

# 24-表油菜素内酯减轻杏果实冷害及与活性氧的代谢关系

张瑞杰<sup>1</sup>, 张杼润<sup>1</sup>, 金鹏<sup>2</sup>, 李亚玲<sup>1</sup>, 朱璇<sup>1</sup>

(1. 新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

(2. 南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095)

**摘要:**以新疆赛买提杏为试验原料, 选用 0.9 mg/L 的 24-表油菜素内酯 (24-epibrassinolide, EBR) 在 0.05 MPa 的压强下对杏果实进行减压渗透处理, 以蒸馏水处理作为对照, 将处理后的果实取出晾干后在温度为 4 °C、RH 90%~95% 的冷库中贮藏。定期测定杏果实的冷害发病率和冷害指数及过氧化氢酶 (CAT)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、超氧阴离子自由基 ( $O_2^-$ ) 的产生速率和过氧化氢 ( $H_2O_2$ ) 的含量。结果表明: 浓度为 0.9 mg/L 的 24-表油菜素内酯能有效提高杏果实 SOD、APX 的活性, 减缓杏果实冷藏期间 POD 和 CAT 活性的下降, 抑制  $H_2O_2$  含量和  $O_2^-$  产生速率的增长, 显著降低杏果实冷害发病率和冷害指数。说明 24-表油菜素内酯处理减轻杏果实冷害与防止果实冷藏期间的氧化伤害, 清除自由基的积累密切相关。

**关键词:** 杏果实; 冷害; 24-表油菜素内酯; 活性氧代谢

文章编号: 1673-9078(2018)04-39-44

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.04.007

## Reduce the Cold Damage of Apricot Fruit and Its Active

## Oxygen Metabolism Treating by 24 - Epibrassinolide

ZHANG Rui-jie<sup>1</sup>, ZHANG Zhu-run<sup>1</sup>, JIN Peng<sup>2</sup>, LI Ya-ling<sup>1</sup>, ZHU Xuan<sup>1</sup>

(1. College of Food Science and Pharmacy Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

(2. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** Saimaiti apricots sampled from Xinjiang were infiltrated by 0.9 mg/L 24-epibrassinolide (EBR) under the pressure of 0.05 MPa, and the distilled water treatment was used as a control. The treated fruits were taken out, air-dried and stored in a cold room at 4 °C and relative humidity of 90%-95%. Incidence of chilling injury and chilling injury index, the activities of catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX), superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and superoxide anion ( $O_2^-$ ) and the content of hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) of apricot fruits were determined regularly. The results showed that 0.9 mg/L 24-epibrassinolide treatment could increase the activities of SOD and APX, and decreased the activities of POD and CAT in apricot fruit during cold storage. It also inhibited the content of  $H_2O_2$  and the increase of generation rate of  $O_2^-$ , and significantly decreased the incidence of chilling injury and chilling injury index of apricot fruit. Results indicated that the 24-epibrassinolide treatment was related to the reduction of chilling injury, prevention of oxidative damage and the accumulation of free radical scavenging during apricot preservation.

**Key words:** apricot fruit; chilling injury; 24-epibrassinolide; active oxygen metabolism

新疆是杏果的主要产地, 在新疆水果产业中占有重要的地位。据统计, 新疆杏树种植面积约为 13.24 万公顷, 产量为 128.16 万 t, 占新疆水果总量的

收稿日期: 2017-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31460414); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303075); 南京农业大学-新疆农业大学联合基金项目 (KYYJ201605)

作者简介: 张瑞杰 (1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏与保鲜

通讯作者: 朱璇 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬贮藏与保鲜

13.93%<sup>[1]</sup>。由于杏的采收期较集中, 大多在高温季节, 采后的杏果会在常温下迅速后熟衰老, 导致严重的腐烂<sup>[2]</sup>。低温冷藏可有效控制杏果的采后腐烂和变质。但杏是一种低温冷敏型果实, 在低温下贮藏易发生冷害<sup>[3]</sup>。由于冷害症状一般在离开冷藏条件后转移到较温暖的环境中才得以表现, 因此不易及时发现; 而且杏果实发生冷害后极易受到病原微生物的侵染, 造成严重腐烂。杏果实的冷敏性限制了低温冷藏技术在杏果上的使用<sup>[4]</sup>。因此, 如何减少冷害的发生, 增强杏果实采后的抗冷性, 是杏果贮运产业中尚未解决的实

实际问题。

油菜素内酯 (Brassinosteroids, BRs) 是一种主要存在于植物中的天然甾醇类物质, 目前已被国内外公认为新型植物激素。对植物的生长发育, 生物和非生物胁迫的发展起着至关重要的作用<sup>[5]</sup>。研究表明, 油菜素内酯能较好的增强植物的抗逆性, 极低浓度的 EBR 处理就能促使植物表现出显著的生理效应<sup>[7,8]</sup>。近年来, 油菜素内酯也用于园艺作物采后衰老和病害的控制<sup>[6]</sup>。

唐如雪<sup>[9]</sup>和李园园<sup>[10]</sup>发现 5 μmol/L 的油菜素内酯处理能诱导桃果实和草莓 SOD、CAT、APX 的增强, 延缓了桃果实和草莓采后的成熟与衰老。油菜素内酯处理还可显著降低青椒<sup>[11]</sup>、茄子<sup>[12]</sup>、番茄<sup>[13]</sup>和桃果实<sup>[14]</sup>等果蔬采后冷害的发生, 但以往的研究更多关注于油菜素内酯对果蔬冷害效果的控制。而对杏果实的冷害及活性氧代谢关系的研究少见报道。本试验以新疆赛买提杏果实为实验材料, 以 24-表油菜素内酯 (24-epibrassinolide, EBR) 处理杏果实, 研究杏果实在冷藏期间的冷害发生和抗氧化活性变化规律的研究, 为油菜素内酯处理在杏果实贮运保鲜中的应用提供方法和依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

赛买提杏于 2017 年 6 月采摘自新疆库车县乌恰镇杏果园, 祛除伤病果, 挑选大小与成熟相同, 硬度为 2.1±0.1 kg/cm<sup>2</sup>, 可溶性固形物为 12.4±0.2%, 无损伤、无病害的杏果实为试材进行处理。

24-表油菜素内酯、福林酚试剂、氯化钾、抗坏血酸、硫代巴比妥酸、氢氧化钠、氮蓝四唑、邻菲罗林、PVP、DTT、30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液、EDTA-Na<sub>2</sub>, 购自南京寿德试剂器材有限公司; 三氯化铝、三氯化铁、三氯乙酸、无水乙醇、丙酮、甲酸、磷酸、硫酸、氨水、冰醋酸、醋酸钠、盐酸为国产 AR; 四氯化钛、碳酸钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、甲硫氨酸、核黄素, 购自国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

SHB-III 循环水式多用真空泵, 郑州长城科工贸有限公司; TU-1810APC 紫外-可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司; 电热恒温水浴锅, 北京市永光明医疗仪器厂; AL204-IC 电子分析天平, 梅特勒-托利多仪器 (上海) 有限公司; GL-20G-II 高速冷冻离心机, 上海安亭科学仪器厂。

### 1.3 处理方法

用浓度为 0.9 mg/L 的 24-表油菜素内酯处理杏果实, 每个处理 20 kg 杏子, 将杏果实在 0.05 MPa 的压强下进行减压渗透处理浸泡 2 min 后在常温状态下浸泡 5 min, 取出自然晾干。把处理晾干后的杏果实放置于温度为 4 °C, RH 90%~95% 的冷库里贮藏。试验重复 3 次, 以蒸馏水处理的杏果实作为对照。期间每隔 7 d 定期测定杏果实冷害发病率、冷害指数、SOD、POD、CAT、APX 的活性以及 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量和 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率。

### 1.4 指标测定

#### 1.4.1 冷害指数的计算

参照 Dong Li 等<sup>[16]</sup>方法并稍有改进, 将杏果实冷害分为 5 级: 0 级: 无冷害发生; 1 级: 冷害发生面积 5%~15%; 2 级: 冷害发生面积在 15%~25% 之间; 3 级: 冷害发生面积 25%~50%; 4 级: 冷害面积 50%~75%; 5 级: 冷害面积 ≥ 75%。按下列公式计算冷害指数:

$$\text{冷害指数} = \frac{\sum (\text{冷害果实数} \times \text{冷害级数})}{\text{总果实数} \times \text{最高冷害级数}}$$

#### 1.4.2 冷害发病率的计算

以单个果实冷害程度达 1 级以上计为发病果, 统计发病个数占总果数的百分率。按下列公式计算冷害发病率:

$$\text{冷害发病率}(\%) = \frac{\text{发病果数}}{\text{总果数}} \times 100$$

#### 1.4.3 过氧化氢 (hydrogen peroxide, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 含量的测定

参照 Zhou 等<sup>[17]</sup>的方法进行测定。

#### 1.4.4 过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性测定

参照曹建康等<sup>[20]</sup>的方法, 采用比色法测定。以每克鲜质量果蔬样品每分钟吸光度变化值增加 0.01 时为 1 个 CAT 活性单位 (U), 结果以 U/g 表示。

#### 1.4.5 超氧阴离子自由基 (superoxide anion, O<sub>2</sub><sup>-</sup>) 产生速率测定

参照金昌海等<sup>[18]</sup>的方法测定。

#### 1.4.6 超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性测定

采用氮蓝四唑方法<sup>[19]</sup>。以每分钟每克鲜质量果蔬组织的反应体系对氮蓝四唑光化还原的抑制为 50% 时为一个 SOD 活性单位 (U) 表示, 结果以 U/g 表示。

#### 1.4.7 过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性的测定

采用愈创木酚氧化法<sup>[20]</sup>测定。以每克鲜质量果蔬样品每分钟吸光度变化值增加 1 时为 1 个 POD 活性单位 (U), 结果以 U/g 表示。

### 1.4.8 抗坏血酸氧化酶 (ascorbate peroxidase, APX) 活性的测定

参考 Nakano<sup>[21]</sup>的方法进行并改进。以每克鲜重样品每分钟吸光度值变化 0.01 时为 1 个 APX 活性单位 (U), 结果以 U/g 表示。

### 1.5 数据分析

数据分析处理采用 SPSS 19.0 软件。利用邓肯多重比较法进行差异分析,  $p < 0.05$  为显著水平。

## 2 结果与分析

### 2.1 EBR 处理对杏果实冷害指数的影响

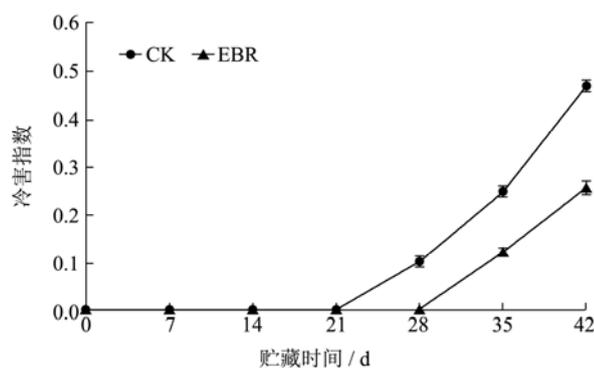


图 1 EBR 处理对杏果实冷害指数的影响

Fig.1 Effects of EBR treatment on the chilling injury index of apricot fruits

如图 1 知, EBR 处理组杏果实在 35 d 出现冷害症状, 比对照组推迟了 7 d 发生冷害, 在整个贮藏期冷害指数随着冷藏时间的增长不断升高, EBR 处理组始终低于对照组。在冷藏末期对照组与 EBR 处理组均达到最大值。在冷藏结束时对照组杏果实为 0.47, EBR 处理组为 0.26, 比对照组杏果实低了 44.68% ( $p < 0.01$ )。说明 EBR 处理可以显著降低杏果实冷藏期间的冷害指数。

### 2.2 EBR 处理对杏果实冷害发病率的影响

如图 2 所示, EBR 处理较对照组推迟 7 d 发生冷害, 且冷害发病率低于对照组。冷藏 21 d 开始杏果实冷害发病率呈逐渐上升状态, 表现为果实木质化, 有明显的凹陷斑。在冷藏 28 d 时对照组杏果实冷害发病率开始上升, EBR 处理组杏果实冷害发病率始终低于对照组杏果实。冷藏第 42 d 时, 对照组杏果实冷害发病率为 36.83%, EBR 处理组杏果实冷害发病率为

18.94%, 比对照组低了 48.57% ( $p < 0.01$ )。说明 EBR 处理能显著降低杏果实冷藏期间冷害发病率。

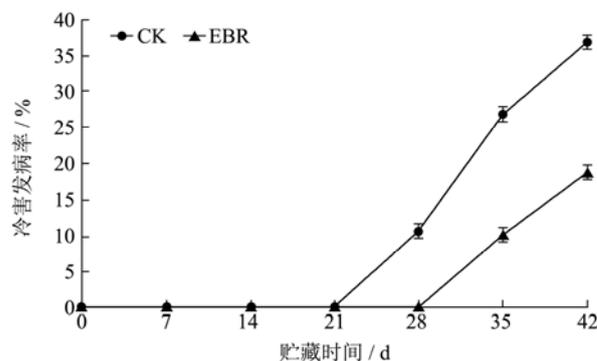


图 2 EBR 处理对杏果实冷害发病率的影响

Fig.2 Effects of EBR treatment on incidence of cold injury of apricot fruits

### 2.3 EBR 处理对杏果实冷藏期间 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的影响

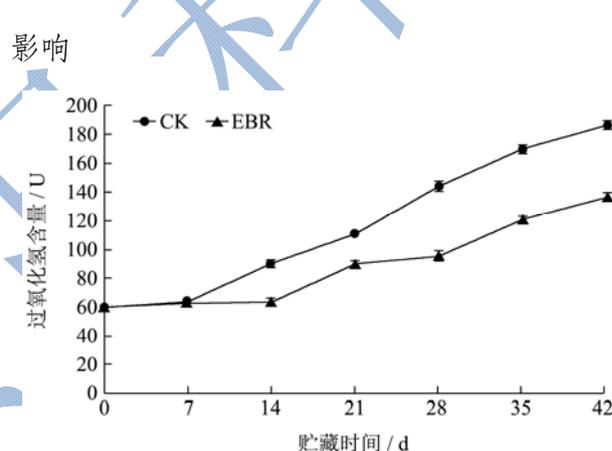


图 3 EBR 处理对杏果实 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的影响

Fig.3 Effects of EBR treatment on the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content of apricot fruits

过氧化氢 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 是植物体内活性氧自由基的一种, 长期过多积累会对植物细胞造成代谢失调以及破坏细胞膜的完整性。如图 3 所示, 冷藏期间 EBR 处理组和对组都有上升趋势, 但 EBR 处理组 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量明显低于对照组, 在冷藏第 28 d 时, EBR 处理组和对组 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量分别为 95.36 μmol/g 和 143.68 μmol/g, 对照组高于 EBR 处理组 33.63% ( $p < 0.05$ )。在冷藏结束时, EBR 处理组和对组 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量分别为 136.43 μmol/g 和 187.09 μmol/g, 对照组高于 EBR 处理组 27.07% ( $p < 0.05$ )。说明 EBR 处理能有效保持杏果实冷藏过程中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量在较低的水平。

### 2.4 EBR 处理对杏果实冷藏期间 CAT 活性的影响

影响

过氧化氢酶 (CAT) 主要存在于线粒体等细胞器中的过氧化物酶体, 是一种酶类清除剂, 清除体内的  $H_2O_2$ , 使细胞减少  $H_2O_2$  的毒害。如图 4 可知, 随着冷藏时间的延长 EBR 处理组和对照组杏果实的 CAT 活性不断下降, 但 EBR 处理组杏果实 CAT 活性始终高于对照组。在冷藏的第 28 d 和冷藏结束时, EBR 处理组杏果实 CAT 活性分别比对照组高 49.73% 和 49.51% ( $p < 0.01$ )。说明 EBR 处理可以显著提高杏果实 CAT 的活性。

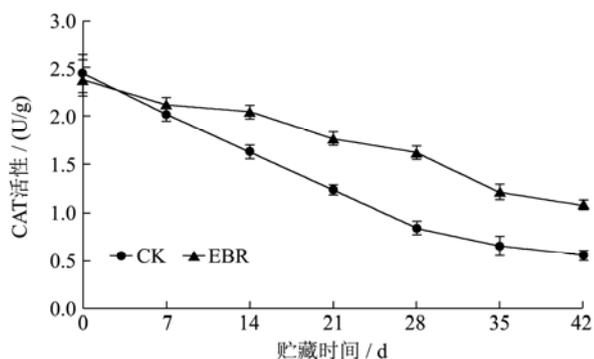


图 4 EBR 处理对杏果实 CAT 活性的影响

Fig.4 Effects of EBR treatment on the CAT activity of apricot fruits

### 2.5 EBR 处理对杏果实冷藏期间 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率的影响

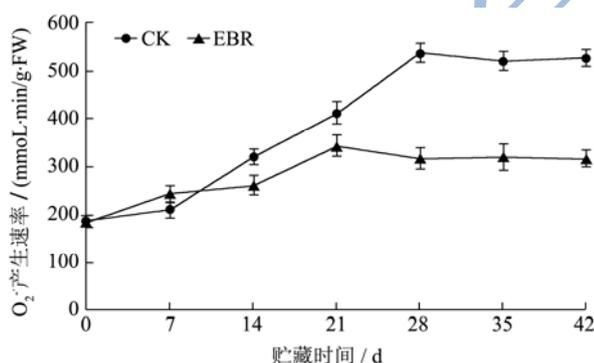


图 5 EBR 处理对杏果实  $O_2^{\cdot-}$  产生速率的影响

Fig.5 Effects of EBR treatment on the  $O_2^{\cdot-}$  production rate of apricot fruits

超氧阴离子 ( $O_2^{\cdot-}$ ) 是植物体内常见的活性氧自由基, 若长期积累不及时除去会引起膜透性上升, 膜脂过氧化物会大量积累, 造成代谢失调而破坏组织细胞膜的完整性。如图 5 所示, 在冷藏期间 EBR 处理组与对照组杏果实  $O_2^{\cdot-}$  的产生速率都呈现出上升的趋势, 在冷藏 7 d 之后, EBR 处理组杏果实  $O_2^{\cdot-}$  产生速率始终低于对照组, 并在冷藏第 28 d 达到最大值。在冷藏第 28 d 时, EBR 处理组和对照组  $O_2^{\cdot-}$  产生速率分

别为 315.69  $nmol/(min \cdot g)$  和 536.35  $nmol/(min \cdot g)$ , 对照组比 EBR 处理组高了 41.14% ( $p < 0.05$ )。说明 EBR 处理能显著的抑制杏果实  $O_2^{\cdot-}$  的产生速率。

### 2.6 EBR 处理对杏果实冷藏期间 SOD 活性的影响

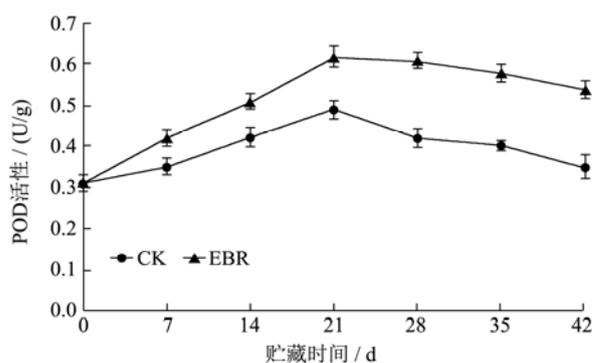


图 6 EBR 处理对杏果实 SOD 活性的影响

Fig.6 Effects of EBR treatment on the SOD activity of apricot fruits

超氧化物歧化酶 (SOD) 在植物体内是重要的抗氧化酶, 主要参与活性氧自由基的清除, 保持抗氧化性, 增强其耐贮藏性, 延缓采后果实的成熟与衰老。如图 6 所示, 杏果实冷藏期间 SOD 活性呈现出先上升后下降的趋势, EBR 处理组杏果实 SOD 活性明显高于对照组。在达到冷藏第 21 d 时为最大值, EBR 处理组杏果实 SOD 活性为 0.61 U/g, 对照组杏果实 SOD 活性为 0.42 U/g, EBR 处理组杏果实 SOD 活性高于对照组 31.14% ( $p < 0.05$ )。说明 EBR 处理能显著提高杏果实的 SOD 活性。

### 2.7 EBR 处理对杏果实冷藏期间 POD 活性的影响

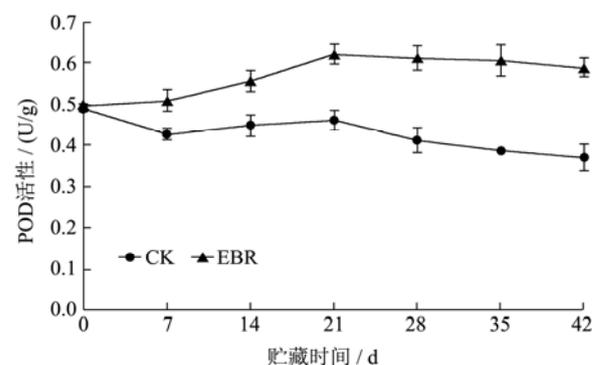


图 7 EBR 处理对杏果实 POD 活性的影响

Fig.7 Effects of EBR treatment on the POD activity of apricot fruits

过氧化物酶(POD)是主要存在于植物体内的氧化还原酶,参与催化活性氧代谢中过多积累的 $H_2O_2$ ,维持活性氧代谢的平衡。如图7可知,在整个冷藏期间,EBR处理组杏果实POD活性始终大于对照组杏果实POD活性。对照组杏果实和EBR处理组杏果实POD活性均呈现出先上升后下降的趋势,冷藏前期,EBR处理组杏果实POD活性呈现上升状态,在冷藏第21d出现高峰。冷藏第28d和冷藏42d时,EBR处理组杏果实POD活性分别为6.12 U/g和5.85 U/g,对照组杏果实POD活性分别为4.11 U/g和3.69 U/g。EBR处理组比对照组分别高了32.84%和36.92% ( $p<0.05$ )说明EBR处理能显著提高杏果实POD活性,在冷藏末期同样保持较高水平。

## 2.8 EBR处理对杏果实冷藏期间APX活性的影响

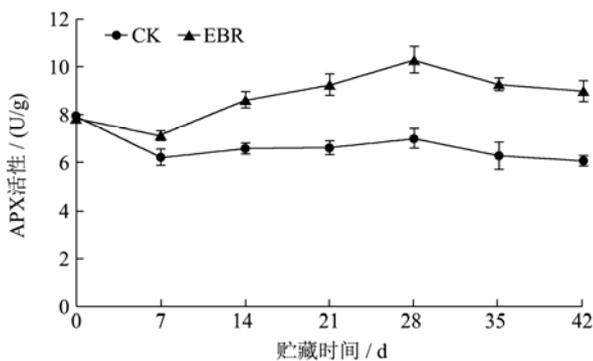


图8 EBR处理对杏果实APX活性的影响

Fig.8 Effects of EBR treatment on the APX activity of apricot fruits

抗坏血酸过氧化物酶(APX)是植物体内尤其是叶绿体中清除 $H_2O_2$ 的关键酶,减少了膜脂过氧化物的大量积累,保持细胞膜的完整性。如图8可知,在整个冷藏期间,EBR处理组杏果实APX活性均高于对照组,冷藏初期EBR处理组和对照组杏果实APX活性均呈现下降的趋势,在冷藏第7d到第28d期间APX活性逐渐上升,之后呈缓慢下降趋势。在冷藏第28d时,EBR处理组和对照组杏果实APX活性分别为10.31 U/g-FW和7.01 U/g-FW,EBR处理组APX活性高于对照组32.01% ( $p<0.05$ )。说明EBR处理杏果实在冷藏期间能维持较高的APX活性。

## 3 结论

3.1 本实验结果表明,在冷藏过程中,EBR处理组杏果实在冷藏第35d发生冷害,对照组比EBR处理组提前7d发生冷害,EBR处理组杏果实的冷害发病率

和冷害指数不仅低于对照组,且发生的冷害时间推迟。以往的研究也表明油菜素内酯可减轻青椒<sup>[11]</sup>、茄子<sup>[12]</sup>、番茄<sup>[13]</sup>和桃果实<sup>[14]</sup>等冷害的发生,说明适宜浓度的EBR处理可有效抑制果实采后冷害的发生。在正常情况下,植物细胞中活性氧的产生和消除处于平衡状态,使植物不足以受到伤害。低温胁迫的条件下,植物中羟基自由基( $\cdot OH$ )、过氧化氢( $H_2O_2$ )、超氧阴离子自由基( $O_2^{\cdot -}$ )等活性氧自由基会过多累积,代谢失调而破坏组织细胞膜的完整性,造成细胞质膜损伤、膜透性上升、膜脂过氧化物大量积累,导致果实冷害症状大面积产生<sup>[22]</sup>。在长期的进化过程中,植物本身形成了活性氧清除系统,主要由抗氧化酶和抗氧化物质共同构成。这些抗氧化物质通过参与防止不饱和脂肪酸的过氧化作用,活性氧自由基的清除,以保护细胞膜的完整性,从而增强果实的抗冷能力,提高果实的耐贮性。

3.2 在本实验中EBR处理提高了冷藏期间杏果实CAT、POD、APX和SOD的活性,并降低 $H_2O_2$ 的含量和 $O_2^{\cdot -}$ 的产生速率,当CAT和SOD活性升高时 $H_2O_2$ 含量和 $O_2^{\cdot -}$ 产生速率减少,因此能有效减轻活性氧自由基的积累,提高了杏果实的耐冷性。这与前人在枣果实<sup>[24]</sup>、青椒<sup>[11]</sup>中的研究结果一致。范林林等<sup>[24]</sup>也发现,极低浓度的采后油菜素内酯处理能提高豇豆POD和CAT活性,从而提高抗氧化能力,较好的控制冷害的现象。高慧等<sup>[12]</sup>和李园园等<sup>[10]</sup>的研究表明,一定浓度的EBR处理能提高茄子和草莓SOD、CAT、APX抗氧化酶的活性,并抑制 $O_2^{\cdot -}$ 产生速率和 $H_2O_2$ 含量,保持抗氧化性,增强其耐贮藏性,延缓采后果实的成熟与衰老。本研究中EBR处理增强杏果实抗冷性与提高抗氧化酶活性与以上研究结果一致。以上研究表明24-表油菜素内酯可通过激活果实中SOD、CAT、POD、APX活性的上升从而减轻活性氧自由基的过度积累,能够增强对低温环境下活性氧自由基的清除能力,减轻氧化胁迫造成的危害,维持杏果实活性氧代谢的平衡,进而提高杏果实的抗冷性及贮藏性。

3.3 综上所述,0.9 mg/L的24-表油菜素内酯能有效控制杏果实冷藏期间冷害的发生,24-表油菜素内酯处理不仅能降低冷害发病率和冷害指数,还能诱导活性氧代谢相关酶SOD、APX、POD、CAT的增强,同时也抑制 $O_2^{\cdot -}$ 产生速率和 $H_2O_2$ 含量的增长。

## 参考文献

- [1] 新疆维吾尔自治区统计局.新疆统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016  
The Xinjiang Uygur Autonomous Region Bureau of Statistics.

- Xinjiang statistical yearbook [M]. Beijing: China statistics press, 2016
- [2] 马岳岳,李永才,胡培芳,等.采后多胺处理对杏果实黑斑病的控制及贮藏品质的影响[J].食品科学,2017.<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20170323.1438.028.html>
- MA Yue-yue, LI Yong-cai, HU Pei-fang, et al. Effect of postharvest polyamines treatment on black spot disease control and storage quality of apricot fruit [J]. Food Science, 2017 <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20170323.1438.028.html>
- [3] 杨婷婷,朱璇,向玉洁,等.采收成熟度对杏果实贮藏品质的影响[J].现代食品科技,2015,31(7):277-282
- YANG Ting-ting, ZHU Xuan, XIANG Yu-jie, et al. Impact of harvest maturity on storage quality of apricot fruits [J]. Modern Food Science & Technology, 2015, 31(7): 277-282
- [4] 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
- HOU Yuan-yuan, ZHU Xuan, WANG Ying, et al. Effect of salicylic acid treatment on chilling injury and the metabolism of reactive oxygen species in apricot fruits stored at low temperature [J]. Food Science, 2014, 35(4): 195-199
- [5] Bajguz A, Hayat S. Effects of brassinosteroids on plant responses to environmental stresses [J]. Plant physiology & Biochemistry, 2009, 47: 1-8
- [6] Nakashita H, Yasuda M, Nitta T, et al. Brassinosteroid functions in a broad range of disease resistance in tobacco and rice [J]. Plant Journal for Cell & Molecular Biology, 2003, 33(5): 887-98
- [7] 康云艳,杨暹,郭世荣,等.24-表油菜素内酯对低氧胁迫下黄瓜幼苗碳水化合物代谢的影响[J].中国农业科学,2011,44(12):2495-2503
- KANG Yun-yan, YANG Xian, GUO Shi-rong, et al. Effect of 24-epibrassinolide on carbohydrate metabolism and enhancement of tolerance to root-zone hypoxia in cucumber [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(12): 2495-2503
- [8] 任鸿雁,王莉,马青秀,等.油菜素内酯生物合成途径的研究进展[J].植物学报,2015,50(6):768-778
- REN Hong-yan, WANG Li, MA Qing-xiu, et al. Research progress of biosynthesis pathway of brassinolide [J]. Bulletin of Botany, 2015, 50(6): 768-778
- [9] 唐如雪,葛永红,李灿婴,等.采后油菜素内酯处理对久保桃果实活性氧代谢的影响[J].保鲜与加工,2016,16(5):5-9
- TANG Ru-xue, GE Yong-hong, LI Can-ying, et al. Effect of brassinolide treatment on the active oxygen metabolism of postharvest 'Okubao' peach [J]. Storage and Process, 2016, 16(5): 5-9
- [10] 李园园,王莉,周梦洁,等.2,4-表油菜素内酯对草莓果实贮藏品质及抗氧化活性的影响[J].食品科学,2017. ; <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20170111.1430.038.html>
- LI Yuan-yuan, WANG Li, ZHOU Meng-jie, et al. Effect of 2,4-epibrassinolide on the postharvest quality and antioxidant activity of strawberry fruit [J]. Food Science, 2017 <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20170111.1430.038.html>
- [11] Wang Q, Ding T, Gao L P, et al. Effect of brassinolide on chilling injury of green bell pepper in storage [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 144: 195-200
- [12] Gao H, Kang L N, Gao L P, et al. Effect of 24-epibrassinolide treatment on the metabolism of eggplant fruits in relation to development of pulp browning under chilling stress [J]. Journal of Food Science & Technology, 2015, 52(6): 3394-3401
- [13] Aghdam M S, Asgari M, Farmani B, et al. Impact of postharvest brassinosteroids treatment on pal activity in tomato fruit in response to chilling stress [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 144: 116-120
- [14] Gao H, Zhang Z k, Lv X G, et al. Effect of 24-epibrassinolide on chilling injury of peach fruit in relation to phenolic and proline metabolisms [J]. Postharvest Biology & Technology, 2016, 111: 390-397
- [15] Hu W H, Wu Y, Zeng J Z, et al. Chilling induced inhibition of photosynthesis was alleviated by 24-epibrassinolide pretreatment in cucumber during chilling and subsequent recovery [J]. Photosynthetica, 2010, 48(4): 537-544
- [16] DONG Li, ZHOU Hong-wei, SONEGO L, et al. Ethylene involvement in the cold storage disorder of Flavortop nectarine [J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 23(2): 105-115
- [17] ZHOU Biyan, WANG Jihua, Guo Zhenfei, et al. A simple colorimetric method for determination of hydrogen peroxide in plant tissues [J]. Plant Growth Regulation, 2006, 49: 113-118
- [18] 金昌梅,阚娟,王红梅,等.桃果实成熟软化过程中活性氧代谢的变化[J].扬州大学学报:农业与生命科学版,2006,27(4):86-89
- JIN Chang-mei, KAN Juan, WANG Hong-mei, et al. Changes of active oxygen metabolism during the ripening of peach fruit [J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2006, 27(4): 86-89

- [19] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants [J]. *Plant Physiology*, 1977, 59(2): 309-314
- [20] 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  
CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007
- [21] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chl-oplasts [J]. *Plant Cell Physiology*, 1981, 22(5): 867-880
- [22] Wada L, Ou B. Antioxidant Activity and phenol content of Oregon caneberries [J]. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 2002, 50(12): 3495-3500
- [23] Chun OK, Kim DO, Lee CY. Superoxide radical scavenging activity of the major polyphenols in fresh plums [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(27): 8067-8072
- [24] 范林林,高丽朴,王清,等.油菜素内酯对豇豆冷害的控制[J].食品工业科技,2016,37(15):339-343  
FAN Lin-lin, GAO Li-pu, WANG Qing, et al. Effect of treatment with BR on chilling injury of postharvest cowpea [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(15): 339-343