

毕凯悦, 阿依则巴·艾尼玩尔, 海子悦, 等. 1-MCP 处理对西梅果实贮藏期品质及活性氧代谢的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 395–403. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090179

BI Kaiyue, AIZHEBA Ainiyangur, HAI Ziyue, et al. Effect of 1-MCP Treatment on Quality and Reactive Oxygen Metabolism of Prune Fruits During Storage Period[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 395–403. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090179

· 贮运保鲜 ·

1-MCP 处理对西梅果实贮藏期品质及活性氧代谢的影响

毕凯悦, 阿依则巴·艾尼玩尔, 海子悦, 苏丽娅, 吴予涵, 张梦莹, 李学文*
(新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:为明确 1-甲基环丙烯 (1-methylcyclopropene, 1-MCP) 处理对西梅的保鲜效果, 以新疆喀什伽师县‘法兰西’西梅为试材, 采用不同浓度 1-MCP (0、0.05、0.15、0.3 $\mu\text{L/L}$) 熏蒸 24 h, 随后将果实置于 $(-1\sim 1)^\circ\text{C}$ 冷库贮藏 90 d。结果表明: 不同浓度 1-MCP 处理均可有效抑制西梅果实贮藏品质的下降, 延缓西梅果实硬度和腐烂率下降, 维持可溶性固形物和可滴定酸的含量, 推迟西梅果实呼吸高峰, 降低呼吸强度。其中 0.30 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 处理效果最好。进一步研究表明, 1-MCP 可以有效抑制西梅果实细胞膜透性下降和丙二醛含量的上升, 提高西梅果实超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶和抗坏血酸过氧化物酶的活性上升。结果说明 1-MCP 可以延缓果实品质劣变, 降低果实呼吸速率, 提高西梅果实抗氧化酶的活性, 延缓果实中过氧化氢含量升高、降低超氧阴离子产生速率, 能够在一定贮藏时间内维持西梅果实贮藏品质。

关键词:西梅, 1-甲基环丙烯 (1-MCP), 贮藏品质, 活性氧代谢

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)14-0395-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090179

本文网刊:



Effect of 1-MCP Treatment on Quality and Reactive Oxygen Metabolism of Prune Fruits During Storage Period

BI Kaiyue, AIZHEBA Ainiyangur, HAI Ziyue, SU Liya, WU Yuhan, ZHANG Mengying, LI Xuewen*

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

Abstract: To investigate the preservation effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on prune plums, 'France' prune plums from Kashi Jiashi County, Xinjiang, were used as the test material. The fruits were fumigated with different concentrations of 1-MCP (0, 0.05, 0.15, and 0.3 $\mu\text{L/L}$) for 24 hours and then stored in a cold storage at $(-1\sim 1)^\circ\text{C}$ for 90 days. The results indicated that all concentrations of 1-MCP effectively inhibited the decline in storage quality of the prune plums, delayed the reduction in fruit firmness and decay rate, maintained the content of soluble solids and titratable acidity, postponed the respiratory peak, and reduced the respiratory intensity. Among them, 0.30 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP treatment showed the best effect. Further research demonstrated that 1-MCP could effectively inhibit the increase in cell membrane permeability and malondialdehyde content of prune plums, and enhance the activities of superoxide dismutase, catalase, peroxidase, and ascorbate peroxidase. These results suggested that 1-MCP could delay fruit quality deterioration, reduce fruit respiration rate, enhance the activity of antioxidant enzymes in prune plums, postpone the increase in hydrogen peroxide content, and decrease the generation rate of superoxide anions, thereby maintaining the storage quality of prune plums for a certain period of storage.

Key words: prune; 1-methylcyclopropene; storage quality; reactive oxygen metabolism

收稿日期: 2024-09-13

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目 (2022B02018-1)。

作者简介: 毕凯悦 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: bkaiyue@126.com。

* 通信作者: 李学文 (1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬采后生理及贮藏保鲜技术, E-mail: xjndsp@sina.com。

西梅(*Prunus domestica* L.)产自于西亚和欧洲,在我国新疆、陕西、河北等地广泛种植^[1-2],但西梅采摘时天气炎热,果实生理代谢旺盛,软化快、贮藏期短、腐烂严重,造成了巨大损失,西梅鲜果销售的损耗量达到 35%^[3]。

西梅为典型的呼吸跃变型果实^[4],采后会产生大量的乙烯,加速果实衰老。1-MCP 作为一种乙烯受体抑制剂,可以降低果实乙烯产生^[5],从而抑制果实衰老,延长果实贮藏期^[6]。1-MCP 的乙烯抑制作用已广泛应用于延迟水果和蔬菜的成熟^[7],研究发现 1-MCP 处理可以有效抑制李果实^[8]、香梨^[9]、苹果^[5]、石榴^[10]等水果的软化,李忠等^[11]用 1-MCP 处理西梅果实,发现 1-MCP 可以抑制果实腐烂率及 pH 的上升,保持较高的好果率及硬度。延长贮藏期。张怡等^[12]采用 1-MCP 结合魔芋葡甘聚糖/卡拉胶处理梨果实可以有效降低梨果实采后呼吸强度和乙烯释放量,果实在贮藏期间可以保持较低的 O_2 自由基产生速率,保持较高的细胞壁物质干质量、果胶物质、纤维素含量和果实硬度;李自芹等^[13]使用乙烯脱除剂结合 1-MCP 处理吊干杏,发现处理组可以推迟果实冷害现象发生,增强鲜食吊干杏果实活性氧清除酶的活性。

果实采后贮藏条件不当,抗氧化相关酶活性和含量就会急速下降,同时活性氧不断积累,导致果实活性氧和抗氧化酶平衡破坏,从而果实品质下降^[14]。过氧化氢(H_2O_2)和超氧阴离子(O_2^-)自由基是植物细胞代谢过程中正常代谢的副产物,但会造成果实膜损伤、脂质过氧化,对果实造成不可逆的损害,超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)及抗坏血酸过氧化物酶(Ascorbate peroxidase, APX)会形成活性氧(Reactive oxygen species, ROS)清除系统^[15],SOD 会将超氧阴离子自由基转化为分子氧和过氧化氢,CAT 和 APX 会继续分解过氧化氢,从而保护果实细胞膜免受氧化损伤^[16]。1 μ L/L 1-MCP 熏蒸 12 h 可以延缓樱桃果实 POD 活性和抗氧化物质含量的下降,减轻活性氧代谢对组织的损伤^[17];1-MCP 处理可持续提高软枣猕猴桃 SOD,保持 POD 和 CAT 清除 H_2O_2 能力^[18]。

目前对于 1-MCP 处理西梅果实文章还鲜有报道,因此,本研究以新疆喀什伽师县‘法兰西’西梅为材料,采用不同浓度 1-MCP 对西梅果实进行处理,筛选出维持西梅果实贮藏期品质的最适 1-MCP 浓度,以期延长西梅果实贮藏期,维持果实品质提供理论依据和新思路。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

‘法兰西’西梅 于 2023 年 8 月 14 日采自于新疆喀什伽师县西梅商品园,采后迅速运到新疆农业大学控温冷库进行预冷用于试验;1-MCP 粉剂 美国

罗门哈斯中国公司;氢氧化钠、草酸、酚酞、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾、三氯乙酸、邻苯二甲酸氢钾、甲醇、甲苯、无水乙醇、丙酮 均为分析纯,天津市致远化学试剂有限公司;抗坏血酸 分析纯,天津市北联精细化学品开发有限公司;2,6-二氯靛酚 分析纯,上海源叶生物科技有限公司。

GY-4 数显果实硬度计 山东格蓝普物联科技有限公司;PAL-1 便显示数显糖度计 日本爱拓株式会社;JSB30-1 电子计重秤 上海浦春计量仪器有限公司;DDS-307 微机型电导率仪 上海佑科仪器有限公司;DZKW-S-6 恒温水浴锅 常州隆和仪器制造有限公司;001 二氧化碳分析仪 VAISALA 公司;P4PC 型紫外可见分光光度计、P4PC 型紫外可见分光光度计 上海美谱达仪器有限公司;CR-10plus 分光色差仪 广东三恩时科技有限公司;BSA233S 电子天平 赛多利斯科学仪器有限公司;3H16RI 高速冷冻离心机 赫西仪器装备有限公司;DZWKW-S-6 恒温水浴锅 永光明医疗仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 挑选大小均匀、无病虫害、无损伤的西梅果实,将果实放入 5~7 $^{\circ}$ C 的冷库中预冷 24 h,散去田间热。并立即进行果实硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸含量等相关品质指标的测定。随机将果实放置在 1-MCP 浓度为 0、0.05、0.15、0.3 μ L/L 4 个 1 m^3 的密封塑料帐内熏蒸 24 h 熏蒸温度为 5~7 $^{\circ}$ C,熏蒸方式参考李学文等^[19]的方法,0 μ L/L 用蒸馏水进行处理作为对照组,记作 CK,共 4 个处理组,每组处理各 18 kg 果实,各组处理均重复三次,熏蒸 24 h,处理结束后,贮藏于相对湿度 85%~90%、温度为 -1~1 $^{\circ}$ C 保鲜库中,贮藏 90 d,每 20 d 取样测定,贮藏第 80 d 时果实品质指标变化较快,随后 10 d 取一次样进行测定。将西梅果实去核切成小块,立即用液氮冷冻样品并存放于 -40 $^{\circ}$ C 的超低温冰箱中保存待用,用于过氧化氢(H_2O_2)含量、过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、超氧阴离子产生速率、DPPH、还原型谷胱甘肽(GSH)含量、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的影响、多酚氧化酶活性的测定。

1.2.2 测定指标及方法

1.2.2.1 腐烂率 取大约 1 kg 果实进行腐烂率测定,每 20 d 检查西梅果实是否有腐烂,果梗处是否有严重皱缩,腐烂率按照下方公式进行测定。

$$D(\%) = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中: D 表示腐烂率,%; m_1 表示腐烂果实个数; m_2 表示果实总个数。

1.2.2.2 色差值 使用色差仪测定,沿果实赤道部位选取等距离 3 个位置进行测定,每个处理随机选择 5 个果实并记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值。

1.2.2.3 硬度 采用 GY-4 数显果实硬度计,探头直

径为 3 mm, 刺入深度为 1 cm, 将果皮削去进行测定, 沿果实赤道部位选取等距离 3 个位置进行测定, 随机选择 15 个果实, 测定重复三次, 取平均值, 单位: N/cm^2 。

1.2.2.4 可溶性固形物(SSC)含量测定 随机取 15 个果实, 混合研磨成匀浆, 用纱布过滤去澄清汁液, 滴于便携式数显糖度计上进行读数, 单位: %。

1.2.2.5 可滴定酸(TA)含量测定 参考曹建康等^[20]的方法, 采用酸碱滴定法测定, 以苹果酸折算系数 0.067 进行计算, 测定重复三次, 取平均值, 单位: %。

1.2.2.6 呼吸强度测定 将 500 g 左右且无损伤的西梅果实放入密封玻璃罐中, 随后插入二氧化碳分析仪, 待数值稳定上升后开始读数, 每 2 min 记录一次 CO_2 浓度^[21]。以上测定重复三次, 取平均值, 单位: $\text{mg}/\text{kg}/\text{h}$ 。

1.2.2.7 细胞膜透性 将电导仪在使用前预热 30 min, 同时将电极浸入去蒸馏水中活化 30 min, 将西梅果实对半剖开, 用直径 6 mm 的打孔器打孔, 再用锋利的刀具将其切割成高 5 mm 的圆柱果粒, 取 10 个圆柱果粒于小烧杯中, 加 50 mL 去离子水, 30 ℃ 水浴 1 h 测定其电导率, 记为 A_0 。加热煮沸 5 min(保鲜膜封口), 迅速冷却至室温, 再次测其电导率, 记为 A_1 。以煮沸前后电导率的比值作为细胞的膜透率(测定重复三次), 取平均值, 单位: %。

1.2.2.8 丙二醛(MDA)含量测定 参考曹建康等^[20]的方法进行测定, 称取 1.0 g 西梅果实, 加入 5.0 mL 100 g/L 三氯乙酸研磨、离心, 取上清液加入 2.0 mL 0.67% TBA 溶液, 煮沸 20 min 后再次离心, 分别测定上清液在 450 nm、532 nm 和 600 nm 处的吸光值, 丙二醛的计算公式如下:

$$M(\mu\text{mol}/\text{g FW}) = \frac{c \times v}{V_s \times m \times 1000} \quad \text{式 (2)}$$

式中: M 表示丙二醛含量, $\mu\text{mol}/\text{g FW}$; c 表示反应混合液中丙二醛浓度, $\mu\text{mol}/\text{L}$; v 表示样品提取总体积, mL; V_s 表示测定时所取样品提取液体积, mL; m 表示样品质量, g。

1.2.2.9 H_2O_2 含量测定 称取 3 g 西梅果实冻样, 加入 5.0 mL 预冷的丙酮研磨成浆, 随后离心取上清液作为酶制剂, H_2O_2 含量采用苏州梦犀生物医药科技有限公司试剂盒测定(M0107B), 重复 3 次。

1.2.3 抗氧化酶活性测定 超氧化物歧化酶(SOD)的测定参照曹建康等^[20]的方法稍作修改。取 3 g 西梅果实样品加入 5 mL 磷酸钠缓冲液后进行离心, 取上清液进行测定。重复 3 次, 用 SOD 抑制硝基蓝四唑在光下的还原作用确定酶活性大小。

过氧化氢(H_2O_2)酶活性的测定参照曹建康等^[20]的方法稍作修改。取 3 g 西梅果实样品加入 0.1 mol/L pH7.5 的 5 mL 磷酸钠缓冲液后进行离心, 取上清液进行测定。以每克果实样品每分钟吸光度变化值减少 0.01 为 1 个过氧化氢酶活性, 重复 3 次, 结果

用 $0.01\Delta\text{OD}_{240}/\text{min} \cdot \text{g}$

过氧化物酶(POD)活性测定参照曹建康等^[20]的方法稍作修改, 取 0.5 mL 酶制液加入 3 mL 25 mmol/L 愈创木酚溶液和 200 μL 0.5 mol/L H_2O_2 溶液迅速混合反应, 在 470 nm 波长下测定吸光值变化。以每克西梅果实每分钟吸光度变化值增加 1 时为 1 个过氧化物酶活性单位, 重复 3 次, 结果用 Ug^{-1}FW 表示。

还原性谷胱甘肽(GSH)含量参照曹建康等^[20]方法稍作修改, 称取 3 g 西梅果实冻样, 加入 5.0 mL 50 g/L 三氯乙酸溶液, 在冰浴条件下研磨, 随后离心取上清液测定, 根据吸光度差值, 通过标准曲线计算每个西梅果实中 GSH 含量, 重复 3 次。

谷胱甘肽还原酶(GR)测定参照曹建康等^[20]的方法称取 3 g 西梅果实加入 5.0 mL 0.1 mol/L pH7.5 磷酸缓冲液研磨成浆, 随后离心取上清液进行测定, 以每分钟西梅果实样品在 340 nm 吸光度值减少 0.01 为 1 个酶活性单位表示 GR 活性大小, 重复 3 次。

抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性测定参照曹建康等^[20]的方法稍作修改, 称取 3 g 果实样品, 加入 5.0 mL 提取缓冲液冰浴条件下研磨, 随后离心取上清液进行测定, 以每个样品 APX 酶促反应体系在 290 nm 出吸光值降低 0.01 为一个酶活性单位, 重复 3 次, 结果用 U/g 表示。

超氧阴离子(O_2^-)自由基产生速率参照曹建康等^[20]的方法, 称取 3 g 西梅果实, 加入 5 mL 提取缓冲液, 在冰浴条件下研磨成浆, 随后离心提取上清液进行测定, 以每分钟每克果实产生的超氧阴离子自由基的物质的量作为超氧阴离子自由基产生速率, 重复 3 次, 用 $\text{nmol}/\text{min} \cdot \text{g}$ 表示。

1.2.4 DPPH 自由基清除率 采用 Kotikova 等^[22]方法, 将 0.0395 g DPPH 溶于无水乙醇定容至 500 mL, 在 517 nm 处测定吸光度值小于 1, 以确保试剂的最佳浓度, 用于清除活性测定。然后将 0.1 mL 样品与 3.9 mL 稀释后的 DPPH 溶液混合, 室温下避光保存 30 min, 以无水乙醇为空白对照, 在 517 nm 处测定吸光度值, 重复 3 次。

1.3 数据处理

该实验基于完全随机, 使用 Origin 软件系统对样本实行数据分析, 显著分析采用 SPSS 软件对样本进行显著性分析并经过邓肯式多重计算分析差异, $P < 0.05$ 时表示偏差显著, 并用 Origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 1-MCP 处理对西梅果实贮藏期腐烂率的影响

果实采后仍会进行呼吸作用, 如表 1 所示, 随着贮藏时间的延长, 西梅果实腐烂率呈现上升趋势, CK 组果实在贮藏第 60 d 出现腐烂, 80 d, 0.05 $\mu\text{L}/\text{L}$ 处理果实出现腐败果, 且 CK 组果实腐烂率高于 0.05 $\mu\text{L}/\text{L}$ 处理组, 差异显著 ($P < 0.05$), 第 90 d 时 0.15 $\mu\text{L}/\text{L}$ 和 0.3 $\mu\text{L}/\text{L}$ 处理组无腐烂率, 说明 1-

MCP 可以抑制西梅果实腐烂率的上升,且浓度越高抑制效果越明显。

表 1 1-MCP 处理对西梅果实贮藏期腐烂率的影响
Table 1 Effect of different concentrations of 1-MCP treatments on the decay rate of prune fruits

处理组	第0 d	第20 d	第40 d	第60 d	第80 d	第90 d
CK	0	0	0	3.76±0.13	4.73±0.25 ^a	5.55±0.32 ^a
0.05 μL/L	0	0	0	0	1.67±0.31 ^b	1.96±0.11 ^b
0.15 μL/L	0	0	0	0	0 ^c	0 ^c
0.3 μL/L	0	0	0	0	0 ^c	0 ^c

注:表中同一列不同字母标识差异性显著($P<0.05$),表2~表5同。

2.2 1-MCP 处理对西梅果实贮藏期色差的影响

西梅果实色泽是判断西梅果实品质的直观标准, L^* 值代表亮度, L^* 值越大,西梅果实果皮越亮。由表2可知,成熟度决定西梅果实 L^* 值,各处理组西梅果实在贮藏期间 L^* 值呈现先下降后上升再下降的趋势,60 d 开始下降,80~90 d 急速下降。1-MCP 处理可以延缓果实 L^* 值的下降,贮藏第90 d 时 CK 相较于1-MCP 处理组 L^* 值分别下降为29.97%、37.83%、34.32%,其中0.15 μL/L 1-MCP 处理的西梅色泽最好,其次是0.3 μL/L。

表 2 不同浓度 1-MCP 对西梅果实贮藏期 L^* 的影响

Table 2 Effect of different concentrations of 1-MCP on the storage period L^* of prune fruits with different maturity levels

处理组	第0 d	第20 d	第40 d	第60 d	第80 d	第90 d
CK	40.46±0.69 ^a	41.43±0.16 ^a	27.44±2.48 ^{bc}	41.05±1.58 ^a	33.37±0.33 ^b	17.95±0.29 ^b
0.05 μL/L	40.46±0.69 ^a	33.10±0.44 ^c	30.70±1.06 ^b	39.16±0.44 ^{ab}	38.53±0.56 ^a	23.33±1.42 ^{ab}
0.15 μL/L	40.46±0.69 ^a	40.10±1.42 ^{ab}	37.64±1.37 ^a	35.48±2.51 ^b	38.85±0.96 ^a	24.74±3.90 ^a
0.3 μL/L	40.46±0.69 ^a	39.34±0.02 ^b	25.37±1.35 ^c	35.96±2.87 ^{ab}	31.54±0.75 ^c	24.11±3.09 ^{ab}

表 3 不同浓度 1-MCP 对西梅果实贮藏期 a^* 的影响

Table 3 Effect of different concentrations of 1-MCP on the storage period a^* of prune fruits of different maturity levels

处理组	第0 d	第20 d	第40 d	第60 d	第80 d	第90 d
CK	16.42±1.04 ^a	23.04±0.68 ^a	24.18±2.41 ^a	35.47±2.64 ^a	37.59±1.77 ^a	41.76±0.76 ^a
0.05 μL/L	16.42±1.04 ^a	23.19±0.33 ^a	21.95±1.71 ^a	35.49±1.14 ^a	32.36±0.22 ^b	40.83±0.23 ^b
0.15 μL/L	16.42±1.04 ^a	21.12±1.84 ^{ab}	21.13±0.81 ^a	29.22±0.14 ^b	30.52±1.09 ^b	39.99±0.50 ^b
0.3 μL/L	16.42±1.04 ^a	19.59±1.55 ^b	24.30±0.54 ^a	29.24±0.76 ^b	30.28±1.60 ^b	39.75±0.94 ^b

表 4 不同浓度 1-MCP 对西梅果实贮藏期 b^* 的影响

Table 4 Effect of different concentrations of 1-MCP on storage period b^* of prune fruits with different maturity levels

处理组	第0 d	第20 d	第40 d	第60 d	第80 d	第90 d
CK	23.27±1.15 ^a	27.26±0.65 ^a	20.14±1.08 ^b	29.78±1.73 ^b	28.99±0.68 ^b	27.35±0.11 ^b
0.05 μL/L	23.27±1.15 ^a	26.59±1.44 ^a	25.00±0.70 ^a	31.16±0.89 ^{ab}	26.34±0.41 ^c	26.61±0.02 ^c
0.15 μL/L	23.27±1.15 ^a	29.82±3.34 ^a	25.21±1.29 ^a	33.00±1.75 ^a	35.06±0.34 ^a	25.71±0.17 ^d
0.3 μL/L	23.27±1.15 ^a	16.95±3.49 ^b	19.67±1.7 ^b	22.72±0.18 ^c	29.27±0.34 ^b	33.90±0.24 ^a

表 5 不同浓度 1-MCP 对西梅果实贮藏期 ΔE 的影响

Table 5 Effect of different concentrations of 1-MCP on storage period ΔE of prune fruits with different maturity levels

处理组	第0 d	第20 d	第40 d	第60 d	第80 d	第90 d
CK	2.76±1.02 ^a	1.62±0.34 ^b	5.87±2.21 ^a	6.09±0.42 ^a	2.99±1.48 ^a	0.73±0.06 ^b
0.05 μL/L	2.76±1.02 ^a	2.51±0.91 ^b	3.52±1.11 ^a	2.61±0.18 ^b	1.24±0.26 ^a	2.71±0.73 ^{ab}
0.15 μL/L	2.76±1.02 ^a	6.76±1.98 ^a	3.42±0.91 ^a	5.04±1.68 ^{ab}	2.51±0.62 ^a	6.41±2.33 ^a
0.3 μL/L	2.76±1.02 ^a	6.33±1.9 ^a	3.82±0.64 ^a	4.91±1.56 ^{ab}	2.94±1.05 ^a	4.76±2.96 ^{ab}

a^* 值代表西梅果实的红绿程度, a^* 越大果实颜色越红,由表3可知,随着贮藏时间的延长,西梅果实 a^* 整体呈现上升趋势。CK 组和0.05 μL/L 处理组果实20 d 和60 d a^* 值上升较快,第60 d 0.15 μL/L 和0.3 μL/L 处理组果实 a^* 与CK 组差异显著($P<0.05$)。

b^* 为果实果皮的黄蓝程度, b^* 越大,果实颜色越黄,由表4可知,随着贮藏天数的增加, b^* 值整体呈现先上升后下降的趋势,贮藏结束第90 d 时,0.3 μL/L 处理组 b^* 值果实分别高于CK、0.05 μL/L、0.15 μL/L 处理组23.95%、27.40%、31.86%,差异显著($P<0.05$),说明0.3 μL/L 会促进西梅果实果皮由绿转黄。随着贮藏时间 ΔE 整体呈现先上升后下降的趋势,60 d CK 组 ΔE 高于0.15、0.3 μL/L 处理组果实,90 d CK 组与0.3 μL/L 处理组差异不显著。表明CK 和0.3 μL/L 处理组果实在贮藏中40~60 d 色泽变化差异较大,在贮藏末期90 d 果实色泽变化较小。

2.3 1-MCP 处理对西梅果实贮藏期品质的影响

由图1(A)可知,随着贮藏期的延长,各组西梅果实的硬度整体呈现下降趋势,贮藏期处理组果实的硬度均高于CK 组,0~60 d 西梅果实硬度下降较慢,在贮藏第60 d 时,0.05、0.15、0.3 μL/L 处理组硬度分

别高于 CK 组果实 7.75%、37.15%、51.76%, 60~80 d CK 和 0.05 $\mu\text{L/L}$ 西梅果实硬度急速下降, 90 d 0.15 和 0.3 $\mu\text{L/L}$ 处理组果实硬度高于 CK 组果实 40.28%、89.05%。结果说明, 1-MCP 处理可以延缓西梅果实硬度的下降。采收后的果实仍然进行呼吸作用, 贮藏时由于呼吸作用果实逐渐后熟, 达到呼吸高峰后果实开始衰老, 呼吸作用会逐渐分解积累物从而导致果实可溶性固形物含量逐渐下降, 如图 1(B) 所示, 在西梅果实贮藏期间可溶性固形物含量呈现先上升后下降的趋势, CK 和 0.05 $\mu\text{L/L}$ 组果实第 40 d 达到最大值, 0.15 和 0.3 $\mu\text{L/L}$ 处理组在第 60 d 达到最大值, 分别高于 CK 组 2.63%、2.33%, 随后果实可溶性固形物含量开始下降, 90 d 0.3 $\mu\text{L/L}$ 处理组比 CK 组高 1.05 倍。如图 1(C) 所示, 随着贮藏时间的延长, 由于呼吸作用西梅果实可滴定酸含量呈现下降趋势, 其中 0.3 $\mu\text{L/L}$ 处理组可滴定酸含量维持效果

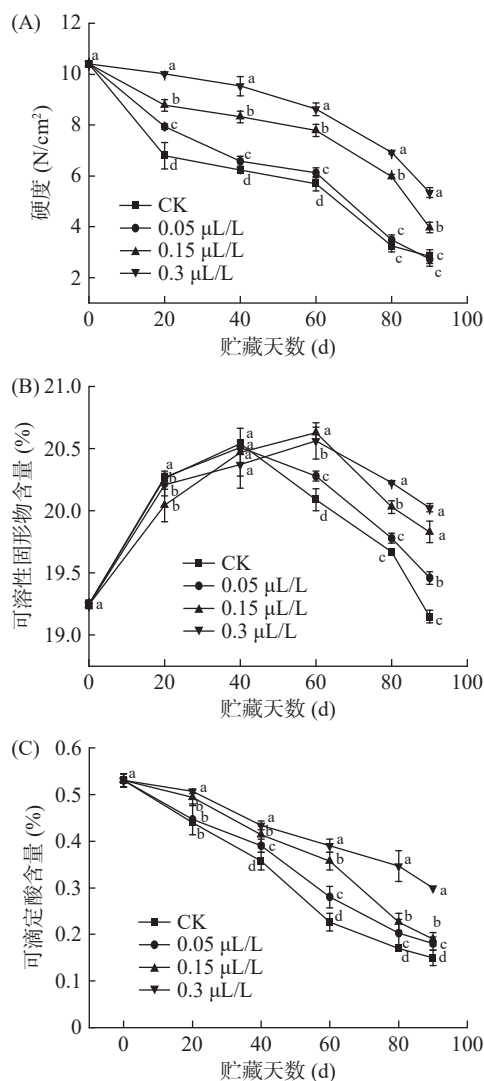


图 1 1-MCP 处理对西梅果实贮藏期硬度(A)、可溶性固形物含量(B)、可滴定酸含量(C)的影响

Fig.1 Effect of 1-MCP treatment on prune fruit hardness (A), soluble solids content (B), and titratable count content (C) during storage period

注: 不同小写字母代表各个处理组间数字差异显著($P<0.05$), 图 2~图 6 同。

最好, 40~60 d CK 组果实可滴定酸含量急速下降, 60 d CK 组果实可滴定酸含量为 0.23%, 90 d 1-MCP 处理组与 CK 组西梅果实可滴定酸含量差异显著($P<0.05$), 说明 1-MCP 可以有效的保持西梅果实可滴定酸含量, 其中 0.3 $\mu\text{L/L}$ 处理组效果最好。

2.4 1-MCP 处理对西梅果实贮藏期呼吸强度的影响

由图 2 可知, 西梅属于呼吸跃变型果实, 随着贮藏时间的延长, 呈现先上升后下降的趋势, 20 d, CK 和 0.05 $\mu\text{L/L}$ 处理组出现呼吸高峰, CK 组呼吸强度比 0.05 $\mu\text{L/L}$ 高 8.70% 且差异显著($P<0.05$), 0.15 $\mu\text{L/L}$ 和 0.3 $\mu\text{L/L}$ 在第 40 d 出现呼吸高峰且 0.15 $\mu\text{L/L}$ 处理组呼吸强度高于 0.3 $\mu\text{L/L}$ 处理组 11.89%, 呈现差异显著($P<0.05$), 说明 1-MCP 可以有效抑制西梅果实呼吸强度增加, 推迟呼吸高峰的出现, 从而延缓西梅果实后熟, 延长西梅贮藏期。

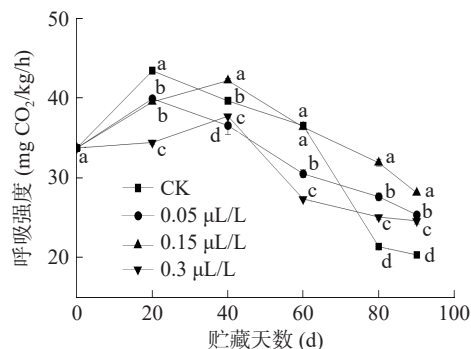


图 2 1-MCP 处理对西梅果实贮藏期呼吸强度的影响

Fig.2 Effect of 1-MCP treatment on the respiratory intensity of prune fruits during storage period

综上所述, 1-MCP 处理可以延缓西梅果实贮藏期品质的降低, 延缓西梅果实呼吸强度, 并且 0.3 $\mu\text{L/L}$ 处理组效果最优, 因此选择 0.3 $\mu\text{L/L}$ 处理组作为最佳处理组用于后续的试验分析。

2.5 1-MCP 对西梅果实贮藏期细胞膜透性及丙二醛含量的影响

果实在采后后熟过程中, 细胞质膜氧化受损, 果实细胞膜通透性增加。由图 3(A) 可知, 随着贮藏时间的延长, 西梅果实细胞膜通透性呈现上升趋势, 且 0.3 $\mu\text{L/L}$ 组始终低于 CK 组, 20~60 d, 0.3 $\mu\text{L/L}$ 处理组细胞膜通透性维持较好, 贮藏末期 90 d 时, CK 组的相对电导率为 44.01%, 0.3 $\mu\text{L/L}$ 组相较于 CK 组降低了 12.53%, 说明 1-MCP 可以维持西梅果实细胞膜通透性。由图 3(B) 可知, 西梅果实丙二醛含量随着贮藏时间的延长持续增加。在贮藏阶段, 0.30 $\mu\text{L/L}$ 组相较于 CK 组增加趋势缓慢, 并始终低于 CK 组, 80 d 时 CK 组丙二醛含量比 0.3 $\mu\text{L/L}$ 组增加 24.85%, 差异显著($P<0.05$)。说明 1-MCP 处理西梅果实可以抑制西梅果实丙二醛含量的积累, 降低细胞膜渗透率, 延缓西梅果实软化, 维持果实贮藏期品质, 这与张明明等^[23]用 1-MCP 处理伯谢克甜瓜的研究结果一致。

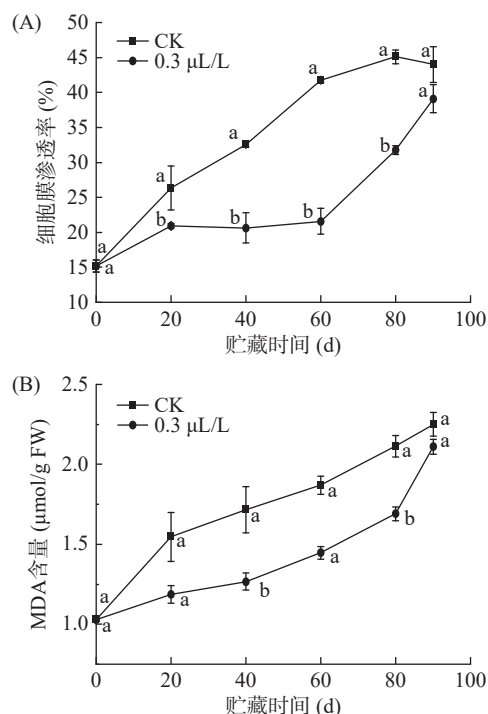


图3 1-MCP处理对西梅果实贮藏期细胞膜透性(A)和丙二醛含量(B)的影响

Fig.3 Effects of 1-MCP treatment on cell membrane permeability (A) and malondialdehyde content (B) of prune fruits during storage period

2.6 1-MCP对西梅果实贮藏期超氧阴离子产生速率及过氧化氢含量的影响

超氧阴离子累积过量会引起西梅果实脂膜过氧

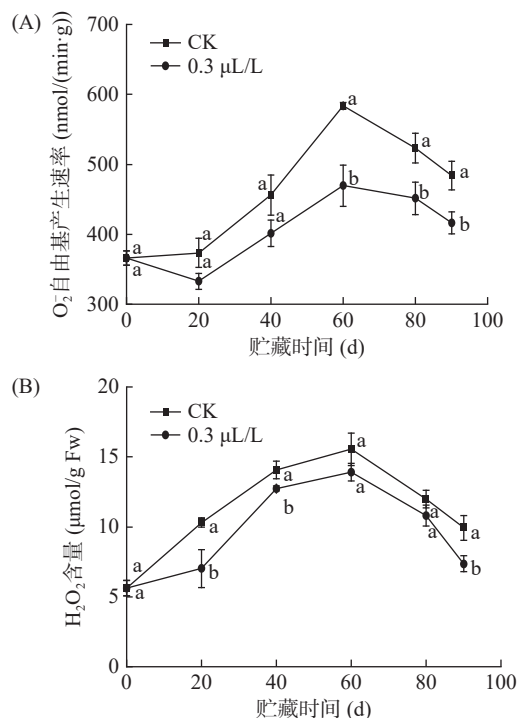


图4 1-MCP对西梅果实贮藏期超氧阴离子产生速率(A)和过氧化氢含量(B)的影响

Fig.4 Effects of 1-MCP on the rate of superoxide anion production (A) and hydrogen peroxide content (B) in prune fruit during storage period

化作用。如图4所示,经过1-MCP处理后的西梅果实超氧阴离子产生速率和过氧化氢含量均随着贮藏期的延长呈现先增加后降低的趋势,且0.3 μL/L组始终小于CK组。由图4(A)可知,60 d时,CK组西梅果实超氧阴离子产生速率达到最大值,高于0.3 μL/L组22.15%,随后两组果实超氧阴离子产生速率开始下降,贮藏第90 d时CK组果实超氧阴离子产生速率高于0.3 μL/L组16.26%。由图4(B)可知,过氧化氢含量在60 d时达到峰值,CK组高于0.3 μL/L组11.79%,而贮藏期结束90 d时CK组高于0.3 μL/L组34.92%。1-MCP处理减缓西梅果实O₂⁻自由基产生速率和H₂O₂的快速积累。说明1-MCP处理可以有效抑制贮藏期西梅果实活性氧的生成,延长西梅果实贮藏时间,维持果实品质。

2.7 1-MCP对西梅果实贮藏期SOD、CAT、POD活性和APX含量的影响

SOD、CAT以及POD是植物细胞中主要的抗氧化酶类,其中CAT可以将西梅果实体内H₂O₂分解为H₂O和O₂。西梅果实SOD、CAT、POD在贮藏期间整体呈现先上升后下降的趋势,由图5(A)可知,0.3 μL/L组SOD整体高于CK,20 d CK组西梅果实SOD达到最大值,40 d 0.3 μL/L组达到最大值,高于CK组12.17%,随后两组果实SOD急速下降,第90 d 0.3 μL/L组西梅果实SOD高于CK组9.38%。由图5(B)可知,20 d CK组的CAT达到高峰,随后下降显著,到90 d时下降至25.97,低于0.3 μL/L组29.30%。如图5(C)所示,0~60 d 0.3 μL/L组西梅果实POD整体呈现上升趋势,到第60 d达到最大值2.49 U/g FW,高于CK组14.22%,随后果实POD活性下降,直至第90 d下降至1.63 U/g FW,高于CK组26.35%。APX是西梅果实体内过氧化物保护系统的重要的酶,如图5(D)两个处理组在贮藏期间西梅果实APX活性呈现先上升后下降的趋势,0~40 d APX快速上升,第40 d 0.3 μL/L比CK组APX活性高9.86%,40~90 d,两组西梅果实APX活性开始下降,但0.3 μL/L组始终高于CK组,60 d 0.3 μL/L组果实高于CK组36.11%。在整个贮藏过程中,0.3 μL/L处理组果实SOD、POD、APX始终高于CK组,1-MCP处理可以提高西梅果实贮藏期活性氧代谢相关酶的活性,保持较好的贮藏品质。

2.8 1-MCP对西梅果实贮藏期GSH活性、DPPH自由基清除率的影响

GSH含量与果实抗氧化能力密切相关,如图6(A)所示,西梅果实GSH含量在贮藏期间呈现上升趋势,且0.3 μL/L组始终高于CK组,0~20 d两个处理组果实GSH含量相差较小,第40 d 0.3 μL/L组西梅果实GSH含量比CK组高26.55%,90 d时0.3 μL/L组高于CK组24.38%,1-MCP处理可以有效维持西梅果实在贮藏过程中GSH的含量^[24]。由

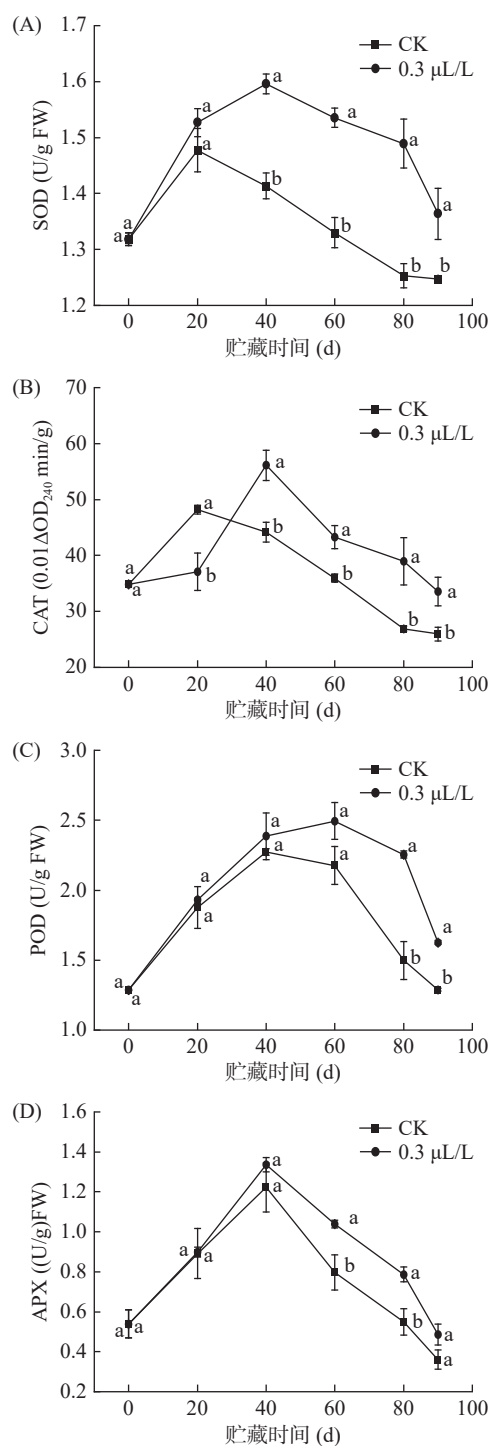


图 5 1-MCP 处理对西梅果实贮藏期 SOD(A)、CAT(B)、POD 活性(C)和 APX 含量(D)的影响

Fig.5 Effects of 1-MCP treatment on SOD (A), CAT (B), POD activities (C) and APX content (D) of prune fruits during storage period

图 6(B)可知,随着贮藏时间的延长,西梅果实 DPPH 自由基清除率呈现下降趋势,0.3 μL/L 整体自由基清除率高于 CK 组,40~60 d CK 组西梅果实 DPPH 下降较快。60 d 时 0.3 μL/L 组 DPPH 自由基清除率高于 CK 组 41.54%,贮藏期结束 90 d 时,1-MCP 处理的西梅果实 DPPH 自由基清除率比 CK 组高 37.97%,说明 1-MCP 处理西梅果实可以抑制果实抗氧化能力降低。

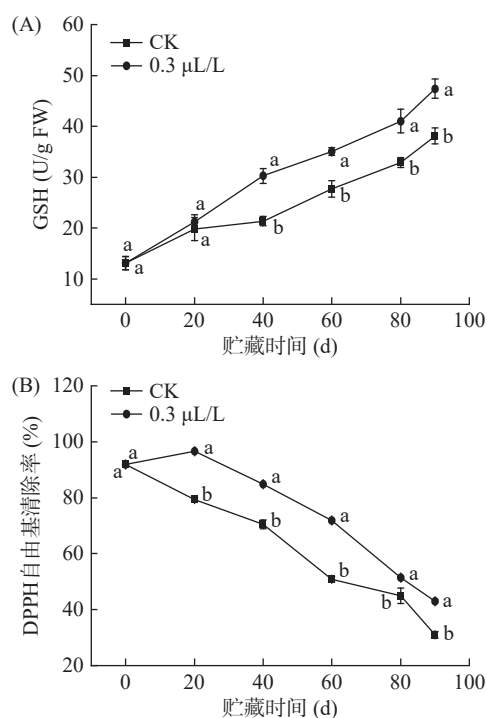


图 6 1-MCP 处理对西梅果实贮藏期 GSH 活性(A)、DPPH 自由基清除率(B)的影响

Fig.6 Effects of 1-MCP treatment on GSH activity (A), DPPH radical scavenging rate (B) of prune fruits during storage period

3 讨论

本研究结果表明,1-MCP 处理组能降低呼吸强度,推迟呼吸高峰,有效的延缓西梅果实硬度的下降,侯佳迪^[25]发现用 1-MCP 处理桃果实可以降低两种成熟桃果实呼吸速率和乙烯释放量,并推迟了高成熟度桃果实乙烯高峰的出现;曹森等^[26]用三种浓度 1-MCP 处理猕猴桃,发现最高浓度 0.75 μL/L 能更好的保持猕猴桃货架期的品质;可溶性固形物含量是决定西梅果实的食用品质,本研究中西梅果实可溶性固形物整体呈现先上升后下降的趋势,前期呼吸作用使多糖和淀粉转化为单糖,从而可溶性固形物含量增加,60 d 后由于呼吸作用分解西梅果实所积累的营养物质,导致可溶性固形物含量下降。这与朱文靖等^[27]的红毛丹果实在贮藏过程中可溶性固形物含量的变化趋势相同。

ROS 是植物体内主要的自由基,大量积累会导致西梅果实衰老,其中过氧化氢和超氧阴离子的增多会加速西梅果实的衰老,同时也会造成膜结构和功能的损伤,影响果实品质。1-MCP 可以延缓呼吸高峰出现,抑制呼吸强度,植物有氧呼吸主要发生在线粒体中,线粒体的内膜也是活性氧产生的主要部位^[28],本研究结果显示,1-MCP 处理组可以有效降低超氧阴离子和过氧化氢的积累,抑制 ROS 的积累,延缓果实细胞膜透性和丙二醛含量的升高。Xiong 等^[29]发现 1-MCP 处理显著抑制了西梅果实丙二醛(MDA)的产生,并保持了硬度、可溶性固形物含量等

品质指标。Dong 等^[30]发现,使用 1-MCP 处理梨,可以抑制果实过氧化氢、超氧阴离子和丙二醛含量的积累,维持细胞膜和细胞器的完整结构,同时还抑制酚类物的氧化,延缓果实核心褐变。SOD、CAT 以及 POD 的产生,可以降低过氧化氢以及超氧阴离子积累,1-MCP 处理后的西梅果实相较于 CK 组 SOD、CAT、POD 都有不同程度的增加,说明 1-MCP 处理可以加强消除 ROS 相关酶类的增加,从而降低西梅果实过氧化氢和超氧阴离子的含量,延缓果实衰老,同时能够较好的维持西梅果实的品质,黄钰萍等^[31]研究发现,1-MCP 处理杨梅可以提高果实 SOD、CAT 等抗氧化酶活性和抗坏血酸含量。1-MCP 处理还可以提高西梅果实 APX 活性和 GSH 含量的上升,同时提高了西梅果实 DPPH 自由基清除能力,Wu 等^[32]发现 1-MCP 处理后的桃子 DPPH 自由基清除能力增强。Xu 等^[33]采用 1-MCP 处理蓝莓,发现与对照组相比,1-MCP 处理组显著提高了蓝莓果实 DPPH 自由基清除活性和羟基自由基清除能力。

综上所述,1-MCP 可以抑制呼吸作用对果实带来的损伤,进而保护活性氧清除系统,1-MCP 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 O_2^- 自由基产生速率、 H_2O_2 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。西梅果实酚类物质丰富,也有文章提及 1-MCP 对酚类物质的影响,因此还可以从 1-MCP 对西梅果实酚类物质影响的角度进一步探索 1-MCP 对西梅果实活性氧代谢的研究。

4 结论

1-MCP 处理均能延缓西梅果实品质劣变,研究结果表明,使用 1-MCP 处理可以维持西梅果实硬度和可溶性固形物含量及可滴定酸含量。1-MCP 通过提高抗氧化酶活性及抗氧化物质的含量,减少果实 O_2^- 自由基产生速率和 H_2O_2 含量对西梅果实组织的破坏,抑制西梅果实细胞膜透性和丙二醛含量的增加,使细胞膜免受氧化损伤,保持西梅果实较好的硬度,维持果实品质。因此可以采用 1-MCP 浓度为 $0.30 \mu\text{L/L}$ 进行贮藏西梅果实,该研究结果为 1-MCP 处理在西梅果实贮藏保鲜中的实际应用提供参考。

© The Author(s) 2025. 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 Junxu, HU Taohua, SUN Junbao, et al. Progress of prune cultivation and management[J]. Journal of Fruit Tree Resources, 2020, 1(2): 52-55.]

[2] 王艺蕊,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 Yihan, WANG Yonggang, WANG Jianrui, et al. Origin and conservation utilization of European plum[J]. Xinjiang Forestry, 2021(4): 29-31.]

[3] 皇甫兆青.不同保鲜处理方式对西梅果实品质及香气的影响[D].石河子:石河子大学,2023. [HUANGFU Zhaoqing. Effects of different preservation treatments on the quality and aroma of prune fruits[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.]

[4] 文钰,杨莉玲,刘岚,等.近冰温贮藏对西梅的采后品质及活性氧代谢的影响[J].食品与发酵工业,2024,4(2):1-10. [WEN Yue, YANG Lili, LIU Lan, et al. Effects of near-freezing temperature storage on postharvest quality and reactive oxygen metabolism of prunes[J]. Food and Fermentation Industry, 2024, 4(2): 1-10.]

[5] MYO N W, JINGI Y, HTAY A N, et al. 1-Methylcyclopropene treatment delays modification of cell wall pectin and fruit softening in "Hwangok" and "Picnic" apples during cold storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 10(1): 1-11.

[6] 刘汝婧,李学文,张婷,等.1-MCP 处理对货架期香梨果实软化的影响[J].新疆农业大学学报,2021,44(5):375-381. [LIU Rujin, LI Xuewen, ZHANG Ting, et al. Effects of 1-MCP treatment on fruit softening in shelf-life balsam pear[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2021, 44(5): 375-381.]

[7] NGUYEN L P L, ZSOM T, DAM S M, et al. Evaluation of the 1-MCP microbubbles treatment for shelf-life extension for melons[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 150: 89-94.

[8] 陈鸥,吴雪莹,邓丽莉,等.1-甲基环丙烯处理对采后李果实硬度变化的影响机制[J].食品科学,2020,41(3):185-191. [CHEN Ou, WU Xueying, DENG Lili, et al. Mechanisms of the effect of 1-Methylcyclopropene treatment on the changes of postharvest plum fruit firmness[J]. Food Science, 2020, 41(3): 185-191.]

[9] JIA X H, WANG W H, DU Y M, et al. Optimal storage temperature and 1-MCP treatment combinations for different marketing times of Korla Xiang pears[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 17(3): 693-703.

[10] 闫欣鹏,张润光,梁琪琪,等.低温结合 1-MCP 处理对突尼斯软籽石榴采后品质的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(5):147-155. [YAN Xinpen, ZHANG Runguang, LIANG Qiqi, et al. Effect of low temperature combined with 1-MCP treatment on postharvest quality of Tunisian soft-seeded pomegranate[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(5): 147-155.]

[11] 李忠,王向未,董成虎.不同处理方式对西梅贮藏品质的影响[J].保鲜与加工,2023,23(4):16-19. [LI Zhong, WANG Xiangwei, DONG Chenghu. Effects of different treatments on the storage quality of prunes[J]. Freshness and Processing, 2023, 23(4): 16-19.]

[12] 张怡,王佳艺,黄雯,等.1-甲基环丙烯结合魔芋葡甘聚糖/卡拉胶涂膜处理对梨货架期品质的影响[J].食品科学,2025,46(10):249-256. [ZHANG Yi, WANG Jjiayi, HUANG Weng, et al. Effect of 1-methylcyclopropene combined with konjac glucomannan/carrageenan coating treatment on shelf-life quality of pears[J]. Food Science, 2025, 46(10): 249-256.]

[13] 李自芹,赵志永,潘艳芳,等.乙烯脱除剂结合 1-MCP 处理对吊干杏贮藏期间冷害及活性氧代谢的调控作用[J].现代食品科技,2023,39(9):155-161. [LI Ziqing, ZHAO Zhiyong, PAN Yanfang, et al. Regulation of cold damage and reactive oxygen metabolism in hanging dried apricots during storage by ethylene remover combined with 1-MCP treatment[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(9): 155-161.]

- [14] KARLIA MEITHA, YONADITA PRAMESTI, SONY SUHANDONO. Reactive oxygen species and antioxidants in postharvest vegetables and fruits[J]. International Journal of Food Science, 2020, 2020: 1–11.
- [15] HUAN C, JIANG L, AN X, et al. Potential role of reactive oxygen species and antioxidant genes in the regulation of peach fruit development and ripening[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 104: 294–303.
- [16] WARUNEE C, ATHIWAT C, PORNCHAI R, et al. Reduction of reactive oxygen species production and membrane damage during storage of ‘Daw’ longan fruit by chlorine dioxide[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 170: 143–149.
- [17] 侯杰, 杨青珍, 王锋, 等. 1-MCP 处理对甜樱桃果实凹陷、贮藏品质及活性氧代谢的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(21): 280–286. [HOU Jie, YANG Qinzhen, WANG Feng, et al. Effect of 1-MCP treatment on fruit pitting, storage quality and reactive oxygen metabolism of sweet cherry[J]. Food and Fermentation Industry, 2024, 50(21): 280–286.]
- [18] 陈曦冉, 张鹏, 贾晓昱, 等. 1-MCP 处理维持软枣猕猴桃活性氧的代谢平衡[J]. 现代食品科技, 2022, 38(4): 83–91. [CHEN Xiran, ZHANG Peng, JIA Xiaoyu, et al. 1-MCP treatment maintains the metabolic balance of reactive oxygen species in soft date kiwifruit[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(4): 83–91.]
- [19] 李学文, 韩江. 1-MCP 处理对香梨采后生理效应的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2006, 29(2): 3. [LI Xuewen, HAN Jiang. Effect of 1-MCP treatment on postharvest physiological effects of balsam pear[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2006, 29(2): 3.]
- [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 Jiankang, JIANG Weibo, ZHAO Yumei. Experimental guidance on postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.]
- [21] 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 Yanyan. Study on the regulatory mechanism of near-freezing temperature storage on storage quality and softening of Xinjiang prunes[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.]
- [22] KOTIKOVA Z, LACHMAN J, HEJTMANKOV A, et al. Determination of antioxidant activity and antioxidant content in tomato varieties and evaluation of mutual interactions between antioxidants[J]. LWT-Food Science Technology, 2011, 44: 1703–1710.
- [23] 张明明, 热合满·艾拉, 王玉红, 等. 乙烯与 1-MCP 处理对伯谢克辛甜瓜采后活性氧代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(18): 270–273, 310. [ZHANG Mingming, ZHEHEMAN Ella, WANG Yuhong, et al. Effects of ethylene and 1-MCP treatments on postharvest reactive oxygen metabolism in Berserksen melons[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(18): 270–273, 310.]
- [24] 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. [LIU Zhiyu, ZHU Xuan, ZHAO Yating, et al. Effects of short-term treatment with high concentration of CO₂ on postharvest storage quality and antioxidant metabolism of prunes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 311–318.]
- [25] 侯佳迪. 1-MCP 对贮藏期间不同成熟度‘霞晖 8 号’桃果实乙烯合成及相关基因表达的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2021. [HOU Jiadi. Effects of 1-MCP on ethylene synthesis and related gene expression in ‘Xiahui 8’ peach fruits of different maturity during storage[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021.]
- [26] 曹森, 江彤, 马超, 等. 1-MCP 处理对“东红”猕猴桃货架期品质的影响[J]. 北方园艺, 2021(4): 101–106. [CAO Seng, JIANG Tong, MA Chao, et al. Effect of 1-MCP treatment on shelf-life quality of “Donghong” kiwifruit[J]. Northern Horticulture, 2021(4): 101–106.]
- [27] 朱文靖, 张容鹤, 邓浩, 等. 不同成熟度红毛丹果实果肉品质特性及抗氧化活性比较[J]. 现代食品科技, 2021, 37(9): 138–144, 293. [ZHU Wenjin, ZHANG Ronggao, DENG Hao, et al. Comparison of pulp quality characteristics and antioxidant activity of rambutan fruits at different maturity[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(9): 138–144, 293.]
- [28] 杨源. 1-MCP 对采后西葫芦贮藏品质及活性氧代谢的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2022. [YANG Yuan. Effect of 1-MCP on storage quality and reactive oxygen metabolism of postharvest courgette[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.]
- [29] XIONG Z, LI H, LIU Z, et al. Effect of 1-MCP on postharvest quality of French prune during storage at low temperature[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(8): 1–11.
- [30] DONG Y, LIU L, ZHAO Z, et al. Effects of 1-MCP on reactive oxygen species, polyphenol oxidase activity, and cellular ultrastructure of core tissue in ‘Yali’ pear (*Pyrus bretschneideri* Rehd.) during storage[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2015, 56(2): 207–215.
- [31] 黄钰萍, 刘青娥. 1-MCP 处理对杨梅果实贮藏期间品质及活性氧代谢的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(9): 13–20. [HUANG Yupin, LIU Qinge. Effects of 1-MCP treatment on quality and reactive oxygen metabolism of prune fruits during storage[J]. Preservation and Processing, 2021, 21(9): 13–20.]
- [32] WU X Q, AN X J, YU M L, et al. 1-Methylcyclopropene treatment on phenolics and the antioxidant system in postharvest peach combined with the liquid chromatography/mass spectrometry technique[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(25): 6364–6372.
- [33] XU F, LIU Y, DONG S, et al. Effect of 1-Methylcyclopropene (1-MCP) on ripening and volatile compounds of blueberry fruit[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(11): 1–11.