马俊杰, 白梦涵, 哦哈尔·帕孜力江, 等. 臭氧处理对西梅果实采后贮藏 AsA-GSH 循环及细胞膜脂过氧化的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(8): 368−376. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040018
MA Junjie, BAI Menghan, OHAER Pazilijiang, et al. Effects of Ozone Treatment on AsA-GSH Cycle and Membrane Lipid Peroxidation in Postharvest Storage of Prunus Fruits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(8): 368−376. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040018

·贮运保鲜·

臭氧处理对西梅果实采后贮藏 AsA-GSH 循环及细胞膜脂过氧化的影响

马俊杰[1], 白梦涵[1], 哦哈尔·帕孜力江[1], 田　瑞[2], 唐彭丽[1], 宋娅楠[1], 古丽努尔·结肯[1], 崔宽波[3,*]
（1.新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052;
2.新疆农业大学化学化工学院, 新疆乌鲁木齐 830052;
3.新疆维吾尔自治区农业科学院农业装备研究所, 新疆乌鲁木齐 830091）

摘　要: 为探究臭氧处理对西梅采后贮藏期间抗坏血酸-谷胱甘肽循环及细胞膜脂过氧化的影响，本实验以‘法兰西’西梅为材料，使用 96.3 mg/m^3 的臭氧，每隔 15 d 对西梅果实进行处理，在近冰温−1~−1.5 ℃，相对湿度 80%~90% 的条件下贮藏 120 d，测定抗坏血酸-谷胱甘肽循环及细胞膜脂过氧化相关指标。结果表明：96.3 mg/m^3 的臭氧处理可维持西梅贮藏期间抗坏血酸（ascorbic acid，AsA）、还原性谷胱甘肽（reduced glutathione，GSH）、氧化型谷胱甘肽（oxidized glutathione，GSSG）含量，减少脱氢抗坏血酸（dehydroascorbic acid，DHA）生成，通过调控抗坏血酸代谢关键酶，包括抗坏血酸过氧化物酶（ascorbate peroxidase，APX）、单脱氢抗坏血酸还原酶（monodehydroascorbate reductase，MDHAR）、谷胱甘肽还原酶（glutathione reductase，GR）、脱氢抗坏血酸还原酶（dehydroascorbate reductase，DHAR）的活性维持细胞体内氧化平衡，并激活抗氧化代谢酶系统，显著提升超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、过氧化物酶（peroxidase，POD）和过氧化氢酶（catalase，CAT）活性（P<0.05），降低过氧化氢（hydrogen peroxide，H_2O_2）含量和超氧阴离子（superoxide anion，$O_2^{-}\cdot$）产生速率，抑制脂氧合酶活性（lipoxygenase，LOX），减少丙二醛（malondialdehyde，MDA）生成，贮藏末期 120 d 时 96.3 mg/m^3 臭氧处理组 LOX 活性比对照组降低了 32.73%，MDA 含量比对照组降低了 14.18%（P<0.05）。因此，96.3 mg/m^3 臭氧处理可通过加快抗坏血酸-谷胱甘肽循环，提高抗氧化代谢酶活性，减少有害物质对细胞膜造成的损伤，维持细胞膜完整性，从而延缓果实衰老，达到维持西梅贮藏品质，延长西梅贮藏期的目的。

关键词: 臭氧, 西梅, 贮藏保鲜, 抗坏血酸-谷胱甘肽循环, 膜脂过氧化
中图分类号: TS255.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)08−0368−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040018
本文网刊:

Effects of Ozone Treatment on AsA-GSH Cycle and Membrane Lipid Peroxidation in Postharvest Storage of Prunus Fruits

MA Junjie[1], BAI Menghan[1], OHAER Pazilijiang[1], TIAN Rui[2], TANG Pengli[1], SONG Yanan[1], GULINUER Jiekeng[1], CUI Kuanbo[3,*]
（1.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2.College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
3.Institute of Agricultural Equipment, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China）

Abstract: In order to explore the effects of ozone treatment on ascorbic acid-glutathione cycle and cell membrane lipid peroxidation during postharvest storage of prunes, 'France' prunes were used as materials in this experiment, and ozone at

收稿日期: 2025−04−03
基金项目: 国家自然科学基金项目（32460613）; 自治区重点研发项目（2022B02018-4）; 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目（2022D01A262）。
作者简介: 马俊杰（2001−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工贮藏及保鲜, E-mail: 2500618514@qq.com。
*** 通信作者:** 崔宽波（1982−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工贮藏及保鲜, E-mail: 30877141@qq.com。

96.3 mg/m^3 was used to treat prunes every 15 days. The fruit was stored at near ice temperature (−1~−1.5 ℃) and relative humidity (80%~90%) for 120 days. Ascorbic acid-glutathione cycle and cell membrane lipid peroxidation related indicators were measured. The results showed that 96.3 mg/m^3 ozone treatment could maintain the contents of ascorbic acid (AsA), reduced glutathione (GSH) and oxidized glutathione (GSSG), and reduce the production of dehydroascorbic acid (DHA) during storage. The key enzymes of ascorbic acid metabolism, including ascorbate peroxidase (APX) and monodehydroascorbate reductase (MDHAR), were regulated by ozone treatment. The activities of glutathione reductase (GR) and dehydroascorbate reductase (DHAR) maintained the oxidative balance in cells, and activated the antioxidant metabolic enzyme system, significantly elevating the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) (P<0.05). It reduced hydrogen peroxide (H_2O_2) content and superoxide anion ($O_2^{-}\cdot$) production rate, inhibited lipoxygenase (LOX) activity, reduced malondialdehyde (MDA) production. At the end of 120 days of storage, the LOX activity of the 96.3 mg/m^3 ozone treatment group was 32.73% lower than that of the control group, and the MDA content was 14.18% lower than that of the control group (P<0.05). Therefore, 96.3 mg/m^3 ozone treatment could delay fruit senescence by accelerating the ascorbic acid-glutathione cycle, increasing the activity of antioxidant metabolic enzymes, reducing the damage caused by harmful substances to the cell membrane, so as to maintain the storage quality of prunes and prolong the storage period of prunes.

Key words: ozone; prune; storage and preservation; ascorbic acid-glutathione cycle (AsA-GSH); membrane lipid peroxidation

西梅（*Prunus domestica* L.）属蔷薇科李属植物[1]。新疆是我国最大的西梅种植区，主要栽培的品种包括‘法兰西’、‘女神’、‘来客’等。‘法兰西’作为喀什地区主栽品种之一，口感香甜，风味浓郁，并富含丰富的营养物质，深受消费者喜爱。西梅属于呼吸跃变型果实，采摘后新陈代谢快，果实极易软化和腐败，产区采后腐烂率达 35%~45%[2]，严重制约产业效益，因此，运用简单高效的保鲜技术来解决西梅采后贮藏保鲜问题具有重要的实际意义。

在果蔬采后贮藏过程中，活性氧（reactive oxygen species, ROS）的过量积累会攻击植物细胞体内的核苷酸、蛋白质及膜脂中的多不饱和脂肪酸，从而降低抗氧化酶的活性，引起氧化损伤，破坏细胞膜结构的完整性和功能性[3]。植物可以通过酶促反应和非酶促反应来清除 ROS。抗坏血酸-谷胱甘肽循环（ascorbic acid-glutathione, AsA-GSH）在 ROS 清除系统中起着重要的作用。AsA-GSH 循环可通过增强抗坏血酸过氧化物酶（ascorbate peroxidase, APX）、谷胱甘肽还原酶（glutathione reductase, GR）、单脱氢抗坏血酸还原酶（monodehydroascorbate reductase, MDHAR）、脱氢抗坏血酸还原酶（dehydroascorbate reductase, DHAR）之间的协同氧化作用来清除过氧化氢（hydrogen peroxide, H_2O_2）[4]。抗坏血酸（ascorbic acid, AsA）与还原型谷胱甘肽（reduced glutathione, GSH）不仅可以作为酶促反应的底物，同时可作为电子供体，直接通过氧化还原清除 ROS，维持植物体内的氧化平衡。ROS 清除酶系统还包括过氧化氢酶（catalase, CAT）、过氧化物酶（peroxidase, POD）、超氧化物歧化酶（superoxide dismutase, SOD）的协同作用清除 ROS，抑制脂氧合酶（lipoxygenase, LOX）活性，减少膜脂过氧化最终产物丙二醛（malondialdehyde, MDA）的生成，从而维持细胞膜结构的稳定性，延缓果实采后衰老进程。

目前西梅常见的采后保鲜技术有气调处理、高二氧化碳处理、生物调节剂处理等，这些保鲜方法存在成本较高、操作复杂等问题。因此，绿色、高效、操作简单的保鲜技术对西梅采后贮藏具有重要作用。近冰温（near-freezing temperature, NFT）贮藏技术是指将贮藏温度控制在果蔬的冰点间，在不破坏细胞结构的基础上最大程度地降低果实新陈代谢，延缓果实衰老。臭氧作为一种广谱、安全、强氧化性的杀菌保鲜剂，在处理果蔬方面具有操作简单、成本低、实际应用效果较好等特点，有研究表明适宜浓度的臭氧能激活果蔬的抗氧化系统[5]，促进抗氧化次生代谢产物合成，加速酶促及非酶促反应，维持果实的贮藏品质，广泛应用在果蔬采后贮藏方面。王燕等[6] 的研究表明 45 mg/m^3 臭氧处理可以提高猕猴桃 AsA-GSH 循环相关酶的活性，保持 AsA 和 GSH 含量，维持较高的氧化还原状态，提升抗氧化能力。芦玉佳等[7] 研究表明 200 mg/m^3 的臭氧可以提高杏果实抗氧化酶（SOD、POD、CAT）的活性，减缓超氧阴离子（superoxide anion, $O_2^{-}\cdot$）的产生速率和 H_2O_2 的积累。李欣等[8] 的研究发现，48.2 mg/m^3 臭氧处理猕猴桃可抑制 MDA 的积累，保持细胞膜的完整性，维持猕猴桃品质。

目前尚未有系统性研究臭氧处理对西梅采后贮藏 AsA-GSH 循环及细胞膜脂过氧化的影响。本研究以‘法兰西’西梅为材料，通过间歇性臭氧处理西梅果实，探讨臭氧处理对采后西梅果实贮藏期间 AsA-GSH 循环以及细胞膜脂过氧化的影响，为西梅贮藏保鲜技术提供理论依据和实践指导。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

‘法兰西’西梅　喀什市疏附县，选取可溶性固形物含量（22.5%±0.5%），硬度（19±0.2）kg/cm^2，形状大小均匀，无机械伤、无病虫害的西梅进行实验；三氯

乙酸、硫代巴比妥酸、聚乙烯吡咯烷酮、无水醋酸钠、愈创木酚　天津致远化学试剂有限公司；氧化型谷胱甘肽、二硫代硝基苯甲酸、还原性谷胱甘肽　均为分析纯，上海源叶生物科技有限公司；GSSG 含量、DHAR 活性、MDHAR 活性、O_2^{-}·产生速率、H_2O_2 含量试剂盒　苏州梦犀生物科技有限公司。

RC-4 温度记录仪　江苏精创电气有限公司；GX16R 高速冷冻离心机　湖南恒诺仪器设备有限公司；FL-810SY 飞力臭氧发生机　深圳飞力电器科技有限公司；T6 紫外分光光度计　北京普析仪器有限责任公司。

1.2　实验方法

1.2.1　西梅处理及贮藏　通过测定西梅果实冰点，将西梅放置在近冰温（−1～−1.5 ℃）、相对湿度（80%～90%）的冷库贮藏，使用臭氧发生机每隔 15 d 处理一次，在前期实验浓度（0、64.2、96.3、128.4 mg/m^3）的基础上选择 96.3 mg/m^3 的臭氧浓度进行实验。

1.2.2　指标测定方法

1.2.2.1　西梅果实结冰点的测定　参照崔宽波等[9]的方法，将温度记录仪探头插入西梅果实中心，置于−35 ℃ 的冷冻箱中，每 10 s 自动记录一次温度数据，直至西梅果实完全冻结，绘制温度变化曲线图，以确定西梅果实的冰点温度。

1.2.2.2　AsA、DHA 含量测定　参照 Turcsányi 等[10]的方法进行测定：取 1 g 西梅样品，加入 2 mL 100 mmol/L HCl，4 ℃ 下 12000×g 离心 25 min，收集上清液备用。AsA 含量测定：取 100 μL 上清液与 2 mL 100 mmol/L pH6.0 磷酸钾缓冲液和 0.5 mL 蒸馏水混匀，于 265 nm 波长测定吸光度，通过标准曲线计算每克西梅样品中 AsA 含量，单位为 mg/100 g FW。DHA 含量测定：取等量上清液加入 2 mL 磷酸钾缓冲液及 0.5 mL 2 mmol/L DTT 溶液，28 ℃ 下反应 20 min 后在 265 nm 波长下测定总抗坏血酸含量，两者差值即为 DHA 含量，单位为 mg/100 g FW。

1.2.2.3　GSH、GSSG 含量测定　参照曹建康等[11]的方法测定 GSH 含量：取 2 g 西梅样品，加入 2 mL 50 g/L 三氯乙酸（含 5 mmol/L EDTA-2Na），4 ℃ 12000×g 离心 25 min。取 2 mL 上清液与 0.1 mol/L pH6.8 磷酸缓冲液等体积混合后，分别加入 4 mmol/L DTNB 试剂和磷酸缓冲液各 1 mL，在 28 ℃ 反应 25 min 后在 412 nm 波长下测定吸光度差值，通过标准曲线计算每克西梅样品中 GSH 含量，单位为 μmol/g FW。GSSG含量采用试剂盒测定，单位为 nmol/g FW。

1.2.2.4　AsA-GSH 循环酶活性测定　APX 活性参照曹建康等[11]的方法测定：取 2 g 西梅样品，加入含 0.1 mmol/L EDTA、1 mmol/L 抗坏血酸和 2% PVPP 的 2 mL 磷酸钾缓冲液（0.1 mol/L，pH7.5），4 ℃ 12000×g 离心 30 min。取 0.1 mL 上清液与 2.6 mL 反应缓冲液（含 0.1 mmol/L EDTA、0.05 mmol/L 抗坏血酸），加入 0.4 mL 2 mmol/L H_2O_2 启动反应。在 290 nm 波长处测定吸光度，每分钟降低 0.01 定义为一个酶活单位（U/g FW）。

GR 活性参照曹建康等[11]的方法测定：取 2 g 西梅样品加入 2 mL 0.1 mol/L，pH7.5 磷酸钠缓冲液（含 1 mmol/L EDTA），离心取上清液。取 200 μL 上清液与 2.7 mL 磷酸钠缓冲液、0.1 mL 5 mmol/L GSSG 溶液混匀，加入 40 μL 4 mmol/L NADPH 启动反应。在 340 nm 波长下测定吸光值变化速率计算酶活，单位定义为 U/g FW。

DHAR、MDHAR 活性均采用试剂盒测定，单位为 U/g FW。

1.2.2.5　SOD、POD、CAT 抗氧化酶活性测定　SOD、POD、CAT 活性均参照曹建康等[11]的方法测定，单位均为 U/g FW。

SOD 活性测定：取 2 g 西梅样品加入 5 mL 磷酸钠缓冲液（含 5 mmol/L DTT 和 5% PVP）后，在 4 ℃ 下、12000×g 离心 20 min，取上清液，在 560 nm 波长下测定吸光度变化。以 SOD 抑制硝基蓝四唑在光下的还原作用确定酶活性大小。

CAT 活性测定：取 2 g 样品加入 5 mL 预冷的 0.1 mol/L pH7.5 磷酸钠缓冲液，在 4 ℃ 下、12000×g离心 20 min 后取上清液，在 240 nm 波长测定吸光度变化。以 CAT 催化 H_2O_2 分解过程中 H_2O_2 的消耗量来确定酶活性。

POD 活性测定：取 2 g 西梅样品加入 5 mL 预冷的乙酸-乙酸钠缓冲液，在 4 ℃ 下、10000×g 离心 30 min 后取上清液，在 470 nm 波长下测定吸光度变化。POD 活性以每克样品每分钟吸光度增加 0.01 为 1 个 POD 活性单位。

1.2.2.6　O_2^{-}·产生速率和 H_2O_2 含量的测定　O_2^{-}·产生速率和 H_2O_2 含量均采用试剂盒测定，O_2^{-}·产生速率单位为 nmol/g min FW，H_2O_2 含量单位为 μmol/g FW。

1.2.2.7　LOX 活性、MDA 含量测定　LOX 活性参照曹建康等[11]的方法测定，取 2 g 西梅样品加入 2 mL 磷酸缓冲液，离心取上清液待测，加入 2.75 mL 乙酸乙酸钠缓冲液和 200 μL 酶液及 50 μL 0.1 mol/L 的亚油酸钠溶液 35 ℃ 反应 10 min，在 234 nm 处测定吸光度变化，LOX 活性以每克样品每分钟吸光度增加 0.01 为 1 个 LOX 活性，单位为 U/g FW。MDA 含量参照曹建康等[11]的方法测定，取 1 g 样品，加入 5 mL 三氯乙酸溶液离心取上清液待测，取 2 mL 上清液加入 2 mL 0.67%TBA 溶液，煮沸 20 min 后离心取上清液，分别在 450、532、600 nm 处测定吸光值，单位为 μmol/g FW。

1.3　数据处理

本试验中每个处理重复 3 次，结果表示为平均值±标准误差，采用 Excel 2019 处理数据，SPSS 26.0

对数据进行分析，$P<0.05$ 代表该指标存在显著性差异，$P<0.01$ 代表该指标存在极显著性差异，使用 Origin 2024 绘图。

2　结果与分析

2.1　西梅果实冰点测定

如图 1 西梅果实冰点曲线图可知，随着冷冻时间延长，西梅果实中心温度下降至过冷点（−5.1 ℃），随后温度开始回升，这是由于西梅果实内部液态水向固态水转变，相变潜热释放[12]，回升后的温度即为西梅冰点温度（−2.3 ℃）。在实验中为避免受到冷库波动造成果实冷害现象，所以近冰温贮藏温度设定为−1~−1.5 ℃。

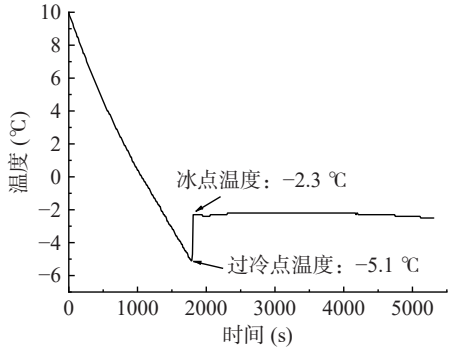


图 1　西梅冻结曲线

Fig.1　Freezing curve of prune

2.2　臭氧处理对西梅贮藏期间 AsA、DHA、GSH、GSSG 含量的影响

果蔬中的 AsA 和 GSH 作为抗氧化物质可直接清除果蔬细胞内的 ROS，同时也是许多代谢途径中的辅酶和还原剂[13]。如图 2A 所示，在贮藏期间西梅 AsA 含量总体呈下降趋势，但贮藏中期（45~75 d），AsA 含量产生波动且 96.3 mg/m³ 臭氧处理组 AsA 含量始终维持在较高的水平，贮藏末期 120 d 时，臭氧处理组比对照组高出了 25.68%（$P<0.05$）。如图 2B 所示，西梅贮藏期间 DHA 含量呈先上升后下降的趋势，在贮藏 30~45 d 时，96.3 mg/m³ 臭氧处理组 DHA 含量显著高于对照组（$P<0.05$），在第 45 d 达到峰值，比同时期对照组高 19.17%，贮藏后期 75~120 d 对照组 DHA 含量显著高于臭氧处理组（$P<0.05$），在 90 d 达到峰值，是臭氧处理组的 2.72 倍（$P<0.05$）。如图 2C 所示，西梅贮藏期间 GSH 含量呈先上升后下降的趋势，贮藏 45 d 开始上升，贮藏 60~75 d 时，96.3 mg/m³ 臭氧处理组比同期对照组分别高 30.41%、30.26%（$P<0.05$）。GSSG 含量如图 2D 所示，贮藏前期较为平稳，两组在 75 d 达到峰值，臭氧处理组比同期对照组高 27.64%，90~120 d 出现下降趋势，比对照组分别高 41.81%、40.48%、38.97%（$P<0.05$）。实验结果表明，96.3 mg/m³ 臭氧处理可有效维持西梅果实采后贮藏过程中 AsA 和 GSH、GSSG 的含量，降低 DHA 的生成，同时加快 AsA-GSH 循环中底物的转化，使 AsA 含量维持在较高水平，以此来保持体内的氧化平衡。

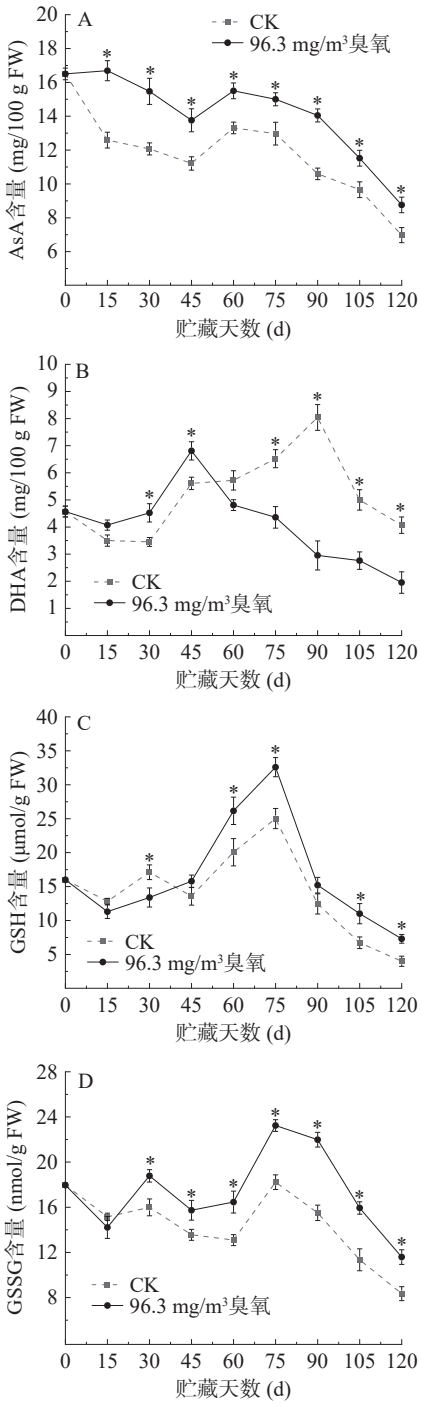


图 2　臭氧处理对西梅贮藏期间 AsA（A）、DHA（B）、GSH（C）、GSSG（D）含量的影响

Fig.2　Effects of ozone treatment on AsA (A), DHA (B), GSH (C), and GSSG (D) contents of prunes during storage

注：*表示同一贮藏时间组间呈显著性差异（$P<0.05$），图 3~图 5 同。

2.3　臭氧处理对西梅贮藏期间 AsA-GSH 循环酶活性的影响

如图 3A 所示，贮藏期间西梅 APX 活性呈先上升后下降趋势，在贮藏前期 15~30 d 对照组 APX 活性比 96.3 mg/m³ 臭氧处理组分别高 12.06%、21.43%（$P<0.05$），30 d 达到峰值，随后开始下降，臭氧处理组峰值出现在 75 d，活性较对照组高 27.20% 且维持到

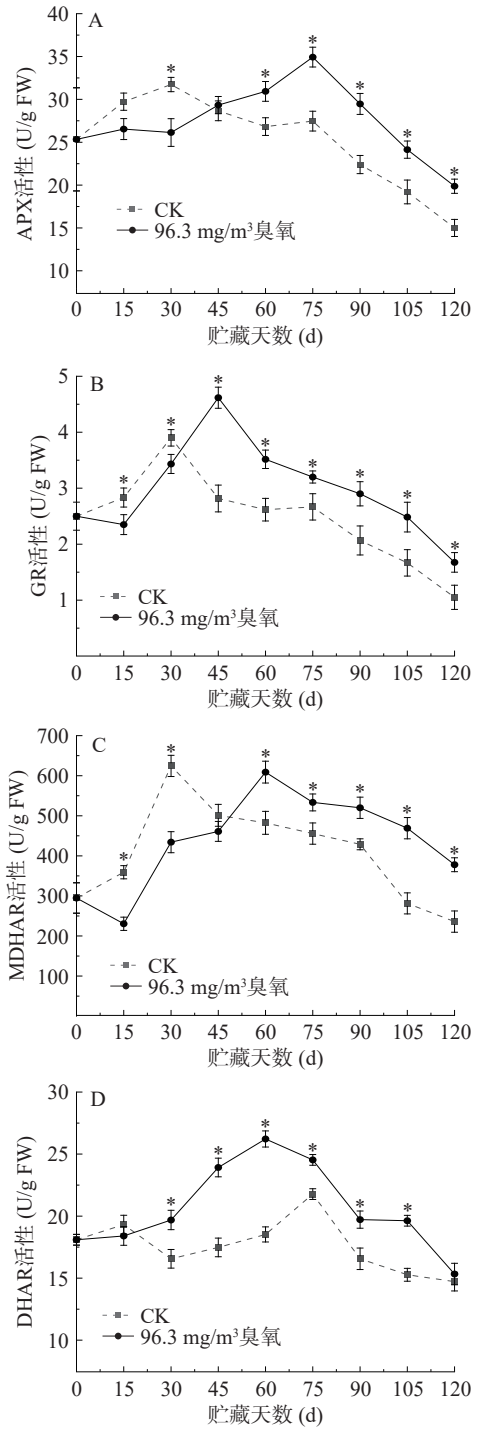


图 3 臭氧处理对西梅贮藏期间 APX(A)、GR(B)、MDHAR(C)、DHAR(D)活性的影响

Fig.3 Effects of ozone treatment on the activities of APX (A), GR (B), MDHAR (C), and DHAR (D) of prunes during storage

贮藏末期, 始终保持较高活性。GR 活性如图 3B 所示, 两组 GR 活性呈先上升后下降趋势, 贮藏 15~30 d 期间对照组 GR 活性显著高于 96.3 mg/m³ 臭氧处理组(P<0.05), 臭氧处理组 GR 活性在 45 d 达到峰值, 比同期对照组高 64.06%(P<0.05), 在 45 d 后臭氧处理组 GR 活性始终高于对照组。贮藏期间西梅果实 MDHAR 活性与 APX、GR 活性趋势一致(图 3C), 贮藏 15~30 d 期间, 对照组比 96.3 mg/m³ 臭氧处理组 MDHAR 活性高 55.82%、43.83%(P<0.05), 臭氧处理组在 60 d 达到峰值后开始下降, 且在贮藏末期仍保持较高的活性。贮藏 15 d 时两组 DHAR 活性无显著性差异, 贮藏 30 d 之后臭氧处理组 DHAR 活性均显著高于对照组(图 3D), 在第 45、60、75 d 活性分别比对照组高 64.06%、55.82%、43.83%(P<0.05), 贮藏末期 120 d 时两组无显著性差异。

结果表明, 臭氧处理在初期(0~30 d)会轻微抑制 AsA-GSH 循环酶活性, 这是因为臭氧处理初期会引起果实轻度氧化应激, 导致 ROS 短暂积累, 造成氧化应激和细胞损伤[14], 而随着贮藏时间的延长, 西梅果实逐渐适应了臭氧处理的环境, 并激活 AsA-GSH 循环系统提高相关酶的活性, 这与李程程等[15] 的研究结果一致, 使用 200 mg/m³ 臭氧处理大豆可引起 AsA-GSH 循环酶的活性出现先抑制后上升的现象。

2.4 臭氧处理对西梅贮藏期间 SOD、POD、CAT 抗氧化酶活性的影响

抗氧化酶系统是细胞中清除 ROS 的主要途

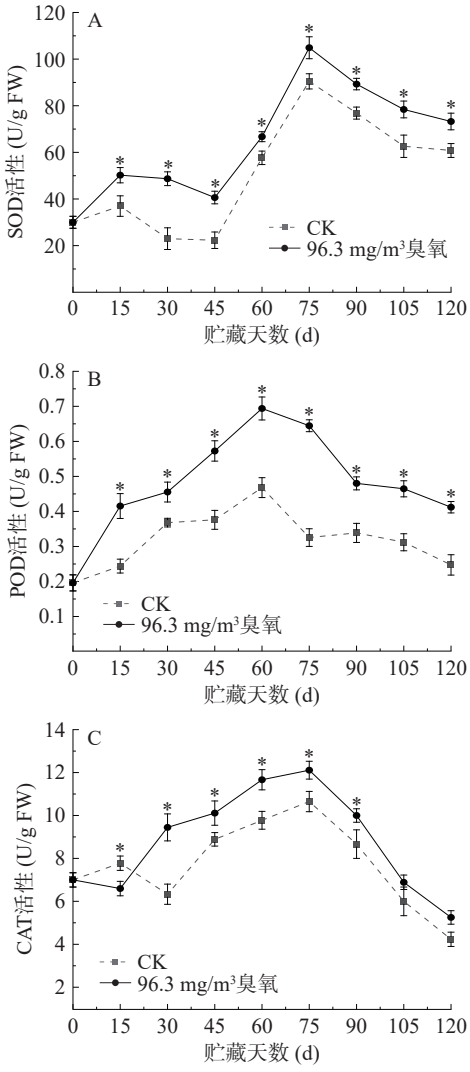


图 4 臭氧处理对西梅贮藏期间 SOD(A)、POD(B)、CAT(C)活性的影响

Fig.4 Effects of ozone treatment on the activities of SOD (A), POD (B), and CAT (C) of prunes during storage

径[16]，主要通过 SOD、POD、CAT 之间的协同氧化作用来清除 ROS。如图 4A 所示，贮藏期间西梅果实 96.3 mg/m³ 臭氧处理组的 SOD 活性显著高于对照组（P<0.05），从 45 d 起 SOD 活性急剧上升，在 75 d 达到峰值，臭氧处理组比对照组高 15.91%，贮藏 120 d 时臭氧处理组比对照组的 SOD 活性高 20.44%（P<0.05）。POD 活性如图 4B 所示，贮藏期间西梅 POD 活性呈先上升后下降的趋势，对照组变化较为平稳，两组均在 60 d 达到峰值，臭氧处理组比同期对照组高 48.29%（P<0.05），随后两组 POD 活性开始逐渐下降。CAT 活性如图 4C 所示，在 15 d 对照组 CAT 活性高于 96.3 mg/m³ 臭氧处理组，随后臭氧处理组活性持续上升，在 30~90 d 始终高于对照组（P<0.05），贮藏后期 105~120 d 两组 CAT 活性无显著性差异（P>0.05）。实验结果表明，96.3 mg/m³ 臭氧处理可以激活西梅果实自身的抗氧化防御系统，提高 SOD、POD、CAT 的活性，增强果实在贮藏期间的抗氧化能力。

2.5　臭氧处理对西梅贮藏期 H_2O_2 含量、$O_2^{-}\cdot$产生速率、LOX 活性、MDA 含量的影响

ROS 是一类具有强氧化能力的氧分子[17]，主要包括 $O_2^{-}\cdot$和 H_2O_2，在贮藏过程中 ROS 的积累会提高 LOX 的活性[18]，LOX 作为细胞膜脂过氧化的重要启动因子，可直接参与果实衰老进程[19]，促进多不饱和脂肪酸的降解，增加细胞膜质过氧化的最终产物 MDA 的积累[20]，MDA 的积累会破坏细胞膜的完整性和功能性，加速果实衰老品质下降。

如图 5A 所示，西梅在贮藏 15~30 d 时，96.3 mg/m³ 臭氧处理组的 H_2O_2 含量略高于对照组，分别比对照组高出 18.11%、5.96%（P>0.05），贮藏 45~90 d 期间，对照组 H_2O_2 含量显著高于臭氧处理组，分别比臭氧处理组高 41.15%、35.47%、86.62%、35.36%（P<0.05），在贮藏末期（105~120 d）无显著性差异。如图 5B 所示，贮藏 30~45 d 期间，臭氧处理组 $O_2^{-}\cdot$产生速率略高于对照组，但无显著性差异（P>0.05），60 d 时对照组的 $O_2^{-}\cdot$产生速率急剧上升，在 60~105 d 对照组分别比臭氧处理组高 3.94%、3.05%、9.97%、4.50%（P<0.05）。如图 5C 所示，贮藏期间西梅 LOX 活性呈上升趋势，两组 LOX 活性均在贮藏 75 d 开始急剧上升，90~120 d 期间，96.3mg/m³臭氧处理组 LOX 活性相比对照组分别降低了 41.04%、34.84%、32.73%（P<0.05）。如图 5D 所示，西梅贮藏期间 MDA 含量变化趋势与 LOX 活性一致，贮藏 0~60 d 变化较为平稳，两组无显著性差异（P>0.05），在贮藏 60 d 后西梅 MDA 含量开始急剧上升，贮藏后期（75~120 d）臭氧处理组 MDA 含量相比对照组分别降低了 32.35%、20.48%、17.20%、14.18%（P<0.05）。

实验结果表明，96.3 mg/m³ 臭氧处理可通过促进 APX 和 GR、MDHAR、DHAR 酶活性，加快 ASA/DHA 和 GSH/GSSG 之间的氧化循环，抑制 $O_2^{-}\cdot$的产生速率和 H_2O_2 的积累，抑制 LOX 活性从而减少 MDA 含量的积累。

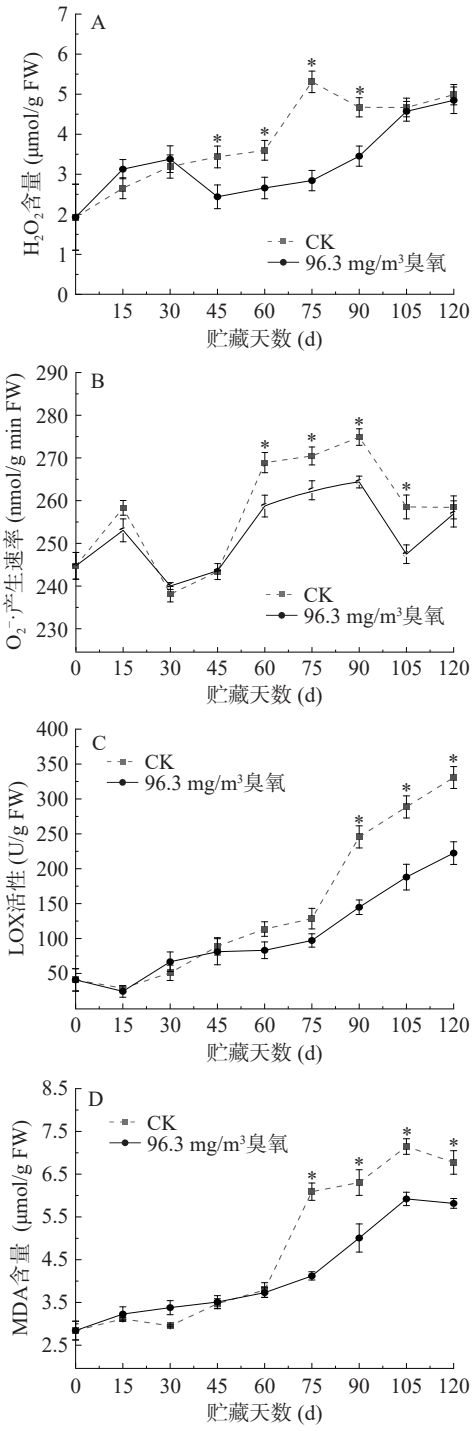
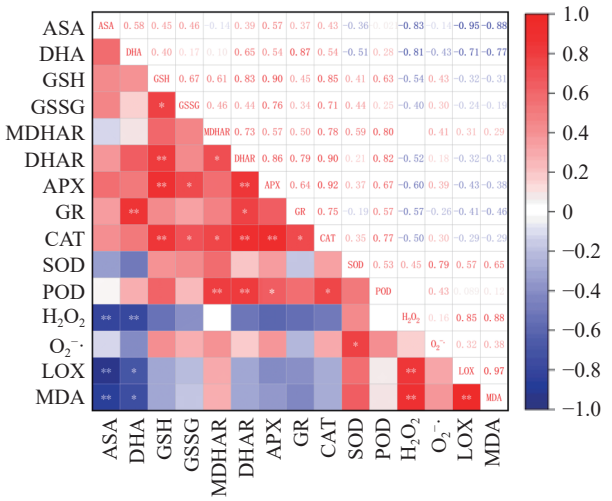


图 5　臭氧处理对西梅贮藏期间 H_2O_2 含量（A）、$O_2^{-}\cdot$产生速率（B）、LOX 活性（C）、MDA 含量（D）的影响

Fig.5　Effects of ozone treatment on H_2O_2 content (A), $O_2^{-}\cdot$generation rate (B), LOX activity (C), and MDA contents (D) of prunes during storage

2.6　臭氧处理对西梅贮藏期 AsA-GSH 循环及细胞膜脂过氧化相关性分析

当相关系数的绝对值为 0.8~1.0 时，表明两者之间存在极强的相关性；绝对值为 0.6~0.8 则表示显著相关；相关性分析结果表明（图 6），96.3 mg/m³ 臭氧



*P<0.05, **P<0.01

图 6 臭氧处理对西梅贮藏期 AsA-GSH 循环及细胞膜脂过氧化相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of ozone treatment on AsA-GSH cycle and cell membrane lipid peroxidation of plum during storage

处理西梅果实后 H_2O_2、LOX、MDA 变化与 AsA 含量呈极显著负相关(P<0.01)。而 AsA、DHA、GSH 的含量变化与 APX、GR、DHAR 酶活性呈正相关,其中 DHA 与 GR 呈现极显著正相关(P<0.01)相关系数为 0.87,GSH 与 APX、DHAR 均呈极显著正相关(P<0.01),相关系数分别为 0.90、0.83。

3 讨论

适宜浓度的臭氧处理可增加果蔬的抗氧化酶活性,诱导轻度氧化应激,促进多胺、酚类化合物和其他次生代谢产物的合成[21]。臭氧的作用效果取决于多方面因素,如受到贮藏温度、湿度,果实蜡脂层[22]等因素影响,不同果实对臭氧的耐受程度不同,若臭氧浓度较低则无法起到保鲜作用,而浓度过高时,会产生过量的 ROS 积累引起细胞氧化损伤,加速膜脂过氧化和果实腐败。因此,适宜浓度的臭氧处理可通过调控抗氧化代谢通路(如 AsA-GSH 循环)提升抗氧化酶活性,在激活防御响应的同时避免造成过度的氧化胁迫,最终提高果实的抗逆性并延缓采后衰老。

AsA-GSH 循环作为维持植物体抗氧化系统的重要调控机制,在植物抵抗氧化胁迫、清除逆境 ROS 积累方面具有重要的作用。AsA-GSH 循环中,AsA 作为电子供体在 APX 的催化作用下将 H_2O_2 分解为水,同时自身氧化为单脱氢抗坏血酸(monodehydroascorbate, MDHA)[23],而后在 DHAR 的作用下转化为 DHA,MDHAR 和 DHAR 可分别将 MDHA 和 DHA 再还原为 AsA[24],臭氧可诱导 GR 活性增强,在烟酰胺腺嘌呤二核苷酸和还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸的作用下将 GSSG 还原为 GSH,GSH 作为反应底物在 DHAR 的催化下重新还原为 AsA[25],保证 AsA 的高效再生。GSH 作为一种低分子硫醇化合物可与自由基反应形成低活性物质,还可以与 AsA 和多酚类化合物构成植物抗氧化应激的非酶性保护系统[26],GSH 可通过产生蛋白质-谷胱甘肽二硫化物来保护蛋白质免受氧化变性,通过谷胱甘肽转移酶催化形成缀合物,螯合具有促氧化特性的金属离子[27],共同起到维持细胞稳态的作用。在臭氧的胁迫下 AsA-GSH 循环(APX、GR、MDHAR、DHAR)酶活性被提高,AsA 和 GSH 含量得到较好的维持,保持较高的氧化还原状态,增强 H_2O_2 分解速率。

ROS 是导致水果和蔬菜衰老的主要因素,其中 H_2O_2 和 O_2^{-}·是主要物质[28],ROS 会提高脂氧合酶和磷脂酶 D 的活力,导致多不饱和脂肪酸的降解,同时对细胞膜上的脂类物质具有较强的氧化作用,从而增加脂质饱和度,改变膜的流动性,形成 MDA 等脂质过氧化物造成西梅果实衰老。LOX 是一种含非血红素铁或锰的加氧酶[29],是贮藏过程中脂质降解中第一步的主要启动酶,通过催化具有 1,4-戊二烯结构的不饱和脂肪酸(如油酸、亚油酸、亚麻酸)与氧气发生协同氧化[30],产生多种 ROS 如 O_2^{-}·、羟基自由基(·OH)、单线态氧(^{1}O2)和脂质过氧化氢(LOOH)等物质[31−32],并经过一系列的反应生成最终产物 MDA。MDA 含量是衡量细胞膜细胞膜脂过氧化程度的重要指标标志[33],MDA 可攻击细胞中核酸、蛋白质、多不饱和脂肪酸,使这些大分子发生交联和断裂,导致细胞结构和功能受到氧化损伤。CAT、POD、SOD 作为植物细胞内重要的 ROS 清除剂[34],其中 SOD 通过歧化反应将 O_2^{-}·分解为 H_2O_2 和氧气,而后通过 POD和 CAT 的协同作用将 H_2O_2 催化成水和氢气[35],以此来减少对细胞的刺激作用,延缓果实细胞膜脂氧化,进而抑制果实衰老。本研究发现 96.3 mg/m^3 臭氧处理可提高抗氧化酶活性,来清除 ROS,抑制 LOX活性,减少有害物质 MDA 对细胞的损害作用。Lu等[36]的研究表明,15 mg/m^3 的臭氧处理可以抑制采后哈密瓜 H_2O_2 和 MDA 的积累,提高 AsA-GSH 循环相关关键酶的活性,上调 MDHAR 基因的表达。Wang 等[37]的研究发现,使用 1 mg/L 臭氧处理猕猴桃可提升 AsA-GSH 循环中 MDHAR 和 DHAR 的活性,促进果实 AsA、GSH 含量的再生。Piechowiak[38]研究发现臭氧处理可通过提高琥珀酸脱氢酶活性和 ATP 水平来提高 GSH 含量,有助于提高 H_2O_2 清除能力,综上所述臭氧处理可通过调控 ROS 代谢,维持细胞膜稳定性,提升贮藏品质。

4 结论

本研究表明,使用 96.3 mg/m^3 的臭氧处理可调控西梅果实贮藏期间 AsA-GSH 循环,增强 APX、GR、MDHAR、DHAR 活性,维持 AsA、GSH 与 GSSG 的含量,减少 DHA 生成,同时,臭氧处理可激活抗氧化代谢 CAT、POD、SOD 活性,减少 H_2O_2 含量和 O_2^{-}·产生速率,抑制 LOX 活性,降低有害物质 MDA 对细胞膜造成的损伤,有效延缓膜脂过氧化进

程，维持细胞膜的完整性，延长西梅果实贮藏期。综上所述，本实验通过探究臭氧处理对采后西梅果实贮藏期间 AsA-GSH 循环以及细胞膜脂过氧化的影响，为臭氧处理调控西梅贮藏品质提供了新的思路，并为将来研究臭氧与其他保鲜技术的联合应用提供参考，同时为西梅贮藏保鲜技术的发展提供理论依据和实践指导。

© 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］ 张俊秀, 胡桃花, 孙俊宝, 等. 西梅栽培管理研究进展[J]. 果树资源学报, 2020, 1(2): 52−55. ［ZHANG Junxiu, HU Taohua, SUN Junbao, et al. Advancesin research on cultivation and management of *Prunus*[J]. Journal of Fruit Resources Guoshu, 2020, 1(2): 52−55.］

［2］ 晏文丽, 代宇琪, 韩森, 等. 新疆西梅采后生理变化与贮运保鲜技术研究进展[J]. 食品工业, 2024, 45(4): 173−177. ［YAN Wenli, DAI Yuqi, HAN Miao, et al. A review on postharvest physiological and biochemical changes, storage and preservation of Xinjiang *Prunus domestica* L. ximei[J]. The Food Industry, 2024, 45(4): 173−177.］

［3］ YOU Jun, CHAN Zhulong. ROS regulation during abiotic stress responses in crop plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 1092.

［4］ 王懿, 侯媛媛, 马钰晴, 等. 甘氨酸甜菜碱处理对桃果实冷害及抗坏血酸-谷胱甘肽循环代谢的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(13): 158−165. ［WANG Yi, HOU Yuanyuan, MA Yuqing, et al. Effect of *Glycine* betaine treatment on chilling injury and ascorbic acid-glutathione cycle metabolism in peach fruit[J]. Food Science, 2021, 42(13): 158−165.］

［5］ TOKALA V Y, SINGH Z, KYAW P N. Postharvest fruit quality of apple influenced by ethylene antagonist fumigation and ozonized cold storage[J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128293.

［6］ 王燕, 牛耀星, 叶力瑕, 等. 臭氧处理对猕猴桃采后抗氧化系统的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(7): 66−73. ［WANG Yan, NIU Yaoxing, YE Lixia, et al. Effect of ozone treatment on postharvest antioxidant system of kiwifruit[J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 66−73.］

［7］ 芦玉佳, 李玲, 张亚琳, 等. 臭氧处理对采后杏果实活性氧代谢的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(7): 345−352. ［LU Yujia, LI Ling, ZHANG Yalin, et al. Effects of ozone treatment on active oxygen metabolism of postharvest apricot fruits[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(7): 345−352.］

［8］ 李欣, 梁子兆, 范思仪, 等. 不同浓度间歇性臭氧处理对猕猴桃贮藏保鲜效果及抗氧化系统的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(20): 239−246. ［LI Xin, LIANG Zizhao, FAN Siyi, et al. Effect of intermittent treatment with different concentrations of ozone on preservation and antioxidant system of kiwifruit[J]. Food Science, 2024, 45(20): 239−246.］

［9］ 崔宽波, 范新光, 杨忠强, 等. 近冰点贮藏对小白杏采后品质和抗氧化能力的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 238−244. ［CUI Kuanbo, FAN Xinguang, YANG Zhongqiang, et al. Improved postharvest quality and antioxidant capacity of apricot (*Prunus armeniaca* L. cv. Xiaobai) during storage at near freezing temperature[J]. Food Science, 2019, 40(3): 238−244.］

［10］ TURCSÁNYI E, LYONS T, PLÖCHL M, et al. Does ascorbate in the mesophyll cell walls form the first line of defence against ozone testing the concept using broad bean (*Vicia faba* L.)[J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(346): 901−910.

［11］ 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[Z]. 果蔬采后生理生化实验指导, 2007. ［CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Postharvest physiological and biochemical experimental guidance of fruits and vegetables[Z]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.］

［12］ 范新光. 杏果实采后品质特性及近冰温冷藏技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. ［FAN Xinguang. Analysis of apricot postharvest quality and study of near freezing temperature storage on apricot[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.］

［13］ DAS K, ROYCHOUDHURY A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants[J]. Frontiers in Environmental Science, 2014, 2: 53.

［14］ ZHOU Qian, MA Chao, CHENG Shunchang, et al. Changes in antioxidative metabolism accompanying pitting development in stored blueberry fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 88: 88−95.

［15］ 李程程, 张子蕤, 宋晓萱, 等. 臭氧胁迫对大豆抗氧化代谢与生殖生长的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1383−1392. ［LI Chengcheng, ZHANG Zirui, SONG Xiaoxuan, et al. Effects of ozone stress on antioxidant metabolism and reproductive growth of soybean[J]. Ecology and Environment Sciences, 2022, 31(7): 1383−1392.］

［16］ 彭思佳, 虞任莹, 童秀子, 等. 1-MCP 处理结合激光微孔膜包装对采后水蜜桃的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 363−370. ［PENG Sijia, YU Renying, TONG Xiuzi, et al. Effect of 1-MCP treatment combined with laser microporous film packing on the preservation effect of honey peach fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 363−370.］

［17］ MITTLER R. ROS are good[J]. Trends in Plant Science, 2017, 22(1): 11−19.

［18］ AGHDAM M S, ASGHARI M, KHORSANDI O, et al. Alleviation of postharvest chilling injury of tomato fruit by salicylic acid treatment[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(10): 2815−2820.

［19］ 巩多蕊, 杨莉玲, 韩江, 等. 模拟冷链处理下不同储藏温度对杏果实贮藏期细胞膜脂过氧化及品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(9): 2198−2207. ［GONG Duorui, YANG Liling, HAN Jiang, et al. Effects of simulated cold chain transport on cell membrane lipid peroxidation and quality of apricot fruit during storage[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(9): 2198−2207.］

［20］ 尹杰文, 何晓梅, 贾嘉懿, 等. 基于主成分分析的微孔膜包装对延缓黄瓜冷贮后细胞膜脂过氧化及品质劣变研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(22): 227−234. ［YIN Jiewen, HE Xiaomei, JIA Jiayi, et al. Effect of microporous membrane packaging on retarding cell membrane lipid peroxidation and quality deterioration of cucumber after cold storage based on principal component analysis[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(22): 227−234.］

［21］ SHEZI S, SAMUKELO M L, MDITSHWA A, et al. Changes in biochemistry of fresh produce in response to ozone postharvest treatment[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 269: 109397.

［22］ ALI A, ONG M K, FORNEY C F. Effect of ozone pre-conditioning on quality and antioxidant capacity of *Papaya* fruit during

ambient storage[J]. Food Chemistry, 2014, 142: 19−26.
[23] MA Yuanyuan, HUANG Dandan, CHEN Changbao, et al. Regulation of ascorbate-glutathione cycle in peaches *via* nitric oxide treatment during cold storage[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 247: 400−406.
[24] ANJUM N A, CHAN M T, UMAR S. Ascorbate-glutathione pathway and stress tolerance in plants[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010.
[25] 苗卫东, 王萌, 高焕超, 等. 外源褪黑素对低温胁迫下不同葡萄品种抗氧化酶活性和 AsA-GSH 循环的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(23): 133−138. [MIAO W D, WANG M, GAO H C, et al. Effect of exogenous melatonin on antioxidant enzyme activities and AsA-GSH cycle in different grape varieties under low temperature stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(23): 133−138.]
[26] WANG Yuxuan, SHEN Lulu, WU Shiliang, et al. Sensitivity of surface ozone over China to 2000–2050 global changes of climate and emissions[J]. Atmospheric Environment, 2013, 75: 374−382.
[27] HASANUZZAMAN M, NAHAR K, ANEE T I, et al. Glutathione in plants: Biosynthesis and physiological role in environmental stress tolerance[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2017, 23(2): 249−268.
[28] JIA L, LI Y, LIU G, et al. UV-C delays senescence in 'Lingwu long' jujube fruit by regulating R OS and phenylpropanoid metabolism[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2023, 194: 383−393.
[29] 李会容, 赵昶灵, 杨焕文, 等. 高等植物脂氧合酶活性测定方法的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 217−223. [LI Huirong, ZHAO Changling, YANG Huanwen, et al. Research advances of the assay methods of the lipoxygenase activity in higher plants[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(15): 217−223.]
[30] 沙伟, 任巍巍, 马天意. 脂氧合酶基因在植物中的研究进展[J]. 分子植物育种, 2019, 17(24): 8102−8107. [SHA Wei, REN Weiwei, MA Tianyi. Research advances of lipoxygenase genes in plants[J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(24): 8102−8107.]
[31] 彭敏兰, 胡建安. 脂氧合酶介导的氧化代谢与氧化应激[J]. 中国药理学与毒理学杂志, 2014, 28(3): 449−454. [PENG Minlan, HU Jian'an. Lipoxygenase-mediated oxidative metabolism and oxidative stress[J]. Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology, 2014, 28(3): 449−454.]
[32] KANGASJÄRVI J, JASPERS P, KOLLIST H. Signalling and cell death in ozone-exposed plants[J]. Plant, Cell & Environment, 2005, 28(8): 1021-1036.
[33] LI Ruijuan, YANG Shuxia, WANG Dan, 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.
[34] 李莹, 程青, 李冉, 等. 1-MCP 对 CO_2 处理'磨盘柿'果实活性氧含量及清除酶活性的影响[J]. 果树学报, 2015, 32(3): 494−501. [LI Ying, CHENG Qing, LI Ran, et al. Influence of 1-MCP on reactive oxygen species content and scavenger enzyme activity in persimmon fruit treated with CO_2[J]. Journal of Fruit Science, 2015, 32(3): 494−501.]
[35] 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 Donglan, QU Guangfan, CAO Sen, et al. Effect of preharvest salicylic acid combined with postharvest 1-MCP treatment on quality and antioxidant ability of plum fruit during storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 327−333.]
[36] LU Xiaohui, ZHANG Huijie, ZHANG Na, et al. Effects of ozone treatment on gene profiling involved in ASA-GSH cycle in postharvest cantaloupe[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 312: 111843.
[37] WANG Yajing, LI Yuexin, YANG Shuhan, et al. Gaseous ozone treatment prolongs the shelf-life of fresh-cut kiwifruit by maintaining its ascorbic acid content[J]. LWT, 2022, 172: 114196.
[38] PIECHOWIAK T. Effect of ozone treatment on glutathione (GSH) status in selected berry fruit[J]. Phytochemistry, 2021, 187: 112767.