

刘志旭, 朱璇, 赵亚婷, 等. 高浓度 CO₂ 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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080119

LIU Zhixu, ZHU Xuan, ZHAO Yating, et al. Effects of Short-term Treatment with High Concentration CO₂ on Post-harvest Storage Quality and Antioxidant Metabolism of Plums[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 311–318. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080119

· 贮运保鲜 ·

高浓度 CO₂ 短时处理对西梅采后贮藏品质及抗氧化代谢的影响

刘志旭, 朱璇*, 赵亚婷, 张昱, 石慧敏, 栾若林, 刘嘉宝
(新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 为明确高浓度二氧化碳 (carbon dioxide, CO₂) 短时处理对西梅采后贮藏品质及抗氧化代谢的影响, 以新疆‘法兰西’西梅为试材, 分别采用 45%、60%、75% 的 CO₂ 熏蒸西梅果实 3 h, 于 1.0±0.5 °C 条件下贮藏 49 d, 定期测定西梅果实硬度、色泽、可溶性固形物含量、可滴定酸含量及抗氧化代谢相关指标。结果表明: 高浓度 CO₂ 短时处理可有效维持西梅果实硬度、色泽、可溶性固形物及可滴定酸含量水平, 其中 60% CO₂ 处理对西梅果实品质维持效果最佳。贮藏结束时, 60% CO₂ 处理组西梅果实超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT)、过氧化物酶 (peroxidase, POD)、谷胱甘肽还原酶 (glutathione reductase, GR)、抗坏血酸过氧化物酶 (ascorbate peroxidase, APX) 活性分别比对照组高 5.71%、59.95%、27.40%、29.18% 和 45.00% ($P<0.05$), 抗坏血酸 (ascorbic acid, AsA) 与谷胱甘肽 (glutathione, GSH) 含量是对照组的 1.42 倍和 1.23 倍, 提高了西梅果实抗氧化酶活性, 有效维持了 AsA 与 GSH 含量, 降低了超氧阴离子 (superoxide anion, O₂⁻) 产生速率, 延缓了过氧化氢 (hydrogen peroxide, H₂O₂) 含量、丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量的积累和细胞膜透性的上升。说明高浓度 CO₂ 短时处理可增强西梅果实贮藏期间的抗氧化代谢, 保持果实贮藏品质。

关键词: 西梅果实, 二氧化碳 (CO₂), 采后保鲜, 抗氧化代谢, 贮藏品质

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)12-0311-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080119

本文网刊:



Effects of Short-term Treatment with High Concentration CO₂ on Post-harvest Storage Quality and Antioxidant Metabolism of Plums

LIU Zhixu, ZHU Xuan*, ZHAO Yating, ZHANG Yu, SHI Huimin, LUAN Ruolin, LIU Jiabao

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

Abstract: 'Franch' plums were used as experimental material to elucidate the effects of short-term treatment with high concentration of carbon dioxide (CO₂) on post-harvest storage quality and antioxidant metabolism. The fruits were treated with 45%, 60%, and 75% CO₂ for 3 hours, and then stored at 1.0±0.5 °C for 49 days. The firmness, color, soluble solids content, titratable acid content, and indicators related to antioxidant metabolism of the plums were measured during cold storage. The results showed that short-term treatment with high concentration CO₂ can effectively maintain the firmness, color, soluble solids, and titratable acid content of plums, among which 60% CO₂ treatment showed the best effects in maintaining fruit quality. At the end of storage, the activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD), glutathione reductase (GR), and ascorbate peroxidase (APX) in the 60% CO₂ treatment group were 5.71%, 59.95%, 27.40%, 29.18%, and 45.00% ($P<0.05$) higher than those in control group, respectively. The contents of ascorbic acid (AsA) and glutathione (GSH) were 1.42 and 1.23 times higher than the control group, respectively. This increased the

收稿日期: 2023-08-15

基金项目: 自治区重点研发计划项目 (2022B02018-2); 南京农业大学-新疆农业大学联合基金项目 (KYYJ201908)。

作者简介: 刘志旭 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏及物流工程, E-mail: 2278286479@qq.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。

activity of antioxidant enzymes, maintained the content of AsA and GSH, reducing the production rate of superoxide anion ($O_2^{\cdot-}$), and delaying the accumulation of hydrogen peroxide (H_2O_2) content, malondialdehyde (MDA) content and the increase in cell membrane permeability. These results indicate that short-term treatment with high concentration CO_2 can enhance the antioxidant metabolism of plums during storage, thereby preserving fruit quality.

Key words: plum fruits; carbon dioxide (CO_2); post-harvest preservation; antioxidant metabolism; storage quality

西梅(*Prunus domestica* L.)属蔷薇科李属植物,原产于西亚和欧洲^[1],近年来在中国各地引种栽培,种植面积逐年呈上升趋势^[2-3]。但西梅果实采摘存在着明显的季节性和区域性,且西梅属于呼吸跃变型果实^[4],采摘后生理代谢旺盛,容易发生后熟软化、腐烂,严重影响了西梅果实商品价值。

高浓度的 CO_2 可有效地抑制采后果蔬的呼吸作用,调控抗氧化防御体系,减慢新陈代谢速度,延缓果蔬采后成熟衰老进程^[5]。15% 的 CO_2 熏蒸杏果实 12 h,可抑制杏果实呼吸速率和内源乙烯的产生,延缓杏果实的成熟和衰老^[6]。茎瘤芥经 40% CO_2 处理 48 h,可使其保持较高的抗氧化能力,延缓衰老进程^[7]。20% 的 CO_2 处理葡萄 3 d 还可以显著地增强葡萄果实对真菌感染的抗性^[8]。此外,高浓度 CO_2 短时处理还可以提高草莓^[9]、蓝莓^[10]、桃子^[11] 果实的耐贮性与品质,延长甜柿^[12]、蒜薹^[13] 果蔬的货架期,提高甜樱桃^[14] 果实的抗病性,抑制板栗^[15] 果实的褐变。由此可见,高浓度 CO_2 短时处理在果蔬保鲜方面的应用颇具研究价值与开发潜力。但是,高浓度 CO_2 短时处理西梅的研究鲜有报道,且对其品质和抗氧化能力影响尚不清楚,确定适宜的处理条件对保持西梅果实品质和减少采后损失具有重要意义。

因此,本研究以‘法兰西’西梅为试材,采用不同浓度的 CO_2 对西梅果实进行处理,筛选出保持西梅果实贮藏品质的最适浓度,并从抗氧化代谢的角度揭示高 CO_2 短时处理保持西梅果实采后品质的作用机理,以期以西梅贮藏保鲜技术研究提供新思路与理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘法兰西’西梅 采自新疆喀什地区伽师县西梅果园(经度 76.723720,纬度 39.488182),选取无机械损伤,成熟度(硬度为 (13.5 ± 0.5) N、可溶性固形物 $(19.2\% \pm 0.5\%)$)相近的西梅,立即经空运至实验室,5℃ 预冷 24 h;磷酸钾、磷酸钠、三氯乙酸、核黄素、盐酸、丙酮、无水乙醇等 均为分析纯,天津致远化学试剂有限公司; $O_2^{\cdot-}$ 产生速率试剂盒、 H_2O_2 含量试剂盒 北京盒子生工科技有限公司;MDA 含量试剂盒 南京建成生物工程研究所。

GY-4 果实硬度计 浙江艾德堡仪器有限公司;PAL-1 数字式糖度计折光仪 日本 Atago 公司;T6 新世纪紫外分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司;3HBRI 型高速冷冻离心机 湖南赫西仪器装备有限公司;IKA A11 型分析研磨机 艾卡仪器

设备有限公司;YGA 2100 型气体分析仪 北京阳光易事达科技有限公司;LZB-6 玻璃转子流量计 江阴市科达仪表厂。

1.2 实验方法

1.2.1 样品预处理 在前期预实验的基础上选择 45%、60% 和 75% CO_2 作为处理浓度。排空箱内气体后,以 500 L/h 的气体流速将 45%、60% 和 75% CO_2 分别充入 70 L 密闭箱中(O_2 浓度 21%,流速 200 L/h、其余气体成分为 N_2),待气体达到指定浓度稳定后,密闭处理 3 h,以相同条件下充入空气处理作为对照,各组处理均重复三次,每次重复 5 kg 果实,处理完成后的西梅果实置于冷库(温度 1.0 ± 0.5 ℃,相对湿度 90%~95%)中贮藏,每 7 d 进行一次取样及相关指标的测定。

1.2.2 测定指标和方法

1.2.2.1 品质指标 色泽采用色差仪在西梅果实赤道附近三个等距离点测定,每组随机选取 15 个西梅果实,记录 L^* 与 a^* 值;硬度采用探头直径为 3.5 mm 的 GY-4 型硬度计对西梅果实进行测定;可溶性固形物含量(soluble solids content, SSC)采用 PAL-1 型糖度仪对西梅果实进行测定;可滴定酸(titratable acidity, TA)含量采用酸碱滴定法^[16] 测定。以上测定重复三次,取平均值。

1.2.2.2 还原型抗坏血酸(ascorbic acid, AsA)含量、谷胱甘肽(glutathione, GSH)含量 AsA 和 GSH 含量参照曹建康等^[17] 的方法测定,前者单位为 mg/100 g FW,后者单位表示为 nmol/g FW。

1.2.2.3 超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)产生速率、过氧化氢(H_2O_2)含量 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和 H_2O_2 含量参照试剂盒的说明书进行测定。

1.2.2.4 抗氧化酶活性 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)的测定参照曹建康等^[17] 的方法稍作修改。取 2 g 西梅果实样品加入 5 mL 磷酸钠缓冲液(含 5 mmol/L DTT 和 5% PVP)后,在 4℃ 下、12000×g 离心 30 min,取上清液测定。SOD 活力依据 SOD 抑制硝基蓝四唑(NBT)在光下的还原作用来确定酶活性的大小,单位为 U/g FW。

过氧化氢酶(catalase, CAT)的测定参照曹建康等^[17] 的方法稍作修改。取 2 g 西梅果实样品加入 5 mL 预冷的 0.1 mol/L pH7.5 磷酸钠缓冲液(含 5 mmol/L DTT 和 5% PVP),在 4℃ 下、12000×g 离心 30 min,取上清液测定。依据 CAT 催化 H_2O_2 分解为水和分子氧的过程中 H_2O_2 的消耗量来确定酶

活性的大小,单位为 U/g FW。

过氧化物酶(Peroxidase, POD)的测定参照曹建康等^[17]的方法稍作修改。取 1 g 西梅果实样品加入 5 mL 预冷的乙酸-乙酸钠缓冲液(含 1 mmol PEG、4% PVPP 和 1% TritonX-100),在 4 ℃ 下、12000×g 离心 30 min,取上清液测定。POD 活力的测定以每克鲜果实样品每分钟吸光度增加 0.01 为 1 个 POD 活性单位,单位为 U/g FW。

谷胱甘肽还原酶(glutathione reductase, GR)的测定参照曹建康等^[17]的方法稍作修改。取 2 g 西梅样品加入 5 mL 预冷的 0.1 mol/L pH7.5 磷酸钠缓冲液(含 1 mmol/L EDTA),在 4 ℃ 下、12000×g 离心 30 min,取上清液测定。GR 活性以每分钟每克果蔬样品反应体系在 340 nm 吸光度值减少 0.01 为一个酶活性单位,单位为 U/g FW。

抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)的测定参照曹建康等^[17]的方法稍作修改。取 1 g 西梅果实样品加入 5 mL 预冷的磷酸钾缓冲液(含 0.1 mmol/L EDTA、1 mmol/L 抗坏血酸和 2% PVPP),在 4 ℃ 下、12000×g 离心 30 min,取上清液测定。APX 活力以每克样品酶促反应体系在波长 290 nm 处吸光度值降低 0.01 为一个酶活性单位,单位为 U/g FW。

1.2.2.5 细胞膜透性、丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量 细胞膜透性的测定参考曹建康等^[17]的方法稍作修改;MDA 含量参照试剂盒的说明书进行测定。

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件和 SPSS 22.0 软件对原始数据进行处理和方差分析,采用 Duncan 式和 Tukey 检验进行差异显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著。采用 GraphPad Prism 8.0.2 软件作图。

2 结果与分析

2.1 高浓度 CO₂ 短时处理对西梅果实贮藏品质影响

2.1.1 对色泽的影响 如图 1A 所示,在贮藏前期(0~14 d)西梅果实的 L^* 值(亮度)呈现逐渐上升趋势。随着贮藏时间的延长,西梅果皮颜色逐渐变暗,亮度值随之下降。贮藏结束时,60% CO₂ 处理组的西梅果实 L^* 值分别比 45% CO₂ 处理组、75% CO₂ 处理组和对照组高 3.88%、4.75%、7.20% ($P<0.05$)。

如图 1B 所示,4 组西梅果皮 a^* 值在贮藏期间均呈上升趋势,表明西梅果皮颜色由绿色逐渐转变为红色。对照组果实第 14~28 d 时 a^* 值迅速上升,显著 ($P<0.05$) 高于其他三组,直至贮藏结束。第 49 d 时,60% CO₂ 处理组的西梅果实 a^* 值分别比 45% CO₂ 处理组、75% CO₂ 处理组和对照组低 4.27%、9.65%、10.37% ($P<0.05$)。

如图 1C 所示,贮藏初期西梅果皮颜色为紫红色,随着贮藏时间的延长,果实外观色泽和鲜艳度均

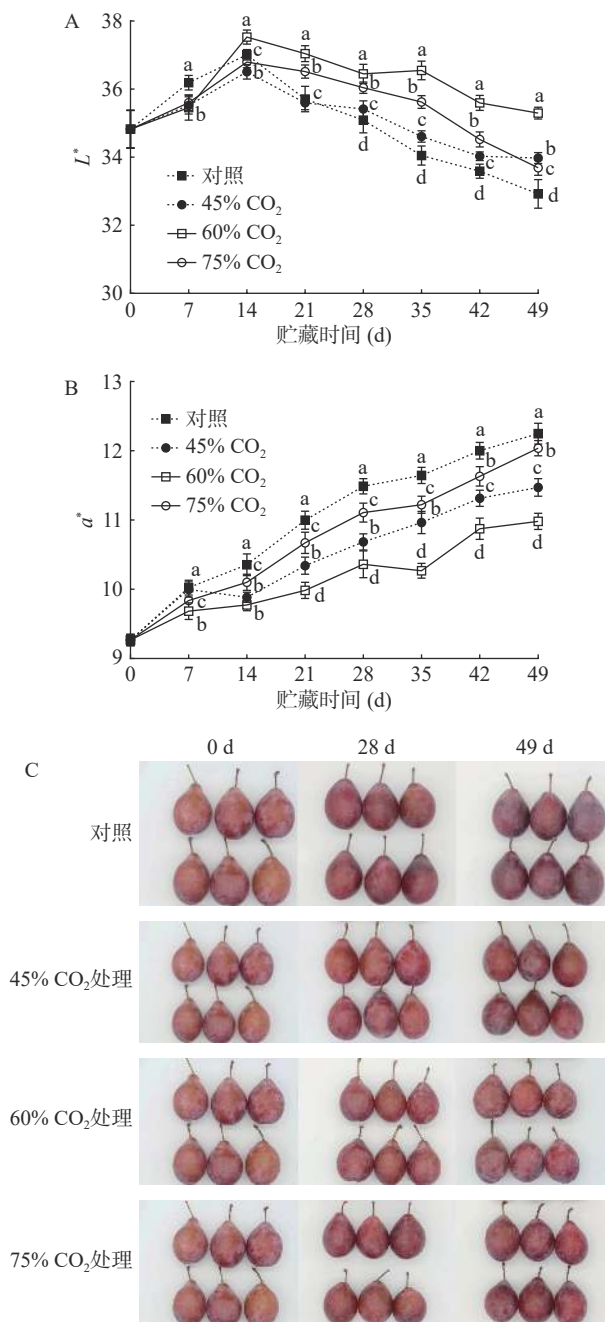


图 1 高浓度 CO₂ 短时处理对西梅果实色泽的影响

Fig.1 Effects of short-term treatment with high concentration of CO₂ on color of prune fruit

注: 图中字母不同表示相同贮藏时间不同处理组和对照组相比差异显著 ($P<0.05$); 字母相同则差异不显著 ($P>0.05$); 图 2~图 6 同。

有所降低。贮藏第 28 d 时,对照组与各处理组相比,对照组西梅果实颜色转变最明显,各处理组西梅果实色泽变化缓慢,其中 45% 与 60% CO₂ 处理组西梅果实色泽保持效果较好。贮藏结束时,对照组果实颜色逐渐加深至黑紫色,45% 和 75% CO₂ 处理组西梅果实光泽度较低,红色加深,60% CO₂ 处理组西梅果实颜色鲜艳,光泽度较高。说明高浓度 CO₂ 短时处理可有效维持西梅果实贮藏期间的色泽,其中 60% CO₂ 处理组效果最优。

2.1.2 对硬度、SSC、TA 的影响 硬度、SSC、TA 是衡量西梅果实贮藏品质的重要指标。如图 2A 所示,随着贮藏时间的延长,4 组西梅果实硬度均呈下降趋势,但整个贮藏期间 CO_2 处理组西梅果实的硬度均高于对照组。在贮藏第 49 d 时,45%、60%、75% CO_2 处理组硬度分别是对照组的 1.20 倍、1.37 倍、1.07 倍($P<0.05$)。结果表明高浓度 CO_2 短时处理可以延缓西梅果实硬度的下降。

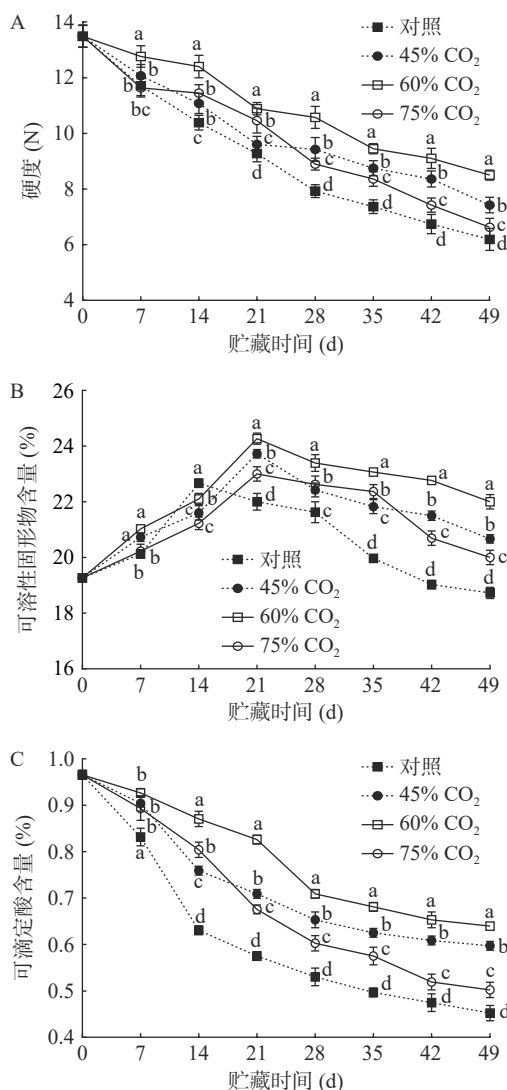


图2 高浓度 CO_2 短时处理对西梅果实采后硬度(A)、可溶性固形物含量(B)、可滴定酸含量(C)的影响

Fig.2 Effects of short-term treatment with high concentration of CO_2 on postharvest hardness (A), soluble solids content (B) and titratable acid content (C) of prune fruit

如图 2B 所示,在西梅果实贮藏期间 SSC 含量随着后熟逐渐增加,增加到一定程度之后随着衰老又逐渐下降。对照组在第 14 d 时 SSC 含量达到最大值,比 CO_2 处理组提前了 7 d。贮藏结束时,60% CO_2 处理组 SSC 含量比 45% CO_2 、75% CO_2 处理组和对照组高 6.43%、10.00%、17.46%($P<0.05$)。结果表明高浓度 CO_2 短时处理可以有效维持西梅果实贮藏期间 SSC 含量。

如图 2C 所示,在整个贮藏期间,西梅果实

TA 含量呈现下降趋势。贮藏前期(0~28 d) CO_2 处理组和对照组 TA 含量下降趋势较快。第 28 d 时,45%、60%、75% CO_2 处理组 TA 含量是对照组的 1.23 倍、1.12 倍、1.34 倍、1.14 倍($P<0.05$)。贮藏第 28~49 d 时, CO_2 处理组和对照组 TA 含量下降趋势缓慢。贮藏第 49 d 时,60% CO_2 处理组 TA 含量分别比 45% CO_2 、75% CO_2 处理组和对照组高 6.67%、28.00%、42.22%($P<0.05$)。结果表明高浓度 CO_2 短时处理能够较好地抑制西梅采后贮藏期间 TA 含量的降低。

综上所述,高浓度 CO_2 短时处理能延缓西梅果实贮藏品质的降低,并且 60% CO_2 处理组效果最优,因此选择 60% CO_2 处理作为最佳处理组用于后续的试验分析。

2.2 高浓度 CO_2 短时处理对西梅果实抗氧化代谢影响

2.2.1 对 AsA、GSH 含量的影响 AsA、GSH 含量与果实抗氧化能力密切相关。如图 3A、图 3B 所示,西梅果实 AsA 含量和 GSH 含量在贮藏过程中分别呈下降趋势和上升趋势。从贮藏第 7 d 开始,60% CO_2 处理组与对照组之间的 AsA 含量出现显著性差异。贮藏结束时,60% CO_2 处理组 AsA 含量是对照组的 1.42 倍($P<0.05$)。从贮藏第 21 d 开始,60% CO_2 处理组与对照组之间 GSH 含量出现显著性差异,贮藏结束时,60% CO_2 处理组的西梅果实 GSH 含量是对照组的 1.23 倍($P<0.05$)。说明 60% CO_2 处理可有效维持西梅果实采后贮藏过程中 AsA

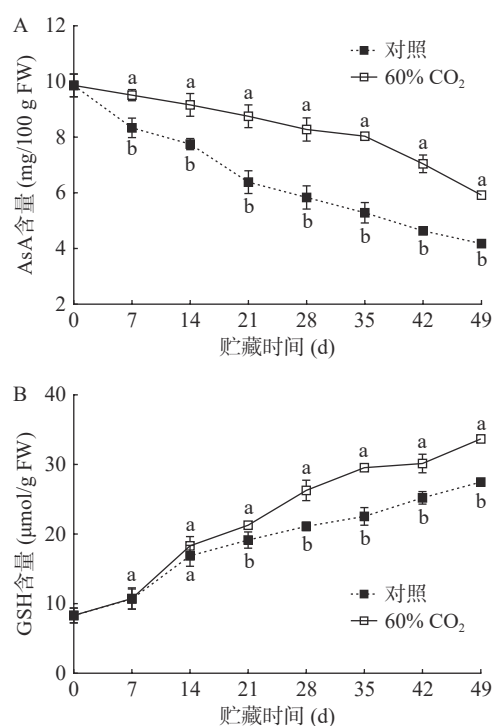


图3 高浓度 CO_2 短时处理对西梅果实 AsA(A)、GSH(B) 含量的影响

Fig.3 Effects of short-term treatment with high CO_2 concentration on AsA (A) and GSH (B) contents of prune fruit

与 GSH 的含量。

2.2.2 对 O₂⁻产生速率与 H₂O₂ 含量的影响 如图 4A、图 4B 所示,在整个贮藏期间,60% CO₂ 处理组和对照组西梅果实 O₂⁻产生速率和 H₂O₂ 含量均呈现先上升后下降趋势。贮藏过程中,60% CO₂ 处理组 O₂⁻产生速率始终显著低于对照组 ($P<0.05$)。

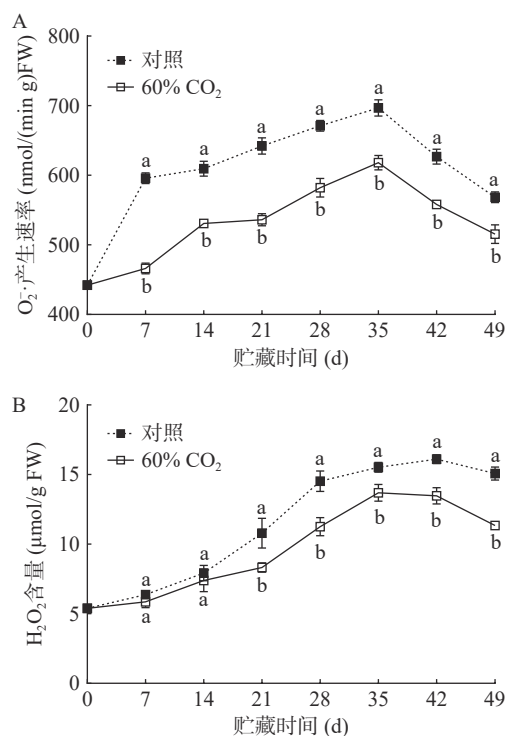
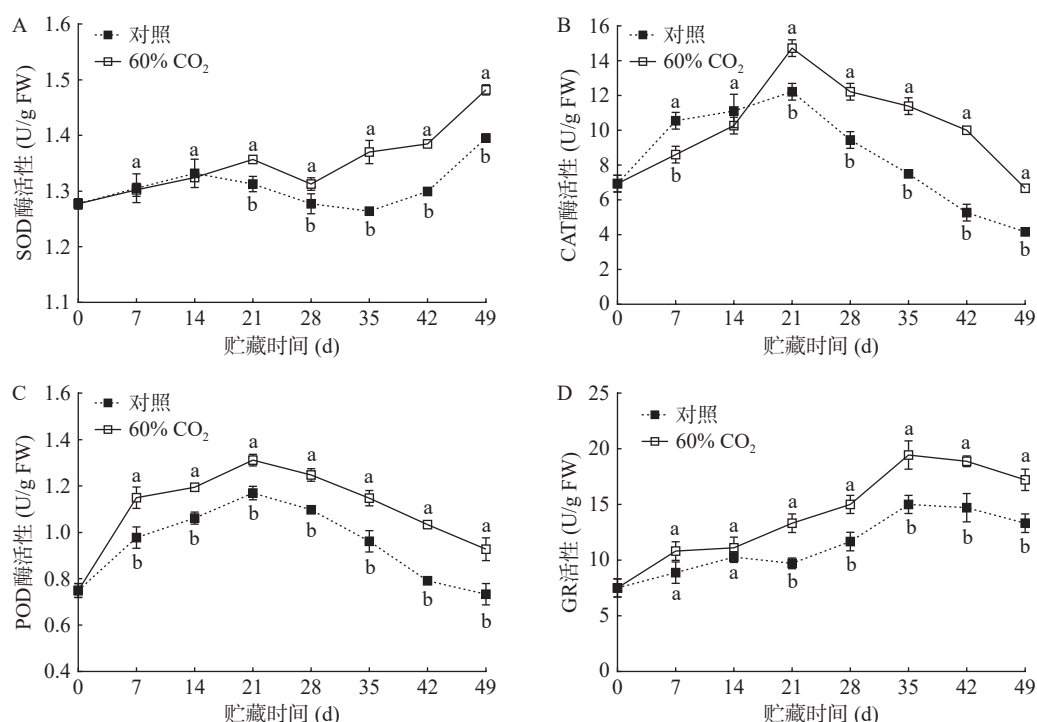


图 4 高浓度 CO₂ 短时处理对西梅果实 O₂⁻产生速率(A)与 H₂O₂ 含量(B)的影响

Fig.4 Effects of short-term treatment with high CO₂ concentration on O₂⁻ production rate (A) and H₂O₂ content (B) of prune fruit



贮藏 49 d 时, 60% CO₂ 处理组 O₂⁻产生速率比对照组低 9.3% ($P<0.05$)。贮藏前期(0~14 d)60% CO₂ 处理组和对照组西梅果实 H₂O₂ 含量无显著性差异。第 14~28 d 时, 对照组 H₂O₂ 含量快速上升, 60% CO₂ 处理组 H₂O₂ 含量显著 ($P<0.05$) 低于对照组。贮藏结束时, 60% CO₂ 处理组 H₂O₂ 含量比对照组低 24.73% ($P<0.05$)。说明 60% CO₂ 处理可有效抑制贮藏期间 O₂⁻和 H₂O₂ 含量的积累。

2.2.3 对酶活性的影响 SOD、CAT、POD、GR、APX 是果蔬体内过氧化物防御系统的重要保护酶。如图 5A 所示, 西梅果实 SOD 活性在整个贮藏期间呈先增加后降低再上升的趋势。第 0~14 d 时, 60% CO₂ 处理组和对照组西梅果实的 SOD 活性之间没有显著差异 ($P>0.05$); 第 21 d 时, 60% CO₂ 处理组的西梅果实 SOD 活力是对照组的 1.03 倍 ($P<0.05$)。在 35~49 d 期间, 60% CO₂ 处理组和对照组西梅果实 SOD 活性均呈上升趋势; 第 49 d 时, 60% CO₂ 处理组的西梅果实 SOD 活性是对照组的 1.06 倍 ($P<0.05$)。

如图 5B、图 5C 所示, 西梅果实 CAT 活性和 POD 活性随贮藏时间的延长呈先上升后下降的趋势。第 0~21 d 时, 各组西梅果实 CAT 活性和 POD 活性均呈上升趋势, 第 21~49 d 时, 60% CO₂ 处理组西梅果实 CAT 活性和 POD 活性均显著高于对照组 ($P<0.05$)。贮藏第 49 d 时, 60% CO₂ 处理组西梅果实 CAT 活性是对照组的 1.60 倍 ($P<0.05$), 60% CO₂ 处理组的西梅果实 POD 活性是对照组的 1.27 倍 ($P<0.05$)。

如图 5D 所示, 在整个贮藏期间, 西梅果实 GR 活性呈先上升后下降趋势。第 0~14 d 时, 60%

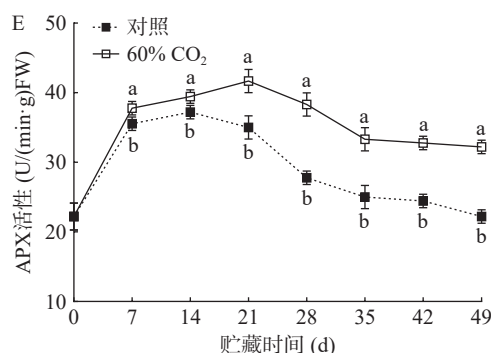


图5 高浓度 CO₂ 短时处理对西梅果实 SOD(A)、CAT(B)、POD(C)、GR(D)、APX(E)活性的影响

Fig.5 Effects of short-term treatment with high CO₂ on the activity of SOD (A), CAT (B), POD (C), GR (D) and APX (E) of prune fruits

CO₂ 处理组和对照组西梅果实的 GR 活性没有显著差异 ($P>0.05$)。第 21~49 d 时, 60% CO₂ 处理组和对照组西梅果实的 GR 活性差异显著 ($P<0.05$)。贮藏结束时, 60% CO₂ 处理组比对照组高 29.17% ($P<0.05$)。

如图 5E 所示, 西梅果实 APX 活性在整个贮藏期间呈先上升后下降趋势。60% CO₂ 处理组与对照组西梅果实 APX 活性在贮藏前期 (0~14 d) 快速上升, 第 21 d 时, 60% CO₂ 处理组西梅果实 APX 活性是对照组的 1.20 倍 ($P<0.05$)。第 35~49 d 时, 60% CO₂ 处理组与对照组西梅果实 APX 活性缓慢下降, 但 60% CO₂ 处理组始终高于对照组。第 49 d 时, 60% CO₂ 处理组西梅果实 APX 活性是对照组的 1.45 倍 ($P<0.05$)。

综上 60% CO₂ 处理可显著提高采后西梅果实抗氧化酶活性。

2.3 高浓度 CO₂ 短时处理对西梅果实细胞膜透性与 MDA 含量的影响

活性氧过量积累可导致细胞膜过氧化损伤, 使细胞膜的完整性遭到破坏, 从而加速果实品质劣变及衰老进程, 细胞膜透性与 MDA 含量是作为衡量果实氧化损伤程度的常用指标^[18-19]。如图 6A、图 6B 所示, 在整个贮藏期间西梅果实细胞膜透性和 MDA 含量呈现上升趋势。第 0~28 d 时, 对照组西梅细胞膜透性和 MDA 含量快速增加, 显著高于 60% CO₂ 处理组 ($P<0.05$)。贮藏第 49 d 时, 60% CO₂ 处理组西梅果实细胞膜透性、MDA 含量分别是对照组的

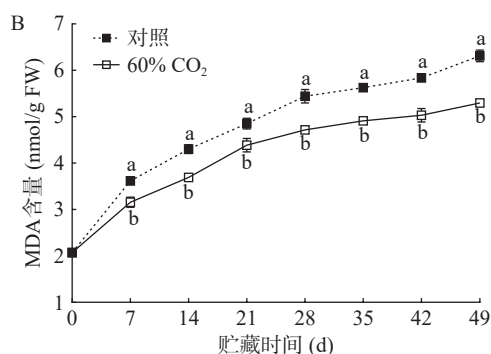


图6 高 CO₂ 短时处理对西梅果实细胞膜透性(A)与 MDA 含量(B)的影响

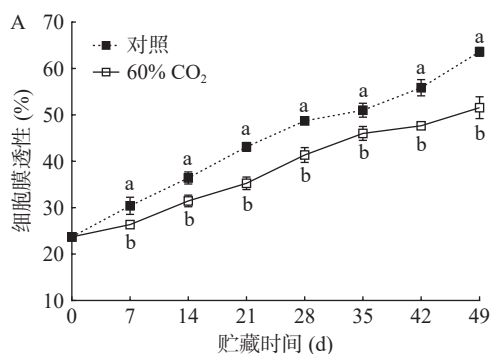
Fig.6 Effects of short-term treatment with high CO₂ on cell membrane permeability (A) and MDA content (B) of prune fruit

1.23 倍和 1.20 倍 ($P<0.05$)。说明 60% CO₂ 处理可有效延缓西梅果实细胞膜透性和 MDA 含量的上升。

3 讨论

本研究结果表明, 高 CO₂ 短时处理可有效维持西梅果实硬度、色泽、可溶性固形物及可滴定酸水平, 其中 60% CO₂ 处理对西梅果实品质维持效果最佳。张辉等^[20]也发现相似的结果, 短期高浓度 CO₂ 对杏果实进行处理, 能显著抑制杏果实硬度、SSC 含量的下降, 保持较高的 TA 和 AsA 含量, 在贮藏过程中有效的保持了杏果实的品质。但王荣花等^[21]的结果则表明, 高浓度 CO₂ 短时处理对常温贮藏欧洲李果实品质的维持效果不显著, 这可能是由于不同的 CO₂ 处理浓度和不同的处理条件造成的差异。

果实品质劣变和衰老密切相关, 而 ROS 的大量积累是果实衰老的重要原因之一^[22]。ROS 主要包含 O₂⁻ 和 H₂O₂, 能够使各种细胞成分不受控制地氧化, 从而导致细胞的氧化损伤, 加速果实衰老进程和品质的下降^[23-24]。为维持 ROS 的低稳态水平, 植物自主进化出了有效的抗氧化防御系统, 用来清除氧化应激条件下细胞中产生的过量 ROS^[18,25]。其中由酶所组成的抗氧化防御系统成分包括 SOD、CAT、POD 等^[26-27]。SOD 将线粒体中产生的 O₂⁻ 歧化为



H₂O₂ 和 O₂, CAT 和 POD 则将 H₂O₂ 进一步转化为 H₂O 和 O₂, 它们协同作用以清除过量积累的活性氧自由基^[28-29]。在本试验中, 60% CO₂ 处理组的西梅果实 SOD、CAT、POD 抗氧化酶活性显著高于对照组, 同时有效降低了 O₂⁻、H₂O₂ 含量的积累, 延缓了细胞膜透性和 MDA 含量的上升, 对细胞的氧化损伤起到了积极的防御作用, 有效保持了西梅果实的色泽与硬度, 显著抑制了贮藏期间 SSC 与 TA 含量的下降。这说明高浓度 CO₂ 短时处理增强了西梅果实体内活性氧清除系统中相关酶的活性, 从而有效降低了西梅果实体内积累的 O₂⁻ 和 H₂O₂ 含量, 延缓了果实衰老进程, 抑制了果实品质劣变。Romero 等^[8] 研究也表明 CO₂ 处理后的葡萄能够通过诱导防御系统的增强来阻止活性氧的产生, 有效保持果实品质。

植物中的抗氧化体系还包括 AsA-GSH 循环^[30]。该途径在清除果实 ROS、延缓果实品质劣变等方面也发挥了至关重要的作用。AsA-GSH 循环包括抗氧化代谢产物 AsA、GSH 以及 APX 和 GR 等抗氧化酶^[31-32]。本研究表明, 在整个贮藏期间, 高浓度 CO₂ 短时处理与对照组相比可显著提高西梅果实 APX 与 GR 活性, 有效维持 AsA 与 GSH 含量, 避免活性氧过度积累对细胞产生氧化损伤, 有效延缓西梅果实的后熟衰老, 使果实保持较好的贮藏品质。这也是高浓度 CO₂ 处理增强西梅果实的抗氧化能力的一个重要方面。胡花丽等^[33] 研究也发现, 2% O₂+3% CO₂ 气调处理有效维持了猕猴桃较高的 AsA-GSH 循环活性, 从而增强抗氧化能力, 延缓衰老进程, 维持猕猴桃果实贮藏品质。

综上所述, 高浓度 CO₂ 短时处理可通过调控西梅果实贮藏期间的活性氧代谢与 AsA-GSH 循环, 来增强西梅果实的抗氧化能力, 保持西梅果实贮藏品质, 延长其贮藏期。

4 结论

本研究中, 60% CO₂ 短时处理可提高西梅果实采后贮藏期间 SOD、POD、CAT、APX、GR 活性, 维持 AsA 与 GSH 含量, 抑制 O₂⁻ 与 H₂O₂ 的积累, 降低 MDA 含量与细胞膜透性的上升, 有效地延缓西梅果实的硬度、色泽、SSC、TA 的下降, 较好地保持西梅果实采后贮藏品质。

已有研究表明, 高浓度 CO₂ 短时处理在果蔬采后贮藏保鲜方面有较好的开发潜力, 目前, 高浓度 CO₂ 短时处理与其它贮藏保鲜技术相结合的研究较少, 因此, 还可从高浓度 CO₂ 短时处理复合保鲜技术角度进一步探索西梅采后贮藏品质及生理代谢的研究。

参考文献

- [1] 王艺菡, 王永刚, 王剑瑞, 等. 欧洲李(西梅)的原产地与保护利用[J]. 新疆林业, 2021(4): 29-31. [WANG Y H, WANG Y G, WANG J R, et al. Origin and conservation and utilization of Prunus (prune) in Europe[J]. Xinjiang Forestry, 2021(4): 29-31.]
- [2] 马燕燕. 近冰温贮藏对新疆西梅贮藏品质及软化的调控机制研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2023. [MA Y Y. Study on the regulation mechanism of near-ice temperature storage on storage quality and softening of prunes in Xinjiang[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.]
- [3] 沈康. 西梅膳食纤维的提取纯化、功能性研究及其相关产品开发[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023. [SHEN K. Extraction, purification, functional research and related product development of prune dietary fiber[D]. Aral: Tarim University, 2023.]
- [4] 王志鹏, 徐智昕, 范利君, 等. 西梅热风干燥特性及品质的研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 103-110. [WANG Z P, XU Z X, FAN L J, et al. Study on drying characteristics and quality of prune hot air[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 103-110.]
- [5] 李浪花, 任国谱, 李梦怡. 二氧化碳在乳制品及农产品保鲜领域中的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(4): 17-20. [LI L H, REN G P, LI M Y. Research progress of carbon dioxide in the field of dairy products and agricultural product preservation[J]. Grain and Oil, 2017, 30(4): 17-20.]
- [6] 张辉, 逢煥明, 王静, 等. CO₂ 熏蒸对杏果呼吸速率及内源乙烯的影响[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(10): 127-129. [ZHANG H, PANG H M, WANG J, et al. Effects of CO₂ fumigation on respiration rate and endogenous ethylene of apricot fruit[J]. Food Research and Development, 2009, 30(10): 127-129.]
- [7] 江晶晶, 陈洁, 周雅涵, 等. 高 CO₂ 短时处理对茎瘤芥采后衰老的影响[J]. 包装工程, 2015, 36(9): 42-47. [JIANG J J, CHEN J, ZHOU Y H, et al. Effects of short-term treatment of high CO₂ on postharvest aging of Mustard stem[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(9): 42-47.]
- [8] ROMERO I, SANCHEZ-BALLESTA T M, MALDONADO R, et al. Expression of class I chitinase and β -1, 3-glucanase genes and postharvest fungal decay control of table grapes by high CO₂ pretreatment[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 41(1): 9-15.
- [9] HARKER F, ELGAR H, CHRISTOPHER B. et al. Physical and mechanical changes in strawberry fruit after high carbon dioxide treatments[J]. Postharvest Biology and Technology, 2000, 19(2): 139-146.
- [10] 姜爱丽, 孟宪军, 胡文忠, 等. 高 CO₂ 冲击处理对采后蓝莓生理代谢及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 362-368. [JIANG A L, MENG X J, HU W Z, et al. Effects of high CO₂ impact treatment on physiological metabolism and quality of postharvest blueberries[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 362-368.]
- [11] BONGHI C, RAMINA A, RUPERTI B, et al. Peach fruit ripening and quality in relation to picking time and hypoxic and high CO₂ short-term postharvest treatments[J]. Postharvest Biology and Technology, 1999, 16(3): 213-222.
- [12] 李自强, 胡云峰, 崔瀚元, 等. 不同高 CO₂ 处理时间对保山甜柿货架期的影响[J]. 农学学报, 2014, 4(3): 72-76. [LI Z Q, HU Y F, CUI H Y, et al. Effects of different high CO₂ treatment periods on the shelf life of Baoshan sweet persimmon[J]. Journal of Agronomy, 2014, 4(3): 72-76.]

- [13] 焦丽霞, 王庆国. 短期高 CO₂ 处理对蒜薹货架期品质的影响[J]. 食品与发酵科技, 2013, 49(4): 21-24. [JIAO L X, WANG Q G. Effect of short-term high CO₂ treatment on shelf life quality of garlic[J]. Science and Technology of Food and Fermentation, 2013, 49(4): 21-24.]
- [14] TIAN S P, FAN Q, XU Y, et al. Evaluation the use of high CO₂ concentrations and cold storage to control of *Monilinia fructicola* on sweet cherries[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2001, 22(1): 53-60.
- [15] 吴丽婷, 梁丽松, 王贵禧, 等. 采后高 CO₂ 处理对板栗褐变相关因子的影响[J]. 食品科学, 2007(10): 533-539. [WU L T, LIANG L S, WANG G X, et al. Effects of postharvest high CO₂ treatment on correlated factors of chestnut browning[J]. *Food Science*, 2007(10): 533-539.]
- [16] 王迪. 高二氧化碳处理调控鲜切梨果实品质机制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. [WANG D. Study on the mechanism of high carbon dioxide treatment regulating the quality of fresh-cut pear fruit[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.]
- [17] 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: 101-120. [CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Postharvest physiological and biochemical experimental guidance of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 101-120.]
- [18] LI R J, YANG S X, 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(12): 109717.
- [19] 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-ice temperature storage on cold damage and reactive oxygen species metabolism of apricot fruit[J]. *Food Science*, 2020, 41(7): 177-183.]
- [20] 张辉, 逢焕明, 李学文, 等. CO₂ 熏蒸处理对采后杏果贮藏品质的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2009, 32(1): 56-59. [ZHANG H, PANG H M, LI X W, et al. Effects of CO₂ fumigation treatment on storage quality of postharvest apricot fruit[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2009, 32(1): 56-59.]
- [21] 王荣花, 轩海波, MCCORMICK R 等. 常温贮藏条件下短期高浓度 CO₂ 处理对欧洲李子采后生理及品质的影响[J]. 北方园艺, 2011(19): 144-146. [WANG R H, XUAN H B, MCCORMICK R, et al. Effects of short-term high-concentration CO₂ treatment on postharvest physiology and quality of European plum under normal temperature storage conditions[J]. *Northern Horticulture*, 2011(19): 144-146.]
- [22] 乔沛, 殷菲彤, 王雨莹, 等. 外源褪黑素处理对采后荔枝褐变及活性氧代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 282-287. [QIAO P, YIN F L, WANG Y X, et al. Effects of exogenous melatonin treatment on browning and reactive oxygen species metabolism in postharvest lychee[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(6): 282-287.]
- [23] EPANDEY P, EPANDEY P, ESINGH J, et al. Redox homeostasis via gene families of ascorbate-glutathione pathway[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2015, 3(460).
- [24] 张亚琳, 展晓凤, 马海娟, 等. 外源褪黑素调控活性氧代谢诱导采后杏果实对黑斑病的抗性[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 355-362. [ZHANG Y L, ZHAN X F, MA H J, et al. Exogenous melatonin regulation of reactive oxygen species metabolism induces resistance of postharvest apricot fruits to black spot[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(24): 355-362.]
- [25] CHEN C Y, CAI N, WAN C P, et al. Carvacrol delays Phomopsis stem-end rot development in pummelo fruit in relation to maintaining energy status and antioxidant system[J]. *Food Chemistry*, 2022, 372(15): 131239.
- [26] 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(5): 109009.
- [27] 袁楚珊, 黄余年, 董欣瑞, 等. 不同贮藏温度对黄桃采后品质和抗氧化能力的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 356-364. [YUAN C S, HUANG Y N, DONG X R, et al. Effects of different storage temperatures on postharvest quality and antioxidant capacity of yellow peach[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(3): 356-364.]
- [28] 董柏余, 汤洪敏, 姚秋萍, 等. 采后水杨酸处理对金刺梨果实活性氧和苯丙烷代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(17): 308-315. [DONG B Y, TANG H M, YAO Q P, et al. Effects of postharvest salicylic acid treatment on reactive oxygen species and phenylpropanoid metabolism in prickly pear fruit[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(17): 308-315.]
- [29] 罗冬兰, 瞿光凡, 曹森, 等. 采前水杨酸结合采后 1-MCP 处理对李果实贮藏期品质及抗氧化能力的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 327-333. [LUO D L, QU G F, CAO S, et al. Effects of preharvest salicylic acid combined with postharvest 1-MCP treatment on the quality and antioxidant capacity of plum fruit during storage period[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(9): 327-333.]
- [30] 张昱, 芦玉佳, 任新雅, 等. 外源葡萄糖处理对杏果实抗氧化代谢及贮藏品质的影响[J/OL]. 食品科学, 2023, 44(19): 157-163. [ZHANG Y, LU Y J, REN X Y, et al. Effects of exogenous glucose treatment on antioxidant metabolism and storage quality of apricot fruit[J]. *Food Science*, 2023, 44(19): 157-163.]
- [31] LI X, LI C Y, CHENG Y, et al. Postharvest application of acibenzolar-s-methyl delays the senescence of pear fruit by regulating reactive oxygen species and fatty acid metabolism[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(17): 4991-4999.
- [32] XU J R, WEI Z E, LU X F, et al. Involvement of nitric oxide and melatonin enhances cadmium resistance of tomato seedlings through regulation of the ascorbate-glutathione cycle and ROS metabolism[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(11).
- [33] 胡花丽, 王毓宁, 李鹏霞. 气调贮藏对猕猴桃抗坏血酸-谷胱甘肽代谢的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(7): 152-159. [HU H L, WANG Y N, LI P X. Effects of modified atmosphere storage on ascorbic acid-glutathione metabolism in kiwifruit[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 31(7): 152-159.]