

1-甲基环丙烯和乙烯吸收剂对小白杏风味及贮藏品质的影响

代仁昶^{1,2,3}, 支益^{2,3}, 申迪², 潘艳芳², 李国镇⁴, 胡敏⁴, 宋方圆^{3*}, 夏伊宁^{1,2*}

(1.青岛农业大学 食品科学与工程学院, 山东 青岛 266000; 2.中国农业科学院西部农业研究中心, 新疆 昌吉 831100; 3.新疆农垦科学院农产品加工研究所, 新疆 石河子 832000; 4.宁波爱博瑞斯环保科技有限公司, 浙江 奉化 315500)

摘要: 目的 研究 1-甲基环丙烯 (1-Methylcyclopropene, 1-MCP) 和乙烯吸收剂 (Ethylene Absorbents, EA) 处理对小白杏采后贮藏品质的影响。方法 以小白杏为试材, 无处理作为对照 (CK), 研究 1-MCP、EA 和 1-MCP+EA 处理对小白杏冷藏 (0 °C±0.5 °C、相对湿度 80%~90%) 期间果实的气味、滋味、可溶性固形物、可滴定酸、色泽、硬度、呼吸强度、乙烯释放量、相对电导率、质量损失率、抗坏血酸和总酚含量的影响。结果 相比 1-MCP 和 EA 单独处理, 1-MCP+EA 处理可有效延缓果实硬度、抗坏血酸和总酚含量的下降, 以及可溶性固形物与可滴定酸的积累和转化, 同时抑制果实呼吸强度、乙烯释放量和质量损失率的上升, 在冷藏 21~35 d 时显著延缓气味和滋味的劣变。结论 1-MCP+EA 处理在小白杏采后保鲜上效果突出, 有效维持了果实风味和品质, 在水果保鲜方面展现出广阔的市场应用前景。

关键词: 小白杏; 1-甲基环丙烯; 乙烯吸收剂; 风味; 贮藏品质

中图分类号: TB484

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)09-0122-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.09.014

Effects of 1-Methylcyclopropene and Ethylene Absorbents on the Flavor and Storage Quality of *Prunus armeniaca* L.

DAI Renchang^{1,2,3}, ZHI Yi^{2,3}, SHEN Di², PAN Yanfang², LI Guozhen⁴, HU Min⁴,
SONG Fangyuan^{3*}, XIA Yining^{1,2*}

(1. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Shandong Qingdao 266000, China;

2. Western China Agricultural Research Center, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinjiang Changji 831100,

China; 3. Institute of Agricultural Product Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences,

Xinjiang Shihezi 832000, China; 4. Ningbo Aiboer Environmental Protection Technology Co., Ltd.,

Zhejiang Fenghua 315500, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of 1-Methylcyclopropene (1-MCP) and ethylene absorbents (EA) on the postharvest storage quality of *Prunus armeniaca* L.. *Prunus armeniaca* L. was used as the test material and untreated one was used as the control (CK). The effects of 1-MCP, EA and 1-MCP+EA treatments on the odor, taste, soluble solid, titrable acid, color, hardness, respiratory intensity, ethylene release, relative conductivity, weight loss, ascorbic acid and total phenol contents of *Prunus armeniaca* L. during cold storage (0 °C±0.5 °C, relative humidity 80%-90%) were studied. Compared with 1-MCP and EA alone, 1-MCP+EA treatment could effectively delay the decline of fruit hardness, ascorbic acid and total phenol content, as well as the accumulation and transformation of soluble solid and titrable acid, inhibit the

收稿日期: 2025-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFE0107200); “庭州英才”人才计划庭州科技创新团队 (2023CT02); 中国农业科学院科技创新工程

*通信作者

increase of respiratory intensity, ethylene release and weight loss rate, and significantly delay the odor and taste deterioration after 21-35 days of cold storage. 1-MCP+EA treatment has an outstanding effect on postharvest preservation, which can effectively maintain fruit flavor and quality, and has a broad market application prospect in fruit preservation.

KEY WORDS: *Prunus armeniaca* L.; 1-Methylcyclopropene; ethylene absorbents; flavor; storage quality

小白杏 (*Prunus armeniaca* L.) 为蔷薇科杏属植物, 是一种具有独特风味和高营养价值的水果, 主要生长在“中国白杏之乡”轮台县, 是新疆著名优质特色水果之一^[1]。其果实呈卵形, 色泽浅黄透明, 口感绵甜清爽, 因具有高含糖量、低含酸量、风味浓郁、汁液丰富以及口感鲜美的特点, 被认为是理想的鲜食水果^[2]。小白杏属于呼吸跃变型果实, 集中在 6—7 月的高温时期成熟, 果实采收后迅速进入后熟阶段, 极易发生软化、腐烂和变质, 这不仅会降低其市场价值, 也限制了市场流通, 造成巨大的经济损失^[3]。因此, 亟需开发高效的小白杏采后贮藏保鲜技术, 这对于提升其商业价值和满足消费者需求具有重要的现实意义。

1-甲基环丙烯 (1-Methylcyclopropene, 1-MCP) 是一种高效的乙烯抑制剂, 它通过与乙烯受体结合阻断乙烯信号传导通路, 减缓乙烯诱导的果实后熟软化, 延长保质期^[4]。谢绍忠等^[5]发现 1.0 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 处理可显著抑制小白杏贮藏期间的乙烯释放量, 保持果实硬度, 延长货架期; 李敏等^[6]发现 1-MCP 既可增强果实的耐贮运特性, 又能使催熟后的香蕉果实正常软化与转色, 保持良好的食用品质。因此, 本研究采用浓度为 1.0 $\mu\text{L/L}$ 的 1-MCP 对小白杏进行熏蒸处理。乙烯吸收剂 (Ethylene Absorbents, EA) 是一种能够通过物理或化学方式吸收乙烯分子的材料, 可减少空气中的乙烯浓度, 有效降低果蔬的呼吸速率, 从而显著延长果蔬的货架寿命。邹曼等^[7]研究发现 EA 处理可降低秋洋梨的腐烂率, 并延缓可滴定酸含量的下降, 进一步提升果实的贮藏品质。国内外的研究表明, 在黄桃^[8]、李子^[9]、蓝莓^[10]和香蕉^[11]等水果上结合使用 1-MCP 和 EA, 具有显著去除乙烯、延缓成熟的作用。关于 1-MCP 和 EA 对小白杏采后冷藏品质影响的研究鲜见报道, 本研究旨在评估 EA、1-MCP 和 1-MCP+EA 3 种处理方式对小白杏采后冷藏期间风味及品质的影响, 研究结果将为小白杏的采后保鲜技术提供科学依据, 有助于研发更高效的贮藏保鲜技术, 以减少小白杏的采后损失, 进一步提升其市场竞争力和经济价值。

1 实验

1.1 材料与试剂

主要材料: 小白杏在 2024 年 6 月 20 日采摘于新疆轮台县阳霞镇, 选取七八成熟、无病虫害、无机械损伤的果实, 戴手套无伤采收; 聚乙烯 (PE) 袋规格

为 400 mm×600 mm×0.03 mm, 购自青岛云汇生物科技有限公司。

主要试剂: 无水乙醇 (体积分数为 99.5%), 分析纯, 购自上海麦克林生化科技股份有限公司; 抗坏血酸含量试剂盒, 分析纯, 购自苏州格锐思生物科技有限公司; 植物总酚含量检测试剂盒, 分析纯, 购自北京索莱宝科技有限公司; 1-MCP, 购自山东奥维特生物科技有限公司; EA, 购自宁波爱博瑞斯环保科技有限公司, 采用 Ag/ZSM-5 分子筛纳米催化材料, 通过分子筛吸附空气中的乙烯, 乙烯与分子筛中的纳米银催化剂反应生成二氧化碳和水^[12]。

1.2 仪器

主要仪器: LS175 色差仪, 深圳市林上科技有限公司; GY-4 数显水果硬度计, 乐清市艾德堡仪器有限公司; PEN3 电子鼻, 德国 AIRSENSE 公司; ASTREE 电子舌, 法国 Alpha M.O.S. 公司; JJ-2B 组织捣碎匀浆机, 常州金坛精达仪器制造有限公司; PAL-BX/ACID F5 糖酸度一体机, 广州市爱宕科学仪器有限公司; F950 型便携气体分析仪, 美国 Felix Instruments 公司; BSA224S 型电子天平, 赛多利斯科学仪器 (北京) 有限公司; 雷磁 DDS-11 电导率仪, 上海仪电科学仪器股份有限公司; H1650K 高速离心机, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; Infinite F50 酶标仪, 帝肯奥地利有限公司; 770S 紫外可见分光光度计, 上海悦丰仪器仪表有限公司; B250 恒温水浴锅, 上海予卓仪器有限公司。

1.3 样品处理

将每颗小白杏单独套上 PE 发泡网并放入套有 PE 保鲜袋的塑料框, 上下层各放一张吸水纸, 每框放 2 kg 果实。采样完成后, 在产地入冷库敞口预冷至果心温度为 0 $^{\circ}\text{C}$, 然后采取以下 4 种处理方式: 对照组 (CK), 不做处理; EA 处理组, 在每筐果实中放入一袋 EA (2 g/袋); 1-MCP 处理组, 在 1 m^3 的大帐内用 1 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 密闭熏蒸 12 h; 1-MCP+EA 处理组, 1 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 熏蒸处理后, 在每筐果实中放入一袋 EA (2 g/袋), 所有组处理后用 PE 保鲜袋封口贮藏。产地处理完成后, 采用蓄冷方式 (<4 $^{\circ}\text{C}$) 将小白杏运送至新疆农垦科学院农产品加工研究所, 贮藏的冰温库 (0 $^{\circ}\text{C}\pm 0.5$ $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 80%~90%), 并于第 0、7、14、21、28、35、42 和 49 天测定小白杏的风味及贮藏品质。

1.3.1 电子鼻与电子舌测定

参考 Xiong 等^[13]的方法,使用 PEN3 电子鼻分析小白杏的气味并进行修改。将 10 g 切碎的小白杏样品置于 40 mL 顶空瓶中密封,30 min 后对顶空气体进行采样,并在电子鼻中分析。进样流速为 600 mL/min,空气净化时间为 180 s,测量时间为 60 s,数据分析采用第 54~56 秒稳定的相对电导率。

使用 ASTREE 电子舌测定小白杏的滋味。取 3 g 研磨后的样品加入 20 mL 超纯水振荡 15 min,在 4 °C 下 10 000 r 离心 20 min 收集上清液,过 0.22 μm 滤膜后定容至 100 mL。传感器探头于稀释液中工作 120 s,传感器读数为 1 次/s,取 100~120 s 的响应值。2 次测试之间需使用蒸馏水清洗探头,以避免测量误差。

1.3.2 可溶性固形物与可滴定酸含量测定

每组取 10 颗小白杏果实,将每颗果实去核匀浆后过滤,取 1 mL 滤液,采用 PAL-BX/ACID F5 糖酸度一体机进行测定。重复测定 3 次,取平均值。

1.3.3 色泽测定

采用 LS175 色差仪测定小白杏的色泽。每个处理组随机挑选 15 颗果实,检测每颗果实的 3 个不同位置,且每个位置重复测量 3 次,并记录 L^* 、 a^* 、 b^* 。

1.3.4 硬度测定

参考 Pan 等^[9]的方法,使用探头直径为 2 mm 的 GY-4 数显水果硬度计,在每个小白杏赤道位置上取去皮的 3 个点进行测量,3 个点等距,每组处理测定 10 个果实。

1.3.5 果实呼吸强度和乙烯释放量测定

呼吸强度参考曹建康等^[14]的方法并稍加修改。在容积为 1 500 mL 的呼吸室中放入约 500 g 小白杏,室温下静置 2 h 后用 F950 型便携气体分析仪测定乙烯释放量和呼吸强度。

1.3.6 相对电导率测定

参考吕小华等^[15]的方法测定果实的相对电导率。每组实验重复测定 3 次,取平均值。

1.3.7 质量损失率测定

参考 Lyu 等^[16]的方法,采用称重法测定小白杏的质量损失情况,每个处理组随机选择 20 颗果实,每隔 7 d 称量 1 次,实验结果为 3 次平行测定的平均值。采用差重法计算质量损失率,见式(1)。

$$L = \frac{m - m_1}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中: L 为质量损失率; m 为初始质量, g; m_1 为贮后质量, g。

1.3.8 抗坏血酸(ASA)含量测定

抗坏血酸含量参考试剂盒说明书和 Hu 等^[17]的紫外分光光度法测定。实验结果为 3 次平行测定的平均

值,计算见式(2)。

$$A_{\text{ASA}} = 10 \times \frac{(A_1 - A_2) / (\Delta A_1 - A_2)}{W} \times D \quad (2)$$

式中: A_{ASA} 为样品中抗坏血酸含量, mg/100 g; A_1 为样本测定数值; A_2 为空白测定数值; ΔA_1 为标准液测定数值; W 为样品质量, g; D 为稀释倍数,取 10。

1.3.9 总酚含量测定

参考植物总酚含量检测试剂盒说明书和张旭东等^[18]的微量法测定总酚含量。实验结果为 3 次平行测定的平均值,计算见式(3)。

$$A_{\text{TP}} = \frac{X \times V}{W} \quad (3)$$

式中: A_{TP} 为样品总酚含量, mg/g; X 为样本质量浓度, mg/mL; V 为加入提取液体积,取 2.5 mL。

1.4 数据处理

使用 Excel 2019 进行数据计算统计;采用 SPSS27.0 进行数据统计分析, $P < 0.05$ 表示差异显著;采用 Origin 2024 软件进行主成分分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理方式对小白杏贮藏期间气味和滋味的影响

电子鼻是一种模拟人类嗅觉系统的分析仪器,采用无损检测方法,具有操作简单、快速高效等特点^[13],其主要聚类分析方法为主成分分析法(Principal Components Analysis, PCA)。PCA 将 10 个传感器输出的原始数据通过算法降维成 2 个新的指标:主成分 1 (PC1) 和主成分 2 (PC2),二者无信息交叉,且指标无量纲。由图 1 可知,PC1 贡献率为 71.7%,PC2 贡献率为 19.0%,总贡献率为 90.7%, >85%,表明通过

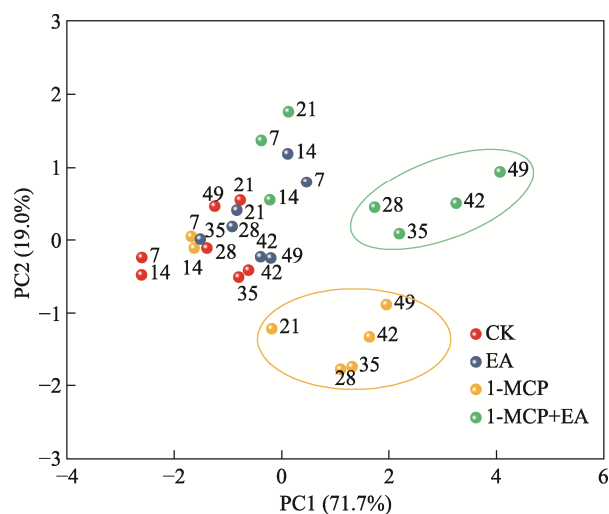


图 1 不同处理方式下小白杏气味的变化
Fig.1 Changes in the odor of *Prunus armeniaca* L. under different treatments

PCA 得到的电子鼻数据几乎代表所有获得的气味信息。处理组和 CK 组的数据点在贮藏初期 (0~14 d) 大部分为聚集状态, 表明果实气味变化较小。EA 处理组的数据点在整个贮藏期间集中分布, 其变化趋势与 CK 组基本一致。1-MCP 处理组的数据点在 21~49 d 时与贮藏前期明显分离; 1-MCP+EA 处理组的数据点在 28~49 d 时与贮藏前期明显分离。以上结果表明, 1-MCP 和 1-MCP+EA 处理组对小白杏气味的影响主要发生在贮藏中后期, 这是由于 1-MCP 通

过抑制乙烯与受体结合来阻断乙烯信号传导, 延缓果实成熟衰老过程中醛类、酮类和醇类等气味成分的代谢变化^[19]; EA 可进一步吸收空气中的游离乙烯, 降低果实周围环境中的乙烯浓度, 形成内外双重抑制机制, 进一步减缓果实气味品质的劣变速度^[20]。

电子舌作为客观的检测工具, 可以减少人为因素的干扰, 更好地判断小白杏滋味的变化情况。如图 2 所示, 在 14 d 时甜度味觉值与酸度味觉值出现显著变化, 变化趋势为 CK>EA>1-MCP>1-MCP+EA,

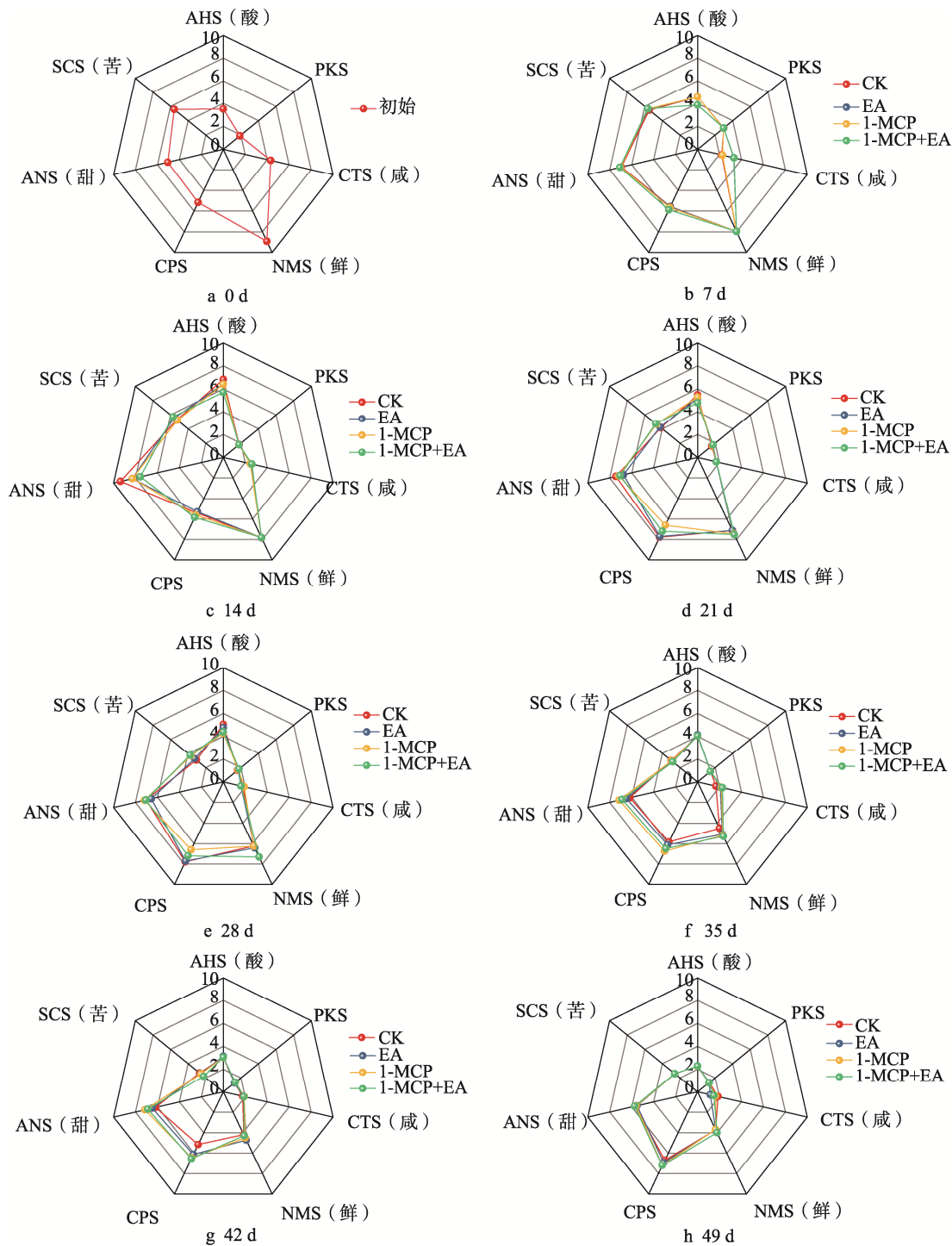


图 2 不同处理方式下小白杏滋味的变化
Fig.2 Changes in the taste of *Prunus armeniaca* L. under different treatments

主要原因是水果成熟度的增加导致可溶性糖和有机酸含量动态变化,这与张鹏等^[21]的研究结果类似,其研究表明 1-MCP 结合乙烯吸收剂会影响软枣猕猴桃的贮藏品质。鲜度味觉值在整个贮藏过程中呈现递减趋势,在贮藏 21~35 d 时,1-MCP+EA 处理组的鲜度味觉值显著高于 CK 组 ($P<0.05$),表明该处理能有效延缓氨基酸、核苷酸等营养成分的降解,维持果实的新鲜口感^[21]。在 35 d 时,1-MCP+EA 处理组的甜度味觉值为 6.50,高于 CK 组的 5.85 和 EA 处理组的 6.12,略低于 1-MCP 处理组的 6.75。此外,1-MCP+EA 处理组在鲜度味觉值上表现最佳,为 6.69,显著高于其他处理组 ($P<0.05$)。在 49 d 时,各处理组的酸度、甜度和鲜度的味觉值基本趋于一致,差异不再显著。这表明随着贮藏周期接近自然极限,果实的生理变化已逐渐变缓,不同保鲜处理的调控效果逐渐减弱,难以显著改变果实的味觉参数。通过综合对比各组数据可以得出以下结论:1-MCP+EA 处理组在贮藏中后期(21~35 d)可显著延缓气味和滋味的劣变,表现出较强的协同保鲜作用,有助于维持小白杏的整体风味品质。

2.2 不同处理方式对小白杏贮藏期间可溶性固形物的影响

可溶性固形物含量是反映果实成熟度的重要指标,也是决定果实口感的关键因素。如图 3 所示,在 0~14 d 的贮藏初期,可溶性固形物含量逐渐上升,这是由于贮藏初期果实内部发生生理代谢,如糖代谢相关酶的活性变化,可以促进糖的积累,使果实继续成熟;在第 14 天,果实可溶性固形物含量达到峰值,CK 组、EA、1-MCP 和 1-MCP+EA 处理组的可溶性固形物质量分数分别为 18.25%、17.18%、16.83%和 16.75%,由此可知处理组可以减弱小白杏的生理活动,延缓糖分的积累和转化。在贮藏中后期,随着果实呼吸作用持续进行,可溶性固形物被分解为二氧化碳和水,导致其含量不断下降^[22]。在第 49 天,各组间的可溶性固形物差异不再显著,这可能是由于果实内部的生理代谢活动趋于稳定,糖分的积累与消耗达到动态平衡状态。

2.3 不同处理方式对小白杏贮藏期间可滴定酸含量的影响

如图 4 所示,小白杏果实的可滴定酸含量呈先上升后下降的趋势,这是由于贮藏过程中果实的呼吸作用持续进行,会产生一些有机酸作为代谢产物,从而使可滴定酸含量逐渐升高;在贮藏 28 d 后,多酚氧化酶、脂氧合酶等酶类的活性增强,促进有机酸的转化或分解,降低了可滴定酸的总量^[23]。在第 14 天,果实可滴定酸含量达到峰值,CK 组、EA、1-MCP 和 1-MCP+EA 处理组的可滴定酸质量分数分别为

2.53%、2.18%、2.15%和 2.05%。在整个贮藏期内,1-MCP+EA 处理组的曲线相对平缓,且可滴定酸含量比其他各组稳定。由此可知,不同的处理方式对小白杏贮藏期间可滴定酸含量的影响存在差异,其中 1-MCP+EA 处理表现最为突出。

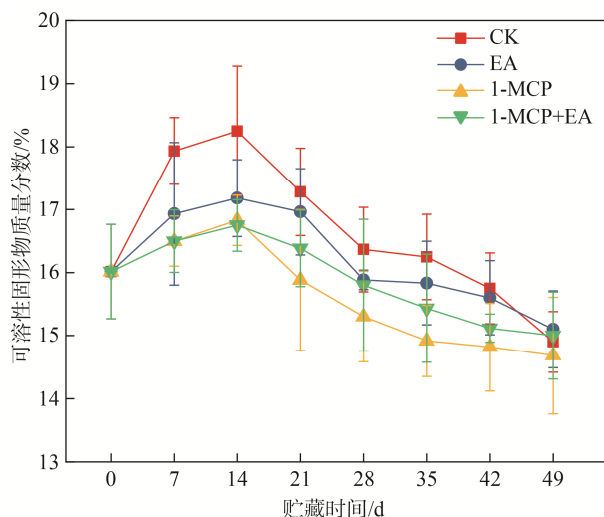


图3 不同处理方式下小白杏可溶性固形物含量的变化
Fig.3 Changes in soluble solids content of *Prunus armeniaca* L. under different treatments

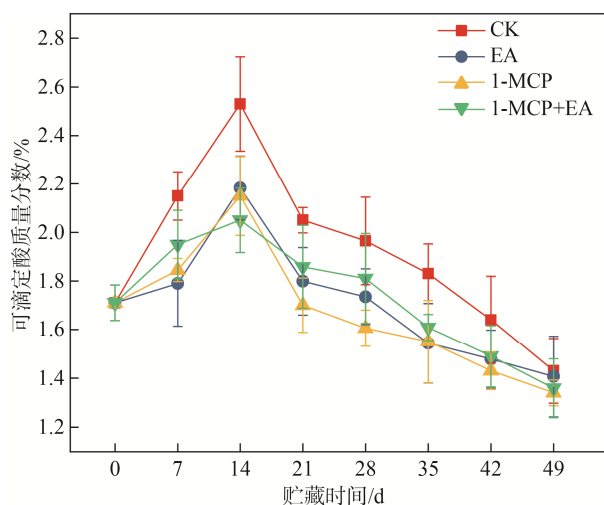


图4 不同处理方式下小白杏可滴定酸含量的变化
Fig.4 Changes in titratable acid content of *Prunus armeniaca* L. under different treatments

2.4 不同处理方式对小白杏贮藏期间色泽的影响

色泽是评估水果品质的核心感官指标,直接反映果实的成熟度及外观品质。果实色泽通过 L^* 、 a^* 和 b^* 表示,其中 L^* 代表亮度, a^* 代表红绿度, b^* 代表黄蓝度^[24]。如图 5a 所示,贮藏期间 CK 组与处理组的 L^* 均呈先上升后下降的变化趋势,且 1-MCP+EA 处理组在整个贮藏期间的 L^* 始终高于 CK 组。在贮藏第

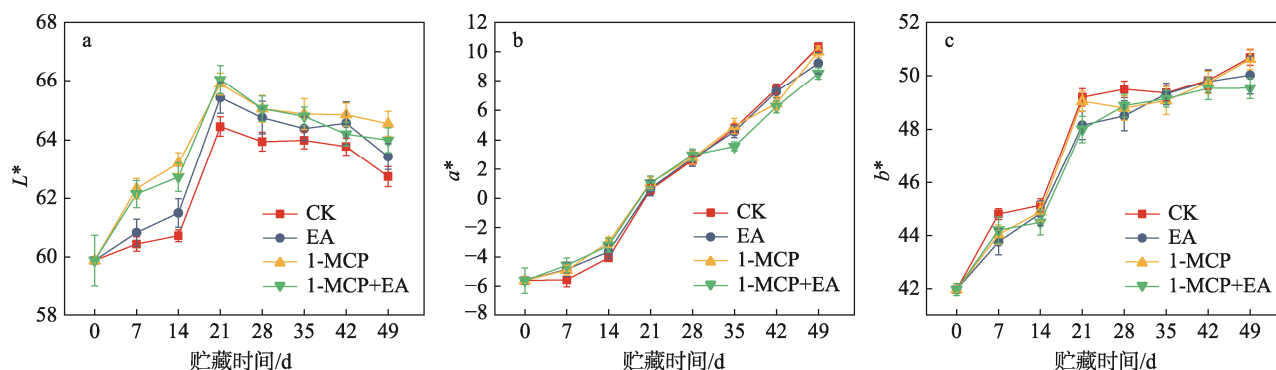


图 5 不同处理方式下小白杏 L^* (a)、 a^* (b) 和 b^* (c) 值的变化
Fig.5 Changes in L^* (a), a^* (b) and b^* (c) values of *Prunus armeniaca* L. under different treatments

21 天, CK 组、EA、1-MCP 和 1-MCP+EA 处理组的 L^* 分别为 64.5、65.4、65.9 和 66.1, 且 1-MCP+EA 处理组的 L^* 显著高于 CK 组 ($P<0.05$), 展现出其在增强果实亮度方面的显著效果。如图 5b 所示, a^* 随着贮藏时间延长逐渐上升, 在贮藏 14 d 开始快速上升, 表明果实颜色转变进入加速阶段。在 35 d 后, 各处理组之间的 a^* 开始出现显著差异, 表明不同处理对果实颜色变化的影响逐渐显现。在第 49 天, 1-MCP+EA 处理组的 a^* 最低, 为 8.5, 表明 1-MCP+EA 处理能更好地延缓果实颜色变化, 保持外观特征。如图 5c 所示, 贮藏 35~49 d 时, 1-MCP+EA 处理组的 b^* 显著低于 CK 组、EA 和 1-MCP 处理组 ($P<0.05$), 这与 Wang 等^[25]的研究结果类似, 其研究表明 1-MCP 和乙烯吸收剂可有效延缓‘新梨 7 号’的色泽变化, 进而证明 1-MCP+EA 处理可以有效延缓果实颜色变化, 保持更好的贮藏品质。

2.5 不同处理方式对小白杏贮藏期间硬度的影响

果实的硬度是反映其成熟度与品质的重要指标, 直接关系着果实的采后贮藏与市场价值。如图 6 所示, 小白杏果实采摘时硬度约为 11.5 N, 随着贮藏时间的延长, 各处理组硬度均呈下降趋势, 这是由贮藏过程中果实后熟、果胶和纤维素等细胞壁成分降解引起的软化效应^[26]。在贮藏前 21 d, CK 组硬度快速降低, 而其余 3 组经保鲜处理后的果实硬度下降幅度明显较小, 表明处理组可以抑制果实软化, 维持较高硬度。在第 49 天, CK 组、EA、1-MCP 和 1-MCP+EA 处理组果实硬度相较于采摘时分别下降 65.62%、47.95%、39.43% 和 34.02%, 且 1-MCP+EA 处理组硬度显著高于其他组 ($P<0.05$), 充分证明 1-MCP+EA 处理能更有效地保持果实硬度, 减缓果实软化, 延长贮藏时间。本研究结果与曹森等^[26]的研究结论相吻合, 其研究表明乙烯吸收剂耦合 1-MCP 可有效延缓猕猴桃果实硬度下降, 进一步证实 1-MCP 结合 EA 的处理方式在维持采后果实硬度、延缓软化进程及提升贮藏品质方面具有显著效果。

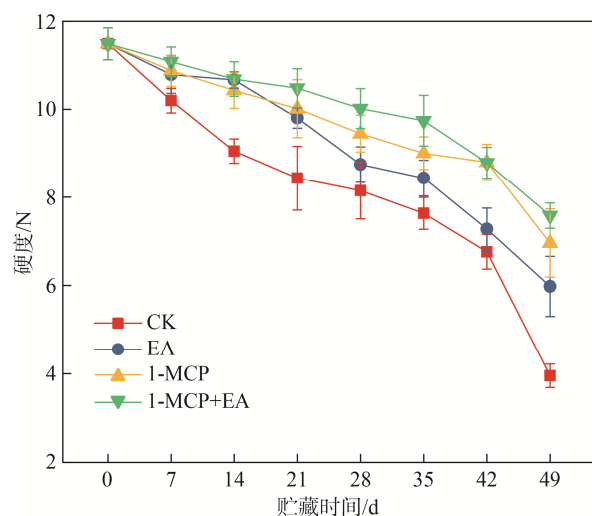


图 6 不同处理方式下小白杏硬度的变化
Fig.6 Changes in the hardness of *Prunus armeniaca* L. under different treatments

2.6 不同处理方式对小白杏贮藏期间呼吸强度的影响

小白杏作为呼吸跃变型水果, 在贮藏过程中, 其呼吸活动的变化能够揭示生理代谢的变化。不同的处理方式会影响果实的呼吸强度, 进而影响营养物质的消耗程度。如图 7 所示, 在第 7 天, 各处理组都出现了呼吸高峰, 但 EA、1-MCP 和 1-MCP+EA 处理组的峰值比 CK 组分别低 10.62%、20.70% 和 16.04%, 且具有显著差异 ($P<0.05$), 表明这些处理可有效抑制果实的呼吸强度。在贮藏第 21 天和第 35 天, 各处理组又出现了呼吸小高峰, 这可能是由于果实在经历一段时间的贮藏后, 其内部的生理活动持续变化, 导致呼吸强度再次上升。这种现象在果蔬贮藏过程中并不罕见, 通常与果实内部的酶活性变化、呼吸作用的暂时增强有关^[27]。在第 49 天, 1-MCP+EA 处理组呼吸强度比 CK 组低 14.90% ($P<0.05$), 表明 1-MCP+EA 处理可以有效抑制果实的呼吸强度, 延缓衰老进程。

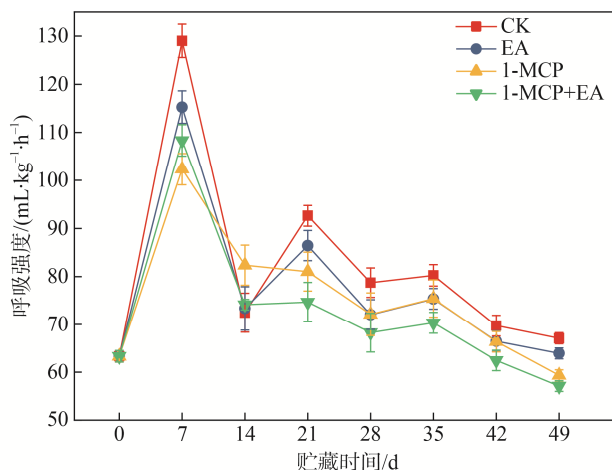


图7 不同处理方式下小白杏呼吸强度的变化
Fig.7 Changes in the respiration intensity of *Prunus armeniaca* L. under different treatments

2.7 不同处理方式对小白杏贮藏期间乙烯释放量的影响

乙烯释放量是指植物在生长、成熟和衰老过程中释放的乙烯气体的量。乙烯是一种植物激素,对植物的生长成熟具有重要作用^[28]。由图8可知,小白杏乙烯释放量和呼吸强度的趋势大体一致,均呈先增长后下降的趋势。在贮藏第7天,CK组和EA处理组出现峰值,分别为5.43和3.88 $\mu\text{L}/(\text{kg}\cdot\text{h})$,而1-MCP和1-MCP+EA处理组在第21天出现峰值,分别为2.73和2.71 $\mu\text{L}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 。在贮藏7~42 d,EA、1-MCP、1-MCP+EA处理组的乙烯释放量始终低于CK组,其中1-MCP+EA处理组乙烯释放量最低。结果表明,1-MCP+EA处理组不仅可以阻断乙烯的信号传导路径,还能直接减少环境中的乙烯浓度,从而显著降低小白杏的乙烯释放量,达到延长货架期和提高贮藏品质的目的。

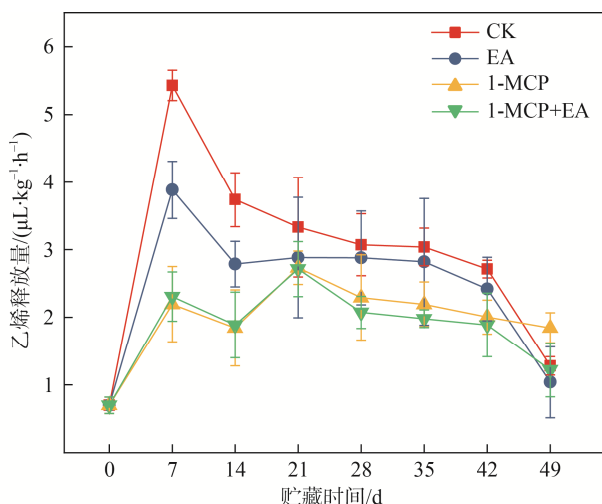


图8 不同处理方式下小白杏乙烯释量的变化
Fig.8 Changes in the ethylene release of *Prunus armeniaca* L. under different treatments

2.8 不同处理方式对小白杏贮藏期间相对电导率变化的影响

相对电导率是衡量果实成熟软化程度的关键指标之一,与细胞膜损伤程度呈正相关。它能够反映果实细胞内外电解质的分布状况,当果实细胞遭遇机械损伤、病虫害或面临其他逆境压力时,细胞膜透性会增加,导致细胞内的电解质渗出,从而使相对电导率升高^[29]。如图9所示,贮藏期间,小白杏的相对电导率持续上升,但各处理组始终低于CK组。在贮藏第7天,CK组的相对电导率为25.5%,而1-MCP+EA处理组在第28天时才达到22.7%。在贮藏第49天,EA和1-MCP处理组的相对电导率较CK组分别低9.74%和17.77% ($P<0.05$),1-MCP+EA处理组的相对电导率比CK组低20.21% ($P<0.05$),差异显著。由此可见,EA、1-MCP及1-MCP+EA处理组均能不同程度保持果实细胞膜的完整性,延缓果实软化进程,其中以1-MCP+EA处理效果最佳。

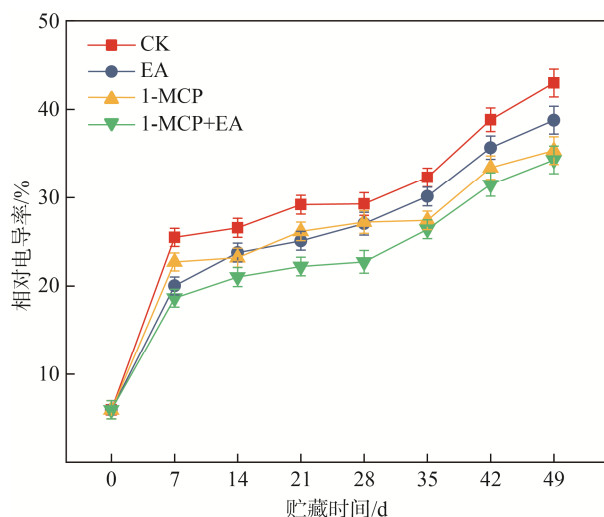


图9 不同处理方式下小白杏相对电导率的变化
Fig.9 Changes in the relative conductivity of *Prunus armeniaca* L. under different treatments

2.9 不同处理方式对小白杏贮藏期间质量损失率的影响

果实在采后贮藏过程中的质量损失率是评估其水分保持能力和贮藏性能的关键指标。质量损失率的变化直接关联到果实的新鲜度、口感以及消费者的接受度^[30]。由图10可知,各处理组的质量损失率随着贮藏时间的延长持续上升,其中CK组呈快速上升趋势。在贮藏第49天,CK组质量损失率为8.49%,而EA、1-MCP和1-MCP+EA处理组的质量损失率分别为6.56%、5.56%和4.63%。由此可见,1-MCP+EA处理方式可以更好地保持小白杏中的水分,降低内部物质的损失,延长货架期。

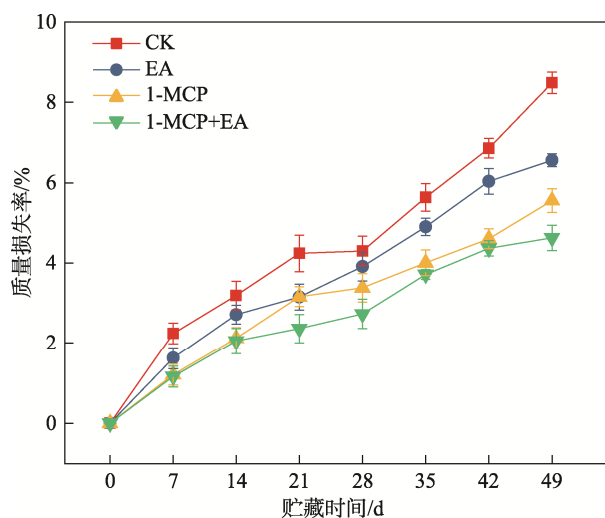


图 10 不同处理方式下小白杏质量损失率的变化
Fig.10 Changes in the weight loss rate of *Prunus armeniaca* L. under different treatments

2.10 不同处理方式对小白杏贮藏期间抗坏血酸含量的影响

抗坏血酸是植物体内一种强大的抗氧化剂,能够清除有害的自由基,保护植物免受氧化应激的伤害^[31]。如图 11 所示,各处理组的抗坏血酸含量在 0~28 d 时迅速下降,在 28~49 d 时下降趋势平缓。这可能是由于在贮藏前中期,果实的生理代谢活动强,导致抗坏血酸快速降解;在贮藏后期,随着果实进一步成熟和衰老,代谢活动速度减慢,抗坏血酸降解速度相应变缓^[32]。在贮藏第 49 天,CK 组、EA、1-MCP 和 1-MCP+EA 处理组抗坏血酸含量分别为 2.90、3.61、3.84 和 4.41 mg/100 g,CK 组抗坏血酸含量显著低于其他处理组 ($P<0.05$),这表明 3 种处理方式都可以延缓果实中抗坏血酸含量的下降。1-MCP+EA 处理组的抗坏血酸含量在 49 d 时

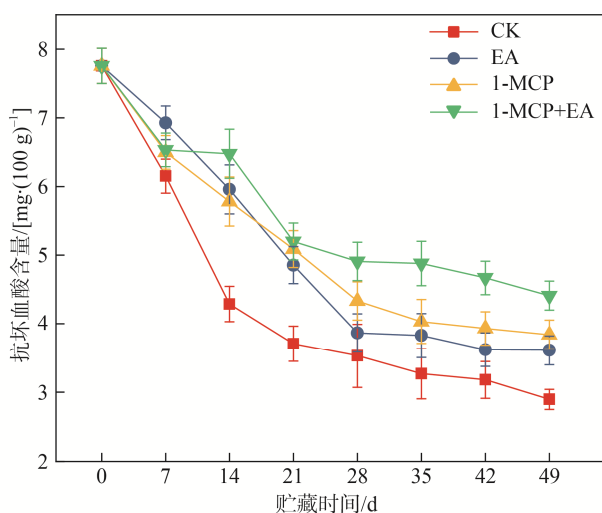


图 11 不同处理方式下小白杏抗坏血酸含量的变化
Fig.11 Changes in the ascorbic acid content of *Prunus armeniaca* L. under different treatments

显著高于 EA 和 1-MCP 处理组 ($P<0.05$),表明 1-MCP+EA 处理方式可以更好地维持小白杏果实抗坏血酸含量,保持较高的抗氧化能力,维持较好的贮藏品质。

2.11 不同处理方式对小白杏贮藏期间总酚含量的影响

小白杏果实中的总酚类化合物是一种重要的次生代谢产物,在果实生长发育过程中发挥着多种作用,能够清除自由基,减少细胞氧化损伤,影响果实色泽、风味和口感等。如图 12 所示,各处理组的果实总酚含量均呈先上升后下降的趋势,这可能是由于在采后贮藏过程中呼吸、后熟等作用导致酚类物质合成,而长期贮藏会加快酚类物质的自然降解^[33]。在贮藏第 14 天,1-MCP+EA 处理组的总酚含量为 19.13 mg/g,显著高于 EA 和 1-MCP 处理组 ($P<0.05$)。随着贮藏时间的延长,总酚含量逐渐下降。在贮藏第 49 天,其他 3 组的总酚含量显著高于 CK 组 ($P<0.05$),且 1-MCP+EA 处理组的总酚含量最高,这表明 1-MCP+EA 处理方式能够有效促进总酚的生成和保留。

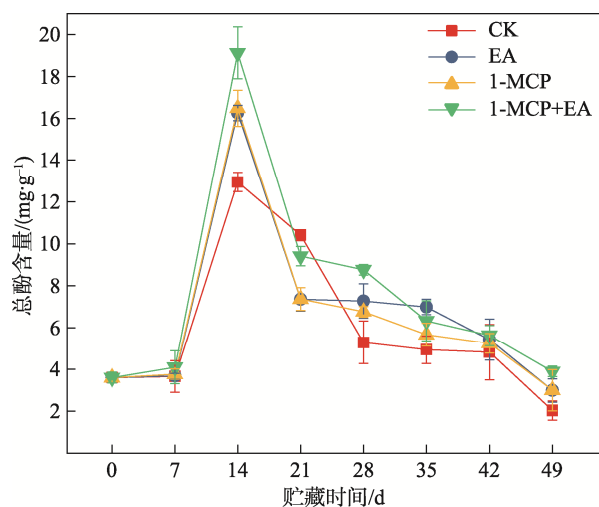


图 12 不同处理下小白杏总酚含量的变化
Fig.12 Changes in the total phenolic content of *Prunus armeniaca* L. under different treatments

3 结语

研究表明,EA、1-MCP 和 1-MCP+EA 这 3 种处理方式在小白杏采后贮藏品质保持上均有正向效果,其中 1-MCP+EA 处理后的保持效果最佳。通过检测气味、滋味、可溶性固形物、可滴定酸、色泽、硬度、呼吸强度、乙烯释放量、相对电导率、质量损失率、抗坏血酸和总酚含量等多个指标发现,1-MCP+EA 处理组在贮藏 21~35 d 时能够显著延缓气味和滋味的劣变,以及可溶性固形物与可滴定酸的积

累和转化,同时延缓小白杏采后冷藏的色泽变化和果实硬度下降,降低呼吸强度和乙烯释放量,控制质量损失率,抑制果实相对电导率的升高及抗坏血酸和总酚含量的下降。EA处理环保安全且可有效吸收乙烯,保持果实品质,而1-MCP处理操作简单、成本较低、保鲜效果好,2种处理方式协同使用具有双重抑制乙烯的作用,可以解决小白杏贮藏过程中软化、腐烂等限制性因素,在小白杏采后贮藏保鲜及品质保持方面具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 王聘. 新疆小白杏果实采后贮藏保鲜的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
WANG P. Study on Postharvest Storage and Fresh-Keeping of Xiaobai Apricot in Xinjiang[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [2] 魏征, 张政, 魏佳, 等. 水杨酸雾化熏蒸对新疆小白杏采后贮藏品质的影响[J]. 现代食品科技, 2020, 36(1): 113-119.
WEI Z, ZHANG Z, WEI J, et al. Effect of Salicylic Acid Atomization Fumigation on Postharvest Storage Quality of Xinjiang Xiaobai Apricot[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(1): 113-119.
- [3] 胡东宇, 黄力平, 高健, 等. 新疆小白杏产业高质量发展对策研究[J]. 中国林业经济, 2021(6): 76-78.
HU D Y, HUANG L P, GAO J, et al. Research on Countermeasures for High-Quality Development of Xinjiang Xiaobai Apricot Industry[J]. China Forestry Economics, 2021(6): 76-78.
- [4] MAQBOOL A, BEIGH M A, HUSSAIN S Z, et al. Effect of 1-MCP and KMnO_4 Treatments with Different Packaging on Quality Preservation of Golden Delicious Apples[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101768.
- [5] 谢绍忠, 钟梅, 吴斌, 等. 1-MCP 对新疆小白杏采后生理和贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2009, 34(3): 60-64.
XIE S Z, ZHONG M, WU B, et al. Effect of 1-Methylcyclopropene on the Postharvest Physiology and Storage Quality of Xinjiang Xiaobai Apricots[J]. Food Science and Technology, 2009, 34(3): 60-64.
- [6] 李敏, 高兆银, 邹冬梅, 等. 1-甲基环丙烯对高温下“南天黄”香蕉品质的影响[J]. 中国南方果树, 2019, 48(6): 34-39.
LI M, GAO Z Y, ZOU D M, et al. Effect of 1-Methylcyclopropene on Fruit Quality of "Nantian-huang" Banana Stored at High Temperature[J]. South China Fruits, 2019, 48(6): 34-39.
- [7] 邹曼, 杨娟侠, 张坤鹏, 等. 不同贮藏温度和保鲜剂对秋洋梨保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(2): 1-6.
ZOU M, YANG J X, ZHANG K P, et al. Effects of Different Storage Temperatures and Preservatives on the Preservation of Autumn Pears[J]. Storage and Processing, 2023, 23(2): 1-6.
- [8] 郭智鑫, 孙畅, 李高阳, 等. 1-MCP 结合乙烯吸附剂处理对黄桃货架期品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(9): 213-223.
GUO Z X, SUN C, LI G Y, et al. Effect of 1-MCP Combined with Ethylene Adsorbent on Shelf-Life Quality of Yellow Peach[J]. Chinese Journal of Food, 2023, 23(9): 213-223.
- [9] PAN H X, WANG R, LI L L, et al. Manipulation of Ripening Progress of Different Plum Cultivars during Shelf Life by Post-Storage Treatments with Ethylene and 1-Methylcyclopropene[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 198: 176-182.
- [10] 张鹏, 赵倩, 贾晓昱, 等. 1-MCP 结合 EA 对蓝靛果贮藏品质及活性氧代谢的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(13): 63-73.
ZHANG P, ZHAO Q, JIA X Y, et al. Effects of 1-MCP Combined with EA on Storage Quality and Active Oxygen Metabolism of Indigo Fruit[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(13): 63-73.
- [11] WANG R, ZHANG L, RAHMAN F U, et al. 1-Methylcyclopropene Combined with Ethylene Absorbent Delays the Ripening of 'Fenjiao' Banana (Musa ABB Pisang Awak)[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 326: 112772.
- [12] YANG H L, MA C Y, LI Y, et al. Synthesis, Characterization and Evaluations of the Ag/ZSM-5 for Ethylene Oxidation at Room Temperature: Investigating the Effect of Water and Deactivation[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 347: 808-818.
- [13] XIONG S G, SUN X S, TIAN M X, et al. 1-Methylcyclopropene Treatment Delays the Softening of Actinidia Arguta Fruit by Reducing Cell Wall Degradation and Modulating Carbohydrate Metabolism[J]. Food Chemistry, 2023, 411: 135485.
- [14] 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: 44-46.
CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Guidance on Postharvest Physiological and Biochemical Experiments of Fruits and Vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 44-46.
- [15] 吕小华, 陈长宝, 尚鹏鹏, 等. 一氧化氮和冷胁迫对桃果实细胞膜脂过氧化的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(2): 8-15.
LYU X H, CHEN C B, SHANG P P, et al. Effects of Nitric Oxide and Cold Stress on Lipid Peroxidation of Peach Fruit Cell Membrane[J]. Storage and Process,

- 2019, 19(2): 8-15.
- [16] LYU Y H, FU A Z, SONG X X, et al. 1-Methylcyclopropene and UV-C Treatment Effect on Storage Quality and Antioxidant Activity of 'Xiaobai' Apricot Fruit[J]. Foods, 2023, 12(6): 1296.
- [17] HU T X, YE J, TAO P W, et al. The Tomato HD-Zip I Transcription Factor SIHZ24 Modulates Ascorbate Accumulation through Positive Regulation of the D-Mannose/L-Galactose Pathway[J]. The Plant Journal, 2016, 85(1): 16-29.
- [18] 张旭东, 程锦潇, 申迪, 等. 不同包装材料对伽师西梅保鲜效果的影响[J]. 包装工程, 2024, 45(13): 148-157.
- ZHANG X D, CHENG J X, SHEN D, et al. Effect of Different Packaging Materials on Fresh-Keeping Effect of Jiashi Prunus Mume[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(13): 148-157.
- [19] WATKINS C B. The Use of 1-Methylcyclopropene (1-MCP) on Fruits and Vegetables[J]. Biotechnology Advances, 2006, 24(4): 389-409.
- [20] MARTÍNEZ-ROMERO, BAILÉN, SERRANO, et al. Tools to Maintain Postharvest Fruit and Vegetable Quality through the Inhibition of Ethylene Action: A Review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2007, 47(6): 543-560.
- [21] 张鹏, 陈曦冉, 贾晓昱, 等. 1-MCP 结合乙烯吸收剂对软枣猕猴桃贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2022, 43(21): 17-24.
- ZHANG P, CHEN X R, JIA X Y, et al. Effects of 1-MCP Combined with Ethylene Absorbent on Storage Quality of Actinidia Arguta[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(21): 17-24.
- [22] YANG S N, ZHANG J F, HU X P, et al. Utilization of Γ -Polyglutamic Acid/Pectin Hydrogel with 1-MCP on the Apricot Storage[J]. Journal of Stored Products Research, 2024, 106: 102306.
- [23] YU J C, WANG M G, LI Z G, et al. Preserving Freshness: Innovations for Fresh-Eating Fruit Distribution and Damage Prevention-A Review[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 44: 101323.
- [24] 袁梓洙, 尹保凤, 邓丽莉, 等. 果蔬采后色素物质代谢调控研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(17): 236-244.
- YUAN Z Y, YIN B F, DENG L L, et al. Advances in Regulation of Pigment Metabolism in Postharvest Fruits and Vegetables[J]. Food Science, 2016, 37(17): 236-244.
- [25] WANG B G, WANG Y X, LI W S, et al. Effect of 1-MCP and Ethylene Absorbent on the Development of Lenticel Disorder of 'Xinli No.7' Pear and Possible Mechanisms[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(6): 2525-2533.
- [26] 曹森, 马超, 吉宁, 等. 乙烯吸收剂耦合 1-MCP 对“贵长”猕猴桃保鲜效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(3): 186-193.
- CAO S, MA C, JI N, et al. Effect of Ethylene Adsorbent Coupled with 1-MCP on the Fresh-Keeping Effect of "Guichang" Kiwifruit[J]. Food and Fermentation Industry, 2018, 44(3): 186-193.
- [27] 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 Z Q, ZHAO Z Y, PAN Y F, et al. Effects of Ethylene Remover Combined with 1-MCP Treatment on Chilling Injury and Active Oxygen Metabolism of Hanging Dried Apricot during Storage[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(9): 155-161.
- [28] BI X F, DAI Y S, ZHOU Z Y, et al. Combining Natamycin and 1-Methylcyclopropene with Modified Atmosphere Packaging to Evaluate Plum (*Prunus Salicina* Cv. 'Cuihongli') Quality[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 183: 111749.
- [29] WU P W, LI B W, LIU Y, et al. Multiple Physiological and Biochemical Functions of Ascorbic Acid in Plant Growth, Development, and Abiotic Stress Response[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(3): 1832.
- [30] 张佳佳. 1-MCP 和高氧处理对小白杏贮藏品质及生理的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- ZHANG J J. Effects of 1-MCP and Hyperoxia Treatment on Storage Quality and Physiology of Small White Apricot[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.
- [31] XU Z, DAI J Y, LIANG L P, et al. Chitinase-Like Protein PpCTL1 Contributes to Maintaining Fruit Firmness by Affecting Cellulose Biosynthesis during Peach Development[J]. Foods, 2023, 12(13): 2503.
- [32] LIANG C C, CUI X Z, SUN C C, et al. Synergistic and Antagonistic Effects of Preharvest Salicylic Acid and Postharvest 1-Methylcyclopropene Treatments on the Storage Quality of Apricot[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134764.
- [33] 夏乐晗, 陈玉玲, 冯义彬, 等. 不同品种杏果实发育过程中类黄酮、总酚和三萜酸含量及抗氧化性研究[J]. 果树学报, 2016, 33(4): 425-435.
- XIA (L/Y)H, CHEN Y L, FENG Y B, et al. Changes in Flavonoids, Total Phenolics, Triterpenoidic Acids and Antioxidant Capacity during Fruit Development of Different Cultivars of Apricot[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(4): 425-435.