

康敏, 何炎红, 林涛, 等. 10个鲜食杏品种的抗寒性[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(3): 580-587.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.03.017

## 10个鲜食杏品种的抗寒性

康敏<sup>1</sup>, 何炎红<sup>1</sup>, 林涛<sup>1</sup>, 田春<sup>2</sup>, 辛启睿<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古自治区中医院, 内蒙古 呼和浩特 010000)

**摘要:** 本研究通过人工低温胁迫处理研究不同低温下10个杏树品种的抗寒性, 旨在选出抗寒性较强的品种, 为人工选育杏树抗寒品种提供理论依据。本研究在人工低温胁迫处理后测定杏树枝条的相对电导率、可溶性蛋白含量、超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性和丙二醛含量的动态变化规律, 采用隶属函数分析法综合评价品种间的抗寒性差异。结果表明, 可溶性蛋白含量、超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性在低温胁迫下的变化趋势大致相同, 随着温度的下降多数呈先上升后下降的变化趋势, 但其峰期各不相同; 相对电导率和部分温度范围的丙二醛含量随着温度的下降而升高, 与植物的抗寒性呈负相关。通过隶属函数综合分析得出杏树的抗寒能力强弱顺序为胭脂红>崂山红>串枝红>金太阳>丰园红>兰州大接杏>陕西大黄杏>白杏>丰园29>金杏。

**关键词:** 杏; 抗寒性; 相关性分析; 隶属函数分析

**中图分类号:** S662.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)03-0580-08

## Study on cold resistance of ten fresh-eating apricot varieties

KANG Min<sup>1</sup>, HE Yanhong<sup>1</sup>, LIN Tao<sup>1</sup>, TIAN Chun<sup>2</sup>, XIN Qirui<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Hospital of Traditional Chinese Medicine, Hohhot 010000, China)

**Abstract:** This study investigated the cold resistance of ten kinds of apricot trees at different low temperatures by artificial low temperature stress treatment, aiming to select the varieties with strong cold resistance, and provide theoretical basis for artificial selection of cold resistant apricot varieties. In this study, the dynamic variation rule of relative conductivity, soluble protein content, superoxide dismutase activity, peroxidase activity and malonaldehyde content of branches of ten different varieties of apricots were measured after artificial low temperature stress treatment. Membership function analysis was used to comprehensively evaluate the differences in cold resistance among varieties. The results showed that soluble protein content, superoxide dismutase activity and peroxidase activity showed the same change trend under low temperature stress, which increased first and then decreased with the decrease of temperature, but their peak periods were different. The relative conductivity and malonaldehyde contents within partial temperature range increased with the decrease of temperature, and were negatively correlated with the cold resistance of plants. According to the comprehensive analysis of membership function, the order of cold resistance of apricot was Carmine Red > Laoshan Red > Chuanzhi Red > Jintaiyang > Fengyuan Red > Lanzhou Dajie Apricot > Shaanxi Big Yellow Apricot > White Apricot > Fengyuan 29 > Jinxing.

**Key words:** apricot; cold resistance; correlation analysis; membership function analysis

收稿日期: 2024-07-14

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0034)

作者简介: 康敏(2000-), 女, 内蒙古乌兰察布人, 硕士研究生, 研究方向为森林培育。(Tel) 15754841364; (E-mail) 2753000841@qq.com

通讯作者: 何炎红, (E-mail) hyh20012008@imau.edu.cn

杏树(*Armeniaca vulgaris* Lam.)属于蔷薇科(Rosaceae)杏属(*Armeniaca* Mill.), 分布于温带和亚热带地区, 在防风固沙、保持水土方面发挥了重要作用, 也是北方主要的经济林树种, 其果实具有较高的

营养价值和经济价值<sup>[1]</sup>。但由于杏树枝条常在晚秋和冬季遭受冻害,温度过低会导致木质部出现褐色,甚至出现形成层的细胞被冻死的现象,导致杏树干枯死亡,使杏树产量和经济效益受到极大的损失<sup>[1]</sup>。内蒙古呼和浩特市东乌素图享有“红杏遗村”的美誉,早期居住于此的居民大量引种杏树。得天独厚的地理环境和优质土壤、气候及水质,为杏树的生长创造了优越条件。但此地区昼夜温差较大,杏树容易受到冻害,造成果树大幅度减产。因此研究呼和浩特市不同品种杏应对低温的响应机制,评价不同品种的抗寒性,不仅在理论上具有重要意义,而且在生产上具有重要的实践意义。

低温危害的首要部位就是细胞膜,低温使细胞膜透性发生改变<sup>[2]</sup>。低温胁迫下,植物体内保护酶可清除活性氧和自由基,保护细胞免受低温冻害<sup>[3-6]</sup>。李捷<sup>[7]</sup>研究了 8 种杏树的抗寒性,结果表明,低温危害的主要部位是细胞膜,低温使细胞膜逐渐丧失选择透过性,膜内物质外渗,相对电导率增加。崔强旺等<sup>[8]</sup>研究发现,在逆境条件下,植物体内抗氧化酶、渗透调节物质均以各自的方式响应低温。郑元等<sup>[9]</sup>采用人工模拟自然的方式测定仁用杏杏树的抗寒性,发现相对电导率和丙二醛(MDA)含量与植物的抗寒性呈负相关,超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、可溶性蛋白含量与植物的抗寒性呈正相关。黄永红等<sup>[10]</sup>研究杏树对低温胁迫的响应时发现,随着温度的降低,杏树体内 SOD 活性、POD 活性、可溶性蛋白含量逐渐增加,但当温度降至杏树所能忍受的临界范围时,这些指标会显著下降。大量研究结果表明,可以将相对电导率、SOD 活性、POD 活性、MDA 含量和可溶性蛋白含量作为评价抗寒性的指标。

本研究拟通过测定不同温度下 10 种鲜食杏品种枝条相对电导率、可溶性蛋白含量、SOD 活性、POD 活性和 MDA 含量等的变化,进而对 10 种鲜食杏品种进行抗寒性评价,旨在筛选出抗寒性较强的品种,为进一步选育抗寒性强的品种提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验材料均来自乌素图杏园,此地区位于 111. 172°E, 60. 263°N,是典型的北方大陆性季风气候,冬春季节少雨雪,昼夜温差较大,年平均气温为 5~6 °C, 12 月为最冷月,历史最低气温仅为

-32. 7 °C,年平均有霜期为 105~150 d,年降水量为 337~418 mm,海拔 1 500 m 左右。于 2023 年 3 月初在乌素图杏园进行取样,选择金杏、崂山红、金太阳、白杏、陕西大黄杏、胭脂红、兰州大接杏、串枝红、丰园 29 和丰园红 10 个品种,在树体中上部,选择无病虫害且粗细均匀的一年生休眠枝,从树体东、南、西、北 4 个方向采集,每个品种采 72 份样品,将取下的材料迅速分类,贴上标签,装入袋中,带回实验室。

### 1.2 试验方法

1.2.1 材料处理 将采回的枝条末端进行蜡封处理,随后将每个品种经蜡封后的枝条平均分成 6 组,对应 6 个不同的温度梯度,用于测定杏树的相对电导率、可溶性蛋白含量、SOD 活性、POD 活性以及 MDA 含量,每组设置 12 根枝条,分组完成后将枝条放置在温度为 4 °C 的冰箱中保存备用,设置 3 次重复试验。每次处理时,将参试品种放于控温冰箱内进行低温处理,处理温度梯度为: 4 °C (CK)、-10 °C、-20 °C、-25 °C、-30 °C、-35 °C。初始温度为 4 °C,降温速度为 4 °C/h,达到目标温度后维持 12 h,再以 4 °C/h 的速度进行回温处理,回温至 4 °C,此升降温过程于控温冰箱中进行,将经过低温处理的部分枝条用于电导率的测定,其余用液氮速冻后放入 -80 °C 冰箱保存备用。

1.2.2 测定方法 相对电导率的测定参考王飞等<sup>[11]</sup>的电导法,通过 Logistic 方程计算半致死温度( $LT_{50}$ ), SOD 活性采用氮蓝四唑(NBT)法测定,POD 活性采用愈创木酚比色法测定,MDA 含量采用硫代巴比妥酸法(TBA)测定,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定<sup>[12]</sup>。

本研究利用隶属函数法<sup>[13]</sup>对 10 个供试品种的抗寒性进行综合性评价,用公式(1)和公式(2)计算 10 个供试材料抗寒指标的隶属函数值,用公式(3)计算供试材料的抗寒性综合评价值( $D_i$ )。采用 Excel 和 SPSS.22 进行数据处理分析。

$$\text{正相关关系: } u(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$\text{负相关关系: } u(X_{ij}) = 1 - (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

$$D_i = \sum u(X_{ij}) / n \quad (3)$$

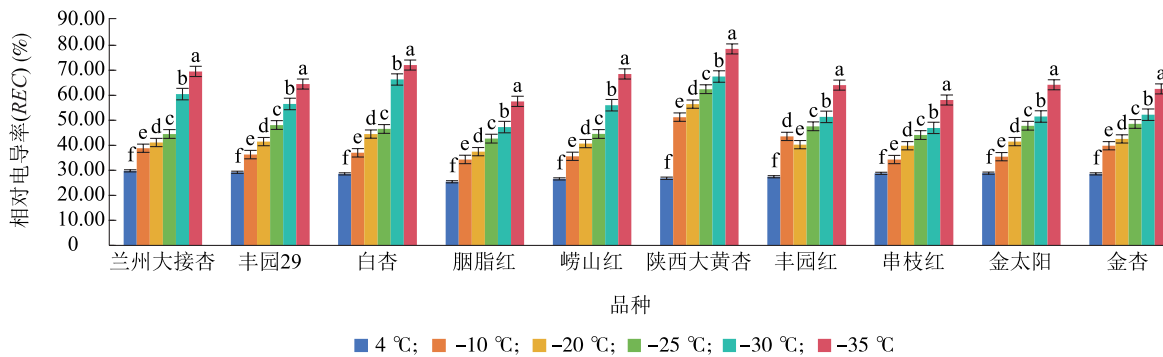
式中, $u(X_{ij})$ 为  $i$  样品  $j$  性状的隶属函数值; $X_{ij}$ 为  $i$  样品  $j$  性状的实测值; $X_{\max}$ 和  $X_{\min}$ 分别为该指标的最大值和最小值; $D_i$ 为  $i$  材料的平均隶属函数值;

$n$  为测定指数;  $D_i$  值越大, 表明抗寒性越强。

## 2 结果与分析

### 2.1 10 个不同杏品种相对电导率对低温胁迫的响应及半致死温度

由图 1 可知, 随着温度的降低, 不同杏品种相对电导率总体呈现上升趋势, 当处理温度为 4~ -10 °C 时, 各品种相对电导率均显著增加 ( $P < 0.05$ ), 其中



不同小写字母表示同一品种不同温度处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 1 低温对不同品种杏相对电导率的影响

Fig.1 Effect of low temperature on the relative electrical conductivity of different apricot varieties

以温度为自变量  $x$ , 枝条的相对电导率为因变量  $Y$ , 对不同杏品种相对电导率进行 Logistic 方程拟合回归分析, 并计算出各品种的半致死温度 ( $LT_{50}$ ), 结果见表 1。各品种的 Logistic 方程拟合度  $R^2$  为 0.826~0.958, 表明所拟合方程具有较高的可靠性, 由此计算的  $LT_{50}$  真实可用。各品种的  $LT_{50}$  为 -13.50~-31.49 °C, 胭脂红和串枝红的  $LT_{50}$  较低, 说明其抗寒性较强且显著强于其他品种, 而陕西大黄杏的  $LT_{50}$  最高, 为 -13.5 °C。

### 2.2 10 个不同杏品种 MDA 含量对低温胁迫的响应

由图 2 可知, 随着温度的降低, 不同杏品种枝条的 MDA 含量呈现先上升后下降的趋势, 在低温胁迫初期 (4~-10 °C), 丰园红和金杏的 MDA 含量变化差异不显著 ( $P < 0.05$ ), 其他品种杏的 MDA 含量显著上升。当处理温度为 -20 °C 时, 金杏的 MDA 含量最高, 达到 37.88 nmol/g, 而兰州大接杏的 MDA 含量最低, 为 20.67 nmol/g, 而在 -20 °C 时丰园红和串枝红的 MDA 含量较 -10 °C 时变化均不显著 ( $P > 0.05$ )。当处理温度为 -25 °C 时, 胭脂红、崂山红、串枝红、金太阳和金杏的 MDA 含量均达到峰值, 其中, 金杏的 MDA 含量最高, 为 39.70 nmol/g。当处理温度为 -30 °C 时, 兰州大接杏、丰园 29、白杏、陕西大黄杏和丰园红的 MDA 含量均

达到峰值。当处理温度为 -35 °C 时, 与 -30 °C 相比, 10 个品种 MDA 含量均显著下降 ( $P < 0.05$ ), 金太阳的 MDA 含量降幅最大, 为 50.00%, 金杏的 MDA 含量降幅最小, 为 18.10%, 并且在 -35 °C 时, 金杏的 MDA 含量与其余品种相比是最高的, 为 32.46 nmol/g, 串枝红的 MDA 含量最低, 为 15.09 nmol/g。

### 2.3 10 个不同杏品种 SOD 活性对低温胁迫的响应

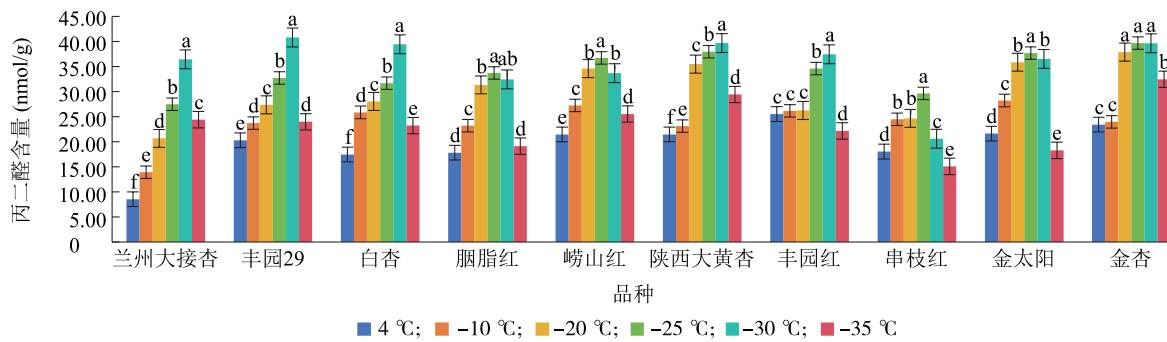
由图 3 可知, 随着温度的降低, 不同杏品种的 SOD 活性呈现不同的变化趋势。在 4 °C 时, 各品种的 SOD 活性为 207.37~555.68 U/g。在低温处理 (4~-10 °C) 时, 陕西大黄杏、丰园红和串枝红 SOD 活性均显著下降 ( $P < 0.05$ ), 其余品种 SOD 活性均显著上升 ( $P < 0.05$ )。当处理温度在 -20 °C 时, 兰州大接杏、丰园 29、胭脂红、崂山红、金太阳和金杏 SOD 活性均到达峰值, 其中金太阳的 SOD 活性最高, 为 553.38 U/g。当处理温度在 -20~-25 °C 时, 除白杏和串枝红以外, 其余品种的 SOD 活性均显著下降 ( $P < 0.05$ )。当处理温度在 -25~-30 °C 时, 各品种的 SOD 活性均显著下降 ( $P < 0.05$ ), 其中, 陕西大黄杏的 SOD 活性降幅最大, 达到 50.04%。当处理温度为 -35 °C 时, 胭脂红的 SOD 活性最高, 为 353.17 U/g。

表 1 10 个不同杏品种枝条半致死温度 ( $LT_{50}$ )

Table 1 Semi-lethal temperature ( $LT_{50}$ ) of ten different varieties of apricot branches

品种	曲线参数			$LT_{50}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	决定系数 ( $R^2$ )
	$a$	$b$	回归方程		
兰州大接杏	2.355	-0.039	$Y = \frac{100}{1+2.354e^{-0.039x}}$	-22.04	0.826
丰园 29	2.394	-0.037	$Y = \frac{100}{1+2.394e^{-0.037x}}$	-23.91	0.922
白杏	2.528	-0.046	$Y = \frac{100}{1+2.528e^{-0.046x}}$	-19.99	0.866
胭脂红	2.739	-0.032	$Y = \frac{100}{1+2.739e^{-0.032x}}$	-31.49	0.933
崂山红	2.718	-0.042	$Y = \frac{100}{1+2.718e^{-0.041x}}$	-24.10	0.881
陕西大黄杏	2.043	-0.053	$Y = \frac{100}{1+2.043e^{-0.052x}}$	-13.50	0.958
丰园红	2.278	-0.033	$Y = \frac{100}{1+2.278e^{-0.033x}}$	-24.79	0.854
串枝红	2.429	-0.029	$Y = \frac{100}{1+2.429e^{-0.029x}}$	-30.92	0.913
金太阳	2.431	-0.035	$Y = \frac{100}{1+2.431e^{-0.035x}}$	-25.45	0.911
金杏	2.414	-0.035	$Y = \frac{100}{1+2.414e^{-0.035x}}$	-24.97	0.876

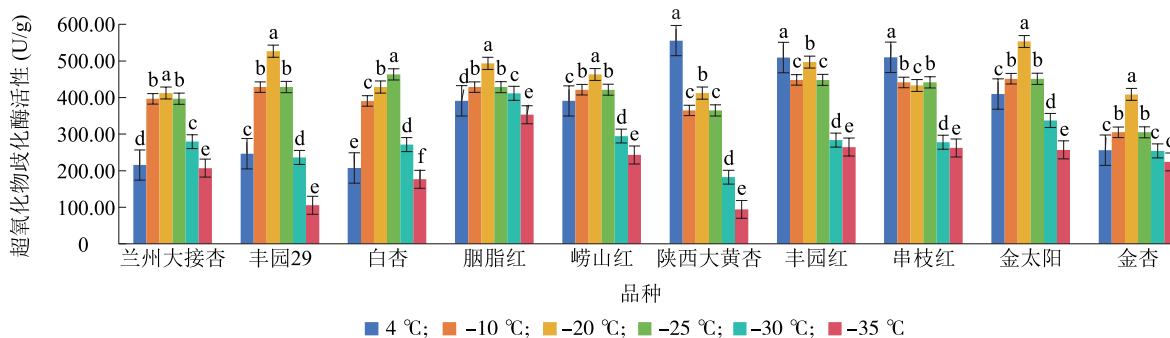
$a, b$  为常数;  $R^2$  表示数据线性拟合度, 当拟合度越趋近于 1.000 表示相关性越高。



不同小写字母表示同一品种不同温度处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 低温对不同杏品种丙二醛含量的影响

Fig.2 Effect of low temperature on the malonaldehyde content of different apricot varieties



不同小写字母表示同一品种不同温度处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

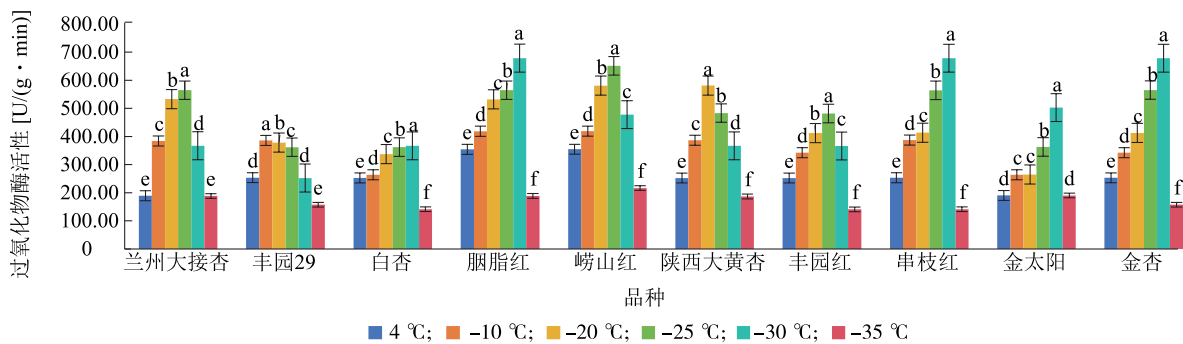
图 3 低温对不同杏品种超氧化物歧化酶活性的影响

Fig.3 Effect of low temperature on the superoxide dismutase activity of different apricot varieties

## 2.4 10 个不同杏品种 *POD* 活性对低温胁迫的响应

由图 4 可知,不同品种杏 *POD* 活性随温度的降低呈先上升后下降的变化趋势。在 4 °C 时,各品种的 *POD* 活性为 189.25~354.78 U/(g·min)。在低温胁迫初期(4~-10 °C),各品种 *POD* 活性均显著增加( $P<0.05$ ),其中,兰州大接杏的 *POD* 活性增幅最大,为 103.03%,白杏的 *POD* 活性增幅最小,为 4.50%。当处理温度为 -20 °C 时,陕西大黄杏的 *POD* 活性达到峰值,为 581.16 U/(g·min),随着低温胁迫的持续加强 *POD* 活性出现下降趋势。当处

理温度为 -25 °C 时,兰州大接杏、丰园红和崂山红的 *POD* 活性达到峰值,其中崂山红的 *POD* 活性最大,为 651.43 U/(g·min)。当处理温度为 -30 °C 时,白杏、胭脂红、串枝红、金太阳和金杏的 *POD* 活性达到峰值,其中胭脂红、串枝红和金杏的 *POD* 活性为 678.26~678.65 U/(g·min)。当处理温度为 -35 °C 时,10 个品种杏的 *POD* 活性与 -30 °C 相比均显著下降( $P<0.05$ ),其中串枝红的 *POD* 活性的降幅最大,为 79.16%,丰园 29 的 *POD* 活性下降幅度最小,为 37.64%。



不同小写字母表示同一品种不同温度处理间差异显著( $P<0.05$ )。

图 4 低温对不同杏品种过氧化物酶活性的影响

Fig.4 Effect of low temperature on the peroxidase activity of different apricot varieties

## 2.5 10 个不同杏品种可溶性蛋白含量对低温胁迫的响应

由图 5 可知,不同杏品种的可溶性蛋白含量随着温度的降低整体呈先上升后下降的趋势。在 4 °C 时,各品种的可溶性蛋白含量为 1.44~2.71 mg/g。当温度处理为 -20 °C 时,与 4 °C 相比,金杏的可溶性蛋白含量增幅最大,为 99.84%,崂山红的可溶性蛋白含量增幅最小,为 9.20%,并且崂山红、陕西大黄杏、金太阳和金杏在 -20 °C 时可溶性蛋白含量均到达峰值。当处理温度为 -25~-30 °C 时,白杏、陕西大黄杏、丰园红、串枝红、金太阳和金杏的可溶性蛋白含量均显著下降( $P<0.05$ )。当处理温度为 -25 °C 时,白杏、串枝红和丰园红的可溶性蛋白含量均达到其峰值,其中丰园红的可溶性蛋白含量最大,为 3.57 mg/g。当处理温度为 -30 °C 时,兰州大接杏、丰园 29 和胭脂红可溶性蛋白含量达到峰值,其中胭脂红的可溶性蛋白含量最大,为 3.58 mg/g。当处理温度为 -35 °C 时,与处理温度为 -30 °C 相比,除陕西大黄杏的可溶性蛋白含量变化不显著外,其余品种可溶性蛋白含量均显著下降( $P<0.05$ )。

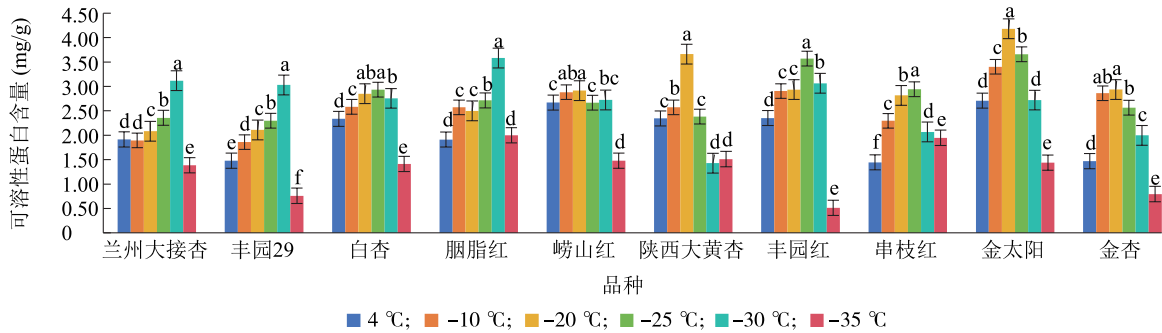
## 2.6 10 个杏品种抗寒性的综合评价

2.6.1 抗寒性指标相关性分析 为明确在低温胁迫下不同低温处理后杏树各生理指标之间的相关性,对 5 个指标进行了相关性分析,结果(表 2)表明,相对电导率与 *SOD* 活性和可溶性蛋白含量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与 *MDA* 含量呈极显著正相关( $P<0.01$ )。可溶性蛋白含量与 *SOD* 活性和 *POD* 活性呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与 *MDA* 含量呈极显著负相关( $P<0.01$ )。 *POD* 活性与 *MDA* 含量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与 *SOD* 活性呈极显著正相关( $P<0.01$ )。研究结果表明,植物组织的相对电导率与植物细胞被破坏程度呈正相关,即相对电导率与抗寒性呈负相关。*MDA* 含量与植物的抗寒能力呈负相关,*SOD* 活性和可溶性蛋白含量与植物的抗寒能力呈正相关。

2.6.2 抗寒性指标隶属函数分析 由相关性分析结果可知,5 项生理指标所反映的杏树抗寒性信息交叉重叠,很难反映出杏树受低温胁迫的严重程度,评价结果具有很大的局限性。因此,进一步采用隶属函数综合分析来评价 10 个不同品种杏树的抗寒性,通过

隶属函数计算公式对各指标测定值进行优化,得出各生理指标的隶属函数值(表 3),根据隶属函数综合分析,得出杏树品种的抗寒能力排序,从强到弱为胭脂红>崂山红>串枝红>金太阳>丰园红>兰州大接杏>陕

西大黄杏>白杏>丰园 29>金杏。在供试的 10 种杏树中,胭脂红的隶属函数平均值最大,为 0.671,且明显大于抗寒性最差的金杏,所以在今后杏树抗寒性的研究和栽培选种中,胭脂红可以作为首选品种。



不同小写字母表示同一品种不同温度处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 5 低温对不同品种杏可溶性蛋白含量的影响

Fig.5 Effect of low temperature on the soluble protein content of different apricot varieties

表 2 不同低温胁迫下杏枝条各生理指标间的相关系数矩阵

Table 2 Matrix of correlation coefficients between the physiological indicators of apricot branches under different cold stresses

指标	相关系数				
	丙二醛含量	超氧化物歧化酶活性	过氧化物酶活性	可溶性蛋白含量	相对电导率
丙二醛含量	1.000				
超氧化物歧化酶活性	-0.061	1.000			
过氧化物酶活性	-0.463 **	0.355 **	1.000		
可溶性蛋白含量	-0.464 **	0.574 **	0.472 **	1.000	
相对电导率	0.366 **	-0.608 **	-0.143	-0.274 **	1.000

\*\* 表示相关性在 0.01 水平显著。

表 3 采用隶属函数法综合分析 10 个杏品种的抗寒性

Table 3 Cold resistance of ten apricot varieties comprehensively analyzed by membership function method

品种	隶属函数值					隶属函数平均值	抗寒性排序
	丙二醛含量	超氧化物歧化酶活性	过氧化物酶活性	可溶性蛋白含量	相对电导率		
兰州大接杏	0.780	0.353	0.537	0.302	0.493	0.492	6
丰园 29	0.382	0.472	0.292	0.158	0.326	0.326	9
白杏	0.411	0.405	0.148	0.537	0.376	0.376	8
胭脂红	0.476	0.790	0.862	0.556	0.671	0.671	1
崂山红	0.249	0.583	0.921	0.592	0.586	0.586	2
陕西大黄杏	0.184	0.302	0.578	0.443	0.377	0.377	7
丰园红	0.332	0.744	0.339	0.583	0.499	0.499	5
串枝红	0.715	0.650	0.559	0.394	0.580	0.580	3
金太阳	0.256	0.802	0.209	0.870	0.534	0.534	4
金杏	0.079	0.159	0.546	0.288	0.268	0.268	10

### 3 讨论

低温伤害使细胞膜逐渐丧失选择透过性,细胞膜透性增加,膜内物质外渗<sup>[14-16]</sup>,相对电导率增加,而相对电导率大小直接反映了植物细胞对外界环境变化的响应能力。王茹华等<sup>[17]</sup>、饶席兵等<sup>[18]</sup>研究发现,在低温胁迫下,月季、甘蔗的相对电导率随着温度的降低呈上升趋势,这与本研究结果一致。在本研究中,相对电导率随着低温胁迫的加大均呈上升趋势,与对照相比,在-35℃时陕西大黄杏的相对电导率增幅显著大于其他品种,说明陕西大黄杏细胞膜系统受害程度显著高于其他品种,其抗寒能力较低。

当植物受到低温危害时,植物体内含有的保护酶会充分发挥保护作用<sup>[19-21]</sup>。前人研究的结果表明,*SOD* 活性和 *POD* 活性与植物的抗寒性呈正相关,*MDA* 含量与植物的抗寒性呈负相关。杨燕君等<sup>[22]</sup>、程世强等<sup>[23]</sup> 研究山西杏和苦瓜幼苗的抗寒性时,发现其 *POD* 活性和 *SOD* 活性随温度的下降呈上升趋势。林苗苗等<sup>[24]</sup> 在其研究中也证实了这一点。但与相关研究不同的是,在本研究中,陕西大黄杏、丰园红和串枝红的 *SOD* 活性在-10℃时均出现下降趋势,随着温度的持续降低,其 *SOD* 活性上升,然后随着温度的下降 *SOD* 活性又下降,说明这 3 个品种对于突然的低温极其敏感,随后 *SOD* 活性逐渐上升。植物通过提高 *SOD* 活性来清除自由基和活性氧,抵御植物受到的低温伤害<sup>[25]</sup>,但当温度超越了植物所能忍受的范围时,植物体内 *SOD* 活性开始下降,低温对植物造成了不可逆的损伤。

植物遭受低温胁迫时,可溶性蛋白通过植物细胞内重要渗透过程,与相关酶活性协同变化,导致细胞膜蛋白的疏水结构不稳定,产生抗逆性功能蛋白,使其可溶性蛋白含量增加<sup>[26]</sup>,抗冻能力增强。罗娅等<sup>[27]</sup> 的研究结果表明草莓在低温胁迫下,可溶性蛋白质含量迅速增加以应对低温。王晓龙等<sup>[28]</sup>、赵硕<sup>[29]</sup> 的研究结果表明可溶性蛋白含量随温度降低呈逐渐上升趋势,在本研究中,丰园 29、兰州大接杏、胭脂红在试验温度范围内可溶性蛋白含量于-30℃时达到最大值继而下降,此结果初步表明:抗寒性强的株系可溶性蛋白含量较高,也表明植物遭受低温胁迫时会启动体内蛋白质保护机制,植物产生更多蛋白质以抵御严寒,但当温度低到一定程度

时,抗寒性较差的品种会降低产生蛋白质的速率,甚至完全停止合成。

### 4 结论

综上所述,可以将相对电导率、*SOD* 活性、*POD* 活性、*MDA* 含量、可溶性蛋白含量作为评价杏树抗寒性的指标,相对电导率和 *MDA* 含量与植物的抗寒性呈负相关,*SOD* 活性和可溶性蛋白含量与植物的抗寒性呈正相关。通过隶属函数综合分析得出 10 个杏品种的抗寒能力强弱顺序为胭脂红>崂山红>串枝红>金太阳>丰园红>兰州大接杏>陕西大黄杏>白杏>丰园 29>金杏。所以在今后的低温地区的杏树研究和栽培选种中,胭脂红可以作为首选品种。

#### 参考文献:

- [1] 王晓倩,白玉娥,林涛,等. 西伯利亚杏雌蕊发育过程的初步探究[J]. 分子植物育种,2018,16(14):4773-4777.
- [2] 苗阳. 辽西地区引种野杏枝条解剖结构与抗寒生理特性关系研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2018.
- [3] MCKERSIE B D, MURNAGHAN J, JONES K S, et al. Iron-superoxide dismutase expression in transgenic alfalfa increases winter survival without a detectable increase in photosynthetic oxidative stress tolerance[J]. Plant Physiology, 2000, 122(4):1427-1437.
- [4] 吴宇欣,蔡昌杨,唐诗蓓,等. 植物响应低温的生长发育及分子机制研究进展[J]. 江苏农业科学,2023,51(19):1-9.
- [5] 赵金凤. 公主岭霉素引发对低温胁迫下玉米幼苗生长及耐寒性的调节[D]. 长春:吉林农业大学,2022.
- [6] 黄月华. 五种桉树苗期耐寒性能的初步研究[D]. 海口:华南热带农业大学,2003.
- [7] 李捷. 8个杏树品种的抗寒性研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2008.
- [8] 崔强旺,曹子怡,贾光红,等. 低温胁迫对4个菜用甘薯品种生理生化特性的影响[J]. 分子植物育种,2018,16(17):5804-5811.
- [9] 郑元,杨途熙,魏安智,等. 低温胁迫对仁用杏几个抗寒生理指标的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2008,36(1):163-167.
- [10] 黄永红,沈洪波,陈学森. 杏树抗寒生理研究初报[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2005,36(2):191-195.
- [11] 王飞,李嘉瑞,陈登文. 用电导法配合 Logistic 方程确定杏花期的抗寒性[J]. 西北农业大学学报,1997,25(5):59-63.
- [12] 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.
- [13] 于庆帆. 伊犁地区树上干杏6个不同株系抗寒性的研究[D]. 石河子:石河子大学,2018.
- [14] STEWART R R, BEWLEY J D. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes[J]. Plant Physiology, 1980, 65

- (2):245-248.
- [15] 毛可欣. 猕猴桃越冬期生理响应及耐寒性评价[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
- [16] 坎智勇,张德辉,李中兴,等. 90 个苹果品种耐寒性评价和全基因组关联分析[J]. 园艺学报,2023,50(5):921-932.
- [17] 王茹华,丁久敏,张启发. 低温胁迫对几种月季砧木生理特性的影响[J]. 北方园艺,2023(12):59-65.
- [18] 饶席兵,钱祺锋,曾 丹,等. 低温胁迫下不同甘蔗品种的生理响应及耐寒性评价[J]. 热带作物学报,2024,45(4):742-751.
- [19] 李亚波,张文健,何丽萍,等. 不同生物引发条件对番茄冷胁迫下种子活力和幼苗生理特性的影响[J]. 南方农业学报,2024,55(2):531-539.
- [20] 李 可,蒋伟勤,车 阳,等. 水稻冷害成灾机制与调控机理研究进展及展望[J]. 江苏农业科学,2024,52(2):31-40.
- [21] 张赞培,谷月营,尚旭岚,等. 自然低温下 23 个青钱柳家系耐寒性评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(4):85-92.
- [22] 杨燕君,杨复康,宋永宏,等. 山西不同杏品种抗寒性主成分分析[J]. 山西农业科学,2020,48(12):1913-1915,1963.
- [23] 程世强,吴智明,曾 晶,等. 低温胁迫对苦瓜成苗及幼苗生理生化特性的影响[J]. 热带作物学报,2011,32(11):2099-2103.
- [24] 林苗苗,孙世航,齐秀娟,等. 猕猴桃抗寒性研究进展[J]. 果树学报,2020,37(7):1073-1079.
- [25] 魏 鑫,王 升,王兴东,等. 不同蓝莓品种对低温处理的生理响应及抗寒性评价[J]. 河南农业科学,2023,52(8):115-125.
- [26] 欧 欢. 不同扁桃品种抗寒性研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2019.
- [27] 罗 娅,汤浩茹,张 勇. 低温胁迫对草莓叶片 *SOD* 和 *AsA-GSH* 循环酶系统的影响[J]. 园艺学报,2007,34(6):1405-1410.
- [28] 王晓龙,杨 翌,来永才,等. 不同苜蓿越冬期根系生理代谢响应研究[J]. 中国饲料,2023(23):126-131.
- [29] 赵 硕. 基于转录组的西伯利亚杏花器官抗冻机制研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2022.

(责任编辑:陈海霞)