

孔伟君,李文博,赵亚婷,等.采前喷施水杨酸对采后西梅贮藏品质及抗氧化代谢的影响[J].食品工业科技,2026,47(9):380-388.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060045

KONG Weijun, LI Wenbo, ZHAO Yating, et al. Effects of Pre-harvest Spraying Salicylic Acid on Storage Quality and Antioxidant Metabolism of Post-harvest Prunes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 380-388. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060045

· 贮运保鲜 ·

采前喷施水杨酸对采后西梅贮藏品质及 抗氧化代谢的影响

孔伟君,李文博,赵亚婷,张学梅,张鑫,范雅青,张新祺,朱璇*
(新疆农业大学食品科学与药学院,新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:为探究采前喷施水杨酸(salicylic acid, SA)对采后西梅贮藏品质及抗氧化代谢的影响,本实验以新疆‘法兰西’西梅为试材,分别在西梅发育的四个时期(坐果期、膨大期、转色期及成熟期)喷施不同浓度(1、2、4 mmol/L) SA,对照组喷施清水。采收后的西梅果实于 $1.0\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度90%~95%条件下贮藏,并每隔15 d取样测定果实品质及抗氧化代谢等相关指标,直至90 d结束实验。结果表明,采前喷施SA能够显著保持西梅果实在采后贮藏期间硬度、可溶性固形物含量与可滴定酸水平,抑制果实色泽转黑和呼吸作用以及失重率的上升,其中采前喷施2 mmol/L SA组效果最佳。贮藏结束时,采前喷施2 mmol/L SA组西梅果实的超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxydas, APX)和谷胱甘肽还原酶(gluathione reductase, GR)的活性分别是对照组的1.17倍、1.40倍、1.54倍、1.23倍、1.26倍($P<0.05$),抗坏血酸(ascorbic acid, AsA)和谷胱甘肽(glutathione, GSH)的含量是对照组的2.70倍和1.08倍,提高了西梅果实抗氧化酶活性,有效维持了AsA与GSH含量,同时,抑制超氧阴离子自由基($\text{O}_2^{\cdot-}$)产生速率、过氧化氢(H_2O_2)和丙二醛(malondialdehyde, MDA)的积累以及细胞膜透性的上升。这表明采前喷施SA可通过增强采后西梅果实的抗氧化代谢能力,维持其贮藏品质。

关键词:西梅,水杨酸,贮藏品质,抗氧化代谢

中图分类号:TS255.36

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2026)09-0380-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060045



本文网刊:

Effects of Pre-harvest Spraying Salicylic Acid on Storage Quality and Antioxidant Metabolism of Post-harvest Prunes

KONG Weijun, LI Wenbo, ZHAO Yating, ZHANG Xuemei, ZHANG Xin, FAN Yaqing,
ZHANG Xinqi, ZHU Xuan*

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

Abstract: In order to investigate the effects of pre-harvest salicylic acid (SA) spraying on post-harvest quality and antioxidant metabolism of prunes (*Prunus domestica* L.), 'French' prune trees in Xinjiang were treated with SA solutions at concentrations of 1, 2, or 4 mmol/L. Applications were made during four key developmental stages: fruit set, expansion, color change, and maturity. A control group received water sprays. Following harvest, fruit were stored at $1.0\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 90%~95% relative humidity. Quality parameters and antioxidant metabolism indicators were assessed at 15 days intervals over the 90 days storage period. Results demonstrated that pre-harvest spraying of SA could significantly maintain the hardness, soluble solids content and titratable acid level of plum fruits during post-harvest storage, and inhibit the color blackening, respiration and weight loss rate of fruits. The 2 mmol/L SA treatment proved most effective. At the end of

收稿日期: 2025-06-06

基金项目: 自治区重点研发计划项目(2022B02018-2);新疆维吾尔自治区天池英才引进计划-青年博士人才项目。

作者简介: 孔伟君(2001-),男,硕士研究生,研究方向:果蔬贮藏及物流工程,E-mail: 18997729837@163.com。

*通信作者: 朱璇(1971-),女,博士,教授,研究方向:果蔬贮藏及物流工程,E-mail: 13999877961@126.com。

storage, the activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD), ascorbate peroxidase (APX), and glutathione reductase (GR) in the 2 mmol/L SA-treated prunes were 1.17, 1.40, 1.54, 1.23, and 1.26 fold those of the control group, respectively ($P<0.05$). The contents of ascorbic acid (AsA) and glutathione (GSH) were 2.70 and 1.08 fold those of the control group, enhancing the antioxidant enzyme activities and effectively maintaining AsA and GSH levels. Additionally, the production rate of superoxide anion (O_2^-), hydrogen peroxide (H_2O_2), and malondialdehyde (MDA) accumulation, as well as cell membrane permeability, were suppressed. This indicated that spraying SA before harvest could maintain the post-harvest quality of prunes by enhancing their antioxidant metabolism capacity.

Key words: prune; salicylic acid (SA); storage quality; antioxidant metabolism

西梅(*Prunus domestica* L.)属蔷薇科李属植物,原产于欧洲与西亚地区^[1]。近年来,新疆因其得天独厚的地理条件和自然资源,西梅种植面积逐年呈上升趋势,产生了良好的经济与社会效益,但西梅属于呼吸跃变型果实,其水分与含糖量高,加之集中采收期间温度较高与果实堆积会引发呼吸代谢激增,若采摘后的西梅果实贮藏不当,会加速果实衰老与品质劣变,影响西梅的食用价值和商品价值。果蔬采前处理对其贮藏品质有重要的影响,也是采后贮藏保鲜研究的重点。

果蔬采后贮藏期间因自身代谢与外界逆境胁迫积累的活性氧(reactive oxygen species, ROS)会引发脂质过氧化反应,破坏细胞膜结构完整性,导致膜损伤和丙二醛积累,引发代谢紊乱,加速果蔬衰老^[2]。水杨酸(salicylic acid, SA)是一种 β -羟基苯甲酸类植物内源信号分子与生长调节物质。作为新型植物激素,能够调节植物的抗氧化代谢,影响植物的生长衰老^[3-4]。近年来,SA在园艺作物采后处理中开展了较为广泛的研究。相关研究表明,SA处理能够有效抑制鲜莲^[5]、番茄^[6]、橙子^[7]等果实的呼吸作用与蒸腾作用,有效保持果实的贮藏品质;还可通过调控叶绿素代谢及抗氧化系统,延缓西兰花^[8]的黄化进程;还可降低杏^[9]、葡糖^[10]等果实腐烂率,延长果实保鲜期。

SA作为一种能够调节植物生长的信号分子,它可通过植物韧皮部运输,能够调节气孔开闭机制,有效促进植物的光合作用,并能够提高植物气孔对干旱、低温等逆境的响应能力,更好地减少植物体内水分流失,促进植物的生长。近年来,有关SA的研究虽大多聚焦于采后领域,但是通过采前喷施SA来影响果实采后品质也是一个重要的研究方向^[11-12]。相关研究表明,采前SA处理能够保持青椒^[13]、番茄^[14]、树莓^[15]、草莓^[16]等果实的贮藏品质,延缓红地球葡萄^[17]果实的软化。以上研究表明,不同种类果实的生理特性与代谢途径不同,会引起贮藏效果的差异,因此,采前喷施SA所产生的效果呈现出显著的果实特异性。目前,关于采前喷施SA对西梅采后贮藏品质影响的研究鲜见报道。

为此,本研究以新疆‘法兰西’西梅为对象,于果实坐果期、膨大期、转色期及成熟期分别喷施1、2、4 mmol/L SA。采收后测定品质指标筛选出最佳的SA浓度,并基于抗氧化代谢探究SA对西梅果实贮

藏品质的影响,为西梅采后保鲜创新策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘法兰西’西梅于2024年8月22日采摘于新疆喀什疏附县,并于采后12 h内运抵新疆农业大学食品科学与药学学院实验室,预冷24 h后贮藏于 1.0 ± 1.0 °C冷库中,选取大小、成熟度(硬度为 24.5 ± 0.5 N、可溶性固形物为 $22.5\%\pm 0.5\%$)一致且无机械损伤的西梅作为试材;三氯乙酸、硫代巴比妥酸、无水乙醇、邻苯二酚、愈创木酚、丙酮、2,6-二氯酚、核黄素、水杨酸等均为国产分析纯,天津市光复科技发展有限公司; O_2^- 产生速率检测试剂盒、 H_2O_2 含量检测试剂盒 苏州梦犀生物医药科技有限公司。

GY-4果实硬度计 山东优云谱光电科技有限公司;TS-7036分光色差仪 广东三恩时科技有限公司;PAL-BX ACID F5型糖酸度计 ATAGO(爱拓)中国分公司;UV-1700型紫外可见分光光度计 岛津公司;IKA-A11基础分析研磨机 南京天普生物科技有限公司;3HBRI型高速冷冻离心机 赫西仪器有限公司;SX-MD16I型动力喷雾机 市下控股有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 喷施处理

1.2.1.1 溶液配制 分别称取1.38、2.76、5.52 g水杨酸加清水不断搅拌,配制为1 L水杨酸溶液,再分别加入9 L清水,充分混匀,配制成浓度分别为1、2、4 mmol/L的SA溶液。

1.2.1.2 田间喷施 参照Wang等^[18]的方法,选取田间通风、光照良好且长势均匀的西梅果树若干,采用单株随机组合设计。在果实发育的坐果期(花后30 d)、膨大期(花后60 d)、转色期(花后90 d)和成熟期(花后120 d),于晴天17:00~19:00,使用动力喷雾机对树枝叶均匀喷施1、2、4 mmol/L SA溶液(以清水为对照,CK)。喷施以叶片均匀湿润为准,每组浓度喷施10棵树(单组处理量10 L溶液),重复3次并标记。果实成熟后采摘,12 h内运回实验室,预冷24 h后置于 1.0 ± 1 °C冷库贮藏,每15 d取样测定。

1.2.2 指标测定

1.2.2.1 品质指标 色泽:使用色差仪,以赤道为界

在果实两侧各取3个点测定,记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值,每组处理随机测10个果实。

硬度:采用硬度计(探头直径3.55 mm)测定。

SSC与TA含量:使用糖酸度计测定。

呼吸强度:参照曹建康等^[19]的方法测定。采用静置法测定,根据空白与样品消耗草酸溶液的差值,计算样品在单位时间内释放的 CO_2 量,结果以 $\text{mg CO}_2/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 表示。

失重率:采用重量差值法。贮藏前测定四组样品初始重量(W_0),每15 d取样称量当前重量(W_t)。按下列公式计算失重率。

$$\text{失重率}(\%) = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100$$

式中, W_0 为初始重量,kg; W_t 为贮藏第t天重量,kg。

1.2.2.2 还原型抗坏血酸(ascorbic acid, AsA)含量、谷胱甘肽(glutathione, GSH)含量 参考曹建康等^[19]的方法进行测定。还原型抗坏血酸含量测定采用2,6-二氯酚靛酚滴定法,单位为 $\text{mg}/100\text{ g FW}$,谷胱甘肽含量测定采用分光光度计法,单位表示为 $\mu\text{mol}/\text{g FW}$ 。

1.2.2.3 超氧阴离子自由基($\text{O}_2^{\cdot-}$)产生速率、过氧化氢(H_2O_2)含量 按照 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率检测试剂盒、 H_2O_2 含量检测试剂盒说明进行测定。

1.2.2.4 抗氧化酶活性 SOD、CAT、POD、APX、GR活性的测定,参照曹建康等^[19]的方法稍作修改。配制磷酸缓冲液、各类底物溶液、反应终止液及显色剂等试剂;称取1~2 g西梅冻样,SOD与CAT分别加入经过预冷的5 mL含有5 mmol/L和5%PVP的磷酸缓冲液;POD加入经过预冷的5 mL含有1 mmol PEG、4% PVPP的磷酸缓冲液;APX、GR分别加入经过预冷的5 mL含有0.1 mol/L pH 7.5的磷酸缓冲液,在冰浴下研磨,4℃、12000×g离心30 min得上清粗酶液;SOD在560 nm测吸光度计算活性;CAT、POD、APX、GR分别在240、470、290、340 nm测吸光度,并按照SOD抑制硝基蓝四唑在光下的还原作用来确定酶活性的大小;CAT为每分钟分解1 $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2$ 所需的酶量;POD为每分钟催化氧化1 μmol 愈创木酚所需的酶量;APX为每分钟氧化1 μmol 抗坏血酸所需的酶量;GR为每分钟氧化1 μmol NADPH所需的酶量),结果以 $\text{U}/\text{g FW}$ 表示。

1.2.2.5 细胞膜透性、丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量 参考曹建康等^[19]的方法测定细胞膜透性。采用电导率法,将西梅果实用打孔器与小刀处理成2 mm的小片,后将样品浸泡于去离子水中。根据如下公式计算细胞膜透性(%),重复3次。

$$\text{细胞膜透性}(\%) = \frac{\gamma_1}{\gamma_0} \times 100$$

式中, γ_1 :定时测定溶液电导率, γ_0 :煮沸后总电

导率,以相对电导率表示细胞膜透性。

丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量参考曹建康等^[19]的方法进行测定。将西梅果肉组织匀浆与硫代巴比妥酸试剂在酸性条件下沸水浴反应,生成红棕色产物,通过测定450、532、600 nm处吸光值,根据如下公式计算MDA含量,重复3次。

$$\text{MDA含量}(\text{nmol}/\text{g FW}) = \frac{[6.45 \times (\text{OD}_{532\text{nm}} - \text{OD}_{600\text{nm}}) - 0.56 \times \text{OD}_{450\text{nm}}] \times V}{V_s \times m \times 1000}$$

式中,V:样品提取液总体积,mL; V_s :测定时所取样品提取液体积,mL;m:样品质量,g。

1.3 数据处理

原始数据采用Excel 2019整理,使用SPSS 27.0进行方差分析,差异显著性检验采用Duncan's多重比较和Tukey检验($P < 0.05$ 为显著)。图表由Origin 2019制作。所有实验重复至少3次。

2 结果与分析

2.1 采前喷施水杨酸对采后西梅贮藏品质的影响

2.1.1 色泽 L^* 值表示果实颜色的明亮度,如图1A所示,西梅果实的 L^* 值随贮藏时间的延长呈下降的趋势,表明西梅果实的颜色由亮转暗。贮藏结束(90 d),采前喷施2 mmol/L SA组的西梅果实的 L^* 值分别比采前喷施1、4 mmol/L SA组与对照组高5.61%、11.59%、16.25%($P < 0.05$)。

a^* 值表示果实的红绿值,如图1B所示,随着贮藏时间的延长,西梅果实的 a^* 值整体呈现上升趋势,且采前喷施2 mmol/L SA组西梅果实的 a^* 值始终小于其他三组,贮藏结束(90 d),采前喷施2 mmol/L SA组的西梅果实的 a^* 值分别比采前喷施1、4 mmol/L SA组与对照组低5.35%、7.58%、15.10%($P < 0.05$)。

b^* 值表示果实的黄蓝值,如图1C所示,西梅果实在贮藏过程中的 b^* 值整体呈现下降的趋势,表明西梅果实颜色逐渐转为紫黑色,第15 d开始,采前喷施2 mmol/L SA组西梅果实的 b^* 值始终大于其他三组,贮藏结束(90 d),采前喷施2 mmol/L SA组的西梅果实的 b^* 值分别比采前喷施1、4 mmol/L SA组与对照组高20.16%、42.11%、79.30%($P < 0.05$)。

如图1D所示,贮藏第0 d,西梅果实色泽鲜亮,随贮藏时间延长,果实色泽逐渐由红转黑。贮藏第45 d,对照组西梅果实色泽转色明显,而处理组转色缓慢;贮藏结束(90 d),对照组与处理组西梅果实色泽差距明显,对照组果实色泽转变为黑紫色,而处理组西梅果实色泽保持较好。说明采前喷施SA能够抑制西梅果实色泽转黑,其中采前喷施2 mmol/L SA组效果最优。

2.1.2 硬度、可溶性固形物、可滴定酸含量 硬度、SSC、TA是反映果蔬贮藏品质的关键指标^[20-21]。贮藏期间,各组西梅果实硬度均持续下降,但采前喷施2 mmol/L SA处理的果实硬度始终显著高于其他三组;贮藏结束时(90 d),采前喷施1、2、4 mmol/L SA组的硬度分别是对照组的1.19倍、1.33倍、1.13

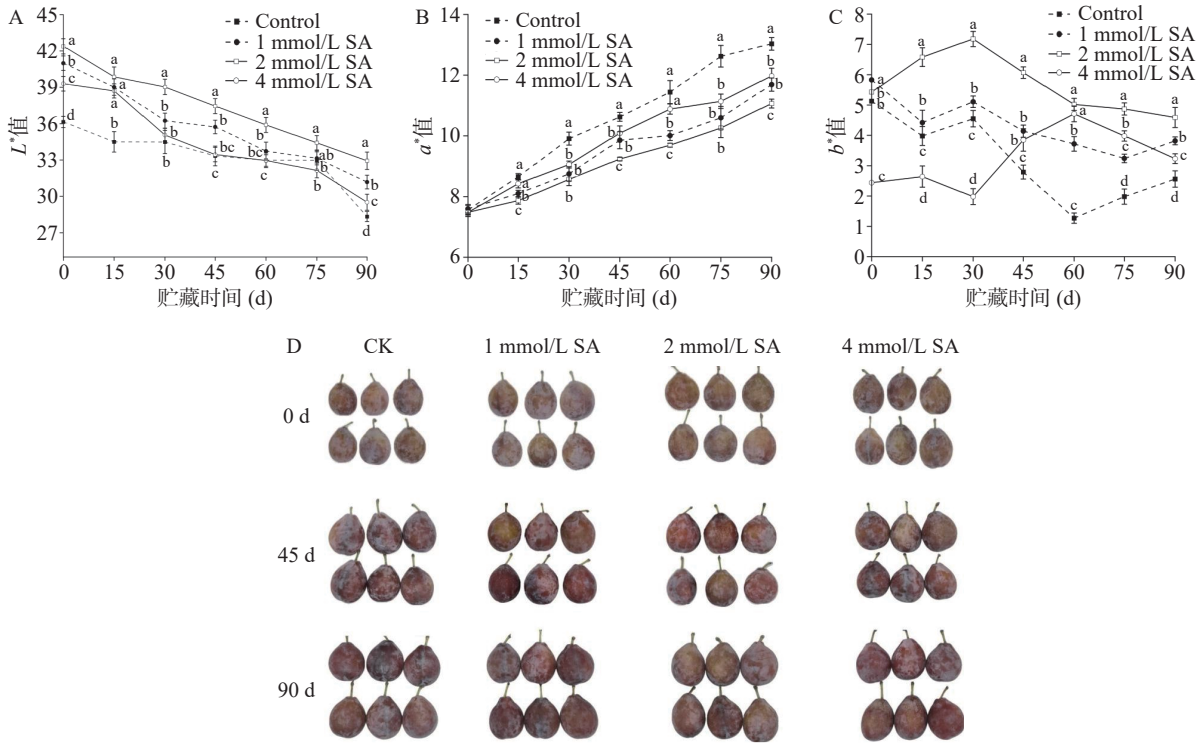


图 1 采前喷施 SA 对采后西梅果实色泽的影响

Fig.1 Effect of spraying SA before harvest on the color of postharvest prune fruit

注: 不同小写字母表示相同贮藏时间下处理组与对照组差异显著 ($P < 0.05$), 图 2~图 3 同。

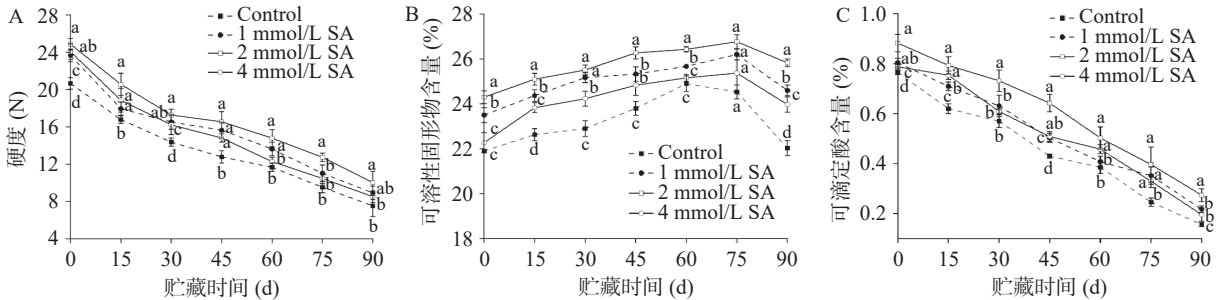


图 2 采前喷施 SA 对采后西梅果实硬度(A)、可溶性固形物含量(B)、可滴定酸含量(C)的影响

Fig.2 Effects of spraying SA before harvest on hardness (A), soluble solids content (B) and titratable acid content (C) of postharvest prune fruit

倍 ($P < 0.05$)。结果表明, 采前喷施 SA 能够有效延缓采后西梅硬度的下降。

如图 2B 所示, 西梅果实的可溶性固形物含量随贮藏进程表现为先升后降的变化特征。采前喷施 SA 组在贮藏 75 d 时含量最高, 对照组在 60 d 达到最大, 且采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实的可溶性固形物含量始终大于其他三组, 贮藏结束时(90 d), 采前喷施 2 mmol/L SA 组的西梅果实的可溶性固形物含量分别比采前喷施 1、4 mmol/L SA 组和对照组高 5.00%、7.76%、17.25% ($P < 0.05$)。结果表明, 采前喷施 SA 能够有效维持采后西梅可溶性固形物的含量。

如图 2C 所示, 贮藏期间西梅果实的可滴定酸含量呈下降趋势, 但采前喷施 SA 组始终高于对照组, 贮藏结束时(90 d), 采前喷施 1、2、4 mmol/L SA 组可滴定酸含量分别是对照组的 1.39 倍、1.75 倍、

1.25 倍 ($P < 0.05$)。结果表明, 采前喷施 SA 能够有效延缓采后西梅可滴定酸含量的下降。

2.1.3 呼吸强度与失重率 如图 3A 所示, 随贮藏时间延长, 西梅果实呼吸强度表现出先升后降的变化特征。贮藏前期(0~45 d), 西梅果实的呼吸强度迅速增加, 采前喷施 4 mmol/L SA 组西梅果实的呼吸强度在第 30 d 达到最大, 采前喷施 1 mmol/L SA 组与对照组在第 45 d 达到最大, 而采前喷施 2 mmol/L SA 组在第 60 d 达到最大, 贮藏结束时(90 d), 采前喷施 2 mmol/L SA 组的西梅果实的呼吸强度分别比采前喷施 1、4 mmol/L SA 组和对照组低 9.42%、14.62%、20.63% ($P < 0.05$)。结果表明, 采前喷施 SA 能够有效抑制采后西梅的呼吸作用的上升, 推迟呼吸高峰的出现。

失重率反映果实水分损失程度, 如图 3B 所示, 西梅果实的失重率随贮藏时间的延长呈上升趋势, 表

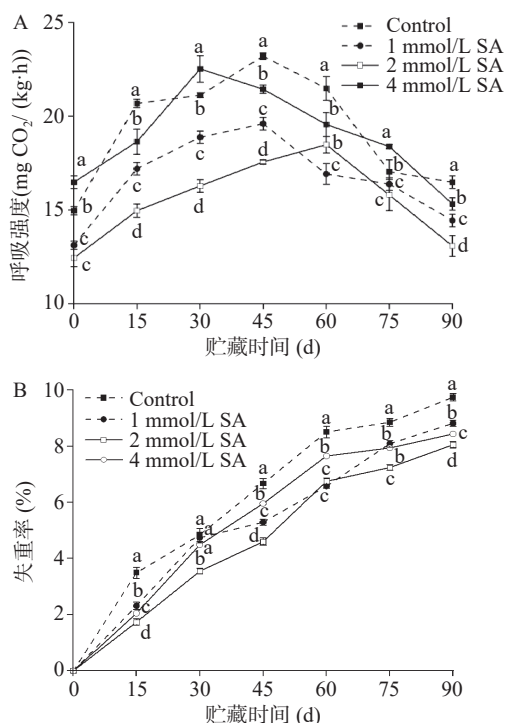


图3 采前喷施 SA 对采后西梅果实呼吸强度(A)和失重率(B)的影响

Fig.3 Effects of spraying SA before harvest on respiration (A) and weight loss rate (B) of postharvest prune fruit

明果实因蒸腾和呼吸作用持续减轻重量。贮藏结束(90 d)时,采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实失重率分别比采前喷施 1、4 mmol/L SA 组和对照组低 8.64%、4.55% 和 17.38% ($P < 0.05$)。

综上,采前喷施 SA 可减缓西梅果实贮藏品质的下降,其中采前喷施 2 mmol/L SA 处理效果最佳,故选用该处理组进行后续试验分析。

2.2 采前喷施水杨酸对采后西梅抗氧化代谢的影响

2.2.1 AsA 与 GSH AsA 与 GSH 是影响果蔬活性氧代谢的重要指标。如图 4A 所示,西梅果实的 AsA 含量在贮藏期间持续下降,但采前喷施 2 mmol/L SA 处理的果实,其 AsA 含量始终高于对照组;贮藏结束时(90 d),采前喷施 2 mmol/L SA 组的西梅果实的 AsA 含量是对照组的 2.70 倍 ($P < 0.05$)。结果表明,采前喷施 SA 能够有效维持采后西梅 AsA 的含量。

如图 4B 所示,贮藏期间西梅果实 GSH 含量呈上升的变化特征,且采前喷施 2 mmol/L SA 处理的果实,其 GSH 含量始终高于对照组;贮藏结束时(90 d),采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实 GSH 含量是对照组的 1.08 倍 ($P < 0.05$)。结果表明,采前喷施 SA 能够有效提高采后西梅 GSH 含量。

2.2.2 O_2^- 产生速率与 H_2O_2 含量 O_2^- 产生速率与 H_2O_2 含量等指标能够直接反映出果蔬衰老程度^[22-23]。如图 5A 所示,西梅果实 O_2^- 产生速率随贮藏时间延长呈先升后降的变化特征。贮藏前中期(0~45 d)两组西梅果实的 O_2^- 产生速率急速上升,且对照组在第 30 d 达到最大,而采前喷施 2 mmol/L

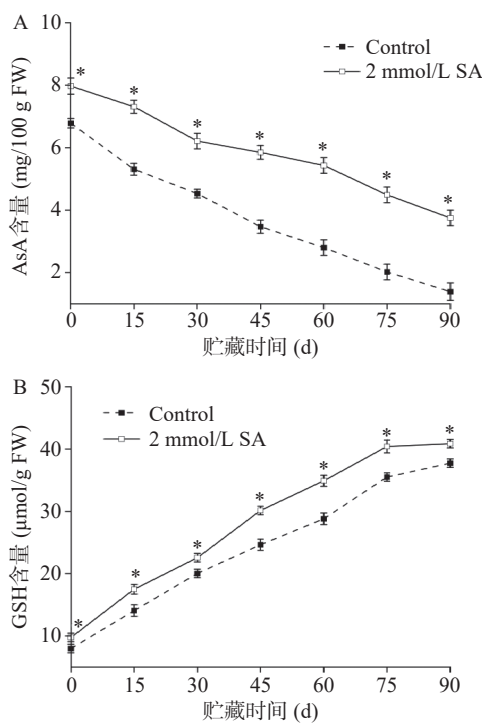


图4 采前喷施 SA 对采后西梅果实 AsA(A)、GSH(B)含量的影响

Fig.4 Effects of spraying SA before harvest on ASA (A) and GSH (B) contents of postharvest prune fruit

注：“*”表示相同贮藏时间下处理组与对照组差异显著 ($P < 0.05$),图 5~图 7 同。

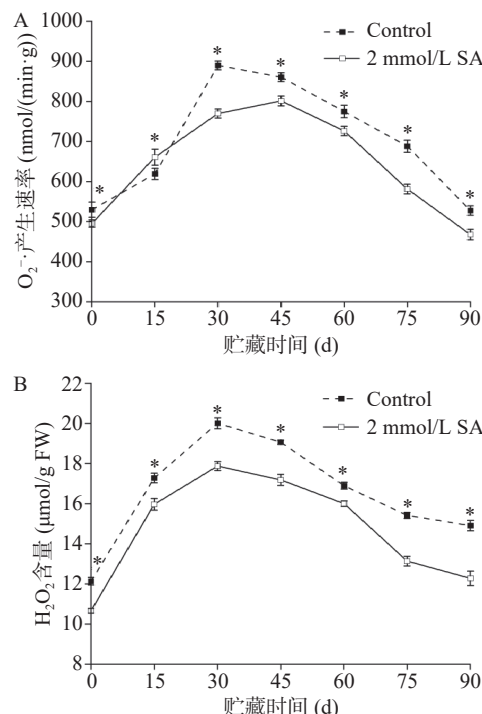


图5 采前喷施 SA 对采后西梅果实 O_2^- 产生速率(A)与 H_2O_2 含量(B)的影响

Fig.5 Effects of spraying SA before harvest on O_2^- production rate (A) and H_2O_2 content (B) of postharvest prune fruit

SA 组则在第 45 d 达到最大;从第 60 d 开始,两组西梅果实 O_2^- 产生速率开始急速下降;贮藏结束(90 d),采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实 O_2^- 产生速率比

对照组低 11.37% ($P < 0.05$)。

如图 5B 所示, 贮藏期间西梅果实 H_2O_2 含量呈先升后降的趋势。在贮藏 0~30 d 间, 采前喷施 2 mmol/L SA 组与对照组西梅果实 H_2O_2 含量急速上升, 都在 30 d 达到最大, 从第 45 d 开始, 对照组西梅果实 H_2O_2 含量缓慢下降, 而采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实 H_2O_2 含量迅速下降; 贮藏结束 (90 d), 采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实 H_2O_2 含量比对照组低 17.62% ($P < 0.05$)。

2.2.3 酶活性 SOD、CAT、POD、GR 和 APX 是抗氧化代谢过程中的关键防御酶, 它们在抵御氧化应激中发挥着重要作用^[24-25]。如图 6A 所示, 西梅果实 SOD 活性随贮藏时间延长呈先升后降的变化特征。在贮藏前期 (0~30 d), 在第 0 d 两组无显著差异, 从第 15 d 开始差异显著, 采前喷施 2 mmol/L SA 组与对照组西梅果实 SOD 活性急速上升, 对照组西梅果实 SOD 活性在 30 d 达到最大; 第 45 d 时, 采前喷施 2 mmol/L SA 组的西梅果实的 SOD 活性达到最大, 是对照组的 1.30 倍 ($P < 0.05$); 第 45~90 d, 采前喷施 2 mmol/L SA 组与对照组西梅果实 SOD 活性逐渐下降, 贮藏结束 (90 d), 采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实 SOD 活性是对照组的 1.17 倍 ($P < 0.05$)。

如图 6B 所示, 贮藏期间西梅果实 CAT 活性呈先升后降的变化特征。在贮藏前中期 (0~45 d), 采前喷施 2 mmol/L SA 组与对照组西梅果实 CAT 活性急速上升, 同时两组西梅果实 CAT 活性在 45 d 达到最大, 且采前喷施 2 mmol/L SA 组的西梅果实的 CAT 活性是对照组的 1.18 倍 ($P < 0.05$); 第 60~90 d, 采前喷施 2 mmol/L SA 组与对照组西梅果实 CAT 活性急速下降, 且采前喷施 2 mmol/L SA 组的西梅

果实的 CAT 活性始终大于对照组; 贮藏结束 (90 d), 采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实 CAT 活性是对照组的 1.40 倍 ($P < 0.05$)。

如图 6C 所示, 西梅果实 POD 活性在贮藏期间呈先升后降的变化特征。在贮藏前期 (0~30 d), 采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实 POD 活性先上升后下降, 而对照组酶活性则缓慢上升; 第 45 d, 采前喷施 2 mmol/L SA 组与对照组西梅果实 POD 活性均达到最大, 且采前喷施 2 mmol/L SA 组的西梅果实的 POD 活性是对照组的 1.25 倍 ($P < 0.05$); 从 60 d 开始, 两组 POD 活性开始缓慢下降; 贮藏结束 (90 d), 采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实 POD 活性是对照组的 1.54 倍 ($P < 0.05$)。

如图 6D 所示, 贮藏期间西梅果实 GR 活性呈先升后降的变化特征。贮藏前期 (0~30 d), 在第 0 d 两组无显著差异, 从第 15 d 开始差异显著 ($P < 0.05$), 采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实 GR 活性急速上升, 而对照组西梅果实 GR 活性缓慢上升; 第 45 d, 两组西梅果实的 GR 活性均达到最大值, 且采前喷施 2 mmol/L SA 组的西梅果实的 GR 活性是对照组的 1.17 倍 ($P < 0.05$); 第 60~90 d, 两组西梅果实 GR 活性急速下降; 贮藏结束 (90 d), 采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实 GR 活性是对照组的 1.23 倍 ($P < 0.05$)。

如图 6E 所示, 西梅果实 APX 活性随贮藏时间延长呈先升后降的变化特征。贮藏前期 (0~30 d), 在第 0 d 两组无显著差异, 从第 15 d 开始差异显著 ($P < 0.05$), 采前喷施 2 mmol/L SA 组与对照组西梅果实 APX 活性急速上升并在 45 d 达到最大, 且采前喷施 2 mmol/L SA 组的西梅果实的 APX 活性是对照组的 1.14 倍 ($P < 0.05$); 从第 60 d 开始, 两组西

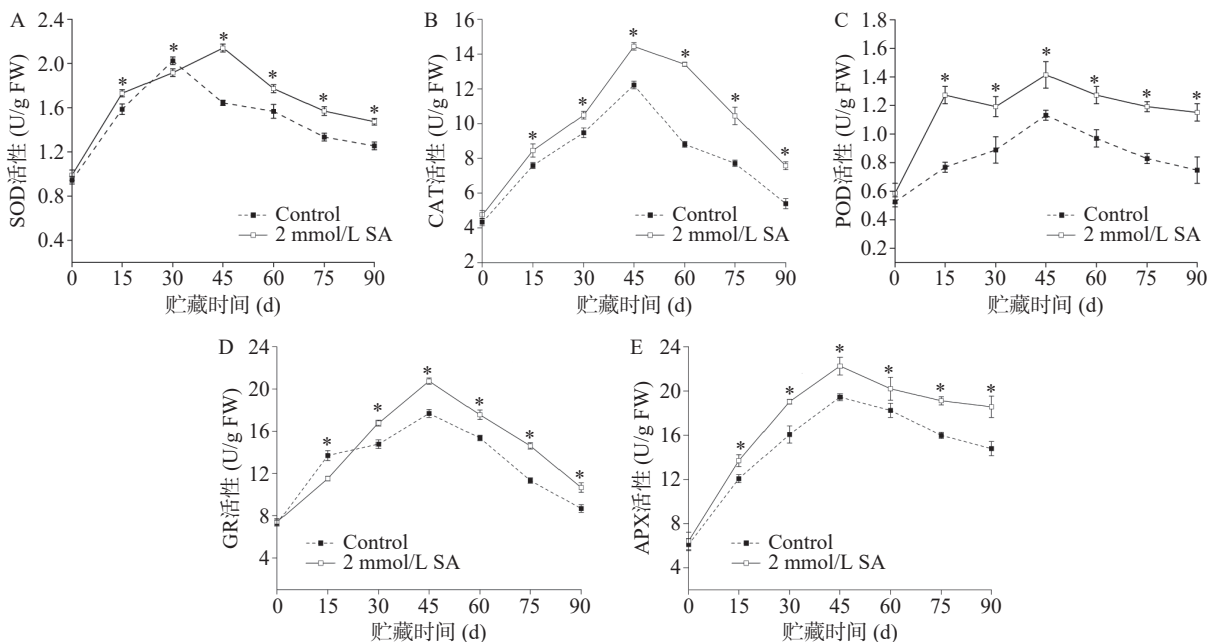


图 6 采前喷施 SA 对采后西梅果实 SOD(A)、CAT(B)、POD(C)、GR(D)、APX(E)活性的影响

Fig.6 Effects of spraying SA before harvest on the activity of SOD (A), CAT (B), POD (C), GR (D), APX (E) of postharvest prune fruit

梅果实 APX 活性开始缓慢下降;贮藏结束(90 d),采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实 APX 活性是对照组的 1.26 倍($P<0.05$)。

综上,采前喷施 SA 能显著提升采后西梅果实的抗氧化酶活性。

2.2.4 果实细胞膜透性与 MDA 含量 细胞膜透性和 MDA 含量是评估果实氧化损伤程度的常用指标^[24,26]。如图 7A 所示,西梅果实细胞膜透性随贮藏时间延长呈上升的变化特征。在第 0 d 两组无显著差异,从第 15 d 开始差异显著($P<0.05$),从第 15 d 开始,对照组西梅果实的细胞膜透性快速增加,而采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实细胞膜透性缓慢增加,且采前喷施 2 mmol/L SA 组的西梅果实的细胞膜透性始终低于对照组;贮藏结束(90 d),采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实细胞膜透性比对照组低 18.71%($P<0.05$)。

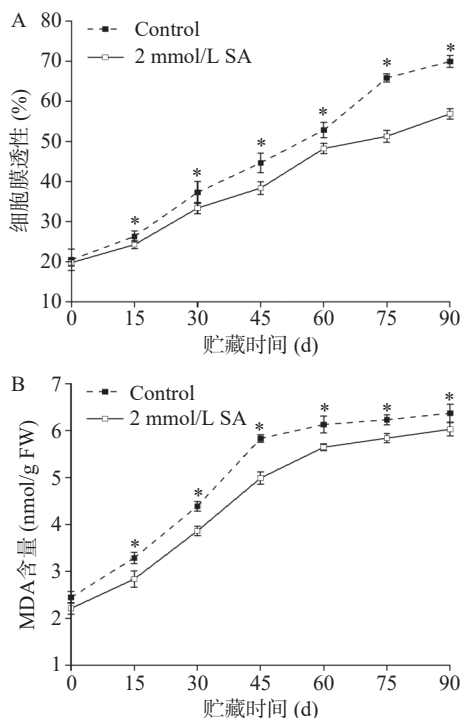


图 7 采前喷施 SA 对采后西梅果实细胞膜透性(A)与 MDA 含量(B)的影响

Fig.7 Effects of spraying SA before harvest on cell membrane permeability (A) and MDA content (B) of postharvest prune fruit

如图 7B 所示,西梅果实 MDA 含量随贮藏时间延长而上升。贮藏前中期(0~45 d),采前喷施 2 mmol/L SA 组与对照组西梅果实中 MDA 含量迅速增加,且对照组的含量始终大于采前喷施 2 mmol/L SA 组,从第 60 d 开始,两组西梅果实中 MDA 含量平缓上升;贮藏结束(90 d),采前喷施 2 mmol/L SA 组西梅果实中 MDA 含量比对照组低 5.37%($P<0.05$)。

综上所述,采前喷施 SA 可显著抑制采后西梅果实细胞膜透性与 MDA 含量的上升。

3 讨论

本研究表明,采前喷施 SA 可显著保持采后西梅果实在贮藏期间的硬度、可溶性固形物含量和可滴定酸水平,抑制西梅果实色泽转黑和呼吸作用以及失重率的上升,推迟呼吸高峰的出现,其中以采前喷施 2 mmol/L SA 组的效果最为显著。何庆^[27]研究也表明,采前喷施 SA 可有效维持红地球葡萄的硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸水平,有效保持其贮藏品质。

果实的衰老与品质的劣变密切相关,衰老过程又与活性氧代谢失调密切相关^[28]。ROS 作为果蔬贮藏过程中的生理代谢产物,在遭受逆境胁迫时会突破抗氧化系统的清除阈值,造成 ROS 过度积累,果蔬细胞组织氧化损伤以致膜脂分解,引发果实组织中的细胞损伤,从而加速果实的衰老进程,导致果实品质劣变^[29-30]。然而,果蔬自身也具备抗氧化防御系统来应对 ROS 代谢失衡。其中 SOD、CAT、POD 是主要的抗氧化酶,SOD 可催化 O_2^- 转化为 H_2O_2 ,后者通过 CAT、POD 等进一步分解为无害的 H_2O 和 O_2 ,维持 ROS 的代谢平衡,保持果蔬的正常生理状态,延缓果蔬衰老进程^[31]。在本研究中,采前喷施 2 mmol/L SA 的西梅果实中 SOD、CAT、POD 酶的活性显著高于对照组,表明该处理能够明显提高抗氧化酶的活性,这些较高的抗氧化酶活性能够有效清除西梅果实组织中过量的 H_2O_2 ,降低 O_2^- 产生速率,减轻膜脂过氧化,抑制了细胞膜透性与 MDA 含量的上升,延缓果实衰老,有效维持其贮藏品质。Giménez 等^[32]研究也表明,采前 SA 处理可增强樱桃果实中抗氧化酶的活性,延缓其衰老进程,有效地保持樱桃的硬度、色泽。

AsA-GSH 循环也是植物中重要的抗氧化体系。AsA 在 APX 作用下将 H_2O_2 还原为 H_2O ,自身经系列反应后,并在 GR 等作用下,利用 GSH 实现再生,不断清除 ROS,维持细胞氧化还原平衡。该循环的功能对于延缓果蔬采后衰老和品质劣变至关重要。一旦其效能减弱,将导致 ROS 积累加剧,加速组织氧化损伤,导致果蔬贮藏品质下降^[33-34]。本研究表明,采前喷施 2 mmol/L SA 组的西梅果实 GR、APX 酶的活性显著高于对照组,有效维持 AsA 与 GSH 在较高水平,避免 ROS 过量积累,有效地保持西梅果实的贮藏品质。虽然,目前采前 SA 处理对果蔬 AsA-GSH 循环的影响少见报道,但杨乾等^[35]研究表明,采后 SA 处理可有效提升甜瓜 AsA-GSH 循环系统活性,增强其采后抗氧化能力,延缓衰老进程,维持其贮藏品质。综上,采前喷施 SA 通过调控西梅果实贮藏期间的活性氧代谢与 AsA-GSH 循环,增强其抗氧化能力,防止膜脂过氧化损伤,延缓果实衰老,维持其贮藏品质。

4 结论

本研究表明,采前整株喷施 2 mmol/L SA 能够

增强采后西梅果实中的 SOD、CAT、POD、APX 和 GR 的活性, 其酶活性分别是对照组的 1.17 倍、1.40 倍、1.54 倍、1.23 倍、1.26 倍 ($P < 0.05$), 显著的维持了 AsA 和 GSH 的含量, 减缓了 O_2^- 产生速率以及 H_2O_2 和 MDA 含量的积累, 抑制细胞膜透性的增加, 并能够有效维持西梅果实色泽、硬度、可溶性固形物质量分数与可滴定酸水平以及抑制呼吸作用和失重率的上升, 推迟呼吸高峰的出现, 明显的保持西梅果实采后的贮藏品质。已有研究表明, 采前喷施 SA 处理在提升果蔬采后保鲜效果方面具有良好的应用前景, 但其与其他保鲜技术的协同应用研究相对较少。因此, 未来的研究可进一步探讨 SA 与其他保鲜技术结合的协同效应, 以期更有效地改善果蔬贮藏品质。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 张新祺, 李文博, 赵亚婷, 等. 西梅果实采后病原真菌的分离鉴定及 LED 蓝光对其抑制作用[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 224–231. [Zhang X Q, Li W B, Zhao Y T, et al. Isolation and identification of pathogenic fungi from postharvest plum fruits and the inhibitory effect of LED blue light on them[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 224–231.]
- [2] 唐伟杰. 茉莉酸甲酯处理对‘金冠’苹果贮藏品质及活性氧代谢的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2024. [Tang W J. Effects of methyl jasmonate treatment on storage quality and active oxygen metabolism of ‘Golden Delicious’ apple[D]. Jinzhou: Bohai University, 2024.]
- [3] 杨帆. 外施水杨酸对菠菜主要营养品质的影响及机理分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2024. [Yang F. Effects of exogenous salicylic acid on the main nutritional quality of spinach and its mechanism[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2024.]
- [4] CHEN C, SUN C, WANG Y, et al. The preharvest and postharvest application of salicylic acid and its derivatives on storage of fruit and vegetables: A review[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 312: 111858.
- [5] 严锐, 韩延超, 吴伟杰, 等. 水杨酸处理对鲜莲采后品质及抗氧化酶活性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(3): 235–245. [Yan R, Han Y C, Wu W J, et al. Effects of salicylic acid treatment on postharvest quality and antioxidant enzyme activity of fresh lotus[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(3): 235–245.]
- [6] KUMAR N, TOKAS J, RAGHAVENDRA M, et al. Impact of exogenous salicylic acid treatment on the cell wall metabolism and ripening process in postharvest tomato fruit stored at ambient temperature[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(6): 2961–2972.
- [7] AMIRI S, NICKNAM Z, RADI M, et al. Postharvest quality of orange fruit as influenced by salicylic acid, acetic acid, and carboxymethyl cellulose coating[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(5): 3912–3930.
- [8] 杨庆喜, 罗曼莉, 周倩, 等. 水杨酸处理对采后西兰花褪绿转黄及营养品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(9): 181–188. [Yang Q X, Luo M L, Zhou Q, et al. Effects of salicylic acid treatment on chlorosis, yellowing and nutritional quality of postharvest broccoli[J]. Food Science, 2024, 45(9): 181–188.]
- [9] BATOOL M, BASHIR O, AMIN T, et al. Effect of oxalic acid and salicylic acid treatments on the post-harvest life of temperate grown apricot varieties (*Prunus armeniaca*) during controlled atmosphere storage[J]. Food Science and Technology International, 2022, 28(7): 557–569.
- [10] GOMES E P, BORGES C V, MONTEIRO G C, et al. Preharvest salicylic acid treatments improve phenolic compounds and biogenic amines in ‘Niagara Rosada’ table grape[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 176: 111505.
- [11] NAZ S, BILAL A, SADDIQ B, et al. Foliar application of salicylic acid improved growth, yield, quality and photosynthesis of pea (*Pisum sativum* L.) by improving antioxidant defense mechanism under saline conditions[J]. Sustainability, 2022, 14(21): 14180.
- [12] SONG W, SHAO H, ZHENG A, et al. Advances in roles of salicylic acid in plant tolerance responses to biotic and abiotic stresses[J]. Plants, 2023, 12(19): 3475.
- [13] DOBÓN-SUÁREZ A, GUTIÉRREZ-POZO M, SERNA-ESCOLANO V, et al. Antioxidant metabolism insights into ripening and senescence delay of green pepper fruit through the salicylic acid preharvest treatment[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1475068.
- [14] BANINAIEM E, DASTJERDI A M. Enhancement of storage life and maintenance of quality in tomato fruits by preharvest salicylic acid treatment[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2023, 7: 1180243.
- [15] 张帆, 王友升, 刘晓艳, 等. 采前水杨酸处理对树莓果实贮藏效果及抗氧化能力的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(10): 308–312. [Zhang F, Wang Y S, Liu X Y, et al. Effects of pre-harvest salicylic acid treatment on storage and antioxidant capacity of raspberry[J]. Food Science, 2010, 31(10): 308–312.]
- [16] DARWISH O S, ALI M R, KHOJAH E, et al. Pre-harvest application of salicylic acid, abscisic acid, and methyl jasmonate conserve bioactive compounds of strawberry fruits during refrigerated storage[J]. Horticulturae, 2021, 7(12): 568.
- [17] 何庆, 郑素慧, 秦南南, 等. 采前喷施水杨酸对红地球葡萄采后果实软化的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(4): 16–23. [He Q, Zheng S H, Qin N N, et al. Effects of pre-harvest spraying of salicylic acid on postharvest fruit softening of Red Globe grape[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(4): 16–23.]
- [18] WANG B, JIANG H, BI Y, et al. Preharvest multiple sprays with sodium nitroprusside promote wound healing of harvested muskmelons by activation of phenylpropanoid metabolism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 158: 110988.
- [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: 50–149. [Cao J K, Jiang W B, Zhao Y M, et al. Postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 50–149.]
- [20] 刘志旭, 朱璇, 赵亚婷, 等. 高浓度 CO_2 短时处理对西梅采后贮藏品质及抗氧化代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 311–318. [Liu Z X, Zhu X, Zhao Y T, et al. Effects of short-term high-concentration CO_2 treatment on postharvest storage quality and antioxidant metabolism of prunes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 311–318.]
- [21] GONG D, BI Y, LI Y, et al. Preharvest elicitors spray improves antioxidant activity, alleviates chilling injury, and maintains quality in harvested fruit[J]. Horticulturae, 2022, 8(12): 1208.

- [22] HOU Y Y, ZHU X, WANG Y, 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.
- [23] ZHAO Y T, ZHU X, HOU Y Y, et al. Postharvest nitric oxide treatment delays the senescence of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit during cold storage by regulating reactive oxygen species metabolism[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 261: 109009.
- [24] LI R, YANG S, WANG D, et al. Electron-beam irradiation delayed the postharvest senescence of kiwifruit during cold storage through regulating the reactive oxygen species metabolism[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2021, 189: 109717.
- [25] DING X, LIU S, MA J, et al. Application of hydrogen-rich water maintains red pitaya fruit quality through regulation of ROS and energy metabolism[J]. LWT, 2024, 213: 117020.
- [26] 李亚玲, 崔宽波, 石玲, 等. 近冰温贮藏对杏果实冷害及活性氧代谢的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 177–183. [LI Y L, CUI K B, SHI L, et al. Effects of near-freezing temperature storage on chilling injury and active oxygen metabolism of apricot fruit[J]. Food Science, 2020, 41(7): 177–183.]
- [27] 何庆. 采前喷施水杨酸对红地球葡萄采后灰霉病抗性和品质的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021. [HE Q. Effects of pre-harvest spraying of salicylic acid on postharvest gray mold resistance and quality of Red Globe grape[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.]
- [28] LI Q, ZENG K, YAO S. Effect of reactive oxygen species on fruit ripening and senescence and the relevant mechanism[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(17): 271–276.
- [29] AGHDAM M S, BODBODAK S. Physiological and biochemical mechanisms regulating chilling tolerance in fruits and vegetables under postharvest salicylates and jasmonates treatments[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 156: 73–85.
- [30] CHAMPA W H, GILL M, MAHAJAN B, et al. Preharvest salicylic acid treatments to improve quality and postharvest life of table grapes (*Vitis vinifera* L.) cv. Flame Seedless[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52: 3607–3616.
- [31] LI M, CHI H, SUN L, et al. Spraying 2,4-epibrassinolide maintains the quality attributes and activates reactive oxygen species metabolism of postharvest strawberries[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 331: 113123.
- [32] GIMÉNEZ M J, SERRANO M, VALVERDE J M, et al. Preharvest salicylic acid and acetylsalicylic acid treatments preserve quality and enhance antioxidant systems during postharvest storage of sweet cherry cultivars[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(4): 1220–1228.
- [33] JIAO Y, WU J, YU W, et al. Enhanced sulforaphane accumulation in fresh-cut broccoli via exogenous glutathione-mediated modulation of the AsA-GSH cycle[J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 229: 113717.
- [34] LI Y, LIU Y, ZHANG J. Advances in the research on the AsA-GSH cycle in horticultural crops[J]. Frontiers of Agriculture in China, 2010, 4: 84–90.
- [35] 杨乾, 范存斐, 王毅, 等. 水杨酸处理诱导采后甜瓜抗坏血酸-还原型谷胱甘肽循环代谢清除过氧化氢的作用及机制[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 243–249. [YANG Q, FAN C F, WANG Y, et al. The effect and mechanism of salicylic acid treatment on the scavenging of hydrogen peroxide by ascorbic acid-reduced glutathione cycle metabolism in postharvest melon[J]. Food Science, 2021, 42(1): 243–249.]