



田启航, 李杰, 田振东, 王雨, 王召元, 刘国俭, 常瑞丰, 陈湖, 李永红. 桃杂交后代抗寒性遗传倾向分析及高抗寒单株的筛选[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(8): 50-59.

TIAN Qihang, LI Jie, TIAN Zhendong, WANG Yu, WANG Zhaoyuan, LIU Guojian, CHANG Ruifeng, CHEN Hu, LI Yonghong. Inherited tendency analysis of cold resistance in peach hybrid population and the screening of high cold-resistant individuals [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(8): 50-59.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.08.05

桃杂交后代抗寒性遗传倾向分析及高抗寒单株的筛选

田启航 李杰 田振东 王雨 王召元 刘国俭 常瑞丰 陈湖 李永红*

(河北省农林科学院 昌黎果树研究所, 河北 昌黎 066600)

摘要 为探究桃杂交后代抗寒性的遗传倾向, 从而为桃抗寒育种亲本选配以及后代植株抗寒性预测提供选择依据。以3个杂交组合亲本及后代群体为试验材料, 连续3年采用田间调查法对其抗寒力进行统计, 分析不同遗传背景下杂交后代的抗寒能力; 同时利用差热分析系统(DTA)对极端抗寒组合(‘东合1号’×‘21世纪’)F₁代及亲本1年生休眠枝条进行低温放热(LTE)分析, 测定枝条在低温处理下相对电导率、可溶性糖含量、游离脯氨酸含量、淀粉含量, 利用隶属函数法对抗寒性进行综合评价, 筛选出高抗寒单株。结果表明: 3个杂交组合后代抗寒力平均值分别为1.99、2.37、3.11, 均与母本抗寒力较接近, ‘东合1号’×‘21世纪’杂交后代抗寒力高于其他2个杂交组合; ‘东合1号’×‘21世纪’杂交后代抗寒力超过高值亲本‘东合1号’的有26株, 超高亲率为18.6%; 低于低值亲本‘21世纪’的有6株, 超低亲率为4%, 超高亲株率明显高于超低亲株率; 本研究初步筛选出8株高抗寒单株, 可为桃抗寒育种提供材料。综上, 桃抗寒性具有母性遗传倾向, 存在超亲遗传特点, 并趋向抗性强的方向遗传, 因此桃育种选配亲本时选择抗寒性强的品种作母本更有利于提高后代群体的抗寒性。

关键词 桃; 抗寒性; 遗传倾向; 杂交后代; 隶属函数

中图分类号 S662.1

文章编号 1007-4333(2025)08-0050-10

文献标志码 A

Inherited tendency analysis of cold resistance in peach hybrid population and the screening of high cold-resistant individuals

TIAN Qihang, LI Jie, TIAN Zhendong, WANG Yu, WANG Zhaoyuan, LIU Guojian, CHANG Ruifeng, CHEN Hu, LI Yonghong*

(Changli Institute of Pomology, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Changli 066600, China)

Abstract The inherited tendency of cold resistance in peach hybrid progeny was investigated to provide a genetic basis for parent selection in peach cold resistance breeding and cold resistance prediction in progeny plants. The freezing damage index of three peach hybrid populations and their parents were assessed under natural wintering conditions for three consecutive years. To further study the physiological change after cold stress and establish an evaluation method of cold resistance in peaches, the one-year-old dormant branches of a high-low cold-resistant combination F₁ population ‘Donghe No. 1’×‘21st Century’

收稿日期: 2024-11-23

基金项目: 河北省重点研发计划热杂果现代种业科技创新团队项目(21326310D); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-30-Z-02); 河北省农林科学院基本科研业务费青年基金项目(2023020102); 河北省农林科学院科技创新专项(2022KJCXZX-CGS-6); 河北省现代农业产业技术体系创新团队建设项目(HBCT2023130205)

第一作者: 田启航(ORCID: 0009-0006-5357-6726), 助理研究员, 主要从事桃育种与栽培生理研究, E-mail: mstianqihang@126.com

通讯作者: 李永红(ORCID: 0000-0001-6769-1692), 副研究员, 主要从事桃抗性育种与栽培研究, E-mail: liyonghongpeng@126.com

and their parents were treated with low temperature, the relative electrical conductivity, soluble sugar content, free proline acid content, and starch content of the branches were measured. In addition, the branches' low temperature exotherm (LTE) was measured using a differential thermal analysis system (DTA). The cold resistance of each tested individual was evaluated by the comprehensive membership function method, and the high cold-resistant individuals were identified according to the results of the cold resistance evaluation. The results showed that the mean cold-resistances of the offspring of the three hybrid combinations were 1.99, 2.37 and 3.11, respectively, close to the maternal cold-resistance. The cold resistance of the hybrid progeny of 'Donghe No. 1' × '21st Century' was higher than that of the other two hybrid combinations. The cold resistance of the 'Donghe No. 1' × '21st century' hybrid was higher than that of the high-value parent 'Donghe No. 1' in 26 strains, and the high affinity rate was 18.6%. There were 6 points lower than the low parental '21st Century'. The ultra-low parental rate was 4%, and the ultra-high parental rate was significantly higher than the ultra-low parental rate. 2) Eight high cold-resistance individual plants were selected as materials for further cold-resistance breeding. In conclusion, the inherited tendency analysis of cold resistance in peaches indicated that the resistance to freezing injury in the hybrid population exhibits a maternal genetic tendency, demonstrating hyper-progenetic characteristics and a propensity for inheritance towards stronger cold resistance. Therefore, Selecting the higher cold-resistance varieties as parents is more conducive to enhancing the cold resistance of future generations.

Keywords peach; cold resistance; inherited tendency; hybrid progeny; membership function

桃(*Prunus persica* L.)原产于中国,已有4 000多年的栽培历史及丰富的种质资源^[1]。中国是全球最大的桃生产国,2021年中国桃种植面积及产量在全球比重分别为54.83%、64.08%,均位列全球第一,与排名第二的西班牙相比,种植面积超出50.04%,产量高出59.29%(数据来源联合国粮农组织(FAO))。河北省是我国桃生产大省,种植面积位列全国第3位,仅次于山东省和河南省。温度是影响桃树生长发育及地理分布的一个重要环境因子,近年来极端天气频发,冬季低温冻害是北方较寒冷产区桃产业发展的主要限制因子之一,不但导致产量大幅下降,而且还能造成枝干受冻死亡或树体整株死亡^[2-4]。因此,选育抗寒品种以适应北方寒冷地区是育种者亟待解决的问题。

杂交育种是果树育种的重要途径,果树抗寒性评价是果树抗寒育种的重要内容。20世纪70年代开始,差热分析(Different thermal analysis, DTA)或称为低温放热(Low temperature exotherm, LTE)分析方法开始被应用于木本植物组织的抗寒性评价。其基本原理为:在低温下植物组织结冰时伴随放热过程,通过DTA检测、记录、分析这种低温放热,进而评定植物组织抗寒能力^[5-6]。该方法已应用于苹果^[7]、葡萄^[8-10]、核桃^[11]、板栗^[12]、柿子^[13]等现有育成品种的抗寒性评价。也有研究利用生理指标来评价果树的抗寒性,如可溶性糖^[14]、可溶性蛋白^[15]、淀粉^[16]、丙二醛^[17]含量、电导

率^[18]等。王小丽等^[19]通过电导率测定58份桃种质资源的抗寒性发现绝大多数品种的半致死温度集中在-25~-30℃;牛茹萱^[20]鉴定桃资源抗寒性时,认为-25℃是测定桃树抗寒性的最佳温度。目前隶属函数法作为综合评价抗寒性的方法在多种作物上广泛应用^[21]。国内外关于桃抗寒性的评价方法比较单一,对抗寒性遗传规律的研究较少,而且用单一的指标评价桃树的抗寒性不够全面,多个指标综合评价更加准确和可靠。因此,本研究拟选取桃杂交群体‘东合1号’×‘21世纪’、‘中油8号’×‘秀峰’、和‘绿化9号’×‘瑞光39号’共3个杂交群体,于2022—2024年连续3年田间调查亲本及杂交后代的抗寒力,分析桃杂交后代抗寒性遗传倾向;同期利用差热分析方法测定‘东合1号’(高抗寒)×‘21世纪’(优质、不抗寒)杂交后代150株休眠枝条的抗寒性,并测定枝条在低温处理下(-25℃)相对电导率、可溶性糖含量、游离脯氨酸含量、淀粉含量,通过计算隶属函数值,对杂交后代抗寒性进行综合评价,筛选出抗寒优异单株,以期为桃抗寒育种提供理论依据,并丰富桃抗寒育种材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料取自河北省农林科学院昌黎果树研究所桃资源圃。该地区属于暖温带半湿润季风气候,年平均气温为12.5℃,无霜期为187 d,夏季潮

湿凉爽,平均气温在24~26℃;冬季干旱寒冷,近3年每年1月低温在-20℃~0℃,极端最低气温达-22.8℃(2021年1月6日)。试验材料包括3个杂交组合的亲本及其后代:‘东合1号’为野生半栽培品种,抗寒能力极强,抗寒等级为1级,为高抗品种^[2];‘21世纪’品质优良,但抗寒性较差,为不抗,抗寒等级为5级^[22];‘中油8号’^[22]、‘秀峰’和‘瑞光39

号’^[22]抗寒力强,抗寒力为抗,抗寒等级为2级;‘绿化9号’抗寒性一般,抗寒等级为3级;均于2019年杂交,2020年5月定植于桃资源圃。亲本的株行距为3 m×4 m,杂交后代的株行距为1 m×3 m。土壤为沙壤土,所有亲本及后代在栽培期间的管理模式一致。通过表型确认,选择桃杂交品种材料及F₁代数量,详见表1。

表1 桃杂交品种材料及F₁代数量
Table 1 Peach hybrid variety materials and F₁ generation quantity

母本 Maternal		父本 Paternal		F ₁ 代数量 Number of F ₁ generation
品种 Cultivar	来源 Source	品种 Cultivar	来源 Source	
东合1号 Donghe No. 1	辽宁 Liaoning	21世纪 21 st Century	河北 Hebei	150
中油8号 Zhongyou No. 8	河南 Henan	秀峰 Xiufeng	日本 Japan	124
绿化9号 Lyuhua No. 9	北京 Beijing	瑞光39号 Ruiguang 39	北京 Beijing	150

1.2 试验方法

1.2.1 田间抗寒性调查

2022—2024年连续3年,在每年1月底进行田间抗寒性调查。将后代株系抗寒性分为5个等级^[23],详见表2。

1.2.2 其他指标测定

2022—2024年连续3年,每年1月底剪取杂交组合‘东合1号’×‘21世纪’亲本及F₁代150株无明显病虫害、长度和粗度(0.5 cm)较一致的一年生休眠枝条,每株剪取20个枝条,石蜡封住剪口,带回实

验室。随机将枝条分为2组,每组10枝,其中一组置于4℃冰箱内用于LTE测定;另一组置于-25℃温度处理的程控冰箱内进行低温胁迫处理,以4℃作为对照,降/升温速率设置为4℃/h,到达设定温度后低温处理12 h,之后升温至4℃解冻12 h,用于测定相对电导率、可溶性糖含量、游离脯氨酸含量和淀粉含量。

LTE测定采用高振^[24]等的测定方法。截取枝条第3~5节节间,长度控制在2 cm左右,两头封蜡放于热电模块上,每个模块放2个,6次重复

表2 田间抗寒等级分级标准^[23]
Table 2 Classification standard for cold resistance level in fields^[23]

冻害等级 Freeze damage level	花芽叶芽 Flower bud and leaf bud	枝条 Branch	树干及韧皮部 Trunk and bark
1级(无冻害) Level 1 (No freezing injury)	正常表现	无表现或轻微	韧皮部正常绿色
2级(轻微冻害) Level 2 (Minor freezing injury)	僵芽较少,多数正常开花	少量枝条干枯	主干北侧皮层内部及韧皮部浅褐色
3级(中度冻害) Level 3 (Moderate freezing injury)	僵芽较多,发芽不抽梢	半数以内枝条干枯	主干北侧皮层内部及韧皮部褐色
4级(严重冻害) Level 4 (Severe freezing injury)	僵芽多,发芽但不抽梢	半数以内枝条干枯	树干冻裂,韧皮部深褐色,形成层受冻
5级(严重冻害) Level 5 (Severe freezing injury)	干枯死亡	树干枝条全部干枯	木质部黑褐色或整株死亡

(3穴×2个)。

相对电导率采用电导法进行测定。将枝条避开芽眼剪成0.2 cm的薄片,混匀后准确称取2 g,放入25 mL刻度试管中,加入去离子水20 mL,封口摇匀,在室温(20℃)下浸泡4 h,用DDS-307型数字电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定浸提液初始电导值(R_1);然后封口,沸水浴30 min,静置至室温后摇匀,再测定终止电导值(R_2),重复3次。相对电导率(REC)计算公式如下:

$$REC = R_1 / R_2 \times 100\%$$

参照李合生^[25]的方法测定各项生理指标,可溶性糖、淀粉的含量采用蒽酮法测定,脯氨酸含量参照酸性茚三酮法测定。

1.3 数据分析

数据利用Microsoft Excel 2007进行统计计算,用IBM SPSS20.0进行相关性分析,用EGMA 7.0软件对表型性状进行聚类分析。

运用隶属函数法计算各抗寒指标隶属度^[26]。

如果指标与抗寒性呈正相关,计算公式为:

$$U_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$$

如果指标与抗寒性呈负相关,指标隶属度计算公式为:

$$U_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$$

式中: U_{ij} 为*i*品种*j*指标的抗寒隶属函数值; X_{ij} 为*i*品种*j*指标的测定值; X_{jmin} 为*j*指标的最小值; X_{jmax} 为*j*指标的最大值。

按照隶属度将抗寒性分为5级:[0.60, 1.00]为高抗(HR),1级;[0.50, 0.60)为抗(R),2级;[0.40, 0.50)为中抗(MR),3级;[0.30, 0.40)为低抗(LR),4级;[0.00, 0.30)为不抗(S),5级。

亲中值为父母本抗寒力的平均值,其中超低亲率和超高亲率分别为杂种后代抗寒性低于低抗亲本和高于高抗亲本的比率;变异系数(CV)表示后代植株相较于亲本的离散程度;组合遗传传递力(Ta)表示为亲本将遗传特性遗传给子代的能力。其计算公式如下:

超低亲率 = 平均隶属度低于较低亲本的 F_1 代株数 / 组合 F_1 代总株数 × 100%

超高亲率 = 平均隶属度高于较高亲本的 F_1 代株数 / 组合 F_1 代总株数 × 100%

$$CV = S / F \times 100\%$$

$$Ta = F / \bar{P} \times 100\%$$

式中: S 为样本标准差(STDV); F 为后代性状平均值; $\bar{P}$ 为亲中值。

2 结果与分析

2.1 抗寒力的遗传倾向分析

3个桃杂交组合后代 F_1 群体中抗寒力的分布情况见表3。可见3个杂交组合的遗传传递力分别为66.3%、118.5%、124.4%,平均值达到了103.1%,表明桃杂交后代的抗寒性受亲本抗寒性影响较为明显。其中:从 F_1 代抗寒力平均值来看,‘东合1号’×‘21世纪’ F_1 代抗寒力平均值为1.99,抗寒等级较其他组合高;从高抗寒植株占比来看,‘东合1号’×‘21世纪’ F_1 代高抗寒植株比例为40.70%,较其他组合高。因此本研究中‘东合1号’×‘21世纪’是获得高抗寒性杂交后代的优势组合。

此外,3个杂交组合后代的抗寒等级与母本抗寒等级相同的株系所占比例最大,且3个组合后代抗寒力平均值与母本抗寒力较接近,说明桃的抗寒性受母本抗寒力影响更大,表现一定的母系遗传优势;3个杂交组合的变异系数分别为53.26%、53.58%、40.95%,变异程度较大。说明桃抗寒力不仅受遗传因素影响,也会受外界环境影响。

‘东合1号’×‘21世纪’、‘中油8号’×‘秀峰’、‘绿化9号’×‘瑞光39号’3个杂交组合的 F_1 群体后代的抗寒等级分布结果见图1。可见:3个杂交后代的抗寒性均呈偏态分布,且呈连续分布态,表现为由多基因控制的数量性状遗传特点,说明桃抗寒性遗传受基因的加性效应和非加性效应的共同影响,基因互作效应对桃抗寒性影响显著。由图1(a)和(b)可见:‘东合1号’×‘21世纪’、‘中油8号’×‘秀峰’2个杂交群体的抗寒性偏态分布拟合曲线较相似,表明这在2个杂交群体中,抗寒性高于平均值的个体比低于平均值的个体多;群体的偏态分布的右侧拖尾较左侧要长,该结果从另一个角度说明了在这2个杂交群体中,抗寒性向高抗寒型亲本回归。由表4可知:在‘中油8号’×‘秀峰’和‘绿化9号’×‘瑞光39号’2个杂交群体中,抗寒性偏态分布的峰度分别-0.58、-0.95,均<0,表示这2个群体抗寒等级数据分布相比于正态分布较为平坦,极端值出现概率相对较小;‘东合1号’×‘21世纪’杂交后代峰度值为0.23,抗寒等级数据分布相比于正态分布较为陡峭,为尖顶峰,表明单株抗寒性在峰值附近分布得较为集中,且极端值出现概率相对较大。

表3 不同亲本桃杂交后代抗寒力分布情况
Table 3 Distribution of cold resistance of different peach hybrid progenies

亲本组合 Parents combination	父本和母本抗寒级别 Parents cold resistance level	抗寒力分布/% Distribution of cold resistance					抗寒力平均值 Mean of cold resistance	遗传传递力/% Heritability of combination
		1级	2级	3级	4级	5级		
		Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5		
东合1号×21世纪 Donghe No. 1 × 21 st Century	1级和5级	40.7	32.7	16	8	2.7	1.99 ± 1.06	66.3
中油8号×秀峰 Zhongyou No. 8 × Xiufeng	2级和2级	29.8	33.1	16.1	12.1	8.9	2.37 ± 1.27	118.5
绿化9号×瑞光39号 Lyuhua No. 9 × Ruiguang No. 39	3级和2级	12.7	19.3	26.7	22.7	18.7	3.11 ± 1.26	124.4

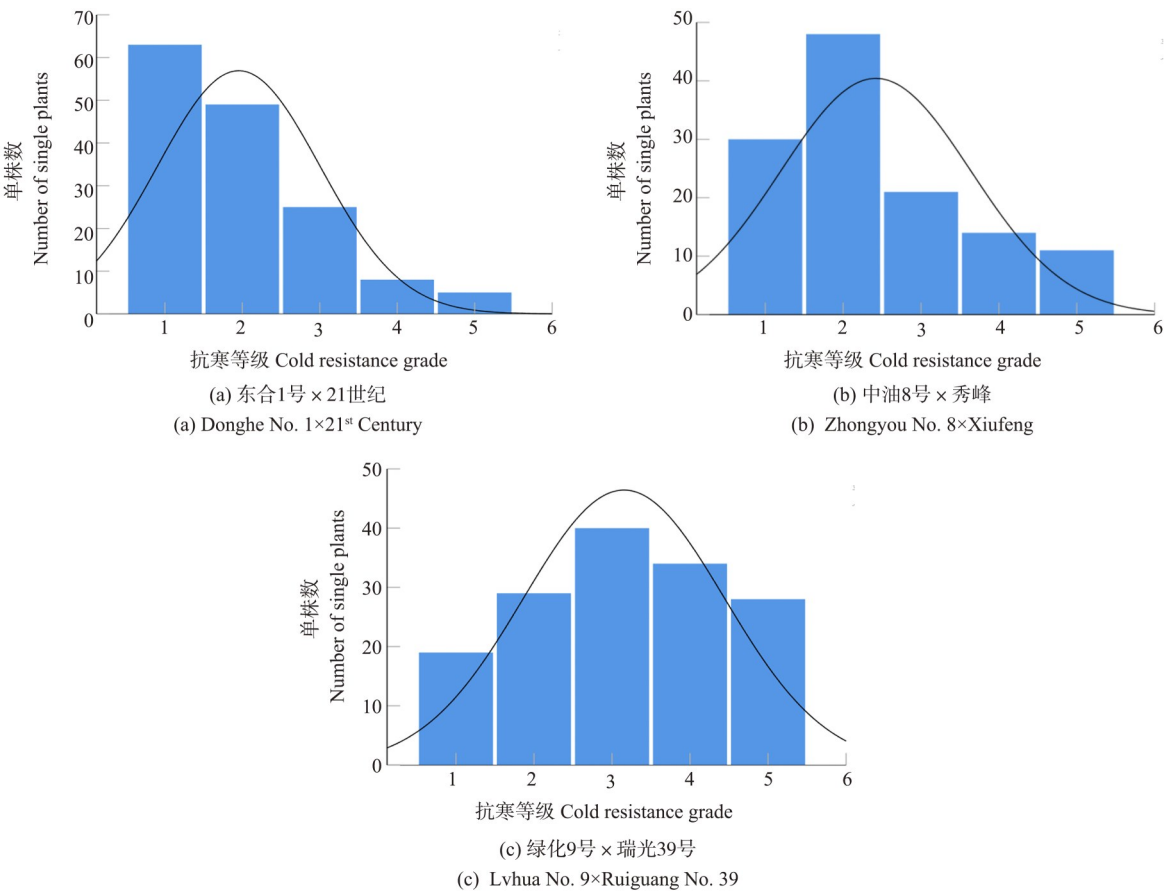


图1 3种桃杂交组合后代群体抗寒等级频数分布

Fig. 1 Distribution of the cold resistance frequencies in three peach hybrid combination populations

表 4 桃不同杂交组合后代群体抗寒力正态性检验

Table 4 Distribution of the cold resistance frequency in different peach hybrid combination populations

杂交组合 Hybrid combination	正态性检验 Shapiro-Wilk test	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
东合 1 号 × 21 世纪 Donghe No. 1 × 21 st Century	非正态	0.96	0.23
中油 8 号 × 秀峰 Zhongyou No. 8 × Xiufeng	非正态	0.69	−0.58
绿化 9 号 × 瑞光 39 号 Lyuhua No. 9 × Ruiguang No. 39	非正态	−0.08	−0.95

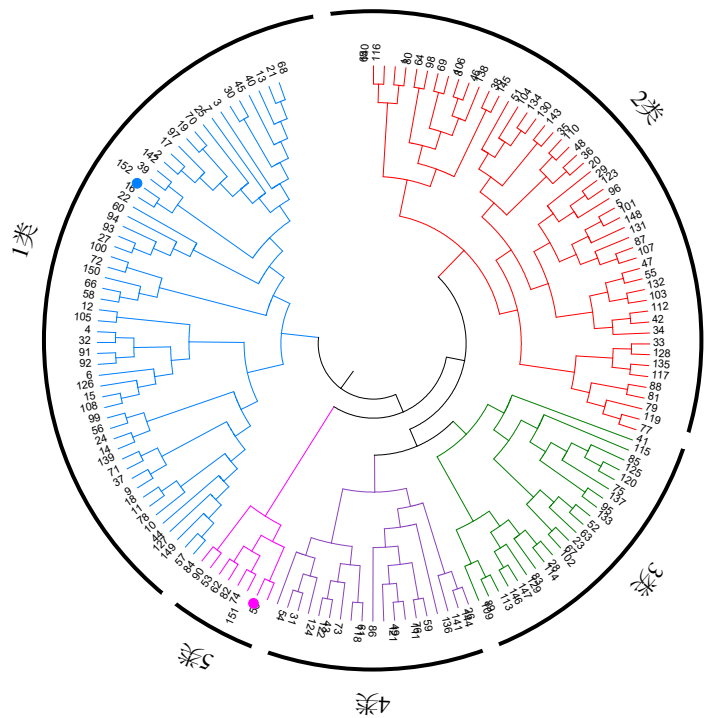
2.2 ‘东合 1 号’×‘21 世纪’杂交后代抗寒性评价

综合差热分析、各抗寒相关生理指标的隶属函数可知：母本‘东合 1 号’隶属度为 0.74，其抗寒性等级属于高抗；父本‘21 世纪’隶属度为 0.29，其抗寒性等级属于不抗；杂交 F₁ 代隶属度分布在 0.19~0.90，平均隶属度为 0.60，抗寒等级属于高抗寒。‘东合 1 号’×‘21 世纪’杂交后代表现出不同程度的抗寒性，出现了抗寒性分离，并且存在超亲遗传现象，其中超过高抗亲本‘东合 1 号’的有 26 株，超高亲率为 18.6%；低于低抗亲本‘21 世纪’的有 6 株，

超低亲率为 4%，超高亲株率明显高于超低亲株率，杂交优势明显，说明该杂交组合抗寒传递能力强，杂种优势较为明显，后代中易出现抗寒性较高的单株。

2.3 ‘东合 1 号’×‘21 世纪’杂交后代抗寒性聚类分析

‘东合 1 号’×‘21 世纪’杂交后代的聚类分析结果见图 2。可见在遗传距离为 0.063 处可将‘东合 1 号’和‘21 世纪’的 150 株杂交后代抗寒等级分为 5 大类。其中：第 1 类有 53 株，所占比例为 35.33%，



0.00 0.02 0.04 0.06 0.08 0.10 遗传距离 Genetic distance 1、2、3、4、5 类为依据聚类分析划分的第 1 类群、第 2 类群、第 3 类群、第 4 类群、第 5 类群。151 号为‘21 世纪’；152 为‘东合 1 号’。
1, 2, 3, 4 and 5 represent the 1st, 2nd, 3rd, 4th and 5th groups based on cluster analysis. 151 is variety 21st Century, and 152 is variety Donghe No. 1.

图 2 桃杂交后代抗寒性聚类分类图

Fig. 2 Cluster graph of cold resistance of peach hybrids

为高抗寒株系,抗寒等级1级;第2类有49株,所占比例为32.67%,为抗寒株系,抗寒等级2级;第3类有22株,所占比例为14.67%,为中抗寒株系,抗寒等级3级;第4类有19株,所占比例为12.67%,为低抗寒株系,抗寒等级4级;第4类有7株,所占比例为4.67%,为不抗寒株系,抗寒等级为5级。

2.4 ‘东合1号’×‘21世纪’杂交后代不同抗寒指标间相关性分析

‘东合1号’×‘21世纪’杂交后代不同抗寒指标间的相关性分析结果见表5。可见‘东合1号’与‘21世纪’的杂交后代一年生休眠枝条在经历-25℃的低温处理后,各抗寒生理指标之间呈现出显著的相关关系。相对电导率和低温放热(LTE)值与抗寒

性之间存在明显的负相关关系,相关系数分别为-0.865和-0.894,表明抗寒性越强的单株,其相对电导率和LTE值则越低;同时,可溶性糖、脯氨酸以及淀粉的含量都与抗寒性呈现出显著的正相关关系,相关系数分别为0.797、0.863和0.842,这表明抗寒性越强的单株,其可溶性糖、脯氨酸和淀粉的含量也越高。此外,相对电导率和LTE之间也显示出显著的正相关关系,相关系数为0.732。由此可见,虽然各抗寒指标之间存在一定的关联性,但它们所提供的信息可能会存在一些重叠和遗漏。因此,在进行桃树抗寒性鉴定时,不应仅依赖单一或少数几个指标,而应采用多项抗寒指标进行综合评价。

表5 不同抗寒指标间相关性分析
Table 5 Correlation analysis of different cold resistance indexes

指标 Index	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	1					
X_2	-0.558*	1				
X_3	0.652**	-0.725**	1			
X_4	0.523*	-0.664**	0.663**	1		
X_5	0.688**	0.732**	-0.671**	-0.707**	1	
X_6	0.797**	-0.865**	0.863**	0.842**	-0.894**	1

注: X_1 为可溶性糖含量; X_2 为相对电导率; X_3 为脯氨酸含量; X_4 为淀粉含量; X_5 为LTE值; X_6 为抗寒等级。
*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上显著相关。
Note: X_1 means soluble sugar content; X_2 means relative electrical conductivity content; X_3 means proline content; X_4 means starch content; X_5 means LTE numerical; X_6 means cold hardness grade. * and ** indicate significant correlations at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

2.5 ‘东合1号’×‘21世纪’杂交后代抗寒单株的筛选

通过对‘东合1号’与‘21世纪’150株杂交后代抗寒性综合隶属函数值由高到低分析,并结合3年田间调查发现,枝条没有任何冻害表现,花芽叶芽均正常萌出为筛选依据,初步筛选出19-2-105、19-2-108、19-2-126、19-2-12、19-2-15、19-2-6、19-2-4和19-2-32共8株高抗寒单株。

3 讨论

3.1 桃杂交后代抗寒性遗传倾向分析

抗寒育种主要是通过将具有高抗寒性特征的野生资源与优质栽培品种进行杂交,以期获得具有较高抗寒性和优良品质的杂交后代^[27]。在桃的育

种过程中,分析杂交后代的抗寒性遗传倾向不仅是育种工作的重要基础,同时也是一种简便而有效的方法来筛选出具备抗寒性的单株。桃的抗寒性受到遗传因素与环境影响的共同作用,因此在表现上具有复杂的数量性状特征,而母本的抗寒性对后代的抗寒性具有显著影响。本研究通过对3个桃杂交组合后代抗寒性的遗传规律进行研究,发现桃杂交后代抗寒性趋向母性遗传,这一研究结果与李志英等^[28]、沙广利等^[29]、马庆华等^[30]在其他果树树种上的研究结果一致。杂交后代的抗寒性存在超亲遗传现象,主要原因在于父母本在基因分离与重组的过程中,非加性效应的影响^[31]。从遗传的视角来看,不同单株的基因组成在决定其对低温的响应能力上起着决定性作用。一些单株可能携带特定的

抗寒基因,使其能够在低温环境下更有效地调节生理代谢过程。此外,环境适应性也可能在抗寒性差异中发挥关键作用,长时间生长于寒冷地区的品种经过自然选择,可能逐渐形成更强的抗寒能力。

3.2 桃杂交后代抗寒性评价

本研究利用综合隶属函数法评价桃杂交后代抗寒性。通过相关性分析表明,生理指标的变化与桃的抗寒性密切相关,在低温胁迫条件下,具有高抗寒性的单株其可溶性糖、脯氨酸和淀粉的含量高,相对电导率、LTE值低,抗寒性弱的单株相对电导率、LTE值高,可溶性糖、脯氨酸和淀粉的含量高,这与包俊宏等^[32]、欧欢^[33]、丁思悦等^[34]在其他果树树种上的研究结果基本一致。因此,将植株一年生休眠枝条进行-25℃低温处理后测定抗寒性相关生理指标综合评价结果可用于快速检测桃植株的抗寒性。然而,抗寒机制不仅受遗传因素的影响,还有生存环境和营养水平的共同作用,它们之间的具体相互关系仍需进一步地研究探讨。

本研究利用聚类分析将‘东合1号’×‘21世纪’150株杂交后代划分为5类,高抗寒53株、抗寒49株、中抗寒22株、低抗寒19株以及不抗寒7株;通过田间调查抗寒性为高抗寒61株、抗寒49株、中抗寒24株、低抗寒12株以及不抗寒4株。可见两种评价方法的抗寒等级分布频次基本趋向一致,但略有不同,主要原因在于本研究也存在一定的局限性,尽管通过人工模拟低温环境可以在一定程度上揭示桃树对低温胁迫的响应机制,但仍与自然环境中的低温胁迫存在明显差异。因此,为更加全面、深入地探究桃树抗寒性,未来的研究需采用更贴近自然环境的试验方法,以便多方位、多因素、综合性地深入探讨桃树的抗寒机制。

4 结 论

本研究为桃抗寒育种亲本选配以及后代植株抗寒性预测提供选择依据,以3种不同桃杂交组合亲本及后代为研究对象,探究桃杂交后代抗寒性的遗传倾向。主要结论如下:

1)桃杂交后代的抗寒性受母本抗寒性影响较大,趋向母性遗传倾向,且杂交后代的抗寒性存在超亲遗传特点,并趋向抗性强的方向遗传;

2)桃抗寒育种选配亲本时选择抗寒性强的品种作母本,与品质优良的父本进行杂交,更有利于

获得高抗寒、品质优的后代群体;

3)本研究初步筛选出的8株高抗寒单株,可为今后桃树抗寒机制的深入研究及抗寒品种的培育提供重要的研究材料和参考依据。

参考文献 References

- [1] 王力荣,朱更瑞,方伟超,曹珂,王小丽,陈昌文,赵佩,王新卫. 中国桃遗传资源[M]. 北京:中国农业出版社,2012
Wang L R, Zhu G R, Fang W C, Cao K, Wang X L, Chen C W, Zhao P, Wang X W. *Peach Genetic Resource in China*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2012 (in Chinese)
- [2] Li Y H, Tian Q H, Wang Z Y, Li J, Liu S Y, Chang R F, Chen H, Liu G J. Integrated analysis of transcriptomics and metabolomics of peach under cold stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1153902
- [3] Niu R X, Zhao X M, Wang C B, Wang F L. Physiochemical responses and ecological adaptations of peach to low-temperature stress: Assessing the cold resistance of local peach varieties from Gansu, China [J]. *Plants*, 2023, 12(24): 4183
- [4] 王召元,田启航,常瑞丰,刘国俭,陈湖,李永红. 桃不同品种对低温胁迫的生理响应及评价[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(2):66-77
Wang Z Y, Tian Q H, Chang R F, Liu G J, Chen H, Li Y H. Physiological response and evaluation of different peach varieties under low temperature stress [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(2):66-77 (in Chinese)
- [5] Quamme H A. An exothermic process involved in the freezing injury to flower buds of several *Prunus* Species [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 99(4): 315-318
- [6] Mills L J, Ferguson J C, Keller M. Cold-hardiness evaluation of grapevine buds and cane tissues [J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2006, 57(2): 194-200
- [7] Quamme H A. Relationship of the low temperature exotherm to apple and pear production in North America [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1976, 56(3): 493-500
- [8] 柴凤梅,祝为,项悦,辛海平,李绍华. 利用低温放热(LTE)测定葡萄冬芽耐寒性方法的优化及应用[J]. 园艺学报, 2015, 42(1):140-148
Chai F M, Zhu W, Xiang Y, Xin H P, Li S H. Optimized method for detecting the cold hardiness of grape dormant bud by low temperature exotherms (LTE) analysis and its utilization [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 42(1): 140-148 (in Chinese)
- [9] 柴凤梅. 葡萄种质资源抗寒性评价及抗寒候选基因挖掘[D]. 武汉:中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2018
Chai F M. Evaluation of cold resistance of grape germplasm resources and mining of cold resistance candidate genes [D]. Wuhan: Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, 2018 (in Chinese)
- [10] 王荣,乔改霞,檀鹏霞,段伟,梁振昌,范培格. 葡萄种间杂种后代抗寒性评价[J]. 中国果树, 2021(5):25-32
Wang R, Qiao G X, Tan P X, Duan W, Liang Z C, Fan P G. Evaluation of cold resistance performance of the offspring of hybrids among grapespecies[J]. *China Fruits*, 2021(5):25-32 (in Chinese)
- [11] Volk G M, Waddell J, Towill L. Variation in low-temperature exotherms of pecan cultivar dormant twigs[J]. *HortScience*, 2009, 44(2):317-321

- [12] 郭燕, 李颖, 张树航, 张馨方, 王广鹏. 利用低温放热法分析板栗枝条抗寒性[J]. 华北农学报, 2017, 32(S1):201-209
- Guo Y, Li Y, Zhang S H, Zhang X F, Wang G P. Using low temperature exotherms method to analyze branch cold resistance of Chinese chestnut [J]. *Journal of North China Agriculture*. 2017, 32 (S1):201-209 (in Chinese)
- [13] Kang S K, Motosugi H, Yonemori K, Sugiura A. Exothermic characteristics of dormant buds of persimmon (*Diospyros kaki thunb*) in relation to cold hardiness[J]. *HortScience*, 32(5): 840-843
- [14] 王季姣, 王世伟, 潘越, 李亚兰, 李树德. 新疆天山北麓产区酿酒葡萄种质抗寒性鉴定及综合评价[J]. 果树学报, 2024, 41(10): 1933-1946
- Wang J J, Wang S W, Pan Y, Li Y L, Li S D. Identification and comprehensive evaluation of cold resistance of wine grape germplasms in Northern Tianshan region, Xinjiang[J]. *Journal of Fruit Science*, 2024, 41(10): 1933-1946 (in Chinese)
- [15] 高拖弟. 6个不同鲜食枣品种抗寒性研究[D]. 榆林: 榆林学院, 2023
- Gao T D. Study on cold resistance of six different fresh jujube varieties [D]. Yulin: Yulin College, 2023 (in Chinese)
- [16] 井俊丽, 刘铭潇, 魏欣, 徐继忠, 李中勇, 张学英, 周莎莎. 几种苹果中间砧的抗寒性评价[J]. 果树学报, 2022, 39(6):970-981
- Jing J L, Liu M X, Wei X, Xu J Z, Li Z Y, Zhang X Y, Zhou S S. Evaluation of cold hardiness of several apple interstocks [J]. *Journal of Fruit Trees*, 2022, 39(6):970-981 (in Chinese)
- [17] 包俊宏, 包敷民, 杨荣, 李今普, 王宝侠, 郑东生, 何炎红. 寒地苹果龙丰、岳艳及其两个杂交优系抗寒性综合评价[J]. 果树学报, 2024, 41(2): 241-251
- Bao J H, Bao A M, Yang R, Li J P, Wang B X, Zheng D S, He Y H. Comprehensive evaluation of cold resistance of apple Longfeng, Yueyan and their two hybrid strains in cold region [J]. *Journal of fruit trees*, 2024, 41(2):241-251 (in Chinese)
- [18] 任惠, 王小媚, 刘业强, 苏伟强. 应用电导率法和 Logistic 方程测定杨桃枝条抗寒性的研究[J]. 西南农业学报, 2016, 29(3):662-667
- Ren H, Wang X M, Liu Y Q, Su W Q. Cold resistance of *Averrhoa carambola* by application of electrical conductivity and Logistic equation [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(3): 662-667 (in Chinese)
- [19] 王小丽, 方伟超, 刘云鹤, 赵佩, 毛冬敏, 王新卫. 58份桃种质资源抗寒性评价[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6):138-144
- Wang X L, Fang W C, Liu Y H, Zhao P, Mao D M, Wang X W. Assessment of the cold resistance of fifty-eight peach accessions [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(6): 138-144 (in Chinese)
- [20] 牛茹萱. 甘肃地方桃资源抗寒性评价及其对低温胁迫的响应机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020
- Niu R X. Evaluation of cold resistance of local peach resources in Gansu Province and its response mechanism to low temperature stress [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [21] 张文娥, 王飞, 潘学军. 应用隶属函数法综合评价葡萄种间抗寒性[J]. 果树学报, 2007, (06):849-853
- Zhang W E, Wang F, Pan X J. Comprehensive evaluation on cold hardiness of *Vitis* species by Subordinate Function (SF)[J]. *Journal of Fruit Science*, 2007, 24(6): 849-853 (in Chinese)
- [22] 董婧妍. 河北省桃品种冻害调查及部分品种抗寒力评价[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2022.
- Dong J Y. Investigation on freezing injury of peach varieties in Hebei province and evaluation of cold resistance of some varieties [D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2022 (in Chinese)
- [23] 李在山, 王佳军, 高洪岐, 仇服春, 李凤亮. 果树冻害调查与判定标准[J]. 北方果树, 2012, (1): 29-30
- Li Z S, Wang J J, Gao H Q, Zhang F C, Li F L. Investigation and judgment standard of freezing injury of fruit trees [J]. *Northern Fruits*, 2012(1): 29-30 (in Chinese)
- [24] 高振, 翟衡, 张克坤, 党园, 杜远鹏. LT-I分析7个酿酒葡萄品种枝条的抗寒性[J]. 中国农业科学, 2013, 46(5):1014-1024
- Gao Z, Zhai H, Zhang K K, Dang Y, Du Y P. A study on cold hardiness of seven wine grape canes by LT-I analysis [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(5):1014-1024 (in Chinese)
- [25] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- Li H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [26] 赵国栋, 赵同生, 李春敏, 付友, 张新生. 11个苹果野生砧木品种低温处理抗性指标的综合评价[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6):145-151
- Zhao G D, Zhao T S, Li C M, Fu Y, Zhang X S. Comprehensive evaluation on cold resistance of eleven wild apple rootstocks [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(6):145-151 (in Chinese)
- [27] Wang Z M, Chai F M, Zhu Z F, Kirabi Elias G, Xin H P, Liang Z C, Li S H. The inheritance of cold tolerance in seven interspecific grape populations [J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 266: 109260
- [28] 李志英, 侯丽霞, 宋燕, 胡晓红. 南果梨 F₁ 的遗传倾向分析[J]. 果树科学, 1997(4):230-234
- Li Z Y, Hou L X, Song Y, Hu X H. The heredity of Nanguo F₁ pear [J]. *Journal of Fruit Science*, 1997(4):230-234 (in Chinese)
- [29] 沙广利, 郭长城, 睢薇, 李光裕. 梨抗寒性遗传的研究[J]. 果树科学, 1996, 13(3):167-170
- Sha G L, Guo C C, Sui W, Li G Y. Studies on the inheritance of cold-hardiness of pear [J]. *Journal of Fruit Science*, 1996, 13(3): 167-170 (in Chinese)
- [30] 马庆华, 毛永民, 申连英, 齐靖. 冬枣×临猗梨枣杂交后代的抗寒性和抗寒单株的筛选[J]. 河北农业大学学报, 2006, 29(4):34-37
- Ma Q H, Mao Y M, Shen L Y, Qi J. Cold hardiness of Dongzao×Linyilizao seedlings and the selection of cold-hardiness candidates [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2006, 29(4): 34-37 (in Chinese)
- [31] 顾模, 钱致斌, 孙凤兰, 冯美琦, 林凤起. 苹果杂种后代抗寒力遗传规律的研究[J]. 园艺学报, 1981, 8(2):15-22
- Gu M, Qian Z B, Sun F L, Feng M Q, Lin F Q. Studies on the inheritance of cold hardiness in hybrid progenies of apple [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1981, 8(2):15-22 (in Chinese)
- [32] 包俊宏, 包敷民, 杨荣, 李今普, 王宝侠, 郑东生, 何炎红. 寒地苹果龙丰、岳艳及其两个杂交优系抗寒性综合评价[J]. 果树学报, 2024, 41(2): 241-251
- Bao J H, Bao A M, Yang R, Li J P, Wang B X, Zheng D S, He Y H. Comprehensive evaluation of cold resistance of apple Longfeng, Yueyan and their two hybrid strains in cold region [J]. *Journal of Fruit Science*, 2024, 41(2):241-251 (in Chinese)

[33] 欧欢. 不同扁桃品种抗寒性研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2019
Ou H. Study on cold resistance of different almond cultivars[D]. Ala'er:
Tarim University, 2019

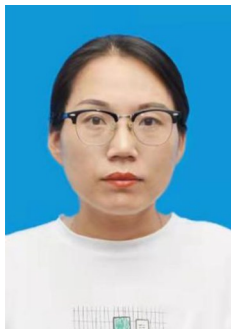
Ding S Y, Wang Y T, Zhao J Q, Wang W, Xi Z M. Identification and
comprehensive evaluation of cold resistance among grape germplasm[J].
Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2024,
52(6):106-120 (in Chinese)

[34] 丁思悦, 王雨婷, 赵佳琪, 王文, 惠竹梅. 葡萄种质抗寒性鉴定及综合评
价[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2024, 52(6):106-120

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 田启航, 硕士研究生, 助理研究员。主要从事桃新品种选育及抗性相关重要机理研究。工作期间主持市厅级项目 1 项, 参加省级和市厅级项目 7 项, 参与审定桃新品种 1 个, 以第一作者和通讯作者发表学术论文 5 篇。



通讯作者简介: 李永红, 副研究员。主要从事桃新品种选育及抗性相关重要机理研究。先后主持和参加省级课题 20 余项, 发表学术论文 20 余篇。获河北省科技进步二等奖 1 项, 三等奖 1 项, 河北省农林科学院科技进步二等奖 1 项, 河北省农林科学院科技进步三等奖 1 项。审定桃新品种 2 个, 获批桃新品种保护权 3 项, 获批国家级桃品种登记 2 项, 获批国家发明专利 4 件; 鉴定科技成果 3 项, 均达到国际先进水平和国内领先水平。