

张一冉,王雅楠,杨 杨,等. 脱落酸与水杨酸处理调节李果实抗冷性及氧化酶活性[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(2): 471-476.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.02.030

脱落酸与水杨酸处理调节李果实抗冷性及氧化酶活性

张一冉, 王雅楠, 杨 杨, 韩育梅

(内蒙古农业大学, 内蒙古 呼和浩特市 010018)

摘要: 为研究水杨酸(SA)提高李果实抗冷能力过程中脱落酸(ABA)的作用,本研究以黑琥珀李果实为原料,分别采用 1.0 mmol/L SA、47.0 μ mol/L ABA、5.0 mmol/L 的 Na_2WO_4 、1.0 mmol/L SA 结合 5.0 mmol/L 的 Na_2WO_4 以及蒸馏水为对照浸泡 30 min。对李果实冷害指数、总酚含量、过氧化物酶(POD)、多酚氧化酶(PPO)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性进行测定。结果表明,SA 和 ABA 处理组降低了冷害指数,提高了其总酚含量并延缓了 POD 和 PPO 活性的上升,还显著地提高了 SOD、CAT 和 APX 等活性氧清除酶的活性, Na_2WO_4 、SA 结合 Na_2WO_4 处理组抗冷能力均低于对照组。说明 SA 和 ABA 可以延缓李果实的冷害,提高其抗冷性和活性氧代谢能力。 Na_2WO_4 显著抑制李果实的抗冷性,且该作用不受 SA 的影响,表明 SA 提高李果实抗冷性依赖于 ABA。

关键词: 李果实; 冷害; 活性氧代谢; 抗冷性

中图分类号: S662.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2020)02-0471-06

Regulation of abscisic acid and salicylic acid treatments on chilling resistance and oxidase activity of plum fruit

ZHANG Yi-ran, WANG Ya-nan, YANG Yang, HAN Yu-mei

(Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In order to study the role of abscisic acid (ABA) in the process of salicylic acid (SA) improving the cold resistance of plum fruit, Black Amber plum fruit was used as raw material and soaked in 1.0 mmol/L SA, 47.0 μ mol/L ABA, 5.0 mmol/L Na_2WO_4 , 1.0 mmol/L SA combined with 5.0 mmol/L Na_2WO_4 , and distilled water (control group) for 30 min. Chilling injury index, total phenolic content, peroxidase (POD) activity, polyphenol oxidase (PPO) activity, superoxide dismutase (SOD) activity, catalase (CAT) activity, ascorbate peroxidase (APX) activity were measured. The results showed that the SA and ABA treatments reduced the chilling injury index, increased the total phenolic content, delayed the increase of POD and PPO activities and significantly increased the activities of active oxygen scavenging enzymes such as SOD, CAT and APX. The cold resistance of Na_2WO_4 and SA combined with Na_2WO_4 treatment groups was lower than that of the control group. It is indicated that SA and ABA can delay the chilling injury of plum fruit and improve its cold resistance and active oxygen metabolism. Na_2WO_4 significantly inhibited the cold resistance of plum fruit, and the effect was not affected by SA, which indicated that SA depended on ABA to increase the cold resistance of plum fruit.

Key words: plum fruit; chilling injury; active oxygen metabolism; cold resistance

收稿日期: 2019-08-08

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJZZ18046)

作者简介: 张一冉 (1995-), 女, 内蒙古包头人, 硕士研究生, 研究方向为农产品加工及贮藏。(E-mail) 760037592@qq.com

通讯作者: 杨 杨, (E-mail) northerapril@126.com; 韩育梅, (E-mail) hanyumeim@sina.com

李果实在低温贮藏时极易发生冷害,造成果实腐烂变质,影响了产品贮藏品质和商品价值^[1]。使用小分子信号物质调控果实冷害是近年来的研究热点。已有研究表明,可以通过施用一些外源物质(包括植物激素和植物生长调节剂在内的外源小

分子物质)有效地调控活性氧代谢及抗氧化相关酶活性^[2-4],控制果实冷害的发生。

在逆境胁迫下,活性氧大量积累超出机体自由清除能力后,导致活性氧代谢失衡,最终植物受到损伤^[5]。近年来的国内外研究结果表明,活性氧代谢失衡主要体现在清除活性氧自由基能力减弱、细胞膜脂过氧化程度加剧、抗氧化酶活性受到抑制等方面^[6-7]。水杨酸(SA)可以提高保护酶的活性来清除活性氧,维持细胞膜系统的平衡,提高植物抵抗逆境胁迫的能力,从而达到保护植物细胞的作用。有研究表明,适宜浓度SA可以提高杏果实抗冷性及活性氧代谢^[8]。类似的现象也在番茄^[9]、桃^[10]等果蔬中得到了验证。脱落酸(ABA)作为一种功能性激素,可以使植物对逆境做出快速应答^[11]。在低温条件下,ABA可以通过调节植物体内水分及维持细胞膜稳定性多个方面来增加植物的低温胁迫、盐胁迫、水分胁迫的抵抗能力^[12-13]。ABA可以提高果实抗冷性,延长果实贮藏期已在草莓^[14]、香蕉^[15]、桃^[16]等多种果蔬中得到证实。黄杏等在研究中指出钨酸钠可以抑制内源ABA合成并阻断其信号传递,还指出钨酸钠可以抑制甘蔗幼苗的抗冷性和抗氧化能力^[17]。但是SA和ABA对果实的抗冷信号是否存在交叉,二者之间相互关系怎样,以及ABA是否参与了SA提高植物抗冷性的信号过程还有待研究。

因此,本研究采用SA、ABA、ABA合成抑制剂钨酸钠(Na_2WO_4)以及SA结合 Na_2WO_4 ,蒸馏水为对照分别浸泡处理李果实,通过研究其对冷害及活性氧相关酶活性的影响以明确SA、ABA处理减轻李果实冷害的作用,并通过 Na_2WO_4 阻断ABA的合成,探究SA提高李果实抗冷性是否依赖于ABA。

1 材料与方法

1.1 试验材料

李果实为中等熟度(果实颜色紫红色,着色面积占2/3,香气明显,手感较软)的黑琥珀李果实,从内蒙古呼和浩特市土左旗李子种植基地采摘获得,大小、成熟度均一,无病虫害。

1.2 仪器与设备

TGL-16M高速冷冻离心机由上海卢湘离心机仪器有限公司生产,T6新世纪型紫外分光光度计由北京普析通用仪器有限公司生产,DDSJ-318电导率

仪由上海仪电科学仪器股份有限公司生产,电热恒温水浴锅由北京长安科学仪器厂生产。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理 将李果实随机分成5组,分别采用1 mmol/L SA、47 $\mu\text{mol/L}$ ABA、5 mmol/L钨酸钠、1 mmol/L SA结合5 mmol/L钨酸钠、蒸馏水(对照组)浸泡30 min后,取出晾干。置于4 $^{\circ}\text{C}$ 下存放,每隔6 d取样30个果,将果肉切成0.5 cm \times 0.5 cm \times 0.5 cm的小块用液氮速冻后放置于-80 $^{\circ}\text{C}$ 下,用于记录冷害发生情况及活性氧相关代谢指标的测定。每个处理组150个果实,重复3次。

1.3.2 测定指标和方法

1.3.2.1 冷害指数的计算 参照郭雨萱等^[18]的方法。根据受冷害程度共分为5级。1级,没有冷害;2级,轻微冷害:表面有直径小于0.5 cm的凹陷或褐色斑点;3级,中度冷害:表面有直径超过1 cm的褐色斑;4级,严重冷害:褐变面积已超过果实的1/3;5级,极其严重:果实已发生完全褐变。

冷害指数=(冷害级别数 \times 发生冷害的果实个数)

1.3.2.2 总酚含量的测定 根据曹建康等^[19]的方法,略有改动。提取缓冲液为1% HCl-甲醇溶液。以提取缓冲液为空白,测定提取液在280 nm下的吸光值,以每克李果实组织在波长280 nm处的吸光值为总酚含量。

1.3.2.3 过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)活性的测定 根据曹建康等^[19]的方法,略有改动。POD活性测定:提取缓冲液为0.1 mol/L的柠檬酸-柠檬酸钠,pH 6.6,其中含4% (质量体积比) PVPP和1% Triton X-100。0.5 ml提取液,加3.0 ml 25 mmol/L愈创木酚溶液和0.2 ml 0.5 mol/L H_2O_2 溶液启动反应。在反应15 s时开始记录反应体系在470 nm处吸光值,5 min内每隔30 s记录1次。PPO活性测定:提取缓冲液为0.1 mol/L乙酸-乙酸钠,pH 5.5,其中含1 mmol/L聚乙二醇6000,4% (质量体积比) PVPP,1% Triton X-100。100 μl 提取液,加4.0 ml 50 mmol/L (pH 5.5)的乙酸-乙酸钠缓冲液和1.0 ml 50 mmol/L的邻苯二酚溶液,在反应15 s时开始记录反应体系在420 nm处吸光值,6 min内每隔1 min记录1次。

1.3.2.4 活性氧代谢相关酶(SOD、CAT、APX)活性的测定 根据曹建康等^[19]的方法,略有改动。SOD

活性测定:采用氮蓝四唑比色法。提取缓冲液为 0.1 mol/L 磷酸缓冲液, pH 7.8, 其中含 5 mmol/L DTT 二硫苏糖醇和 5% PVP。0.1 ml 提取液, 加入 1.7 ml 50 mmol/L (pH 7.8) 磷酸缓冲液, 0.3 ml 13 mmol/L 甲硫氨酸 (MET), 0.3 ml 75 μ mol/L 氮蓝四唑 (NBT), 0.3 ml 10 μ mol/L EDTA- Na_2 和 2 μ mol/L 核黄素, 光照 25 min 后, 记录在 560 nm 下的吸光值。CAT 活性测定: 提取缓冲液为 0.2 mol/L (pH 7.9) 磷酸钠缓冲液, 其中含 133 L Triton-X100。吸取 20 μ l 提取液, 加 1.5 ml (pH 7.9) 磷酸钠缓冲液, 再加 1 ml 蒸馏水, 30 $^{\circ}\text{C}$ 静置 30 min。测定时再加入 0.3 ml 0.1 mol/L H_2O_2 , 在反应 15 s 时开始记录反应体系在 240 nm 处吸光值, 5 min 内每隔 30 s 记录 1 次。APX 活性测定: 提取缓冲液为 0.1 mol/L Tris-HCl (pH 8.0), 其中含 0.1 mmol/L EDTA, 1.0 mmol/L 抗坏血酸和 2% PVPP。0.1 ml 提取液, 加入 2.6 ml 反应缓冲液和 0.3 ml 2 mol/L 的 H_2O_2 溶液, 5 min 内每隔 30 s 记录 1 次在 290 nm 下的吸光值。

1.4 数据处理

应用 Excel 2007 统计分析所有数据, 计算标准偏差并制图。应用 SPSS16.0 软件对所有数据进行方差分析和差异显著性分析。 $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

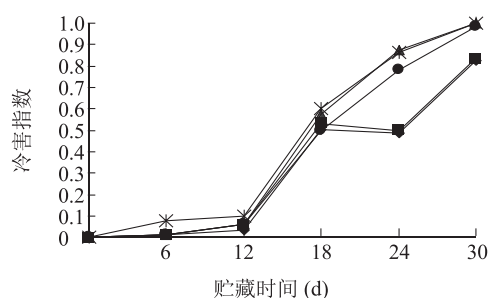
2 结果与分析

2.1 不同处理对李果实冷害指数的影响

由图 1 可以看出, 随着贮藏时间延长, 各处理组果实冷害程度不断增加。其中 ABA 处理组冷害指数上升速度低于对照组 ($P < 0.05$), Na_2WO_4 和 SA 结合 Na_2WO_4 处理组上升速度高于对照组 ($P < 0.05$)。18 d 以后, SA 和 ABA 处理组冷害指数显著低于对照组 ($P < 0.05$), 而 Na_2WO_4 和 SA 结合 Na_2WO_4 处理组显著高于对照组 ($P < 0.05$), 且均在 30 d 达到最大值。表明, SA 和 ABA 能够显著抑制果实采后冷害的发生, ABA 合成抑制剂 Na_2WO_4 降低了果实的抗冷能力, 且该作用不受 SA 的影响。

2.2 不同处理对李果实总酚含量的影响

酚类物质主要与果实的色泽发育、成熟衰老、组织褐变、抗逆性和抗病性有关。如图 2 所示, 随着贮藏时间延长, 对照组总酚含量呈现先升高后下降的趋势。SA 和 ABA 处理组的上升速度显著高于对照组 ($P < 0.05$), Na_2WO_4 和 SA 结合 Na_2WO_4 处理组

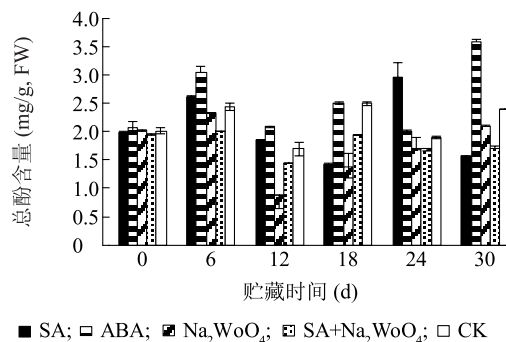


—◆— SA; —■— ABA; —▲— Na_2WO_4 ; —✱— SA+ Na_2WO_4 ; —●— CK
SA: 1 mmol/L SA 处理; ABA: 47 μ mol/L ABA 处理; Na_2WO_4 : 5 mmol/L 钨酸钠处理; SA + Na_2WO_4 : 1 mmol/L SA 结合 5 mmol/L 钨酸钠处理; CK: 蒸馏水。

图 1 不同处理对李果实冷害指数的影响

Fig.1 Effects of different treatments on chilling injury index of plum fruit

的上升速度显著低于对照组 ($P < 0.05$)。SA 和 ABA 处理组的总酚含量分别在第 24 d 和 30 d 达到最大值, 且显著高于对照组 ($P < 0.05$)。 Na_2WO_4 和 SA 结合 Na_2WO_4 处理组的总酚含量始终显著低于对照组 ($P < 0.05$)。表明, SA 和 ABA 提高酚类物质含量可能与提高果实抗病能力有关, ABA 合成抑制剂 Na_2WO_4 显著抑制了 ABA 这一能力, 且该作用不受 SA 的影响。



■ SA; □ ABA; ▨ Na_2WO_4 ; ▩ SA+ Na_2WO_4 ; □ CK
SA、ABA、 Na_2WO_4 、SA + Na_2WO_4 、CK 处理见图 1 注。

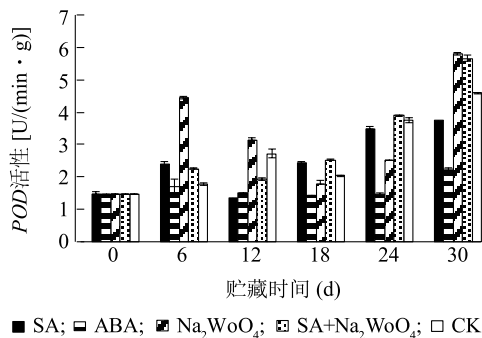
图 2 不同处理对李果实总酚含量的影响

Fig.2 Effects of different treatments on total phenol content of plum fruit

2.3 不同处理对李果实 POD 和 PPO 活性的影响

PPO 和 POD 可促使果实内酚类物质氧化发生褐变, 褐变是果实发生冷害的首要现象, 导致果实品质下降^[20]。如图 3 所示, 随着贮藏时间延长, 对照组的 POD 活性呈现上升趋势, 并在 30 d 达到最大值。在贮藏期间的第 12 d、第 24 d、第 30 d, SA 和

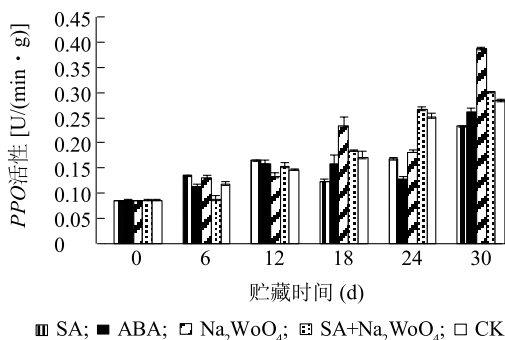
ABA 处理组的上升趋势显著低于对照组 ($P < 0.05$), 且 ABA 处理组在整个贮藏期间始终维持较低水平。而 Na_2WO_4 和 SA 结合 Na_2WO_4 处理组上升趋势显著高于对照组 ($P < 0.05$)。第 12 d、第 30 d 时, SA 处理组的 POD 活性显著低于对照组 ($P < 0.05$), 而 Na_2WO_4 和 SA 结合 Na_2WO_4 处理组的 POD 活性在第 30 d 时迅速上升达到最大值, 显著高于对照组 ($P < 0.05$)。如图 4 所示, 贮藏期间 PPO 上升趋势与 POD 上升趋势一致。表明, SA 和 ABA 可以延缓果实 POD 和 PPO 活性的上升, 抑制果实氧化褐变, 延缓果实冷害。ABA 合成抑制剂 Na_2WO_4 加剧果实氧化褐变, 该作用不受 SA 的影响。



SA、ABA、 Na_2WO_4 、SA + Na_2WO_4 、CK 处理见图 1 注。

图 3 不同处理对李果实 POD 活性的影响

Fig.3 Effects of different treatments on peroxidase (POD) activity of plum fruits



SA、ABA、 Na_2WO_4 、SA + Na_2WO_4 、CK 处理见图 1 注。

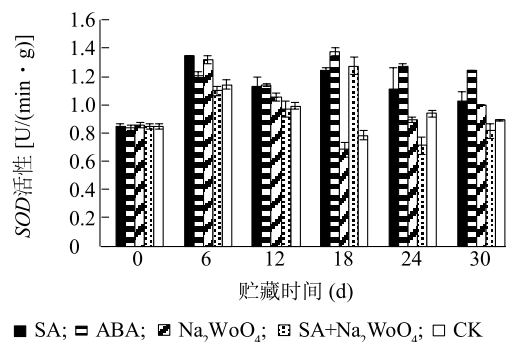
图 4 不同处理对李果实 PPO 活性的影响

Fig.4 Effects of different treatments on polyphenol oxidase (PPO) activity of plum fruits

2.4 不同处理对李果实 SOD、CAT 和 APX 活性的影响

SOD、CAT 和 APX 作为活性氧清除酶, 可以有效

地减少活性氧积累, 减轻细胞膜伤害^[21]。如图 5 所示, 对照组 SOD 活性呈现先升高后下降的趋势, 在第 6 d 达到最大值。SA 和 ABA 处理组的上升速度显著高于对照组 ($P < 0.05$), 且在第 18 d 达到最大值后缓慢下降。第 6 d 后, Na_2WO_4 和 SA 结合 Na_2WO_4 处理组整体呈现下降趋势。SA 结合 Na_2WO_4 处理组虽在第 18 d SOD 活性升高, 但在第 24 d 后活性迅速下降, 显著低于对照组 ($P < 0.05$)。SA 和 ABA 处理组的 SOD 活性在第 18 d 后显著高于对照组 ($P < 0.05$), Na_2WO_4 处理组在第 12 d 后 SOD 活性与对照组无显著性差别, SA 结合 Na_2WO_4 处理组在第 6~12 d 与对照无显著性差别, 在第 24~30 d 显著低于对照组 ($P < 0.05$)。如图 6 所示, CAT 活性变化趋势与 SOD 活性变化趋势一致, 但 Na_2WO_4 处理组的上升速度略高于对照组。如图 7 所示, APX 活性变化趋势与 SOD 活性变化趋势一致。在第 24 d 后, SA 和 ABA 处理组的 APX 活性显著高于对照组 ($P < 0.05$), Na_2WO_4 和 SA 结合 Na_2WO_4 处理组的 APX 活性显著低于对照组 ($P < 0.05$)。表明, SA 和 ABA 能够显著提高果实对活性氧的清除能力, 而 ABA 合成抑制剂 Na_2WO_4 显著抑制了活性氧清除酶的活性, 且该作用不受 SA 的影响。



SA、ABA、 Na_2WO_4 、SA + Na_2WO_4 、CK 处理见图 1 注。

图 5 不同处理对李果实 SOD 活性的影响

Fig.5 Effect of different treatments on superoxide dismutase (SOD) activity of plum fruits

3 讨论

果蔬在正常条件下, 其活性氧产生能力与消除能力相抵消, 系统稳定。但在不适低温条件下, 就会造成活性氧代谢紊乱, 膜脂过氧化造成细胞膜的损伤, 最终导致冷害的发生。从生理的角度看, 低温影

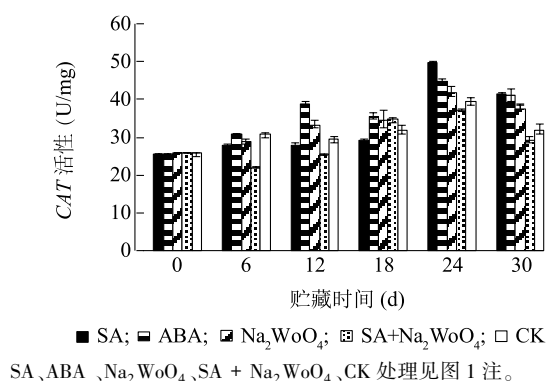


图6 不同处理对李果实CAT活性的影响

Fig.6 Effects of different treatments on catalase (CAT) activity of plum fruits

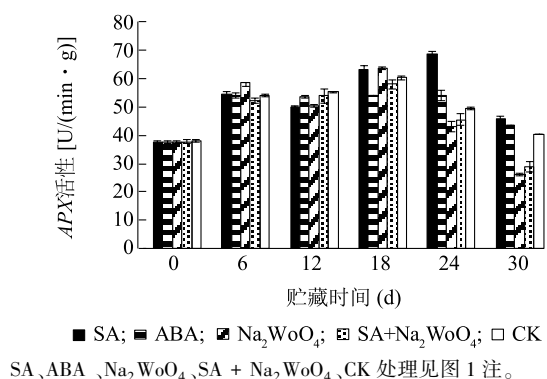


图7 不同处理对李果实APX活性的影响

Fig.7 Effects of different treatments on ascorbate peroxidase (APX) activity of plum fruits

响抗氧化酶的活性,所以一般以抗氧化酶作为研究果蔬冷害的对象^[22],抗氧化酶主要有SOD、POD、CAT等^[23-24]。SA可以减轻膜脂过氧化,提高抗氧化酶活性,加强活性氧代谢途径来减轻低温伤害。ABA可以提高果蔬抵御逆境胁迫的能力。ABA处理甘蔗的研究发现施用外源脱落酸可以诱发内源脱落酸的增加,有效提高其抗冷能力^[25]。徐文玲等^[26]发现外源ABA可以有效提高大白菜相关抗氧化酶的活性。孔祥佳^[27]通过热处理对橄榄叶抗冷性的研究指出,降低果实内POD和PPO活性可以有效地延缓果实内酚类物质的下降,并且通过保持其细胞结构的完整,抑制果实POD、PPO与果实酚类物质接触,从而延缓果实褐变,减轻冷害的发生。酚类物质不但可以提高生物对逆境胁迫的抵御能力,而且具有很强的抗氧化能力^[28]。李文娟等^[29]在施用外源氯化钾对玉米的研究中指出,通过对酚

类物质代谢的调节,还可以提高其抗病性。本研究希望通过SA、ABA等外源小分子物质处理李果实,通过提高其总酚含量及氧化酶活性,进而提高植物的抗冷性。

本研究结果表明,经过SA、ABA处理后的李果实可以降低冷害指数,说明SA和ABA可以延缓冷害的发生,降低冷害的损伤速度。SA、ABA处理提高了李果实的总酚含量并推迟了POD、PPO活性的升高,不但提高了果实的抗病性,还延缓其褐变和冷害的发生。而活性氧代谢相关酶SOD、CAT、APX活性显著提高,抑制了膜脂过氧化发生,维持活性氧代谢平衡。这与前人在杏果实^[30]、蓝莓果实^[31]、猕猴桃果实^[32]的研究结果一致。

参考文献:

- [1] 张银志,孙秀兰,刘兴华,等. 低温胁迫和变温处理对李子生理特性的影响[J]. 食品科学, 2003(2): 134-138.
- [2] 范小玉,张显. 油菜素内酯对低温弱光胁迫下西瓜幼苗耐冷性的影响[J]. 北方园艺, 2012(7): 5-8.
- [3] 廖金柯,赵克,胡小燕,等. 外源钙对棉花幼苗抗冷性的影响[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(4): 687-693.
- [4] 杨美森,王雅芳,干秀霞,等. 外源-氧化氮对冷害胁迫下棉花幼苗生长、抗氧化系统和光合特性的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(15): 3058-3067.
- [5] 黄亚成,秦云霞. 植物中活性氧的研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(36): 219-226.
- [6] 赵丽英,邓西平,山仑. 活性氧清除系统对干旱胁迫的响应机制[J]. 西北植物学报, 2005, 25(2): 413-418.
- [7] GUAN N, BLOMSMA S A, FAHY G M L. Analysis of gene expression changes to elucidate the mechanism of chilling injury in precision-cut liver slices[J]. Toxicology in Vitro, 2013, 27(2): 890-899.
- [8] 侯媛媛,朱璇,王英,等. 水杨酸处理对杏果实冷害及活性氧代谢的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(4): 195-199.
- [9] AGHDAM M S, ASGHARI M R, MORADBEYGI H, et al. Effect of postharvest salicylic acid treatment on reducing chilling injury in tomato fruit[J]. Romanian Biotechnological Letters, 2012, 17(4): 7466-7473.
- [10] 张红宇,尹京苑,万嗣宝. 水杨酸和茉莉酸甲酯处理对水蜜桃低温贮藏冷害的影响[J]. 食品工业, 2012, 33(10): 88-91.
- [11] 姚侠妹,纪敬,岳剑云,等. ABA对盐胁迫下侧柏活性氧代谢及其相关基因表达的研究[J]. 西北植物学报, 2017, 37(1): 105-114.
- [12] GR AHAM D, PATTER SON B D. Responses of plants to low, non-freezing temperatures: proteins, metabolism, and acclimation[J]. Annual Reviews of Plant Physiology, 2003, 33: 347-372.
- [13] WASILEWSKA, VLAD, SIRICHANDRA, et al. An update on ab-

- scisic acid signaling in plants and more[J]. *Molecular Plant*, 2008, 1(2):198-217.
- [14] CHEN J, MAO L, MI H, et al. Involvement of abscisic acid in post-harvest water-deficit stress associated with the accumulation of anthocyanins in strawberry fruit[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2016, 111(31):99-105.
- [15] WANG Y, LU W J, ZHANG Z Q, et al. ABA and putrescine treatments alleviate chilling injury in banana fruits during storage at 8 °C[J]. *Acta Photophysiolica Sinica*, 2003, 29(6):549-554.
- [16] ZHANG Q T, ZHANG L L, GENG B, et al. Interactive effects of abscisic acid and nitric oxide on chilling resistance and active oxygen metabolism in peach fruit during cold storage[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(7):3367-3380.
- [17] 黄 杏, 梁勇生, 杨丽涛, 等. 低温胁迫下脱落酸及合成抑制剂对甘蔗幼苗抗氧化系统的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2013, 34(3):356-361.
- [18] 郭雨萱, 郝利平, 卢银洁, 等. 不同贮藏温度对茄子冷害发生及质构特性的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(9):1763-1769.
- [19] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- [20] 赵迎丽, 李建华, 闫根柱, 等. 不同贮藏温度下石榴褐变生理特性的研究[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(18):90-93.
- [21] YOO Y K. Effects of acetylsalicylic acid and calcium chloride on photosynthetic apparatus and reactive oxygen-scavenging enzymes in chrysanthemum under low temperature stress with low light[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(12):1777-1786.
- [22] 赵黎明, 李 明, 郑殿峰, 等. 冷害后植物生理变化及外源物质调控研究进展[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(12):217-223.
- [23] 李雅洁, 张其安, 陆晓民. 不同外源物质对低温弱光次生盐渍化复合逆境下黄瓜幼苗生长、抗氧化系统及光合作用的影响[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(2):404-410.
- [24] 赵曾菁, 宋奇琦, 赵 虎, 等. 模拟霜冻条件对黄瓜幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. *南方农业学报*, 2018, 49(4):757-762.
- [25] 黄 杏, 杨丽涛, 张保青, 等. 甘蔗脱落酸胁迫成熟诱导蛋白基因(*SoASR*)的克隆和表达分析[J]. *生物技术通报*, 2013(2):93-99.
- [26] 徐文玲, 王翠花, 牟晋华, 等. 不同浓度脱落酸对大白菜抗冷特性的影响[J]. *山东农业科学*, 2012, 44(1):47-50.
- [27] 孔祥佳. 热空气处理诱导采后橄榄果实抗冷性机理的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [28] 周白雪, 谢 君, 包垠秋, 等. 低温贮藏对莲藕酚类物质组成的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(1):189-191.
- [29] 李文娟, 何 萍, 金继运. 氯化钾对玉米茎腐病抗性反应中酚类物质代谢的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3):508-514.
- [30] 袁 洁. 水杨酸和热处理对杏抗冷性及热激蛋白产生影响的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014.
- [31] 曲文颖, 刘真真, 谢琳森, 等. 外源脱落酸和乙烯利对蓝莓重要品质的调控[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(17):126-129.
- [32] 孙 波, 焉志远, 佟 斌. 水杨酸处理对软枣猕猴桃冷害性状的的影响[J]. *经济林研究*, 2017, 35(4):197-201, 206.

(责任编辑: 陈海霞)