

低温对仁用杏雌蕊抗坏血酸—谷胱甘肽循环的影响

王萍¹, 李彦慧², 张雪梅¹, 李保国^{1,*}, 姚飞飞³

(¹河北农业大学林学院, 河北保定 071000; ²河北农业大学园林与旅游学院, 河北保定 071000; ³河北旅游职业学院园艺系, 河北承德 067000)

摘要: 利用人工智能模拟霜箱, 设 8 个温度 (18、-1、-2、-3、-4、-5、-6、-7 °C), 对抗寒性不同的两个仁用杏 (*Prunus armeniaca* Linn.) 品种雌蕊的过氧化氢 (H₂O₂) 含量和抗坏血酸—谷胱甘肽 (AsA-GSH) 循环进行了研究。结果表明, 低温胁迫增加了仁用杏雌蕊 H₂O₂ 含量, -7 °C 时抗晚霜品种 ‘围选 1 号’ 和晚霜敏感品种 ‘龙王帽’ 分别为对照 (18 °C) 的 5.49 倍和 7.22 倍。低温期间, ‘围选 1 号’ 雌蕊 AsA 等酶含量及 APX 等酶活性均高于 ‘龙王帽’, -7 °C 时, ‘围选 1 号’ 雌蕊 AsA、MDHA、DHA、GSH 和 GSSG 含量比对照分别下降了 66%、69%、48%、52%、53%, ‘龙王帽’ 下降了 78%、79%、59%、66%、65%, -7 °C 时, ‘围选 1 号’ 雌蕊 APX、MDHAR、DHAR、GPX、GR 活性、AsA/DHA、GSH/GSSG 分别是对照的 2.87 倍、1.07 倍、1.42 倍、1.60 倍、1.20 倍、65% 和 1.03 倍, ‘龙王帽’ 是对照 2.41 倍、96%、1.13 倍、1.08 倍、98%、54%、97%。结果表明 ‘围选 1 号’ 雌蕊在低温期间有较高的 AsA-GSH 循环效率, 可有效抑制 H₂O₂ 的积累, 这可能是其抗晚霜能力较强的重要原因之一。

关键词: 仁用杏; 雌蕊; 低温胁迫; AsA-GSH 循环

中图分类号: S 662.2

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2013) 03-0417-09

Effects of Low Temperature Stress on Ascorbate-glutathione Cycle in Kernel Apricot Pistil

WANG Ping¹, LI Yan-hui², ZHANG Xue-mei¹, LI Bao-guo^{1,*}, and YAO Fei-fei³

(¹College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000, China; ²College of Landscape and Travel, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000, China; ³Department of Horticulture, Hebei Tourism Vocational College, Chengde, Hebei 067000, China)

Abstract: The peroxide (H₂O₂) content and ascorbate (AsA)-glutathione (GSH) cycle in pistil of two kernel apricot (*Prunus armeniaca* Linn.) cultivars under different low temperature (18, -1, -2, -3, -4, -5, -6, -7 °C) were studied using the artificial climate chamber. The results show that H₂O₂ contents in kernel apricot pistil increased under the low temperature stress, at -7 °C, the amount of ‘Weixuan 1’ resistant to cold stress was 5.49 times more than control (18 °C), the amount of ‘Longwangmao’ susceptible to cold stress was 7.22 times more than the control. The content of enzyme

收稿日期: 2012-07-24; **修回日期:** 2013-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (C041102); 河北省自然科学基金项目 (C2009000552); 河北省科技支撑计划项目 (09230603D, 06220117D216)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: lbg888@163.com)

like AsA and so on and activity of enzyme like APX and so on in 'Weixuan 1' pistil were higher than those in 'Longwangmao' under low temperature, at $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, the contents of AsA, MDHA, DHA, GSH and GSSG were decreased by 66%, 69%, 48%, 52%, 53% compared to the control ($18\text{ }^{\circ}\text{C}$) in 'Weixuan 1' pistil, were decreased by 78%, 79%, 59%, 66%, 65% compared to control ($18\text{ }^{\circ}\text{C}$) in 'Longwangmao' pistil. At $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, the activity of APX, MDHAR, DHAR, GPX, GR, GSH/GSSG were 2.87, 1.07, 1.42, 1.60, 1.20, 1.03 times more than control ($18\text{ }^{\circ}\text{C}$) respectively. AsA/DHA was 65% of the control in 'Weixuan 1' pistil. The activity of APX, DHAR, GPX were 2.41, 1.13, 1.08 times more than control ($18\text{ }^{\circ}\text{C}$). MDHAR, GR, AsA/DHA, GSH/GSSG were 96%, 98%, 54%, 97% of the control respectively in 'Longwangmao' pistil. The results indicate that 'Weixuan 1' pistil could maintain efficient metabolism of AsA-GSH cycle, inhibit the accumulation of H_2O_2 effectivity, this might be one of important reasons for higher cold tolerance of 'Weixuan 1'.

Key words: kernel apricot; pistil; low temperature stress; AsA-GSH cycle

仁用杏 (*Prunus armeniaca* Linn) 芽体休眠期短, 春季开花较早, 易遭晚霜危害 (张秀国 等, 2004; 周国华 等, 2005), 晚霜冻害已成为制约仁用杏生产和发展的主要因素, 是仁用杏研究的热点问题之一。近年来有学者利用智能模拟霜箱模拟自然霜降过程, 研究了不同降温幅度下仁用杏花器官膜系统、保护酶系统、渗透调节物质含量的变化及冰核细菌对授粉特性等的影响 (彭伟秀 等, 2004; 孟庆瑞, 2009; 宁超, 2010; 王晓燕 等, 2010), 但未见有不同降温幅度对其花器官抗坏血酸—谷胱甘肽 (AsA-GSH) 循环影响的研究报告。

逆境条件下, 植物对氧气的利用能力降低, 活性氧的产生与清除机制失去平衡, 导致大量活性氧的积累, 致使植物受到伤害 (刘零怡 等, 2009; 李希东 等, 2011)。AsA-GSH 循环系统是植物体内清除活性氧的重要抗氧化体系之一, 其循环系统在抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、单脱氢抗坏血酸还原酶 (MDHAR)、脱氢抗坏血酸还原酶 (DHAR)、谷胱甘肽过氧化物酶 (GPX) 和谷胱甘肽还原酶 (GR) 的催化作用下, 在单脱氢抗坏血酸 (MDHA)、脱氢抗坏血酸 (DHA)、氧化型谷胱甘肽 (GSSG) 的参与下, 清除 H_2O_2 , 维持 AsA 和 GSH 氧化还原状态的平衡, 调控体内的氧化还原势, 使信号转导系统朝着有利于植物生长的方向进行 (Mallick & Mohn, 2000)。研究低温胁迫下仁用杏雌蕊 AsA-GSH 循环系统的变化, 有利于揭示花器官的低温适应机理, 为改进仁用杏栽培措施提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与处理方法

抗晚霜品种 '围选 1 号' 和晚霜敏感品种 '龙王帽' 取自于河北省围场满族蒙古族自治县杨家湾乡务本堂村仁用杏园内。

于 2011 年 4 月 17 日采取 '龙王帽' 试材, 2011 年 4 月 22 日采取 '围选 1 号' 试材, 每个品种选取管理水平一致、长势良好的 20 株树, 于树冠外围东、西、南、北 4 个方位各采 20 个大蕾期 (花瓣松散而尚未开放的花蕾) 的中果枝, 组成混合样带回实验室, 试验采用单株小区, 重复 3 次。室温 ($18\text{ }^{\circ}\text{C}$) 水培至盛开。

设 7 个处理温度 (-1 、 -2 、 -3 、 -4 、 -5 、 -6 、 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$)。每个品种均取 350 枝盛开的花枝, 分成 7 批, 每批 50 枝, 分批放入 MSZ-2F 型模拟霜箱内。以 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 50 个花枝的雌蕊作为对照, 霜

箱先预冷至 10 ℃左右, 后以 10 ℃/0.5 h 速度降温至 2 ℃左右, 再以 1 ℃/0.5 h 的速度降至处理温度, 维持 0.5 h 后, 以 10 ℃/0.5 h 速度升至室温 (18 ℃)。取出花枝, 立即摘取雌蕊, 液氮处理后置于 -80 ℃冰箱备用。18 ℃下每个品种摘取 50 个花枝的雌蕊, 立即液氮处理, 置于 -80 ℃冰箱备用。

1.2 测定方法

雌蕊褐化率按照孟庆瑞 (2009) 的方法进行测定, 低温处理后, 对受冻情况进行统计, 雌蕊肉眼观察呈水浸状并变褐色者统计为受冻害, 未变褐色统计为正常。

H_2O_2 含量测定采用林植芳等 (1988) 的方法。称取雌蕊 0.5 g, 加入少量石英砂和 1 mL 丙酮在冰浴中研磨, 冲洗并用丙酮定容至 5 mL, 在 4 ℃下, 3 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 分别吸取 1 mL 提取液加入 0.2 mL 5% 硫酸钛, 0.2 mL 浓氨水 (对照为 1 mL 丙酮 + 0.2 mL 4% 硫酸钛 + 0.2 mL 浓氨水离心, 用硫酸溶解沉淀所得混合液) 摇匀后 3 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 弃上清液, 用 0.5 mL 丙酮清洗沉淀 2 次, 加 1 mL 2 mol·L⁻¹ 的硫酸溶液溶解沉淀, 定容至 5 mL, 在 415 nm 下测定 OD 值, 通过制作 H_2O_2 标准曲线计算样品 H_2O_2 含量, AsA、DHA、MDHA、GSH、GSSG 含量, APX、GPX、GR、DHAR 和 MDHAR 活性均按照孟庆瑞 (2009) 的方法进行测定。

1.3 数据处理

数据处理采用 DPS 统计分析软件进行, 试验结果为 3 次重复取平均值 ± 标准误, 采用 LSD 分析法进行多重比较, EXCEL 作图。

2 结果与分析

2.1 低温处理对仁用杏雌蕊褐化率的影响

不同温度处理下仁用杏雌蕊褐化率的变化见表 1。‘围选 1 号’品种在 -4 ℃时雌蕊开始受冻害, 褐化率为 18%, 而‘龙王帽’在 -3 ℃时就有 25% 的褐化率, -5 ℃时‘围选 1 号’雌蕊有一半发生褐化, ‘龙王帽’褐化率达 92%, 仅有极少数雌蕊未受冻, -6 ℃时‘围选 1 号’仍有 10% 左右的雌蕊处于正常状态, 而‘龙王帽’则无存活的雌蕊, -7 ℃时, ‘围选 1 号’和‘龙王帽’雌蕊均全部受害。

表 1 低温处理下仁用杏雌蕊的褐化率

Table 1 The changes of browning rate in kernel apricot pistil under low temperature /%

温度/℃ Temperature	围选 1 号 Weixuan 1	龙王帽 Longwangmao
18 (对照 Control)	0	0
-1	0	0
-2	0	0
-3	0	25
-4	18	74
-5	53	92
-6	90	100
-7	100	100

2.2 低温处理对仁用杏雌蕊 H_2O_2 含量的影响

不同温度处理下‘围选 1 号’和‘龙王帽’雌蕊 H_2O_2 含量的变化如图 1 所示。随着温度不断降低, 二者雌蕊 H_2O_2 含量均持续升高, -7 ℃时‘围选 1 号’雌蕊 H_2O_2 含量是对照 (18 ℃) 的 5.49 倍, ‘龙王帽’达到 7.22 倍。18 ℃时, ‘龙王帽’雌蕊 H_2O_2 含量略低于‘围选 1 号’, -1 ~ -7 ℃‘龙王帽’雌蕊高于‘围选 1 号’, 温度越低, 二者 H_2O_2 含量相差越大, 可见, 受到低温胁迫后, ‘围选 1 号’ H_2O_2 积累量低于‘龙王帽’。‘围选 1 号’雌蕊 H_2O_2 含量增加较快的拐点在 4 ~ 5 ℃, ‘龙王帽’在 3 ~ 4 ℃, 与宁超等 (2010) 测定的过冷却点基本一致。

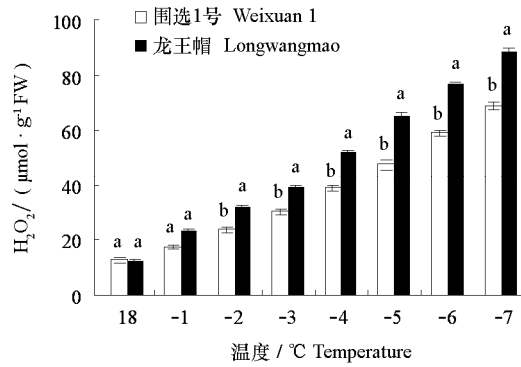


图1 低温处理下仁用杏雌蕊 H₂O₂ 含量的变化

同一温度不同小写字母表示品种间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 1 The changes of H₂O₂ content in kernel apricot pistil under low temperature

Different small letters in the same temperature meant significant difference between 'Weixuan 1' and 'Longwangmao' at 0.05 level.

2.3 低温处理对仁用杏雌蕊 AsA-GSH 循环中抗氧化物质含量的影响

2.3.1 对 AsA、MDHA 和 DHA 含量的影响

不同温度处理下仁用杏雌蕊中 AsA、MDHA、DHA 含量的变化如图 2 所示。

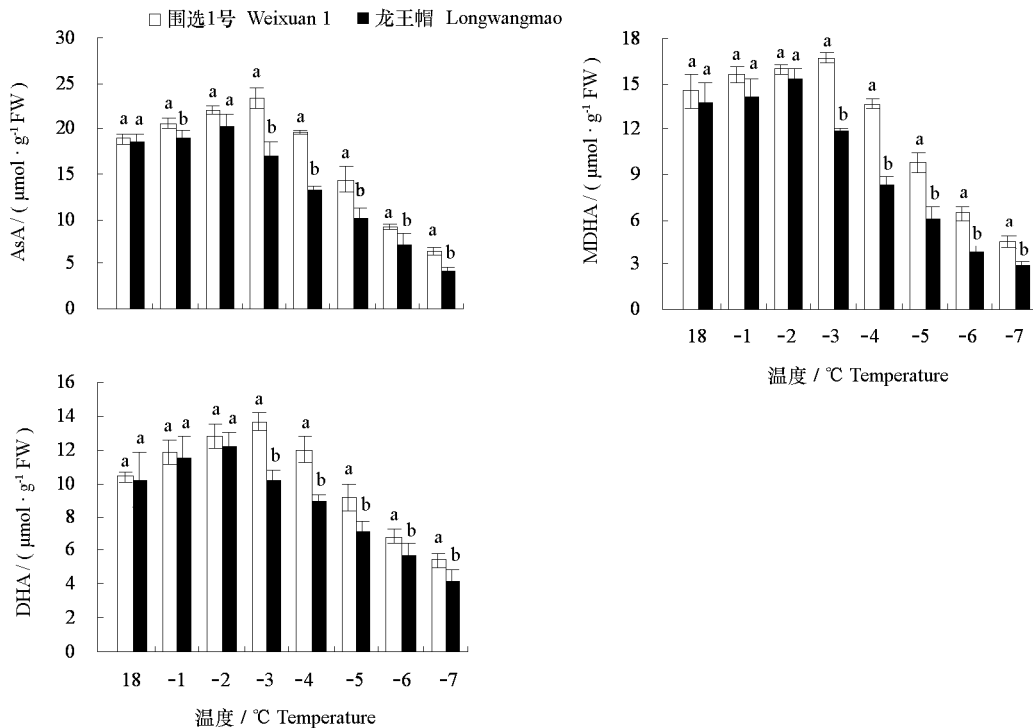


图2 低温处理下仁用杏雌蕊 AsA、MDHA 和 DHA 含量的变化

同一温度不同小写字母表示品种间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 2 The changes of AsA, MDHA and DHA content in kernel apricot pistil under low temperature

Different small letters in the same temperature meant significant difference between 'Weixuan 1' and 'Longwangmao' at 0.05 level.

在本试验中, ‘围选 1 号’ 和 ‘龙王帽’ 雌蕊中 AsA、MDHA、DHA 含量随温度下降呈先升高后降低的变化趋势。‘围选 1 号’ 雌蕊中 AsA、MDHA、DHA 含量的变化一致, 均在 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (过冷却点前) 达到最大值, AsA、MDHA、DHA 含量分别比 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对照增加了 24%、22%、31%, 之后迅速下降。‘龙王帽’ 雌蕊中 AsA、MDHA、DHA 含量的变化也一致, 均在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (过冷却点前) 达到最大值, 分别增加了 9%、18%、19%。 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, ‘围选 1 号’ 和 ‘龙王帽’ 雌蕊 AsA、MDHA、DHA 含量均降到最低, ‘围选 1 号’ 雌蕊中分别下降了 66%、69%、48%, ‘龙王帽’ 下降了 78%、79%、59%。在 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以后, ‘围选 1 号’ 雌蕊 AsA、MDHA、DHA 积累量均显著或极显著高于 ‘龙王帽’。

2.3.2 对 GSH 和 GSSG 含量的影响

不同低温处理下仁用杏雌蕊 GSH、GSSG 含量的变化如图 3 所示。

‘围选 1 号’ 和 ‘龙王帽’ 雌蕊 GSH 含量随温度的降低呈先升高后降低的变化趋势, 均在过冷却点之前的 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到最高, 分别较对照 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升了 19% 和 10%, $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时含量最低, 分别下降了 52% 和 66%。

‘围选 1 号’ 和 ‘龙王帽’ 雌蕊 GSSG 含量均随温度下降而降低, $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 分别较对照 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降了 53% 和 65%。在降温过程中, ‘围选 1 号’ 雌蕊有较高的 GSH 和 GSSG 含量, 为其更有效地清除活性氧, 减少膜脂过氧化奠定了物质基础。

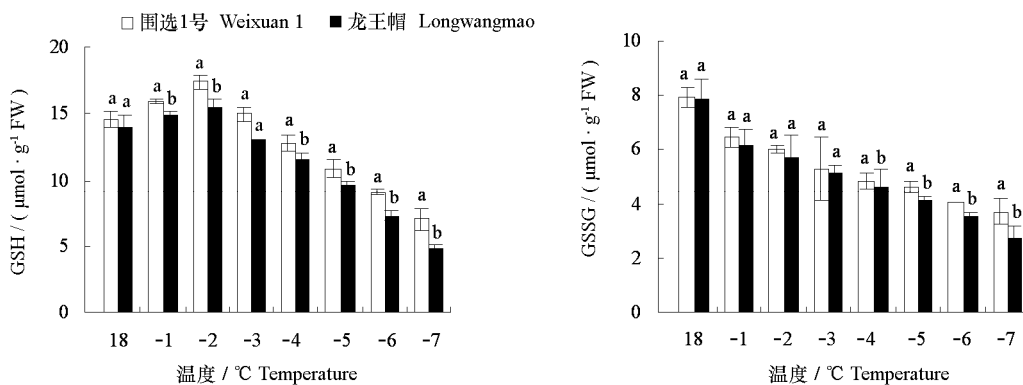


图 3 低温处理下仁用杏雌蕊 GSH、GSSG 含量的变化

同一温度不同小写字母表示品种间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 3 The changes of GSH and GSSG content in kernel apricot pistil under low temperature

Different small letters in the same temperature meant significant difference between

‘Weixuan 1’ and ‘Longwangmao’ at 0.05 level.

2.4 低温处理对仁用杏雌蕊 AsA-GSH 循环中抗氧化酶活性的影响

2.4.1 对 APX、MDHAR 和 DHAR 活性的影响

低温处理下仁用杏雌蕊 APX、MDHAR 和 DHAR 活性的变化如图 4 所示。

‘围选 1 号’ 和 ‘龙王帽’ 雌蕊中 3 种酶的活性均随温度下降呈先升高后降低的变化趋势。‘围选 1 号’ 雌蕊中 APX、MDHAR、DHAR 活性的最大值出现在 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 分别是对照的 3.58、1.51 和 1.93 倍, ‘龙王帽’ 出现在 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 分别是对照的 3.08、1.39 和 1.49 倍。 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, ‘围选 1 号’ 是对照的 2.87、1.07 和 1.42 倍; ‘龙王帽’ 是对照的 2.41 倍、96% 和 1.13 倍。

低温期间, ‘围选 1 号’ 雌蕊较 ‘龙王帽’ 有较强的活性。‘围选 1 号’ 雌蕊中 APX、MDHAR、DHAR 活性的拐点温度为 $-4\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ‘龙王帽’ 为 $-3\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均与过冷却点的温度范围基本一致。

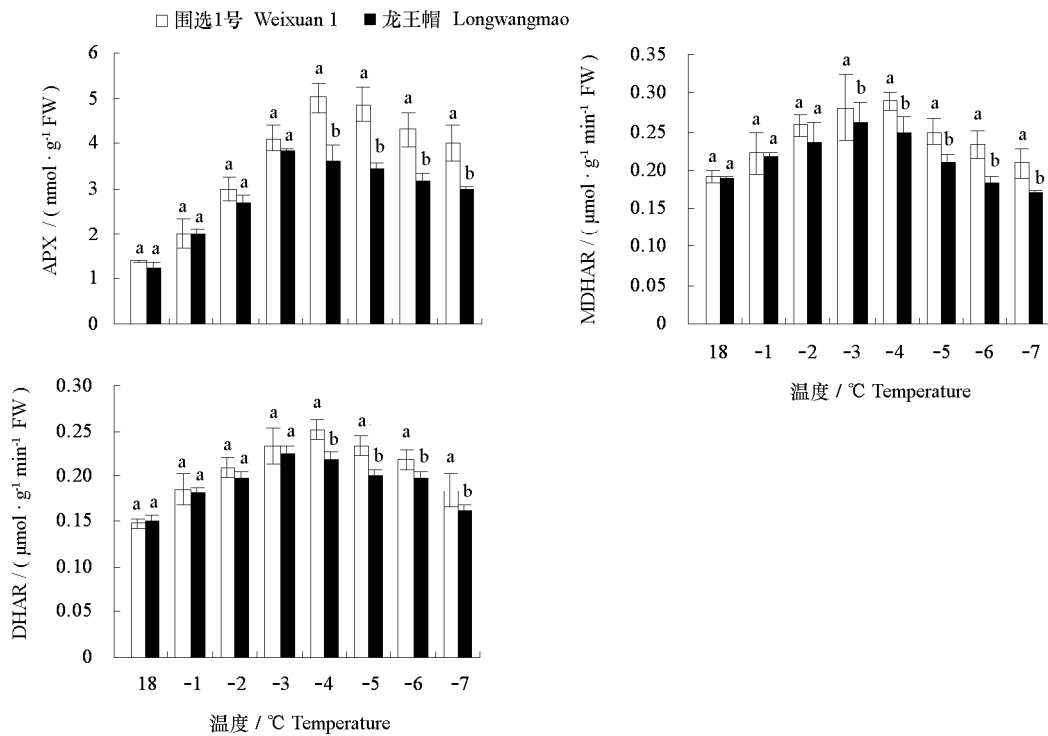


图4 低温处理下仁用杏雌蕊 APX、MDHAR 和 DHAR 活性的变化

同一温度不同小写字母表示品种间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 4 The changes of APX, MDHAR and DHAR activity in kernel apricot pistil under low temperature

Different small letters in the same temperature meant significant difference between ‘Weixuan 1’ and ‘Longwangmao’ at 0.05 level.

2.4.2 对 GPX 和 GR 活性的影响

不同低温处理下仁用杏雌蕊 GPX 和 GR 活性的变化如图 5 所示。

低温胁迫下‘围选 1 号’和‘龙王帽’雌蕊 GPX 活性均呈先上升后下降的趋势。‘围选 1 号’雌蕊 GPX 活性最大值出现在 -4°C ，为对照的 2.36 倍，‘龙王帽’雌蕊活性最大值出现在 -3°C ，为对照温度的 2.09 倍，二者在 -7°C 活性均降到最低，分别是对照的 1.6 倍和 1.08 倍。可见‘围选 1 号’雌蕊 GPX 活性在胁迫前期受低温诱导程度高于‘龙王帽’，后期受低温抑制程度小于‘龙王

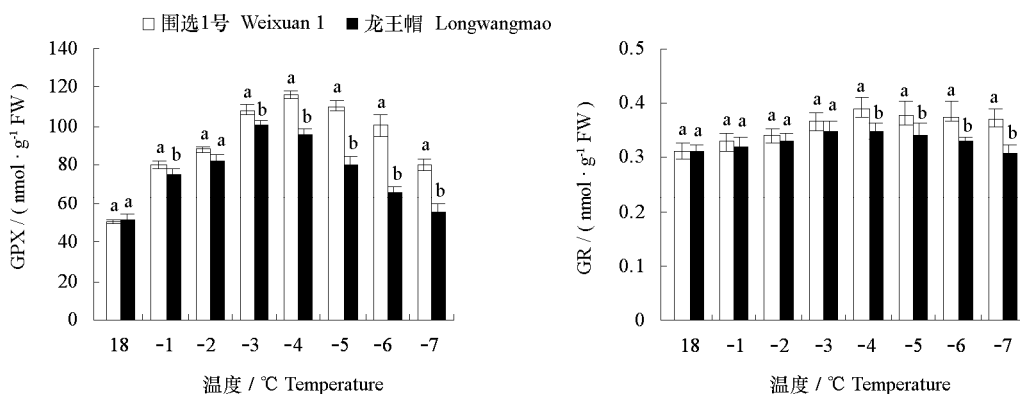


图5 低温处理下仁用杏雌蕊 GPX、GR 活性的影响

同一温度不同小写字母表示品种间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 5 The changes of GPX and GR activity in kernel apricot pistil under low temperature

Different small letters in the same temperature meant significant difference between ‘Weixuan 1’ and ‘Longwangmao’ at 0.05 level.

帽’, 在整个低温过程中, 相对于‘龙王帽’有较强的活性。低温胁迫下, ‘围选 1 号’和‘龙王帽’雌蕊 GR 活性均呈先上升后下降的变化趋势, ‘围选 1 号’雌蕊 GR 活性在 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最大, 是对照的 1.25 倍, ‘龙王帽’在 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最大, 是对照的 1.12 倍, $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时降到最低, 分别为对照的 1.2 倍和 98%, ‘围选 1 号’和‘龙王帽’雌蕊 GR 在受到低温胁迫后变化幅度不大, 但‘围选 1 号’雌蕊活性始终高于‘龙王帽’雌蕊活性。‘围选 1 号’雌蕊中 GPX 和 GR 活性的拐点温度在 $-4\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ‘龙王帽’活性的拐点温度在 $-3\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均与过冷却点的温度范围基本一致。

2.5 低温处理对仁用杏雌蕊 AsA/DHA 和 GSH/GSSG 比值的影响

低温处理下仁用杏雌蕊 AsA/DHA 和 GSH/GSSG 比值的变化如图 6 所示。由图 6 可知‘围选 1 号’和‘龙王帽’雌蕊 AsA/DHA 比值均随温度的降低而下降, $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时分别降为对照的 65% 和 54%。二者的 GSH/GSSG 随温度的降低先上升后降低, 均在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时比值最大, 是对照的 1.57 倍和 1.5 倍, $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时是对照的 1.03 倍和 97%。低温胁迫期间‘围选 1 号’雌蕊保持了相对较高的 AsA/DHA 和 GSH/GSSG, 在一定程度上使 AsA-GSH 循环有效进行。

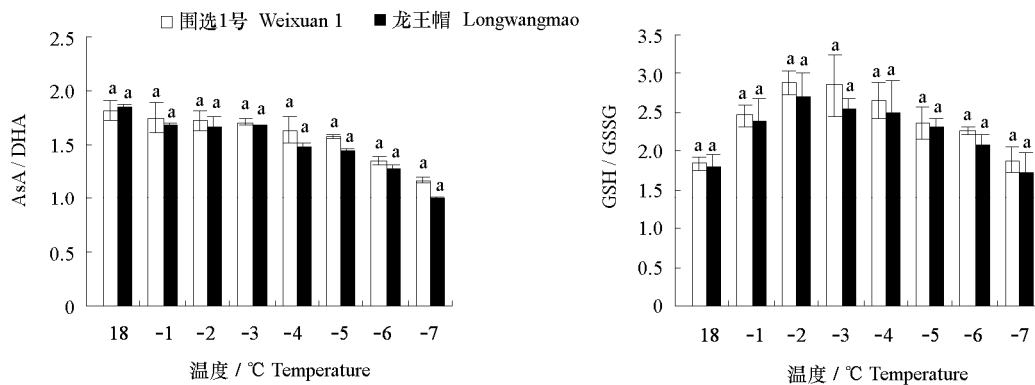


图 6 不低温处理下仁用杏雌蕊 AsA/DHA 和 GSH/GSSG 的变化

同一温度不同小写字母表示品种间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 6 The changes of AsA/DHA and GSH/GSSG ratio in kernel apricot pistil under low temperature

Different small letters in the same temperature meant significant difference between ‘Weixuan 1’ and ‘Longwangmao’ at 0.05 level.

3 讨论

仁用杏雌蕊褐化是受冻害之后的直观表现, ‘围选 1 号’雌蕊受害温度在 $-4\sim-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, ‘龙王帽’雌蕊受害温度在 $-3\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 仁用杏雌蕊的受冻害温度与过冷却点的温度范围基本一致。

H_2O_2 是一种攻击性很强的活性氧, 使蛋白质、核酸等多种细胞内活性成分变质, 逆境条件下, H_2O_2 启动膜质过氧化, H_2O_2 含量是衡量氧化胁迫程度的重要指标之一 (Selote & Khanna-Chopra, 2006; Shao et al., 2008)。本研究表明, 仁用杏雌蕊 H_2O_2 含量在过冷却点之前增加缓慢, 过冷却点之后迅速增加, 可能由于过冷却点之后组织开始结冰, 代谢紊乱, AsA-GSH 循环等清除活性氧系统受阻, 使 H_2O_2 大量积累。在相同的低温胁迫条件下, ‘围选 1 号’雌蕊 H_2O_2 含量的积累低于‘龙王帽’, 说明在抗寒性强的‘围选 1 号’雌蕊中 AsA-GSH 循环等系统能快速有效的清除雌蕊中过量积累的 H_2O_2 , 降低膜质过氧化程度, 保护细胞内的活性物质, 这与相关的研究结果 (王聪 等, 2010; 马春花 等, 2011) 一致。

AsA 和 GSH 是植物体内重要的抗氧化物质, 在清除活性氧自由基方面发挥重要作用 (郑小林 等, 2011), 二者常偶联起作用 (Nagalakshmi & Prasad, 2001), MDHA 和 DHA 是 AsA 在 AsA-GSH

循环中的氧化还原状态,其含量的变化对植物抵抗一系列环境胁迫非常重要(Noctor & Foyer, 1998), GSSG 是 GSH 的催化产物, GSSG 在又 GR 的作用下还原生成 GSH, GSSG 含量的变化关系到 AsA-GSH 的循环效率。APX、MDHAR、DHAR、GR、GPX 是 AsA-GSH 循环中重要的酶,在低温胁迫环境下清除 H₂O₂ 等活性氧系统中发挥重要作用(Jin et al., 2003),适度的逆境条件能够刺激植物体内 AsA-GSH 循环过程中酶活性的升高,有利于胁迫耐性的改善(Rao et al., 1995; Calatayud et al., 2003; Srivalli et al., 2003),在低温胁迫前期,‘围选 1 号’和‘龙王帽’雌蕊中 AsA 等抗氧化物质含量及酶活性均在过冷却点之前达到最大值,是 AsA-GSH 循环对低温的适应,超出了 AsA-GSH 循环的调节适应能力之后迅速降低,抗氧化物质含量开始降低的温度要早于过冷却点,即早于 H₂O₂ 含量迅速增加的温度,可见除 AsA-GSH 的循环能有效的清除 H₂O₂ 以外,还有其他物质也在起作用。‘围选 1 号’雌蕊在同一低温胁迫下 AsA 等抗氧化物质含量及酶活性均高于‘龙王帽’,到达最大时的温度均低于‘龙王帽’,说明‘围选 1 号’雌蕊在低温胁迫下能更好地催化 AsA 再生,有较高的 AsA、GSH 库水平,AsA-GSH 循环效率高于‘龙王帽’,有效地减少了 H₂O₂ 的积累,表现为具有较强的抗寒性。

AsA/DHA 与环境胁迫响应有关(Asada, 1992),已有报道认为 GSH/GSSG 是激活植物抗性基因的信号之一(Pukacka & Ratajczak, 2006)。逆境下,AsA/DHA、GSH/GSSG 可以用来表示植物细胞的氧化还原状态,比值越低说明细胞遭受的氧化胁迫越重(单长卷等,2011)。本研究中‘围选 1 号’雌蕊 AsA/DHA 及 GSH/GSSG 比值均高于同期的‘龙王帽’,‘围选 1 号’雌蕊对低温胁迫表现有较强的适应能力,细胞遭受的氧化胁迫程度轻于‘龙王帽’,在胁迫期间能够保持较高的氧化还原力,有利于 AsA-GSSG 的循环,是其具有较低褐化率和较强抗寒能力的重要因素。

References

- Asada K. 1992. Ascorbate peroxidase—a hydrogen peroxide-scavenging enzyme in plants. *Physiologia Plantarum*, 85: 235 – 241.
- Calatayud A, Iglesias D J, Talón M, Barreno E. 2003. Effects of 2-month ozone exposure in spinach leaves on photosynthesis, antioxidant systems and lipid peroxidation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 41 (9): 839 – 845.
- Jin Y H, Tao D L, Hao Z Q. 2003. Environmental stresses and redox status of ascorbate. *Acta Botanica Sinica*, 45: 795 – 801.
- Li Xi-dong, Hou Li-xia, Liu Xin, Lu Jiang. 2011. Involvement of H₂O₂ in regulating the expression of *VvIPK2* in response to low temperature stress in leaves of *Vitis*. *Acta Horticulturae Sinica*, 38 (6): 1052 – 1062. (in Chinese)
- 李希东, 侯丽霞, 刘新, 卢江. 2011. H₂O₂ 与葡萄 *VvIPK2* 基因表达及其低温胁迫响应的关系. *园艺学报*, 38 (6): 1052 – 1062.
- Lin Zhi-fang, Li Shuang-shun, Lin Gui-zhu, Guo Jun-yan. 2008. The accumulation of hydrogen peroxide in senescing leaved and chloroplasts in relation to lipid peroxidation. *Acta Botanica Sinica*, 14 (1): 12 – 16. (in Chinese)
- 林植芳, 李双顺, 林桂珠, 郭俊彦. 1988. 衰老叶片和叶绿体中 H₂O₂ 的累积与膜脂过氧化的关系. *植物生理学报*, 14 (1): 12 – 16.
- Liu Ling-yi, Zhao Dan-ying, Zheng Yang, Shen Lin, Sheng Ji-ping. 2009. Hydrogen peroxide metabolism and signal transduction under cold stress in plants. *Acta Horticulturae Sinica*, 36 (11): 1701 – 1708. (in Chinese)
- 刘零怡, 赵丹莹, 郑杨, 申琳, 生吉萍. 2009. 植物在低温胁迫下的过氧化氢代谢及信号转导. *园艺学报*, 36 (11): 1701 – 1708.
- Ma Chun-hua, Li Ming-jun, Li Cui-ying, Shao Jian-hui, Ma Feng-wang. 2011. Response of ascorbic acid metabolism in apple rootstocks leaves under drought stress. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 31 (8): 1596 – 1602. (in Chinese)
- 马春花, 李明军, 李翠英, 邵建辉, 马锋旺. 2011. 不同抗性苹果砧木叶片抗环血酸代谢对干旱胁迫的响应. *西北植物学报*, 31 (8): 1596 – 1602.
- Mallik N, Mohn F H. 2000. Reactive oxygen species response of algal cells. *Plant Physiology*, 157 (2): 183 – 193.
- Meng Qing-rui. 2009. The Study on the physiological mechanism of frost injury to apricot floral organs [Ph. D. Dissertation]. Baoding: Agriculture University of Hebei. (in Chinese)
- 孟庆瑞. 2009. 杏花器官霜冻害生理机制研究[博士论文]. 保定: 河北农业大学.

- Nagalakshmi N, Prasad M N. 2001. Responses of glutathione cycle enzymes and glutathione metabolism to copper stress in *Scenedesmus bijugatus*. *Plant Science*, 160 (2): 291 - 299.
- Ning Chao, Meng Qing-rui, Li Shu-xian, Li Yan-hui, Yang Jian-min. 2010. Comparative study of cold resistance in kernel-apricot germplasm floral organs. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 33 (3): 37 - 41. (in Chinese)
- 宁 超, 孟庆瑞, 李淑贤, 李彦慧, 杨建民. 2010. 抗霜冻仁用杏优良花器官抗寒性的比较研究. *河北农业大学学报*, 33 (3): 37 - 41.
- Ning Chao. 2010. Weixuan 1 apricot germplasm cold resistance of floral organs and biological characteristics [M. D. Dissertation] . Baoding: Agriculture University of Hebei. (in Chinese)
- 宁 超. 2010. ‘围选 1 号’仁用杏花器官抗寒性及生物学特性研究[硕士论文]. 保定: 河北农业大学.
- Noctor G, Foyer C H. 1998. Ascorbate and glutathione: Keeping active oxygen under control. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49: 249 - 279.
- Peng Wei-xiu, Yang Jian-min, Zhang Qin, Meng Qing-rui. 2004. Effect of ice nucleation active bacteria on the ultrastructure of apricot varietie ovule. *Acta Horticulturae Sinica*, 31 (1): 21 - 24. (in Chinese)
- 彭伟秀, 杨建民, 张 芹, 孟庆瑞. 2004. 冰核细菌对仁用杏胚珠超微结构的影响. *园艺学报*, 31 (1): 21 - 24.
- Pukacka S, Ratajczak E. 2006. Antioxidative response of ascorbate-glutathione pathway enzymes and metabolites to desiccation of recalcitrant *Acer saccharinum* seeds. *Journal of Plant Physiology*, 163: 1259 - 1266.
- Rao M V, Hale B A, Ormrod D P. 1995. Amelioration of ozone induced oxidative damage in wheat plants grown under high carbon dioxide. *Plant Physiology*, 109 (2): 421 - 432.
- Selote D S, Khanna-Chopra R. 2006. Drought acclimation confers oxidative stress tolerance by inducing coordinated antioxidant defense at cellular and subcellular level in leaves of wheat seedlings. *Physiologia Plantarum*, 127: 494 - 500.
- Shan Chang-juan, Han Rui-lian, Liang Zong-suo. 2011. Responses to drought stress of the biosynthetic and recycling metabolism of glutathione and ascorbate in *Agropyron cristatum* leaves on the loess plateau of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35 (6): 653 - 662. (in Chinese)
- 单长卷, 韩蕊莲, 梁宗锁. 2011. 黄土高原冰草叶片抗坏血酸和谷胱甘肽合成及循环代谢对干旱胁迫的生理响应. *植物生态学报*, 35 (6): 653 - 662.
- Shao H B, Chu L Y, Shao M A, Jaleel C A, Mi H M. 2008. Higher plant antioxidants and redox signaling under environmental stresses. *Comptes Rendus Biologies*, 331: 433 - 441.
- Srivalli B, Sharma G, Khanna-chopra R. 2003. Antioxidative defense system in an upland rice cultivar subjected to increasing intensity of water stress followed by recovery. *Physiologia Plantarum*, 119: 503 - 512.
- Wang Cong, Zhu Yue-lin, Yang Li-fei, Chen Lei. 2010. Effects of NaCl stress on ascorbate-glutathione cycle in vegetable soybean seeds. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 16 (5): 1209 - 1216. (in Chinese)
- 王 聪, 朱月林, 杨立飞, 陈 磊. 2010. NaCl 胁迫对菜用大豆种子抗坏血酸—谷胱甘肽循环的影响. *植物营养与肥料学报*, 16 (5): 1209 - 1216.
- Wang Xiao-yan, Ning Chao, Song Qing-feng, Li Yan-hui, Yang Jian-min. 2010. Comparative study on the hardiness of 4 excellent kernel apricot germplasm. *Journal of Anhui Agri Sci*, 38 (9): 4479 - 4481, 4485. (in Chinese)
- 王晓燕, 宁 超, 宋庆丰, 李彦慧, 杨建民. 2010. 4 个仁用杏优良株抗寒性比较研究. *安徽农业科学*, 38 (9): 4479 - 4481, 4485.
- Zhang Xiu-guo, Wu Jian-liang, Wang Xi-jun, Bai Dong-mei, Wang Li-ying, Chu Bo-yan, Yin Guang-yuan. 2004. The investigation of frost influence factors and prevention measures during apricot florescence. *Hebei Forestry Science and Technology*, 3: 35 - 36. (in Chinese)
- 张秀国, 吴建梁, 王喜军, 白冬梅, 王丽颖, 储博彦, 尹广远. 2004. 杏树花期霜害的影响因素调查及防治措施. *河北林业科技*, 3: 35 - 36.
- Zheng Xiao-lin, Chen Yan, Jing Guo-xing, Li Ang, Zhang Jia-jia, Li Jian-rong. 2011. Effects of oxalic acid treatment on AsA-GSH cycle in mango fruit during storage at room temperature. *Acta Horticulturae Sinica*, 38 (9): 1633 - 1640. (in Chinese)
- 郑小林, 陈 燕, 敬国兴, 李 昂, 张佳佳, 励建荣. 2011. 草酸处理对芒果采后果实 AsA-GSH 循环系统的影响. *园艺学报*, 38 (9): 1633 - 1640.
- Zhou Guo-hua, Zhang Xing-chun, Chang Zhong-bo. 2005. Freezing injury of apricot in spring and prevention measures. *Inner Mongolia Forestry Science & Technology*, (1): 14 - 15. (in Chinese)
- 周国华, 张醒春, 常中波. 2005. 仁用杏的春季冻害及预防措施. *内蒙古林业科技*, (1): 14 - 15.