

孙梦颖,王春雨,郭伟珍,等. 4 个梨品种在低温胁迫下的生理响应及耐寒性评价 [J]. 江苏农业科学,2025,53(12):189-194.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.12.026

4 个梨品种在低温胁迫下的生理响应及耐寒性评价

孙梦颖^{1,2}, 王春雨^{1,2}, 郭伟珍³, 李莹³, 杨敏生^{1,2}, 张军^{1,2}, 赵京献³

(1. 河北农业大学林学院, 河北保定 071000; 2. 河北省树木遗传资源与森林保护重点实验室, 河北保定 071000;

3. 河北省林业和草原科学研究院, 河北石家庄 050061)

摘要:为了筛选出抗寒能力强的梨品种,选取 4 个梨品种 HG051102、美玉、SJ051105 和 041047 幼果为试验材料,通过人工模拟低温的方法,研究不同低温胁迫(18、2、0、-2、-4℃)处理对 4 种梨幼果丙二醛(MDA)含量、相对电导率(REC)、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、可溶性糖(SS)含量、游离脯氨酸(PRO)含量等生理指标的影响。结果表明:随着温度降低,4 个梨品种幼果的相对电导率和丙二醛含量呈逐渐上升的趋势,超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性及游离脯氨酸、可溶性糖含量呈现先增加后减少的趋势。4 个梨品种幼果的过冷却点分别为 -6.2℃(HG051102)、-5.5℃(美玉)、-4.4℃(SJ051105)、-4.8℃(041047)。相关性分析和隶属函数法结果显示,4 个梨品种幼果抗寒能力从大到小依次为 HG051102 > 美玉 > 041047 > SJ051105。其中,HG051102 梨幼果抗寒性最强,该幼果抗寒性强的原因是其具有较低的脂质过氧化物和较高水平的抗氧化酶活性。HG051102 品种可作为抗寒育种的优选材料,以上生理指标也可作为评估其他品种抗寒性的参考指标。

关键词:梨;幼果;生理生化;过冷却点;抗寒性评价

中图分类号:S661.201 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)12-0189-06

低温是一种常见的非生物胁迫因素,影响植物的地理分布,并限制了植物的生长发育^[1]。低温胁迫主要通过 3 种形式呈现:冷害,发生在 0℃以上至 15℃左右的非冻结温度范围内,对植物造成损害;冻害,发生在冰点以下,植物体内水分冻结,破坏细胞结构;霜害,当气温降到冰点以下,霜直接接触对植物表面造成损害^[2]。由于全球气温的波动导致极端天气频发,给农作物生产带来重创,甚至导致农作物大面积绝收,这严重制约了农业的持续发展^[3]。因此,开发耐寒的植物种质以应对低温带来的挑战,对于确保农业健康稳定发展,以及维护生态系统的平衡均有重要意义^[4]。

低温环境会抑制植物的正常代谢活动,进而限制植物的生长发育^[5]。在植物细胞的代谢活动中,会产生一类名为活性氧(reactive oxygen species, ROS)的含氧化合物,它们由氧气衍生,具有较高的

化学活性,主要包含羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧阴离子($\text{O}_2^- \cdot$)和过氧化氢(H_2O_2)等形态^[6]。ROS 在植物体内主要由线粒体等细胞器中的氧化还原反应所产生,具有多重作用,一方面它们充当关键的信号分子,参与调控植物的分子和生理生化活动,响应非生物胁迫,并调控基因表达和蛋白质修饰等^[7]。另一方面过量的 ROS 能够破坏细胞内膜脂和膜蛋白结构,引起细胞膜的损伤,导致细胞代谢紊乱,甚至使细胞死亡^[8]。而低温会加重细胞膜脂氧化,从而增加体内超氧自由基阴离子、过氧化氢、羟基自由基等活性氧的含量,同时降低抗氧化酶的活性,减少其清除 ROS 的能力,导致 ROS 在细胞内积累^[9-10]。为了应对低温带来的挑战,植物激活了一系列抗氧化防御机制,以保持细胞的完整性和功能,这些机制包括增强细胞膜的稳定性和调节渗透调节物质,从而提高植物的生存能力^[11]。在植物的抗氧化机制中,超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和过氧化氢酶(peroxidase, POD)扮演着至关重要的角色。SOD 作为防御的第 1 道线,主要促进 $\text{O}_2^- \cdot$ 分解成 O_2 和 H_2O_2 , 而 POD 则进一步通过酶促反应分解 H_2O_2 , 从而降低细胞内 ROS 的水平^[11-12]。抗氧化酶活性的提升有助于防止脂质过氧化,保持细胞膜的稳定性,降低低温对植物

收稿日期:2024-07-29

基金项目:河北省重点研发计划(编号:21326308D-1-6);河北省现代农业产业技术体系创新团队建设(编号:HBCT2024170404)。

作者简介:孙梦颖(1999—),女,河北保定人,硕士研究生,主要从事林木遗传育种研究。E-mail:15503121758@163.com。

通信作者:赵京献,正高级工程师,主要从事果树研究。E-mail:zhjx6902@163.com。

的损害^[13-14]。在低温环境下,脯氨酸(proline, PRO)和可溶性糖(soluble sugar, SS)作为关键的渗透调节剂,通过提高细胞液的渗透压来提高植物细胞的保水能力,有利于减少因细胞失水而引发的原生质体损伤,使植物能更好地抵御低温环境带来的不利影响^[15]。同时,细胞膜系统是低温损伤植物的原发部位,低温可能引起细胞内电解质外渗,从而使相对电导率(relative electrical conductivity, REC)上升^[16]。丙二醛(malondialdehyde, MDA)作为膜脂过氧化反应的终产品,其水平的上升反映了植物体内脂质过氧化的增强,从而间接反映了细胞受损的程度^[17]。

梨属于蔷薇科梨属(*Pyrus*),其果实不仅含有多种对人体有利的营养物质,还具备多种食疗功效,如生津润燥、清热化痰等^[18]。我国是梨的重要原产地之一,种植面积居世界前列,在全国各地均有分布和栽培。幼果时期是梨生长发育中尤为关键的阶段,对环境条件极为敏感^[19]。“倒春寒”会对幼果造成伤害,这种伤害不仅会减少坐果率,影响果实的产量,还会降低果实的品质,进而会对梨产业造成严重的经济损失^[20]。HG051102、美玉、SJ051105和041047均为中早熟梨品种,坐果率较高^[21]。近年来,气候变暖的背景下,全球自然灾害频发。在此背景下,我国华北地区的霜冻期普遍提前^[20],因此深入了解上述梨品种的抗寒性有助于培育出更适应低温环境的新品种,从而提高梨的稳定性和产量,增强梨产业对气候变化的适应能力^[22]。因此,本研究选取了上述4个梨品种的幼果为研究对象,从生物膜稳定性、抗氧化酶活性以及渗透调节物质积累3个方面进行抗寒性评估,利用相关性分析和隶属函数评估法,对各品种的抗寒能力进行了量化排序,以期今后进一步探究梨抗寒的机理提供重要的理论基础,并为选育梨抗寒新种质提供重要的现实依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与处理

试验材料为种植于河北省林业和草原科学研究院梨树种质资源圃(41°35'N, 114°28'9"E)的4个梨品种无性系:HG051102、美玉、SJ051105、041047。4个品种的梨树采取完全一致的常规水肥管理。2021年4月,每个品种选取5棵树,从距离地面2.0~2.5 m的树冠处的不同方位随机采集各品种

的幼果30株(果直径为2~3 cm),并带回河北省树木遗传资源与森林保护重点实验室进行后续模拟低温处理。具体而言,将4个梨品种的幼果置于MSZ-2F霜箱内进行模拟低温处理4 h,温度梯度分别设置为18℃[对照(CK)]、2℃、0℃、-2℃和-4℃。每个温度处理,使用每个品种的梨幼果60个。随后,将参试幼果液氮速冻,并立即保存于-80℃超低温冰箱,用于后续的生理指标测定。

1.2 指标测定

过冷却点是使用自动控制温度的人工霜箱测量。将幼果放入箱内,并将带有热电偶的温度传感器探头放置在待测量的幼果上。以10次/s的速度扫描,连续自动记录幼果表面的数据变化。半小时内温度降至4℃,然后以2℃/h的速度继续下降至-7℃,最后以4℃/h的速度恢复到室温,每个处理重复3次。如图1所示,在降温过程中,通过监测温度变化曲线可以识别幼果的过冷点(T_1)和结冰点(T_2)。当温度降至某一水平,幼果内部细胞液开始凝固并释放热量,温度曲线开始出现峰值,其中的起始温度即为过冷却点。随后,当细胞溶液形成冰晶核时,温度达到一个稳定状态,此时的最高温度即为结冰点^[23]。幼果的过冷能力为过冷点和结冰点的温度差,即过冷能力=过冷去点温度-结冰点温度。相对电导率(REC)采用DDS-303A电导率仪测定^[24],丙二醛(MDA)、过氧化氢酶活性(POD)、游离脯氨酸(PRO)、超氧化物歧化酶(SOD)活性、可溶性糖(SS)含量采用苏州格锐思生物科技有限公司的试剂盒测定。

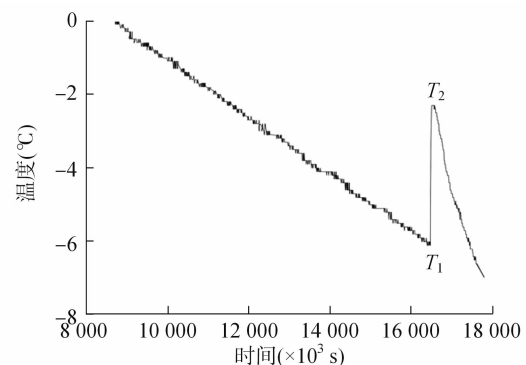


图1 低温处理中梨幼果的过冷却点(T_1)和结冰点(T_2)示意图

1.3 数据统计与分析

试验数据用Excel 2021进行记录,使用SPSS 22.0软件对数据进行统计分析,采用Origin 2021软件绘图。使用隶属函数法综合评估4个参试品种的抗寒性。参考前人方法可知,POD活性、SOD活性、

游离脯氨酸含量和可溶性糖含量与抗寒能力呈正相关^[25-27],公式为:

$$Z_{ij} = (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin})$$

相对电导率和 MDA 含量与抗寒能力负相关^[28-29],公式为:

$$Z_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin})$$

式中: Z_{ij} 代表第*i*个品种第*j*个评估指标的隶属函数值; X_{ij} 指该品种对应指标的测定值; X_{imin} 和 X_{imax} 分别代表该指标的最低值和最高值^[30]。

2 结果与分析

2.1 低温处理下 4 个梨品种幼果过冷却点与结冰点的差异

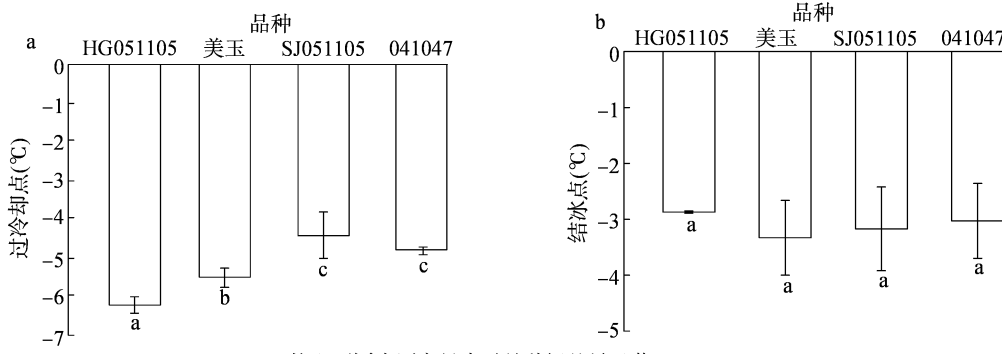
如图 2 所示,HG051102 过冷却点最低,其次为美玉,而 041047 和 SJ051105 则差异不显著(图 2-a)。4 个梨幼果的结冰点之间差异不显著(图 2-b)。幼果的过冷能力通过结冰点与过冷却点之间的温度差表示,温度差越大,其过冷能力越强^[31],4 个品种按过冷能力由高到低排序依次为 HG051102

(3.3 ℃)、美玉(2.17 ℃)、041047(1.77 ℃)和 SJ051105(1.23 ℃)。

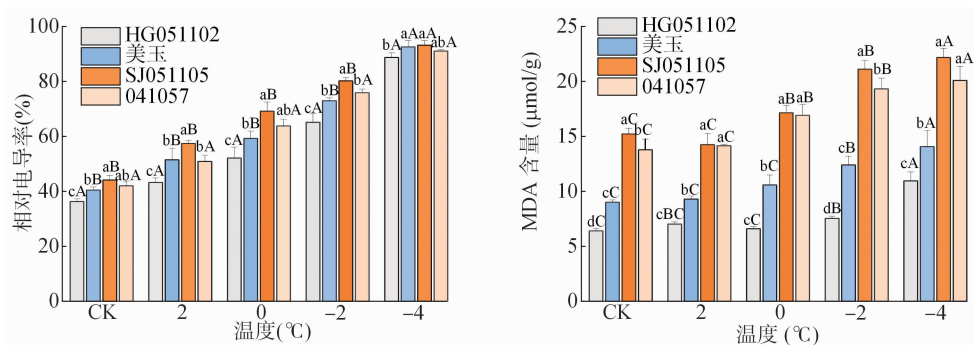
2.2 低温处理下 4 个梨品种幼果相对电导率和 MDA 水平的变化

图 3-a 体现了 4 个梨品种在低温胁迫下相对电导率的变化。随着温度的不断降低,4 个梨品种幼果的相对电导率呈上升趋势。与对照相比,当温度降到 -4 ℃ 时,美玉、SJ051105 的相对电导率显著增加($P < 0.05$),增幅分别为 128.7% 和 111.2%,而 HG051102 和 041047 的 REC 则无显著变化。HG051102 在各温度下的相对电导率水平均低于其他 3 个梨品种($P < 0.05$)。

随着温度的降低,4 个梨品种幼果的 MDA 水平总体呈上升趋势。与对照相比,当温度降至 -4 ℃ 时,HG051102、美玉、SJ051105 和 041047 的 MDA 水平显著提高($P < 0.05$),增幅分别为 71.0%、56.0%、45.7% 和 45.8%,4 个梨幼果的 MDA 含量都在 -4 ℃ 温度下到达峰值(图 3-b)。HG051102 在 -4 ℃ 下显著低于其他品种($P < 0.05$)。



柱上不同小写字母表示品种间差异显著($P < 0.05$)
图 2 低温处理下 4 个梨品种幼果过冷却点和结冰点温度



柱上不同小写字母表示相同温度下不同品种间差异显著 ($P < 0.05$); 柱上不同大写字母表示不同温度下同一品种间差异显著 ($P < 0.05$)。图 4、图 5 同

图 3 低温处理下 4 个梨品种幼果 REC 和 MDA 含量

2.3 低温处理对 4 个梨品种幼果抗氧化酶的影响

由图 4-a 可知,随着温度的下降,4 个梨品种幼果的 POD 活性总体呈先增加后减少的趋势。4

个梨品种幼果的 POD 活性都在 0 ℃ 下达到峰值。与对照相比,当温度降到 0 ℃ 时,HG051102、美玉、SJ051105 和 041047 的 POD 活性分别显著提高

135.3%、100.0%、109.1%、107.7% ($P < 0.05$)。HG051102 的 POD 活性在 0 °C 下显著高于美玉和 041047, 而 SJ051105 的 POD 活性在 0 °C 下显著低于其他 3 个品种 ($P < 0.05$)。由图 4 - b 可知, 随着温度的降低, 4 个梨品种幼果的 SOD 活性总体呈先上升后下降的趋势。与对照相比, 当温度降到 0 °C 时,

HG051102、美玉、SJ051105 的 SOD 活性分别显著提高 62.5%、49.2%、39.1% ($P < 0.05$)。041047 的 SOD 活性在 -2 °C 达到峰值, 与对照相比, 增加了 33.2%。温度在 0、-2 °C 时, HG051102 的 SOD 活性较高, 而 SJ051105 的 SOD 活性在 2 °C 时显著低于其他品种 ($P < 0.05$)。

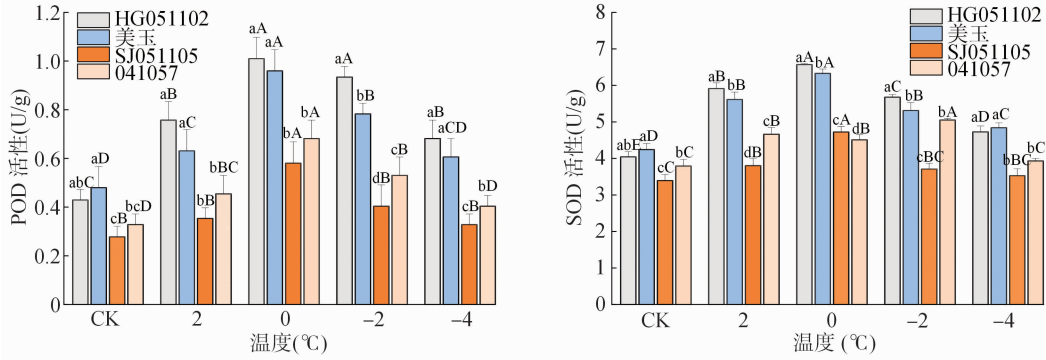


图4 低温处理下 4 个梨品种幼果 POD 和 SOD 含量

2.4 低温处理对 4 个梨品种幼果游离脯氨酸和可溶性糖含量的影响

由图 5 - a 可知, 随着温度的下降, 4 个梨品种幼果的游离脯氨酸含量遵循先增加后减少的倒“V”形模式, 但达到峰值的时间点和变化增幅各有差异。与对照相比, 当温度降到 0 °C 时, 美玉、SJ051105、041047 的游离脯氨酸含量显著增加 ($P < 0.05$), 增幅分别为 124.6%、114.3%、115.5%。HG051102 在 -2 °C 时游离脯氨酸含量达到峰值, 与

常温下相比增加了 205.8%。由图 5 - b 可知, 在低温胁迫下, 4 个梨品种幼果的可溶性糖含量总体呈先上升后下降的趋势。与对照相比, 当温度降到 -2 °C 时, HG051102、美玉和 041047 的可溶性糖含量显著增加 ($P < 0.05$), 增幅分别为 128.5%、85.2%、82.0%。SJ051105 的可溶性糖含量在 0 °C 温度时达到峰值, 与常温下相比增加了 91.8%。当温度处于 2 ~ -4 °C 时, HG051102 的可溶性糖含量显著高于其他品种 ($P < 0.05$)。

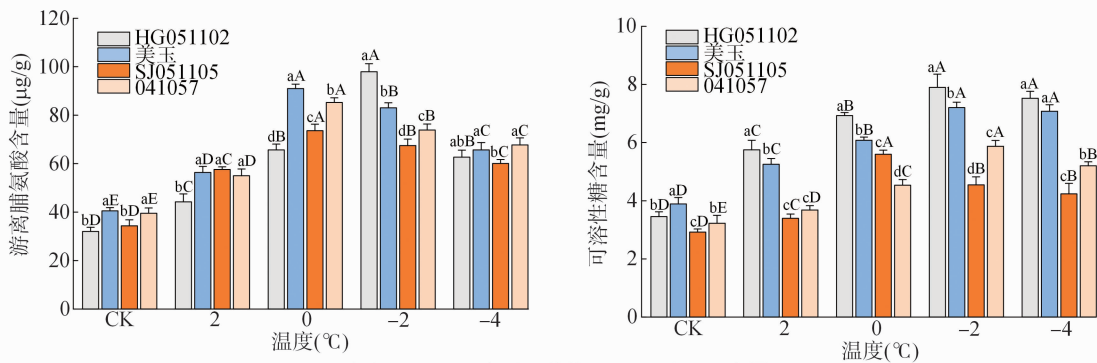


图5 低温处理下 4 个梨品种幼果 PRO 和 SS 含量

2.5 低温处理下 4 个梨品种幼果抗寒能力综合评价

如图 6 - a 所示, 4 个梨品种幼果的 MDA 含量与 REC 之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。此外, MDA 含量和 SOD、POD 活性间均呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。说明各指标间应采用联合分析的方法, 以对试验材料的抗寒性进行综合评价。基于本试验的 5 个生理生化指标, 计算 4 个不同梨品种幼

果各指标的隶属函数值 (图 6 - b), 并取平均值作为评估品种间抗寒性的综合依据。结果 (图 6 - b) 表明, 4 个参试梨品种幼果的综合抗寒性从强到弱依次为 HG051102 > 美玉 > 041047 > SJ051105。

3 讨论

植物对胁迫的反应是一个复杂的生理过程^[32]。当植物遭遇低温胁迫时, 细胞膜首先遭受损害, 导

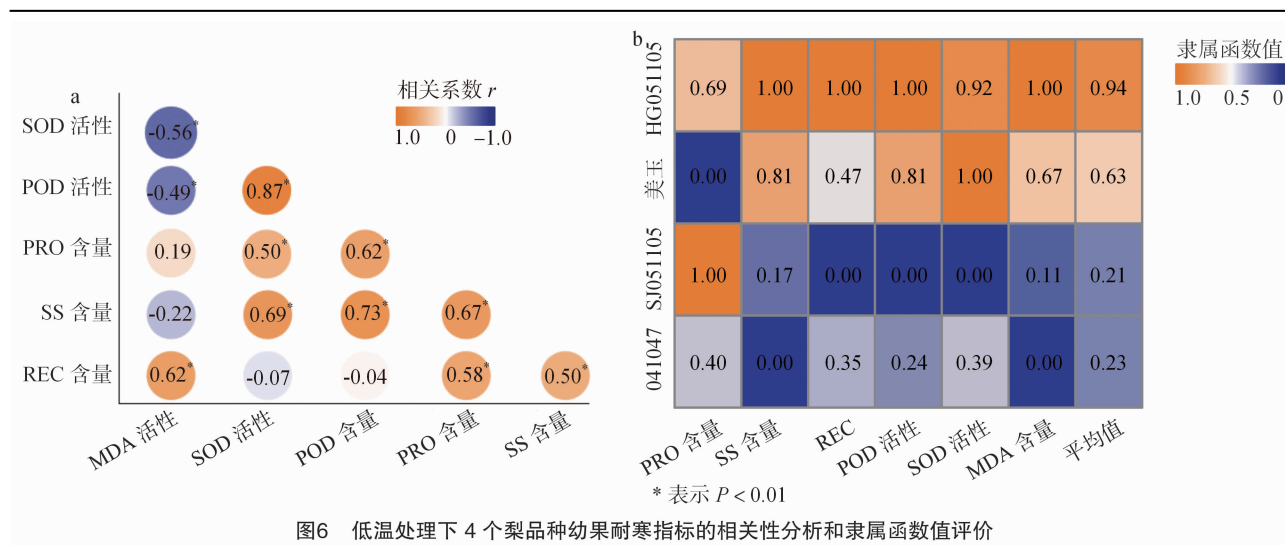


图6 低温处理下4个梨品种幼果耐寒指标的相关性分析和隶属函数值评价

致细胞内部电解质外渗,细胞液浓度降低,细胞内的渗透压随之上升^[33-35]。本研究中,随着温度的降低,美玉、SJ051105的REC水平显著增加,而HG051102和041047的REC则无显著变化。说明HG051102和041047对低温的适应性较强。

SOD、POD活性与MDA含量之间的相互关系是动态变化的,受到各品种自身防御机制的影响^[36-37]。低温会破坏植物的细胞膜,引起膜脂过氧化,形成主要的氧化终产物——MDA^[38]。而SOD和POD通过清除自由基和过氧化氢阻碍脂质过氧化反应的发生,从而间接降低MDA的生成^[36]。本研究中随着温度的降低,4个梨品种幼果的SOD和POD活性先升高后下降,美玉和041047的MDA含量显著增加,而HG051102和SJ051105的MDA含量先小幅度下降后又上升。这可能是因为低温初期,植物会迅速启动体内的抗氧化系统,增强SOD和POD等抗氧化酶的活性,减少了自由基的产生,会暂时降低MDA生成,但随着温度进一步下降,植物代谢过程失衡,酶活性减弱,清除自由基的效率降低,导致MDA含量增加^[39]。

游离脯氨酸和可溶性糖是植物中关键的渗透调节剂^[40]。植物在受到低温胁迫后,可以积累大量的脯氨酸和可溶性糖作为防脱水剂来稳定细胞的膨压^[41-42]。本研究中随着温度的降低,4个梨品种幼果的可溶性糖、游离脯氨酸含量总体呈现先上升后下降的趋势,可能是因为随着植物细胞对温度的适应,积累的渗透调节物质会被分解和利用作为能量来源,导致可溶性糖、游离脯氨酸含量下降^[41]。这说明可溶性糖和脯氨酸对于植物在逆境中的适应起着关键作用。

过冷却点是衡量植物抗冻能力的关键指标,它反映了植物避免细胞内结冰的能力,具备较低过冷却点的植物能在更冷的环境中维持细胞内水分的液态,从而减少低温引发的冰晶形成,降低对细胞结构造成的物理性损伤^[43]。本研究中梨幼果SJ051105与041047的过冷却点差异不大,过冷却点最低的为HG051102,其次为美玉。说明HG051102的抗寒性最高,其次为美玉。结合各项生理指标,采用隶属函数法综合评价4个梨幼果的耐寒性。HG051102隶属函数平均值最高,表示其在4个品种中的抗寒性最高,SJ051105的隶属函数平均值最低,表示其抗寒性相对较弱。结果表明4个梨幼果的抗寒性强弱排序为HG051102 > 美玉 > 041047 > SJ051105。

HG051102的抗寒性最高,即在低温胁迫下,HG051102的相对电导率和MDA含量显著低于其他品种,而POD活性显著高于其他品种。说明抗寒性强的品种可能是具有较低的脂质过氧化物和较高水平的抗氧化酶活性。

4 结论

随着温度的降低,4个梨品种幼果的相对电导率和丙二醛含量逐渐升高,游离脯氨酸和可溶性糖含量以及POD和SOD活性先升高后下降。根据过冷却点和隶属函数值综合评价4个梨品种的幼果抗寒性,其由强到弱为HG051102 > 美玉 > 041047 > SJ051105。

参考文献:

- [1] Wang Y X, Hu Y, Chen B H, et al. Physiological mechanisms of resistance to cold stress associated with 10 elite apple rootstocks[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(4): 857-866.
- [2] McCully M E, Canny M J, Huang C X. The management of

- extracellular ice by petioles of frost - resistant herbaceous plants[J]. *Annals of Botany*,2004,94(5):665 - 674.
- [3] Soualiou S,Duan F Y,Li X,et al. Crop production under cold stress: an understanding of plant responses, acclimation processes, and management strategies[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*,2022,190:47 - 61.
- [4] Wang X,Li X M,Zhou Q,et al. Comparison and evaluation of low - temperature tolerance of different soybean cultivars during the early - growth stage[J]. *Agronomy*,2023,13(7):1716.
- [5] Yang X Y,Wang R,Hu Q L,et al. *DUCE1*, a stress - responsive gene from *Dimocarpus longan*, enhances cold tolerance in transgenic *Arabidopsis* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 142: 490 - 499.
- [6] Dutilleul C,Garmier M,Noctor G,et al. Leaf mitochondria modulate whole cell redox homeostasis, set antioxidant capacity, and determine stress resistance through altered signaling and diurnal regulation[J]. *The Plant Cell*,2003,15(5):1212 - 1226.
- [7] Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species; metabolism, oxidative stress, and signal transduction[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2004,55:373 - 399.
- [8] 许世达,王立,吴莹,等. 低温层积对3种椴树属植物种子活性氧含量和抗氧化酶活性的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2022,31(6):84 - 86.
- [9] 曹燕燕,葛昌斌,齐双丽,等. 不同冬小麦品种(系)拔节期低温胁迫生理反应及抗寒性评价[J]. *江苏农业科学*,2022,50(17):59 - 66.
- [10] 姜恒,张志刚,杨建军,等. 4种夏栎对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J]. *河北大学学报(自然科学版)*,2024,44(4):406 - 413.
- [11] Green R, Fluhr R. UV - B - induced PR - 1 accumulation is mediated by active oxygen species [J]. *The Plant Cell*,1995,7(2):203 - 212.
- [12] Garratt L C,Janagoudar B S,Lowe K C,et al. Salinity tolerance and antioxidant status in cotton cultures[J]. *Free Radical Biology and Medicine*,2002,33(4):502 - 511.
- [13] 陆皎云,田宏,熊军波,等. 14份乡土狼尾草材料幼苗的耐冷性综合评价[J]. *草业学报*,2024,33(8):98 - 111.
- [14] 章希娟,许玲,魏秀清,等. 不同防寒措施对莲雾抗寒性的影响[J]. *中国南方果树*,2019,48(5):24 - 27.
- [15] 王芳,王淇,赵曦阳. 低温胁迫下植物的表型及生理响应机制研究进展[J]. *分子植物育种*,2019,17(15):5144 - 5153.
- [16] 谢婉莹,祁银燕,刘小利,等. 青海九个核桃新品种引种的抗寒性[J]. *北方园艺*,2023(12):29 - 36.
- [17] 王树刚,王振林,王平,等. 不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价[J]. *生态学报*,2011,31(4):1064 - 1072.
- [18] 岳郁,黄平,陈虎,等. ‘玉露香’与‘新世纪’梨杂交F₁代果实品质和香气成分的分析与评价[J]. *食品科学*,2023,44(24):277 - 285.
- [19] 王静,张晓煜,杨洋,等. 宁夏梨树霜冻指标试验研究[J]. *中国农学通报*,2014,30(28):122 - 127.
- [20] 梁小娟,张晓煜,杨永娥,等. 宁夏2个桃品种开花坐果期霜冻指标试验研究[J]. *干旱地区农业研究*,2023,41(5):227 - 235.
- [21] 李莹,郭伟珍,秦素洁,等. 晚霜对13个梨品种(系)幼果发育及果实品质的影响[J]. *果树学报*,2021,38(6):901 - 910.
- [22] 许彦平,万信,贾建英,等. 北京7号桃树(*Prunus armeniaca*)盛花期霜冻害指标试验研究[J]. *干旱区资源与环境*,2019,33(11):195 - 200.
- [23] 杨豫,张晓煜,陈仁伟,等. 不同品种酿酒葡萄根系抗寒性鉴定[J]. *中国生态农业学报(中英文)*,2020,28(4):558 - 565.
- [24] 史树德,孙亚卿,魏磊. *植物生理学实验指导* [M]. 北京:中国林业出版社,2011:32 - 36.
- [25] 刘大林. 低温胁迫下番石榴叶片生理生化变化的探讨[J]. *林业科学*,2003,39(增刊1):38 - 41.
- [26] 徐功勋,周佳,吕德国,等. 4个苹果品种的抗寒性评价[J]. *果树学报*,2023,40(4):669 - 679.
- [27] 张柔,许建新,薛立,等. 低温胁迫和解除对4种阔叶幼苗生理特征的影响[J]. *生态科学*,2014,33(3):419 - 425.
- [28] 崔洁冰,张萌,张莹婷,等. 低温胁迫对柳杉不同无性系的影响及抗寒性评价[J]. *生物技术通报*,2022,38(3):31 - 40.
- [29] 徐立人,曹丽娜,杨敏生,等. 单叶刺槐不同胞子代的抗寒性研究[J]. *西部林业科学*,2020,49(5):12 - 17.
- [30] 郭艳兰,牟德生,赵连鑫,等. 六个葡萄砧木品种(系)的抗寒性评价[J]. *中外葡萄与葡萄酒*,2022(3):38 - 43.
- [31] 王海梅,侯琼,云文丽,等. 内蒙古河套灌区玉米与向日葵霜冻的关键温度[J]. *生态学报*,2014,34(11):2948 - 2953.
- [32] 武辉,侯丽丽,周艳飞,等. 不同棉花基因型幼苗耐寒性分析及其鉴定指标筛选[J]. *中国农业科学*,2012,45(9):1703 - 1713.
- [33] 冯小璐,孔艳娥,孙音,等. 不同品种蝴蝶兰耐冷性评价[J]. *中国农学通报*,2022,38(1):59 - 67.
- [34] 赖铭,陈佳,张军,等. 植物低温胁迫响应机制及提高抗冷性研究进展[J/OL]. *分子植物育种*,2023:1 - 11(2023 - 01 - 31)[2024 - 07 - 29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230130.1626.005.html>.
- [35] 魏兰波,董佳慧,钱稷,等. 冷驯化期间4种楸树叶片叶绿素荧光参数变化研究[J]. *林业与生态科学*,2021,36(1):85 - 88.
- [36] 孙红梅,刘杜玲,杨吉安,等. 早实核桃对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J]. *北方园艺*,2012(15):17 - 20.
- [37] 蒋朝维,陶轩,杨雷,等. 低温胁迫下2个烤烟品种幼苗对外源亚精胺的生理响应[J]. *江苏农业科学*,2024,52(2):73 - 78.
- [38] 曹建东,陈佰鸿,王利军,等. 葡萄抗寒性生理指标筛选及其评价[J]. *西北植物学报*,2010,30(11):2232 - 2239.
- [39] 安孝莹,姜涛,王海静,等. 秦皇岛5份核桃资源的抗寒性评价[J/OL]. *分子植物育种*,2024:1 - 15(2024 - 03 - 14)[2024 - 07 - 29]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20240313.1531.014>.
- [40] 魏鑫,王升,王宏光,等. 低温胁迫下不同类型蓝莓品种的抗寒性研究[J]. *江苏农业科学*,2023,51(19):131 - 137.
- [41] 权威,薛文通,赵天瑶,等. 植物对低温胁迫的响应机制研究进展[J]. *中国农业大学学报*,2023,28(2):14 - 22.
- [42] 王敏,李莉,贾蓉,等. 10种紫花苜蓿在低温胁迫下的生理特性及耐寒性评价[J]. *草业学报*,2024,33(6):76 - 88.
- [43] 王依,靳娟,罗强勇,等. 4个酿酒葡萄品种抗寒性的比较[J]. *果树学报*,2015,32(4):612 - 619.