DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250814004
引用格式: 宣晓婷, 周阳, 车浩妍, 等. 采前 1-甲基环丙烯结合采后 Ag/ZSM-5 分子筛纳米保鲜纸对东魁杨梅成熟度及采后品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 142–153.
XUAN XT, ZHOU Y, CHE HY, *et al*. Effects of preharvest 1-methylcyclopropene combined with post-harvest Ag/ZSM-5 zeolite nano-preservation paper on maturity and post-harvest quality of *Myrica rubra* cv. Dongkui [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 142–153. (in Chinese with English abstract).

采前 1-甲基环丙烯结合采后 Ag/ZSM-5 分子筛纳米保鲜纸对东魁杨梅成熟度及采后品质的影响

宣晓婷[1], 周　阳[2], 车浩妍[2], 尚海涛[1], 林旭东[1], 朱　麟[1*]
(1. 宁波市农业科学研究院农产品加工研究所, 宁波　315100; 2. 浙江药科职业大学食品学院, 宁波　315500)

摘　要: 目的　探究采前 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)处理与采后 Ag/ZSM-5 分子筛纳米保鲜纸对东魁杨梅成熟进程及贮藏品质的影响。**方法**　基于留树期果实外观、果径、可溶性固形物、可滴定酸和色泽等方面评估采前 1-MCP 喷施对杨梅果实成熟度的影响, 同时协同采后 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术, 分析其对杨梅常温和低温贮藏环境下失重率、糖酸度、质构、色泽、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)活性的影响。**结果**　采前 1-MCP 处理可有效延缓东魁杨梅留树期成熟进程, 推迟转色启动 4 d, 抑制果实膨大, 且对降低杨梅采后低温贮藏的失重率具有一定作用, 维持了果实糖酸度和色泽, 提高了果实 POD 酶活性, 从而延缓果实衰老。同时, 采后单一 Ag/ZSM-5 纳米保鲜纸降低了杨梅果实常温贮藏失重率, 维持果实硬度、胶黏性及红色色泽(*a*), 并减轻细胞膜损伤。采前采后协同处理显著降低了低温贮藏环境下杨梅的 PPO 酶活性 86.31%, 延缓膜脂过氧化进程。**结论**　采前喷施 1-MCP 可延迟杨梅成熟, 同时联合采后 Ag/ZSM-5 纳米保鲜纸通过维持东魁杨梅常温和低温贮藏期的果实品质及提升抗氧化活性, 从而显著增强果实耐贮性并延长保鲜期。

关键词: 东魁杨梅; 1-甲基环丙烯; Ag/ZSM-5 分子筛纳米保鲜纸; 贮藏; 品质

Effects of preharvest 1-methylcyclopropene combined with post-harvest Ag/ZSM-5 zeolite nano-preservation paper on maturity and post-harvest quality of *Myrica rubra* cv. Dongkui

XUAN Xiao-Ting[1], ZHOU Yang[2], CHE Hao-Yan[2], SHANG Hai-Tao[1],
LIN Xu-Dong[1], ZHU Lin[1*]
(1. *Institute of Agricultural Products Processing*, *Ningbo Academy of Agricultural Sciences*, *Ningbo* 315100, *China*;
2. *College of Food Science and Technology*, *Zhejiang Pharmaceutical University*, *Ningbo* 315500, *China*)

收稿日期: 2025-08-14
基金项目: 宁波市公益类科技计划项目(2025S009); 宁海县农业科技攻关项目(2025KJ07)
第一作者: 宣晓婷(1991—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品贮藏与非热加工。E-mail: xuanxiaoting163@163.com
***通信作者:** 朱麟(1984—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为农产品保鲜与高值化利用。E-mail: zhulin0822@163.com

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of preharvest 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment and post-harvest Ag/ZSM-5 zeolite nano-preservation paper on the maturation process and storage quality of *Myrica rubra* cv. Dongkui. **Methods** The effects of preharvest 1-MCP spraying on fruit maturity was evaluated based on in-tree parameters including appearance, fruit diameter, soluble solids content, titratable acidity, color indices and so on. Concurrently, the synergistic effects of post-harvest Ag/ZSM-5 zeolite nano-preservation technology were analyzed under both ambient and low-temperature storage conditions, with assessments of weight loss, sugar-acid profile, texture, color, polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD) enzyme activities. **Results** Preharvest 1-MCP treatment effectively delayed the in-tree maturation process, postponing color initiation by 4 days and suppressing fruit expansion. It also reduced post-harvest weight loss during low-temperature storage, maintained sugar-acid ratio balance and color stability, and enhanced POD enzyme activity, thereby delaying fruit senescence. Meanwhile, standalone post-harvest Ag/ZSM-5 zeolite nano-preservation paper reduced weight loss under ambient storage, maintained fruit firmness and cohesiveness, preserved red hue (*a*), and alleviated cell membrane damage. Furthermore, the combined pre- and post-harvest treatments drastically reduced PPO enzyme activity by 86.31% and mitigated membrane lipid peroxidation during low-temperature storage. **Conclusion** Preharvest 1-MCP application delays bayberry maturation, while its integration with post-harvest Ag/ZSM-5 zeolite nano-preservation paper significantly enhances storage tolerance and extends shelf life under room and low temperature by preserving fruit quality and elevating antioxidant activity during storage.

KEY WORDS: *Myrica rubra* cv. Dongkui; 1-methylcyclopropene; Ag/ZSM-5 zeolite nano-preservation paper; storage; quality

0 引 言

东魁杨梅 (*Myrica rubra* cv. Dongkui)作为中国南方特色浆果, 其色泽艳丽、风味浓郁、酸甜适宜, 富含花色苷、多酚、黄酮等抗氧化物质, 具有较高的营养价值[1]。主产区浙江省年产量达 40 万吨, 占全省总量 55%, 其果实大、甜度高, 成为电商和出口市场的首选。然而, 由于其采收期多集中于梅雨高温季节, 果实缺乏外果皮保护导致采后机械损伤高, 微生物快速侵染, 采后生理代谢旺盛, 果实衰老加速, 造成杨梅采后损耗大且常温货架期短[2]。因此丞需有效的保鲜技术以延长杨梅贮藏期, 对拓宽杨梅的市场半径和满足市场需求具有重要意义。

目前关于东魁杨梅的采后保鲜技术主要有低温保鲜、气调保鲜、化学保鲜、生物保鲜等[3]。其中 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene,1-MCP)是一种高效常用的保鲜剂, 通过与植物体表面的乙烯受体不可逆结合, 进而减少内外源乙烯作用于果实出现后熟现象, 对延缓果实采后衰老和维持品质具有显著效果[4]。有学者将 1-MCP 与预冷联合处理, 通过熏蒸方式可显著延长杨梅保鲜期至 11~12 d[5], 但熏蒸操作复杂, 对实施场地有一定限制。已有前期研究表明, 采前使用 1-MCP 可以延缓李子[6]、苹果[7]、葡萄[8]、石榴[9]等果实的采后衰老, 延长采后贮藏期且操作简单[10]。罗冬兰等[6]应用采前喷施 1 μg/L 1-MCP 结合 1 mmol/L 水杨酸可以显著抑制李子失重率、腐烂率的增加, 还可有效维持糖酸、维生素 C、硬度等品质指标。李英丽等[10]证实采前 1-MCP 处理可以降低‘Bartlett’梨虎皮病, 通过降低呼吸速率、乙烯生成速率同时提高抗氧化能力, 显著延长贮藏期 1 个月。因此, 采前 1-MCP 在果品采后保鲜中已有广泛应用且效果显著, 但采前1-MCP保鲜技术在杨梅果品上的应用未有报道。

此外, 金属催化型乙烯脱除剂作为新一代高效乙烯脱除技术已逐渐应用于果蔬采后保鲜, 其核心技术是使用 Ag/ZSM-5 分子筛纳米催化材料[11]。这种材料构建了具有适当孔径的纳米级分子筛结构, 并负载了高度分散的纳米 Ag 颗粒作为活性位点。当乙烯分子吸附在催化剂表面时, 可以在室温下迅速与材料中的活性氧发生催化氧化反应, 将乙烯高效转化为二氧化碳(CO_2)和水(H_2O)。数据显示, 在 25 ℃的环境下, 该材料在 405 min 内能够实现接近100%的乙烯分解率[12]。目前已有企业制造投产以该种材料为填充物的各式保鲜材料, 为果品采后保鲜提供新技术新方法。

本研究应用 1-MCP 采前保鲜技术和 Ag/ZSM-5 分子筛纳米保鲜技术, 探究其对东魁杨梅留树期及采后常温与低温贮藏品质的影响, 以期为杨梅保鲜提供新方法与新思路, 为杨梅产业的可持续发展提供有力支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

采前喷施试验选址位于浙江省宁海县胡陈乡创平家庭农场, 选择树龄(7 年)、树型接近的杨梅树作为采前喷施试验的供试材料, 同时其所结果实挑选形态完整、大小均

匀、无机械损伤的作为采后贮藏试验的供试材料。

1-MCP 保鲜粉剂(美国 AgroFresh 公司); 纳米保鲜垫(宁波爱博瑞斯环保科技有限公司); 醋酸、氯化钠、聚乙二醇(polyethylene glycol, PEG)、愈创木酚、过氧化氢(浓度 30%)(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 交联聚乙烯吡咯烷酮(crosslinked polyvinylpyrrolidone, PVPP)(色谱纯, 阿拉丁生化科技股份有限公司); TritonX-100(分析纯, 美国西格玛公司); 邻苯二酚(分析纯, 上海展开云化工有限公司)。

1.2 仪器与设备

PAL-BX/ACID F5 糖酸度仪(日本 ATAGO 爱拓股份有限公司); DDS-308A 数显电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司); Ci64 色差仪(美国爱色丽有限公司); MS105DU 精密天平[精度 0.0001 g, 梅特勒托利多科技(中国)有限公司]; Readmax1900 光吸收全波长酶标仪(上海闪谱生物科技有限公司); HC-3018R 高速冷冻离心机(安徽中科中佳科学仪器有限公司); VORTEX1 振荡器(德国 IKA 公司); FE28 型 pH 计[梅特勒托利多科技(中国)有限公司]; 1053 型数显游标卡尺(永康市飞尔工贸有限公司)。

1.3 方 法

1.3.1 采前保鲜处理

采前 1-MCP 喷施试验共设 2 个处理, 分别为: (1)未喷施处理组(CK 组); (2) 1-MCP 喷施处理组(剂量为 833 mg/m^2)(1-MCP 组)。试验于 2025 年 6 月 12 日(杨梅果实进入转红期)在梅园敞开环境下处理, 采用气溶胶喷雾器喷施一次, 按照杨梅树 20 m^2 占地面积, 计算相应浓度的 1-MCP 用量, 使用前需稀释 12 倍使用, 每个处理选用 3 棵果树, 分别在第 1、5、9、13 d 测定杨梅留树期品质指标。

1.3.2 采后保鲜处理

采集成熟的杨梅果实进行采后保鲜试验共设 5 个处理, 分别为(1)常温贮藏试验: ① CK_1: 未采前喷施杨梅果+普通聚乙烯(polyethylene, PE)盒包装; ② NM_1: 未采前喷施杨梅果+纳米保鲜纸& PE 盒; (2)低温贮藏试验: ① CK_2: 未采前喷施杨梅果+普通 PE 盒包装; ② CK_3: 采前喷施杨梅果+普通 PE 盒包装; ③ NM_3: 采前喷施杨梅果+纳米保鲜纸& PE 盒。常温贮藏试验每天测定各项指标进行评估, 低温贮藏试验每隔 3 d 测定各项指标, 每次随机选取 6 个杨梅果实。

1.4 测定方法

1.4.1 果径测定

采用游标卡尺测定留树期杨梅果实的横纵径。

1.4.2 可溶性固形物、可滴定酸测定

参考谢浩鹏[13]的方法, 利用糖酸度仪分别测定杨梅果肉样品的可溶性固形物(total soluble solid, TSS)和可滴定酸(titratable acid, TA), 并计算固酸比(TSS/TA)。

1.4.3 色差测定

参考孙华军等[14]的方法, 利用色差仪测定杨梅果实表面色差值, 记录 L、a 和 b, 每个样品重复 6 次, 取其平均值。其中 L 表示明暗值, 正值为明、负值为暗; a 表示红绿值, 正值为红色、负值为绿色; b 表示黄蓝值, 正值为黄色、负值为蓝色。以 CK 组果实成熟采摘后的色值为初始值(L_0、a_0 和 b_0), 按公式(1)计算色差(ΔE)。

$$\Delta E=\sqrt{(\Delta L)^2+(\Delta a)^2+(\Delta b)^2} \tag{1}$$

式中: $\Delta L=L-L_0$; $\Delta a=a-a_0$; $\Delta b=b-b_0$。

1.4.4 质构测定

利用质构仪测定杨梅果实的质构, 探头 P/5, 测前速度 1 mm/s, 测试速度 2 mm/s, 测后速度 1 mm/s, 测试距离 5 mm, 重复测定 6 次取平均值作为最终结果。

1.4.5 腐烂率、失重率测定

腐烂率的测定采用目测法, 计算如公式(2)。

$$\text{腐烂率}/\%=\frac{\text{腐烂果实数量}}{\text{总果实数量}}\times 100\% \tag{2}$$

失重率的测定采用称重法, 计算如公式(3)。

$$\text{失重率}/\%=\frac{\text{初始质量}-\text{测量质量}}{\text{初始质量}}\times 100\% \tag{3}$$

1.4.6 相对电导率测定

取大小一致的约 10 g 杨梅样品, 置于锥形瓶中, 加入 100 mL 蒸馏水; 于振荡器上匀速振荡 1 h, 采用电导率仪测定电导率(P_1), 之后将锥形瓶于沸水浴加热 10 min, 流动水冷却至室温后再测定电导率(P_2), 按照公式(4)计算。

$$\text{相对电导率}/\%=\frac{P_1-P_0}{P_2-P_0}\times 100\% \tag{4}$$

式中: P_0 为蒸馏水的电导率值。

1.4.7 多酚氧化酶活性测定

多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活性测定参考曹建康[15]的方法, 称量 3 g 样品, 加入 4 mL 0.1 mol/L pH 5.5 醋酸-醋酸钠提取缓冲液[含 0.1 mmol/L PEG, 4% PVPP 和 1% TritonX-100], 冰浴匀浆, 于 4 ℃离心(10000 r/min, 15 min)后取上清液即为酶提取液。

吸取 150 μL 50 mmol/L 邻苯二酚溶液, 加入 150 μL 酶提取液, 测定 4 min 内 420 mm 处吸光值变化。以每分钟吸光值增加 1 为 1 个活力单位。结果以 U/g 表示。

1.4.8 过氧化物酶活性测定

过氧化物酶(peroxidase, POD)活性测定参考曹建康[15]的方法, 酶提取液同 PPO 的提取方法。吸取 180 μL 25 mmol/L 愈创木酚溶液, 加入 60 μL 酶提取液, 加入 10 μL 0.5 mol/L 过氧化氢溶液。测定 4 min 内 470 mm 处吸光值变化。以每分钟吸光值增加 1 为 1 个活力单位。结果以 U/g 表示。

1.5 数据处理

所有试验结果均平行测定 3 次, 测定所得数据均以平

均值±标准偏差的形式表示, 数据采用 Origin 8.5 软件进行分析与作图。

2 结果与分析

2.1 采前保鲜处理对东魁杨梅留树期外观的影响

采前 1-MCP 处理对东魁杨梅留树期外观的影响如图 1 所示。由图 1 可知, CK 组杨梅从 5 d 开始转色, 而 1-MCP 组杨梅从 9 d 开始转色, 说明相较于 CK 组, 采前 1-MCP 喷施组的成熟度相对较低, 表明 1-MCP 处理可以延缓东魁杨梅留树期的成熟度, 这与乙烯在果实色素代谢中的调控作用密切相关。已有研究证实采前 1-MCP 处理对苹果[16]、百香果[17]、梨[18]等呼吸跃变型果品有作用。杨梅作为非呼吸跃变型果品, 但其成熟进程仍受乙烯调控, 表明采前 1-MCP 处理在非跃变型果品中也有一定应用前景。

2.2 采前保鲜处理对东魁杨梅留树期果径的影响

果径是判断东魁杨梅果实外观品质最直观的检测方法, 由图 2 可知, 杨梅果实的横纵径比接近于 1, 说明果实偏圆润型。随着杨梅成熟度的推进, 杨梅果实的横径和纵径呈上升趋势。相较于 CK 组, 采前喷施 1-MCP 组的果实横纵径更小, 说明采前 1-MCP 处理可以延缓果实的成熟进程, 这与留树期外观数据相一致。研究表明 1-MCP 通过抑制乙烯信号通路, 间接调控了与细胞膨大和物质积累相关的生理过程, 这一机制在梨、猕猴桃等果实中已有报道[19]。

2.3 采前保鲜处理对东魁杨梅留树期糖酸度的影响

TSS 含量和 TA 能直接反映东魁杨梅留树期品质的变化, 也是判定其成熟度的重要标志之一。图 3 为采前喷施 1-MCP 对东魁杨梅留树期 TSS 含量、可滴定酸和固酸比的影响, 由图 3 可知, 随着成熟进程的推进, 杨梅果实的 TSS/TA 逐渐上升, TSS 先下降后上升, TA 逐渐下降。其中采前喷施后前 9 d, 1-MCP 组杨梅的 TSS/TA 均小于 CK 组, 说明 1-MCP 组杨梅的成熟度更低; 而采前喷施后第 13 d, 1-MCP 组杨梅的 TSS/TA 高于 CK 组, 这是由于此时 1-MCP 组杨梅的 TA 值显著下降, 可能的原因是由于 1-MCP 阻断乙烯信号传导, 进而直接影响有机酸的合成途径关键酶活性, 同时由于整体成熟进程的延缓影响了酸代谢相关的次级过程[20]。因此采前 1-MCP 处理可延缓杨梅的糖酸度和成熟度。

2.4 采前保鲜处理对东魁杨梅留树期色泽的影响

色泽是杨梅商品性的重要评价指标, 可判断果实成熟度[21]。目前, 较为常用的是 Lab 法。该法采用明度 L 和色度坐标 a、b 来表示颜色在色空间中的位置, 其中 L 表示颜色的明度, a 正值表示偏红、负值表示偏绿。色泽变化(L、a、b)与成熟度和花青苷积累水平密切相关[22]。由图 4 可知, 随着成熟进程的推进, 杨梅果实的 L 和 b 逐渐下降、a 呈先上升后下降趋势, 这与前人研究结果相一致[21]。东魁杨梅在转色期和成熟期其果实颜色由亮变暗、由绿转红至深红, 其中 a 峰值的出现代表杨梅转红期向成熟期发展, CK 组杨梅果实的 a 峰值出现在第 5 d, 而 1-MCP 组杨梅果实的 a 峰值出现在第 9 d, 表明 1-MCP 处理对杨梅果实的转色与成熟均有影响。目前关于 1-MCP 对杨梅采前色泽的影响暂无报道, 但有研究证实 1-MCP 能显著延缓非跃变型果实荔枝果皮的褪绿转红过程[23]。

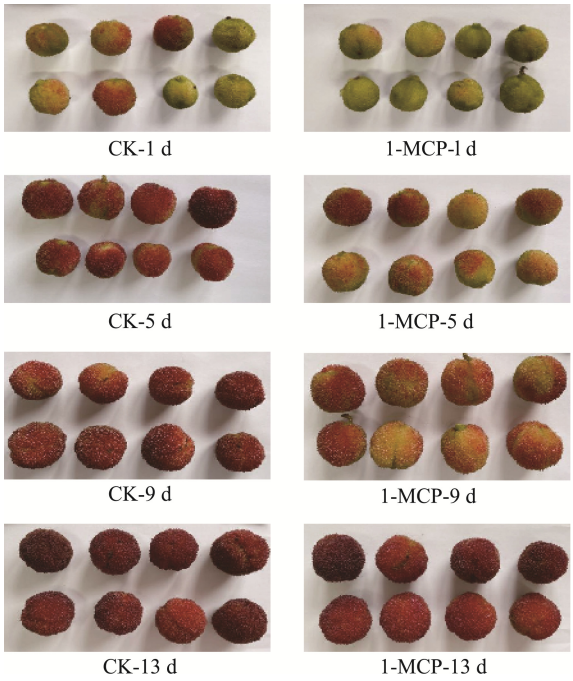
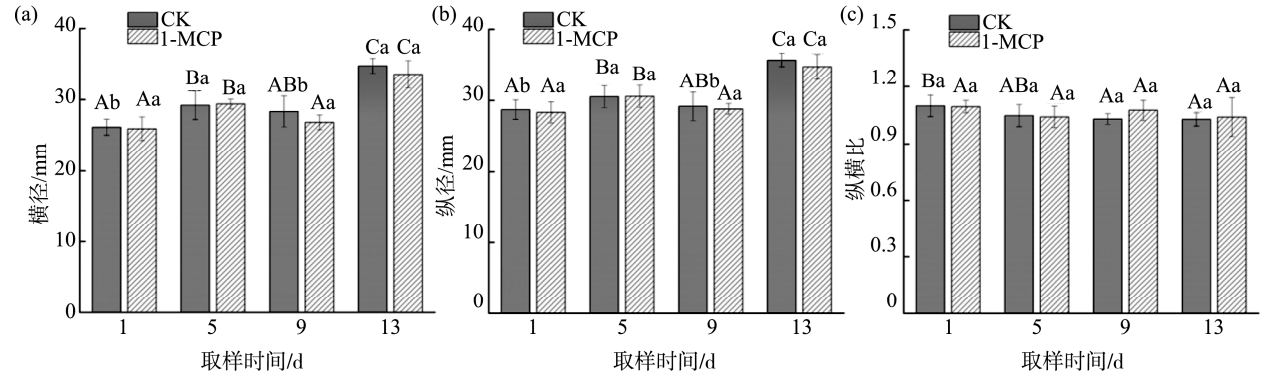


图 1 采前 1-MCP 处理对东魁杨梅留树期外观的影响(n=3)
Fig.1 Effects of preharvest 1-MCP treatment on the appearance of *Myrica rubra* cv. Dongkui during on-tree storage (n=3)

2.5 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅失重率的影响

失重率主要由蒸腾作用引起, 是衡量保鲜技术控水效果的核心指标, 可反映果实水分散失程度。失重过高导致果实萎蔫, 新鲜度和商品价值降低[24]。如图 5(a)所示, 杨梅的失重率随常温贮藏时间的延长而显著升高(P<0.05), 其中 NM_1 的失重率始终低于 CK 组, 但无显著性差异(P>0.05)。这可能是因为分子筛纳米保鲜纸通过其多孔结构高效吸附包装内过量水汽, 维持稳定的高湿度微环境, 抑制了杨梅果实的蒸腾作用和水分散失, 对延缓萎蔫有一定作用, 但由于保鲜纸的接触面积有限且常温贮藏环境杨梅品质劣变迅速, 导致其延缓效果有限。



注: 不同大写字母代表同组处理不同天数组的数据具有显著性差异(P<0.05), 不同小写字母代表相同天数不同处理组的数据在 T 检验下具有显著性差异(P<0.05), 下图同。

图 2 采前 1-MCP 处理对东魁杨梅留树期果径的影响(n=3)

Fig.2 Effects of preharvest 1-MCP treatment on the diameter of *Myrica rubra* cv. Dongkui during on-tree storage (n=3)

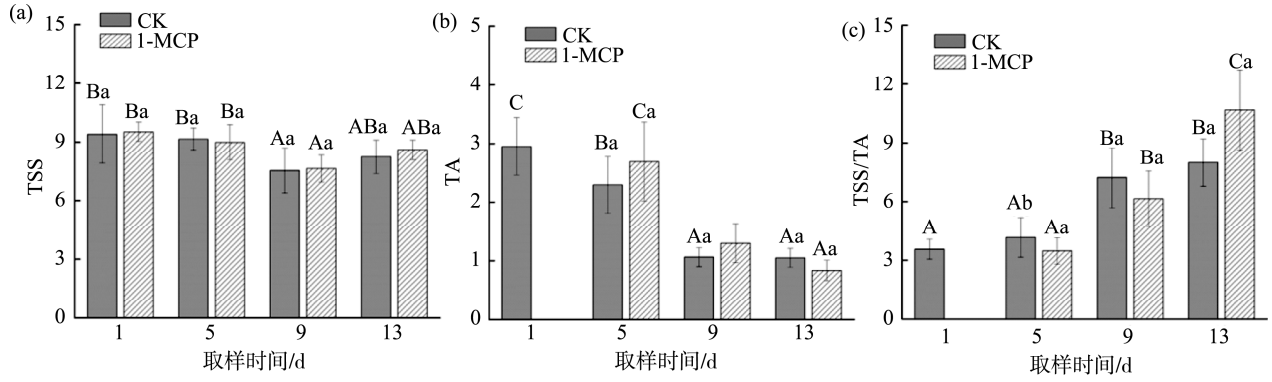


图 3 采前 1-MCP 处理对东魁杨梅留树期 TSS 和 TA 的影响(n=3)

Fig.3 Effects of preharvest 1-MCP treatment on the TSS and TA of *Myrica rubra* cv. Dongkui during on-tree storage (n=3)

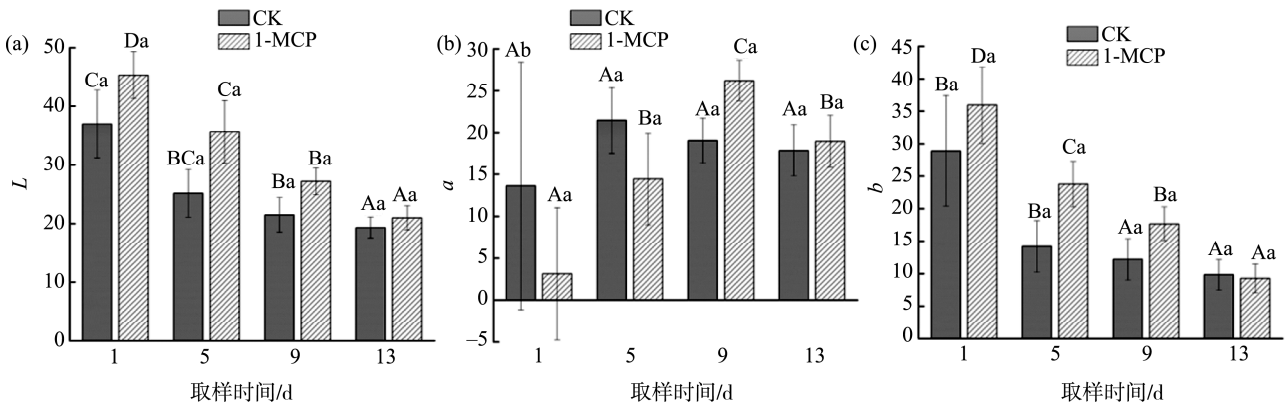


图 4 采前 1-MCP 处理对东魁杨梅留树期色泽的影响(n=3)

Fig.4 Effects of preharvest 1-MCP treatment on the color of *Myrica rubra* cv. Dongkui during on-tree storage (n=3)

图 5(b)是采前采后保鲜处理对东魁杨梅低温贮藏失重率的影响, 低温贮藏 12 d 内, 杨梅的失重率随着低温贮藏时间的延长而显著升高(P<0.05), 其中 CK_2 组的失重率始终高于 CK_3 和 NM_3 组, 说明采前 1-MCP 处理可显著降低杨梅采后低温贮藏期间的失重率。相较于 CK_3 组, NM_3 组的失重率并无显著差异(P>0.05), 说明采前保鲜

和采后保鲜处理并未有叠加增效, 可能是由于采前 1-MCP 处理使得杨梅失重率已显著下降, 分子筛纳米保鲜纸的保鲜效果相对就不显著。综上, 采前 1-MCP 保鲜处理可以降低杨梅采后贮藏失重率, 尤其在长期低温贮藏效果更为明显, 但协同分子筛纳米保鲜技术并未有协同增效作用。

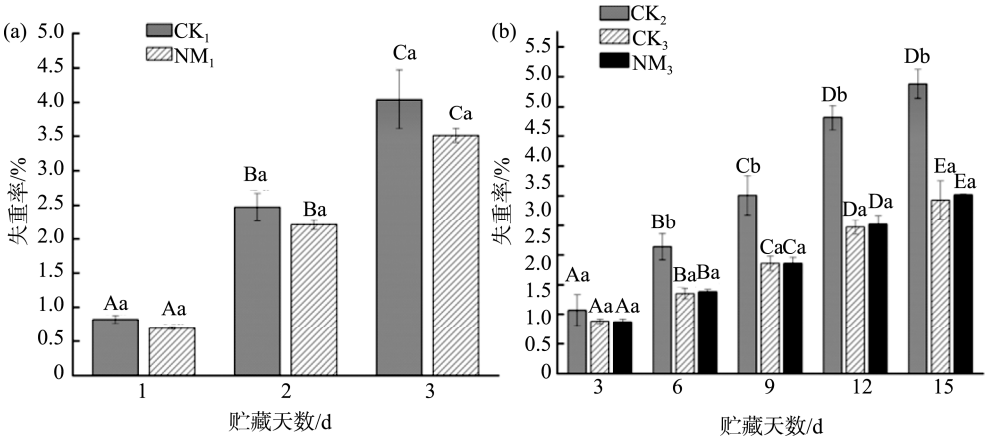


图 5 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅常温(a)和低温(b)贮藏失重率的影响(n=3)

Fig.5 Effects of Ag/ZSM-5 nano-preservation technology on weight loss rate of *Myrica rubra* cv. Dongkui during room temperature (a) and low temperature (b) storage (n=3)

2.6 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅糖酸度的影响

TSS 和 TA 是衡量杨梅果实滋味的重要指标, 二者比值(TSS/TA)也是决定果实风味平衡的关键参数[25]。如表 1 所示, 在常温贮藏期间, 各组杨梅果实的 TSS 均高于原始, 可能与水分损失导致的相对含量上升有关; 而 TA 值均低于原始且到贮藏第 3 dTA 值达到最低, 这是由于贮藏期间 TA 被果实作为呼吸底物消耗或转化成糖[25]。但 NM_1 组与 CK_1 组间 TSS、TA 及 TSS/TA 均无显著差异(P>0.05)。表明 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术主要通过物理阻隔调节微环境, 不会对杨梅滋味造成不利影响。

表 1 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅常温贮藏糖酸度的影响(n=3)

Table 1 Effects of Ag/ZSM-5 nano-preservation technology on sugar-acid ratio of *Myrica rubra* cv. Dongkui during room temperature storage (n=3)

贮藏天数/d	分组	TSS	TA	TSS/TA
0	原始	8.25±0.96	1.42±0.23	6.03±1.59
1	CK_1	$10.57±0.55^{Aa}$	$1.14±0.16^{Aa}$	$9.45±1.48^{Aa}$
	NM_1	$9.97±0.74^{Aa}$	$1.12±0.35^{Aa}$	$9.55±2.63^{Aa}$
2	CK_1	$10.74±1.33^{Aa}$	$1.27±0.27^{Aa}$	$8.86±2.62^{Aa}$
	NM_1	$10.13±0.35^{Aa}$	$1.19±0.34^{Aa}$	$9.07±2.17^{Aa}$
3	CK_1	$10.11±0.87^{Aa}$	$0.92±0.27^{Aa}$	$11.97±3.86^{Aa}$
	NM_1	$10.74±0.62^{Aa}$	$0.95±0.26^{Aa}$	$12.09±3.77^{Aa}$

注: 不同大写字母代表同组处理不同天数组的数据具有显著性差异(P<0.05), 不同小写字母代表相同天数不同处理组的数据在 T 检验下具有显著性差异(P<0.05)。下表同。

表 2 为采后 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅低温贮藏期间糖酸度的影响。由表 2 可知, 随着低温贮藏时间的延长, CK_2 组的 TSS 始终显著高于 CK_3 和 NM_3 组, 且 CK_3 和 NM_3 组间差异不显著(P>0.05), 此外各试验组 TA 值和 TSS/TA 值无显著差异(P>0.05)。说明采前 1-MCP 处理对杨梅采后低温贮藏的糖酸度维持有明显作用, 而采后 Ag/ZSM-5 纳米保鲜处理对其无明显影响。

表 2 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅低温贮藏糖酸度的影响(n=3)

Table 2 Effects of Ag/ZSM-5 nano-preservation technology on sugar-acid ratio of *Myrica rubra* cv. Dongkui during low temperature storage (n=3)

贮藏天数/d	分组	TSS	TA	TSS/TA
0	原始	8.25±0.96	1.42±0.23	6.03±1.59
3	CK_2	$10.68±0.50^{Ab}$	$0.97±0.22^{Aa}$	$11.40±2.33^{Aa}$
	CK_3	$8.55±0.46^{Ba}$	$0.88±0.10^{Aa}$	$9.80±1.21^{Aa}$
	NM_3	$8.26±0.59^{Aa}$	$0.78±0.13^{Aa}$	$10.77±1.72^{Aa}$
6	CK_2	$11.02±1.02^{Ab}$	$0.82±0.21^{Aa}$	$13.92±2.52^{Ab}$
	CK_3	$7.21±0.51^{Aa}$	$0.76±0.22^{Aa}$	$10.16±2.96^{Aab}$
	NM_3	$7.80±0.92^{Aa}$	$0.92±0.19^{Aa}$	$8.91±2.67^{Aa}$
9	CK_2	$10.27±0.78^{Ab}$	$0.85±0.26^{Aa}$	$12.84±3.10^{Ab}$
	CK_3	$7.65±0.40^{ABa}$	$0.94±0.17^{Aa}$	$8.39±1.59^{Aa}$
	NM_3	$7.92±0.80^{Aa}$	$0.82±0.15^{Aa}$	$9.81±1.69^{Aab}$
12	CK_2	$10.70±0.47^{Ab}$	$1.10±0.40^{Aa}$	$10.94±4.07^{Aa}$
	CK_3	$8.47±0.21^{Ba}$	$0.79±0.20^{Aa}$	$11.28±2.75^{Aa}$
	NM_3	$7.75±1.00^{Aa}$	$0.83±0.14^{Aa}$	$9.77±3.38^{Aa}$
15	CK_2	$10.47±0.88^{Ab}$	$0.90±0.23^{Aa}$	$12.53±4.30^{Aa}$
	CK_3	$8.00±1.07^{ABa}$	$0.85±0.32^{Aa}$	$10.66±4.52^{Aa}$
	NM_3	$7.80±0.68^{Aa}$	$0.80±0.18^{Aa}$	$10.37±3.31^{Aa}$

ZSM-5是一种微孔沸石材料, 其高比表面积和规整孔道结构具有良好的吸附性能, 可选择性吸收环境中的乙烯、CO_2等促进成熟的气体, 同时通过纳米 Ag 的抗菌作用抑制微生物滋生[26]。这种以调节微环境气体成分为主的保鲜方式, 虽能延缓腐烂, 但通常对果实内部糖酸代谢途径的干扰较小, 这与在草莓、樱桃等中应用纳米材料保鲜的研究结论一致[27]。此外, 采前 1-MCP 处理显著维持了低温贮藏期间 TSS 的稳定, 这是由于 1-MCP 降低了采后果实的呼吸强度与酶活性, 从而减缓了 TA 作为呼吸底物的消耗速率以及 TSS 的降解[28]。

2.7 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅质构的影响

质构参数是衡量果实口感的重要指标之一, 其中硬度反映果实抗变形能力, 咀嚼性表征咀嚼至吞咽所需功, 黏聚性体现组织内部结合力。这些参数共同决定果实口感, 其下降与细胞壁降解酶活性的增强和水分流失密切相关。如表 3 所示, 对于杨梅硬度与胶黏性, 贮藏第 2 d NM_1 组硬度(77.70±19.92)高于 CK_1 组(70.13±13.78); 至第 3 d, NM_1 组硬度(97.41±30.29)和胶黏性(39.13±19.76)甚至高于初始值及 CK_1 组(86.63±22.60 和 28.37±13.10)。表明 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术通过抑制水分损失, 有效维持果肉细胞膨压和细胞壁结构完整性。对于杨梅黏聚性, 第 2 d NM_1 组黏聚性(0.38±0.20)高于 CK_1 组(0.26±0.04), 反映其果肉组织细胞间黏结力保持更好, 可能与细胞膜完整性维持相关。此外, Ag/ZSM-5 纳米保鲜纸与对照组间咀嚼性及恢复力差异并不显著(P>0.05)。此外, 表 4 是采后 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅低温贮藏质构的影响。由表 4 可知, 各试验组的硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性、恢复力均无显著性差异(P>0.05), 仅 NM_3 组的黏聚性在第 3 d 有显著下降(P<0.05)。表明 15 d 低温贮藏期间东魁杨梅的质构品质参数无显著变化。

表 3 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅常温贮藏质构的影响(n=3)

Table 3 Effects of Ag/ZSM-5 nano-preservation technology on texture profile analysis of *Myrica rubra* cv. Dongkui during room temperature storage (n=3)

贮藏天数/d	分组	硬度	弹性	黏聚性	胶黏性	咀嚼性	恢复力
0	原始	92.16±27.97	0.88±0.11	0.29±0.07	25.65±6.79	23.12±8.41	0.03±0.01
1	CK_1	82.40±13.74^{Aa}	0.83±0.10^{Aa}	0.28±0.06^{Aa}	23.65±6.94^{Aa}	19.84±6.93^{Aa}	0.04±0.01^{Aa}
	NM_1	84.28±20.67^{Aa}	0.88±0.09^{Aa}	0.29±0.07^{Aa}	23.07±3.30^{Aa}	20.36±4.24^{Aa}	0.03±0.01^{Aa}
2	CK_1	70.13±13.78^{Aa}	0.95±0.07^{Aa}	0.26±0.04^{Aa}	17.77±3.66^{Aa}	17.00±4.44^{Aa}	0.04±0.01^{Aa}
	NM_1	77.70±19.92^{Aa}	0.91±0.13^{Ba}	0.38±0.20^{Ba}	27.88±10.91^{Aa}	25.54±10.67^{Aa}	0.03±0.01^{Aa}
3	CK_1	86.63±22.60^{Aa}	0.94±0.03^{Aa}	0.32±0.10^{Aa}	28.37±13.10^{Aa}	26.76±12.70^{Aa}	0.02±0.01^{Aa}
	NM_1	97.41±30.29^{Aa}	0.98±0.02^{Ba}	0.39±0.08^{Ba}	39.13±19.76^{Aa}	38.16±18.77^{Aa}	0.04±0.05^{Aa}

表 4 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅低温贮藏质构的影响(n=3)

Table 4 Effects of Ag/ZSM-5 nano-preservation technology on texture profile analysis of *Myrica rubra* cv. Dongkui during low temperature storage (n=3)

贮藏天数/d	分组	硬度	弹性	黏聚性	胶黏性	咀嚼性	恢复力
0	原始	92.16±27.97	0.88±0.11	0.29±0.07	25.65±6.79	23.12±8.41	0.03±0.01
3	CK_2	90.26±10.99^{Aa}	0.95±0.05^{Aa}	0.33±0.04^{Aab}	30.01±5.69^{Aa}	28.58±6.66^{Aa}	0.02±0.00^{Aa}
	CK_3	65.31±33.26^{Aa}	0.93±0.05^{Aa}	0.43±0.11^{Ab}	25.91±12.10^{Aa}	23.87±11.31^{Aa}	0.01±0.00^{Aa}
	NM_3	88.70±8.66^{Aa}	0.92±0.07^{Aa}	0.29±0.05^{Aa}	25.20±4.22^{Aa}	23.33±4.89^{Aa}	0.02±0.00^{Aa}
6	CK_2	112.41±35.08^{Aa}	0.94±0.04^{Aa}	0.34±0.04^{Aa}	38.56±12.95^{Aa}	36.14±12.35^{Aa}	0.03±0.02^{Aa}
	CK_3	81.80±11.23^{Aa}	0.94±0.08^{Aa}	0.35±0.09^{Aa}	27.82±5.92^{Aa}	26.43±6.25^{Aa}	0.02±0.00^{Aa}
	NM_3	82.81±26.16^{Aa}	0.95±0.04^{Aa}	0.45±0.24^{Aa}	33.78±9.87^{Aa}	32.36±10.84^{Aa}	0.02±0.00^{Aa}
9	CK_2	81.85±45.29^{Aa}	0.92±0.10^{Aa}	0.35±0.12^{Aa}	26.39±16.59^{Aa}	24.83±16.45^{Aa}	0.02±0.00^{Aa}
	CK_3	73.04±7.26^{Aa}	0.96±0.03^{Aa}	0.37±0.11^{Aa}	26.61±7.75^{Aa}	25.49±7.63^{Aa}	0.01±0.01^{Aa}
	NM_3	70.95±13.43^{Aa}	0.92±0.04^{Aa}	0.38±0.06^{Aa}	26.87±4.08^{Aa}	24.83±4.12^{Aa}	0.01±0.00^{Aa}
12	CK_2	70.92±42.27^{Aa}	0.99±0.09^{Aa}	0.33±0.06^{Aa}	23.13±12.88^{Aa}	22.72±12.30^{Aa}	0.02±0.01^{Aa}
	CK_3	77.32±13.39^{Aa}	0.93±0.06^{Aa}	0.31±0.11^{Aa}	24.08±10.71^{Aa}	22.41±10.70^{Aa}	0.01±0.00^{Aa}
	NM_3	62.46±32.08^{Aa}	0.94±0.05^{Aa}	0.37±0.08^{Aa}	23.06±10.91^{Aa}	21.71±10.20^{Aa}	0.02±0.00^{Aa}
15	CK_2	83.50±12.70^{Aa}	0.89±0.11^{Aa}	0.26±0.10^{Aa}	22.53±11.07^{Aa}	20.65±11.35^{Aa}	0.02±0.01^{Aa}
	CK_3	95.07±23.91^{Aa}	0.88±0.10^{Aa}	0.32±0.10^{Aa}	31.74±17.28^{Aa}	28.90±18.02^{Aa}	0.02±0.00^{Aa}
	NM_3	64.15±32.95^{Aa}	0.94±0.05^{Aa}	0.40±0.12^{Aa}	22.63±10.83^{Aa}	21.08±9.88^{Aa}	0.01±0.01^{Aa}

2.8 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅色泽的影响

色泽是水果商品性的重要评价指标。如表 5 所示,对于 a, 随着贮藏时间的延长, CK_1 组的 a 呈下降趋势, 而 NM_1 组的 a 差异不显著(P>0.05), 说明 CK 组杨梅的红色变化更为明显, 提示 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术可延缓杨梅红色色泽的劣变。对于 ΔE 值, CK 组和 NM 组的数值均未有显著性差异(P>0.05)。

表 6 为采后 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅低温贮藏色泽的影响。相比于 CK_2 组, CK_3 和 NM_3 组杨梅的 L 和 a 始终更高, 且在贮藏前期 CK_3 组更高、贮藏后期 NM_3 组更高, 这可能是由于采前 1-MCP 处理可以在杨梅表面形成一层复合膜, 有效抑制杨梅冷藏期间内源乙烯的释放, 降低呼吸代谢和延缓衰老进程[6], 但随着杨梅果实贮藏期的延长, 内源乙烯持续不断的释放, 采前 1-MCP 的作用随之下降, 采后 Ag/ZSM-5 纳米保鲜的作用在贮藏后期体现出来。综上, 采前 1-MCP 处理有利于维持杨梅采后低温贮藏期间的色泽, 且采后 Ag/ZSM-5 纳米保鲜对于贮藏后期的色泽维持有一定作用。

表 5 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅常温贮藏色泽的影响(n=3)

Table 5 Effects of Ag/ZSM-5 nano-preservation technology on color of *Myrica rubra* cv. Dongkui during room temperature storage (n=3)

贮藏天数/d	分组	L	a	b	ΔE
0	原始	21.18±2.13	19.89±4.86	11.19±3.03	/
1	CK_1	$19.19±1.97^{Aa}$	$14.12±4.15^{Aa}$	$6.55±2.83^{Aa}$	$7.75±5.25^{Aa}$
	NM_1	$19.15±1.78^{Aa}$	$13.63±4.26^{Aa}$	$5.61±2.22^{Aa}$	$8.76±4.85^{Aa}$
2	CK_1	$18.42±2.94^{Aa}$	$13.67±4.38^{Aa}$	$6.59±3.20^{Aa}$	$8.85±4.10^{Aa}$
	NM_1	$21.12±2.45^{Aa}$	$15.90±2.68^{Aa}$	$8.06±2.96^{Aa}$	$6.25±2.44^{Aa}$
3	CK_1	$20.42±2.03^{Aa}$	$13.72±2.71^{Aa}$	$7.98±4.74^{Aa}$	$8.59±2.07^{Aa}$
	NM_1	$19.10±1.73^{Aa}$	$14.37±3.65^{Aa}$	$6.74±2.16^{Aa}$	$7.55±4.25^{Aa}$

注: /为无此项, 下表同。

表 6 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅低温贮藏色泽的影响(n=3)

Table 6 Effects of Ag/ZSM-5 nano-preservation technology on color of *Myrica rubra* cv. Dongkui during low temperature storage (n=3)

贮藏天数/d	分组	L	a	b	ΔE
0	原始	21.03±1.52	19.86±2.70	10.51±2.19	/
3	CK_2	$18.21±1.62^{Aa}$	$14.46±1.74^{Aa}$	$6.28±0.88^{Aa}$	$7.50±2.21^{Ab}$
	CK_3	$20.37±2.50^{Aa}$	$16.34±2.35^{Aa}$	$7.98±1.57^{Aab}$	$5.02±2.65^{Aab}$
	NM_3	$19.11±1.38^{ABa}$	$17.54±2.64^{Aa}$	$9.31±1.40^{Ab}$	$3.93±2.20^{Aa}$
6	CK_2	$17.82±2.30^{Aa}$	$13.75±2.68^{Aa}$	$8.16±2.48^{Aa}$	$7.85±2.89^{Aa}$
	CK_3	$20.96±2.30^{Ab}$	$16.16±1.82^{Aa}$	$9.61±2.98^{Aa}$	$5.08±1.98^{Aa}$
	NM_3	$18.04±1.49^{Aab}$	$14.60±1.70^{Aa}$	$6.49±1.34^{Aa}$	$7.50±1.65^{Aa}$
9	CK_2	$17.89±2.57^{Aa}$	$13.70±2.95^{Aa}$	$5.29±1.31^{Aa}$	$8.84±3.64^{Aa}$
	CK_3	$21.67±2.54^{Ab}$	$15.59±1.99^{Aa}$	$8.50±2.59^{Ab}$	$5.81±1.93^{Aa}$
	NM_3	$18.95±1.68^{ABab}$	$14.55±2.40^{Aa}$	$7.07±2.41^{Aab}$	$6.98±3.05^{Aa}$
12	CK_2	$17.09±2.52^{Aa}$	$13.15±3.98^{Aa}$	$5.12±2.46^{Aa}$	$9.71±4.74^{Aa}$
	CK_3	$18.58±2.93^{Aa}$	$14.45±3.15^{Aa}$	$6.66±2.90^{Aab}$	$8.04±3.15^{Aa}$
	NM_3	$20.05±2.00^{ABa}$	$15.89±3.00^{Aa}$	$9.40±2.58^{Ab}$	$5.01±3.33^{Aa}$
15	CK_2	$19.43±1.25^{Aa}$	$15.33±2.76^{Aa}$	$6.02±1.43^{Aa}$	$6.78±2.81^{Aa}$
	CK_3	$20.33±1.95^{Aa}$	$16.56±2.80^{Aa}$	$8.07±1.61^{Aa}$	$4.88±2.57^{Aa}$
	NM_3	$21.29±1.42^{Ba}$	$15.52±1.80^{Aa}$	$7.67±2.19^{Aa}$	$5.71±1.81^{Aa}$

2.9 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅相对电导率的影响

相对电导率是反映植物膜系统状况的一个重要生理生化指标，植物在衰老或者逆境下细胞膜容易破裂，膜蛋白受伤害因而使胞质的胞液外渗而使相对电导率增大，是组织衰老的重要标志[29]。如图 6(a)所示，各组相对电导率均随贮藏时间延长而升高，但 NM_1 组始终低于 CK_1 组，但无显著性差异。至第 3 d，CK_1 组电导率达(43.75±3.07)%，而 NM_1 组仅(35.13±2.56)%。结果表明 Ag/ZSM-5 纳米保鲜有效减轻了细胞膜脂质过氧化损伤，维持了膜结构的完整性和选择透过性。该结果与之前的失重率降低、硬度保持具有内在关联，共同延缓了细胞衰老进程。

图 6(b)是 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅低温贮藏相对电导率的影响，采前 1-MCP 处理和采后 Ag/ZSM-5 纳米保鲜处理可降低杨梅的相对电导率，说明采前和采后处理可以减少细胞损伤，延缓果实衰老，这与之前的试验结果相一致。类似的研究结果已有报道，如罗冬兰等[17]采用 1-MCP 结合褪黑素处理百香果发现可显著抑制果实贮藏后期果皮相对电导率的增加。

2.10 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅 PPO 活性的影响

PPO 是一种含有铜元素的氧化还原酶，广泛存在于植物、真菌和昆虫的细胞质内[30]。作为植物多样呼吸电子传递链中的关键末端氧化酶，PPO 在调节植物在应激条件下的呼吸代谢方面发挥重要作用[31]。图 7 为 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅常温和低温贮藏 PPO 活性的影响，结果显示随着贮藏时间的延长，常温贮藏期间杨梅果实中 PPO 活性均显著上升(P<0.05)，CK_1 和 CK_2 空白组的 PPO 活性最高。在贮藏结束时，常温贮藏处理组 NM_1 酶活性比空白组降低了 77.21%，低温贮藏处理组 CK_3 和 NM_3 酶活性比空白组分别降低了 69.17%和 86.31%，说明采前 1-MCP 和 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对采后杨梅贮藏期间 PPO 活性抑制有显著效

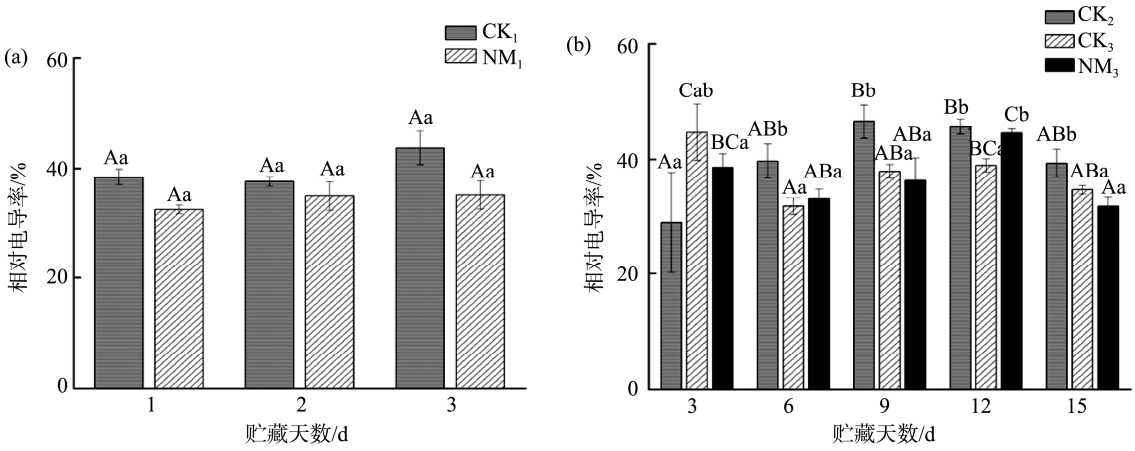


图 6 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅常温(a)和低温(b)贮藏相对电导率的影响(n=3)

Fig.6 Effects of Ag/ZSM-5 nano-preservation technology on relative conductivity of *Myrica rubra* cv. Dongkui during room temperature (a) and low temperature (b) storage (n=3)

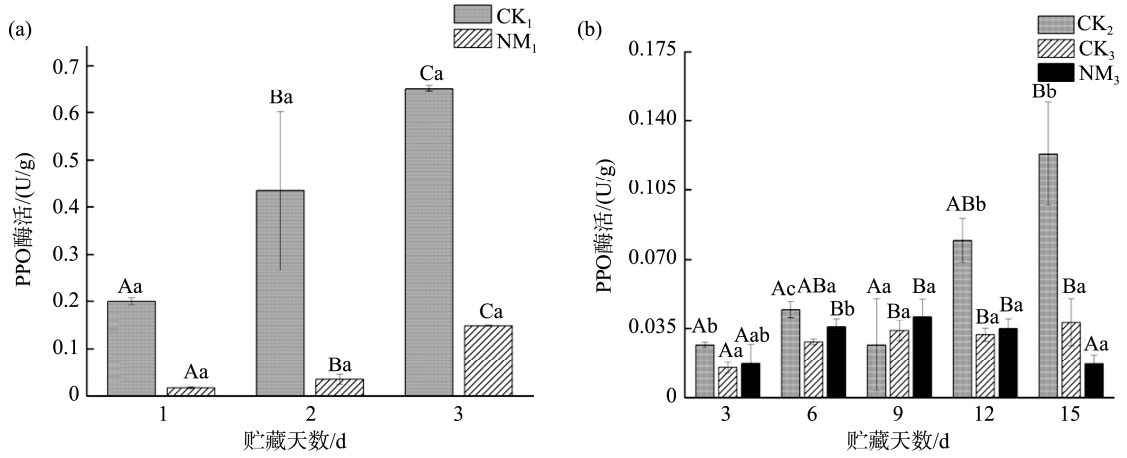


图 7 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅常温(a)和低温(b)贮藏 PPO 活性的影响(n=3)

Fig.7 Effects of Ag/ZSM-5 nano-preservation technology on PPO enzymatic activity of *Myrica rubra* cv. Dongkui during room temperature (a) and low temperature (b) storage (n=3)

果。类似的研究结果已有学者报道[32–33], 戴理民[33]研究发现构建的淀粉纳米晶复合涂膜材料可很好地抑制 PPO 活性, 从而达到良好的保鲜效果。李英丽等[18]证实采前喷施 1-MCP 对贮藏期巴梨果实中的 PPO 活性有显著抑制作用, 这是由于 1-MCP 降低了果实质膜过氧化程度, 有效避免了细胞结构破坏继而引起的 PPO 活性增加。

2.11 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅 POD 活性的影响

POD 在活性氧(reactive oxygen species, ROS)代谢途径中发挥关键作用, 其催化过氧化氢参与的各种氧化反应及芳香族化合物等物质的氧化反应[34], 作为抗氧化酶清除 ROS 并维持其代谢平衡, 实现对细胞氧化损伤的保护, 最终减少果实腐烂并延长贮藏期[35–36]。图 8 为 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅常温和低温贮藏 POD 活性的影响, 由图 8 可以看出, 常温贮藏试验组 POD 活性呈先下降后上升, 且 CK_1 和 NM_1 组 POD 活性仅贮藏第 2 d 具有显著差异(P<0.05); 低温贮藏试验组 POD 活性无明显规律, CK_3 组 POD 活性呈波动上升趋势, 而 NM_3 组呈波动下降趋势。结果表明, 采前 1-MCP 处理可通过提高杨梅采后低温贮藏期间的 POD 抗氧化酶活性, 而延缓果实衰老, 这与刘绪等[37]和 MARTINS 等[38]在甜樱桃、葡萄上的研究结果相类似。罗冬兰等[17]研究发现采前 1-MCP 显著提高百香果 SOD、CAT、POD 等抗氧化酶活性, 进而延缓果实衰老。曹森等[39]同样研究证实采前 0.5 μL/L 的 1-MCP 可以保持樱桃番茄的 SOD、POD、LOX 酶活性, 进而维持较高的贮藏品质。

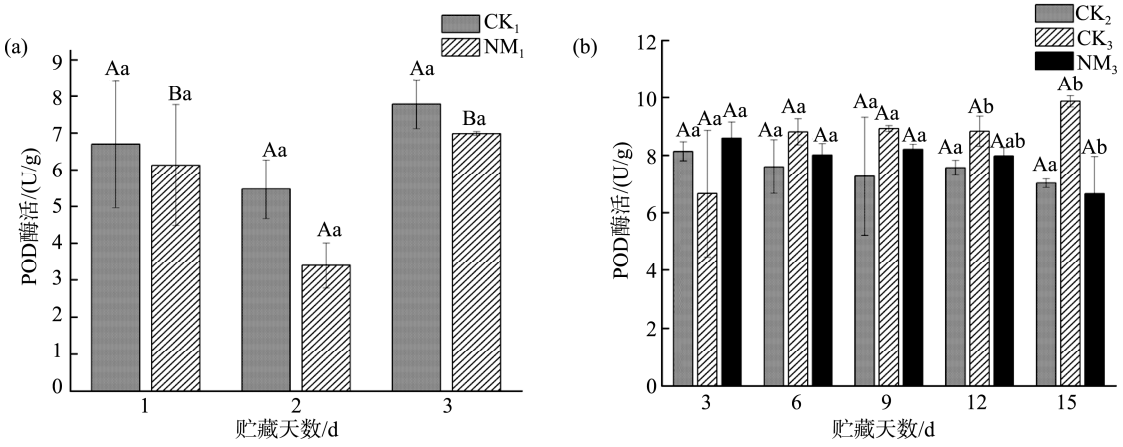


图 8 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术对东魁杨梅常温(a)和低温(b)贮藏 POD 酶活性的影响(n=3)

Fig.8 Effects of Ag/ZSM-5 nano-preservation technology on POD enzymatic activity of *Myrica rubra* cv. Dongkui during room temperature (a) and low temperature (b) storage (n=3)

3 结 论

本研究探究了采前 1-MCP 处理与采后 Ag/ZSM-5 分子筛纳米保鲜技术对东魁杨梅成熟进程及贮藏品质的影响。结果表明, 采前 1-MCP 处理可有效延缓东魁杨梅留树期成熟进程, 推迟转色启动和果实膨大, 且对降低杨梅采后低温贮藏的失重率具有一定作用, 维持了果实糖酸度和色泽, 提高了果实 POD 抗氧化酶活性, 从而延缓果实衰老。同时, 采后 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术通过物理吸附调控微环境湿度, 降低了杨梅果实常温贮藏失重率, 维持果实硬度、胶黏性及红色色泽(a), 并减轻细胞膜损伤。此外, 两者协同处理对于抑制品质劣变关键酶 PPO 和 POD 的活性具有一定作用, 其中在常温贮藏中纳米保鲜使 PPO 活性降低 77.21%, 在低温贮藏中 1-MCP 联合纳米保鲜进一步降低 PPO 活性 86.31%, 延缓膜脂过氧化进程。综上所述, 采前喷施 1-MCP 可延迟杨梅成熟, 同时联合采后 Ag/ZSM-5 纳米保鲜技术通过维持东魁杨梅贮藏期的果实品质及提升抗氧化活性, 从而显著增强果实耐贮性并延长保鲜期。

参考文献

[1] 潘牧, 李俊, 刘辉, 等. 4 种不同酵母酿造杨梅酒的风味特征差异分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(23): 214–226.
PAN M, LI J, LIU H, *et al*. Difference analysis of flavor characterization of *Myrica rubra* wines fermented with 4 kinds of different yeast strains [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(23): 214–226.

[2] ZHANG WS, CHEN KS, ZHANG B, *et al*. Postharvest responses of Chinese bayberry fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 37(3): 241–251.

[3] 胡子聪, 舒畅, 朱鸿杰, 等. 杨梅果实采后品质劣变与保鲜研究进展[J]. 包装工程, 2025, 46(1): 106–116.
HU ZC, SHU C, ZHU HJ, *et al*. Research progress on postharvest quality deterioration and preservation of Chinese bayberry fruit [J]. Packaging Engineering, 2025, 46(1): 106–116.

[4] 帅良, 廖玲燕, 罗焘, 等. 1-MCP 处理对百香果贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(15): 281–284.

SHUAI L, LIAO LY, LUO T, *et al*. Effect of 1-MCP treatment on storage quality of passion fruit [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(15): 281–284.

[5] 王威, 严丽, 谢倩, 等. 预冷前后 1-MCP 处理对杨梅采后贮藏品质的影响[J]. 热带作物学报, 2019(7): 1406–1412.
WANG W, YAN L, XIE Q, *et al*. Effects of pre-cooling timing and 1-MCP treatment on postharvest quality of *Myrica rubra* [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019(7): 1406–1412.

[6] 罗冬兰, 瞿光凡, 曹森, 等. 采前水杨酸结合采后 1-MCP 处理对李果实贮藏期品质及抗氧化能力的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 327–333.
LUO DL, QU GF, CAO S, *et al*. Effect of preharvest salicylic acid combined with postharvest 1-MCP treatment on quality and antioxidant ability of plum fruit during storage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 327–333.

[7] DOERFLINGER FC, NOCK JF, MILLER WB, *et al*. Preharvest aminoethoxyvinylglycine (AVG) and 1-methylcyclopropene (1-MCP) effects on ethylene and starch concentrations of ‘Empire’and ‘McIntosh’apples [J]. Scientia Horticulturae, 2019(244): 134–140.

[8] 张鹏, 袁兴铃, 王利强, 等. 1-MCP 处理对“阳光玫瑰”葡萄货架品质的影响[J]. 包装工程, 2021, 42(7): 19–27.
ZHANG P, YUAN XL, WANG LQ, *et al*. Effect of 1-MCP treatment on shelf quality of “Sunshine Muscat” grapes [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(7): 19–27.

[9] 郭强. 1-MCP、高锰酸钾对‘突尼斯软子’石榴贮藏效果及衰老机理探究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019.
GUO Q. Effect of 1-MCP and potassium permanganate on storage and aging mechanism of ‘Tunisian Soft-seeded’ pomegranate [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019.

[10] 李英丽, 张少颖, 董宇. 采前 1-甲基环丙烯处理对货架期‘Bartlett’梨虎皮病和抗氧化特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 250–256.
LI YL, ZHANG SY, DONG Y. Effect of preharvest 1-methylcyclopene application on superficial scald and antioxidant capacity of ‘Bartlett’ pears during shelf life [J]. Food Science, 2021, 42(1): 250–256.

[11] 章凌, 黄琐, 王耀国. 一种催化型乙烯脱除剂的制备方法及应用: 中国, CN202210331320.X [P]. 2024-07-05.
ZHANG L, HUANG X, WANG YG. Preparation method and application of a catalytic ethylene scavenger: China, CN202210331320.X [P]. 2024-07-05.

[12] YANG H, MA C, 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] 谢浩鹏. 钙盐协同渗透脱水冷冻技术对蓝莓质地品质的研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023.
XIE HP. Effect of calcium salt synergistic osmotic dehydration and freezing technology on the texture and quality of blueberry [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2023.

[14] 孙华军, 崔方正, 钱丽丽, 等. 褪黑素处理对采后树莓果实品质的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2025, 37(3): 53–60, 87.
SUN HJ, CUI FZ, QIAN LL, *et al*. Effects of melatonin treatment on fruit quality of postharvest raspberry [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2025, 37(3): 53–60, 87.

[15] 曹建康. 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. Guidelines for postharvest physiological and biochemical experiments on fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.

[16] 骆文宾, 李媛媛, 郭鑫宇, 等. 1-甲基环丙烯对 K9 小苹果采前保果及采后保鲜的效果[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(9): 179–184.
LUO WB, LI YY, GUO XY, *et al*. Effects of 1-MCP on pre-harvest and post-harvest preservation of K9 small apple [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2022, 50(9): 179–184.

[17] 罗冬兰, 曹森, 瞿光凡, 等. 采前褪黑素和 1-MCP 处理对百香果采后贮藏品质的影响[J]. 中国果树, 2023(2): 42–47, 53.
LUO DL, CAO S, QU GF, *et al*. Effect of preharvest melatonin and 1-MCP treatments on postharvest storage quality of passion fruit [J]. China Fruits, 2023(2): 42–47, 53.

[18] 李英丽, 张少颖, 薛银昊, 等. 采前喷施 1-MCP 对贮藏期巴梨果实品质和后熟性的影响[J]. 果树学报, 2022, 39(11): 2141–2148.
LI YL, ZHANG SY, XUE YH, *et al*. Effect of pre-harvest 1-methylcyclopropene application on internal browning and storage quality of Bartlett pear [J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(11): 2141–2148.

[19] TATSUKI M, NAKAJIMA N, FUJII H, *et al*. Increased levels of IAA are required for system 2 ethylene synthesis causing fruit softening in peach (*Prunus persica* L. *Batsch*) [J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64(4): 1043–1054.

[20] GAPPER NE, MCQUINN RP, GIOVANNONI JJ. Molecular and genetic regulation of fruit ripening [J]. Plant Molecular Biology, 2013, 82(6): 575–591.

[21] 梁森苗, 朱婷婷, 张淑文, 等. 杨梅果实发育成熟度与颜色变化规律探究[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(6): 879–882.
LIANG SM, ZHU TT, ZHANG SW, *et al*. Study on the maturity and color change of Chinese bayberry [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019, 60(6): 879–882.

[22] NIU SS, XU CJ, ZHANG WS, *et al*. Coordinated regulation of anthocyanin biosynthesis in Chinese bayberry (*Myrica rubra*) fruit by a R2R3 MYB transcription factor [J]. Planta, 2010, 231(4): 887–899.

[23] REUCK KD, SIVAKUMAR D, KORSTEN L. Integrated application of 1-methylcyclopropene and modified atmosphere packaging to improve quality retention of litchi cultivars during storage [J]. Postharvest Biology & Technology, 2009, 52(1):71–77.

[24] 李昌宝, 辛明, 孙宇, 等. 组合保鲜技术对圣女果保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(3): 123–129.
LI CB, XIN M, SUN Y, *et al*. Effects of combined fresh-keeping technology on the quality of cherry tomato preservation [J]. Food Research and Development, 2020, 41(3): 123–129.

[25] 刘畅, 周舟, 陈秋怡, 等. 茶多酚/壳聚糖/百里香精油复合涂膜对圣女果保鲜效果的影响[J]. 包装工程, 2025, 46(3): 104–112.
LIU C, ZHOU Z, CHEN QY, *et al*. Effect of tea polyphenols/chitosan/thyme oil composite coating on preservation of cherry tomatoes [J]. Packaging Engineering, 2025, 46(3): 104–112.

[26] FERREIRA R, LOPES H, LOURENCO JP, *et al*. Ethylene removal by Ag-based ZSM-5 adsorbents for the preservation of climacteric fruits [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2024, 370: 113055.

[27] LIU W, ZHANG M, BHANDARI B. Nanotechnology-A shelf life extension strategy for fruits and vegetables [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(10): 1706–1721.

[28] WATKINS CB. The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables [J]. Biotechnology Advances, 2006, 24(4): 389–409.

[29] 钱磊, 曾祥, 陈天泰, 等. 海藻酸钠与滑菇肽复合涂膜对香菇保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(24): 42–49.
QIAN L, ZENG X, CHEN TT, *et al*. Effect of complex coating of sodium alginate and pholiota nameko peptides on fresh keeping of *Lentinus edodes* [J]. Food Research and Development, 2024, 45(24): 42–49.

[30] 刘爱龙, 赵智慧, 董建方, 等. 白酒浸泡鲜枸杞发酵工艺对枸杞酶促褐变的影响研究[J]. 酿酒, 2023, 50(5): 72–77.
LIU AIL, ZHAO ZH, DONG JF, *et al*. Effect of fermentation process of fresh *Lycium barbarum* L. *s*oaked in liquor on enzymatic browning of *Lycium barbarum* L. [J]. Liquor Making, 2023, 50(5): 72–77.

[31] HU H, JING N, PENG Y, *et al*. ^{60}Co*γ*-ray irradiation inhibits germination of fresh walnuts by modulatingrespiratory metabolism and reducing energy status during storage [J]. Postharvest Biology &Technology, 2021(182): 111694.

[32] KOU X, WU M, LI L, *et al*. Effects of $CaCl_2$ dipping and pullulan coating on the development of brown spot on ‘Huangguan’ pears during cold storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2015(99): 63–72.

[33] 戴理民. 淀粉纳米晶的高效制备及其复合涂膜的构建与应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
DAI LM. Study on the efficient preparation of starch nanocrystals and the construction and application of starch-based nanocomposite coating [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

[34] 高瑞萍, 朱建飞, 周文斌, 等. 超声加工技术对果蔬汁品质影响及其作用机制研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 326–338.
GAO RP, ZHU JF, ZHOU WB, *et al*. Progress in understanding the effect and action mechanism of ultrasound processing on the quality of fruit and vegetable juices [J]. Food Science, 2022, 43(7): 326–338.

[35] ZHANG ML, XU LY, ZHANG LY, *et al*. Effects of quercetin on postharvest blue mold control in kiwifruit [J]. Scientia Horticulturae, 2018(228): 18–25.

[36] 雷婷婷, 殷诚, 孙陟岩, 等. 气态臭氧结合微孔气调包装对杨梅品质和抗氧化性能的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 112–119.
LEI TT, YIN C, SUN ZY, *et al*. Effect of ozone gas combined with perforated modified atmosphere packaging on quality and antioxidant capacity of Chinese bayberry [J]. Food Science, 2023, 44(13): 112–119.

[37] 刘绪, 李欢, 黄潇漪, 等. 改良浸钙法对甜樱桃保鲜效果的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(3): 390–396.
LIU X, LI H, HUANG XY, *et al*. Effect of modified calcium immersion treatment on preservation of sweet cherry [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2021, 48(3): 390–396.

[38] MARTINS V, SOARES C, SPORMANN S, *et al*. Vineyard calcium sprays reduce the damage of postharvest grape berries by stimulating enzymatic antioxidant activity and pathogen defense genes, despite inhibiting phenolic synthesis [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021(162): 48–55.

[39] 曹森, 吉宁, 马超, 等. 1-MCP 结合哈茨木霉菌对樱桃番茄贮藏的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 262–268.
CAO S, JI N, MA C, *et al*. Effects of 1-MCP combined with trichoderma harzianum on preservation of cherry tomato [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 262–268.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)