

网络出版时间:2024-07-08 09:43 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.01.010  
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20240704.1344.020

# 采前喷施 $\text{CaCl}_2$ 对蜂糖李果实贮藏品质和 活性氧代谢的影响

吴运星<sup>1,2</sup>, 聂小双<sup>1,2</sup>, 尚磊<sup>1,2</sup>, 欧明伟<sup>1,2</sup>, 刘姗<sup>1,2</sup>, 宋倩军<sup>1,2</sup>, 陈红<sup>1,2</sup>

(1 贵州省果树工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550025; 2 贵州大学 农学院, 贵州 贵阳 550025)

**【摘要】**【目的】探究采前钙处理对蜂糖李果实贮藏品质和活性氧(ROS)代谢的影响,为外源钙在提高蜂糖李果实保鲜中的应用提供参考依据。【方法】选择长势基本一致的蜂糖李树,于花后 80,90 和 100 d 分别喷施质量分数 1.5%  $\text{CaCl}_2$  溶液( $\text{CaCl}_2$  处理),以清水作为对照(CK),采收 2 个处理八成成熟果实,将其置于(25±1)℃、相对湿度 85%~95%光照培养箱条件下贮藏,在贮藏 0,5,10,15,20 和 25 d 时测定了果实品质及 ROS 代谢指标,并分析了果实品质及 ROS 代谢指标间的相关性。【结果】贮藏 0~25 d,随着贮藏时间的延长, $\text{CaCl}_2$  处理和 CK 果实硬度和可滴定酸(TA)含量均下降,腐烂率、失重率和过氧化物酶(POD)活性均增加,呼吸强度、超氧阴离子( $\text{O}_2^-$ )产生速率和可溶性固形物(TSS)、钙、丙二醛(MDA)、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、抗坏血酸(AsA)、还原型谷胱甘肽(GSH)含量以及超氧化物歧化酶(SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、过氧化氢酶(CAT)活性总体上均先增加后降低。与 CK 相比, $\text{CaCl}_2$  处理可提高果实硬度和 TSS 含量,降低果实腐烂率、失重率、呼吸强度和 TA 含量,抑制  $\text{O}_2^-$  产生速率及  $\text{H}_2\text{O}_2$  和 MDA 含量的升高,保持较高的 SOD、APX、POD 和 CAT 活性以及 GSH 和 AsA 含量。相关性分析结果表明,CK 果实中,硬度与失重率和 POD 活性呈极显著负相关,与腐烂率、MDA 和钙含量呈显著负相关;腐烂率与 MDA 和钙含量及 POD 活性呈极显著正相关;TA 含量与硬度呈极显著正相关,与失重率、腐烂率、MDA 和钙含量及 POD 活性呈显著或者极显著负相关。 $\text{CaCl}_2$  处理果实中,硬度与失重率、腐烂率、钙含量和 POD 活性呈显著负相关( $P<0.05$ );失重率与腐烂率、钙和 GSH 含量及 POD 活性呈显著或者极显著正相关;腐烂率与钙和 GSH 含量及 POD 活性呈显著正相关;TA 含量与硬度呈极显著正相关,与失重率、腐烂率、钙和 GSH 含量及 POD 活性呈显著或极显著负相关。【结论】采前喷施  $\text{CaCl}_2$  可以使采后蜂糖李果实维持较高的贮藏品质及抗氧化能力,从而提高果实耐贮性,延长果实保鲜期。

**【关键词】** 蜂糖李;果实贮藏品质; $\text{CaCl}_2$  处理;活性氧代谢;耐贮性

**【中图分类号】** S662.3

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2025)01-0099-11

## Effects of pre-harvest spraying $\text{CaCl}_2$ on fruit storage quality and reactive oxygen species metabolism of postharvest 'Fengtang' plum fruit

WU Yunxing<sup>1,2</sup>, NIE Xiaoshuang<sup>1,2</sup>, SHANG Lei<sup>1,2</sup>, OU Mingwei<sup>1,2</sup>,  
LIU Shan<sup>1,2</sup>, SONG Qianjun<sup>1,2</sup>, CHEN Hong<sup>1,2</sup>

(1 Guizhou Provincial Fruit Tree Engineering Technology Research Center, Guiyang, Guizhou 550025, China;

2 Agricultural College, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** 【Objective】The effects of pre-harvest calcium treatment on storage quality and reactive oxygen species (ROS) metabolism of 'Fengtang' plum fruit were studied to provide reference for the appli-

**【收稿日期】** 2023-11-06

**【基金项目】** 贵州省科技计划项目“贵州蜂糖李优质高产关键技术集成与示范”(黔科合支撑[2022]重点 018 号)

**【作者简介】** 吴运星(1997—),贵州毕节人,在读硕士,主要从事果树学研究。E-mail: wyx970126@aliyun.com

**【通信作者】** 陈红(1975—),重庆潼南人,男,副教授,博士,主要从事果树资源评价研究。E-mail: chen96@aliyun.com

cation of exogenous calcium in improving the preservation of 'Fengtang' plum fruit. 【Method】 'Fengtang' plum trees with basically the same growth vigor were selected and sprayed with 1.5%  $\text{CaCl}_2$  solution ( $\text{CaCl}_2$  treatment) at 80, 90 and 100 days after anthesis, and water was used as the control (CK). The eight-mature fruits of the two treatments were harvested and stored in an incubator at  $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$  and relative humidity of 85%—95%. The fruit quality and ROS metabolism indexes were measured at 0, 5, 10, 15, 20 and 25 days of storage, and the correlations between fruit quality and ROS metabolism indexes were analyzed. 【Result】 During 0—25 days of storage, the firmness and titratable acid content of  $\text{CaCl}_2$  treatment and CK fruits decreased with the extension of storage time, while the decay rate, weight loss rate and peroxidase (POD) activity increased. The respiration intensity, superoxide anion ( $\text{O}_2^-$ ) production rate, contents of total soluble solids (TSS), calcium, malondialdehyde (MDA),  $\text{H}_2\text{O}_2$ , ascorbic acid (AsA) and reduced glutathione (GSH), and activities of superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX) and catalase (CAT) generally increased first and then decreased. Compared with CK,  $\text{CaCl}_2$  treatment increased fruit firmness and TSS content, reduced fruit decay rate, weight loss rate, respiratory intensity and titratable acid content, inhibited the increase of  $\text{O}_2^-$  production rate,  $\text{H}_2\text{O}_2$  and MDA contents, and maintained higher activities of SOD, APX, POD and CAT and contents of GSH and AsA. In CK fruits, firmness had extremely significantly negative correlations with weight loss rate and POD activity, and significantly negative correlations with decay rate, MDA and calcium. The decay rate had significantly positive correlations with MDA content, calcium content and POD activity. TA content had significantly positive correlations with firmness, and significantly or extremely significantly negative correlations with weight loss rate, decay rate, MDA content, calcium content and POD activity. In  $\text{CaCl}_2$  treatment, the firmness had significantly negative correlations with weight loss rate, decay rate, calcium content and POD activity ( $P < 0.05$ ). The weight loss rate had significantly or extremely significantly positive correlations with decay rate, calcium content, GSH content and POD activity. The decay rate had significantly positive correlations with calcium content, GSH content and POD activity. TA content had significantly positive correlation with firmness, and significantly or extremely significantly negative correlations with weight loss rate, decay rate, calcium content, GSH content and POD activity. 【Conclusion】 Spraying  $\text{CaCl}_2$  pre-harvest maintained high storage quality and antioxidant capacity of 'Fengtang' plum fruits, so that fruit storage resistance was improved and fruit preservation period was prolonged.

**Key words:** 'Fengtang' plum; fruit storage quality;  $\text{CaCl}_2$  treatment; reactive oxygen species metabolism; storability

蜂糖李是贵州地方特色品种,其果实甜美爽口,消费市场前景广阔,是贵州发展面积最快的水果之一<sup>[1]</sup>。蜂糖李果实于 6—7 月份采收,作为典型的呼吸跃变型果实,具有采后生理代谢旺盛、易腐烂软化的特点<sup>[2]</sup>,故该果实不方便贮运,制约了采后蜂糖李果实市场价值和产业发展,故筛选出适宜蜂糖李保鲜方法,对提高蜂糖李果实耐贮性和市场经济价值具有重要的意义。

目前,蜂糖李保鲜方法主要有自发气调包装<sup>[3]</sup>以及褪黑素<sup>[4]</sup>、草酸<sup>[5]</sup>和复合涂膜处理<sup>[6]</sup>等,虽然这些保鲜方法在一定程度上均可减缓果实劣变,延长果实贮藏期,但在实际应用中仍然存在成本高、操作繁琐、化学成分残留高等问题。近年来,人们对食品

营养与健康的重视程度不断提升,钙处理凭借安全绿色、简便高效的优点再次成为保鲜领域的研究热点,已被广泛应用于果实采后贮藏中<sup>[7-10]</sup>。

前人研究发现,对樱桃<sup>[11]</sup>、冬枣<sup>[12]</sup>、以及苹果<sup>[13]</sup>等果实进行钙处理后,可以提高果实硬度、可溶性固形物(TSS)和可滴定酸(TA)含量,有效改善了果实品质,延长贮藏期。此外,钙处理可调节活性氧(ROS)代谢,增强 ROS 清除酶活性,减缓果实衰老,提高采后果实的耐贮性<sup>[14-16]</sup>。目前,关于钙处理如何调控蜂糖李果实 ROS 代谢与改善贮藏品质的研究鲜见报道。为此,本试验通过采前对蜂糖李果实喷施  $\text{CaCl}_2$ ,研究  $\text{CaCl}_2$  处理对采后蜂糖李果实贮藏品质和 ROS 代谢的影响,为改进蜂糖李果实贮藏

方法和调控采后果实品质提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

试验于 2022 年在贵州省黔南州惠水县断杉镇蜂糖李种植基地进行,供试材料为 6 年生蜂糖李,树形为自然开心形,园地土壤肥力中等,采用常规管理。

邻苯二酚、三氯乙酸、抗坏血酸(分析纯)、硫代巴比妥酸,贵州凯信生物科技有限公司;磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、乙二胺四乙酸二钠、盐酸羟胺、乙醇、磷酸、三氯化铁、四氯化钛、石英砂、甲醇、愈创木酚、对氨基苯磺酸、 $\alpha$ -萘胺、氮蓝四唑、甲硫氨酸、核黄素、红菲罗琳、二硫代硝基苯甲酸、聚乙烯吡咯烷酮,贵州博奥瑞杰生物有限公司;硫酸、盐酸、质量分数 30% 过氧化氢,重庆川东化工(集团)有限公司。

### 1.2 仪器与设备

TEL-7001 型呼吸仪,上海金泉仪器有限公司;FA2204B 型电子天平,上海佑科仪器仪表有限公司;PAL-BX1ACD1 糖酸度计,日本 ATAGO 公司;DK-98-II 型双列八孔电热恒温水浴锅、UV752 紫外分光光度计,上海佑科仪器有限公司;TGL-185 高速冷冻离心机,上海予卓仪器有限公司;METHER 超低温冰箱,安徽中科都菱商用电器股份有限公司。

### 1.3 试验方法

选择长势基本一致的蜂糖李树,于花后 80、90 和 100 d 分别喷施质量分数 1.5% (课题组前期试验确定)的  $\text{CaCl}_2$  溶液( $\text{CaCl}_2$  处理),以清水作为对照(CK),2 个处理中均添加 0.5% 吐温 80 作为表面活性剂。每个处理设置 3 个生物学重复,每个生物学重复 3 棵树,共 9 棵树。于果实近八成熟(硬度为 10~12  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ,TSS 含量为 11%~13%)时,采集大小一致、无病虫害、无机械伤、果形端正、果柄梗洼处无裂伤、色泽一致的果实。每个处理 200 个果实,共 400 个果实。

蜂糖李果实采收后立即送至实验室,于室温预冷 12 h 后,置于(25±1) °C、相对湿度 85%~95% 光照培养箱条件下贮藏,分别在贮藏 0、5、10、15、20、25 d 时测定果实品质及 ROS 代谢指标。

### 1.4 测定指标与方法

1.4.1 果实硬度 每处理选取 10 个果实,在果实缝合线两侧选取 2 个点,去皮(厚度约 1 mm),用 GY-4 硬度计(探头直径 3.5 mm,测定深度 10 mm)进行果实硬度测定。

1.4.2 失重率 每处理固定 10 个中等大小的果实,采用称重法测定果实质量,观察果实质量变化,计算失重率:失重率= $[(M_1 - M_2)/M_1] \times 100\%$ ,其中  $M_1$  为采收当天果实的初始质量(g), $M_2$  为贮藏不同时间后果实的质量(g)。

1.4.3 腐烂率 以蜂糖李果实出现水渍状褐变斑点、果实软化腐败、果皮皱缩褐变作为果实腐烂的判别依据,每个处理选取 90 个果实,记录并统计果实腐烂情况,腐烂率计算公式为:腐烂率=(腐烂果实总数/果实总数) $\times 100\%$ 。

1.4.4 呼吸强度 参考李辉等<sup>[17]</sup>方法测定呼吸强度,每处理固定 10 个蜂糖李果实,将其放入 6.4 L 的干燥器中,同时放入 TEL-7001 型呼吸仪,密封,每隔 10 min 读取数据 1 次,重复 3 次,计算呼吸强度平均值,单位为  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 。

1.4.5 TSS 和 TA 含量 每处理选取 10 个果实,参照石其宇等<sup>[18]</sup>方法采用 PAL-BX/ACD1 糖酸度计测定 TSS 和 TA 含量。

1.4.6 果实钙含量 每处理选取 10 个果实,采用钙含量检测试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司,中国)的邻甲酚酞络合铜比色法测定果实钙含量。

1.4.7 果实丙二醛(MDA)含量 每处理选取 10 个果实,参照 WANG 等<sup>[19]</sup>的方法测定 MDA 含量。

1.4.8 果实  $\text{O}_2^-$  产生速率和  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量 每处理选取 10 个果实,参照曹建康等<sup>[20]</sup>方法测定  $\text{O}_2^-$  产生速率和  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量。

1.4.9 果实内源抗氧化物质含量 每处理选取 10 个果实,参考陈莲等<sup>[21]</sup>的方法测定抗坏血酸(AsA)含量,参考 QIAN 等<sup>[22]</sup>的方法测定还原型谷胱甘肽(GSH)含量。

1.4.10 抗氧化酶活性 每处理选取 10 个果实,参照曹建康等<sup>[20]</sup>等的方法测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)和过氧化物酶(POD)活性。

### 1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2021 整理数据,SPSS 27.0 软件对数据进行差异显著性和相关性分析,多重比较采用 Duncan 氏新复极差法进行,并用 Origin 2021 软件绘图。

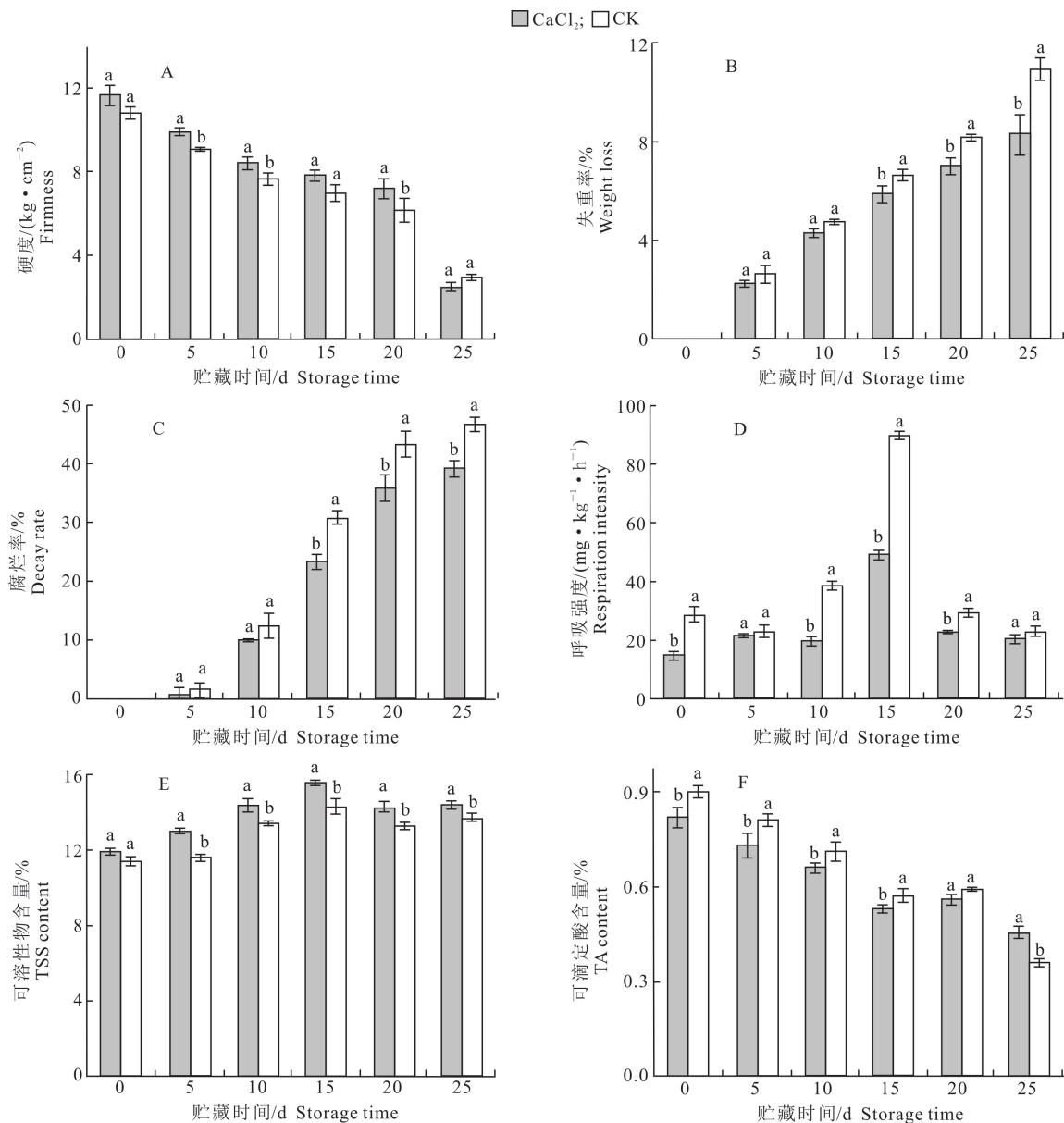
## 2 结果与分析

### 2.1 采前喷施 $\text{CaCl}_2$ 对蜂糖李果实贮藏品质的影响

由图 1-A 可得,随着贮藏时间的延长,果实硬度逐渐下降。在贮藏 0~20 d,果实硬度缓慢下降,贮

藏 20~25 d 则急速下降。进一步比较发现,除贮藏 25 d 外,其余贮藏时间下  $\text{CaCl}_2$  处理果实硬度均高

于 CK;贮藏 20 d 时  $\text{CaCl}_2$  处理果实硬度比贮藏 0 d 时降低了 38.47%。



图柱上标不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ( $P < 0.05$ ). The same below.

图 1 采前喷施  $\text{CaCl}_2$  对蜂糖李果实贮藏品质的影响

Fig. 1 Effect of pre-harvest applied  $\text{CaCl}_2$  on storage quality of 'Fengtang' plum fruit

如图 1-B 所示,贮藏 0~25 d,  $\text{CaCl}_2$  处理和 CK 果实的失重率随着时间延长均呈上升趋势,CK 果实的失重率始终高于  $\text{CaCl}_2$  处理。贮藏 15, 20, 25 d 时,  $\text{CaCl}_2$  处理果实失重率均显著低于 CK ( $P < 0.05$ );贮藏 25 d 时,CK 失重率达到 10.93%,而  $\text{CaCl}_2$  处理果实失重率仅为 8.3%。

如图 1-C 所示,贮藏 0~5 d,  $\text{CaCl}_2$  处理和 CK 果实腐烂率几乎可以不计;贮藏 5~25 d,随着时间的延长,2 个处理果实的腐烂率呈上升趋势,贮藏 25

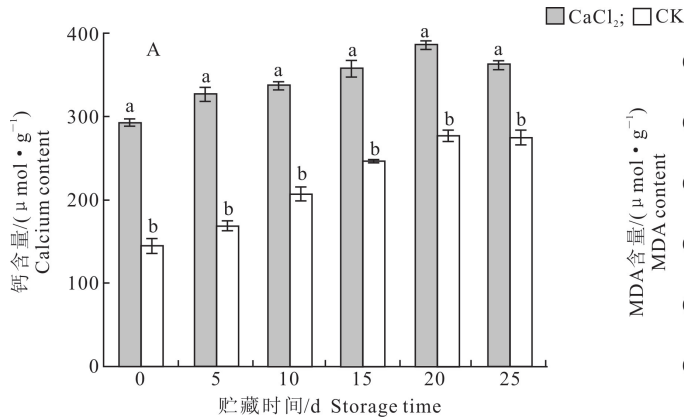
d 时,  $\text{CaCl}_2$  处理果实腐烂率为 39.17%,显著低于 CK ( $P < 0.05$ )。

如图 1-D 所示,贮藏 0~25 d, 2 个处理果实呼吸强度均呈先上升后下降趋势,并且  $\text{CaCl}_2$  处理果实呼吸强度始终低于 CK。贮藏 15 d 时, 2 个处理果实呼吸强度达到最大值,此时 CK 呼吸强度为 89.61  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ ,显著高于  $\text{CaCl}_2$  处理,是  $\text{CaCl}_2$  处理果实的 1.82 倍。

由图 1-E 可知,贮藏 0~15 d,  $\text{CaCl}_2$  处理和 CK

果实 TSS 含量均呈上升趋势,且均在 15 d 达到最大值,此时 CaCl<sub>2</sub> 处理果实 TSS 含量为 15.55%,是 CK 的 1.09 倍;之后,2 个处理果实 TSS 含量略有下降。除 0 d 外,其余贮藏时间下,CaCl<sub>2</sub> 处理果实 TSS 含量均显著高于 CK( $P < 0.05$ )。

由图 1-F 可知,随着贮藏时间的延长,由于果实的消耗和分解,2 个处理果实的 TA 含量总体呈下降趋势。贮藏 0~20 d,CaCl<sub>2</sub> 处理果实 TA 含量总体显著低于 CK;贮藏 25 d 时,CaCl<sub>2</sub> 处理蜂糖李果实 TA 含量显著高于 CK。



综上所述,采前喷施 CaCl<sub>2</sub> 可以提高果实硬度和 TSS 含量,降低果实腐烂率、失重率、呼吸强度和 TA 含量,从而使采后蜂糖李果实保持较优贮藏品质。

## 2.2 采前喷施 CaCl<sub>2</sub> 对蜂糖李果实钙和 MDA 含量的影响

由图 2-A 可知,贮藏 0~25 d,CaCl<sub>2</sub> 处理和 CK 果实钙含量均呈先上升后下降趋势。贮藏 20 d 时,CaCl<sub>2</sub> 处理和 CK 果实钙含量达到最大值,分别是采收时(0 d)的 1.32 和 1.91 倍。整个贮藏期,CaCl<sub>2</sub> 处理果实中钙含量显著高于 CK( $P < 0.05$ )。

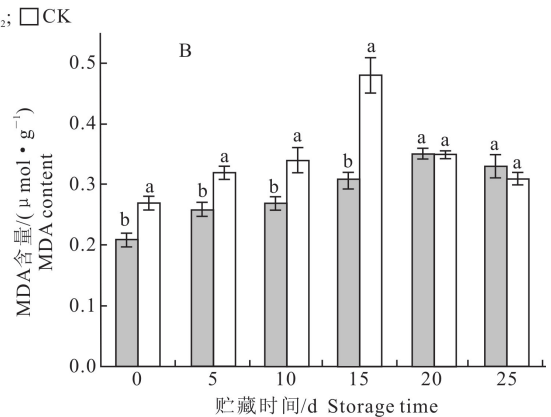


图 2 采前喷施 CaCl<sub>2</sub> 对蜂糖李果实钙(A)和丙二醛(MDA)含量(B)的影响

Fig. 2 Effect of pre-harvest applied CaCl<sub>2</sub> on calcium (A) and MDA contents(B) of 'Fengtang' plum fruit

由图 2-B 可知,贮藏 0~25 d,CaCl<sub>2</sub> 处理和 CK 果实 MDA 含量均呈先上升后下降趋势,其中贮藏 0~15 d 时,CK 果实 MDA 含量显著高于 CaCl<sub>2</sub> 处理( $P < 0.05$ ),贮藏 15 d 时,CK 果实 MDA 含量达到最大值 0.48 μmol/g,比同时期 CaCl<sub>2</sub> 处理果实提高了 54.84%;而 CaCl<sub>2</sub> 处理果实 MDA 含量于贮藏 20 d 时达到最大值 0.350 μmol/g,较 CK 推迟了 5 d。表明采前喷施 CaCl<sub>2</sub> 可以提高果实钙含量,降低 MDA 含量。

## 2.3 采前喷施 CaCl<sub>2</sub> 对蜂糖李果实 ROS 及抗氧化物质含量的影响

由图 3-A 可知,贮藏 0~25 d,CaCl<sub>2</sub> 处理和 CK 蜂糖李果实 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率总体均呈先上升后下降趋势,2 个处理果实 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率在贮藏 10 d 时均达到最大值;CaCl<sub>2</sub> 处理果实 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率均小于 CK,可知 CaCl<sub>2</sub> 处理可有效减缓 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率。

由图 3-B 可知,贮藏 0~25 d,CaCl<sub>2</sub> 处理和 CK 果实 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量均呈先上升后下降趋势。15 d 时 2 个处理果实 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量均达到最大值,此时 CK 果实 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量为 0.22 μmol/g,是 CaCl<sub>2</sub> 处理的 1.21 倍;CaCl<sub>2</sub> 处理果实 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量均显著低于

CK( $P < 0.05$ )。

由图 3-C 可知,贮藏 0~25 d,CaCl<sub>2</sub> 处理果实 AsA 含量均显著高于 CK( $P < 0.05$ )。贮藏 10 d 时,CK 果实 AsA 含量达到最大值,而 CaCl<sub>2</sub> 处理果实 AsA 含量则在 15 d 时达到最大值,比同时期 CK 高 34.21%。

由图 3-D 可知,贮藏 0~25 d,随着贮藏时间的延长,CaCl<sub>2</sub> 处理和 CK 果实 GSH 含量均呈先上升后下降趋势,均在 20 d 时达到最大值,并且 CaCl<sub>2</sub> 处理果实 GSH 含量均显著高于 CK( $P < 0.05$ )。

以上结果表明,采前喷施 CaCl<sub>2</sub> 可以使蜂糖李果实保持较高的 AsA、GSH 含量和较低的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量,从而提高果实清除 ROS 的能力,延长果实的贮藏期。

## 2.4 采前喷施 CaCl<sub>2</sub> 对蜂糖李果实抗氧化酶活性的影响

由图 4-A 可知,贮藏 0~25 d,CaCl<sub>2</sub> 处理和 CK 果实 SOD 活性呈先上升后下降趋势,均在 15 d 时达到峰值。与 0 d 时相比,15 d 时 CaCl<sub>2</sub> 处理果实的 SOD 活性提高了 6.6%。此外,在整个贮藏期,CaCl<sub>2</sub> 处理果实 SOD 活性均高于 CK。

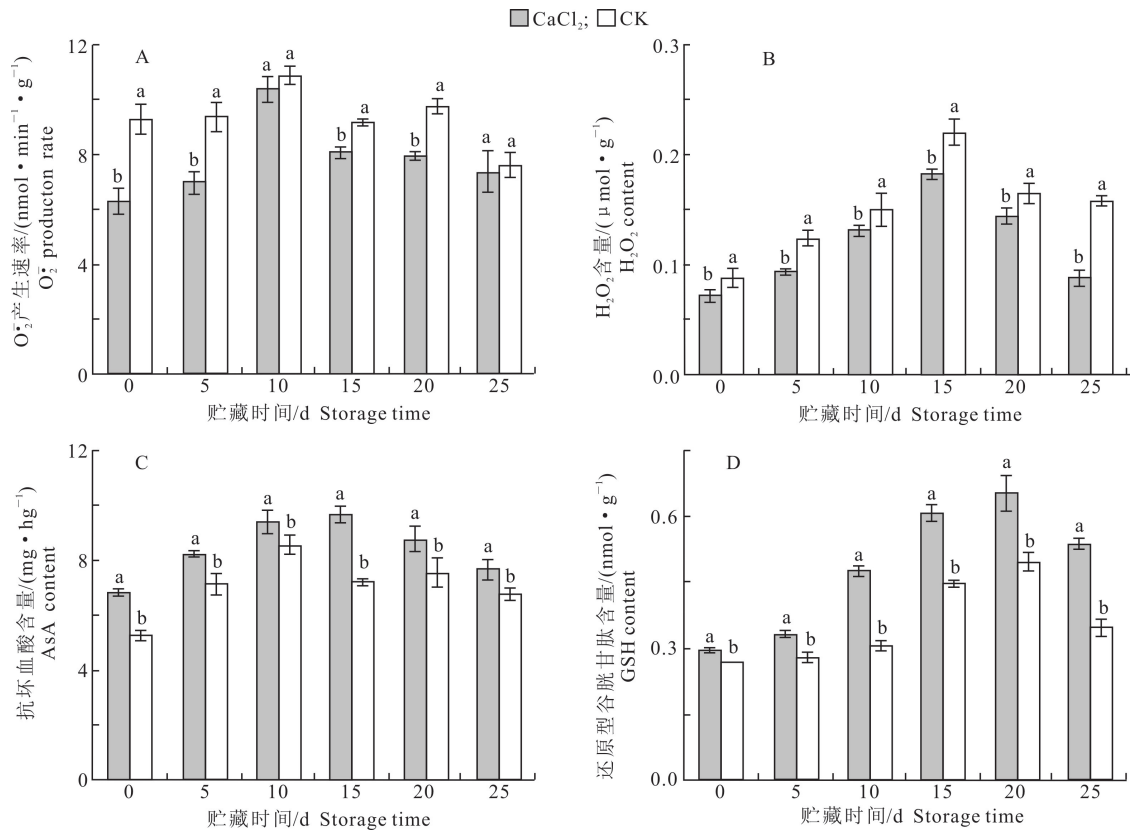


图 3 采前喷施  $\text{CaCl}_2$  对蜂糖李果实活性氧及抗氧化物质含量的影响

Fig. 3 Effect of pre-harvest applied  $\text{CaCl}_2$  on ROS and antioxidant contents of 'Fengtang' plum fruit

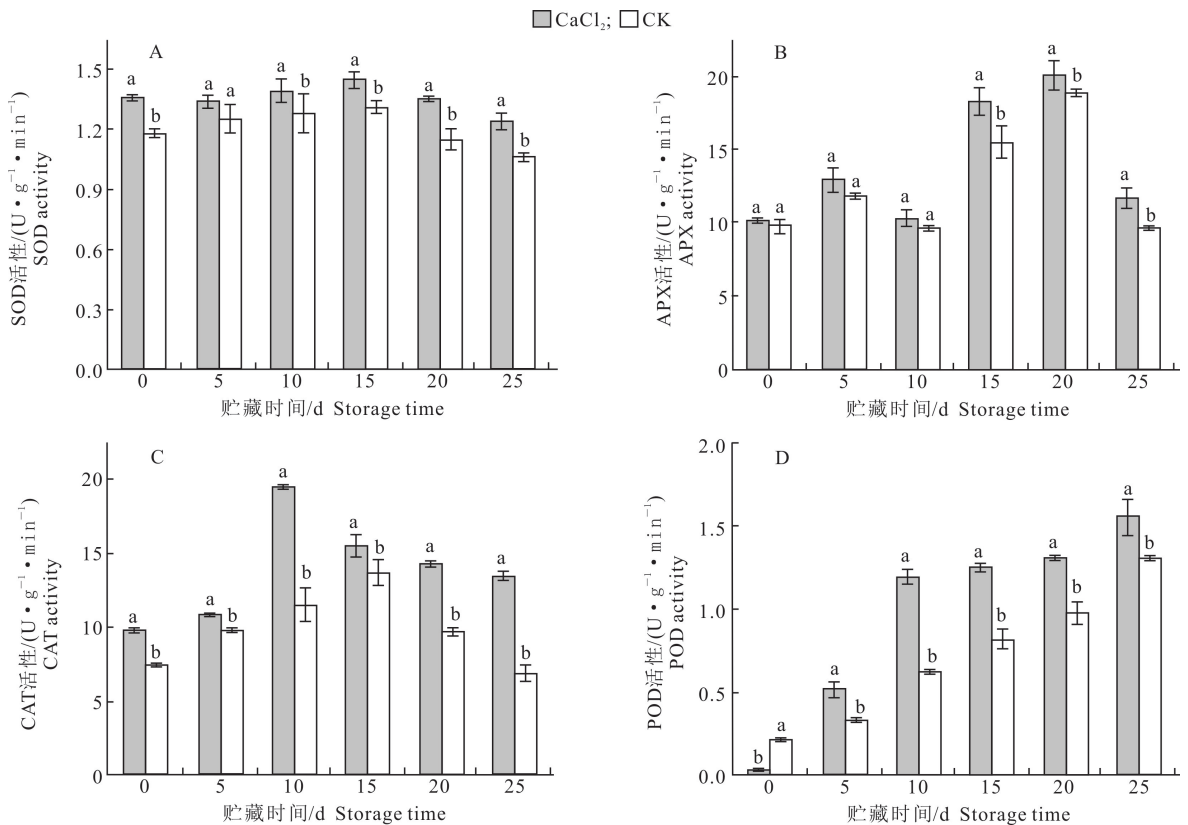


图 4 采前喷施  $\text{CaCl}_2$  对蜂糖李果实抗氧化酶活性的影响

Fig. 4 Effect of pre-harvest spraying  $\text{CaCl}_2$  on antioxidant enzyme activity of 'Fengtang' plum fruit

如图 4-B 所示,贮藏 0~25 d, CaCl<sub>2</sub> 处理和 CK 果实 APX 活性总体均呈先上升后下降趋势,并且 2 个处理 APX 活性于贮藏 20 d 时达到最大值;CaCl<sub>2</sub> 处理果实 APX 活性始终高于 CK。

由图 4-C 可知,贮藏 0~25 d, CaCl<sub>2</sub> 处理和 CK 果实 CAT 活性先上升后下降,并且 CaCl<sub>2</sub> 处理果实 CAT 活性显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。贮藏 10 d 时, CaCl<sub>2</sub> 处理果实 CAT 活性达到峰值,为 19.51 U/(g·min);而 CK 果实 CAT 活性于贮藏 15 d 时达到峰值,较 CaCl<sub>2</sub> 处理果实推迟了 5 d。

由图 4-D 可知,0 d 时 CK 果实的 POD 活性显著高于 CaCl<sub>2</sub> 处理;贮藏 5~25 d, CaCl<sub>2</sub> 处理和 CK 果实 POD 活性均呈上升趋势,并且 CK 果实 POD 活性均显著低于 CaCl<sub>2</sub> 处理 ( $P < 0.05$ )。

综上所述,采前喷施 CaCl<sub>2</sub> 总体可以提高果实 SOD、APX、CAT 和 POD 活性。

## 2.5 蜂糖李果实品质及 ROS 代谢指标间的相关性分析

表 1 显示, CaCl<sub>2</sub> 处理蜂糖李果实中,硬度与失重率、腐烂率、钙含量和 POD 活性呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ),与 TA 含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。失重率与腐烂率、钙和 GSH 含量及 POD 活性呈显著或者极显著正相关,与 TA 含量呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。腐烂率与钙和 GSH 含量及

POD 活性呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ),与 TA 含量呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。呼吸强度与 MDA、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量呈显著或者极显著正相关。TSS 与 GSH 含量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。TA 与钙和 GSH 含量以及 POD 活性呈显著或者极显著负相关。MDA 与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、AsA 含量呈显著或者极显著正相关。钙含量与 POD 活性、O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率与 CAT 活性、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 与 AsA、GSH 含量与 POD 活性呈显著或者极显著正相关。

由表 2 可知,CK 果实中,硬度与失重率、腐烂率、MDA 和钙含量及 POD 活性呈显著或者极显著负相关,与 TA 含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。失重率与 POD 活性呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ),与 TA 含量呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。腐烂率与 MDA 和钙含量及 POD 活性呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ),与 TA 含量呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。呼吸强度与 CAT 活性呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。TSS 与钙、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。TA 与 MDA 和钙含量以及 POD 活性呈显著或者极显著负相关。MDA 与钙和 GSH 含量以及 POD 活性呈显著或者极显著正相关。钙含量与 POD 活性、GSH 含量与 APX、SOD 与 CAT 活性呈显著或者极显著正相关。

表 1 CaCl<sub>2</sub> 处理蜂糖李果实贮藏品质和 ROS 代谢指标的相关性

Table 1 Correlation between storage quality and ROS metabolism indexes of 'Fengtang' plum fruit treated with CaCl<sub>2</sub>

指标 Index	硬度 Firmness	失重率 Wight loss rate	腐烂率 Decay rate	呼吸强度 Respiratory intensity	TSS 含量 TSS content	TA 含量 TA content	MDA 含量 MDA content	钙含量 Calcium content
硬度 Firmness	1.000							
失重率 Wight loss rate	-0.913*	1.000						
腐烂率 Decay rate	-0.876*	0.955**	1.000					
呼吸强度 Respiratory intensity	-0.115	0.341	0.257	1.000				
TSS 含量 TSS content	-0.513	0.683	0.662	0.641	1.000			
TA 含量 TA content	0.920**	-0.980**	-0.930**	-0.457	-0.725	1.000		
MDA 含量 MDA content	-0.139	0.417	0.306	0.974**	0.698	-0.497	1.000	
钙含量 Calcium content	-0.915*	0.965**	0.856*	0.324	0.555	-0.951**	0.399	1.000
O <sub>2</sub> <sup>-</sup> 产生速率 O <sub>2</sub> <sup>-</sup> production rate	-0.150	0.309	0.108	0.155	0.479	-0.243	0.342	0.347
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 含量 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> content	-0.107	0.460	0.361	0.837*	0.735	-0.473	0.934**	0.406
GSH 含量 GSH content	-0.638	0.889*	0.873*	0.538	0.819*	-0.855*	0.642	0.785
AsA 含量 AsA content	-0.135	0.441	0.242	0.691	0.594	-0.430	0.829*	0.476
SOD 活性 SOD activity	0.589	-0.293	-0.359	0.632	0.312	0.255	0.673	-0.335
CAT 活性 CAT activity	-0.299	0.473	0.292	0.298	0.667	-0.427	0.473	0.478
APX 活性 APX activity	-0.165	0.507	0.549	0.621	0.435	-0.480	0.671	0.410
POD 活性 POD activity	-0.862*	0.967**	0.863*	0.371	0.733	-0.944**	0.479	0.958**

表 1(续) Table 1(continued)

指标 Index	$O_2^-$ 产生速率 $O_2^-$ production rate	$H_2O_2$ 含量 $H_2O_2$ content	GSH 含量 GSH content	AsA 含量 AsA content	SOD 活性 SOD activity	CAT 活性 CAT activity	APX 活性 APX activity	POD 活性 POD activity
$O_2^-$ 产生速率 $O_2^-$ production rate	1.000							
$H_2O_2$ 含量 $H_2O_2$ content	0.534	1.000						
GSH 含量 GSH content	0.400	0.756	1.000					
AsA 含量 AsA content	0.758	0.915*	0.642	1.000				
SOD 活性 SOD activity	0.360	0.708	0.112	0.624	1.000			
CAT 活性 CAT activity	0.972**	0.642	0.569	0.802	0.356	1.000		
APX 活性 APX activity	-0.008	0.741	0.758	0.531	0.343	0.114	1.000	
POD 活性 POD activity	0.531	0.545	0.876*	0.595	-0.167	0.672	0.424	1.000

注: TSS. 可溶性固形物; TA. 可滴定酸; MDA. 丙二醛; GSH. 还原性谷胱甘肽; AsA. 抗坏血酸; SOD. 超氧化物歧化酶; CAT. 过氧化氢酶; APX. 抗坏血酸过氧化物酶; POD. 过氧化物酶。\* 表示显著相关( $P < 0.05$ ), \*\* 表示极显著相关( $P < 0.01$ )。下表同。

Note: TSS. Total soluble solids; TA. Titratable acid; MDA. Malondialdehyde; GSH. Reduced glutathione; AsA. Ascorbic acid; SOD. Super-oxide dismutase; CAT. Catalase; APX. Ascorbate peroxidase; POD. Peroxidase. \* indicates significant correlation ( $P < 0.05$ ), \*\* indicates extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ). The same below.

表 2 CK 蜂糖李果实贮藏品质和 ROS 代谢各指标的相关性

Table 2 Correlation between storage quality and ROS metabolism indexes of CK 'Fengtang' plum fruit

指标 Index	硬度 Firmness	失重率 Wight loss rate	腐烂率 Decay rate	呼吸强度 Respiratory intensity	TSS 含量 TSS content	TA 含量 TA content	MDA 含量 MDA content	钙含量 Calcium content
硬度 Firmness	1.000							
失重率 Wight loss rate	-0.967**	1.000						
腐烂率 Decay rate	-0.906*	0.806	1.000					
呼吸强度 Respiratory intensity	0.000	-0.087	0.155	1.000				
TSS 含量 TSS content	-0.722	0.606	0.776	0.605	1.000			
TA 含量 TA content	0.983**	-0.945**	-0.930**	-0.164	-0.798	1.000		
MDA 含量 MDA content	-0.853*	0.705	0.942**	0.169	0.730	-0.861*	1.000	
钙含量 Calcium content	-0.901*	0.771	0.982**	0.212	0.826*	-0.920**	0.976**	1.000
$O_2^-$ 产生速率 $O_2^-$ production rate	0.530	-0.674	-0.452	0.091	-0.112	0.564	-0.274	-0.316
$H_2O_2$ 含量 $H_2O_2$ content	-0.569	0.425	0.666	0.768	0.881*	-0.672	0.737	0.746
GSH 含量 GSH content	-0.482	0.278	0.778	0.457	0.673	-0.556	0.836*	0.809
AsA 含量 AsA content	-0.347	0.182	0.255	0.163	0.492	-0.295	0.476	0.428
SOD 活性 SOD activity	0.545	-0.625	-0.510	0.641	0.020	0.473	-0.327	-0.376
CAT 活性 CAT activity	0.113	-0.268	-0.013	0.826*	0.467	0.016	0.172	0.134
APX 活性 APX activity	-0.145	-0.070	0.486	0.356	0.320	-0.205	0.632	0.529
POD 活性 POD activity	-0.980**	0.917*	0.968**	0.089	0.789	-0.984**	0.900*	0.957**

指标 Index	$O_2^-$ 产生速率 $O_2^-$ production rate	$H_2O_2$ 含量 $H_2O_2$ content	GSH 含量 GSH content	AsA 含量 AsA content	SOD 活性 SOD activity	CAT 活性 CAT activity	APX 活性 APX activity	POD 活性 POD activity
$O_2^-$ 产生速率 $O_2^-$ production rate	1.000							
$H_2O_2$ 含量 $H_2O_2$ content	-0.080	1.000						
GSH 含量 GSH content	-0.033	0.762	1.000					
AsA 含量 AsA content	0.541	0.519	0.316	1.000				
SOD 活性 SOD activity	0.659	0.280	-0.045	0.374	1.000			
CAT 活性 CAT activity	0.518	0.708	0.407	0.591	0.866*	1.000		
APX 活性 APX activity	0.139	0.555	0.902*	0.238	0.114	0.429	1.000	
POD 活性 POD activity	-0.492	0.631	0.620	0.316	-0.534	-0.062	0.279	1.000

### 3 讨论

硬度、腐烂率、失重率、TSS 及 TA 含量是衡量果实贮藏品质的重要指标<sup>[23]</sup>。喷施适宜含量的钙

对防止果实衰老腐烂和保持贮藏品质有重要作用<sup>[24]</sup>。本研究中,在贮藏过程中,腐烂率、失重率和钙含量随着贮藏时间延长而总体升高,硬度和 TA 含量则随着贮藏时间的延长而降低。本研究的相关



性分析结果表明,CK 和  $\text{CaCl}_2$  处理蜂糖李果实硬度与失重率、腐烂率和钙含量呈显著或极显著负相关。在贮藏 0~20 d,  $\text{CaCl}_2$  处理明显降低了贮藏期果实失重率和腐烂率,提高了果实的硬度、钙和 TSS 含量,促进了 TA 含量下降,说明采前喷施  $\text{CaCl}_2$  处理可通过促进钙离子与细胞壁中果胶结合形成有黏结细胞壁作用的 Ca-果胶交联聚合物,提高了果实硬度,抑制细胞壁物质的解聚,减少营养物质消耗,延长果实贮藏期<sup>[25-26]</sup>。王清华等<sup>[12]</sup>等发现,采前喷施醋酸钙处理冬枣后,明显提高了果实硬度和钙含量,加速了果实酸度降低,延长了冬枣的货架期,这与本研究结果一致。

果实的呼吸强度与多种营养物质的分解代谢相关,影响采后果实的贮藏品质和衰老速度<sup>[27]</sup>。本试验中,贮藏期间,与 CK 相比,采前喷施  $\text{CaCl}_2$  明显抑制了采后蜂糖李果实的呼吸强度。LÜ 等<sup>[28]</sup>研究发现,采后使用  $\text{CaCl}_2$  浸泡红树莓果实,可有效抑制其实呼吸强度,从而更好地保持果实贮藏品质,这与本试验结果相似。

当果实品质逐渐下降时,ROS 大量积累,引起脂质过氧化,加速了果实劣变和衰老<sup>[29]</sup>。衰老胁迫下的细胞膜功能障碍与过多的 ROS 物质积累和 MDA 含量有关<sup>[30]</sup>。本研究结果表明,贮藏期间,  $\text{CaCl}_2$  处理和 CK 蜂糖李果实 MDA 含量随着时间的延长先升高后下降;与 CK 相比,采前喷施  $\text{CaCl}_2$  总体可明显降低贮藏期间蜂糖李果实 MDA 和  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量及  $\text{O}_2^-$  产生速率;相关性分析结果表明,CK 和  $\text{CaCl}_2$  处理蜂糖李果实 MDA 含量与腐烂率呈正相关。说明采前喷施  $\text{CaCl}_2$  处理可通过延缓 ROS 积累,减少果实 MDA 的产生,而有效减缓了采后蜂糖李果实腐烂,提高果实耐贮性,这与周君等<sup>[31]</sup>对‘黄金梨’果实的研究结果相似。

果实体内拥有完善的 ROS 清除系统,包括酶促清除系统和非酶促清除系统<sup>[32]</sup>,可通过提高果实抗氧化酶活性和抗氧化物质的含量,消除 ROS 物质积累,从而维持采后果蔬的品质<sup>[33]</sup>。SOD、CAT、APX 和 POD 是植物中清除 ROS 的主要酶,其活性与果实体内的 ROS 水平密切相关<sup>[34]</sup>。SOD 催化果实体内  $\text{O}_2^-$  生成  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  则由 CAT、APX 和 POD 等酶进一步分解,以上 4 种酶共同作用可使果实 ROS 含量在贮藏期间保持较低的水平<sup>[35]</sup>。本研究中,贮藏期间,  $\text{CaCl}_2$  处理和 CK 果实 SOD 和 CAT 活性均呈先上升后下降的趋势。这与巴良杰<sup>[36]</sup>等在火龙果上的研究结果一致。刘绪等<sup>[37]</sup>和

VIVIANA 等<sup>[38]</sup>的研究结果表明,外源钙可以通过提高采后果实 SOD、APX、POD 和 CAT 等抗氧化酶活性,而延缓果实衰老。本研究中,与 CK 相比,采前喷施  $\text{CaCl}_2$  提高了蜂糖李果实 SOD、CAT、APX 和 POD 活性,抑制了  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量和  $\text{O}_2^-$  积累,从而减少了果实的氧化损伤,这与前人研究结果一致。

研究表明,植物可通过内源抗氧化物质(AsA 和 GSH)来调控自身代谢,AsA 作为 APX 的底物,参与催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  分解为  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{O}_2$ ,生成的脱氢抗坏血酸可以在 GSH 的作用下进一步还原为 AsA<sup>[39]</sup>。本试验中,与 CK 相比,采前喷施  $\text{CaCl}_2$  明显提高了蜂糖李果实 APX 活性以及 AsA 和 GSH 含量。凌晨等<sup>[40]</sup>的研究结果表明,冷藏期间,外源钙处理桃果实 AsA 和 GSH 含量较高,从而提高了桃果实的抗氧化能力,这与本研究结果一致。

综上所述,采前喷施  $\text{CaCl}_2$  能维持较高抗氧化酶(SOD、CAT、APX 和 POD)活性、内源抗氧化物质(AsA 和 GSH)含量,从而提高了蜂糖李果实对 ROS 清除能力,减少 ROS 和 MDA 累积。

## 4 结 论

贮藏 0~25 d,与 CK 相比,采前喷施  $\text{CaCl}_2$ ,提高了蜂糖李果实硬度和 TSS 含量,降低了果实呼吸强度、腐烂率、失重率、TA 含量,从而改善果实品质,并维持了较高抗氧化酶(SOD、CAT、APX、POD)活性以及较高内源抗氧化物质(AsA 和 GSH)含量,从而有效地提高了果实对 ROS 清除能力,降低 ROS( $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{O}_2^-$ )和 MDA 的产生与积累。综上所述,采前喷施  $\text{CaCl}_2$  处理可以使采后蜂糖李保持较高的品质及抗氧化活性,从而提高了果实耐贮性,延长了果实保鲜期。

## 【参考文献】

- [1] 张毅,李用奇,肖祎,等. 新品种“蜂糖李”的选育及栽培技术[J]. 中国南方果树,2018,47(6):146-148.  
ZHANG Y, LI Y Q, XIAO Y, et al. Breeding and cultivation techniques of a new plum variety ‘Fengtang’ plum [J]. South China Fruit Trees, 2018, 47(6): 146-148.
- [2] 张琴,林欣,彭俊森,等. 外源草酸对采后蜂糖李果实软化和细胞壁降解的影响[J]. 食品与发酵工业,2023,49(6):64-70.  
ZHANG Q, LIN X, PENG J S, et al. Effects of exogenous oxalic acid on fruit softening and cell wall degrading of ‘Fengtang’ plum [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(6): 64-70.
- [3] 巴良杰,罗冬兰,曹森,等. 自发气调包装对蜂糖李采后生理及

- 贮藏品质的影响 [J]. 中国南方果树, 2019, 48(3): 105-111.
- BA L J, LUO D L, CAO S, et al. Effects of spontaneous modified atmosphere packaging on postharvest physiology and storage quality of 'Fengtang' plum [J]. South China Fruit Trees, 2019, 48(3): 105-111.
- [4] 冯雪立, 董晓庆, 朱守亮, 等. 褪黑素处理对蜂糖李果实的保鲜效应 [J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 265-271.
- FENG X L, DONG X Q, ZHU S L, et al. Effects of melatonin treatments on preservation of 'Fengtang' plum fruits [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(6): 265-271.
- [5] 董晓庆, 石其宇, 卢梅, 等. 草酸处理对采后蜂糖李果实贮藏品质的影响 [J]. 食品科技, 2020, 45(10): 53-59.
- DONG X Q, SHI Q Y, LU M, et al. Effects of oxalic acid treatment on storage quality of postharvest 'Fengtang' plum fruit [J]. Food Science and Technology, 2020, 45(10): 53-59.
- [6] 汪凯莎, 何映霞, 陶冶. 复合涂膜处理对蜂糖李采后低温贮藏品质的影响 [J]. 食品科技, 2023, 48(7): 29-36.
- WANG K S, HE Y X, TAO Y. Effects of composite coating treatment on postharvest storage quality of 'Fengtang' plum in low-temperature [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(7): 29-36.
- [7] 王美红, 李一诺, 葛柯良, 等. 1-MCP(1-甲基环丙烯)与 CaCl<sub>2</sub> 处理对桃果实采后贮藏品质及生理的影响 [J]. 植物生理学学报, 2021, 57(5): 1113-1122.
- WANG M H, LI Y N, GE K L, et al. Effects of 1-MCP (1-methylcyclopropene) and CaCl<sub>2</sub> treatment on postharvest storage quality and physiology of peach fruit [J]. Plant Physiology Journal, 2021, 57(5): 1113-1122.
- [8] 李甜荣, 汤静, 祝竞芳, 等. 氯化钙处理对鲜切火龙果品质及  $\gamma$ -氨基丁酸积累的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(4): 769-776.
- LI T R, TANG J, ZHU J F, et al. Effects of calcium chloride treatment on quality and  $\gamma$ -aminobutyric acid accumulation of fresh-cut pitaya fruit [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2022, 45(4): 769-776.
- [9] 谷会, 朱世江, 侯晓婉, 等. 氯化钙处理对菠萝采后黑心病及贮藏品质的影响 [J]. 食品科学, 2020, 41(9): 161-167.
- GU H, ZHU S J, HOU X W, et al. Effects of calcium chloride treatment on postharvest blackheart and storage quality of pineapple [J]. Food Science, 2020, 41(9): 161-167.
- [10] GUO C E, HE Y X, CUI Q Y, et al. Influence of preharvest calcium spray and postharvest chitosan coating methods on quality of Chinese dwarf cherry (*Cerasus humilis* (Bge.) Sok) fruits during cold storage [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2020, 95(6): 773-781.
- [11] 张聪聪, 刘静珂, 吉茹, 等. 挂树和钙处理对櫻桃果实贮藏品质的影响 [J]. 食品科学, 2020, 41(5): 230-236.
- ZHANG C C, LIU J K, JI R, et al. Effects of tree-hanging time and calcium treatment on storage quality of cherry fruit [J]. Food Science, 2020, 41(5): 230-236.
- [12] 王清华, 杜振宇, 杨守军, 等. 采前喷施氯化钙与醋酸钙对冬枣品质和贮藏性的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020(1): 141-146.
- WANG Q H, DU Z Y, YANG S J, et al. Effects of pre-harvest application of calcium chloride and calcium acetate on fruit quality and storability of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2020(1): 141-146.
- [13] 王世明. 果蔬钙处理有利于提升岳冠苹果贮藏品质 [J]. 中国果业信息, 2020, 37(3): 51.
- WANG S M. Calcium treatment of fruits and vegetables is beneficial to improve the storage quality of Yueguan apple [J]. Chinese Fruit Information, 2020, 37(3): 51.
- [14] 李君兰, 杨澜, 吴潇霞, 等. 葡萄糖酸钙采前处理对鲜枣果实低温贮藏品质及活性氧代谢的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(7): 144-150.
- LI J L, YANG L, WU X X, et al. Effects of preharvest spraying of calcium gluconate on fresh jujube fruit storage quality and reactive oxygen metabolism during refrigerated storage [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(7): 144-150.
- [15] ZHI H H, LIU Q Q, DONG Y, et al. Effect of calcium dissolved in slightly acidic electrolyzed water on antioxidant system, calcium distribution, and cell wall metabolism of peach in relation to fruit browning [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2017, 92(6): 621-629.
- [16] MARTINS V, GARCIA A, ALHINHO A T, et al. Vineyard calcium sprays induce changes in grape berry skin, firmness, cell wall composition and expression of cell wall-related gene [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 150: 49-55.
- [17] 李辉, 林河通, 袁芳, 等. 1-MCP 处理对'油奈'果实采后生理和品质的影响 [J]. 热带作物学报, 2012, 33(2): 279-285.
- LI H, LIN H T, YUAN F, et al. Effects of 1-MCP treatment on postharvest physiology and quality of 'Younai' fruits [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(2): 279-285.
- [18] 石其宇, 董晓庆, 黄世安, 等. 草酸对采后蜂糖李果实品质和抗氧化代谢的影响 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(15): 299-306.
- SHI Q Y, DONG X Q, HUANG S A, et al. Effects of oxalic acid treatment on fruit quality and antioxidant metabolism of postharvest 'Fengtang' plum fruit [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(15): 299-306.
- [19] WANG J W, ZHOU X, ZHOU Q, et al. Low temperature conditioning alleviates peel browning by modulating energy and lipid metabolisms of 'Nanguo' pears during shelf life after cold storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 131: 10-15.
- [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 J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [21] 陈莲, 林钟铨, 林河通, 等. 安喜布处理对台湾青枣果实果皮活性氧代谢和细胞膜透性的影响 [J]. 热带作物学报, 2013, 34(4): 704-709.
- CHEN L, LIN Z Q, LIN H T, et al. AnSiP-S (1-MCP) treat-

- ment on the active oxygen metabolism and membrane permeability in the pericarp of harvested Indian jujube fruit [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(4): 704-709.
- [22] QIAN C L, HE Z P, ZHAO Y Y, et al. Maturity-dependent chilling tolerance regulated by the antioxidative capacity in postharvest cucumber (*Cucumis sativus* L.) fruits [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(3): 626-633.
- [23] CHENG S, YU Y, GUO J, et al. Effect of 1-methylcyclopropane and chitosan treatment on the storage quality of jujube fruit and its related enzyme activities [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 265(30): 109281.
- [24] 张婷婷, 周倩, 郝邢维, 等. 采前钙处理对大红袍李果实贮藏品质的影响 [J]. 食品科技, 2022, 47(9): 15-20.
- ZHANG T T, ZHOU Q, HAO X W, et al. Effect of pre-harvest calcium treatment on storage quality of Dahongpao plum fruit [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(9): 15-20.
- [25] 李磊, 涂郑禹, 宋翔, 等. 不同处理对采后“南果梨”贮藏期间果皮钙形态及褐变的影响 [J]. 北方园艺, 2016(4): 128-132.
- LI L, TU Z Y, SONG X, et al. Effects of different treatments on peel calcium fractions and browning of postharvest ‘Nan Guo’ pear fruit during storage [J]. Northern Horticulture, 2016(4): 128-132.
- [26] 邓佳, 史正军, 王连春, 等. 钙处理对葡萄柚果实细胞壁物质代谢及其相关基因表达的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 450-458.
- DENG J, SHI Z J, WANG L C, et al. Effects of calcium treatment on cell wall material metabolism and related enzyme activities and gene expression in grapefruit (*Citrus paradisi* Macf.) [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(2): 450-458.
- [27] GAO H, ZHANG Z K, CHAI H K, et al. Melatonin treatment delays postharvest senescence and regulates reactive oxygen species metabolism in peach fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 118(8): 103-110.
- [28] LÜ J Y, HAN X Z, LIN B, et al. Effects of calcium chloride treatment on softening in red raspberry fruit during low-temperature storage [J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(10): e13419.
- [29] TIAN S P, QIN G Z, LI B Q. Reactive oxygen species involved in regulating fruit senescence and fungal pathogenicity [J]. Plant Molecular Biology, 2013, 82(6): 593-602.
- [30] SUN J Z, LIN H T, ZHANG S, et al. The roles of ROS production-scavenging system in *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griff. & Maubl-induced pericarp browning and disease development of harvested Longan fruit [J]. Food Chemistry, 2018, 247: 16-22.
- [31] 周君, 肖伟, 陈修德, 等. 外源钙对‘黄金梨’叶片光合特性及果实品质的影响 [J]. 植物生理学报, 2018, 54(3): 449-455.
- ZHOU J, XIAO W, CHEN X D, et al. Effects of exogenous calcium on leaf photosynthetic characteristics and fruit quality of ‘Golden Pear’ [J]. Plant Physiology Journal, 2018, 54(3): 449-455.
- [32] WANG J, MEI L, LI G, et al. Effect of intermittent warming on alleviation of peel browning of ‘Nanguo’ pears by regulation energy and lipid metabolisms after cold storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 142: 99-106.
- [33] LEI Z G, WANG J W, ZHOU B, et al. Calcium inhibited peel browning by regulating enzymes in membrane metabolism of ‘Nanguo’ pears during post-ripeness after refrigerated storage [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 244: 15-21.
- [34] 林毅雄, 林河通, 陈艺晖, 等. 采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮活性氧代谢的影响 [J]. 食品科学, 2019, 40(19): 242-248.
- LIN Y X, LIN H T, CHEN Y H, et al. Effects of pre-harvest spraying of diethyl aminoethyl hexanoate on active oxygen metabolism in pericarp of postharvest Longan fruit during postharvest storage [J]. Food Science, 2019, 40(19): 242-248.
- [35] 唐金艳, 孙钧政, 李美玲, 等. 酸性电解水对采后龙眼果实贮藏期间活性氧代谢的影响 [J]. 食品科学, 2022, 43(15): 185-190.
- TANG J Y, SUN J Z, LI M L, et al. Effect of acidic electrolyzed water on reactive oxygen species metabolism of postharvest Longan fruit during storage [J]. Food Science, 2022, 43(15): 185-190.
- [36] 巴良杰, 曹森, 马超, 等. 采前喷钙处理对火龙果贮藏品质的影响 [J]. 食品科技, 2020, 45(8): 50-55.
- BA L J, CAO S, MA C, et al. Effects of pre-harvest calcium spraying on storage quality of pitaya [J]. Food Science and Technology, 2020, 45(8): 50-55.
- [37] 刘绪, 李欢, 黄潇潇, 等. 改良浸钙法对甜樱桃保鲜效果的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(3): 390-396.
- LIU X, LI H, HUANG X Y, et al. Effect of modified calcium immersion treatment on preservation of sweet cherry [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2021, 48(3): 390-396.
- [38] VIVIANA M, CRISTIANO S, SOFIA S, et al. Vineyard calcium sprays reduce the damage of postharvest grape berries by stimulating enzymatic antioxidant activity and pathogen defense genes, despite inhibiting phenolic synthesis [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 162: 48-55.
- [39] MEYER A J. The integration of glutathione homeostasis and redox signaling [J]. Journal Plant Physiology, 2008, 165(13): 1390-1403.
- [40] 凌晨, 谢兵, 洪羽婕, 等. 外源钙和钙调素拮抗剂对冷藏桃果实耐冷性的影响 [J]. 食品科学, 2019, 40(1): 240-248.
- LING C, XIE B, HONG Y J, et al. Effects of exogenous calcium and calmodulin antagonists on cold tolerance of cold-stored peach fruits [J]. Food Science, 2019, 40(1): 240-24.