

# 4个苹果品种的抗寒性评价

徐功勋, 周佳, 吕德国, 秦嗣军\*

(辽宁省果树品质发育与调控重点实验室·沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110866)

**摘要:**【目的】探究4个具有亲代遗传关系苹果品种的抗寒性,明确能够反映抗寒性强弱的生理指标,为寒地苹果选育过程中优系快速筛选及抗寒栽培管理提供理论支持。【方法】以长富2号、寒富、东光和龙帅休眠期1年生枝为试材,分别在-15、-20、-25、-30、-35℃低温下处理24 h,并于4℃环境中缓冻24 h,测定膜结构稳定性、活性氧代谢和渗透调节物质生理指标,结合主成分分析综合评价影响苹果品种抗寒性差异的生理因素。【结果】随着处理温度的降低,4个苹果品种的相对电导率和丙二醛(malonaldehyde, MDA)含量呈现升高趋势,抗寒性强的龙帅相对电导率在不同低温处理下均低于其他品种且变化较为平稳。相比于-15℃处理,长富2号枝条中的 $O_2^-$ 和 $H_2O_2$ 含量在-35℃时分别增加了38.07%和12.63%,显著高于其他品种。抗寒性越强的品种抗氧化酶活性越高,且响应低温的速率较快。低温下抗寒性品种积累大量的可溶性蛋白质、游离脯氨酸和可溶性糖等渗透调节物质,各品种苹果枝条糖组分主要是蔗糖和山梨醇。在-25℃低温胁迫下,龙帅枝条中的葡萄糖和果糖含量大幅度升高,且显著高于其他品种。在主成分分析综合评价中,抗寒性由强到弱为龙帅>东光>寒富>长富2号,相对电导率、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性、可溶性蛋白质和可溶性糖含量对苹果的抗寒性影响较大。【结论】苹果1年生枝中的相对电导率、SOD活性、可溶性蛋白质和可溶性糖含量在众多生理指标中对低温胁迫响应敏感,可用于杂交后代抗寒优系早期快速选择;龙帅作为寒富的后代抗寒性突出,可在寒地苹果产区推广应用。

**关键词:** 苹果; 抗寒性; 主成分; 综合评价

中图分类号: S661.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2023)04-0669-11

## Cold resistance evaluation of four apple varieties

XU Gongxun, ZHOU Jia, LÜ Deguo, QIN Sijun\*

(Key Lab of Fruit Quality Development and Regulation of Liaoning Province/College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China)

**Abstract:** 【Objective】The present experiment was undertaken to investigate the cold resistance of four apple varieties with parental genetic relationship and to identify the physiological indicators that can reflect the strength of cold resistance. The aim was to provide theoretical support for rapid screening of superior lines and cold-resistant cultivation management in the breeding process of apples in cold regions. 【Methods】In this study, Nagano Fuji No.2, Hanfu, Dongguang and Longshuai were top-grafted (more than one meter above the ground) onto 4-year-old Pingyitiancha rootstocks in spring, and 1-year-old branches were taken as test materials in mid-January in the second year. They were treated at low temperatures of -15℃, -20℃, -25℃, -30℃ and -35℃ for 24 h, and thawed at 4℃ for 24 h. The membrane structure stability, active oxygen metabolism and physiological indexes of osmotic adjustment substances were determined. The cold resistance of apples was comprehensively evaluated by principal component analysis, and the physiological factors affecting cold resistance were analyzed. 【Results】With the decrease of treatment temperature, the relative electrical conductivity of the branches from four apple varieties showed a trend of gradual increase and reached the maximum at -35℃. Moreover, the relative electrical conductivity of Nagano Fuji No.2 was still significantly higher than that of other

收稿日期: 2022-07-04

接受日期: 2022-11-20

基金项目: 国家现代苹果产业技术体系建设项目(CARS-27); 辽宁省农业攻关及产业化项目(2020JH2/10200028)

作者简介: 徐功勋, 男, 在读博士研究生, 研究方向为果树栽培与生理生态。Tel: 15840562621, E-mail: gongxunxu1993@stu.syau.edu.cn

\*通信作者 Author for correspondence. Tel: 024-88487219, E-mail: qsj1975@syau.edu.cn

varieties, and the difference between Longshuai and Dongguang was not significant. With the aggravation of low-temperature stress, the MDA contents in branches of different varieties showed an upward trend, and the content of MDA in branches of Nagano Fuji No.2 was always higher than that of other varieties. The MDA contents in branches of Dongguang and Longshuai was low, and there was no significant difference in MDA content between the two varieties under  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The contents of  $\text{O}_2^-$  and  $\text{H}_2\text{O}_2$  in the branches of the varieties with weak cold resistance were higher, and the contents of  $\text{O}_2^-$  in the branches of Nagano Fuji No.2 were significantly higher than those of other varieties from  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Under low-temperature stress, the contents of  $\text{H}_2\text{O}_2$  in the branches of Nagano Fuji No.2, Hanfu and Dongguang were higher than those of Longshuai, and the difference in  $\text{H}_2\text{O}_2$  content in the branches of Dongguang and Longshuai was not significant at  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , but the difference in  $\text{H}_2\text{O}_2$  content in the branches between Longshuai and other varieties were significantly lower than that with other low-temperature treatments. From  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , SOD and CAT activities of Longshuai branches were significantly higher than other varieties, but SOD activity decreased slightly, while CAT activity increased gradually. The APX activities of the branches of the four varieties reached the peak at  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  and the lowest at  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , with no significant difference. With the decrease in temperature, the changing trend of soluble protein content in branches of different varieties was different. The soluble protein content in Longshuai branches continued to increase, and reached the maximum at  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which increased by 42.24 % compared with at  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The free proline content of Nagano Fuji No.2 was always the lowest, and the free proline content of Dongguang was higher and reached the maximum at  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . With different low-temperature treatments, the soluble sugar content of Nagano Fuji No.2 was always the lowest, and Longshuai was the highest. At  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the soluble sugar contents of Nagano Fuji No.2 and Longshuai decreased by 46.27% and 4.11%, respectively. With the decrease of temperature, the sucrose content in branches of Longshuai increased continuously and reached the maximum at  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and there was no significant difference in sucrose contents among the four varieties. The contents of glucose and fructose in branches of Longshuai increased rapidly at  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , increasing by 21.94% and 52.5%, respectively. The contents of glucose and fructose in branches of Longshuai were significantly higher than those of other varieties at  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The variation trend of sorbitol content in different varieties of apple branches was relatively stable. Comprehensive evaluation of cold resistance by the principal component analysis from strong to weak was as follows: Longshuai>Dongguang>Hanfu>Nagano Fuji No.2. It was found that the relative electronic conductivity value, SOD activity, soluble protein and soluble sugar contents had a great influence on the cold resistance of apple. 【Conclusion】The relative conductivity value, SOD activity, soluble protein and soluble sugar contents in one-year-old branches of apple were sensitive to low temperature stress among many physiological indexes, which could be used for early rapid selection of superior cold-resistant lines among a hybrid offspring. Longshuai, as the offspring of Hanfu, had outstanding cold resistance and could be popularized and applied in cold apple producing areas.

**Key words:** Apple; Cold resistance; Principal component; Comprehensive evaluation

苹果(*Malus domestica*)是世界范围内被广泛种植的温带落叶果树。中国苹果的栽培面积和产量均位居世界前列,已经成为世界苹果生产第一大国。目前,中国的苹果产区已由传统的渤海湾产区、西北黄土高原产区扩大到西南冷凉高地、东北和新疆等特色苹果产区。传统苹果产区的生长周期气候条件

适宜,产量和品质较高<sup>[1-2]</sup>;寒地产区以中小型苹果为主,风味浓郁,受当地消费者青睐,区域经济特色明显。东北寒地栽植的寒富等品种抗寒性较强,但是由于全球气候变暖出现延迟进入休眠或休眠期剧烈大幅度变温,导致抽条、花芽冻害等现象经常发生<sup>[3]</sup>。因此,有必要明确能够反映苹果抗寒性差异

的关键性指标,探讨用于杂交后代抗寒优系快速选择的可行性方法,这对于加快优异抗寒品种选育、建立适于寒地栽培的技术体系以及促进区域特色果业经济发展具有重要意义。

露地寒冻法和生理生化指标测试法常用于植物的抗寒性评价<sup>[4]</sup>。其中,露地寒冻法主要根据植物在低温下的生长状况来评价其抗寒性,适用于田间、园林等规模较大的栽培场地,但是该方法周期较长且在自然条件下极易受到其他因素的干扰。生理生化指标测试法是将植物或离体器官进行人工模拟低温处理,通过观察、测定植物的形态结构和生理生化特征变化,并结合数理统计分析的方式综合评价植物的抗寒性,具有周期短、可重复性高等特点而被广泛应用。闫忠业等<sup>[5]</sup>对6个苹果新品种进行抗寒性评价,发现在-20~-45℃的低温处理下,抗寒性最强的七月鲜1年生枝条中的丙二醛(malonaldehyde, MDA)含量低且较稳定,过氧化物酶(peroxidase, POD)活性较高。于立洋等<sup>[6]</sup>通过电导法和电阻抗图谱法对8种新疆野苹果优良无性系的抗寒性展开研究,发现M-3、M-6和M-8抗寒性较高,且具有较低的低温半致死温度和高萌芽率。张博等<sup>[7]</sup>通过主成分分析的研究结果表明,超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性、脯氨酸含量和相对电导率均可作为评价新疆野苹果抗寒性的主要指标。前人研究也发现,无论是中间砧还是基砧,抗寒性强的砧木具有稳定的细胞膜结构,相对电导率与胁迫温度之间呈负相关,并且可以积累大量的可溶性糖、游离脯氨酸等渗透调节物质,同时SOD、POD、过氧化氢酶(catalase, CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)的活性也相对较高<sup>[8-11]</sup>。此外,前人也对桃<sup>[12]</sup>、梨<sup>[13]</sup>、软枣猕猴桃<sup>[14]</sup>和樱桃<sup>[15]</sup>等不同果树进行了抗寒性鉴定。由此可知,用于抗寒性评价的指标较多,但其在不同品种中表现不一致,不便于直接应用。以东光作为母本、富士作为父本选育的寒富苹果已在辽宁、甘肃、陕西等传统富士系苹果栽植区以北的冷凉地区形成规模,栽培面积达到13.3万hm<sup>2</sup><sup>[16]</sup>,以寒富为母本、金红为父本选育的小果型品种龙帅在黑龙江等多地也有一定的发展规模<sup>[17]</sup>。笔者在本研究中以具有亲代遗传关系且因抗寒性而呈不同地理区域分布的苹果品种东光、长富2号、寒富和龙帅为试材,比较1年生枝条抗寒性生理指标差异,筛选能够反映亲代与子代抗寒性差异

的关键指标,这对于杂交育种过程中通过测定实生后代与亲代之间关键性抗寒指标差异、快速选择优系以及针对性建立寒地栽培技术体系具有重要意义。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

试验材料栽植于沈阳农业大学校内果树栽培与生理生态团队科研基地(东经123°34',北纬41°49')。2019年进入休眠后采集东光、长富2号、寒富、龙帅枝条进行沙藏备用,2020年4月中旬以单芽枝接的方式,将4个品种的接穗高位嫁接(距地面60cm)于田间4年生平邑甜茶(*Malus hupehensis*)(嫁接口平均粗度为3~4cm)上,生长期间正常管理。

### 1.2 试验处理

田间取样时期为2021年1月15日,选择40根长势良好且均匀的1年生枝条,并依次用蒸馏水和去离子水冲洗干净,然后用纱布擦干,在剪口处涂抹菌清后用薄膜包裹,防止失水抽干。将采集的枝条平均分为5组,每组8根,分别进行-15、-20、-25、-30和-35℃冷冻处理,到达设定温度后保持24h,然后置于4℃低温冰箱中解冻24h。通过修枝剪将各品种1年生枝剪成0.5~1cm的枝段,且避开芽眼,一部分用于测定相对电导率,另一部分在液氮中速冻后置于-80℃超低温冰箱中保存,用于生理生化指标的测定。

### 1.3 生理指标的测定方法

采用雷兹电导率仪(DDS-307)测定相对电导率;MDA含量采用硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)法测定;利用羟胺氧化的方法测定O<sub>2</sub>含量;利用氯化钛氧化的方法测定H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量;用氮蓝四唑光化还原法测定SOD活性,用愈创木酚法测定POD活性,用紫外吸收法测定CAT和APX活性;采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白质含量;采用茚三酮显色法测定脯氨酸含量;采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量;用高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)法测定蔗糖、葡萄糖、果糖和山梨醇含量。

### 1.4 数据处理与分析

利用Microsoft Excel 2010和GraphPad Prism 9.0软件处理试验数据并绘图,采用SPSS Statistics

26.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA),利用邓肯检验进行差异显著性分析( $p < 0.05$ ),并对数据进行标准化处理和主成分分析。

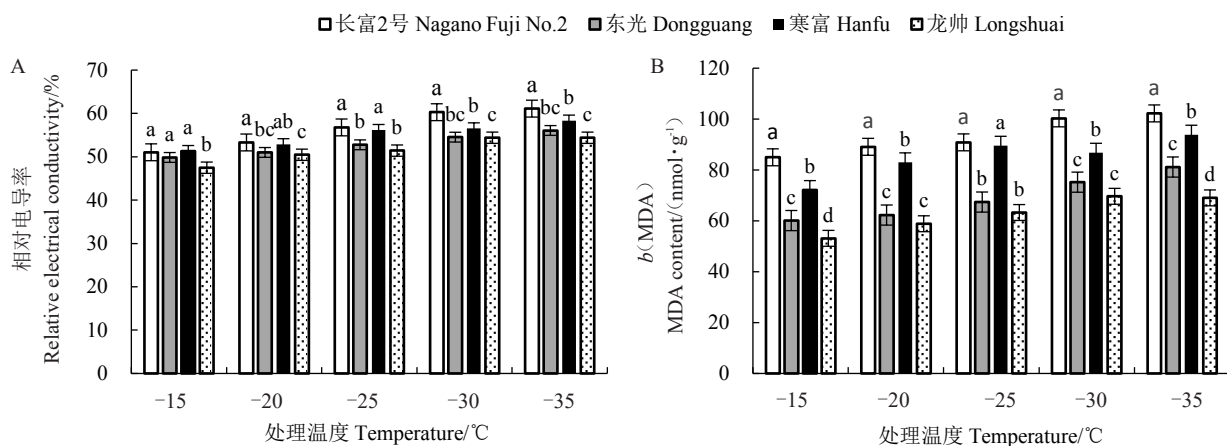
## 2 结果与分析

### 2.1 低温胁迫对不同品种苹果枝条膜结构稳定性的影响

**2.1.1 不同温度处理对苹果枝条相对电导率的影响** 如图1-A所示,随着温度的逐渐降低,不同品种枝条相对电导率呈现逐渐升高的趋势,变化趋势为S型。其中,在-15℃时,长富2号、寒富和东光枝条的相对电导率差异不显著,而龙帅显著低于其他品种。长富2号的枝条相对电导率在-25~-35℃迅速

升高,增幅为7.64%。在-30℃时,长富2号和寒富枝条的相对电导率相差最大,差值为5.75%。在-35℃时,各个品种枝条的相对电导率均达到最大值,长富2号显著高于其他品种,龙帅与东光枝条的相对电导率差异不显著。

**2.1.2 不同温度处理对苹果枝条MDA含量的影响** 如图1-B所示,随着温度的降低,各品种枝条的MDA含量不同程度增加。长富2号枝条始终保持较高的MDA含量,除了在-25℃时长富2号与寒富枝条中MDA含量差异不显著外,在其他温度下长富2号枝条中的MDA含量与各品种差异显著。东光和龙帅枝条中MDA含量较低,在-20、-25、-30℃时两者枝条中MDA含量无显著差异,而在-15、-35℃时



不同小写字母表示  $p < 0.05$  差异显著水平。下同。

Different small letters indicate significant difference at  $p < 0.05$ . The same below.

图1 低温胁迫下枝条膜结构稳定性的变化

Fig. 1 Changes in the structural stability of branch membranes under low temperature stress

龙帅枝条中的MDA含量显著低于东光。

### 2.2 低温胁迫对不同品种苹果枝条活性氧代谢的影响

**2.2.1 不同温度处理对苹果枝条 $O_2^-$ 含量的影响** 低温胁迫下各品种枝条 $O_2^-$ 含量变化如图2-A所示。随着温度的降低,不同品种枝条中 $O_2^-$ 含量变化趋势不同。长富2号和龙帅枝条中的 $O_2^-$ 含量呈升高趋势,相比于-15℃,在-35℃时两者分别增加了38.07%和32.03%。而其他品种呈先降低再升高的变化趋势,寒富枝条中 $O_2^-$ 含量(w,后同)在-35℃时达到最大值,为25.8  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ;而东光枝条中 $O_2^-$ 含量在-30℃时达到最大值,为24.45  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

**2.2.2 不同温度处理对苹果枝条 $H_2O_2$ 含量的影响** 如图2-B所示,低温胁迫下长富2号、寒富和东光枝条中 $H_2O_2$ 含量始终高于龙帅。其中,龙帅与长

富2号和寒富枝条中 $H_2O_2$ 含量的差异均达到显著水平。此外,在-15~-25℃的低温处理下,长富2号枝条中 $H_2O_2$ 含量先升高后降低,而其他品种均持续升高;在-30~-35℃的低温处理下,只有龙帅枝条中 $H_2O_2$ 含量降低,降幅为3.00%。

**2.2.3 不同温度处理对苹果枝条SOD活性的影响** 如图2-C所示,在-15℃时,不同品种枝条SOD活性虽然存在差异但不显著。在较低程度的低温处理下,各品种枝条SOD活性呈现升高的趋势,而后随着低温胁迫程度的加深,各品种枝条SOD活性降低。在-25~-35℃,长富2号枝条SOD活性下降幅度最大,为20.40%;而东光下降幅度最小,为2.30%。

**2.2.4 不同温度处理对苹果枝条POD活性的影响** 如图2-D所示,在-15、-20和-30℃时,寒富枝条POD活性均显著高于长富2号和东光,然而在-25、-35℃

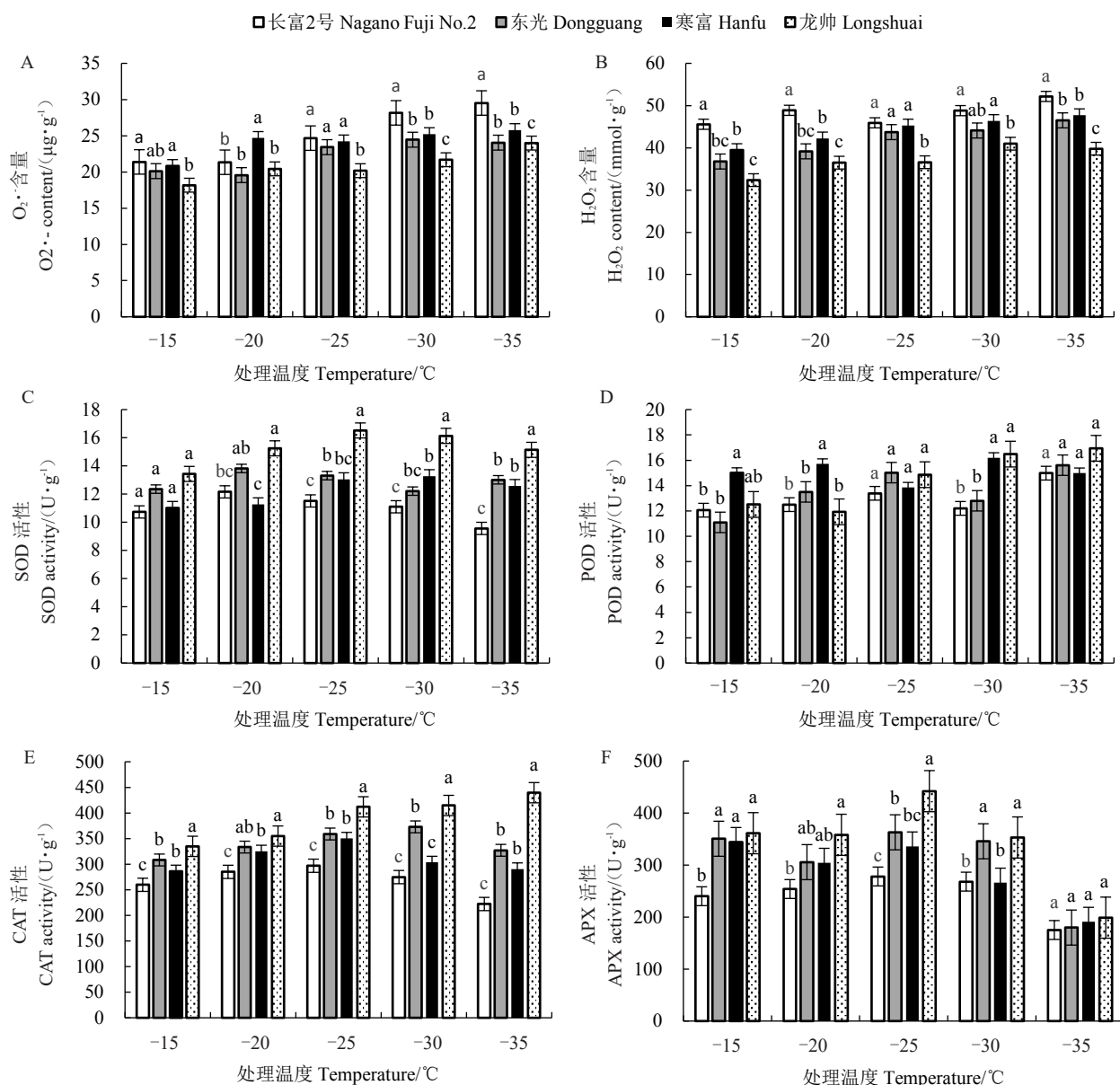


图2 低温胁迫下枝条活性氧代谢的变化

Fig. 2 Changes in active oxygen metabolism of branches under low temperature stress

时,各个品种枝条 POD 活性差异不显著。此外,在-25~-30 °C 的低温处理下,长富2号和东光枝条 POD 活性大幅度下降,降幅分别为9.7%和17.42%,而寒富和龙帅枝条 POD 活性大幅度升高,升幅分别为16.88%和10.97%。

**2.2.5 不同温度处理对苹果枝条 CAT 活性的影响**  
如图2-E所示,低温胁迫下不同品种枝条 CAT 活性变化趋势不同。长富2号、东光和寒富均呈先升高后降低的趋势,分别在-25、-30和-25 °C 下达到峰值,而龙帅枝条 CAT 活性为持续升高的变化趋势,-35 °C 较-15 °C 活性升高了31.3%。此外,除了在-20 °C 时龙帅与东光枝条 CAT 活性差异不显著之外,在其他低温处理

下龙帅枝条 CAT 活性均显著高于各个品种。

**2.2.6 不同温度处理对苹果枝条 APX 活性的影响**  
如图2-F所示,随着低温胁迫程度的加深,4个品种的 APX 活性均在-25 °C 达到峰值,但变化趋势不同。长富2号呈现先增加后降低的趋势,而东光、寒富和龙帅的变化趋势为先降低再升高,最后又降低。各个品种枝条 APX 活性均在-35 °C 低温处理下最低,并且差异不显著。

**2.3 低温胁迫对不同品种苹果枝条渗透调节物质含量的影响**

**2.3.1 不同温度处理对苹果枝条可溶性蛋白质含量的影响**  
如图3-A所示,在不同的低温胁迫处理下,

各品种枝条可溶性蛋白质含量不同。长富2号枝条可溶性蛋白质含量始终最低,除了在-30℃与寒富枝条可溶性蛋白质含量差异不显著之外,在其余低温处理下与各品种的差异均达到显著水平。此外,随着温度的降低,各品种枝条可溶性蛋白质含量变化趋势不同,龙帅枝条可溶性蛋白质含量持续升高,并在-35℃时达到最大值,相比于-15℃增加了42.24%,积累速度较快。

2.3.2 不同温度处理对苹果枝条游离脯氨酸含量的影响 如图3-B可所示,在不同的低温处理下,长富2号枝条始终保持较低的游离脯氨酸含量。在-15℃时寒富枝条游离脯氨酸含量最高,为0.28 mg·g<sup>-1</sup>;而在其

他温度处理下,东光枝条游离脯氨酸含量最高,并且在-35℃时达到最大值,为0.34 mg·g<sup>-1</sup>;寒富与东光相比差异性不显著,为0.31 mg·g<sup>-1</sup>。

2.3.3 不同温度处理对苹果枝条可溶性糖含量的影响 如图3-C所示,随着低温胁迫程度的加深,长富2号枝条可溶性糖含量始终最低,而龙帅枝条可溶性糖含量最高,并且在-30、-35℃时长富2号和龙帅枝条可溶性糖含量均下降,降幅分别为46.27%和4.11%。寒富与东光枝条可溶性糖含量在-30℃时差异显著,而在其他温度处理下差异不显著。

### 2.4 低温胁迫对不同品种苹果枝条糖组分含量的影响

本研究中主要测定了可溶性糖组分中的蔗糖、葡萄糖、果糖和山梨醇含量。低温胁迫对不同品种苹果枝条蔗糖含量的影响如图4-A所示。随着温度的降低,龙帅枝条蔗糖含量持续升高,并在-35℃时达到最大值,为21.46 mg·g<sup>-1</sup>,而4个品种枝条蔗糖含量差异不显著。在-30~-35℃时,寒富枝条蔗糖含量下降3.88%,而长富2号、东光和龙帅枝条蔗糖含量分别升高3.18%、9.51%和4.23%。葡萄糖和果糖含量的变化如图4-B~C所示,在-25℃时龙帅枝条葡萄糖和果糖含量急速升高,增幅分别为21.94%和52.5%,此后随着低温胁迫程度的加深,葡萄糖含量下降,而果糖含量变化平稳。在低温胁迫下,不同品种苹果枝条山梨醇含量变化趋势较为平稳,在-25、-30℃时各品种枝条山梨醇含量差异不显著,但是相比于其他品种,在各个温度下龙帅枝条山梨醇含量相对较高,如图4-D所示。此外,低温胁迫下各品种苹果枝条糖组分含量主要是蔗糖和山梨醇,而葡萄糖和果糖较少。

### 2.5 不同苹果品种抗寒性的综合评价

2.5.1 低温胁迫对不同苹果品种各指标的主成分因子得分分析 在本研究中,通过SPSS对-35℃低温处理的各项抗逆生理生化指标进行主成分因子分析,得到主成分特征值。如表1所示,有2个大于1

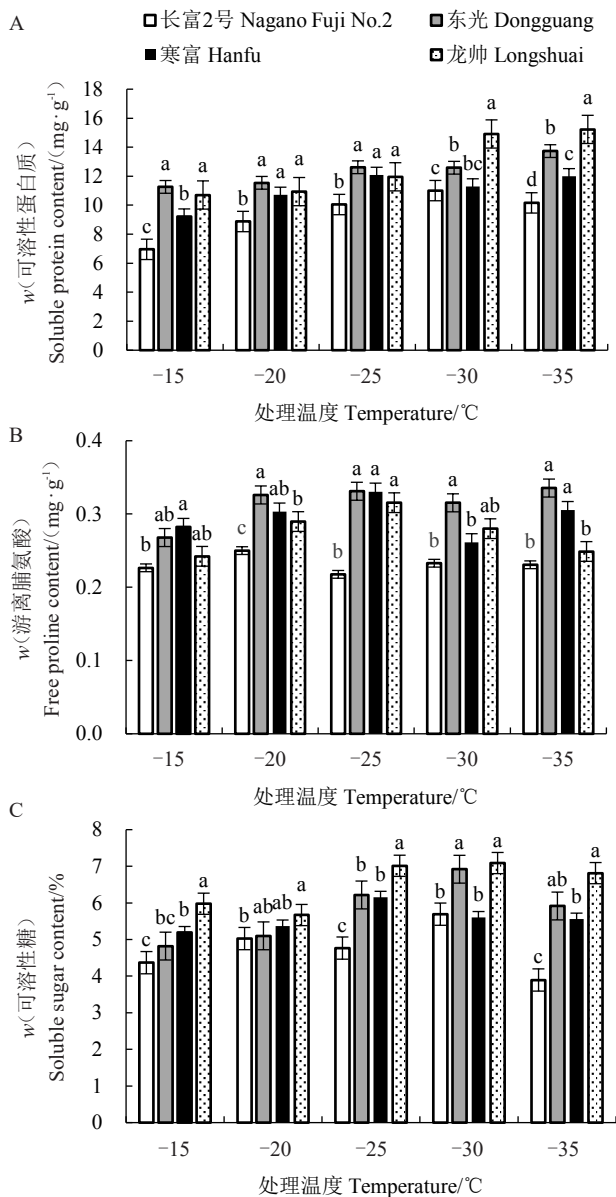


图3 低温胁迫下枝条渗透调节物质含量的变化

Fig. 3 Changes in the content of osmotic adjustment substances in branches under low temperature stress

表1 主成分特征值

Table 1 Principal component eigenvalue

| 主成分<br>Principal<br>component | 起始特征值 Initial eigenvalues       |                                 |                                              |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
|                               | 特征值<br>Characteristic<br>values | 解释方差<br>Variance<br>explained/% | 累积解释方差<br>Cumulative variance<br>explained/% |
| 1                             | 9.146                           | 83.143                          | 83.143                                       |
| 2                             | 1.429                           | 12.993                          | 96.136                                       |

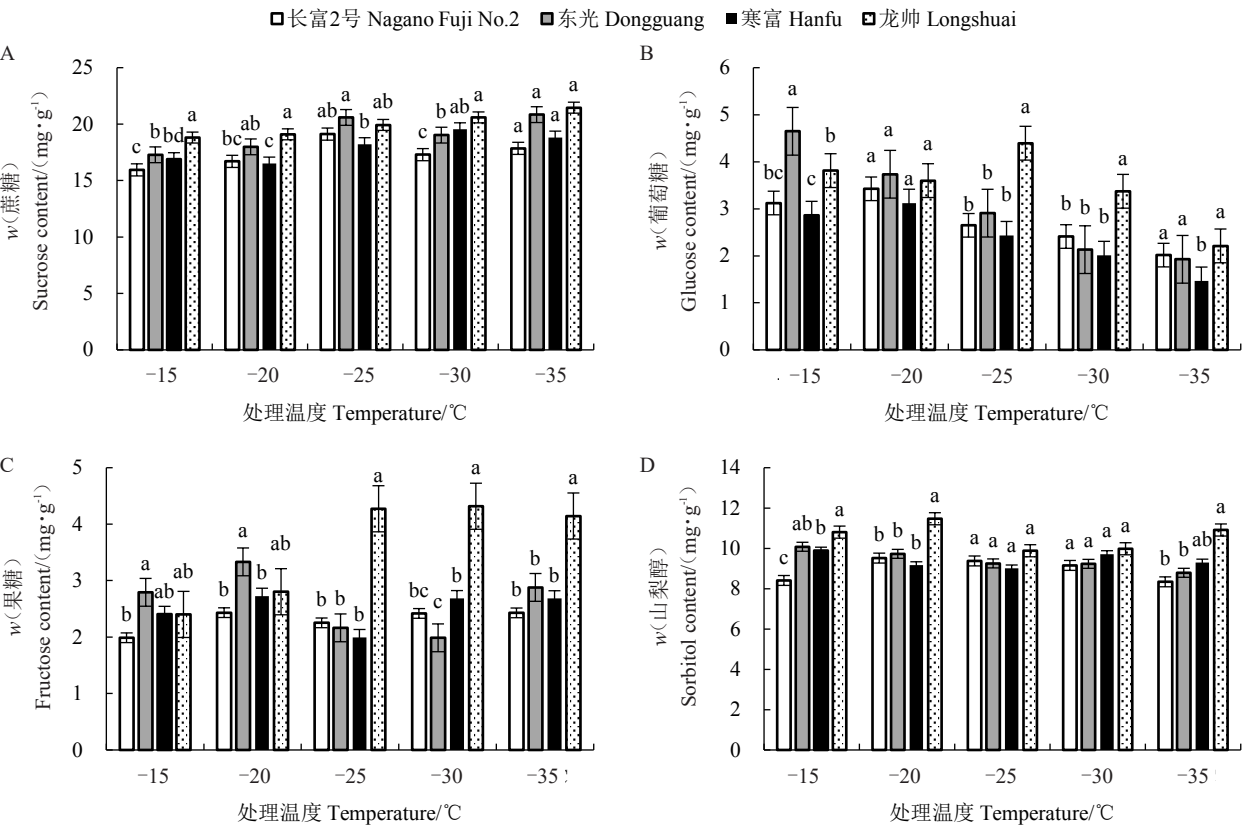


图 4 低温胁迫下枝条糖组分含量的变化

Fig. 4 Changes of sugar content in branches under low temperature stress

的主成分,并且解释了全部方差的96.136%,说明提取的2个主成分能够代表11个指标信息的96.136%,所提取的主成分评价不同苹果品种的抗寒性有一定的合理性。同时由表2可知,主成分1主要反映相对电导率、MDA含量、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量、O<sub>2</sub><sup>-</sup>含量、SOD活性、POD活性、CAT活性、APX活性、可溶性

蛋白含量和可溶性糖含量10个变量的信息。其中,系数绝对值前4位是SOD活性(0.991)、可溶性蛋白质含量(0.989)、可溶性糖含量(0.986)和相对电导率(-0.986),主成分2主要反映游离脯氨酸含量的信息。

2.5.2 不同苹果品种综合抗寒性评价 通过SPSS将标准化的原始数据代入主成分表达式计算不同苹果品种的主成分得分,进而得出各个苹果品种的综合得分,分值越高则抗寒性越强。如表3所示,各苹果品种抗寒性由高到低为龙帅>东光>寒富>长富

表 2 主成分初始因子荷载矩阵

Table 2 Principal component matrix

| 生化指标<br>Biochemical indexes                  | 主成分1<br>Component one | 主成分2<br>Component two |
|----------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 相对电导率<br>Relative conductivity               | -0.986                | -0.118                |
| 丙二醛含量 MDA content                            | -0.978                | 0.047                 |
| 过氧化氢含量 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> content | -0.985                | 0.170                 |
| 超氧阴离子含量 O <sub>2</sub> <sup>-</sup> content  | -0.916                | -0.400                |
| 超氧化物歧化酶活性 SOD activity                       | 0.991                 | 0.054                 |
| 过氧化物酶活性 POD activity                         | 0.892                 | -0.391                |
| 过氧化氢酶活性 CAT activity                         | 0.986                 | -0.164                |
| 抗坏血酸过氧化物酶活性<br>APX activity                  | 0.811                 | -0.266                |
| 可溶性蛋白含量<br>Soluble protein content           | 0.989                 | 0.058                 |
| 游离脯氨酸含量 Free proline content                 | 0.220                 | 0.974                 |
| 可溶性糖含量 Soluble sugar content                 | 0.986                 | 0.134                 |

表 3 各苹果品种主成分值和抗寒力排序

Table 3 Principal component values and cold resistance ranking of apple varieties

| 品种<br>Cultivar           | 主成分值<br>Principal component values |                       | 综合得分<br>Comprehensive score | 抗寒力<br>Cold resistance |
|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|
|                          | 主成分1<br>Component one              | 主成分2<br>Component two |                             |                        |
|                          | Component one                      | Component two         |                             |                        |
| 长富2号<br>Nagano Fuji No.2 | -3.72                              | -0.89                 | -3.21                       | 4                      |
| 东光<br>Dongguang          | 0.74                               | 1.37                  | 0.79                        | 2                      |
| 寒富<br>Hanfu              | -0.60                              | 0.61                  | -0.42                       | 3                      |
| 龙帅<br>Longshuai          | 3.58                               | -1.09                 | 2.83                        | 1                      |

2号。

### 3 讨 论

冬季低温是影响苹果栽培区划的最主要环境因素。在休眠期间,长期的极低温度及早春的大幅度变温容易导致苹果发生冻害,培育抗寒品种及采取配套栽培技术体系是应对上述问题的主要策略,其前提条件是做好品种、品系的抗寒性评价工作。

#### 3.1 低温胁迫与膜稳定性的关系

植物生物膜是感受低温的主要组织部位,同时也极易受到低温胁迫的伤害。在低温胁迫下生物膜的结构和功能发生变化,膜透性增大,选择透过性的作用降低,导致细胞内溶物外渗,细胞失水且膨压降低,严重时植株死亡<sup>[18]</sup>。前人研究发现,相对电导率可以反映细胞膜透性的变化,并作为抗寒性评价的重要指标已在冬油菜<sup>[19]</sup>、西瓜<sup>[20]</sup>、苹果<sup>[21]</sup>、梨<sup>[22]</sup>、枣<sup>[23]</sup>、葡萄<sup>[24]</sup>和柑橘<sup>[25]</sup>等植物上广泛应用。其中,由于不同植物的组织结构和胁迫作用机制不同,其低温处理下的相对电导率的变化范围也有很大的差异。在本研究中,抗寒性最强的龙帅相对电导率在不同低温处理下均低于其他品种,其变化范围为47.48%~54.39%,且变化趋势较为平缓;而抗寒性弱的长富2号相对电导率较高,并且在-25~-35℃时急剧升高,说明其在-25℃处理时细胞膜便开始损害严重,稳定性差。曹晓敏等<sup>[26]</sup>对6个苹果砧木进行抗寒性评价发现,抗寒性强的烟砧6号在-35℃时的相对电导率为46.53%,而抗寒性弱的M9的相对电导率为61.39%,此时M9的萌芽率仅为20.41%,显著低于烟砧6号,由此可知相对电导率与枝条萌芽率呈负相关。MDA是膜脂过氧化的产物,其含量可以作为生物膜系统损伤程度的评价指标。刘兴禄等<sup>[27]</sup>发现在低温处理下,抗寒性弱的M26和T337苹果砧木MDA含量变化幅度大,且MDA含量相比于抗寒性强的SH1较高。本试验结果与之一致,即抗寒性越强的品种,MDA含量越低,而抗寒性弱的长富2号枝条MDA含量始终高于其他品种。由此说明,相对电导率越高,细胞膜损害程度越深,MDA含量越高,则抗寒性越弱。

#### 3.2 低温胁迫与抗氧化系统的关系

当植物受到低温等非生物胁迫时,体内活性氧含量的动态平衡会被打破,从而积累大量的超氧阴离子等活性氧自由基,影响细胞膜系统的稳定性,降

低蛋白质活性,最终导致植物代谢过程紊乱<sup>[28]</sup>。其中,SOD、POD、CAT和APX是植物体内重要的抗氧化酶,属于酶促抗氧化系统的重要组成部分,能够清除活性氧自由基,维持活性氧含量的动态平衡,保证植物正常的生命活动,进而增强植物的抗寒性<sup>[29]</sup>。田景花等<sup>[30]</sup>探究低温逆境对不同核桃品种抗氧化系统的影响,发现抗寒性强的哈特雷叶片中 $O_2^-$ 含量最低,叶片没有明显的冷害症状。在本研究中,虽然随着温度的降低,各品种 $O_2^-$ 含量总体上呈现升高的趋势,但是比较分析可知,抗寒性更强的龙帅升高幅度较小。此外,在-35℃低温处理下,龙帅枝条中 $H_2O_2$ 含量变化趋势与各品种相反,呈现下降的趋势,这可能与龙帅枝条中的POD和CAT活性升高有关。SOD是植物酶促抗氧化系统的第一道防线,能将 $O_2^-$ 转变为 $H_2O_2$ 和 $O_2$ ,产生的过氧化氢会被POD、CAT、APX协同清除,进而维持活性氧平衡<sup>[31]</sup>。范宗民等<sup>[32]</sup>在葡萄砧木的抗寒性研究中发现,SOD、POD和CAT活性变化趋势不同,随着温度的降低,SOD活性不稳定,呈现M型的变化趋势,POD活性则先升高后下降,而CAT活性持续升高,进而清除细胞内过量的活性氧,保证细胞代谢稳定。孟诗原等<sup>[33]</sup>探究卫矛属植物对低温胁迫的生理响应,指出抗寒性强的植物具有较高的抗氧化酶活性。本研究结果表明,随着低温胁迫程度的加深,抗寒性强的龙帅SOD活性显著高于其他品种,CAT活性持续升高,对低温响应剧烈,然而对于POD和APX而言,在-35℃时4个品种的酶活性差异不显著,并且APX活性在-35℃时大幅度下降,这与赵一航等<sup>[34]</sup>对紫花苜蓿的研究结果相似,分析认为当温度降低至植物承受的最低温度时,抗氧化酶活性会受到抑制,不再随着温度的降低而发生改变,也就是植物抗氧化酶活性在阈值内外存在差异。

#### 3.3 低温胁迫与渗透调节物质的关系

可溶性蛋白质、游离脯氨酸和可溶性糖等渗透调节物质是植物响应非生物胁迫的重要物质,含量的积累与抗寒性呈显著正相关<sup>[35-37]</sup>。李清亚等<sup>[38]</sup>在豆梨响应低温胁迫的研究中发现,抗寒性强的克利夫兰在较低温度下能够积累更多的可溶性蛋白质,本试验结果与之一致。笔者研究发现,抗寒性弱的长富2号枝条中可溶性蛋白质含量低,而抗寒性强的龙帅枝条可溶性蛋白质含量随着温度的降低而持续升高,高水平的可溶性蛋白质含量能够增强细胞

的持水能力,降低细胞冰点,并且低温诱导产生的抗冻蛋白与植物的抗寒性密切相关<sup>[39]</sup>。因此,推测可溶性蛋白质含量的差异直接影响品种的抗寒性。游离脯氨酸能够维持生物膜和酶蛋白的结构稳定性,而且作为非酶促抗氧化物质清除逆境下大量生成的活性氧,增强植物的抗寒性<sup>[40]</sup>。试验发现游离脯氨酸含量与苹果的抗寒性呈正相关,即枝条游离脯氨酸含量越高,抗寒性越强,这与郭艳兰等<sup>[41]</sup>对6个葡萄砧木品种抗寒性评价的研究结果一致。可溶性糖的积累可以提高胞液浓度,增强保水能力,防止低温下胞间结冰,并增强细胞膜的稳定性,同时也可以参与活性氧的清除<sup>[42]</sup>。刘胜元等<sup>[43]</sup>对不同花椒的抗寒性研究发现,低温处理下积累的可溶性糖含量与抗寒性呈正相关。在本研究中,抗寒性弱的长富2号枝条可溶性糖含量始终低于其他品种,并在-35℃大幅下降,低温胁迫下积累较少的可溶性糖含量可能是长富2号抗寒性弱的原因之一。此外,本研究还分析了不同品种枝条中蔗糖、果糖、葡萄糖和山梨醇含量在低温下的积累状况,试验结果表明,蔗糖和山梨醇含量在各品种中较高,且变化较为平稳。但是,在-25℃时,龙帅枝条中的葡萄糖和果糖含量大幅度升高,并显著高于其他品种,而后随着低温胁迫程度的加深,葡萄糖含量轻微下降,而果糖含量变化平稳。因此,较高含量的葡萄糖和果糖可能是龙帅具有抗寒性的原因之一。这与Zhao等<sup>[44]</sup>发现抗寒性强的山葡萄在越冬期间积累大量的葡萄糖和果糖的结果一致。

## 4 结 论

根据综合得分评价各苹果品种抗寒性为龙帅>东光>寒富>长富2号。分析发现相对电导率、SOD活性、可溶性蛋白质和可溶性糖含量对低温胁迫响应敏感,这些指标可用于杂交后代抗寒优系早期快速选择。龙帅作为寒富的后代抗寒性突出,可在寒地苹果产区推广应用。

## 参考文献 References:

- [1] 周江涛,赵德英,陈艳辉,康国栋,程存刚. 中国苹果产区变动分析[J]. 果树学报,2021,38(3):372-384.  
ZHOU Jiangtao, ZHAO Deying, CHEN Yanhui, KANG Guodong, CHENG Cungang. Analysis of apple producing area changes in China[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(3): 372-384.
- [2] 汪景彦,李壮,李敏,赵德英,厉恩茂,程存刚,李燕青. 密切结合国情,建设中国特色苹果生产强国[J]. 中国果树,2019(5):1-6.  
WANG Jingyan, LI Zhuang, LI Min, ZHAO Deying, LI Enmao, CHENG Cungang, LI Yanqing. Based on Chinese situation, built a powerful country with Chinese characteristics in apple production[J]. China Fruits, 2019(5): 1-6.
- [3] ZHOU H Y, HE Y, ZHU Y S, LI M, SONG S, BO W, LI Y, PANG X. Comparative transcriptome profiling reveals cold stress responsiveness in two contrasting Chinese jujube cultivars[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 240.
- [4] 丛日征,张吉利,王思瑶,于宏影,闫晓娜,裴晓娜,何山. 植物抗寒性鉴定及其生理生态机制研究进展[J]. 温带林业研究, 2020, 3(1): 27-33.  
CONG Rizheng, ZHANG Jili, WANG Siyao, YU Hongying, YAN Xiaona, PEI Xiaona, HE Shan. Research progress of plant cold resistance identification and its physiological and ecological mechanism[J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2020, 3(1): 27-33.
- [5] 闫忠业,吕天星,王冬梅,刘志,伊凯. 低温下六个苹果新品种抗性生理指标的比较[J]. 植物生理学报, 2015, 51(1): 93-96.  
YAN Zhongye, LÜ Tianxing, WANG Dongmei, LIU Zhi, YI Kai. Comparison of resistant physiological index among six new apple cultivars after low temperature treatment[J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(1): 93-96.
- [6] 于立洋,李政,韩佩尧,张静,汪敏敏,田晓晓,张军. 8个新疆野苹果优良无性系抗寒性比较[J]. 核农学报, 2017, 31(9): 1827-1835.  
YU Liyang, LI Zheng, HAN Peiyao, ZHANG Jing, WANG Minhua, TIAN Xiaoxiao, ZHANG Jun. Comparison of cold hardiness of 8 *Malus sieversii* clones[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(9): 1827-1835.
- [7] 张博,刘立强,秦伟,乌仁其米格. 新疆野苹果抗寒生理生化机制研究[J]. 经济林研究, 2021, 39(4): 60-68.  
ZHANG Bo, LIU Liqiang, QIN Wei, Wurenqimige. Study on physiological and biochemical mechanism of cold resistance of *Malus sieversii*[J]. Non-Wood Forest Research, 2021, 39(4): 60-68.
- [8] 张旭,朱珍珍,孙鲁龙,李凤龙,韦德闯,朱佳顺,樊良栋,赵政阳. 陇东地区不同矮化中间砧对‘长富2号’苹果抗寒性的影响[J]. 果树学报, 2020, 37(7): 985-996.  
ZHANG Xu, ZHU Zhenzhen, SUN Lulong, LI Fenglong, WEI Deichuang, ZHU Jiashun, FAN Liangdong, ZHAO Zhengyang. Effects of different dwarfing interstocks on cold resistance of ‘Changfu 2’ apple in Longdong area[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(7): 985-996.
- [9] 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 Junli, LIU Mingxiao, WEI Xin, XU Jizhong, LI Zhongyong, ZHANG Xueying, ZHOU Shasha. Evaluation of cold hardiness of several apple interstocks[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(6): 970-981.
- [10] 王红平,董铁,刘兴禄,尹晓宁,孙文泰,牛军强,马明. 5个苹

- 果砧木品种枝条的低温半致死温度及耐寒性评价[J]. 果树学报, 2020, 37(4): 495-501.
- WANG Hongping, DONG Tie, LIU Xinglu, YIN Xiaoning, SUN Wentai, NIU Junqiang, MA Ming. A study on the cold resistance and the semi-lethal temperatures for branches of five apple rootstock cultivars[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(4): 495-501.
- [11] 石游, 罗秉瑜, 吾买尔江·亚森. 低温胁迫下不同苹果矮化砧木品种的抗寒性研究[J]. 河北农业科学, 2022, 26(3): 38-42.
- SHI You, LUO Bingyu, Wumuerjiang · Yassen. Study on cold resistance of different apple dwarf rootstock varieties under low temperature stress[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2022, 26(3): 38-42.
- [12] 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 Zhaoyuan, TIAN Qihang, CHANG Ruifeng, LIU Guojian, CHEN Hu, LI Yonghong. Physiological response and evaluation of different peach varieties under low temperature stress[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(2): 66-77.
- [13] 王玮, 李红旭, 赵明新, 曹素芳. 7个梨品种的低温半致死温度及耐寒性评价[J]. 果树学报, 2015, 32(5): 860-865.
- WANG Wei, LI Hongxu, ZHAO Mingxin, CAO Sufang. Study on the cold resistance and the semi-lethal temperatures for seven pear cultivars[J]. Journal of Fruit Science, 2015, 32(5): 860-865.
- [14] 王天鹤, 代志国, 张丙秀, 冯思铭, 张臣. 越冬期软枣猕猴桃田间冻害调查及抗寒生理[J]. 北方园艺, 2021(19): 15-21.
- WANG Tianhe, DAI Zhiguo, ZHANG Bingxiu, FENG Siming, ZHANG Chen. Field freezing injury investigation and physiological characteristics of cold resistance of *Actinidia arguta* during overwintering[J]. Northern Horticulture, 2021(19): 15-21.
- [15] 赵慧, 尹砾, 田长平, 孙庆田. 不同樱桃品种及砧木抗寒性评价[J]. 山东农业科学, 2019, 51(7): 37-40.
- ZHAO Hui, YIN Li, TIAN Changping, SUN Qingtian. Evaluation on cold resistance of different varieties and rootstocks of cherry[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(7): 37-40.
- [16] 程存刚, 赵德英. 新形势下我国苹果产业的发展定位与趋势[J]. 中国果树, 2019(1): 1-7.
- CHENG Cungang, ZHAO Deying. Development orientation and trend of the apple industry under the new situation[J]. China Fruits, 2019(1): 1-7.
- [17] 于文全, 郭金洪, 顾广军, 卜海东, 刘畅, 冯章丽, 程显敏, 林明极, 周进华, 董雪梅, 邢星. 苹果新品种‘龙帅’[J]. 园艺学报, 2017, 44(1): 193-194.
- YU Wenquan, GUO Jinhong, GU Guangjun, BU Haidong, LIU Chang, FENG Zhangli, CHENG Xianmin, LIN Mingji, ZHOU Jinhua, DONG Xuemei, XING Xing. A new apple cultivar ‘Longshuai’ [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2017, 44(1): 193-194.
- [18] CHEN L J, XIANG H Z, MIAO Y, ZHANG L, GUO Z F, ZHAO X H, LIN J W, LI T L. An overview of cold resistance in plants[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2014, 200(4): 237-245.
- [19] 蒲媛媛, 赵玉红, 武军艳, 刘丽君, 白静, 马骊, 牛早霞, 金姣姣, 方彦, 李学才, 孙万仓. 北方强冬性甘蓝型冬油菜品种(系)抗寒性评价[J]. 中国农业科学, 2019, 52(19): 3291-3308.
- PU Yuanyuan, ZHAO Yuhong, WU Junyan, LIU Lijun, BAI Jing, MA Li, NIU Zaoxia, JIN Jiaojiao, FANG Yan, LI Xuecai, SUN Wancang. Comprehensive assessment on cold tolerance of the strong winter *Brassica napus* L. cultivated in Northern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(19): 3291-3308.
- [20] 李冰, 张敬敬, 高秀瑞, 史宇凡, 潘秀清, 武彦荣. 低温胁迫下不同基因型西瓜抗寒性综合评价[J]. 中国瓜菜, 2019, 32(4): 16-19.
- LI Bing, ZHANG Jingjing, GAO Xiurui, SHI Yufan, PAN Xiuling, WU Yanrong. Comprehensive evaluation of cold resistance of different watermelon under low temperature stress[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2019, 32(4): 16-19.
- [21] 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 Guodong, ZHAO Tongsheng, LI Chunmin, FU You, ZHANG Xinsheng. Comprehensive evaluation on cold resistance of eleven wild apple rootstocks[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 145-151.
- [22] 刘明鹤, 王强, 卢明艳, 闫兴凯, 武春昊, 张茂君. 部分梨抗寒性评价及其叶片组织解剖结构差异研究[J]. 东北农业科学, 2022, 47(5): 93-97.
- LIU Minghe, WANG Qiang, LU Mingyan, YAN Xingkai, WU Chunhao, ZHANG Maojun. Cold resistance evaluation of some pears and study on the difference of leaf tissue and anatomical structure[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2022, 47(5): 93-97.
- [23] 郭佳欢, 冯会丽, 史彦江, 俞元春. 灰枣优系抗寒性综合评价[J]. 西南农业学报, 2018, 31(10): 2060-2068.
- GUO Jiahuan, FENG Huili, SHI Yanjiang, YU Yuanchun. Comprehensive evaluation on cold resistance of different excellent strains of *Zizyphus jujuba* ‘Huizao’ [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(10): 2060-2068.
- [24] 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 Rong, QIAO Gaixia, TAN Pengxia, DUAN Wei, LIANG Zhenchang, FAN Peige. Evaluation of cold resistance performance of the offspring of hybrids among grape species[J]. China Fruits, 2021(5): 25-32.
- [25] 阳妮, 蒋景龙, 李丽, 侯茹平, 丁德宽, 邓家锐. 3个柑橘品种幼苗对低温胁迫的生理响应及其抗寒性评价[J]. 中国果树, 2020(5): 32-39.
- YANG Ni, JIANG Jinglong, LI Li, HOU Ruping, DING Dekuan, DENG Jiarui. Physiological response and evaluation of cold resistance of three citrus varieties seedlings under low temperature stress[J]. China Fruits, 2020(5): 32-39.
- [26] 曹晓敏, 迟馨, 弟豆豆, 胡慧, 宋来庆, 姜中武, 赵玲玲. 6种苹果砧木的抗寒性比较研究[J]. 中国果树, 2020(4): 12-17.
- CAO Xiaomin, CHI Xin, DI Doudou, HU Hui, SONG Laiqing, JIANG Zhongwu, ZHAO Lingling. Preliminary identification of cold resistance of six apple rootstocks[J]. China Fruits, 2020(4): 12-17.
- [27] 刘兴禄, 王红平, 孙文泰, 董铁, 牛军强, 马明. 5个砧木苹果枝条的抗寒性评价[J]. 果树学报, 2021, 38(8): 1264-1274.
- LIU Xinglu, WANG Hongping, SUN Wentai, DONG Tie, NIU

- Junqiang, MA Ming. Cold resistance evaluation of the shoots of 5 apple rootstocks[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(8): 1264-1274.
- [28] 林植芳,刘楠. 活性氧调控植物生长发育的研究进展[J]. 植物学报, 2012, 47(1): 74-86.
- LIN Zhifang, LIU Nan. Research progress in the control and regulation of plant growth and development by reactive oxygen species[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2012, 47(1): 74-86.
- [29] 徐松华. 逆境条件下植物体内活性氧代谢研究进展[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(21): 29-32.
- XU Songhua. Research advances of reactive oxygen species in plants under environmental stress[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(21): 29-32.
- [30] 田景花,王红霞,张志华,高仪. 低温逆境对不同核桃品种抗氧化系统及超微结构的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1320-1326.
- TIAN Jinghua, WANG Hongxia, ZHANG Zhihua, GAO Yi. Effects of chilling stress on antioxidant system and ultrastructure of walnut cultivars[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(5): 1320-1326.
- [31] 杨舒贻,陈晓阳,惠文凯,任颖,马玲. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2016, 45(5): 481-489.
- YANG Shuyi, CHEN Xiaoyang, HUI Wenkai, REN Ying, MA Ling. Progress in responses of antioxidant enzyme systems in plant to environmental stresses[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2016, 45(5): 481-489.
- [32] 范宗民,孙军利,赵宝龙,刘怀锋,于坤,章智钧,刘晶晶. 不同砧木‘赤霞珠’葡萄枝条抗寒性比较[J]. 果树学报, 2020, 37(2): 215-225.
- FAN Zongmin, SUN Junli, ZHAO Baolong, LIU Huaifeng, YU Kun, ZHANG Zhijun, LIU Jingjing. Evaluation of cold resistance of one-year shoots from ‘Cabernet Sauvignon’ grape vine grafted on different rootstocks[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(2): 215-225.
- [33] 孟诗原,吕桂云,张明忠,张志浩,韦业,王华田,刘秀梅. 5种卫矛属植物对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J]. 西北植物学报, 2020, 40(4): 624-634.
- MENG Shiyuan, LÜ Guiyun, ZHANG Mingzhong, ZHANG Zhihao, WEI Ye, WANG Huatian, LIU Xiumei. Physiological response to cold stress and evaluation of cold resistance for five species of *Euonymus* Linn.[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(4): 624-634.
- [34] 赵一航,孟令东,张晓萌,王丽娜,刘皓玥,毕琳琳,刘宏亮,殷秀杰. 4个紫花苜蓿品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J]. 草业科学, 2021, 38(4): 683-692.
- ZHAO Yihang, MENG Lingdong, ZHANG Xiaomeng, WANG Lina, LIU Haoyue, BI Linlin, LIU Hongliang, YIN Xiujie. Evaluation of physiological response and cold resistance of four alfalfa cultivars to low temperature stress[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(4): 683-692.
- [35] 刘燕敏,周海燕,王康,闫洪朗,徐建平,吴俊平,魏小云,何林池. 植物对非生物胁迫的响应机制研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(16): 35-37.
- LIU Yanmin, ZHOU Haiyan, WANG Kang, YAN Honglang, XU Jianping, WU Junping, WEI Xiaoyun, HE Linchi. Research on response mechanism of plants to abiotic stresses[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(16): 35-37.
- [36] 单羽,任晓宁,李雪梅. 非生物胁迫对植物碳水化合物及其代谢相关酶影响的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(20): 6-9.
- SHAN Yu, REN Xiaoyun, LI Xuemei. Research progress on the effects of abiotic stress on plant carbohydrates and related enzymes in their metabolism[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(20): 6-9.
- [37] ZHANG X Z, WANG K H, ERVIN E H, WALTZ C, MURPHY T. Metabolic changes during cold acclimation and deacclimation in five bermudagrass varieties. I. Proline, total amino acid, protein, and dehydrin expression[J]. Crop Science, 2011, 51(2): 838-846.
- [38] 李清亚,路斌,赵佳伟,栗浩,李艳,苗胜越,路丙社. 不同豆梨品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 86-94.
- LI Qingya, LU Bin, ZHAO Jiawei, LI Hao, LI Yan, MIAO Shengyue, LU Bingshe. Physiological response and cold resistance evaluation of different *Pyrus calleryana* varieties under low temperature stress[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2020, 48(1): 86-94.
- [39] 刘紫烟,刘佳乐,朱圆圆,杨雅舒,陈利英,张雪梅,齐国辉. 木本植物低温应答机制研究进展[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 157-163.
- LIU Ziyang, LIU Jiale, ZHU Yuanyuan, YANG Yashu, CHEN Liying, ZHANG Xuemei, QI Guohui. Research progress on the response mechanism of woody plants to low temperature[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 157-163.
- [40] KAUR G, ASTHIR B. Proline: A key player in plant abiotic stress tolerance[J]. Biologia Plantarum, 2015, 59(4): 609-619.
- [41] 郭艳兰,牟德生,赵连鑫,王鑫,马宗桓,张兆铭,张利年. 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.
- GUO Yanlan, MU Desheng, ZHAO Lianxin, WANG Xin, MA Zonghuan, ZHANG Zhaoming, ZHANG Linian. Analysis of cold resistance of six wine grape rootstock varieties[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2022(3): 38-43.
- [42] KEUNEN E, PESHEV D, VANGRONSVELD J, VAN DEN ENDE W, CUYPERS A. Plant sugars are crucial players in the oxidative challenge during abiotic stress: Extending the traditional concept[J]. Plant, Cell & Environment, 2013, 36(7): 1242-1255.
- [43] 刘胜元,张明忠,王华田,刘秀梅,战中才. 3个主栽花椒品种的抗寒性评价[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(4): 388-395.
- LIU Shengyuan, ZHANG Mingzhong, WANG Huatian, LIU Xiumei, ZHAN Zhongcai. Evaluation of the cold resistance capability of three different cultivars of *Zanthoxylum bungeanum*[J]. Journal of Forest and Environment, 2021, 41(4): 388-395.
- [44] ZHAO Y, WANG Z X, YANG Y M, LIU H S, SHI G L, AI J. Analysis of the cold tolerance and physiological response differences of Amur grape (*Vitis amurensis*) germplasms during overwintering[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 259: 108760.