) 开展了元宝枫推广种植^[7]。国家林草局已将其作为“三北”防护林重点推广树种, 预计元宝枫种植基地在 2026 年前将由现在的 1 000 km² 增加至 1 700 km²^[8]。

林木遗传变异广泛存在于家系和个体之间, 是遗传改良的基础, 并决定了林木在改良过程中的潜力^[9,10]。作为林木遗传改良的重要环节, 开展区域测定是评价亲本遗传价值和估算遗传参数的有效方法。通过对家系间的遗传变异分析, 可以根据子代的生长性状表现回选优良亲本, 也可以为下一代选育提供优良材料, 提高人工试验林的生产力和生产效率, 科学制定育种策略需要对家系性状的变异规律进行深入研究^[11]。不同

家系林木在不同树龄阶段生长性状具有差异性, 在林木培育过程中, 由于生长周期长和基因杂合度高, 导致育种年限长, 效率低。通过在林木幼龄期进行早期选择, 可预测成年后的表现, 获得快速遗传增益。许超^[12]通过对不同试验点 6 年生元宝枫半同胞家系试验林观测和分析, 利用综合指数选择法, 按照 20% 的入选率选择出两个优良家系, 两个家系胸径、树高和冠幅平均遗传增益为 1.49%、0.14% 和 4.65%。因此, 开展林木苗期选择, 研究林木家系间随着树龄增加的变化趋势, 对林木遗传改良具有重要的现实意义^[13]。现阶段关于元宝枫幼龄期生长遗传变异和选择的相关研究较少, 本文通过研究分析不同半同胞家系幼龄期生长性状遗传多样性水平, 进行早期优良家系及单株评价与选择, 提高育种效率, 以期加速元宝枫遗传改良进程, 为后期元宝枫良种选育奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2018 年 10 月于辽宁和内蒙古采集生长状况良好、无病虫害单株的元宝枫种子, 每个单株间距超过 100 m。2019 年 4 月初, 将采集到的元宝枫种子播种育苗。本试验的参试材料为其中的 27 个元宝枫半同胞家系实生苗 (见表 1)。

表1 参试元宝枫家系信息

Table 1 Family information of the tested *Acer truncatum*

代号 Code	采集地 Location	纬度/°N Latitude	经度/°E Longitude	参试份数 Number of tested copies
LNFX	辽宁阜新	42.666 667	122.733 333	1
NMTL	内蒙古通辽	43.016 667	122.733 333	13
NMCF	内蒙古赤峰	42.883 333	119.416 667	2
NXAM	内蒙古兴安盟	45.233 333	121.483 333	11

1.2 区域试验林布置及生长性状测定

2020年3月,在济南章丘(ZQ)、泰安夏张(XZ)和枣庄滕州(TZ)三地布设区域试验林(见表2),采用随机完全区组设计,栽植密度为

2 m × 3 m,每个重复10株,共3个重复,试验林均设置保护行。2022年2月,分别对各试验林苗木进行全样本测量,测定株高(H/cm)和地径(DBH/mm)。

表2 三个试验地环境条件概况(2020-2022)

Table 2 Overview of environmental conditions at three trial sites (2020-2022)

造林地 Location	纬度/°N Latitude	经度/°E Longitude	平均海拔/m Average altitude	年均温/°C Annual average temperature	年降水量/mm Annual precipitation	土壤类型 Soil type
济南章丘(ZQ)	36.737 818	117.566 739	52	14.5	760.0	潮土
泰安夏张(XZ)	36.107 375	116.947 673	115	14.5	616.5	棕壤
枣庄滕州(TZ)	34.903 955	117.164 807	31	15.4	964.8	褐土

1.3 生长性状数据分析

应用Excel 2010和SPSS 18软件对元宝枫各生长性状数据进行均值计算、方差分析、显著性分析。方差分析采用线性固定模型计算^[14]:

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

式中: Y_{ijk} 为第*i*个区组第*j*个家系第*k*个观测值; μ 为总体平均值; B_i 表示区组效应; F_j 表示家系随机效应; BF_{ij} 为家系和区组的交互作用; e_{ijk} 为随机误差。

表型变异系数(P_{CV})及遗传变异系数(G_{CV})计算公式^[14]:

$$PCV = \sqrt{\sigma_p^2} / \bar{x} \times 100\%$$

$$GCV = \sqrt{\sigma_g^2} / \bar{x} \times 100\%$$

式中: σ_p^2 为性状的表型方差; σ_g^2 为性状的遗传方差; \bar{x} 为性状平均值。

家系遗传力(h_f^2)及单株遗传力(h_i^2)计算公式^[14]:

$$h_f^2 = \sigma_f^2 / (\sigma_f^2 + \sigma_{fb}^2 / B + \sigma_e^2 / NB)$$

$$h_i^2 = 4\sigma_f^2 / (\sigma_f^2 + \sigma_b^2 + \sigma_e^2)$$

式中: σ_f^2 为家系方差分量; σ_b^2 为家系与区组互作的方差分量; σ_e^2 为随机误差的方差分量; B 为区组数, N 为重复数。

选择差(S)、选择增益(G)、选择响应(R)及

遗传增益(ΔG)计算公式^[15]:

$$S = x_i - \bar{x}$$

$$G = S/\bar{x}$$

$$R = h^2 \times S$$

$$\Delta G = (R/\bar{x}) \times 100\% = G \times h^2$$

式中: x_i 表示入选家系性状的平均值; \bar{x} 为所有家系性状平均值。

1.4 优良家系及单株选择方法

(1)优良家系选择:采用隶属函数评估法,将各个性状隶属函数值累加排序进行优良家系的评选。

隶属函数值 $R(X_i)$ 计算公式^[16]:

$$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中: X_i 为指标测定值。 X_{\max} 和 X_{\min} 分别为最大值和最小值。

(2)优良单株选择:株高和地径均位于当前试验林的前10%可入选优良单株。

2 结果与分析

2.1 元宝枫性状三点联合分析

2.1.1 元宝枫性状方差分析 通过对参试的27个元宝枫半同胞家系株高和地径方差分析可知(见表3),株高在不同试验林间、不同家系间以及不同试验林和家系的交互作用间均存在极显著差

表 3 不同地点、家系间的方差分析
Table 3 Analysis of variance among different locations and families

性状 Trait	变异来源 Source of variation	Ⅲ型平方和 Type III sum of squares	df	均方 Mean square	F	Sig.
株高	地点	334 189.813	2	167 094.906	97.437**	0.000
	家系	87 221.143	26	3 354.659	1.956**	0.003
	地点 * 家系	222 633.687	52	4 281.417	2.497**	0.000
地径	地点	9 597.687	2	4 798.844	91.270**	0.000
	家系	2 942.143	26	113.159	2.152**	0.001
	地点 * 家系	3 947.209	52	75.908	1.444*	0.022

注:**表示在 0.01 水平上极显著相关;*表示在 0.05 水平上显著相关,下同。

Note: **: Significance at $P < 0.01$; *: Significance at $P < 0.05$; the same below.

异($P < 0.01$);地径在不同试验林间和不同家系间差异也达到了极显著水平($P < 0.01$),在不同地点和家系的交互作用存在显著差异($P < 0.05$)。表明开展元宝枫幼龄期选择具有可行性和重要意义。

2.1.2 元宝枫性状生长分析 生长分析(表 4)表明,株高均值最大的家系是 NXAM090,达 179.63 cm;NXAM080 的平均株高最小,仅为 144.38 cm。地径最大的是 NMCF062,为 22.32 mm;最小的是 NMCF059,为 17.68 mm。两性状的

表 4 不同家系间生长性状分析
Table 4 Analysis of growth traits among different families

序号 Number	家系 Family	株高H			地径DBH		
		均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
1	LNFX002	170.58	54.68	32.06	21.70	6.78	31.24
2	NMTL026	149.98	47.54	31.70	18.77	6.93	36.92
3	NMTL027	161.26	50.92	31.58	20.31	5.05	24.86
4	NMCF001	172.88	38.02	21.99	20.95	4.94	23.58
5	NMCF010	172.65	45.06	26.10	21.65	4.95	22.86
6	NMCF019	169.59	41.79	24.64	20.41	5.13	25.13
7	NMCF026	174.48	42.30	24.24	21.98	4.90	22.29
8	NMCF028	158.27	40.50	25.59	20.62	6.21	30.12
9	NMCF029	163.96	43.38	26.46	18.90	6.51	34.44
10	NMCF043	177.58	41.18	23.19	20.20	5.22	25.84
11	NMCF045	161.18	48.68	30.20	19.98	5.64	28.23
12	NMCF049	163.3	43.46	26.61	19.97	6.58	32.95
13	NMCF050	157.94	36.13	22.88	20.07	5.21	25.96
14	NMCF059	149.85	53.17	35.48	17.68	5.93	33.54
15	NMCF061	165.89	36.88	22.23	20.01	5.12	25.59
16	NMCF062	171.39	48.23	28.14	22.32	6.30	28.23
17	NXAM048	157.59	41.56	26.37	20.40	5.63	27.60
18	NXAM057	165.11	42.77	25.90	21.60	5.55	25.69
19	NXAM064	160.76	40.41	25.14	20.79	5.83	28.04
20	NXAM065	152.50	44.19	28.98	19.68	5.78	29.37
21	NXAM070	157.53	40.33	25.60	19.32	5.69	29.45
22	NXAM076	163.54	48.45	29.63	19.18	6.29	32.79
23	NXAM078	162.31	40.40	24.89	20.76	4.47	21.53
24	NXAM080	144.38	55.68	38.56	19.85	6.27	31.59
25	NXAM087	165.48	43.63	26.37	21.13	5.51	26.08
26	NXAM090	179.63	39.74	22.12	21.42	4.93	23.02
27	NXAM098	150.99	48.79	32.31	19.62	5.00	25.48

大值是最小值的 1.24 和 1.26 倍。株高的变异系数差异较大,其中 NXAM080 的变异系数最大,为 38.56%; NMCFO01 的变异系数最小,为 21.99%。地径最大和最小的家系分别为 NMTL026 和 NXAM078,变异系数分别为 36.92% 和 21.53%。综上说明,参试的元宝枫家系的 2 个性状间存在着丰富的遗传变异,具备较大的遗传改良潜力。

2.2 区域试验林生长性状变异和遗传参数估算

在不同区域试验林生长性状变异和遗传参数估算分析(表 5)中,ZQ 平均株高(173.52 cm)较 TZ 平均株高(175.25 cm)略低,XZ 平均株高最小,仅为 143.13 cm; ZQ 平均地径(23.06 mm)远大于 XZ (19.13 mm)和 TZ (17.29 mm)。变异系数分析表明,不同试验林株高和地径的表型变异系数范围分别为 17.69%~29.49%和 16.05%~33.35%。其中,ZQ 株高和地径的表型变异系数均为最小,分别为 17.69% 和 16.05%; TZ 株高表型变异系数

(29.49%)与 XZ 的(29.33%)相近,地径表型变异系数最大的是 XZ,为 33.35%,是 ZQ 的 2.08 倍,是 TZ 的(24.35%)1.37 倍。株高和地径的遗传变异系数范围分别为 10.60%~26.10% 和 8.60%~23.44%。其中,XZ 株高和地径的遗传变异系数均为最大,分别为 26.10% 和 23.44%;株高遗传变异系数最小的是 TZ,为 10.60%;地径遗传变异系数最小的是 ZQ,为 8.60%。遗传力分析表明,ZQ 株高和地径的家系遗传力分别为 0.688 3 和 0.456 9,受中高等程度遗传控制,株高单株遗传力为 0.325 9,受中等程度遗传控制,地径单株遗传力为 0.1308,受低等程度遗传;XZ 株高家系遗传力(0.691 9)和地径家系遗传力(0.586 9)均受中高等程度遗传控制,株高单株遗传力(0.384 6)和地径单株遗传力(0.252 2)均受中低等程度遗传控制;TZ 株高家系遗传力为 0.275 1,单株遗传力为 0.101 1,受低等程度遗传控制;地径家系遗传力为 0.722 9,单株遗传力为 0.605 4,受高等程度遗传控制。

表 5 不同试验林生长性状变异和遗传参数

Table 5 Variation of growth traits and genetic parameters in different trial forests

造林地 Location	性状 Trait	均值±标准差 Mean±SD	表型变异系数/% Phenotypic coefficient of variation	遗传变异系数/% Genetic coefficient of variation	家系遗传力 Family heritability	单株遗传力 Individual heritability
ZQ	H/cm	173.52±30.69	17.69	15.46	0.688 3	0.325 9
	DBH/mm	23.06±3.70	16.05	8.60	0.456 6	0.130 8
XZ	H/cm	143.13±41.98	29.33	26.10	0.691 9	0.384 6
	DBH/mm	19.13±6.38	33.35	23.44	0.586 9	0.252 2
TZ	H/cm	175.25±51.68	29.49	10.60	0.275 1	0.101 1
	DBH/mm	17.29±4.21	24.35	23.21	0.723 0	0.605 4

2.3 不同区域试验林生长性状与环境因子相关性分析

对元宝枫不同区域试验林株高和地径性状与当地地理位置及气候进行相关性分析(表 6)可知,株高与纬度和平均海拔均呈负相关,地径则相反;同时,两生长性状均与经度呈正相关关系。另一

方面,株高与年均温和年降水量均呈正相关,地径与该两因子间均呈负相关,表明随着温度和降水量的增加,植株将更多的养分集中到了高度生长方面,从而弱化了粗度的增长。相关性分析表明,不同区域试验林的的元宝枫生长与当地环境因子具有一定程度的相关性,但均未达到显著水平。

表 6 不同区域试验林生长性状与环境因子相关性分析

Table 6 Correlation analysis between growth traits and environmental factors in different regional trial forests

	纬度 Latitude	经度 Longitude	平均海拔 Average altitude	年均温 Annual average temperature	年降水量 Annual precipitation
H	-0.224	0.737	-0.981	0.541	0.838
DBH	0.927	0.784	0.036	-0.745	-0.407

2.4 元宝枫优良家系选择

采用隶属函数评估法对 27 个元宝枫半同胞

家系进行综合评价,分别计算每个家系株高和地径的隶属函数值,然后将两个数据相加后进行排

序,数值愈大表明该家系生长性状综合表现愈好。

2.4.1 基于三点联合分析的优良家系选择 结果表明,27个元宝枫半同胞家系中,合计隶属函数值排名前50%入选,即得分靠前的13个家系,依

次为 NXAM090、NMCF026、NMCF062、NMCF010、LNFX002、NMCF001、NMCF043、NXAM057、NXAM087、NMCF019、NXAM078、NXAM064和NMCF061(见表7)。

表7 不同试验林生长性状变异和遗传参数
Table 7 Variation of growth traits and genetic parameters in different trial forests

排名 Ranging	家系 Family	株高 H	隶属函数值 Subordinate function values	地径 DBH	隶属函数值 Subordinate function values	合计 Total
1	NXAM090	179.63	1	21.42	0.81	1.81
2	NMCF026	174.48	0.85	21.98	0.93	1.78
3	NMCF062	171.39	0.77	22.32	1	1.77
4	NMCF010	172.65	0.8	21.65	0.86	1.66
5	LNFX002	170.58	0.74	21.7	0.87	1.61
6	NMCF001	172.88	0.81	20.95	0.7	1.51
7	NMCF043	177.58	0.94	20.2	0.54	1.48
8	NXAM057	165.11	0.59	21.6	0.84	1.43
9	NXAM087	165.48	0.6	21.13	0.74	1.34
10	NMCF019	169.59	0.72	20.41	0.59	1.3
11	NXAM078	162.31	0.51	20.76	0.66	1.17
12	NXAM064	160.76	0.46	20.79	0.67	1.13
13	NMCF061	165.89	0.61	20.01	0.5	1.11
.....
26	NMTL026	149.98	0.16	18.77	0.23	0.39
27	NMCF059	149.85	0.16	17.68	0	0.16

2.4.2 不同区域试验林优良家系选择 对三地元宝枫家系分别采用隶属函数法进行综合评价,同样按照排名前50%入选,结果见表8。其

中,3个试验林共同入选的家系有4个,分别为 LNFX002、NMCF010、NMCF043 和 NXAM090。

表8 27个元宝枫家系隶属函数得分
Table 8 Membership Function Scores of 27 *Acer truncatum* families

排名 Ranging	ZQ		XZ		TZ	
	家系 Family	合计 Total	家系 Family	合计 Total	家系 Family	合计 Total
1	NMCF062	2.00	NMCF010	1.81	NXAM057	1.99
2	LNFX002	1.49	NMCF026	1.75	NXAM098	1.35
3	NMCF026	1.39	NXAM087	1.68	NXAM076	1.31
4	NXAM090	1.38	NMCF062	1.57	NXAM080	1.23
5	NXAM064	1.27	NXAM090	1.52	LNFX002	1.2
6	NMCF029	1.07	NMCF001	1.47	NXAM090	1.17
7	NMCF010	1.02	NXAM064	1.45	NMCF059	1.14
8	NMCF043	1.01	NMCF028	1.44	NMTL027	1.13
9	NXAM078	0.98	NMCF019	1.41	NMCF043	1.11
10	NMCF001	0.96	NMCF045	1.41	NMCF049	1.06
11	NMTL027	0.96	NMCF043	1.28	NXAM048	1.03
12	NXAM065	0.91	NMCF061	1.28	NXAM078	1.02
13	NMCF049	0.91	LNFX002	1.11	NMCF010	1.01
.....
26	NXAM080	0.22	NXAM080	0.23	NXAM070	0.29
27	NMCF059	0.02	NMCF059	0.15	NXAM064	0.24

综合以上两种选择可以看出, LNFx002、NMCF010、NMCF043 和 NXAM090 等 4 个家系性状表现突出。

2.5 入选家系的选择增益和遗传增益

入选的 4 个家系的选择增益和遗传增益见表 9。4 个家系中, 排除平均遗传增益为负值的家系, 最终入选的优良家系为 LNFx002、NMCF010 和 NXAM090。其中, LNFx002 平均株高为 167.95 cm, 平均选择增益和遗传增益为 1.94% 和 0.87%, 平均地径为 21.53 mm, 平均选择

增益和遗传增益为 8.84% 和 5.45%; NMCF010 的平均株高为 172.22 cm, 平均选择增益和遗传增益为 5.52% 和 3.97%, 平均地径为 21.42 mm, 平均选择增益和遗传增益为 8.50% 和 5.28%; NXAM090 的平均株高为 175.94 cm, 平均选择增益和遗传增益为 7.19% 和 3.98%, 平均地径为 21.23 mm, 平均选择增益和遗传增益为 7.25% 和 4.30%。3 个优良家系株高的遗传增益范围为 0.87%~3.98%, 平均遗传增益为 2.94%, 地径遗传增益范围为 4.30%~5.45%, 平均遗传增益为 5.01%。

表 9 4 个家系的选择增益和遗传增益
Table 9 Selection gains and genetic gains of four families

家系 Family	地点 Location	株高 H			地径 DBH		
		生长量/cm Increment	选择增益/% Selection benefit	遗传增益/% Genetic gain	生长量/mm Increment	选择增益/% Selection benefit	遗传增益/% Genetic gain
LNFx002	ZQ	188.21	8.47	5.83	24.54	6.40	2.92
	XZ	134.57	-5.98	-4.14	20.72	8.32	4.88
	TZ	181.08	3.33	0.92	19.33	11.81	8.54
	均值	167.95	1.94	0.87	21.53	8.84	5.45
NMCF010	ZQ	181.48	4.59	3.16	23.07	0.04	0.02
	XZ	161.88	13.10	9.06	22.79	19.11	11.22
	TZ	173.29	-1.12	-0.31	18.39	6.35	4.59
	均值	172.22	5.52	3.97	21.42	8.50	5.28
NMCF043	ZQ	173.36	-0.09	-0.06	23.96	3.92	1.79
	XZ	173.84	21.46	14.85	17.27	-9.71	-5.70
	TZ	190.20	8.53	2.35	16.88	-2.38	-1.72
	均值	179.13	9.97	5.71	19.37	-2.72	-1.88
NXAM090	ZQ	189.48	9.20	6.33	23.81	3.27	1.50
	XZ	150.73	5.31	3.68	21.88	14.40	8.45
	TZ	187.62	7.06	1.94	18.00	4.09	2.96
	均值	175.94	7.19	3.98	21.23	7.25	4.30

2.6 元宝枫优良单株选择

以株高和地径均位于试验林的前 10% 为标准, 3 个试验林分别入选 23 株、12 株和 13 株, 合计选择优良单株 48 株, 综合入选率为 2.93%, 各

地入选单株生长性状、选择增益及遗传增益见表 10, 平均株高和地径分别为 237.36 cm 和 29.33 mm, 平均选择增益为 44.71% 和 49.33%, 平均遗传增益为 23.11% 和 30.20%。

表 10 各试验林优良单株的选择增益和遗传增益
Table 10 Selection gains and genetic gains of superior individual plants in each trial forest

造林地 Location	总株数 Total number	数量 Number	入选率/% Inclusion rate	株高/cm Height	选择增益/% Selection benefit	遗传增益/% Genetic gain	地径/mm Ground diameter	选择增益/% Selection benefit	遗传增益/% Genetic gain
ZQ	672	23	3.42	231.7	33.53	23.08	29.74	28.96	13.23
XZ	570	12	2.11	206.92	44.57	30.84	31.66	65.5	38.44
TZ	395	13	3.29	273.46	56.04	15.42	26.6	53.84	38.92
合计	1637	48	2.93	237.36	44.71	23.11	29.33	49.43	30.20

3 讨论

林木育种周期普遍较长,开展幼龄期测定是缩短周期、提升遗传改良效率的关键手段,能显著减少试验林观测工作量,简化育种流程。研究幼龄期性状可为早期选择和定向选择提供依据,对林木育种实践与林业生产具有重要价值^[17]。谢金文等^[18]以 2 年生湿地松(*Pinus elliottii*)为试材,观察不同地点的半同胞家系之间生长性状上表现出了显著差异,并应用多目标育种的综合选择方法,筛选出 3 个生长表现优良、育种值高整齐度好且具遗传增益显著的湿地松半同胞家系。王润辉等^[19]对 3 年生杉木(*Cunninghamia lanceolata*)进行测评,结合生长性状育种值和结实能力综合表现,分别筛选出生长和结实皆优亲本 22 个和 30 个。本研究以 27 个 3 年生元宝枫半同胞家系为试材,在 3 个地点营建区域试验林,测量其株高和地径,进行多点联合方差分析、生长分析和遗传参数分析;采用隶属函数评估法和平均值法对 3 个区域试验林进行选择,筛选出了 3 个在不同地点表现均佳的家系和 48 个优良单株。然而由于不同家系的生长趋势可能随树龄增长而分化^[20],而本研究材料目前尚处于幼龄速生阶段,易受环境影响,因此后期需延续多点观测,分析元宝枫家系遗传力在全生长周期的动态变化,进而优化育种策略,为其遗传改良提供依据。

林木群体的遗传变异分析是林木品种改良的前提,其种内遗传变异的广泛性、多样性是林木遗传与改良的基础^[21]。本研究通过对 27 个元宝枫半同胞家系苗木的生长性状进行方差分析,发现不同家系和不同试验地点之间存在显著或极显著的差异,3 个试验点的株高和地径表型变异显著,平均表型变异系数为 25.04%,显著高于同属的 1 年生岭南槭(*A. tutcheri*)(3.73%)^[22]和拧筋槭(*A. triflorum*)(15.94%)^[23],也明显高于云杉属的 15 年生(12.50%)和 20 年生^[24]的青海云杉(*Picea crassifolia*)以及松属的红松(*Pinus koraiensis*)(13.26%)^[25]等异属树种,与许超的前期研究(24.04%)^[12]基本一致,说明元宝枫群体内不同性状存在丰富的变异,具备遗传改良基础。遗传参数是育种工作不可或缺的重要依据,遗传力在一定程度上可以反映生长性状受遗传

控制的大小,是一个与种群遗传结构有关的动态指标^[26]。本研究中的 27 个半同胞家系在不同地点的株高家系遗传力为 0.275 1~0.691 9,平均遗传力为 0.551 8,地径的家系遗传力在 0.456 9~0.722 9 之间,平均遗传力为 0.588 9,这两个性状在较大程度上受到遗传因素的控制,并且遗传力显著高于枫香树(*Liquidambar formosana*)(0.205 9~0.472 4)^[27]、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)(0.11~0.37)^[28]、深山含笑(*Michelia maudiae*)(0.29~0.47)^[29]等阔叶树种,说明元宝枫生长受到遗传控制较强,亲本遗传信息可以较为稳定的传递给子代。

优良家系和单株选择是林业发展的关键,通过选用良种,可提高造林成活率、促进生长加速,缩短成林周期,从而实现更大的经济效益,是推动林业高效发展的有效途径。参试元宝枫的株高和地径在不同试验林、不同家系以及两者的交互间均存在显著或极显著差异,表明元宝枫的生长既受到了自身遗传物质的控制,也在一定程度上受到了不同环境因素的影响,3 个试验地点的海拔高度和土壤类型等立地条件以及年均温、年降水量等气候条件都不尽相同,这也对元宝枫的生长发育造成了不同影响,呈现出基因型与环境互作效应。

4 结论

27 个元宝枫半同胞家系的株高和地径在不同家系和不同试验地点之间存在显著或极显著的差异,株高和地径在 3 个试验林变异系数分别为 17.69%~29.49% 和 16.05%~33.35%,家系遗传力分别为 0.275 1~0.691 9 和 0.456 6~0.723 0,二者均受较高程度遗传控制。筛选出 LNFX002、NMCF010 和 NXAM090 3 个优良家系,可考虑在山东及立地条件相似的地区推广;筛选出 48 个优良单株,单株的预期遗传增益为 23.11%~30.20%。

参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1981, 46: 93-94.
- [2] Li L, Manning W J, Tong L, et al. Chronic drought stress reduced but not protected Shantung maple (*Acer truncatum* Bunge) from adverse effects of ozone (O₃) on growth and physiology in the suburb of Beijing, China[J]. Environmental Pollution, 2015,

- 201:34-41.
- [3] 王宁.野生元宝枫资源调查及种子脂肪酸评价研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [4] 王性炎,李艳菊,王姝清.食品蛋白新资源——元宝枫蛋白[J].中国油脂,2007,32(08):30-33.
- [5] 贾正民.元宝枫产品在工业上的应用[J].山西林业,2015(06):29-29.
- [6] 鲁海龙,张飞,袁榕.我国小品种油料发展现状的研究[J].粮食与食品工业,2018,25(05):1-4.
- [7] 王琨,刘少波,张娜,等.元宝枫研究进展[J].西北林学院学报,2021,36(03):7.
- [8] 杨继平,封加平,陈圣林,等.关于元宝枫产业发展的调研报告[J].中国林业产业,2021(05):5-13.
- [9] 白天道,徐立安,王章荣,等.马尾松实生种子园自由授粉子代测定及亲本家系选择增益估算[J].林业科学研究,2012,25(04):449-455.
- [10] 沈凌,魏志恒,张珉,等.无患子优株子代苗期选择及遗传参数估算[J].湖南林业科技,2022,49(05):91-96.
- [11] 苑海静,成向荣,虞木奎,等.麻栎优树自由授粉家系生长性状3地点间动态变异及优良家系选择[J].林业科学研究,2022,35(02):9-18.
- [12] 许超.元宝枫半同胞子代遗传变异与优良家系选择[D].泰安:山东农业大学,2017.
- [13] Diao S, Hou Y, Xie Y, 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.
- [14] 张杰,顾宸瑞,李慧玉,等.白桦四倍体半同胞家系生长和材性性状的变异及选择[J].东北林业大学学报,2024,52(10): 7-14+26.
- [15] 程万才,王福德,熊欢欢,等.大兴安岭地区兴安落叶松优良家系选择[J].林业科技,2024,49(04):19-22.
- [16] 李祉漪,战昊,张家榕,等.不同种源蒙古栎种子及其苗期生长性状变异研究[J].西北林学院学报,2023,38(01):73-79.
- [17] 孙晓梅,杨务艳.林木育种值预测方法的应用与分析[J].北京林业大学学报,2011,33(02):65-71.
- [18] 谢金文,靳藏馥,张露,等.基于多点试验的湿地松半同胞家系早期选择研究[J].江西农业大学学报,2025,47(02): 414-425.
- [19] 王润辉,胡德活,韦如萍,等.杉木育种亲本生长和结实性状早期测评与选择[J].热带亚热带植物学报,2022,30(02): 195-201.
- [20] 付强,黄桂华,周强,等.柚木无性系早期选择年龄的研究[J].中南林业科技大学学报,2022,42(10): 30-38.
- [21] Yuan J, Han Y J, Dong M F, et al. Assessment of genetic diversity and relationships among *Osmanthus fragrans* cultivars using AFLP markers[J].Electronic Journal of Biotechnology,2011,14(1):2-3.
- [22] 吴培培,孙冰,罗水兴,等.岭南槭不同种源家系种子形态和幼苗生长变异[J].林业科学研究,2017,30(06):1015-1021.
- [23] 李娜.拧筋槭优树选择及扦插繁育技术研究[D].长春:吉林农业大学,2022.
- [24] 陈雅丽.青海云杉半同胞优良家系选择及重要性状全基因组关联分析[D].北京:北京林业大学2021.
- [25] 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.
- [26] 王佳兴,闫平玉,孙佰飞,等.长白落叶松自由授粉家系生长变异及优良家系早期选择[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(05):81-89.
- [27] 贾晨,辜云杰,夏川,等.枫香半同胞家系子代测定及优良家系选择[J].西部林业科学,2014,43(05): 122-128.
- [28] 陈兴彬,涂圣勇,宋晓琛,等.青冈种源家系幼龄期生长变异及早期选择研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2023, 43(05): 1-7.
- [29] 章允清.深山含笑优树的子代测定及速生优良家系选择[J].亚热带农业研究,2023,19(01):44-49.