郭慧静, 周樱子, 王飞, 等. 茉莉酸甲酯静电雾化喷施对西梅采后贮藏品质及香气的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 386−397. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070168
GUO Huijing, ZHOU Yingzi, WANG Fei, et al. Effect of Electrostatic Atomization Spraying of Methyl Jasmonate on the Postharvest Storage Quality and Aroma of Prune[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 386−397. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070168

·贮运保鲜·

茉莉酸甲酯静电雾化喷施对西梅采后贮藏品质及香气的影响

郭慧静[1], 周樱子[2], 王　飞[3], 李斌斌[1], 金新文[1,*], 宋方圆[1,*]
（1.新疆农垦科学院农产品加工研究所, 新疆石河子 832000;
2.中检集团公信安全科技有限公司, 山东枣庄 277100;
3.陕西省果业研究发展中心, 陕西西安 710000）

摘　要: 为探究茉莉酸甲酯（Methyl jasmonate，MEJA）静电雾化喷施对西梅采后贮藏品质的影响，以新疆‘法兰西’西梅为试材，采用 0.1 mmol/L MEJA 喷施后置于 0 ℃ 冷库贮藏 100 d。结果表明，外源静电雾化喷施 MEJA 显著延缓了西梅果实的采后品质劣变。与对照组（CK）相比，贮藏末期 MEJA 处理组的呼吸强度降低 10.3%，乙烯释放峰值推迟 20 d，果实腐烂率降低 60.89%，果实硬度提高 15.10%；超微结构观察显示，MEJA 处理有效抑制了西梅果实细胞壁组分的解聚，从而维持了细胞结构的完整性。进一步研究发现，MEJA 处理显著抑制了乙醇代谢途径关键酶丙酮酸羧化酶（Pyruvate carboxylase，PDC）和乙醇脱氢酶（Alcohol dehydrogenase，ADH）的活性，导致乙醇和乙醛积累量分别减少了 17.4% 和 18.4%。香气测定共鉴定出 94 种挥发性物质成分，发现不同贮藏时期西梅香气成分存在差异，且 MEJA 处理能促进果实香气成分的释放和维持。相关性分析表明，果实理化品质指标与酶活性之间显著相关（$P<0.05$），主成分分析表明两组样品贮藏品质存在差异，MEJA 处理组保鲜效果较好。综上，MEJA 静电雾化处理可维持果实贮藏品质，是一种应用于西梅采后保鲜的有效方法。

关键词: 新疆西梅, 茉莉酸甲酯, 静电雾化喷施, 贮藏品质, 香气化合物
中图分类号: TS255.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0386−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070168
本文网刊:

Effect of Electrostatic Atomization Spraying of Methyl Jasmonate on the Postharvest Storage Quality and Aroma of Prune

GUO Huijing[1], ZHOU Yingzi[2], WANG Fei[3], LI Binbin[1], JIN Xinwen[1,*], SONG Fangyuan[1,*]
（1.Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China;
2.Zhongjian Group Gongxin Security Technology Co., Ltd., Zaozhuang 277100, China;
3.Shaanxi Fruit Industry Research and Development Center, Xi'an 710000, China）

Abstract: To investigate the effects of methyl jasmonate (MEJA) electrostatic atomization treatment on the postharvest storage quality of prune fruits, 'French' prunes (*Prunus domestica* L.) from Xinjiang were treated with 0.1 mmol/L MEJA and stored at 0 ℃ for 100 days. The results demonstrated that exogenous methyl jasmonate (MEJA) applied via electrostatic atomization significantly delayed postharvest quality deterioration in prune fruits. Compared with the control group (CK), the MEJA-treated group showed a 10.3% reduction in respiration rate, a 20-day delay in ethylene production peak, a

收稿日期: 2025−07−14
基金项目: 新疆农垦科学院院级科研项目（2024YJQN06）; 兵团指导性科技计划项目（2024ZD010）; 兵团重点领域科技攻关计划（2023CB007-14）; 新疆农垦科学院培优项目（2025YJPY04）; 国家现代农业产业技术体系岗位科学家项目（CARS-30-5-04）。
作者简介: 郭慧静（1993−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 果蔬贮藏与加工, E-mail: 1505442828@qq.com。
*** 通信作者:** 金新文（1970−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品贮藏加工, E-mail: 372557223@qq.com。
宋方圆（1986−）, 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 果蔬贮藏与加工, E-mail: sfyxy_good@126.com。

60.89% decrease in decay incidence, and a 15.10% increase in firmness at the end of storage period. Ultrastructural observations revealed that MEJA treatment effectively inhibited the depolymerization of cell wall components in prune fruits, thereby maintaining cellular structural integrity. Further investigation indicated that MEJA treatment significantly suppressed the activities of key enzymes in the ethanol metabolic pathway, including pyruvate carboxylase (PDC) and alcohol dehydrogenase (ADH), resulting in 17.4% and 18.4% reductions in ethanol and acetaldehyde accumulation, respectively. A total of 94 volatile aroma compounds were identified using headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry, with significant differences observed in the major aroma components between different storage periods and between treatment groups, MEJA treatment was found to promote the release and maintenance of fruit aroma components. Correlation analysis revealed significant relationships (P<0.05) between physicochemical quality parameters and enzymatic activities, while principal component analysis demonstrated distinct storage quality characteristics between groups, with the MEJA-treated samples exhibiting superior preservation effects. In conclusion, MEJA electrostatic atomization treatment effectively maintains fruit quality during storage, representing a promising postharvest preservation method for prune fruits.

Key words: Xinjiang prune; methyl jasmonate; electrostatic atomization spraying; storage quality; aroma compounds

西梅（*Prunus domestica* L.）原产于欧洲法国西南部，在我国主要产区包括新疆、四川、甘肃和云南等地[1]。近年来，我国西梅种植面积逐年上升，2024 年全国西梅种植面积达 107 万亩，其中新疆地区种植面积达 75 万亩，占全国西梅种植总面积的 70%；其中伽师县种植面积达到了 55 万亩，占全国的 40%，其西梅产量占全国总产量的 60% 以上，成为全国最大的西梅产销基地[2−3]。西梅产业已成为新疆南疆地区的重要经济支柱产业之一。然而，西梅采摘具有明显的季节性和区域性，且属于呼吸跃变型果实，采后生理代谢旺盛，易发生后熟软化、腐烂，而产地存储和鲜果运输等方面仍存在短板，导致西梅采后损耗率较高，严重制约了西梅的市场供应和产业发展[4]。因此，将保鲜技术用于西梅贮运，保证其贮藏品质、延长货架期成为亟待解决的问题。

茉莉酸甲酯（Methyl jasmonate，MEJA）是天然植物调节剂，能够调节植物的生长发育，包括种子萌发、开花及果实成熟等[5]。大量研究表明，MEJA 处理对苹果[6]、樱桃[7]、草莓[8]、香蕉[9] 等均具有明显的保鲜效果，其作用机制涉及抑制呼吸代谢、调控活性氧平衡以及维持细胞膜完整性等多个方面[10]。特别是在香气物质合成调控方面，MEJA 可通过激活酯类合成关键酶基因的表达，显著促进果实特征香气成分的积累[11]。雾化喷施技术可以提高药剂在果实表面的沉积效率，在果蔬的保鲜应用中展现出显著优势[12−13]。静电雾化喷施技术作为一种新型施药方式，在电场作用下能产生尺寸更小、直径分布更均匀的小雾滴，由于其操作可控，且雾滴尺寸分布均一的特点，静电雾化技术已广泛应用于工业喷涂、农药喷洒等方面[14]。然而，目前关于 MEJA 处理对西梅采后品质影响的研究仍局限于传统浸泡或喷洒方式，尚未见静电雾化 MEJA 处理的相关报道。

本研究创新性地将静电雾化喷施技术与 MEJA 处理相结合，以新疆‘法兰西’西梅为试材，基于前期浓度筛选试验结果，采用 0.1 mmol/L MEJA 进行处理，重点研究：a.MEJA 静电雾化处理对西梅果实采后生理（呼吸强度、乙烯释放）和贮藏品质（硬度、腐烂率）的影响；b.对香气物质代谢的调控作用；c.对乙醇代谢关键酶活性的影响。通过多变量统计分析（相关性分析和主成分分析）系统解析各指标间的内在联系，旨在阐明 MEJA 静电雾化处理延缓西梅采后品质劣变的生理机制，为开发西梅绿色高效保鲜新技术提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

‘法兰西’西梅　2024 年 9 月采集自新疆石河子市 143 团西梅果园，要求成熟度一致、色泽、大小均一、无机械损伤、无病虫害（硬度 15 N、可溶性固形物 20% 左右）。采后放置于周转筐内，立即运至新疆农垦科学院农产品加工研究所保鲜库；PE 微孔保鲜袋　规格 350 mm×450 mm、厚度 0.01 mm，潍坊百乐源保鲜包装有限公司；乙醇代谢关键酶丙酮酸脱羧酶（Pyruvate decarboxylase，PDC）试剂盒、乙醇脱氢酶（Alcohol dehydrogenase，ADH）试剂盒　武汉默沙克生物科技有限公司；抗坏血酸（标准品）、乙醇（色谱纯）、仲丁醇（色谱纯）　天津市致远化学试剂有限公司；2,6-二氯酚靛酚钠盐　上海源叶生物科技有限公司；茉莉酸甲酯（MEJA）、次氯酸钠、无水乙醇、盐酸、草酸　均为国产分析纯。

静电雾化保鲜剂喷施机　图 1，专利号：ZL202223384873.6，西梅保鲜剂静电雾化喷施控制系统（软件著作权：2024SR1937897）；WAY-Z 自动阿贝折光仪　上海精密科学仪器有限公司；X3R 高速冷冻离心机　美国赛默飞世尔有限公司；UV-2600 紫外可见分光光度计　岛津中国有限公司；EL-3002 型电子天平　梅特勒-托利多仪器有限公司；TC-ZGY02 型质构仪　济南泰昌仪器有限公司；便携式气体分析仪　天津捷胜东辉保鲜科技有限公司；ES-100 乙烯分析仪　意大利 FCE 公司；S-3400N 扫描电子显微镜（SEM）、H-7650 透射电子显微镜（TEM）　日立科学仪器（北京）有限公司。

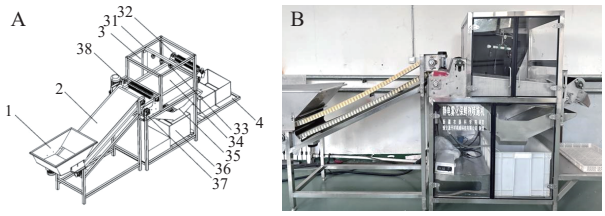


图 1 静电雾化保鲜剂喷施机结构图(A)及样机(B)

Fig.1 Structure diagram (A) and prototype (B) of electrostatic atomization preservative spraying machine

注: 1.上料斗; 2.上料提升机构; 3.保鲜剂喷施与回收利用装置; 4.接料装置; 31.机架; 32.张紧机构; 33.静电喷头; 34.倾斜角度调节机构; 35.药液异形收集箱; 36.药箱; 37.果品保鲜输送机构前轴; 38.滚刷机构。

1.2 实验方法

1.2.1 果实处理 将采收的西梅于 0±0.5 ℃ 条件下快速预冷 24 h。预冷后的样品随机分为 2 组(根据试验需要每组 20 筐, 3 kg/筐)置于精准相温保鲜库内(0±0.5 ℃、相对湿度为 85%~90%), 处理 1 为对照组(CK); 处理 2 为 0.1 mmol/L MEJA 保鲜剂静电雾化喷施(MEJA-P), 喷施后的西梅放置阴凉处自然晾干。优化后的喷施工艺参数: 输送传送带倾斜角度 3.0°、提升电机转速 250 r/min、输送电机转速 220 r/min、喷雾高度 26 cm, 喷头孔径 1.2 mm, 药液管道压力 0.8 MPa。两种处理均采用 PE 微孔保鲜袋、塑料筐包装, 挽口后在 0±0.5 ℃、相对湿度为 85%~90% 的条件下贮藏。贮藏周期 100 d, 取样周期 20 d。

1.2.2 指标测定

1.2.2.1 腐烂率 随机抽取 30 个果实, 判定标准以果实全部或局部霉变、腐烂或流汁均计入腐烂果, 腐烂率(%)=腐烂果实数量/抽取西梅果实总数×100。

1.2.2.2 软果率 随机抽取 30 个果实, 以低于前一周期西梅硬度 20% 的果实记作软果, 软果率(%)=软果数量/抽取西梅果实总数×100。

1.2.2.3 色差 随机挑选 5 个果实, 在果实赤道面均匀选取 3 个点进行测定, 记录 a^*、b^*、L^*值, 并根据下式计算色差(ΔE)。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2}$$

式中: L_0、a_0、b_0 分别表示西梅贮藏 0 d 的明度、红绿值、黄蓝值。

1.2.2.4 质构分析 采用 TC-ZGY02 型质构仪, 通过 TPA 模式分析, 测定条件: 探头 P/0.5、测前速度 30 mm/s、测试速度 30 mm/s、返回速度 30 mm/s、触发力 0.5 N、压缩变形程度 20%, 测定得出西梅硬度和咀嚼性[15]。

1.2.2.5 呼吸强度 将 500 g 西梅置于密闭容器内, 将两个插口接入二氧化碳分析仪, 当仪器数字显示稳定后开始计数, 60 min 后记录 CO_2 浓度, 呼吸强度单位: mg $CO_2\cdot(kg\cdot h)^{-1}$。计算公式如下:

$$\text{呼吸强度}(mg\ CO_2\cdot(kg\cdot h)^{-1}) = \frac{(C_t - C_0)\times V\times 44}{m\times t}$$

式中, C_t 为测定结束时的 CO_2 浓度(%); C_0 为测定开始时的 CO_2 浓度(%); V 为密闭容器顶空体积(L); 44 为摩尔质量(mg·mmol^{-1}); m 为样品质量(kg); t 为测定时间(h)。

1.2.2.6 乙烯释放速率 将 500 g 西梅置于密闭容器内, 将两个插口接入 ES 100 乙烯分析仪, 当仪器数字显示稳定后开始计数, 60 min 后记录乙烯浓度, 乙烯释放速率单位: μL·(kg·h)$^{-1}$。计算公式如下:

$$\text{乙烯释放速率}(\mu L\cdot(kg\cdot h)^{-1}) = \frac{(C_t - C_0)\times V}{m\times t}$$

式中, C_t 为测定结束时的乙烯浓度(μL·L^{-1}); C_0 为测定开始时的乙烯浓度(μL·L^{-1}); V 为密闭容器顶空体积(μL); m 为样品质量(mg); t 为测定时间(h)。

1.2.2.7 细胞膜通透性 用打孔器取直径为 8 mm 圆形果皮放入离心管中, 用蒸馏水清洗 3 次后加入蒸馏水 20 mL, 摇床上室温振荡 1 h 后测定电导率 A_1, 接着将含有果皮的离心管沸水浴 20 min, 降至室温后测定电导率 A_2[16]。相对导电率(%)=A_1 /A_2×100。

1.2.2.8 可溶性固形物(SSC)含量 随机取 10 g 西梅打浆后过滤取汁, 用折光仪进行测定, 单位: %。

1.2.2.9 乙醇和乙醛含量 以水为溶剂配制 1% 乙醛、乙醇溶液制作标准曲线, 获得标准曲线方程如下: Y_1=13.3275X_1−0.0332, R^2=0.9997; Y_2=5.1696X_2+0.0065, R^2=0.9999, 其中, Y_1 为乙醛的峰面积, X_1 为乙醛浓度(mg·mL^{-1}); Y_2 为乙醇的峰面积, X_2 为乙醇浓度(mg·mL^{-1})。称取 3 g 经液氮充分研磨的果肉粉末于 10 mL 离心管, 加入 4 mL 饱和 NaCl 溶液混匀, 吸取 3 mL 至顶空萃取瓶后, 60 ℃ 水浴加热 1 h 后进行静态顶空气相色谱(GC)检测。色谱条件: 1 mL 顶空气体, 5∶1 分流比, 进样口 180 ℃, 采用 DB-624 色谱柱(30 m×0.25 mm×1.4 μm), 流速为 1.0 mL/min; 柱温: 40 ℃ 保留 5 min, 然后 20 ℃/min 升至 180 ℃。检测器 FID 250 ℃, 氢气 30 mL/min, 补偿气(N_2) 25 mL/min, 空气 300 mL/min。通过标准曲线计算样品中乙醇或乙醛的含量, 公式如下:

$$\text{乙醛(乙醇)含量}(mg\cdot kg)^{-1} = \frac{C\times V}{m}$$

式中, C 为乙醛(或乙醇)的浓度(mg·mL^{-1}); V 为样品提取液体积(mL); m 为样品质量(kg)。

1.2.2.10 乙醇代谢关键酶活性 采用 PDC Elisa 试剂盒和 ADH Elisa 试剂盒测定西梅乙醇代谢关键酶活性。

1.2.2.11 超微结构 将西梅果皮和果肉组织切成 1 cm^3 的立方体后, 在 2.5%(v/v)的戊二醛溶液中 4 °C 固定 5 h, 然后用磷酸缓冲液漂洗三次, 漂洗结

束后用 1% 的 OsO_4 溶液固定 2 h，再用磷酸缓冲液漂洗，用梯度浓度的乙醇溶液（30%~95% 5 种浓度）和纯丙酮脱水 20 min，用包埋剂与丙酮混合液处理样品并在 70 ℃ 下加热 9 h，样品切片后分别用醋酸双氧铀和碱性柠檬酸铅染色 5~10 min，再使用扫描电子显微镜（SEM）及透射电子显微镜（TEM）观察[17]。

1.2.2.12　香气物质代谢　采用静态顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用技术（HS-SPME-GC-MS）测定西梅果实的香气物质[18]。具体步骤如下：称取 10 g 西梅果实样品，打浆后 10000 r/min 离心 10 min，取 8 mL 上清液于 20 mL 顶空瓶中，向顶空瓶中加入 2.5 g NaCl 搅拌 3 min 后盖上有孔盖。采用 Thermo Triplus RSH 自动进样装置进行固相微萃取及进样操作，萃取头采用 SPME（DVB/CAR/PDMS，膜厚 50/30 μm；Supelco Inc.，美国），在 40 ℃ 下顶空萃取 40 min 后进入 GC-MS 系统检测。色谱条件：HP-INNOWAX 色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）；程序升温：40 ℃ 保留 2 min，再以 3 ℃/min 升至 160 ℃，接着以 10 ℃/min 升至 210 ℃ 并保持 2 min；传输线温度 250 ℃，载气为 He，流速为 1.0 mL/min，不分流。质谱条件：连接杆 280 ℃，采用电子离子源，离子源 200 ℃，扫描范围质荷比（m/z）为 45~450。

1.3　数据处理

实验均进行三次重复，采用 SPSSPRO 在线软件（https://www.spsspro.com/）对数据进行单因素方差分析（ANOVA），$P<0.05$ 表示差异显著，并用*号表示。数据结果均以三次重复平均值±标准误差（SE）表示，采用 Origin 2024 软件整理作图并进行相关性分析。

2　结果与分析

2.1　MEJA 处理对西梅腐烂率、软果率的影响

腐烂率和软果率是衡量果实品质和保鲜效果的最直接指标。如图 2A 所示，西梅果实随贮藏时间的延长腐烂率均逐渐上升，MEJA-P 处理组的西梅腐烂率上升速度较慢，与 CK 组差异显著（$P<0.05$）。在贮藏期结束（第 100 d）时，CK 组的腐烂率上升至 5.83%，而 MEJA-P 处理组的腐烂率上升至 2.28%，比 CK 组低 60.89%。结果表明，MEJA-P 处理能有效抑制西梅果实采后的微生物侵染及腐烂损失。

如图 2B 所示，西梅果实随贮藏时间的延长软果率均逐渐上升。贮藏 40~60 d 时，MEJA-P 处理组的西梅软果率上升速度较慢，与 CK 组差异显著（$P<0.05$）。在贮藏期结束（第 100 d）时，CK 组的软果率上升至 8.73%，而 MEJA-P 处理组的软果率上升至 4.56%，比 CK 组低 47.77%。结果表明，MEJA-P 处理能有效抑制西梅采后果实的软化、维持果实硬度。

2.2　MEJA 处理对西梅色差影响

果皮的色泽可以直观判断果实的成熟度和品质，对于西梅而言，亮度越高表明西梅品质越好[19]。如图 3A 所示，贮藏期间西梅果实表皮的颜色由黄紫色到红紫色再到深紫色，其颜色逐渐加深，亮度逐渐

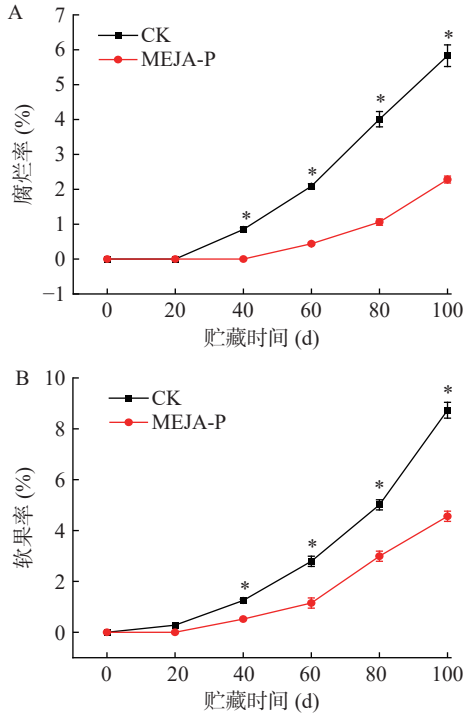


图 2　MEJA 处理对西梅腐烂率（A）、软果率（B）的影响

Fig.2　Effect of MEJA treatment on the rot rate (A) and soft fruit rate (B) of prune

注：误差线代表 SE；“*”表示处理组与 CK 组相比差异显著（$P<0.05$）；图 3~图 7 同。

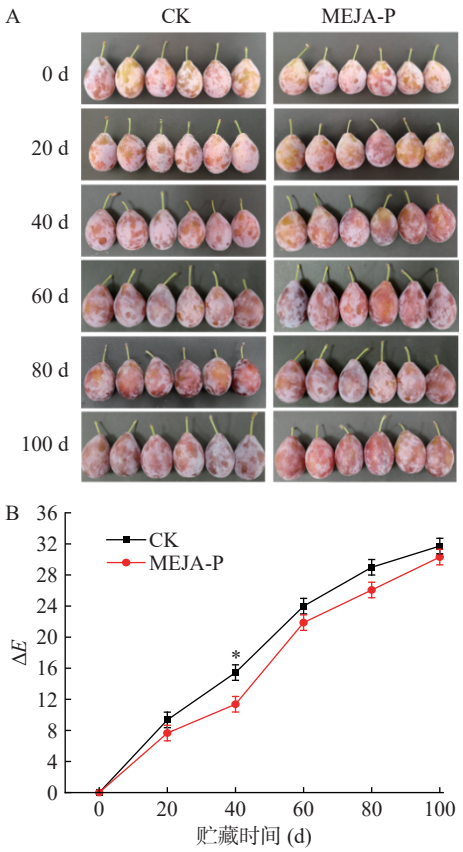


图 3　MEJA 处理对西梅表观（A）、色差（B）的影响

Fig.3　Effect of MEJA treatment on the appearance (A) and color difference (B) of prune

降低(其中 L^*值从 33.52 下降到 24.94),表明果实逐渐进入后熟和衰老阶段。如图 3B 所示,西梅果实随贮藏时间的延长 ΔE 呈现逐渐上升趋势,40~60 d ΔE 上升速度较快,表明色泽变化差异较大,MEJA-P 处理可以延缓西梅果实的颜色变化,但贮藏结束时效果较 CK 组差异不显著。

2.3 MEJA 处理对西梅质构的影响

质构分析可以综合评价西梅果实的口感、质地和贮藏稳定性等[15]。由表 1 可以看出,西梅果实随贮藏时间的延长硬度和咀嚼性均逐渐下降,MEJA-P 处理组的西梅果实下降速度较慢,与 CK 组差异显著(P<0.05)。在贮藏期结束(第 100 d)时,CK 组的硬度下降至 8.08 N,咀嚼性下降至 35.26 mJ,而 MEJA-P 处理组的硬度下降至 9.30 N,咀嚼性下降至 40.57 mJ,分别比 CK 组高 15.10%、15.06%。结果表明,MEJA-P 处理能有效抑制西梅采后果实的软化、维持果实硬度,与软果率结论一致。而西梅的咀嚼性取决于其硬度、粘聚性和弹性,关键因素是成熟度和细胞结构,MEJA-P 可抑制西梅果实的后熟过程,从而维持质地和咀嚼性[20−21]。

2.4 MEJA 处理对西梅呼吸强度、乙烯释放速率的影响

西梅属于典型的呼吸跃变型果实,研究表明西梅采后的呼吸强度随贮藏时间的延长呈先升高后降低的趋势(图 4A)。贮藏 40 d 后,CK 组和 MEJA-P 处理的西梅果实出现呼吸高峰,分别为 35.75 mg-CO_2·(kg·h)$^{-1}$ 和 34.76 mg CO_2·(kg·h)$^{-1}$。与 CK 组相比,整个贮藏期 MEJA-P 处理西梅果实的呼吸强度值均小于 CK 组的呼吸强度值,保持在较低水平。贮藏期结束(第 100 d),MEJA-P 处理西梅果实的呼吸强度为 19.32 mg CO_2·(kg·h)$^{-1}$,显著低于 CK 组(P<0.05)。

西梅果实乙烯释放速率随贮藏时间的延长也呈先上升后下降的趋势(图 4B),贮藏 60 d 后,CK 组西梅果实乙烯释放速率出现高峰,与 CK 相比,MEJA-P 处理西梅果实的高峰延迟了 20 d,且 CK 的峰值是 MEJA-P 处理的 1.06 倍。整个贮藏期 MEJA-P 处理西梅果实的乙烯释放速率保持在较低水平。贮藏期结束(第 100 d),MEJA-P 处理西梅果实的乙烯释放速率为 12.0 μL·(kg·h)$^{-1}$,表明 MEJA-P 处理能延缓西梅果实乙烯的释放速率。

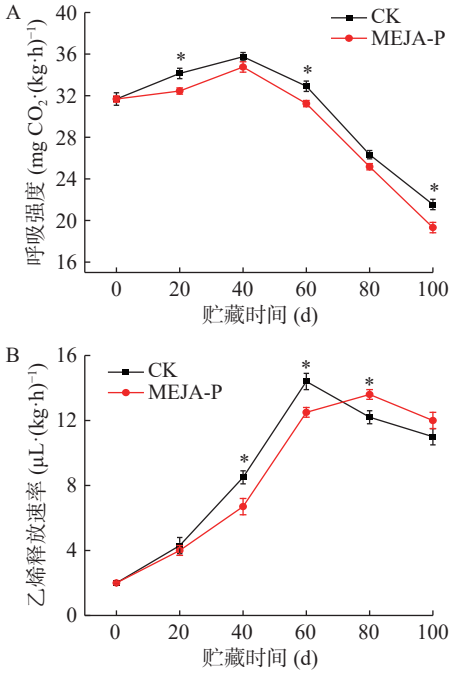


图 4 MEJA 处理对西梅呼吸强度(A)、乙烯释放速率(B)的影响

Fig.4 Effect of MEJA treatment on the respiratory intensity (A) and ethylene release rate (B) of prune

2.5 MEJA 处理对西梅细胞膜透性、SSC 含量的影响

电导率是评价细胞膜透性的重要指标。如图 5A 所示,随着贮藏时间的增加,CK 组和 MEJA-P 处理组西梅电导率均呈上升的趋势。贮藏 80 d 时,CK 组西梅果实的电导率为 54.37%,是 MEJA-P 处理的 1.33 倍,显著高于 MEJA-P 处理西梅的电导率(P<0.05),结果表明 MEJA-P 处理能显著调控西梅果实的细胞膜透性,抑制膜脂过氧化对细胞膜的损伤,延缓西梅的软化。

SSC 含量是评价西梅果实感官品质的重要指标。如图 5B 所示,西梅 SSC 含量在整个贮藏期均呈先上升后下降趋势,CK 组 40 d 时达到峰值 23.73%,MEJA-P 处理组 60 d 时达到峰值 25.51%,是 CK 组的 1.08 倍。贮藏 60 d 后,MEJA-P 处理组 SSC 含量始终显著高于 CK 组(P<0.05),且 MEJA-P 处理组延缓了 SSC 高峰的出现,结果表明 MEJA-P 处理的西梅果实,其采后呼吸强度显著降低,减少了糖类作为呼吸代谢底物的消耗,进而延缓了果实品质劣变,提高了贮藏稳定性[22]。

表 1 MEJA 处理对西梅硬度和咀嚼性的影响

Table 1 Effect of MEJA treatment on the hardness and chewiness of prune

指标	处理	贮藏时间(d)					
		0	20	40	60	80	100
硬度(N)	CK	13.81±1.75	12.02±1.85	10.79±1.44	9.86±1.25	9.17±0.86	8.08±0.76
	MEJA-P	13.79±1.96	12.95±2.03*	12.23±1.78*	11.43±1.13*	10.52±1.07*	9.30±0.92*
咀嚼性(mJ)	CK	68.52±2.08	63.43±2.16	57.06±1.87	50.62±1.90	41.38±1.61	35.26±1.72
	MEJA-P	68.31±2.17	64.05±2.09*	59.66±1.85*	53.19±2.07*	45.24±1.58*	40.57±1.66*

注:“*”表示处理组与CK组相比差异显著(P<0.05)。

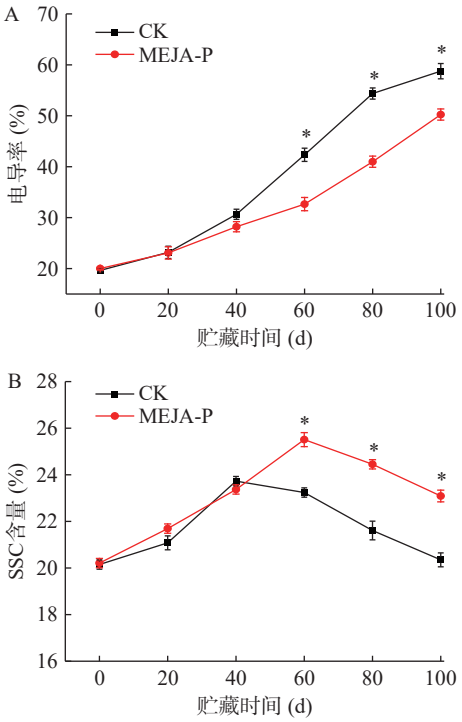


图 5　MEJA 处理对西梅细胞膜透性(A)、SSC 含量(B)的影响

Fig.5　Effect of MEJA treatment on membrane permeability (A) and SSC content (B) of prune

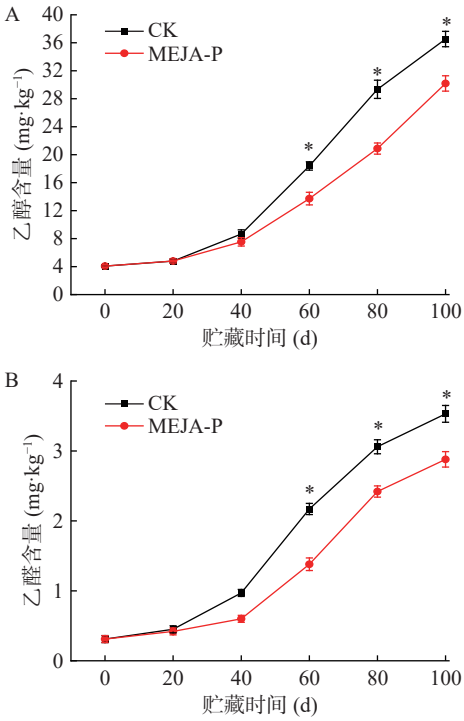


图 6　MEJA 处理对西梅乙醇含量(A)、乙醛含量(B)的影响

Fig.6　Effect of MEJA treatment on the ethanol content (A) and acetaldehyde content (B) of prune

2.6　MEJA 处理对西梅乙醇、乙醛含量的影响

乙醇和乙醛是果实采后乙醇代谢的主要产物，影响着果实的风味，且过度积累可导致衰老加快、品质下降[23–24]。由图 6 可见，西梅乙醇和乙醛含量随贮藏时间的延长整体呈上升趋势，且在贮藏前 40 d，乙醇和乙醛含量上升速率较慢，在 40~100 d，乙醇含量急剧上升，贮藏 100 d 时，CK 组乙醇含量达到 36.54 mg·kg^{-1}，显著高于 MEJA-P 处理组（P<0.05）。在 40~80 d 乙醛含量急剧上升，80~100 d 时乙醛含量上升速率减缓，贮藏 100 d 时，CK 组乙醛含量为 3.53 mg·kg^{-1}，显著高于 MEJA-P 处理组（P<0.05）。结果表明西梅果实后熟及衰老过程会促进乙醛和乙醇含量的积累，且乙醛和乙醇含量的变化趋势基本一致，MEJA-P 处理可有效抑制西梅果实乙醇代谢途径，减缓乙醇和乙醛的积累进程。

2.7　MEJA 处理对西梅 PDC、ADH 酶活性的影响

PDC 和 ADH 是乙醇代谢途径的关键酶，其活性直接影响西梅果实中的乙醇含量[25]。如图 7 所示，随着贮藏时间的延长，CK 组和 MEJA-P 处理组西梅的 PDC 和 ADH 活性均呈逐渐上升趋势，贮藏 60 d 时，CK 组 ADH 活性比 MEJA-P 处理组高 22.19%，差异显著（P<0.05），贮藏 80 d 时，CK 组 PDC 和 ADH 活性分别比 MEJA-P 处理组高 18.86%、15.43%，差异显著（P<0.05），贮藏 100 d 时，CK 组 PDC 活性比 MEJA-P 处理组高 16.27%，差异显著（P<0.05），说明 MEJA-P 处理可有效抑制 PDC 和 ADH 活性，减少乙醇发酵代谢产物乙醇和乙醛的产生。

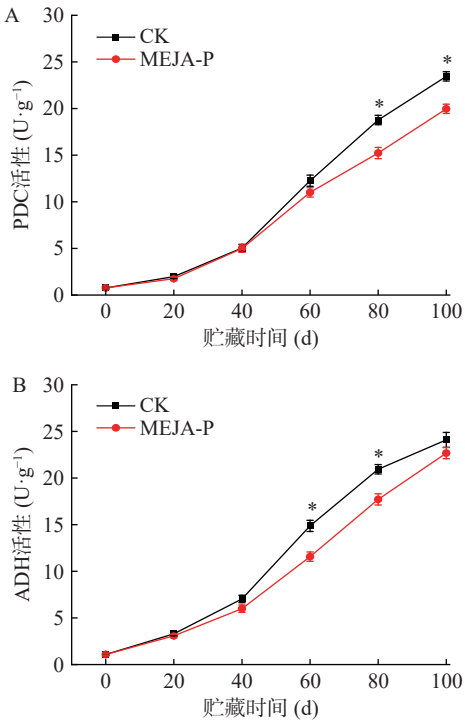


图 7　MEJA 处理对西梅 PDC 活性(A)、ADH 活性(B)的影响

Fig.7　Effect of MEJA treatment on the PDC (A) and ADH (B) of prune

2.8　MEJA 处理对西梅超微结构的影响

果实在贮藏期内部结构和细胞壁成分会发生变化，观察西梅果实组织及细胞的超微结构有助于了解其成熟衰老机制[26]。通过测定贮藏 60 d 时软化较明显（硬度低于 10 N）的西梅果肉组织可以发现，CK 组

较 MEJA 处理组西梅果肉组织形态发生变化，孔状结构增多，孔径较大（图 8A、图 8B）。TEM 观察显示，贮藏 60 d 时，CK 组西梅细胞壁开始膨大松散，中胶层逐渐消失，电子密度降低，细胞壁弯曲并出现了空隙，部分细胞膜脱离细胞壁，细胞器从壁上脱落，大部分线粒体包膜肿胀，部分解体导致基质泄露（图 8C）。而 MEJA 处理组西梅细胞壁结构完整，厚度均匀，细胞膜无脱落现象，细胞器紧贴细胞膜，形态较清晰，大部分线粒体包膜无明显肿胀，个别线粒体破裂导致基质渗漏（图 8D）。表明 MEJA 处理维持了西梅细胞壁结构的完整性，减少了细胞壁组分的解聚和细胞间隙的增大，延缓了果实软化和贮藏品质的下降。

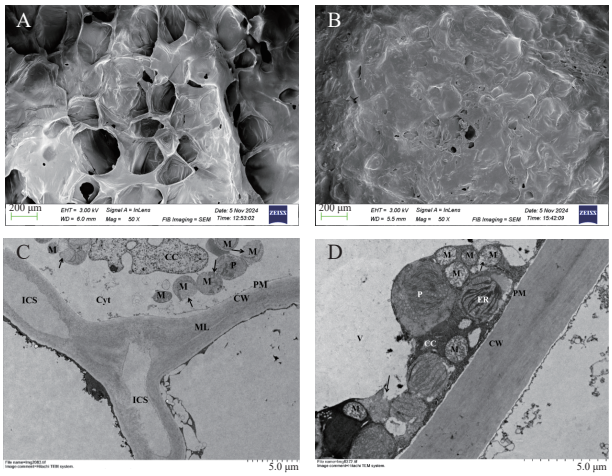


图 8 MEJA 处理对西梅果肉超微结构的影响

Fig.8 Effect of MEJA treatment on the microstructure of prune

注：A 为 CK 组果肉 SEM（60 d）；B 为 MEJA 处理组果肉 SEM（60 d）；C 为 CK 组果肉 TEM（60 d）；D 为 MEJA 处理组果肉 TEM（60 d）；CW 为细胞壁；ML 为中胶层；ICS 为细胞间隙；M 为线粒体；p 为质体；PM 细胞质膜；Cyt 为细胞质；V 为液泡；CC 为细胞内含物；ER 为内质网；箭头表示存在破裂。

2.9 MEJA 处理对西梅香气物质代谢的影响

根据试验指标分别选定了西梅贮藏 0、40、60、80 d 的香气物质进行测定分析，选取具有典型代表性的贮藏 0 d 和 60 d 的西梅香气成分总离子流色谱图见图 9。香气物质在贮藏期间的变化如表 2 所示，从表中可以看出西梅香气成分中醛类、醇类和酯类物质占较大比例，在整个贮藏期内相对含量分别为 45.59%~68.76%、6.40%~31.04% 及 11.82%~23.54%。醛类物质相对含量呈先升高后降低的趋势，醇类物质相对含量呈先下降后上升趋势，酯类物质相对含量呈上升趋势，且 MEJA-P 处理酯类物质相对含量均高于 CK 组，表明 MEJA 可促进西梅酯类物质的释放。从西梅中共测出 94 种香气成分，其中醇类物质 12 种、醛类物质 16 种、酯类物质 35 种，烯烃类物质 7 种、酚类物质 5 种、酮类物质 12 种、酸类物质 6 种、杂环类物质 1 种。CK 组和 MEJA-P 组分别检出 80、77 种物质，使用 MEJA-P 处理的西梅香气成分更集中，主要香气成分按相对含量排序为反-2-己烯醛（15.27%~24.49%）、己醛（12.62%~23.62%）、棕榈酸甲酯（2.47%~11.79%）、邻甲氧基肉桂醛（1.12%~15.21%）、大马士酮（1.78~2.54）等，含有甜的果香、花香和青香等主要香韵。β-紫罗兰酮呈木香、花香等清甜浓郁的气息；d-柠檬烯具有柑橘、松木等气息；庚醛、正辛醛具有果子香、脂肪香味；棕榈酸乙酯具有蜡香、奶油香气等[27−28]，而 MEJA-P 处理均促进了上述香气物质的释放，维持了较好的果实风味。

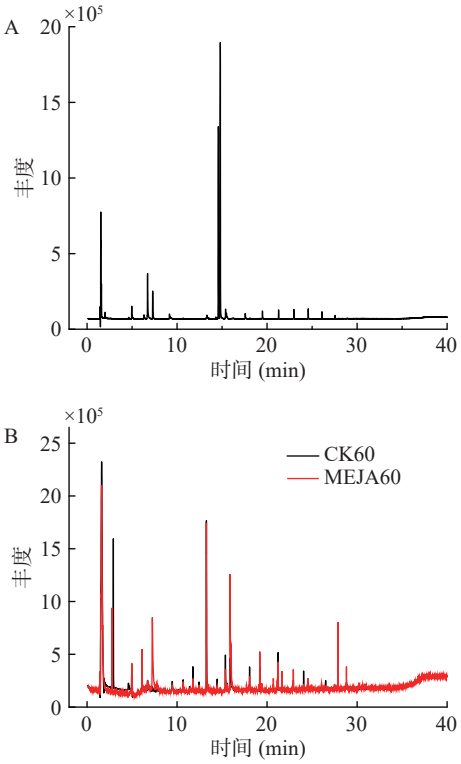


图 9 西梅贮藏 0 d（A）和 60 d（B）香气成分总离子流色谱图

Fig.9 Total ion chromatogram of aroma components in prune stored for 0 days (A) and 60 days (B)

2.10 指标相关性分析

为明确西梅贮藏期各项理化指标之间的关系进行了皮尔逊相关性分析（图 10）。结果表明西梅 12 项理化指标之间存在显著的正相关或负相关关系（P<0.05）。其中，西梅果实腐烂率与软果率、色差、乙烯释放速率、电导率、乙醇含量、乙醛含量、PDC 活性、ADH 活性指标之间呈显著正相关（P<0.05），腐烂率与硬度、呼吸强度呈显著负相关（P<0.05），与 SSC 含量相关性不显著（P>0.05）。西梅采后果实发生后熟和衰老的同时，伴随着果实色泽变暗、组织失水软化、细胞壁降解、乙醇代谢积累等表现。PDC 活性、ADH 活性与乙醇含量呈显著正相关（r=0.99、0.98），表明乙醇代谢受相关酶的调节，通过控制关键酶活性可调控其代谢进程[29]。

2.11 指标主成分分析

为综合分析品质指标、乙醇代谢相关酶变化与西梅果实贮藏品质及酒化的关系，采用 PCA 法进行数据统计分析[30]。结果表明，PCA 分析从 12 个指标

表 2　MEJA 处理对西梅贮藏期间香气的影响

Table 2　Effect of MEJA treatment on the aroma of prune during storage

类别	成分名称	初始相对含量(%)	40 d相对含量(%)		60 d相对含量(%)		80 d相对含量(%)	
			CK40	MEJA40	CK60	MEJA60	CK80	MEJA80
醇类	苯甲醇	12.06	–	–	1.71	0.96	–	–
	芳樟醇	0.21	–	–	–	–	–	–
	正己醇	15.15	0.89	2.38	2.22	2.83	3.42	4.65
	1-辛醇	1.01	1.87	1.14	1.48	0.83	0.50	0.93
	1-壬醇	0.32	0.00	0.42	0.13	0.50	0.51	0.48
	反-2-己烯-1-醇	0.40	0.77	2.98	2.68	0.85	5.84	2.26
	3-己烯-1-醇	0.58	0.78	0.65	0.56	0.27	0.69	0.69
	2-丁基辛醇	0.30	0.13	0.05	0.05	0.07	–	–
	黄瓜醇	0.04	0.05	0.02	0.04	0.06	0.05	0.04
	2-己醇	–	5.43	–	–	–	–	–
	萜品醇	–	–	–	0.11	0.04	–	–
	(Z)-2-壬烯-1-醇	0.97	1.24	–	–	–	0.47	
	小计	31.04	11.16	7.63	8.98	6.40	11.48	9.05
醛类	壬醛	0.28	2.34	1.30	22.86	17.52	28.35	21.09
	己醛	19.11	20.74	23.62	15.49	16.70	12.62	16.17
	正辛醛	0.21	0.23	2.24	1.48	1.02	0.74	0.93
	癸醛	–	–	0.41	0.91	0.53	0.38	0.36
	庚醛	0.02	0.04	1.04	0.92	1.22	0.71	1.09
	月桂醛	–	–	0.14	0.06	0.06	–	2.01
	戊醛	0.18	0.23	1.15	0.97	0.75	0.39	0.06
	邻甲氧基肉桂醛	5.44	15.21	5.49	6.33	5.26	1.20	1.12
	2,4-壬二烯醛	–	–	–	0.53	0.46	1.15	0.48
	3-乙基苯甲醛	–	–	–	0.09	0.03	–	–
	2,4-庚二烯醛	–	–	–	–	0.24	–	0.17
	2-壬烯醛	–	–	–	0.19	0.16	0.28	0.27
	反-2-辛烯醛	–	–	–	–	–	–	0.22
	反-2-己烯醛	20.28	20.14	24.49	18.94	19.98	15.27	16.07
	2-甲基丁醛	–	–	–	–	–	0.37	0.68
	苯甲醛	0.07	0.18	0.30	–	–	–	–
	小计	45.59	59.12	60.18	68.76	63.92	61.46	60.72
酮类	大马士酮	1.78	2.09	2.54	2.02	2.45	1.94	2.03
	2,3-丁二酮	–	–	–	1.91	0.85	–	–
	β-紫罗兰酮	0.02	0.08	0.09	0.13	0.16	0.21	0.27
	苯乙酮	–	–	–	0.80	0.24	–	–
	2-辛酮	0.25	0.07	0.14	0.19	0.23	–	–
	2-羟基-1-苯并呋喃-3(2H)-酮	–	–	–	–	–	0.29	0.40
	4-甲基环己酮	–	–	–	–	–	0.23	–
	香叶基丙酮	0.26	–	–	–	–	–	0.10
	2-甲基环戊酮	–	–	1.04	–	–	–	–
	1-戊烯-3-酮	0.43	1.59	2.08	0.74	1.24	–	0.21
	羟基丙酮	–	0.25	0.45	–	–	–	–
	樟脑	0.42	0.26	–	–	–	–	–
	小计	3.16	4.34	6.33	5.78	5.16	2.68	3.00
酯类	棕榈酸乙酯	0.54	0.78	1.51	0.99	1.65	2.72	4.34
	苯乙酸乙酯	–	–	–	1.26	0.76	–	–
	月桂酸甲酯	1.25	0.37	0.49	0.22	0.96	1.34	0.76
	棕榈酸甲酯	4.71	5.42	5.57	2.47	9.81	10.65	11.79
	苯甲酸甲酯	–	–	–	0.34	0.17	0.97	0.20
	月桂酸乙酯	–	–	–	0.05	0.31	–	0.15
	肉豆蔻酸甲酯	–	–	–	0.13	0.60	0.18	0.15
	辛酸乙酯	1.18	0.47	0.70	0.08	1.16	0.43	0.57
	辛酸甲酯	0.07	0.87	0.53	0.07	0.70	0.72	0.93

续表 2

类别	成分名称	初始相对含量(%)	40 d相对含量(%)		60 d相对含量(%)		80 d相对含量(%)	
			CK40	MEJA40	CK60	MEJA60	CK80	MEJA80
酯类	苯乙酸甲酯	0.45	0.37	0.41	0.56	0.59	0.24	0.12
	2-甲基丁酸己酯	–	–	–	0.03	0.27	–	–
	肉桂酸正丙酯	–	–	–	1.60	1.26	0.28	–
	硬脂酸甲酯	–	0.07	–	0.09	0.35	0.25	0.55
	癸酸甲酯	–	–	–	0.59	0.20	0.40	0.26
	羟基乙酸乙酯	–	0.85	0.63	0.76	1.44	–	–
	丁酸己酯	0.07	0.23	0.35	0.02	0.15	0.09	–
	己酸己酯	0.43	0.41	0.19	–	–	–	–
	壬酸甲酯	0.55	0.47	0.28	0.47	0.20	0.45	0.23
	壬酸乙酯	–	–	–	–	–	0.34	0.22
	反-4-癸烯酸乙酯	0.26	0.18	0.42	0.20	0.35	0.19	0.24
	邻苯二甲酸二异丁酯	–	–	–	0.43	–	–	–
	2-甲基丁酸乙酯	0.08	0.10	0.19	0.11	0.24	0.13	0.21
	异戊酸叶醇酯	–	0.05	0.24	0.18	0.15	–	0.16
	己酸甲酯	0.18	0.47	0.74	0.07	0.30	–	0.54
	肉豆蔻酸乙酯	–	0.08	0.25	0.06	0.12	0.16	–
	邻苯二甲酸二甲酯	0.15	0.25	0.37	0.14	0.08	–	–
	水杨酸甲酯	–	0.46	–	0.68	0.33	–	1.24
	硬脂酸乙酯	–	0.19	0.15	0.07	0.12	0.24	0.33
	r-亚麻酸甲酯	1.41	1.02	0.32	0.06	0.04	0.10	0.08
	亚油酸甲酯	–	–	–	–	–	–	0.47
	1,2-丙二醇二乙酸酯	–	–	–	0.72	–	–	–
	己酸叶醇酯	0.37	1.11	0.96	–	–	–	–
	草酸异丁酯	–	–	0.42	–	–	–	–
	甲酸丙酯	–	–	2.18	–	–	–	–
	(Z)-丙酸-3-己烯酯	0.11	0.30	0.38	–	–	–	–
	小计	11.82	14.53	17.30	12.45	22.30	19.86	23.54
酚类	2,4-二叔丁基酚	0.18	0.23	0.20	0.19	0.17	–	–
	4-乙烯基-2-甲氧基苯酚	–	0.26	0.19	0.40	–	–	–
	4-异丙基-3-甲基苯酚	–	–	–	–	–	–	0.10
	异丁香酚	–	0.42	0.38	–	–	–	0.14
	丁香酚	–	–	–	–	–	–	0.13
	小计	0.18	0.91	0.77	0.59	0.17	0.00	0.37
烯烃类	环己烯	0.03	0.08	–	0.09	–	–	–
	茴香烯	–	–	–	–	–	0.53	–
	d-柠檬烯	0.06	0.48	1.24	0.02	–	0.12	0.20
	顺式-3-癸烯	–	–	–	–	–	–	0.39
	苯乙烯	–	0.64	0.59	–	–	–	–
	茨烯	2.25	2.43	–	–	–	–	–
	萜品烯	0.34	–	–	–	–	–	–
	小计	2.68	3.63	1.83	0.11	0.00	0.65	0.59
酸类	肉豆蔻酸	0.40	0.33	–	–	–	0.48	
	2-甲基戊酸	0.19	–	–	–	–	0.39	
	肉桂酸	–	–	–	–	–		0.37
	DL-丙氨酸	0.19	0.15	0.52	–	–	–	–
	2-甲基丁酸	–	0.43	–	–	–	–	–
	羟基乙酸	0.12	0.55	0.69	–	–	–	–
	小计	0.90	1.46	1.21	0.00	0.00	0.87	0.37
杂环类	2-戊基呋喃	1.24	1.39	1.78				
	总计(%)	96.61	96.54	97.04	96.67	97.95	96.99	97.65

注: 表中“–”表示未检出。

中提取出 2 个主成分, PC1 贡献率为 82.3%, PC2 贡献率为 13.1%, 累计贡献率为 95.4%, 表明这 2 个 PC 可以反映原始数据 95% 以上的信息, 符合 PCA 分析要求。如图 11A 所示, 可根据贮藏时间区分处

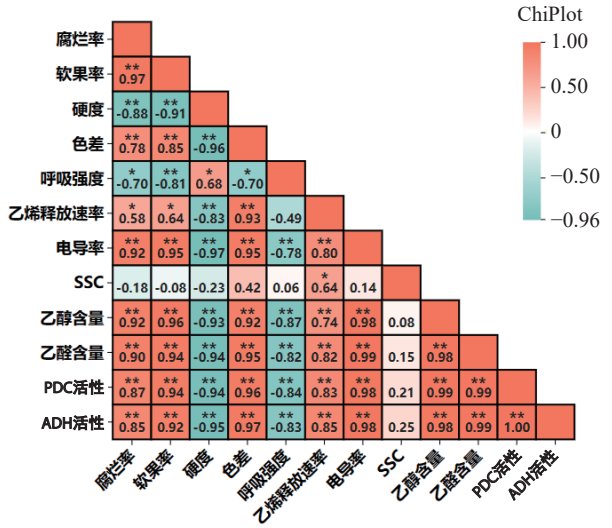


图 10　MEJA 处理西梅贮藏期间理化指标皮尔逊相关性分析

Fig.10　Pearson correlation analysis of physical and chemical indicators during the storage period of prune treated with MEJA

注：“*”表示交互指标之间差异显著（P<0.05），“**”表示交互指标之间差异极显著（P<0.01）；深色表示强相关，浅色表示弱相关，棕色表示正相关，蓝色表示负相关。

理组西梅果实，且贮藏前 40 d，CK 组和 MEJA 处理组得分位置相对一致，随贮藏时间的延长，60 d 后两组得分均由左半区向右半区移动，MEJA 处理组与 CK 组有较为明显的区域分布差异。图 11B 为载荷分布，PC1 主要由乙烯释放速率、色差、ADH 活性、PDC 活性、电导率、乙醛含量、乙醇含量、软果率、腐烂率等指标决定，与呼吸强度和硬度呈负相关；而

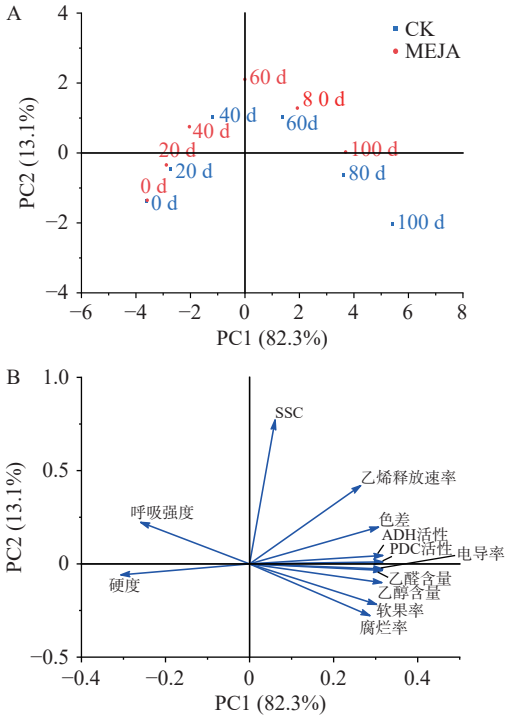


图 11　MEJA 处理西梅各指标的 PCA 得分图（A）和载荷图（B）

Fig.11　PCA score chart (A) and load chart (B) of various indexes of prune treated with MEJA

PC2 与呼吸强度、SSC 和乙烯释放速率呈正相关，与硬度呈负相关。

为防止过分捕捉数值较大的特征，PCA 分析时先对每个指标值进行标准化处理，使它们在相同的范围内后再进行 PCA。以选取的 PC1、PC2 的方差贡献率 a_1（82.3%）、a_2（13.1%）作为权数构建综合评价模型：$F_1=0.091X_1-0.098X_2+0.096X_3+0.097X_4-0.082X_5+0.101X_6+0.084X_7+0.101X_8+0.1X_9+0.101X_{10}+0.1X_{11}+0.019X_{12}$；$F_2=-0.221X_1-0.04X_2-0.172X_3+0.158X_4+0.176X_5+0.037X_6+0.335X_7+0.009X_8-0.027X_9-0.021X_{10}-0.079X_{11}+0.615X_{12}$。

式中：F_1 表示 PC1 所包含的因子得分，F_2 表示 PC2 所包含的因子得分；X_1~X_{12} 分别表示腐烂率、硬度、软果率、色差、呼吸强度、ADH、乙烯释放速率、PDC、电导率、乙醛含量、乙醇含量、SSC。

通过模型公式得到线性组合：$F=(0.823/0.955)\times F_1+(0.131/0.955)\times F_2$，即综合得分 $F=0.862\times F_1+0.137\times F_2$。针对本研究的主要信息方向，综合得分 F 值大小表示两个主成分对总体评价的贡献，其 PC1 所含的各项指标均与品质成负相关，因此综合得分 F 值越高表示品质越差，反之则越好。如图 12 所示，各处理组综合得分随贮藏时间的延长整体呈上升趋势，表明贮藏期果实品质呈逐渐下降趋势。贮藏第 40~80 d 时，CK 组与处理组之间综合得分差异显著（P<0.05），在整个贮藏期，MEJA 处理组综合得分均低于 CK 组，表明 MEJA 处理在贮藏期能更有效保持西梅品质，保鲜效果更佳。

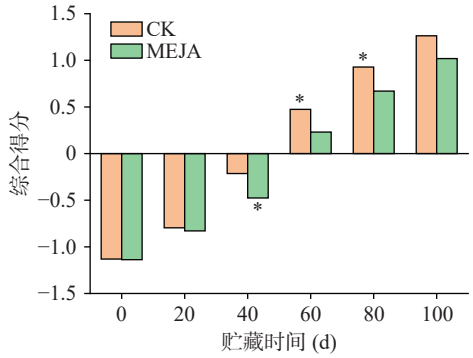


图 12　MEJA 处理西梅果实的综合得分

Fig.12　Combined scores of prune treated with MEJA

注：“*”表示处理组与 CK 组相同贮藏时间的显著性差异（P<0.05）。

3　结论

本实验采用 MEJA 通过自主研发的静电雾化喷施机处理西梅果实，结果表明，随着贮藏时间的延长，MEJA-P 处理能显著延缓西梅果实采后贮藏期的腐烂、失水酒软和褐变等，抑制果实的呼吸速率及乙烯释放速率，维持细胞组织结构的稳定性和完整性，并抑制乙醇代谢关键酶 PDC 和 ADH 活性从而减少乙醇和乙醛的积累。MEJA-P 处理使西梅果实典型的甜而细腻的果香、花香、青香等香韵得到提升；相关

性分析表明 12 个指标之间均存在显著的正相关或负相关；主成分分析提取出 2 个主成分，MEJA-P 处理综合品质最好。综上所述，MEJA 静电雾化处理可作为改善西梅采后贮藏品质和抑制果实采后酒软的有效策略。

© 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. Advances in research on cultivation and management of *Prunus*[J]. Journal of Fruit Resources, 2020, 1(2): 52−55.]

[2] 坎吉古丽·乌守尔, 苟转荣. 2010—2020 年伽师县气候条件对新梅生长发育的影响[J]. 农业灾害研究, 2024, 14(10): 10−12. [WUSUER K, GOU Z R. The impact of climate conditions in Jiashi County on the growth and development of new plums from 2010 to 2020[J]. Agricultural Disaster Research, 2024, 14(10): 10−12.]

[3] 张政, 魏佳, 郭文莉, 等. 新疆新梅保鲜加工产业发展现状及需求分析[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(S1): 111−115. [ZHANG Zheng, WEI Jia, GUO Wenli, et al. Development status and demand of preservation and processing industry of prunes in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(S1): 111−115.]

[4] 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 methods on fruit quality and aroma of Ximei fruit[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.]

[5] WANG Suyan, SHI Xinchi, LIU Fengquan, et al. Effects of exogenous methyl jasmonate on quality and preservation of postharvest fruits: A review[J]. Food Chemistry, 2021, 353: 129482.

[6] 唐伟杰, 张潆支, 张良, 等. 不同浓度茉莉酸甲酯处理对“金冠”苹果保鲜效果的影响[J]. 包装与食品机械, 2024, 42(1): 12−18. [TANG Weijie, ZHANG Yingzhi, ZHANG Liang, et al. Effects of different concentrations of methyl jasmonate treatment on preservation of "Jinguan" apple fruit[J]. Packaging and Food Machinery, 2024, 42(1): 12−18.]

[7] VILLAVICENCIO J D, ZOFFOLI J P, O'BRIEN J A, et al. Methyl jasmonate mediated modulation of lipoxygenase pathway modifies aroma biosynthesis during ripening of 'Regina' sweet cherry (*Prunus avium* L.)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 225: 113511.

[8] SHAH H M S, SINGH Z, HASAN M U, et al. Preharvest methyl jasmonate application delays cell wall degradation and upregulates phenolic metabolism and antioxidant activities in cold stored raspberries[J]. Food Chemistry, 2025, 462: 141020.

[9] HUANG Chunxia, YI Ping, LI Jing, et al. Exogenous methyl jasmonate alleviates mechanical damage in banana fruit by regulating membrane lipid metabolism[J]. Foods, 2024, 13(19): 193132.

[10] ZENG Guihua, GAO Feifei, XIE Rui, et al. The ameliorative effects of exogenous methyl jasmonate on grapevines under drought stress: Reactive oxygen species, carbon and nitrogen metabolism[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 335: 113354.

[11] LUO Manli, ZHOU Xin, HAO Yi, et al. Methyl jasmonate pretreatment improves aroma quality of cold-stored 'Nanguo' pears by promoting ester biosynthesis[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 127846.

[12] TIRAWAT D, FLICK D, MÉRENDET V, et al. Combination of fogging and refrigeration for white *Asparagus* preservation on vegetable stalls[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 124: 8−17.

[13] LIU Aiping, WANG Bo, WANG Yuchuan, et al. Recent application of electrospray technology in food processing: A review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(7): 5970−5987.

[14] NIU Shuzhang, LÜ Wei, ZHOU Guangmin, et al. Electrostatic-spraying an ultrathin, multifunctional and compact coating onto a cathode for a long-life and high-rate lithium-sulfur battery[J]. Nano Energy, 2016, 30: 138−145.

[15] CHENG Xiaoyan, ZHOU Yao, HUO Zhengyang, et al. Predicting postharvest weight loss and texture changes in table grapes using fruit color and machine learning[J]. Future Foods, 2025, 12: 100703.

[16] GUO Yuanyuan, LIANG Pingzhuo, TANG Ying, et al. Effects of postharvest deastringency and 1-methylcyclopropene treatments on membrane permeability, membrane-degrading enzymes and their encoding genes in persimmon (*Diospyros kaki*, cv Mopanshi) fruit[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 297: 110941.

[17] ZHANG Weida, GUO Minrui, YANG Wanting, et al. The role of cell wall polysaccharides disassembly and enzyme activity changes in the softening process of Hami melon (*Cucumis melo* L.)[J]. Foods, 2022, 11(6): 841.

[18] GEORGIADOU E C, GARCIA HERNANDEZ GIL C J, TALIADOROU A M, et al. The postharvest application of biodegradable polymers and a priming agent as a potential tool to enhance phytochemical content, aroma profile and market life of strawberry fruit[J]. LWT, 2025, 227: 117877.

[19] HABIBI F, SHAHID M A, JACOBSON T, et al. Postharvest quality and biochemical changes in blood orange fruit exposed to various non-chilling storage temperatures[J]. Horticulturae, 2025, 11(5): 493.

[20] GUSTANI F M, COLODEL C, AYUB R A. Unraveling the molecular mechanisms of melon fruit firmness: Insights into cell wall gene expression and regulation[J]. Phytochemistry Reviews, 2025, 24(4): 3205−3220.

[21] LEI Ying, LIU Yongzhong, GU Qingqing, et al. Comparison of cell wall metabolism in the pulp of three cultivars of 'Nanfeng' tangerine differing in mastication trait[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(3): 496−502.

[22] LU Keyan, WU Xinping, YUAN Ruimin, et al. Mechanism of exogenous methyl jasmonate in regulating the quality of fresh-cut Chinese water chestnuts[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1435066.

[23] CHENG Jiao, ZHENG Anran, LI Huihong, et al. Effects of melatonin treatment on ethanol fermenation and ERF expression in kiwifruit cv. Bruno during postharvest[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 293: 110696.

[24] FUENTEALBA C, EJSMENTEWICZ T, CAMPOS-VARGAS R, et al. Cell wall and metabolite composition of sweet cherry fruits from two cultivars with contrasting susceptibility to surface pitting during storage[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128307.

［25］ VENTURA I, BRUNELLO L, IACOPINO S, et al. *Arabidopsis* phenotyping reveals the importance of alcohol dehydrogenase and pyruvate decarboxylase for aerobic plant growth[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 16669.

［26］ WANG Yu, JIA Wenjun, WANG Xin, et al. Tea polyphenols coating improves physiological properties, microstructure and chemical composition of cuticle to suppress quality deterioration of passion fruit during cold storage[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141524.

［27］ 张翼鹏, 廖头根, 何邦华, 等. 基于 GC-O、OAV 和 S 型曲线法研究西梅特征香气[J]. 食品科学, 2020, 41(22): 271−278. ［ZHANG Yipeng, LIAO Tougen, HE Banghua, et al. Identification of characteristic aroma compounds in prunes using gas chromatography-olfactometry, odor activity value and S-curve method [J]. Food Science, 2020, 41(22): 271−278.］

［28］ 张玎婕, 胡超, 朱远洋, 等. 不同品种及产地西梅香气成分差异性研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(23): 33−40. ［ZHANG Dingjie, HU Chao, ZHU Yuanyang, et al. Study of differences among different prune varieties and producing areas in prune aroma components[J]. Food Research and Development, 2021, 42(23): 33−40.］

［29］ 吴远星, 聂小双, 尚磊, 等. 采前喷施 $CaCl_2$ 对蜂糖李果实贮藏品质和活性氧代谢的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 99−109. ［WU Yunxing, NIE Xiaoshuang, SHANG Lei, et al. Effects of pre-harvest spraying $CaCl_2$ on fruit storage quality and reactive oxygen species metabolism of postharvest 'Fengtang' plum fruit[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2025, 53(1): 99−109.］

［30］ 李斌斌, 吴忠红, 张锦强, 等. 采前喷施氯化钙结合采后水杨酸处理对甜樱桃贮藏品质及果实软化的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 363−372. ［LI Binbin, WU Zhonghong, ZHANG Jinqiang, et al. Effect of pre-harvest calcium chloride spray combined with post-harvest salicylic acid treatment on storage quality and fruit softening of sweet cherries[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 363−372.］