

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2021.60610

谢影, 于海洋, 庞忠义, 张明, 于海洋, 张世凯, 赵曦阳. 东北地区 6 种槭属植物种子表型多样性分析及优良家系选择[J]. 植物科学学报, 2021,39(6): 610-619

Xie Y, Yu HY, Pang ZY, Zhang M, Yu HY, Zhang SK, Zhao XY. Phenotypic diversity analysis and superior family selection of seed traits in six *Acer* species in northeast China[J]. *Plant Science Journal*, 2021,39(6): 610-619

东北地区 6 种槭属植物种子表型多样性分析及优良家系选择

谢影¹, 于海洋², 庞忠义³, 张明⁴, 于海洋¹, 张世凯¹, 赵曦阳^{1*}

(1. 东北林业大学林木遗传育种国家重点实验室, 哈尔滨 150040; 2. 吉林省红石林业局, 吉林桦甸 132405; 3. 国有新民市机械林场, 沈阳 110300; 4. 四平市林业科学研究院, 吉林四平 136000)

摘要: 槭属(*Acer*)植物种类多, 分布广, 集药用、观赏等经济价值于一体。为探析槭属种子的表型分化程度和遗传变异规律, 本文对槭属 6 个树种的种子进行了测定分析。结果显示: 槭属种子性状在种间和种内均存在显著差异($P < 0.05$), 各性状的种间变异系数为 9.72% ~ 42.30%, 各性状遗传力均值为 0.56 ~ 0.97; 除翅宽与空壳率外, 其他表型性状之间均呈极显著正相关; 通过 UPGMA 聚类分析, 可将 6 个槭属树种划分为 3 类; 主成分分析结果表明, 两个主成分的累计贡献率达 75.981%。通过多性状综合评价法, 以 10% 的入选率筛选出 6 个优良家系, 其千粒重性状的遗传增益均超过 10%, 筛选出的优良材料可为东北地区槭属种质资源的保护及开发利用奠定基础。

关键词: 槭属; 种子性状; 表型变异; 遗传增益; 选择

中图分类号: S792.35

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2021)06-0610-10

Phenotypic diversity analysis and superior family selection of seed traits in six *Acer* species in northeast China

Xie Ying¹, Yu Hai-Yang², Pang Zhong-Yi³, Zhang Ming⁴, Yu Hai-Yang¹,
Zhang Shi-Kai¹, Zhao Xi-Yang^{1*}(1. *State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;*
2. *Jilin Hongshi Forestry Bureau, Huadian, Jilin 132405, China;* 3. *State-owned Xinmin City Machinery Forest Farm, Shenyang 110300, China;* 4. *Forestry Institute of Siping City, Siping, Jilin 136000, China*)

Abstract: *Acer* is a widely distributed genus containing many important medicinal and ornamental species. Thus, evaluating the germplasm resources of different *Acer* species is important. In this study, seed phenotypic traits of six *Acer* species (*A. mono* Maxim, *A. mandshuricum* Maxim, *A. tegmentosum* Maxim, *A. ginnala* Maxim, *A. triflorum* Komarov, and *A. pseudosieboldianum* (Pax) Komarov) were measured and analyzed to explore the relationships among different species. Variance analysis indicated that all investigated traits were significantly different among and within species ($P < 0.05$). Phenotypic variation coefficients and heritability of different traits ranged from 9.72% – 42.30% and 0.56 – 0.97, respectively. Correlation analysis indicated that all coefficients were positive and significant, except for that between wing width and shell rate. Cluster analysis showed that the six *Acer* species were clustered into three groups. Principal component analysis showed that the

收稿日期: 2021-04-30, 修回日期: 2021-08-01。

基金项目: 黑龙江省应用技术研究及开发技术项目(GA20B402)。

This work was supported by a grant from the Heilongjiang Province Applied Technology Research and Development Technology Project (GA20B402).

作者简介: 谢影(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为槭树遗传改良(E-mail: xieying128@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: zhaoxyphd@163.com)。

cumulative contribution rate of the first two principal components was 75.981%, indicating that these components contained most of the information on the investigated traits of the samples. According to multi-trait comprehensive evaluation, with the rate of 10%, six excellent families were selected, and the genetic gains for kilo-seed weight traits were above 11%. This research provides a basis for the protection, development, and utilization of *Acer* germplasm resources in northeast China.

Key words: *Acer*; Seed traits; Phenotypic variation; Genetic gains; Selection

槭树科 (Aceraceae) 槭属 (*Acer*) 植物在全世界约有 200 种, 主要分布于北半球的温带地区。我国是世界上槭属植物种质资源最为丰富的国家, 约有 140 余种, 分布于海拔 50 ~ 4000 m 的地区, 其中东北地区有 28 种 (黑龙江 9 种, 吉林 9 种, 辽宁 10 种)^[1]。槭属植物多为高大乔木, 树干笔直、木材优质, 是优良的建筑用材。同时, 槭属植物叶色绚丽多彩, 深得人们喜爱, 在风景园林建设中也有广泛应用^[2]。研究发现, 槭属种子蕴含丰富的衍生物和生物活性化合物^[3]。唐雯等^[4]研究发现毛果槭 (*A. nikoense* Maxim) 提取物在治疗眼疾方面具有良好效果。茶条槭 (*A. ginnala* Maxim) 中的没食子酸具有抗菌抗氧化活性和良好的消炎作用^[5], 元宝枫 (*A. truncatum* Bunge) 叶中含有多种活性物质, 如黄酮、绿原酸等, 可制作成茶饮^[6]。槭属植物具有营养、药用和经济价值等多重价值, 在医疗保健、建材化工等领域开发和应用前景广阔^[7]。

表型变异是遗传和环境因素双重作用的结果, 而表型多样性是研究种群在其分布区内各种环境因素作用下的表型变异, 是生物多样性与生物系统学的重要研究内容^[8]。目前, 国内外学者已对鸡爪槭 (*A. palmatum* Thunb.)^[9]、三裂枫 (*A. calcareatum* Gagnepain)^[8]、白皮松 (*Pinus bungeana* Zucc. ex Endl.)^[10]、云杉 (*Picea asperata* Mast.)^[11]、脱皮榆 (*Ulmus lamellosa* Wang et S. L. Chang ex L. K. Fu)^[12]、油杉 (*Keteleeria fortunei* (Murr.) Carr.)^[13]、无患子 (*Sapindus saponaria* L.)^[14]等树种的表型多样性进行了研究, 但关于东北槭属植物种质资源的表型多样性研究较少。长期以来, 槭属植物资源不断受到自然因素和人类活动的干扰, 导致种群存量资源锐减, 分布地域更加狭窄。目前部分物种已处于濒危状态, 亟需对其进行遗传基因的保存和自然群体的保护^[15]。

本研究以我国东北地区白牛槭 (*A. mandshuricum* Maxim)、青楷槭 (*A. tegmentosum* Maxim)、茶条槭、拧筋槭 (*A. triflorum* Komarov)、假色槭 (*A. pseudosieboldianum* (Pax) Komarov) 及色木槭 (*A. mono* Maxim) 等 6 个树种的天然种群为研究对象, 对种子的多个表型性状进行测定分析, 并进行优良家系的选择, 旨在了解槭属各树种种子表型变异程度与变异规律, 为槭属资源的保护、合理利用提供科学的理论依据, 同时为东北地区槭属植物的优良家系选择提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料采集

本实验材料来源于吉林省桦甸市天然林区, 北纬 42°34' ~ 43°29', 东经 126°16' ~ 127°45'。林区年平均降水量 748.1 mm, 雨量多集中在 7 月、8 月。初霜多在 9 月下旬, 山区初霜期在 9 月上旬, 终霜期一般在 5 月中旬, 山区可能延迟到 5 月末或 6 月初。无霜期约 125 d, 山区约 110 d。年均降雪时长达 6 个月。2020 年 10 月对当地槭属 6 个树种进行种子采集 (图 1), 每个树种采集 10 个家系, 共计 60 个家系, 每个家系采集 500 粒以上种子。将采集的种子放入透气网袋并做好标记, 带



1: 拧筋槭; 2: 白牛槭; 3: 青楷槭; 4: 假色槭; 5: 色木槭; 6: 茶条槭。

1: *A. triflorum*; 2: *A. mandshuricum*; 3: *A. tegmentosum*; 4: *A. pseudosieboldianum*; 5: *A. mono*; 6: *A. ginnala*.

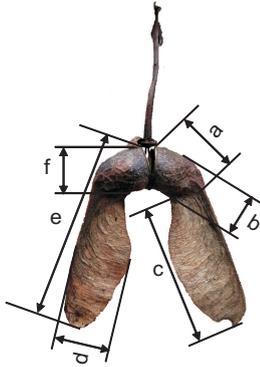
图 1 槭属 6 个种的种子形态特征

Fig. 1 Morphological characteristics of seeds of six species of *Acer*

回实验室进行测定分析。

1.2 测定方法

待种子自然风干后,根据罗建勋等^[16]的方法对不同树种的种长(Seed length, SL)、种宽(Seed width, SW)、种厚(Seed thickness, ST)、着生痕(Bear the mark, BTM)、翅长(Key length, KL)、翅宽(Key width, KW)、翅果长(Key fruit length, KFL)、千粒重(Kilo-seed weight, KSW)、空壳率(Shell rate, SR)共9个表型性状进行测定。具体测定方法为每个家系随机选取形态完整的30颗种子,用游标卡尺测量种长、种宽、种厚、着生痕、翅长、翅果长和翅宽共7个种子性状(图2),用电子天平测定种子千粒重,手工去壳测定种子空壳率。



a. 种长; b. 种宽; c. 翅长; d. 翅宽; e. 翅果长; f. 着生痕。
a. Seed length; b. Seed width; c. Key length; d. Key width; e. Key fruit length; f. Bear the mark.

图2 种子性状的测定方法(以白牛槭为例)

Fig. 2 Measurement methods of each seed trait (e.g., *Acer mandshuricum*)

1.3 统计方法

测定数据统一使用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 软件进行整理分析,方差分析中的空壳率指标反正弦转换后进行。

不同树种间方差分析模型为^[17]:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + e_{ij} \quad (1)$$

式中: μ 为总体均值, T_i 为树种效应, e_{ij} 为环境误差。

种内不同家系间方差分析模型为^[17]:

$$Y_{ij} = \mu + F_i + e_{ij} \quad (2)$$

式中: μ 为总体均值, F_i 为家系效应, e_{ij} 为环境误差。

家系遗传力(H^2)采用公式^[17]:

$$H^2 = \frac{\sigma^2_F}{\sigma^2_F + \sigma^2_e/N} \quad (3)$$

式中: σ^2_F 为家系的方差分量, σ^2_e 为随机误差的方差分量, N 为重复数。

表型变异系数(PCV)采用公式^[18]:

$$PCV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: S 为表型的标准差, \bar{X} 为性状的平均值。

表型相关分析 r_{p12} 采用公式^[19]:

$$r_{p12} = \frac{Cov_{p12}}{\sqrt{\sigma^2_{p1}\sigma^2_{p2}}} \quad (5)$$

式中: Cov_{p12} 为2个性状的表型协方差, σ^2_{p1} 、 σ^2_{p2} 为2个性状的表型方差。

采用布雷金多性状综合评价法^[20]对树种进行综合评定,采用公式:

$$Q_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n a_j} \quad (6)$$

式中: $a_j = X_{ij} / X_{jmax}$, X_{ij} 某一性状的平均值, X_{jmax} 为某一性状的最优值。

遗传增益采用公式^[21]:

$$\Delta G = R\Delta W/\bar{X} \times 100\% \quad (7)$$

式中: ΔG 为遗传增益, R 为性状的遗传力, ΔW 为选择差, \bar{X} 为某一性状的平均值。

2 结果和分析

2.1 均值分析

槭属6个种的种子性状均值见表1。拧筋槭除了空壳率(39.10%)外,其他性状在槭属不同种中均为最大值;白牛槭空壳率最高(72.85%),茶条槭的种长(4.99 mm)、种厚(1.97 mm)、种宽(4.39 mm)、千粒重(24.85 g)和空壳率(13.33%)的均值最小;假色槭具有最小的翅果长(22.19 mm);青楷槭的着生痕(4.16 mm)最小。

2.2 方差分析

从种间来看,各种子性状差异均达到了极显著水平($P < 0.01$);从种内来看,除了白牛槭、茶条槭、青楷槭及拧筋槭的种长和白牛槭的翅果长的差异不显著外,其他性状均的差异均达到了显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)水平(表2)。

2.3 表型变异分析

各树种种子就性状而言,空壳率的表型变异系数均值最大(42.30%),翅果长的表型变异系数均值最小(9.72%)。就树种而言,白牛槭的种厚(7.79%)、种宽(7.22%)、着生痕(7.38%)、空壳

表1 均值及标准差
Table 1 Mean and standard deviation of different traits

树种 Species	均值及标准差 Mean ± SD				
	种长(mm) SL	种厚(mm) ST	种宽(mm) SW	着生痕(mm) BTM	翅长(mm) KL
白牛槭 <i>A. mandshuricum</i>	8.15 ± 0.63	6.70 ± 0.52	6.71 ± 0.48	6.79 ± 0.50	25.30 ± 2.62
茶条槭 <i>A. ginnala</i>	4.99 ± 0.36	1.97 ± 0.25	4.39 ± 0.38	5.10 ± 0.65	21.28 ± 2.25
假色槭 <i>A. pseudosieboldianum</i>	5.43 ± 0.69	4.61 ± 0.39	5.70 ± 0.54	5.87 ± 0.58	16.55 ± 1.80
拧筋槭 <i>A. triflorum</i>	10.67 ± 1.33	6.74 ± 0.62	9.64 ± 1.01	7.69 ± 0.85	28.34 ± 3.65
青楷槭 <i>A. tegmentosum</i>	8.89 ± 0.73	2.71 ± 0.58	6.13 ± 0.71	4.16 ± 0.71	19.62 ± 1.00
色木槭 <i>A. mono</i>	8.67 ± 0.89	2.05 ± 0.42	6.75 ± 1.17	5.39 ± 0.71	18.67 ± 2.17

树种 Species	均值及标准差 Mean ± SD			
	翅宽(mm) KW	翅果长(mm) KFL	千粒重(g) KSW	空壳率(%) SR
白牛槭 <i>A. mandshuricum</i>	10.03 ± 1.29	33.64 ± 3.18	87.24 ± 0.13	39.10 ± 18.68
茶条槭 <i>A. ginnala</i>	10.35 ± 1.03	28.95 ± 2.27	24.85 ± 0.06	50.65 ± 14.51
假色槭 <i>A. pseudosieboldianum</i>	7.96 ± 1.20	22.19 ± 2.22	37.40 ± 0.14	72.85 ± 12.72
拧筋槭 <i>A. triflorum</i>	13.15 ± 1.74	35.96 ± 4.81	196.45 ± 0.19	30.90 ± 15.85
青楷槭 <i>A. tegmentosum</i>	9.16 ± 0.95	27.33 ± 2.06	43.09 ± 0.12	13.15 ± 6.27
色木槭 <i>A. mono</i>	8.77 ± 1.09	25.95 ± 2.62	44.08 ± 0.15	21.15 ± 14.37

表2 种间和种内方差及随机误差
Table 2 Variance analysis among and within species

变异来源 Variation source	性状 Trait	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	显著性 P
假色槭 <i>A. pseudosieboldianum</i>	种长 SL	12.978	9	1.442	8.407	0
	种厚 ST	3.394	9	0.377	4.455	0.001
	种宽 SW	7.665	9	0.852	5.774	0
	着生痕 BTM	7.627	9	0.847	6.650	0
	翅长 KL	75.943	9	8.438	8.384	0
	翅宽 KW	44.717	9	4.969	16.087	0
	翅果长 KFL	153.274	9	17.030	14.597	0
	千粒重 TSW	2796.088	9	310.676	334.217	0
	空壳率 SR	0.796	9	0.088	42.497	0
色木槭 <i>A. mono</i>	种长 SL	21.421	9	2.678	5.102	0.001
	种厚 ST	3.516	9	0.439	5.162	0.001
	种宽 SW	30.315	9	3.789	5.494	0
	着生痕 BTM	8.946	9	1.118	5.374	0
	翅长 KL	128.122	9	16.015	8.109	0
	翅宽 KW	25.989	9	3.249	8.800	0
	翅果长 KFL	150.814	9	18.852	5.007	0.001
	千粒重 TSW	1768.279	9	221.035	37.848	0
	空壳率 SR	0.958	9	0.120	14.864	0
白牛槭 <i>A. mandshuricum</i>	种长 SL	4.418	9	0.491	0.981	0.475
	种厚 ST	3.924	9	0.436	6.649	0
	种宽 SW	4.422	9	0.491	2.930	0.013
	着生痕 BTM	4.976	9	0.553	3.262	0.007
	翅长 KL	120.825	9	13.425	2.622	0.023
	翅宽 KW	29.739	9	3.304	3.320	0.006
	翅果长 KFL	167.742	9	18.638	1.690	0.135
	千粒重 TSW	8715.610	9	968.401	113.203	0
	空壳率 SR	0.861	9	0.096	6.360	0

续表 2

变异来源 Variation source	性状 Trait	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	显著性 P
茶条槭 <i>A. ginnala</i>	种长 SL	1.636	9	0.182	1.406	0.231
	种厚 ST	1.545	9	0.172	3.599	0.004
	种宽 SW	2.735	9	0.304	3.307	0.007
	着生痕 BTM	13.300	9	1.478	11.182	0
	翅长 KL	101.587	9	11.287	5.154	0
	翅宽 KW	23.883	9	2.654	12.655	0
	翅果长 KFL	121.883	9	13.543	4.063	0.002
	千粒重 TSW	263.134	9	29.237	38.028	0
	空壳率 SR	0.064	9	0.007	2.348	0.039
拧筋槭 <i>A. triflorum</i>	种长 SL	62.392	9	6.932	9.119	0
	种厚 ST	10.868	9	1.208	8.623	0
	种宽 SW	36.320	9	4.036	7.855	0
	着生痕 BTM	21.312	9	2.368	5.638	0
	翅长 KL	364.536	9	40.504	2.233	0.048
	翅宽 KW	128.336	9	14.260	7.869	0
	翅果长 KFL	808.102	9	89.789	3.960	0.002
	千粒重 TSW	22471.510	9	2496.834	39.291	0
	空壳率 SR	1.451	9	0.161	17.272	0
青楷槭 <i>A. tegmentosum</i>	种长 SL	8.468	9	0.941	2.174	0.054
	种厚 ST	9.628	9	1.070	10.145	0
	种宽 SW	12.681	9	1.409	7.192	0
	着生痕 BTM	13.226	9	1.470	3.624	0.004
	翅长 KL	84.074	9	9.342	3.106	0.009
	翅宽 KW	143.691	9	15.966	36.672	0
	翅果长 KFL	167.709	9	18.634	3.714	0.003
	千粒重 TSW	1265.434	9	140.604	16.594	0
	空壳率 SR	0.437	9	0.049	7.691	0
种间 Among species	种长 SL	7157.441	5	1431.488	2101.915	0
	种厚 ST	7383.842	5	1476.768	6413.850	0
	种宽 SW	5563.807	5	1112.761	1868.534	0
	着生痕 BTM	3018.361	5	603.672	1301.475	0
	翅长 KL	29225.143	5	5845.029	913.582	0
	翅宽 KW	4914.967	5	982.993	625.176	0
	翅果长 KFL	38244.017	5	7648.803	544.738	0
	千粒重 TSW	830227.048	5	166045.410	961.418	0
	空壳率 SR	12.770	5	2.554	90.981	0
随机误差 Random error	种长 SL	8379.227	1799	—	—	—
	种厚 ST	7800.719	1799	—	—	—
	种宽 SW	6632.181	1799	—	—	—
	着生痕 BTM	3850.485	1799	—	—	—
	翅长 KL	40271.816	1799	—	—	—
	翅宽 KW	7735.757	1799	—	—	—
	翅果长 KFL	63433.508	1799	—	—	—
	千粒重 TSW	870640.918	239	—	—	—
	空壳率 SR	19.338	239	—	—	—

注：种长、种宽、种厚、着生痕、翅长、翅宽、翅果长的单位为“mm”；千粒重的单位为“g”。

Notes: Unit of SL, SW, ST, BTM, KL, KFL, KW is “mm”; Unit of KSW is “g”.

率(17.46%)的表型变异系数最小;茶条槭的种长(7.14%)、翅宽(9.95%)、千粒重(11.43%)的表型变异系数最小;青楷槭的种厚(21.37%)、着生痕(16.95%)的表型变异系数最大,而其翅长(10.19%)和翅果长(7.55%)的表型变异系数最小;拧筋槭的种长(12.45%)、翅长(12.88%)、翅果长(13.38%)的表型变异系数最大;假色槭的翅宽(15.03%)、千粒重(22.75%)、空壳率(67.95%)的表型变异系数最大;色木槭的种宽(17.37%)的表型变异系数最大(表 3)。

2.4 不同树种各性状的遗传力分析

不同树种的遗传力分析见表 4。就种子表型性

状而言,各性状遗传力均值大小依次为:千粒重(0.97) > 翅宽(0.88) > 空壳率(0.86) > 种厚(0.82) > 着生痕(0.80) > 种宽(0.79) > 翅长(0.74) > 翅果长(0.73) > 种长(0.56)。就树种而言,假色槭种子性状的遗传力较大,均超过 0.78。

2.5 槭属不同种间性状相关性分析

对不同表型性状进行相关性分析与检验,结果发现,种宽与千粒重存在极显著正相关;翅长分别与翅宽、翅果长极显著正相关;种长与种宽存在显著正相关关系;种厚与着生痕显著正相关;千粒重与着生痕、翅长、翅宽均达到显著正相关水平(表 5)。

表 3 树种内不同性状的表型变异

Table 3 Phenotypic variation of different characters within tree species

树种 Species	表型变异系数 PCV(%)								
	种长 SL	种厚 ST	种宽 SW	着生痕 BTM	翅长 KL	翅宽 KW	翅果长 KFL	千粒重 TSW	空壳率 GR
白牛槭 <i>A. mandshuricum</i>	7.78	7.79	7.22	7.38	10.35	12.95	9.46	17.39	17.46
茶条槭 <i>A. ginnala</i>	7.14	12.52	8.71	12.83	10.59	9.95	7.83	11.43	46.85
假色槭 <i>A. pseudosieboldianum</i>	12.70	11.11	12.06	13.83	10.85	15.03	10.00	22.75	67.95
拧筋槭 <i>A. triflorum</i>	12.45	9.15	10.48	11.07	12.88	13.24	13.38	12.73	47.79
青楷槭 <i>A. tegmentosum</i>	8.17	21.37	11.60	16.95	10.19	10.35	7.55	14.49	43.50
色木槭 <i>A. mono</i>	10.26	20.75	17.37	13.20	11.60	12.44	10.10	17.82	30.23
均值 Average	9.75	13.78	11.24	12.54	11.08	12.33	9.72	16.10	42.30

表 4 不同树种各性状的遗传力

Table 4 Heritability of various characters of different tree species

树种 Species	遗传力 H^2								
	种长 SL	种厚 ST	种宽 SW	着生痕 BTM	翅长 KL	翅宽 KW	翅果长 KFL	千粒重 TSW	空壳率 GR
白牛槭 <i>A. mandshuricum</i>	-	0.85	0.66	0.69	0.62	0.70	0.41	0.99	0.84
茶条槭 <i>A. ginnala</i>	0.29	0.72	0.70	0.91	0.81	0.92	0.75	0.97	0.57
假色槭 <i>A. pseudosieboldianum</i>	0.88	0.78	0.83	0.85	0.88	0.94	0.93	0.99	0.98
拧筋槭 <i>A. triflorum</i>	0.89	0.88	0.87	0.82	0.55	0.87	0.75	0.97	0.94
青楷槭 <i>A. tegmentosum</i>	0.54	0.90	0.86	0.72	0.68	0.97	0.73	0.94	0.87
色木槭 <i>A. mono</i>	0.80	0.81	0.82	0.81	0.88	0.89	0.80	0.97	0.93
均值 Average	0.56	0.82	0.79	0.80	0.74	0.88	0.73	0.97	0.86

表 5 槭属种子性状相关性分析

Table 5 Correlation analysis of seed traits in *Acer*

性状 Trait	种长 SL	种厚 ST	种宽 SW	着生痕 BTM	翅长 KL	翅宽 KW	翅果长 KFL	千粒重 TSW
种厚 ST	0.412							
种宽 SW	0.879*	0.668						
着生痕 BTM	0.397	0.873*	0.736					
翅长 KL	0.598	0.700	0.694	0.749				
翅宽 KW	0.553	0.513	0.687	0.660	0.923**			
翅果长 KFL	0.604	0.633	0.640	0.670	0.991**	0.897*		
千粒重 KSW	0.740	0.766	0.935**	0.840*	0.861*	0.867*	0.801	
空壳率 SR	0.486	0.533	0.408	0.475	0.448	0.113	0.484	0.320

注: * 显著相关($P < 0.05$); ** 极显著相关($P < 0.01$)。

Notes: * means correlation is significant at 0.05 level; ** means correlation is significant at 0.01 level.

2.6 聚类分析

基于种子性状指标, 运用非加权配对算数平均法(UPGMA)对槭属 6 个树种进行聚类分析。结果表明, 在欧氏距离为 5 时, 6 个槭属树种可划分为 3 类, 第 1 类包括色木槭、青楷槭、假色槭及茶条槭, 第 2 类为白牛槭, 拧筋槭为第 3 类(图 3)。

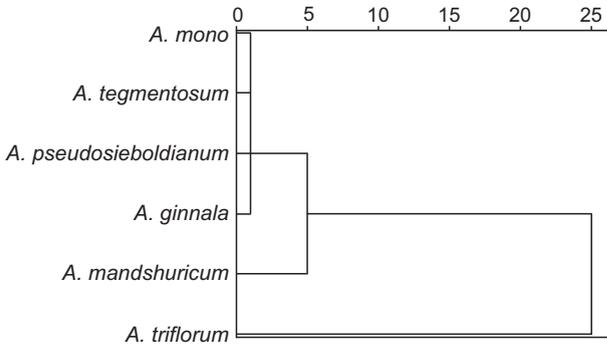


图 3 基于 9 个表型性状的槭属树种的 UPGMA 分析
Fig. 3 UPGMA analysis of *Acer* species based on nine phenotypic traits

2.7 主成分分析

对各性状进行主成分分析, 结果显示, 主成分 I 的特征值为 5.788, 贡献率为 64.311%, 千粒重、种宽、翅长等性状特征值较高, 分别为 0.920、0.899 和 0.892; 主成分 II 特征值为 1.050, 贡献率为 11.670%, 空壳率的特征值较高, 为 0.817。两个主成分的累计贡献率为 75.981%, 包含了供试家系生长及形质性状的绝大部分信息(表 6)。

2.8 优良家系评价选择

基于主成分分析及相关性分析结果, 以种宽、

表 6 各性状主成分分析

Table 6 Principal component analysis of different traits

主要成分因子 Principal component factor	主成分 I Component I	主成分 II Component II
特征值 Eigenvalue	5.788	1.050
贡献率 Contribution(%)	64.311	11.670
累计贡献率 Cumulative contribution(%)	64.311	75.981
种长 SL	0.788	0.124
种厚 ST	0.810	0.259
种宽 SW	0.899	0.058
着生痕 BTM	0.886	0.030
翅长 KL	0.892	-0.156
翅宽 KW	0.794	-0.425
翅果长 KFL	0.668	-0.291
千粒重 TSW	0.920	-0.083
空壳率 SR	0.443	0.817

翅长、千粒重和空壳率等 4 个性状为指标对各家系进行综合评价, 其中, 空壳率采用获得参数的相反数进行评价。 Q_i 值是多性状综合评价得分, 其数值越大, 代表整体表现越好。由表 7 可知, 各树种内 Q_i 值最大的家系分别为: 白牛槭 3 号、茶条槭 19 号、假色 13 号、拧筋槭 22 号、青楷槭 21 号和色木槭 2 号。因此, 这 6 个家系是槭属各树种表现优良的家系。

2.9 遗传增益分析

对 6 个优良家系的 4 个性状(种宽、翅长、千粒重及空壳率)进行遗传增益分析, 结果发现, 色木槭 2 号的种厚遗传增益最大(14.54%), 青楷槭 21 号的翅宽遗传增益最大(8.87%), 白牛槭 3 号的千粒重遗传增益最大(43.72%)(表 8)。另外, 就空壳率而言, 色木槭的空壳率增益效果最优, 其种

表 7 树种内各家系的 Q_i 值

Table 7 Q_i values of each family within tree species

白牛槭 <i>A. mandshuricum</i>	Q_i	茶条槭 <i>A. ginnala</i>	Q_i	假色槭 <i>A. pseudosieboldianum</i>	Q_i	拧筋槭 <i>A. triflorum</i>	Q_i	青楷槭 <i>A. tegmentosum</i>	Q_i	色木槭 <i>A. mono</i>	Q_i
3	2.186	19	2.665	13	2.374	22	2.455	21	2.617	2	2.164
4	1.973	24	2.179	30	2.361	14	2.431	29	2.121	12	2.144
10	1.86	12	2.088	15	2.328	16	2.417	1	2.091	16	2.132
8	1.76	2	2.057	25	2.159	5	2.23	23	2.061	4	2.102
18	1.732	25	2.039	11	1.961	2	2.177	2	2.051	9	2.083
11	1.624	10	1.912	20	1.929	4	2.081	19	1.966	8	1.914
15	1.55	13	1.883	7	1.905	15	2.072	16	1.965	14	1.909
16	1.453	26	1.834	2	1.701	1	1.969	18	1.902	10	1.805
7	1.32	30	1.825	26	1.648	17	1.902	25	1.703	18	1.511
17	1.303	8	1.742	10	1.623	19	1.442	27	1.591	1	1.388

注: 各树种下面的数字代表该树种对应的具体的单株编号。

Note: Numbers below each tree species represent specific individual number corresponding to tree species.

子空壳概率降低了42.02%。同时,我们发现,假色槭13号家系的种厚、翅宽与色木槭2号家系的翅宽的遗传增益皆为负值,原因可能是假色槭和色木槭的种子表型变异相对较小,导致性状的选择差为负值,即家系内表型差异大于家系间表型差异。

表8 优良家系性状的遗传增益

Table 8 Genetic gain of each trait in superior families

各树种优良家系 Superior family of different species	遗传增益 Genetic gain (%)			
	种宽 SW	翅长 KL	千粒重 KW	空壳率 GR
白牛槭 3 <i>A. mandshuricum</i>	5.66	6.25	43.73	-3.29
茶条槭 19 <i>A. ginnala</i>	6.04	1.57	22.93	-34.21
假色槭 13 <i>A. pseudosieboldianum</i>	-12.66	-7.76	17.93	-30.81
拧筋槭 22 <i>A. triflorum</i>	2.33	2.22	16.91	-20.68
青楷槭 21 <i>A. tegmentosum</i>	7.08	8.88	22.40	-36.01
色木槭 2 <i>A. mono</i>	14.54	-3.67	11.06	-42.02
均值 Average	3.83	1.25	22.49	-27.84

3 讨论

遗传和变异是林木育种研究的主要内容^[22],其中,变异的来源、特点和规律是进行树种改良的重要基础。本研究发现,槭属不同种的种子表型性状均存在一定差异,其中拧筋槭种子的表型均值最大,翅果最长,有利于种子传播与子代的繁衍^[23]。方差分析结果显示,槭属种子在种间和种内不同家系间均存在显著差异,表明实验材料差异较大,与乔谦等^[24]对槭属种子的分析结果一致,为槭属优良种与家系的选择提供了基础。而假色槭、色木槭和青楷槭的种子所有表型性状均达极显著差异水平,表明这3个树种均具有较为丰富的遗传基础,遗传改良潜力更大。

变异系数(CV)可以评价不同性状间的变异程度,CV越大,表明性状的离散程度越大。本研究显示,槭属不同种的种子的平均表型变异系数变化范围为9.72%~42.30%,表明槭属种子表型性状整体离散程度较高,存在丰富的变异,与武艳虹^[25]对茶条槭的研究结果相似。种子空壳率的平均表型性状变异系数(42.30%)最大,说明槭属种子授粉与后期发育情况差异较大。槭属翅果长的表型变异系数(9.72%)最小,与梓叶槭(*A. catalpifolium* Rehd.)^[26]和五角枫(又名色木槭)^[27]的相关研究结果不同,这可能与研究材料差异、实验地点不同有关。

植物种子的形态受地理气候、生境条件、个体发育差异等多重因素的影响,在长期的自然选择下,种子性状存在丰富的表型多样性^[23]。对于槭属不同种而言,假色槭种子各性状平均表型变异系数最大(19.59%),表明假色槭种子对环境较敏感;而白牛槭种子各性状平均表型变异系数最小(10.86%),说明其种子表型较稳定,受环境影响较小。

遗传力表示亲本的某一性状遗传给子代能力的大小,是估算遗传增益的重要参数^[27]。本研究中,各性状遗传力变化范围为0.56~0.97,属于中高遗传力,而高变异系数和高遗传力有利于进行优良种和种源的评价选择。

在林木表型多样性研究中,性状之间的相关性十分重要^[28]。除翅宽和空壳率外,槭属种子表型性状两两之间均呈极显著正相关,表明种子发育过程中,各指标相互关联,进一步表明多指标测定评价的重要意义。通过聚类分析,可将槭属6个种划分为3类,不同类群种子表型具有不同特点,可为东北地区槭树分类提供一定的理论依据。

槭树是东北地区分布较为广泛的秋季观叶树种,过去几十年,由于过度采伐,槭树种群结构持续衰退,对其进行种质资源收、保护、评价意义重大^[29,30]。本研究通过对不同树种家系的评价,初步选出6个优良家系,其千粒重的遗传增益均超10%,与樟树(*Cinnamomum camphora* (L.) Presl.)中的研究结果相近^[31]。这些优良家系可以为东北地区槭树良种选育提供基础,但该研究只局限于种子研究,还需进一步对种子的发芽特性、苗木生长特性、抗逆性等进行综合评价。

4 结论

本研究以东北地区白牛槭、青楷槭、茶条槭、拧筋槭、假色槭及色木槭为材料,对其种子进行表型测定与变异分析,结果表明:

(1)不同种间、种内方差分析达显著水平,表型变异系数范围为9.72%~42.30%,遗传力范围为0.56~0.97;

(2)聚类分析可将槭属6个种划分为3类:第1类包括色木槭、青楷槭、假色槭与茶条槭,第2类为白牛槭,第3类为拧筋槭;

(3)通过综合评价,初选出6个优良家系(白

牛槭 3 号、茶条槭 19 号、假色槭 13 号、拧筋 22 号、青楷槭 21 号和色木槭 2 号), 他们的千粒重遗传增益整体较大, 均超过 10%。

参考文献:

- [1] 刘利. 槭属植物资源的药食功效及其利用研究[J]. 食品研究与开发, 2007(1): 172-175.
Liu L. The medicine and edible functions and the study exploitation progress of *Acer* plants[J]. *Food Research and Development*, 2007(1): 172-175.
- [2] 王丽敏. 甘肃省天水市槭树科园林应用观赏植物资源简介[J]. 特种经济动植物, 2020, 23(1): 11-13.
Wang LM. Introduction of *Aceraceae* ornamental plant resources in Tianshui city of Gansu Province[J]. *Special Economic Animals and Plants*, 2020, 23(1): 11-13.
- [3] 李倩中, 刘晓宏, 苏家乐. 我国槭树科植物研究进展[J]. 江苏农业科学, 2008(6): 184-186.
Li QZ, Liu XH, Su JL. Research progress of *Aceraceae* in China[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2008(6): 184-186.
- [4] 唐雯, 王建军, 徐家星, 王俐, 黄静, 陈勇. 槭树科药用植物的化学成分研究进展[J]. 北方园艺, 2012(18): 194-200.
Tang W, Wang JJ, Xu JX, Wang L, Huang J, Chen Y. Advances of chemical composition of medicinal plants in *Aceraceae*[J]. *Northern Horticulture*, 2012(18): 194-200.
- [5] 齐凤慧, 陈思齐, 景天忠, 张宇昕, 詹亚光. 真菌诱导子对茶条槭细胞没食子酸积累的影响[J]. 植物研究, 2018, 38(6): 948-955.
Qi FH, Cheng SQ, Jing TZ, Zhang YX, Zhan YG. Effect of fungal elicitor on gallic acid accumulation in the cells of *Acer ginnala*[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2018, 38(6): 948-955.
- [6] 任红剑, 丰震, 乔谦, 安凯, 叶美静, 等. 元宝枫叶片形态特征的地理变异[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1): 113-119.
Ren HJ, Feng Z, Qiao Q, An K, Ye MJ, et al. Geographic variation trend of leaf morphology in *Acer truncatum*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(1): 113-119.
- [7] 程欣, 林立, 林乐静, 祝志勇, 崔广元, 等. 4 种槭树种子油脂脂肪酸组成及含量比较[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(7): 220-224.
Chen X, Lin L, Lin LJ, Zhu ZY, Cui GY, et al. Comparison of fatty acid composition and contents of four kinds of maple seed oil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(7): 220-224.
- [8] Motahari B, Shabani N, Rahmani MS, Mohammad-Hasani F. Genetic diversity and genetic structure of *A. monspessulanum* L. across Zagros forests of Iran using molecular markers[J]. *Gene*, 2021, 769: 145245.
- [9] Mochizuki T, Ikeda F, Tani A. Effect of growth temperature on monoterpene emission rates of *A. palmatum*[J]. *Sci Total Environ*. 2020, 745: 140886.
- [10] 李斌, 顾万春, 卢宝明. 白皮松天然群体种实性状表型多样性研究[J]. 生物多样性, 2020(2): 181-188.
Li B, Gu WC, Lu BM. A study on phenotypic diversity of seeds and cones characteristics in *Pinus bungeana*[J]. *Biodiversity Science*, 2020(2): 181-188.
- [11] 王娅丽, 李毅. 祁连山青海云杉天然群体的种实性状表型多样性[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 355-362.
Wang YL, Li Y. Study on phenotypic diversity of cone and seed in natural populations of *Picea crassifolia* in Qilian mountain, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(2): 355-362.
- [12] 郑昕, 孟超, 姬志峰, 王祎玲. 脱皮榆山西天然居群叶性状表型多样性研究[J]. 园艺学报, 2013, 40(10): 1951-1960.
Zhen X, Meng C, Ji ZF, Wang WL. Phenotypic diversity of leaves morphologic characteristics of *Ulmus lamellosa* natural populations in Shanxi[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(10): 1951-1960.
- [13] 杨森森, 何文广, 陈文荣, 余孟杨, 孙代珍, 等. 江南油杉优树种子表型性状的多样性分析[J]. 福建林业科技, 2020, 47(4): 18-21.
Yang MM, He WG, Chen WR, Yu MY, Sun DZ, et al. Phenotypic traits diversity analysis of seeds of candidate superior trees of *Keteleeria cyclolepis*[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2020, 47(4): 18-21.
- [14] 刁松锋, 邵文豪, 姜景民, 董汝湘, 孙洪刚. 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1451-1460.
Diao SF, Shao WH, Jiang JM, Dong RX, Sun HG. Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1451-1460.
- [15] 兰士波. 槭属植物研究概论及发展前景[J]. 中国林副特产, 2019(5): 84-89.
Lan SB. Research overview and development prospect of *Acer* Linn plants[J]. *Forest By-Product and Speciality in China*, 2019(5): 84-89.
- [16] 罗建勋, 顾万春. 云杉天然群体种实性状变异研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(8): 60-66.
Luo JX, Gu WC. Cone and seed variation of natural population in *Picea asperata*[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2004, 32(8): 60-66.
- [17] 续九如. 林木数量遗传学[M]. 北京: 高等教育出版社, http://www.plantscience.cn

- 2006.
- [18] Metougui ML, Mokhtari M, Maughan PJ, Jellen EN, Benhabib O. Morphological variability, heritability and correlation studies within an argan tree population (*Argania spinosa* (L.) Skeels.) preserved in situ [J]. *Int J For Res*, 2017, 7(2): 42–51.
- [19] 解孝满, 李景涛, 赵合娥, 刘建军, 段春玲, 朱青. 柳树无性系苗期遗传测定与选择[J]. 江苏林业科技. 2008(3): 6–9.
Jie XM, Li JT, Zhao HE, Liu JJ, Duan CL, Zhou Q. Willow clone seedling genetics determination and selection [J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2008(3): 6–9.
- [20] Wang F, Zhang QH, Tian YG, Yang SC, Wang HW, et al. Comprehensive assessment of growth traits and wood properties in half-sib *Pinus koraiensis* families [J]. *Euphytica*, 2018, 214(11): 202.
- [21] 覃敏, 尹光天, 杨锦昌, 李荣生, 邹文涛. 米老排种源家系生长性状变异分析及早期选择[J]. 植物研究, 2017, 37(1): 139–146.
Qin M, Yin GT, Yang JC, Li RS, Zou WT. Growth traits variation and early selection of *Mytilaria laosensis* provenances and families [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2017, 37(1): 139–146.
- [22] Mwase WF, Savill PS, Hemery. Genetic parameter estimates for growth and form traits in common ash (*Fraxinus excelsior* L.) in a breeding seedling orchard at Little Wittenham in England [J]. *New For*, 2008, 36(3): 225–238.
- [23] 裴晓娜, 张秦徽, 张世凯, 王德, 孔令远, 等. 核桃楸无性系叶片性状变异研究 [J]. 分子植物育种, 2021, 19(6): 2030–2036.
Fei XN, Zhang QH, Zhang SK, Wang D, Kong LY, et al. Variation analysis of leaf characters of *Juglans mandshurica* clones [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(6): 2030–2036.
- [24] 乔谦, 丰震, 任红剑, 安凯, 张林, 孙忠奎. 元宝枫天然种群果实表型多样性 [J]. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2707–2715.
Qiao Q, Feng Z, Ren HJ, An K, Zhang L, Sun ZK. Phenotypic diversity of wing fruits and seeds in natural populations of *Acer truncatum* Bunge [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(10): 2707–2715.
- [25] 武艳虹, 樊泽璐, 李佳, 郭晋宏, 郭雅坤, 王祎玲. 茶条槭自然种群种子和果实表型多样性研究 [J]. 广西植物, 2018, 38(6): 795–803.
Wu YH, Fan ZL, Li J, Guo JH, Guo YK, Wang WL. Phenotypic diversity of seeds and fruits in natural populations of *Acer ginnala* in China [J]. *Guihaia*, 2018, 38(6): 795–803.
- [26] 冯秋红, 李登峰, 于涛, 李俊清, 马文宝, 张雷. 极小种群野生植物梓叶槭的种实表型变异特征 [J]. 生物多样性, 2020, 28(3): 314–322.
Feng QH, Li DF, Yu T, Li JQ, Ma WB, Zhang L. Phenotypic fruit and seed variations of *Acer catalpifolium*, a wild plant with extremely small populations in China [J]. *Biodiversity Science*, 2020, 28(3): 314–322.
- [27] 张翠琴, 姬志峰, 林丽丽, 赵瑞华, 王祎玲. 五角枫种群表型多样性 [J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5343–5352.
Zhang CQ, Ji ZF, Lin LL, Zhao LL, Wang YL. Phenotypic diversity of *Acer mono* Maxim. population [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(16): 5343–5352.
- [28] 卢超, 高明博, 焦小钟, 何峰, 李学军, 王辉. 几个小麦亲本主要农艺性状的配合力评价及遗传力分析 [J]. 麦类作物学报, 2010, 30(6): 1023–1028.
Lu C, Gao MB, Jiao XZ, He F, Li XJ, Wang H. Combining ability and heritability analysis of main agronomic traits in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(6): 1023–1028.
- [29] 张宝. 槭属种质资源的收集、保存、研究及信息管理系统的创建 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.
- [30] 李翔, 侯璐, 李双喜, 李颖岳. 濒危树种庙台槭种群数量特征及动态分析 [J]. 植物科学学报, 2018, 36(4): 24–533.
Li X, Hou L, Li SX, Li YY. Population quantitative characteristics and dynamic analysis of the endangered plant *Acer miaotaiense* [J]. *Plant Science Journal*, 2018, 36(4): 524–533.
- [31] 魏志恒, 吴际友, 程勇, 陈明皋, 张珉, 等. 多地点樟树家系遗传参数估算与综合选择 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(6): 51–58.
Wei ZH, Wu JY, Cheng Y, Cheng MH, Zhang M, et al. Estimation of genetic parameters and comprehensive selection of *Cinnamomum camphora* families in multiple locations based on Half-sibMS [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology* 2021, 41(6): 51–58.

(责任编辑: 李惠英)