DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251016003
引用格式: 王静, 张静圆, 王娜, 等. 1-甲基环丙烯和高锰酸钾处理对低温贮藏冬枣鲜果的保鲜效应研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 49–57.
WANG J, ZHANG JY, WANG N, *et al*. Effects of 1-methylcyclopropene and potassium permanganate treatment on preservation of *Ziziphus jujuba* Mill. fruits stored at low temperature [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 49–57. (in Chinese with English abstract).

1-甲基环丙烯和高锰酸钾处理对低温贮藏冬枣鲜果的保鲜效应研究

王 静[1*], 张静圆[1], 王 娜[1], 宋民斗[2], 杨 君[3], 王新军[4]

(1. 陕西学前师范学院生物食品与化学学院, 西安 710100; 2. 陕西大荔县果业发展中心, 大荔 715100; 3. 商洛市林业局, 商洛 726100; 4. 潼关县红宝石农民专业合作社, 潼关 714300)

摘 要: 目的 探究低温结合 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)与高锰酸钾处理对大荔冬枣鲜果的保鲜效果。**方法** 选取脆熟期大荔冬枣, 均分 3 组, 分别用 1 μL/L 1-MCP、饱和高锰酸钾处理, 设空白对照, 于–1~0 ℃贮藏 75 d, 每 15 d 测定维生素 C、硬度、细胞膜透性等 11 项指标, 各指标至少 3 次平行试验取均值。**结果** 1-MCP 与高锰酸钾处理均能延缓冬枣维生素 C、可滴定酸含量下降, 抑制还原糖升高, 延缓原果胶降解与硬度、脆性下降; 同时能抑制细胞膜透性增大与丙二醛含量上升, 维持总酚、类黄酮含量及过氧化物酶等抗氧化酶活性, 其中 1-MCP 的保鲜效果更优。**结论** 低温环境下, 1-MCP 与高锰酸钾处理均能降低冬枣呼吸强度, 维持果实营养与抗氧化活性, 延长货架期; 1-MCP 的保鲜效果最优, 可作为冬枣贮藏保鲜的优选处理方式。

关键词: 冬枣; 低温; 高锰酸钾; 1-甲基环丙烯; 保鲜效应

Effects of 1-methylcyclopropene and potassium permanganate treatment on preservation of *Ziziphus jujuba* Mill. fruits stored at low temperature

WANG Jing[1*], ZHANG Jing-Yuan[1], WANG Na[1], SONG Min-Dou[2], YANG Jun[3], WANG Xin-Jun[4]

(1. *College of Biological Food and Chemistry, Shaanxi Xueqian Normal University, Xi'an* 710100, *China*; 2. *Fruit Industry Development Center of Dali County, Dali* 715100, *China*; 3. *Shangluo County Forestry Bureau, Shangluo* 726100, *China*; 4. *Hongbaoshi Farmers' Professional Cooperative of Tongguan County, Tongguan* 714300, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the preservation effects of low temperature combined with 1-methylcyclopropene (1-MCP) and potassium permanganate treatments on 'Dali' *Ziziphus jujuba* Mill. fruits. **Methods** Firm-ripe 'Dali' *Ziziphus jujuba* Mill. fruits were selected and randomly divided into 3 groups. These

收稿日期: 2025-10-16
基金项目: 2020 年农业产业化发展项目; 中央财政林草科技推广示范项目(SLTG[2025]05 号); 陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLNY-26); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202414390002)
第一作者/*通信作者: 王静(1985—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品功能因子的研究与开发, 果蔬采后生理与贮藏保鲜。E-mail: 531243773@qq.com

were treated with 1 μL/L 1-MCP or saturated potassium permanganate, respectively, with an untreated group as the control. All fruits were stored at –1–0 ℃ for 75 d. The 11 indicators, including vitamin C content, firmness and cell membrane permeability, were measured every 15 d. Each indicator was analyzed with at least 3 replicates, and the mean values were reported. **Results** Both 1-MCP and potassium permanganate treatments significantly delayed the decline in vitamin C and titratable acid content, inhibited the increase in reducing sugar, and retarded the degradation of protopectin and the loss of firmness and crispness. They also suppressed the increase in cell membrane permeability and malondialdehyde content, while maintaining higher levels of total phenols, flavonoids and the activity of antioxidant enzymes such as peroxidase. Among them, the 1-MCP treatment demonstrated superior overall preservation effects. **Conclusion** Under low-temperature conditions, both 1-MCP and potassium permanganate treatments effectively reduce the respiration rate of *Ziziphus jujuba* Mill., help maintain its nutritional quality and antioxidant activity, and extend its shelf life. 1-MCP is identified as the optimal treatment for the storage and preservation of *Ziziphus jujuba* Mill..

KEY WORDS: *Ziziphus jujuba* Mill.; low temperature; potassium permanganate; 1-methylcyclopropene; preservation effect

0 引 言

冬枣(*Ziziphus jujuba* Mill.)作为中国高价值的特色果品，采后易失水霉变，这一问题已成为产业发展的瓶颈。为解决此问题，研究者们已广泛探索了物理、化学及生物等多种保鲜技术[1]。其中，1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)作为一种高效的乙烯受体抑制剂，在多种果蔬保鲜中已被证实能有效延缓衰老；同样，高锰酸钾作为氧化性消毒剂，通过抑制表面微生物生长，也在采后处理中展现出保鲜潜力[2−7]。尽管已有大量研究证实了1-MCP和高锰酸钾在果蔬保鲜上的有效性，但当前研究仍存在两点明显不足：首先，多数研究侧重于单一处理效果的验证，而对这两种作用机制迥异的处理方式在同一品种(如“大荔冬枣”)上进行系统、直接地对比研究尚不充分，导致在实际应用中选择何种技术缺乏明晰的理论与实践依据。其次，对于1-MCP和高锰酸钾处理是否能在低温贮藏环境下产生协同增效作用，以及它们对冬枣采后活性氧代谢网络(包括抗氧化物质与抗氧化酶系统)的精细化调控机制，仍有待深入阐明。王思滢等[8]用不同浓度1-MCP处理冬枣，在冷藏条件下贮藏60 d，测定了其呼吸强度等贮藏品质指标，但未检测活性氧代谢相关指标(如丙二醛、关键酶活性等)。因此，本研究选用陕西代表性特色品种“大荔冬枣”为试材，在–1~0 ℃的低温和冷藏条件下，并行设置1-MCP与高锰酸钾处理组，进行为期75 d的系统性对比研究。本研究不仅检测维生素C、硬度和酸度等常规品质指标，同时结合活性氧代谢平衡相关参数，如丙二醛、总酚、类黄酮含量以及过氧化物酶等关键酶活性[9−10]，系统分析两种处理对冬枣果实的差异化调控作用。研究旨在明确1-MCP与高锰酸钾在冬枣低温贮藏中的独立保鲜效果与比较优势，并深入揭示二者维持果实品质稳定的生理机制。这一研究对于保障冬枣品质稳定性、拓展市场供应周期及推动产业可持续发展具有重要意义。通过筛选出最优处理方式并阐明其作用机制，可为“大荔冬枣”乃至同类枣果的采后保鲜提供精准化的技术选择和坚实的理论支撑，对减少采后损失、提升商品价值具有直接的经济与社会效益。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

试验用冬枣采自陕西省大荔县新禧冬枣专业合作社，成熟度为冬枣脆熟期。

三氯乙酸、邻苯二甲酸氢钾、乙二胺四乙酸、没食子酸、邻苯二酚、苯酚(分析纯，天津市大茂化学试剂厂)；愈创木酚、3,5-二硝基水杨酸(分析纯，上海展云化工有限公司)；盐酸、浓硫酸、过氧化氢溶液(分析纯，天津政成化学制品有限公司)；交联聚乙烯吡咯烷酮(分析纯，山东科源生化有限公司)；无水乙醇、无水葡萄糖(分析纯，四川西陇科学有限公司)；芦丁、多聚半乳糖醛酸(分析纯，晶博生物科技有限公司)；抗坏血酸(分析纯，天津市登峰化学试剂)；咔唑(分析纯，天津市光复精细化工研究所)；甲醇、无水乙酸钠、冰醋酸、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾、酒石酸钾钠、氢氧化钠、碳酸氢钠、高锰酸钾(分析纯，天津市天力化学试剂有限公司)；2-硫代巴比妥酸(分析纯，上海九沃生物科技有限公司)；无水亚硫酸钠(分析纯，天津奥普升化工有限公司)；草酸(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，上海蓝季生物试剂有限公司)；酚酞(分析纯，天津市天新精细化工开发中心)；1-MCP、饱和高锰酸钾(上海源叶生物科技有限公司)。

1.2　仪器与设备

JA2003 电子天平(精度 0.001 g, 上海菁海仪器有限公司); 101 型电热鼓风干燥箱(上海科恒实业发展有限公司); T2600 紫外可见分光光度计(上海佑科仪器仪表有限公司); DK-98-IIA 电热恒温水浴锅(天津市泰斯特仪器有限公司); AXTG16G 小型台式离心机(盐城市安信实验仪器有限公司); ST3100C 实验室电导率仪(奥豪斯仪器有限公司); TA-XTplusC 质构仪(英国 Stable Micro Systems 公司); H2050R 低温离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司); ZYM-II-20T 微量分析型超纯水机(四川卓越水处理设备有限公司)。

1.3　试验方法

将冬枣平均分成3份, 分别用1 μL/L 1-MCP和饱和高锰酸钾进行处理, 同时设置一份空白对照。在–1~0 ℃的环境下贮存, 并在第 0、15、30、45、60、75 d 测定其品质指标。测定的指标包括维生素 C 含量、可滴定酸含量、果胶含量、还原糖含量、质构(硬度和脆性)、细胞膜透性、丙二醛含量、总酚和类黄酮含量、过氧化物酶活性和抗坏血酸过氧化物酶活性。每个指标均需测定 3 次, 并计算其平均值。

1.3.1　维生素 C 含量的测定

参考张晓荣等[11]的方法, 称2.0 g冬枣果实, 采用2,6-二氯酚靛酚滴定法测定维生素 C 含量。重复测定 3 次, 计算平均值和标准偏差。2,6-二氯靛酚溶液的滴定度按公式(1)计算:

$$T = \frac{c \times V}{V_1 - V_0} \tag{1}$$

式中: T 为 2,6-二氯靛酚溶液的滴定度, mg/mL; c 为抗坏血酸标准溶液的质量浓度, mg/mL; V 为吸取抗坏血酸标准溶液的体积, mL; V_1 为滴定抗坏血酸标准溶液所消耗 2,6-二氯靛酚溶液的体积, mL; V_0 为滴定空白所消耗 2,6-二氯靛酚溶液的体积, mL。

维生素 C 含量按公式(2)计算:

$$X = \frac{(V_2 - V_3) \times D \times A}{m} \times 100 \tag{2}$$

式中: X 为试样中 L(+)-抗坏血酸含量, mg/100 g; V_2 为滴定试样所消耗 2,6-二氯靛酚溶液的体积, mL; V_3 为滴定空白所消耗 2,6-二氯靛酚溶液的体积, mL; D 为 2,6-二氯靛酚溶液的滴定度, mg/mL; A 为稀释倍数; m 为试样质量, g。

1.3.2　可滴定酸含量的测定

参考张晓荣等[11]的方法, 称 2.0 g 冬枣果实, 采用氢氧化钠溶液滴定法测定可滴定酸含量(以苹果酸计)。重复 3 次, 计算平均值和标准偏差。可滴定酸含量按公式(3)计算:

$$\text{可滴定酸含量}/\% = \frac{V_4 \times C_1 \times (V_5 - V_6) \times f}{V_S \times W} \times 100\% \tag{3}$$

式中: V_4 为样品提取液总体积, mL; V_s 为滴定时所取滤液体积, mL; C_1 为氢氧化钠滴定液摩尔浓度, mol/L; V_5 为滴定滤液消耗的氢氧化钠溶液毫升数, mL; V_6 为滴定蒸馏水消耗的氢氧化钠溶液毫升数, mL; W 为样品重量, g; f 为折算系数(以柠檬酸计), g/mmoL。

1.3.3　果胶含量的测定

参考曲文峰[12]的方法, 取 2.0 g 冬枣, 采用咔唑比色法测定果胶含量。测 A_{530} 吸光度, 重复 3 次, 计算平均值和标准偏差。以半乳糖醛酸为标准物绘制曲线, 计算原果胶和可溶性果胶含量, 结果以质量分数表示。果胶含量按公式(4)~(5)计算:

$$\text{果胶含量}/\% = \frac{C_2 \times V_7}{V_{8s} \times W_1 \times 10^6} \times 100\% \tag{4}$$

$$\text{果胶}/\% = \text{原果胶}/\% + \text{可溶性果胶}/\% \tag{5}$$

式中: C_2 为从标准曲线查得半乳糖醛酸量, μg; V_7 为样品提取液总体积, mL; V_{8s} 为测定时所取样品提取液体积, mL; W_1 为样品重量, g。

1.3.4　还原糖含量的测定

参照曹建康等[13]的方法, 称 1.0 g 冬枣, 采用3,5-二硝基水杨酸法测定还原糖含量。测定 A_{540} 吸光度, 重复 3 次, 计算平均值。以葡萄糖为标准物绘制曲线, 计算还原糖含量, 结果以质量分数表示。还原糖含量按公式(6)计算:

$$\text{还原糖含量}/\% = \frac{C_3 \times V_9 \times N}{V_{9S} \times W_2 \times 1000} \times 100\% \tag{6}$$

式中: C_3 为从标准曲线查得的葡萄糖毫克数, mg; V_9 为样品提取液总体积, mL; N 为样品提取液稀释倍数; V_{9s} 为测定时所取样品提取液体积, mL; W_2 为样品重量, g。

1.3.5　质构的测定

使用 TA-XTplusC 型质构仪测定冬枣的硬度、脆性指标。其测定条件为, 探头型号为 P/2, 测前速度为 5.00 mm/s, 测中速度为 2.00 mm/s, 测后速度为 5.00 mm/s, 位移为 4.000 mm, 触发力为 5.0 g。重复测定 10 次, 计算平均值和标准偏差。

1.3.6　细胞膜透性的测定

参考曹建康等[13]的方法, 用 ST3100C 电导率仪测定细胞膜的渗透性, 结果取平均值。膜渗透率按公式(7)计算:

$$\text{细胞膜渗透率}/\% = C_4/C_5 \times 100\% \tag{7}$$

式中: C_4 为冬枣在贮藏过程中测定的电导率值; C_5 为冬枣经沸水浴彻底破碎细胞膜后测定的总电导率值。

1.3.7　丙二醛含量的测定

参照 SHAN 等[14]的方法, 取 1.0 g 冬枣, 采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量。测定 A_{450}、A_{532}、A_{600} 吸光度值, 重复 3 次。丙二醛含量按公式(8)计算:

$$\text{丙二醛含量}/(\mu\text{mol/g FW}) = \frac{C_6 \times V_{10}}{V_{11S} \times W_3 \times 1000} \tag{8}$$

式中: C_6 为反应混合液中丙二醛含量, μmol/L; V_{10} 为样品提取液总体积, mL; V_{11s} 为测定时所取样品提取液体积, mL; W_3 为样品重量, g。

1.3.8 总酚和类黄酮含量的测定

参考曹建康等[13]的方法, 称取 2.0 g 冬枣, 采用盐酸-甲醇法测定总酚和类黄酮含量。分别测定 280 nm 和 325 nm 波长的吸光度值, 重复 3 次, 计算平均值和标准偏差。结果以每克冬枣在 280 nm 下的吸光度值表示总酚含量(OD_{280}/g FW), 325 nm 下的吸光度值表示类黄酮含量(OD_{325}/g FW)。

1.3.9 过氧化物酶活性的测定

取 2.0 g 冬枣, 参考曲文峰[12]的方法, 酶液加愈创木酚, 最后加过氧化氢启动反应, 记录反应开始 15 s 及之后每分钟的 A_{470} 值, 连续 5 min, 重复 3 次。过氧化物酶活性单位为每克冬枣样品每分钟吸光度变化值增加 1 时为 1 个单位。过氧化物酶活性按公式(9)计算:

$$过氧化物酶活性/(U\cdot g^{-1}\ FW\cdot min^{-1})=\frac{\Delta OD_{470}\times V_{12}}{\Delta t\times V_{13s}\times W_4} \quad (9)$$

式中: ΔOD_{470} 为反应混合液的吸光度变化值; Δt 为酶促反应时间, min; V_{12} 为样品提取液总体积, mL; V_{13S} 为测定时所取样品提取液体积, mL; W_4 为样品重量, g。

1.3.10 抗坏血酸过氧化物酶活性的测定

取 2.0 g 冬枣, 参考曲文峰[12]的方法。酶液加反应缓冲液, 最后加过氧化氢溶液启动反应, 记录反应开始 15 s 及之后每 30 s 的 A_{290} 值, 连测 3 min, 重复 3 次。酶活性单位为每克冬枣样品每分钟 OD_{290} 变化 0.01 为 1 单位。抗坏血酸过氧化物酶活性按公式(10)计算:

$$抗坏血酸过氧化物酶活性/(U\cdot g^{-1}\ FW\cdot min^{-1})=\frac{\Delta OD_{290}\times V_{14}}{0.01\times \Delta t'\times V_{15s}\times W_5} \quad (10)$$

式中: ΔOD_{290} 为反应混合液在 290 nm 处吸光度的每分钟变化值; $\Delta t'$为酶促反应时间, min; V_{14} 为样品提取液总体积, mL; V_{15S} 为测定时所取样品提取液体积, mL; W_5 为样品重量, g。

1.4 数据处理

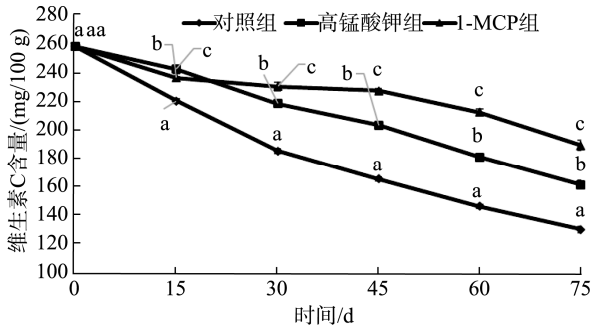
每组进行 3 次平行试验, 结果以平均值±标准偏差表示。使用 Excel 2021 版本软件对数据进行统计分析和绘图。采用字母标记法表示组间多重比较结果, 字母相异代表组间差异显著(P<0.05), 字母相同则代表组间差异不显著(P>0.05)。

2 结果与分析

2.1 低温结合高锰酸钾处理和 1-MCP 处理对冬枣果实贮藏品质的影响

2.1.1 维生素 C 含量变化

维生素 C 含量是评估冬枣贮藏品质的关键指标[15], 可清除自由基、减轻膜脂过氧化损害以延长保鲜期[16]。由图 1 可知, 随贮藏时间增加, 冬枣维生素 C 含量呈下降趋势, 这与冬枣含维生素 C 氧化酶、冷藏时该酶与氧气反应加速其流失有关, 且冷藏越久损失越重。对比来看, 1-MCP 处理组下降最小, 高锰酸钾处理组次之, 二者均能维持较高维生素 C 含量, 减少维生素 C 损失。



注: 不同小写字母表示同一贮藏时间不同处理组之间差异显著(P<0.05), 相同字母表示同一贮藏时间不同处理组之间无显著差异(P>0.05), 下同。

图 1 高锰酸钾处理和 1-MCP 处理对冬枣维生素 C 含量变化的影响

Fig.1 Effects of potassium permanganate treatment and 1-MCP treatment on vitamin C content of *Ziziphus jujuba* Mill.

2.1.2 可滴定酸含量变化

可滴定酸含量是衡量植物品质的重要指标, 且影响果实风味。由图 2 可知, 冬枣可滴定酸含量随贮藏时间增加而减少, 或因采后呼吸作用消耗有机酸[17]。其中对照组、高锰酸钾处理组和 1-MCP 处理组 3 组相差不大。说明其抑制可滴定酸下降效果均差不多。可滴定酸作为呼吸代谢的重要底物, 其消耗速率直接反映了呼吸强度。1-MCP 处理组可滴定酸下降最慢, 表明 1-MCP 可能通过抑制乙烯作用, 有效降低了冬枣果实的呼吸强度, 减少了有机酸作为呼吸底物的消耗, 这对于维持果实风味和延缓衰老具有重要意义。

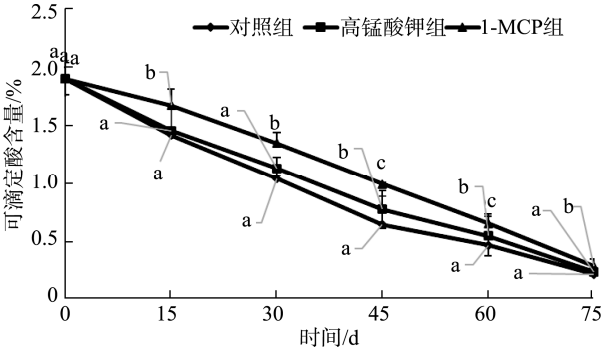


图 2 高锰酸钾处理和 1-MCP 处理对冬枣可滴定酸含量的影响

Fig.2 Effects of potassium permanganate treatment and 1-MCP treatment on titrable acid content of *Ziziphus jujuba* Mill.

2.1.3　果胶含量变化

果胶主要存在于果实初生细胞壁与胞间层, 对细胞结构支撑和果蔬组织稳定至关重要[18]。果实成熟衰老时, 原果胶会分解为可溶性果胶, 导致细胞内聚力减弱、果实软化[19]。由图 3 可见, 冬枣鲜果原果胶含量随贮藏时间延长而持续下降, 1-MCP 处理组降幅最小, 高锰酸钾处理组次之, 对照组最大。由图 3 可见, 冬枣鲜果可溶性果胶含量随贮藏时间延长而上升, 且对照组始终高于另两组。这表明高锰酸钾和 1-MCP 处理均能延缓冬枣鲜果可溶性果胶增加与原果胶降解, 其中 1-MCP 处理效果最佳。

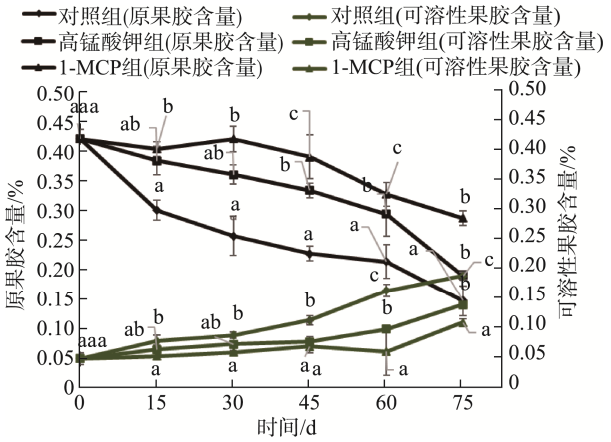


图 3　高锰酸钾处理和 1-MCP 处理对冬枣可溶性果胶和原果胶含量的影响

Fig.3　Effects of potassium permanganate treatment and 1-MCP treatment on soluble pectin content and protopectin content of *Ziziphus jujuba* Mill.

2.1.4　还原糖含量变化

还原糖含量是评估果蔬品质的重要依据, 兼具为大分子碳水化合物及核苷酸的合成提供糖基供体、关联生理生化代谢的作用, 其含量增加通常意味着果蔬组织代谢加速, 成熟衰老进程加快[20]。由图 4 可知, 冬枣贮藏期间还原糖含量持续上升, 且贮藏越久呼吸作用越强、糖分积累越多; 其中对照组增幅最大, 高锰酸钾处理组次之, 1-MCP 处理组增幅最小, 说明 1-MCP 可有效抑制还原糖含量上升。还原糖是呼吸作用的主要底物。对照组还原糖快速积累并消耗, 表明其呼吸代谢旺盛。1-MCP 处理通过抑制整体呼吸代谢速率, 显著减缓了还原糖的上升趋势。呼吸消耗的降低减少了维持基础代谢对腺苷三磷酸(adenosine triphosphate, ATP)的需求, 这部分“节约”的能量可能被重新分配至细胞结构与膜系统的维护与修复过程。

2.1.5　冬枣果实质构变化

硬度是评价果蔬品质的重要物理参数, 反映其抗形变或破裂能力。由图 5A 可知, 3 种处理的冬枣果实硬度均随贮藏时间降低, 这可能与贮藏中冬枣果实内部原果胶分解为可溶性果胶, 同时淀粉水解、纤维素糖化, 共同导致硬度下降有关[21]; 其中 1-MCP 处理组降幅最小, 延缓硬度下降效果最佳。果实的软化与细胞壁结构(如果胶)的降解密切相关, 而维持细胞壁完整性是一个需要消耗 ATP 的主动过程。1-MCP 处理最好地维持了果实硬度, 这可能与其通过降低呼吸消耗, 优化了细胞内的“能量负荷”, 为多聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase, PG)、果胶甲酯酶(pectin methylesterase, PME)等细胞壁降解酶的抑制及细胞壁物质的修复提供了更充足的能量供应有关。

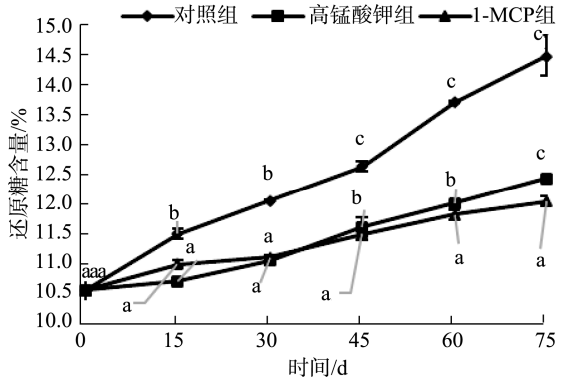


图 4　高锰酸钾处理和 1-MCP 处理对冬枣还原糖含量的影响

Fig.4　Effects of potassium permanganate treatment and 1-MCP treatment on reducing sugar content of *Ziziphus jujuba* Mill.

脆性反映果蔬受力破裂的难易程度, 是关键品质指标。由图 5B 可知, 贮藏中冬枣脆性均逐渐降低, 与失水、强呼吸消耗及果肉乙醇积累促进软化有关[22]; 对照组脆性下降最快, 高锰酸钾处理与 1-MCP 处理组下降较慢, 表明两种处理均能较好延缓冬枣果实脆性降低。脆性的维持同样依赖于完整的细胞结构。1-MCP 处理延缓脆性下降的效果, 进一步支持了其可能通过调控呼吸代谢和能量平衡, 帮助细胞维持更高的膨压和细胞壁-膜系统的稳定性。

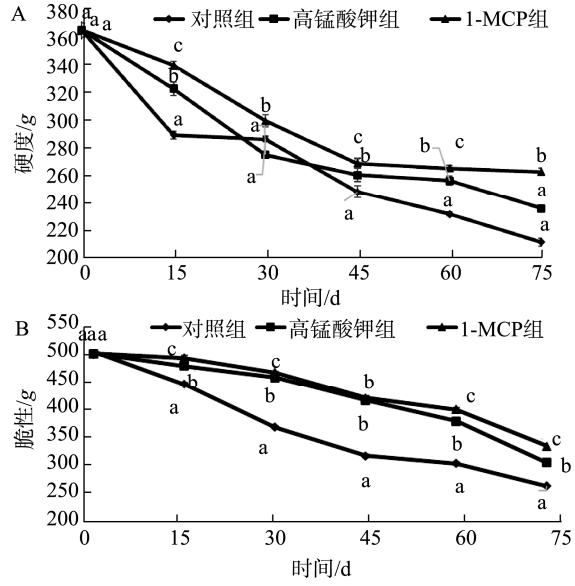


图 5　高锰酸钾处理和 1-MCP 处理对冬枣硬度(A)和脆性(B)的影响

Fig.5　Effects of potassium permanganate treatment and 1-MCP treatment on hardness (A) and brittleness (B) of *Ziziphus jujuba* Mill.

2.2 低温结合高锰酸钾处理和 1-MCP 处理对冬枣果实活性氧代谢的影响

2.2.1 细胞膜透性

细胞膜透性是衡量果蔬新鲜度及冷害受损的关键指标。通过检测提取液电导率, 可有效监测细胞膜渗透率变化, 判断果蔬是否受冷害。如图 6 所示, 随着贮藏时间增加, 冬枣细胞膜透性不断提升。这或因贮藏期间膜质过氧化, 丙二醛含量显著上升, 破坏细胞膜结构, 导致细胞膜透性增大[23]。对照组细胞膜透性从 50.2%升至 75 d 时的 89.9%, 增速最快, 显示无外界干预下细胞膜透性会随时间显著恶化。高锰酸钾处理组增速略低, 表明其有短期抑制作用。1-MCP 处理组增速最缓, 说明其长效抑制效果最佳。细胞膜透性的增加是膜系统结构受损的标志。1-MCP 处理最有效地延缓了膜透性的上升, 这不仅与它能减少丙二醛等膜脂过氧化产物有关, 还可能得益于其通过降低呼吸等消耗性代谢, 使细胞有更充分的 ATP 用于膜脂和膜蛋白的周转与修复, 维持了膜的完整性。

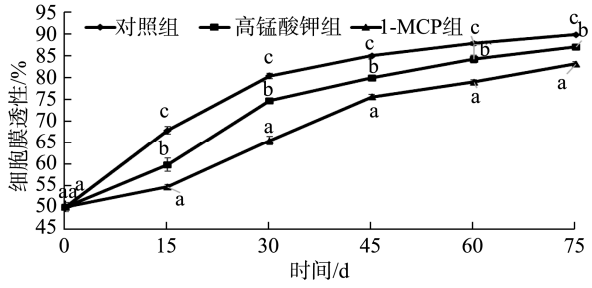


图 6 高锰酸钾处理和 1-MCP 处理对冬枣细胞膜透性的影响

Fig.6 Effects of potassium permanganate treatment and 1-MCP treatment on cell membrane permeability of *Ziziphus jujuba* Mill.

2.2.2 丙二醛含量变化

丙二醛是衡量膜脂过氧化程度的重要物质, 通过产生氧化自由基加重细胞膜损伤, 能反映果蔬衰老状况[24–25]。如图 7 所示, 随着贮藏时间增加, 冬枣中的丙二醛含量不断攀升。这或因贮藏期间细胞膜系统受氧化应激影响, 引发膜质过氧化, 生成更多丙二醛。对照组增速最快, 15 d 后增速加快, 反映了自然代谢的活跃程度。高锰酸钾组增速略低, 1-MCP 组增速最缓, 抑制效果最明显, 表明 1-MCP 能有效延缓丙二醛生成。

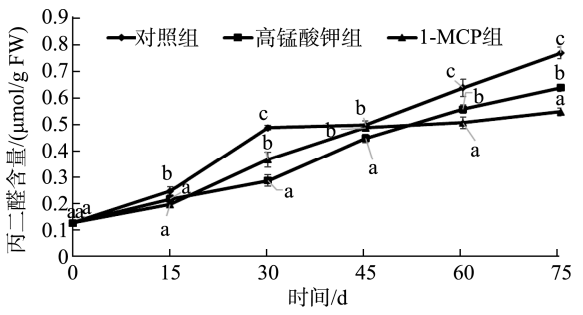


图 7 高锰酸钾处理和 1-MCP 处理对冬枣丙二醛含量的影响

Fig.7 Effects of potassium permanganate treatment and 1-MCP treatment on malondialdehyde content of *Ziziphus jujuba* Mill.

2.2.3 总酚含量变化

总酚是果蔬清除活性氧的关键物质, 与抗氧化能力密切相关。由图 8 可知, 冬枣贮藏期间总酚含量先缓升后下降[26]: 这或因贮藏初期冬枣果实内酚类物质合成活跃, 合成速度超分解速度, 故总酚含量上升。随时间推移, 分解速度占主导, 总酚含量下降[27]。此外, 贮藏期间酚类物质易氧化, 生成醌类化合物并聚合成黑色素, 此过程中多酚氧化酶等酶活性变化会加速此反应, 对总酚含量产生进一步影响。高锰酸钾和 1-MCP 处理组总酚含量始终高于对照组, 能有效抑制酚类物质减少。总酚作为重要的抗氧化物质, 其含量变化与过氧化物酶和抗坏血酸过氧化物酶活性密切相关。过氧化物酶和抗坏血酸过氧化物酶通过清除过氧化氢等活性氧物种, 减轻氧化应激, 从而有助于维持总酚的稳定性。本研究中, 1-MCP 处理组总酚含量较高, 同时过氧化物酶和抗坏血酸过氧化物酶活性也相对较高(图 8~9), 表明 1-MCP 可能通过调控活性氧代谢, 延缓总酚的氧化降解, 进而维持冬枣的抗氧化能力。

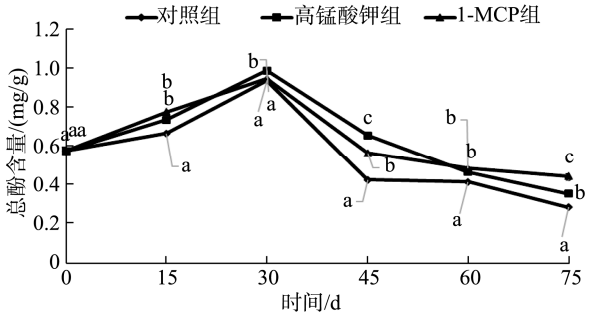


图 8 高锰酸钾处理和 1-MCP 处理对冬枣总酚含量的影响

Fig.8 Effects of potassium permanganate treatment and 1-MCP treatment on total phenol content of *Ziziphus jujuba* Mill.

2.2.4 类黄酮含量变化

类黄酮含量是衡量冬枣抗氧化性能的重要指标[28]。由图 9 可知, 贮藏期间冬枣类黄酮含量先缓升后下降: 初期因合成酶活性高、合成超降解而上升, 后期代谢减缓、合成降速而减少。初始含量为 0.094 mg/g, 45 d 达峰值, 对照组、高锰酸钾、1-MCP 分别 75 d 贮藏结束时分别降至 0.043、0.063、0.071 mg/g, 且高锰酸钾和 1-MCP 能显著抑制类黄酮减少(P<0.05), 维持贮藏品质。类黄酮与总酚类似, 作为抗氧化剂, 其含量变化与活性氧代谢相关。1-MCP 处理组类黄酮含量较高, 可能与抗坏血酸过氧化物酶和过氧化物酶活性维持较好有关(图 9~10), 这些酶协同清除活性氧, 减少了类黄酮的氧化分解, 从而延缓了冬枣衰老。

2.2.5 过氧化物酶活性变化

过氧化物酶是评估果蔬成熟度与衰老状态的关键物质, 可清除过氧化氢、维持活性氧稳态, 同时, 在过氧化氢作用下, 它还能催化酶促褐变反应, 加速冬枣褐变, 削弱

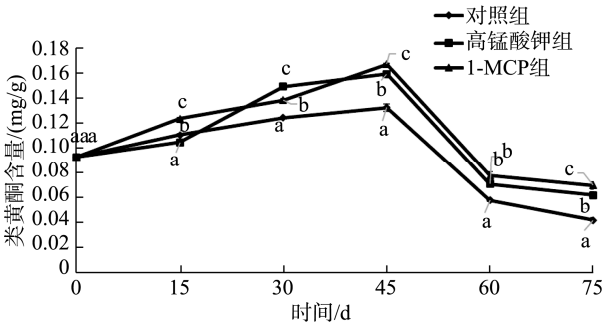


图 9　高锰酸钾处理和 1-MCP 处理对冬枣类黄酮含量的影响

Fig.9　Effects of potassium permanganate treatment and 1-MCP treatment on flavonoid content of *Ziziphus jujuba* Mill.

抗氧化活性[29–30]。由图 10 可知, 其贮藏期间活性先升后降, 这或因贮藏初期冬枣果实为适应新环境产生应激反应, 使酶活性升高。随时间推移, 果实生理代谢减弱, 酶活性开始下降。贮藏后期, 果实衰老, 过氧化物酶活性处于较低水平。3 组均在 30 d 达高峰、75 d 降至最低。45 d 后高锰酸钾和 1-MCP 处理组酶活性均高于对照组, 1-MCP 效果更显著, 更能抑制酶活性降低。过氧化物酶活性与总酚和类黄酮含量相互关联, 因为酚类物质可以作为过氧化物酶的底物, 参与褐变反应。1-MCP 处理维持了较高的过氧化物酶活性, 可能减少了活性氧积累, 从而保护了抗氧化物质, 延缓了品质劣变。

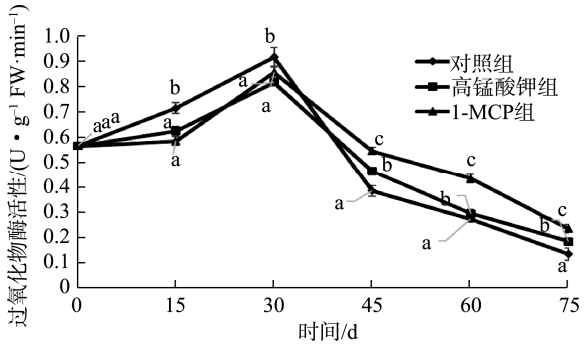


图 10　高锰酸钾处理和 1-MCP 处理对冬枣过氧化物酶活性的影响

Fig.10　Effects of potassium permanganate treatment and 1-MCP treatment on peroxidase activity of *Ziziphus jujuba* Mill.

2.2.6　抗坏血酸过氧化物酶活性变化

抗坏血酸过氧化物酶是果蔬关键酶, 可催化抗坏血酸与过氧化氢反应并将其分解[31]。由图 11 可知, 冬枣贮藏期间该酶活性持续下降, 或因低温胁迫加剧膜脂过氧化、破坏细胞膜, 导致酶活性降低; 其中对照组下降最快, 高锰酸钾组初期慢后期快, 1-MCP 组下降最慢, 表明其或能更持久维持酶活性。抗坏血酸过氧化物酶活性与维生素 C 含量直接相关, 因为抗坏血酸过氧化物酶利用维生素 C 作为底物清除过氧化氢。1-MCP 处理组抗坏血酸过氧化物酶活性下降较慢, 同时维生素 C 含量保持较高(图 1), 表明 1-MCP 处理有助于维持抗氧化系统功能, 减少活性氧对细胞膜的损伤。

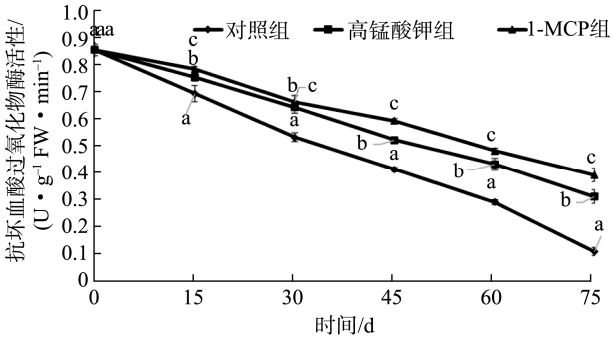


图 11　高锰酸钾处理和 1-MCP 处理对冬枣抗坏血酸过氧化物酶活性的影响

Fig.11　Effects of potassium permanganate treatment and 1-MCP treatment on ascorbate peroxidase activity of *Ziziphus jujuba* Mill.

3　结　论

1-MCP (1 μL/L)与饱和高锰酸钾处理均能有效延缓冬枣贮藏期间的品质劣变, 具体表现为: 抑制维生素 C、可滴定酸含量的下降及还原糖含量的上升; 延缓原果胶降解, 更好地维持果实硬度和脆性; 降低细胞膜透性与丙二醛积累, 维持较高的总酚、类黄酮含量及过氧化物酶、抗坏血酸过氧化物酶活性。综合比较, 1-MCP 处理的保鲜效果全面优于高锰酸钾处理, 是更优的保鲜技术选择。本研究推测出, 1-MCP 的卓越保鲜效能源于其多路径协同作用机制: 首先, 作为乙烯受体抑制剂, 它直接阻断乙烯信号传导, 延缓衰老启动。其次, 它通过抑制呼吸强度, 推测出可能优化了细胞内的“能量负荷”(ATP 分配), 将更多代谢能量导向维持细胞壁结构(如果胶代谢)和膜系统完整性等防御与修复过程。再者, 它通过维持过氧化物酶、抗坏血酸过氧化物酶等抗氧化酶活性和抗氧化物质(总酚、类黄酮、维生素 C)含量, 有效缓解氧化应激, 形成协同保鲜网络。这为理解 1-MCP 在果实采后生理中的系统调控作用提供了新的视角。基于本研究成果, 对于‘大荔冬枣’或类似枣果的商业化贮藏保鲜, 推荐采用 1 μL/L 1-MCP 在果实预冷后进行处理, 随后于–1~0°C 条件下贮藏。该处理能最大限度延长货架期至 75 d 以上, 并保持优良的商品与营养品质。高锰酸钾处理可作为辅助或替代方案, 但其整体保鲜效果次于 1-MCP。本研究仍存在一定局限性: (1)仅设置了单一的 1-MCP 浓度(1 μL/L), 未来需探究不同浓度(如 0.5 μL/L、1.5 μL/L)的剂量效应。(2)未深入研究 1-MCP 与高锰酸钾是否具有协同保鲜效应。(3)对 1-MCP 调控能量代谢(如 ATP、二磷酸腺苷水平)及关键细胞壁降解酶基因表达的直接证据有待补充。因此, 后续研究应围绕上述问题展开, 以完善冬枣保鲜理论体系并开发更精准高效的复合保鲜技术。

参考文献

[1] 黄国中, 王琴, 刘东杰. 基于 LF-NMR 及其成像技术探究冬枣贮藏过程中的水分变化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(21): 319–324.
HUANG GZ, WANG Q, LIU DJ. Study on water changes in winter jujube during storage based on LF-NMR and its imaging technology [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(21): 319–324.

[2] 贺伦英, 曾仁侠. 高锰酸钾对柑桔果实保鲜作用的研究[J]. 中国包装工业, 2000(11): 33–35.
HE LY, ZENG RX. Research on the preservation effect of potassium permanganate on citrus fruits [J]. China Packaging Industry, 2000(11): 33–35.

[3] 梁燕. 高锰酸钾和次氯酸钙对桃保鲜效果的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
LIANG Y. Research on the preservation effect of potassium permanganate and calcium hypochlorite on peach [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2018.

[4] 郝浩然, 刘思含, 周宏胜, 等. 1-MCP结合ClO_2处理对水蜜桃保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 1–9.
HAO HR, LIU SH, ZHOU HS, *et al*. Influence of 1-MC combined with ClO_2 treatment on the preservation effect of water peach [J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 1–9.

[5] 袁芳, 黎文卓, 王春艳, 等. 1-MCP 与 MT 联合处理对芒果保鲜效果的影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(9): 219–225.
YUAN F, LI WZ, WANG CY, *et al*. The effect of 1-MCP and combined treatment on the preservation of mango [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(9): 219–225.

[6] 李自芹, 李文绮, 王纪文, 等. 1-MCP 协同冷库处理对克瑞森葡萄保鲜效果的影响[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(5): 17–22.
LI ZQ, LI WQ, WANG JW, *et al*. Effect of 1-MCP and cold storage on the preservation of crimson seedless grapes [J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(5): 17–22.

[7] 李浩鑫. 化学保鲜剂在果蔬保鲜方面的应用研究[J]. 中国食品, 2025(2): 104–106.
LI HX. Research on the application of chemical preservatives in fruit and vegetable preservation [J]. China Food, 2025(2): 104–106.

[8] 王思滢, 寇莉萍, 蔚江涛, 等. 1-MCP 处理对冬枣低温贮藏期间品质变化的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(22): 64–70.
WANG SY, KOU LP, YU JT, *et al*. Effect of 1-MCP Treatment on quality of winter jujube during low-temperature storage [J]. Food Research and Development, 2021, 42(22): 64–70.

[9] 罗红, 李丹, 程慧蓉, 等. 气调保鲜盒和1-甲基环丙烯处理对鲜莲子贮藏品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(12): 184–191.
LUO H, LI D, CHEN HR, *et al*. Effects of modified atmosphere packaging and 1-methylcyclopropene treatment on the storage quality of fresh lotus seeds [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(12): 184–191.

[10] 崔鑫之. 微孔气调包装的设计及在冬枣保鲜上的应用[D]. 烟台: 鲁东大学, 2024.
CUI XZ. Design of microporous modified atmosphere packaging and its application in preserving winter jujube [D]. Yantai: Ludong University, 2024.

[11] 张晓荣, 于仁宗, 王群霞, 等. 冬枣保鲜药剂的筛选[J]. 清远职业技术学院学报, 2016, 9(1): 48–52.
ZHANG XR, YU RZ, WANG QX, *et al*. Selection of preservation agents for winter jujubes [J]. Journal of Qingyuan Vocational and Technical College, 2016, 9(1): 48–52.

[12] 曲文峰. 低温等离子体对冬枣冷杀菌保鲜效能及活性氧代谢和衰老软化的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
QU WF. Effects of low-temperature plasma on cold sterilization and preservation of winter jujube, and its impact on reactive oxygen metabolism and senescence softening [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.

[13] 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 JK, JIANG WB, ZHAO YM. Postharvest physiological and biochemical experiment guide for fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.

[14] SHAN TM, JIN P, ZHANG Y, *et al*. Exogenous glycine betaine treatment enhances chilling tolerance of peach fruit during cold storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 114: 104–110.

[15] 林青, 周聪, 李学进, 等. 马齿苋提取物对鲜切苹果褐变的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(6): 108–114.
LIN Q, ZHOU C, LI XJ, *et al*. The effect of *Portulaca oleracea* extract on browning of fresh-cut apples [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(6): 108–114.

[16] JULIEN HM, VIVIEN NG, BRICE TL, *et al*. Nutrient composition, antioxidant components and ascorbic acid content response of pepper fruit (*Capsicum annuum* L.) cultivars grown under salt stress [J]. OALib, 2021, 8(3): 1–20.

[17] 孙金金. 杨桃冷藏保鲜及冷激处理技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
SUN JJ. Research on cold storage preservation and cold shock treatment technology of starfruit [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.

[18] 张华. 1-MCP 处理对杨桃果实贮藏品质和软化衰老生理的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
ZHANG H. Effects of 1-MCP treatment on the storage quality and physiological softening and senescence of starfruit [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.

[19] 李圆圆, 罗安伟, 苏苗, 等. 采前氯吡苯脲处理对采后'秦美'猕猴桃细胞超微结构的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 273–278.
LI YY, LUO ANW, SU M, *et al*. Effects of pre-harvest chlorpyrifos treatment on the ultrastructure of 'Qinmei' kiwifruit cells after harvest [J]. Food Science, 2019, 40(3): 273–278.

[20] 王淑琴, 颜廷才, 李江阔. 减压贮藏对朝阳大平顶枣衰老软化影响的研究[J]. 食品科技, 2010, 35(10): 60–65.
WANG SQ, YAN TC, LI JK. Study on the effects of pressure-reducing storage on senescence and softening of Chaoyang Dapingding jujube [J].

Food Science and Technology, 2010, 35(10): 60–65.

[21] 戚英伟, 姜永华, 陈于陇, 等. 1-MCP 对百香果乙烯合成和细胞壁降解及相关基因表达的影响[J]. 食品科学技术学报, 2025, 43(1): 96–105.
QI YW, JIANG YH, CHEN YL, *et al*. Effects of 1-MCP on ethylene synthesis, cell wall degradation, and related gene expression in passion fruit [J]. Journal of Food Science and Technology, 2025, 43(1): 96–105.

[22] 李露露. 生物复合缓释抑菌凝胶对甘薯匍枝根霉抑制作用效果研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2024.
LI LL. Study on the inhibitory effect of bio-composite sustained-release antibacterial gel on sweet potato rhizopus rot [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024.

[23] 王傲然. 2,3-丁二酮对采后苹果果实贮藏品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
WANG AOR. Effect of 2,3-butanedione on the storage quality of postharvest apples [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024.

[24] 李君兰, 马勇, 康慧仁, 等. 热空气处理对冷藏鲜枣衰老软化及相关酶活性的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(3): 237–243, 236.
LI JL, MA Y, KANG HR, *et al*. Effects of hot air treatment on aging softening and related enzyme activities of refrigerated fresh jujubes [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(3): 237–243, 236.

[25] 张桂霞, 王英超, 王瑞. 柿果软化过程中丙二醛含量变化的研究[J]. 天津农学院学报, 2007(2): 27–29.
ZHANG GX, WANG YC, WANG R. Study on the changes of malondialdehyde content during persimmon fruit softening [J]. Journal of Tianjin Agricultural College, 2007(2): 27–29.

[26] YU Y, GUO WB, LIU YX, *et al*. Effect of composite coating treatment and low-temperature storage on the quality and antioxidant capacity of Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* cv. Junzao) [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 288: 110372.

[27] 白雪蓉, 李雅玲, 郑贺云, 等. 冷激处理对库尔勒香梨贮藏品质的影响[J]. 中国果菜, 2023, 43(11): 3–9.
BAI XR, LI YL, ZHENG HY, *et al*. Effects of cold shock treatment on the storage quality of Korla fragrant pears [J]. China Fruits & Vegetables, 2023, 43(11): 3–9.

[28] 李政红, 张玉星, 葛会波. 梨果实提取物的体外抗氧化活性[J]. 食品科技, 2018, 43(7): 193–197.
LI ZH, ZHANG YX, GE HB. *In vitro* antioxidant activity of pear fruit extracts [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(7): 193–197.

[29] 何靖柳, 刘继, 黄彭, 等. 几种保鲜处理对贮藏期间'红阳'猕猴桃抗氧化生理特性变化的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(21): 341–345, 350.
HE JL, LIU J, HUANG P, *et al*. Effects of several preservation treatments on changes in antioxidant physiological characteristics of 'Hongyang' kiwifruit during storage [J]. Food Industry Technology, 2014, 35(21): 341–345, 350.

[30] DONG SS, MA YF, LI YF, *et al*. Effect of dielectric barrier discharge (DBD) plasma on the activity and structural changes of horseradish peroxidase [J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2021, 13(3): 92–101.

[31] 李娜, 陆海. 植物抗坏血酸过氧化物酶基因家族研究进展[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2011, 30(2): 97–101
LI N, LU H. Research progress on the plant ascorbate peroxidase gene family [J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2011, 30(2): 97–101

(责任编辑: 安香玉　蔡世佳)