高萨, 史冉冉, 虞益江, 等. 四种杀菌保鲜剂结合不同温度对鲜食杨梅品质及生理特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 401−411. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050299

GAO Sa, SHI Ranran, YU Yijiang, et al. Effects of Four Bactericidal Preservatives Combined with Different Temperatures on the Quality and Physiology Characteristics of Fresh Bayberry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 401−411. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050299

· 贮运保鲜 ·

四种杀菌保鲜剂结合不同温度对鲜食杨梅品质及生理特性的影响

高　萨[1,2], 史冉冉[1], 虞益江[3], 王炜涛[1], 郭　颢[1], 杨桂玲[1], 丁　伟[2], 王新全[1], 罗　婷[1,*], 王　豆[1,*]

（1.浙江省农业科学院农产品质量安全与营养研究所, 浙江杭州 310021;
2.东北农业大学植物保护学院, 黑龙江哈尔滨 150000;
3.杭州市事务保障中心, 浙江杭州 310020）

摘　要: 系统探究不同杀菌保鲜剂对杨梅采后贮藏品质与生理代谢的调控作用。以‘荸荠’杨梅为试验材料，分别采用浓度为 0.15、0.3、0.6 mmol/L 的脱氢乙酸，45、90、180 mg/L 的咪鲜胺，15、30、60 mg/L 的二氯异氰尿酸钠和 2、4、6 g 的 1-甲基环丙烯（1-Methylcyclopropene，1-MCP）处理杨梅果实，研究其在冷藏和常温过程中的贮藏品质及生理生化和营养品质的变化规律。咪鲜胺处理在冷藏条件下可显著降低杨梅果实腐烂率（降低 80%）、乙烯释放量，并延缓软化（P<0.05），抑制丙二醛（Malondialdehyde，MDA）含量上升。常温条件下可有效延缓杨梅果实软化、抑制乙烯释放及多酚氧化酶（Polyphenol Oxidase，PPO）活性增加（P<0.05）；二氯异氰尿酸钠（60 mg/L）在冷藏条件下可降低杨梅腐烂率（降低 25%）、提升过氧化物酶（Peroxidase，POD）活性（P<0.05），常温贮藏下二氯异氰尿酸钠（15 mg/L）可延缓果实软化，降低乙烯含量并抑制 PPO 活性增加（P<0.05）；1-甲基环丙烯处理在冷藏和常温贮藏下均可降低杨梅果实硬度和乙烯含量，且常温下有效成分含量为 0.03% 的 1-MCP（2 g）可抑制杨梅果实腐烂（P<0.05）；脱氢乙酸（0.15 mmol/L）在冷藏条件下仅能短暂提升杨梅 POD 活性（P<0.05），且会不同程度增加杨梅的腐烂率和乙烯含量，而其在常温贮藏下会显著增加杨梅果实硬度和可溶性固形物（Total Soluble Solids，TSS）含量（P<0.05），对酶活性及可滴定酸度（Titratable Acidity，TA）含量差异不显著（P>0.05）。综上，在高浓度水平下，咪鲜胺（90 mg/L）和二氯异氰尿酸钠（60 mg/L）对杨梅保鲜效果较为显著；有效成分含量为 0.03% 的 1-MCP（2 g）处理能够有效维持果实采后品质，延长其保鲜期；而脱氢乙酸处理对维持采后杨梅品质效果不显著。研究结果为杨梅采后精准保鲜提供了理论依据。

关键词: 杨梅, 杀菌保鲜剂, 保鲜, 贮藏品质, 生理生化, 营养品质
中图分类号: S482.2+95　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0401−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050299　　本文网刊:

Effects of Four Bactericidal Preservatives Combined with Different Temperatures on the Quality and Physiology Characteristics of Fresh Bayberry

GAO Sa[1,2], SHI Ranran[1], YU Yijiang[3], WANG Weitao[1], GUO Hao[1], YANG Guiling[1], DING Wei[2], WANG Xinquan[1], LUO Ting[1,*], WANG Dou[1,*]

（1.Institute of Agricultural Products Quality Safety and Nutrition, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China;

收稿日期: 2025−05−29
基金项目: 农业农村部农产品质量安全风险评估（GJFP20230202）—鲜食杨梅和桑葚中食品添加剂风险评估及对果实货架期影响评价（2023.04-2025.12）。
作者简介: 高萨（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农药学, E-mail: gaos20001125@163.com。
*** 通信作者:** 王豆（1990−）, 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品质量安全风险评估, E-mail: doudounankai@163.com。
罗婷（1993−）, 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 农产品质量安全风险评估, E-mail: luoting9309@163.com。

2.College of Plant Protection, Northeast Agricultural University, Harbin 150000, China;
3.Hangzhou Affairs Support Center, Hangzhou 310020, China）

Abstract: The regulatory effects of various fungicide preservatives on the postharvest storage quality and physiological metabolism of bayberry were systematically investigated. Using 'Biqi' bayberries as the experimental material, bayberry fruits were treated with different concentrations of dehydroacetic acid (0.15, 0.3, 0.6 mmol/L), prochloraz (45, 90, 180 mg/L), sodium dichloroisocyanurate (15, 30, 60 mg/L), and 1-methylcyclopropene (2, 4, 6 g). The changes in storage quality, physiological and biochemical properties, and nutritional quality during cold storage and normal temperature storage were studied. Under refrigerated conditions, prochloraz treatment was found to significantly reduce the decay rate (reduce 80%), ethylene release, and delay softening of bayberry fruits (P<0.05), while malondialdehyde (MDA) content was inhibited. At ambient temperature, prochloraz could effectively delay fruit softening, inhibit ethylene release, and suppressed the increase in polyphenol oxidase (PPO) activity (P<0.05). Sodium dichloroisocyanurate (60 mg/L) under refrigeration was observed to reduce the decay rate (by 25%) and enhance peroxidase (POD) activity (P<0.05). During room temperature storage, sodium dichloroisocyanurate (15 mg/L) could delay fruit softening, reduce ethylene content, and suppresse the increase in PPO activity (P<0.05). 1-Methylcyclopropene treatment under both refrigeration and ambient temperature storage condition was demonstrated to reduce fruit firmness and ethylene content. Moreover, under room temperature conditions, fruit decay was effectively inhibited by 1-MCP with an active ingredient concentration of 0.03% (2 g) (P<0.05). Dehydroacetic acid (0.15 mmol/L) under refrigeration could only transiently enhance the POD activity of Chinese bayberry fruits (P<0.05), amd increased the decay rate and ethylene content to varying degrees. In contrast, under ambient temperature storage, it significantly increased fruit firmness and total soluble solids (TSS) content (P<0.05), while showing no significant effects on enzyme activity or titratable acidity (TA) content (P>0.05). In conclusion, prochloraz (90 mg/L) and sodium dichloroisocyanurate (60 mg/L) at relatively high concentrations were determined to exhibit preservative effects. The 1-MCP treatment (2 g, 0.03% active ingredient) effectively maintained postharvest fruit quality and extended the preservation period, while dehydroacetic acid showed insignificant preservative efficacy. The research results provide a theoretical basis for the precise post-harvest fresh-keeping of bayberries.

Key words: bayberry; bactericidal preservative; fresh preservation; storage quality; physiological and biochemical; nutritional quality

杨梅(*Mycira rubra* Sieb. & Zucc)作为我国南方特有的季节性水果,因其色泽鲜艳、口感酸甜,深受消费者喜爱[1−2]。杨梅果实因富含有多种纤维素、矿物质和抗氧化物质,具有较高的营养价值和保健功能。然而,由于杨梅无外果皮包被,采后极易受微生物侵染导致果实软化、腐烂变质,常温贮藏通常 2~3 d 即开始腐烂,7 d 会完全腐烂,严重限制其市场流通[3]。传统的物理保鲜技术虽能部分延缓衰老,但成本高且操作复杂,难以满足大规模市场需求,化学保鲜剂的使用仍是杨梅贮藏的主要手段。目前,有关杨梅保鲜的研究多集中于 1-甲基环丙烯(1-MCP)的应用,但有报道指出市场上存在使用脱氢乙酸等防腐保鲜剂进行杨梅防腐保鲜的现象[4]。

近年来,已有相关研究将杀菌保鲜剂应用于农产品的采后保鲜中。黄钰萍等[5]通过研究不同 1-MCP 处理浓度与处理时间对杨梅果实品质和活性氧代谢的影响,结果表明 1.0 μL/L 1-MCP 处理 24 h 可通过提高杨梅果实的超氧化物歧化酶(SOD)等抗氧化酶活性以有效清除活性氧自由基,从而延缓杨梅果实采后衰老,延长其保鲜时间。中国科学院华南植物园的研究团队[6]通过将香蕉浸泡于二氯异氰尿酸钠(DCCNa)溶液中,用聚乙烯薄膜袋包装后,放置常温条件下贮藏,结果显示乙烯释放峰和呼吸跃变峰分别延迟 8 d 和 4 d;贮藏 20~30 d 时,好果率仍可保持在 80% 以上。刘鹏等[7]研究咪鲜胺浸果对南丰蜜橘的保鲜效果,结果表明咪鲜胺处理能降低果实腐烂率,室温贮藏或冷藏下使用咪鲜胺能显著提升采后保鲜效果,延长货架期。1-MCP 在果蔬采后保鲜中应用广泛,然而脱氢乙酸、咪鲜胺和 DCCNa 被发现违规用作杨梅采后防腐保鲜。近几年,这四种防腐保鲜剂被发现在杨梅采后保鲜中普遍被使用,但其对杨梅采后贮藏品质的效果和影响一直未被证实过,需进一步研究验证。采用 4 种杀菌保鲜剂进行其他水果和蔬菜保鲜已有大量成熟的研究和应用,而有关 4 种杀菌保鲜剂结合贮藏温度对采后杨梅果实贮藏保鲜效果的研究未见资料报道。因此,本研究以‘荸荠’杨梅为研究对象,系统探究不同贮藏温度和添加浓度下 4 种常用果蔬杀菌保鲜剂(脱氢乙酸、1-MCP、DCCNa 和咪鲜胺)对杨梅采后生理生化特征及贮藏品质的影响,评估不同杀菌保鲜剂的贮藏效果,为杨梅采后科学保鲜和质量安全监管提供科学依据,开发推广具有绿色高效的物理保鲜技术和天然保鲜剂,助力杨梅产业健康可持续发展。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘荸荠’杨梅　2024 年 6 月 15 日于浙江余姚杨梅园采摘成熟的果实(八分熟),选择颗粒饱满、大小均一、无机械损伤及病虫害侵染的果实作为供试材

料；有效成分含量为 98% 的脱氢乙酸钠　购自江苏南通醋酸化工股份有限公司；有效成分为 450 g/L 的咪鲜胺　购自江苏龙灯化学有限公司；有效成分含量为 50% 的二氯异氰尿酸钠　购自山东省曲阜市尔福农药厂；有效成分含量为 0.03% 的 1-甲基环丙烯　购自山东奥维特生物科技有限公司；磷酸缓冲液 PBS　购自上海圣尔生物科技有限公司；丙二醛及酶活试剂盒　购自南京建成有限公司；实验用水娃哈哈（一级水）　购自京东超市。

2011F145-1 电子天平　北京赛多利斯科学仪器有限公司；PAL-BX/ACID F5 手持糖酸度计　广州市爱拓科学仪器有限公司；GY-5B 水果硬度质构仪　艾普仪器有限公司；Tissuelyser-48 全自动样品快速研磨仪　上海净信实业发展有限公司；冷冻高速离心机　赛默飞世尔科技有限公司；WB100-2F 水浴锅　群安仪器有限公司；FlexA-200 酶联免疫分析仪　杭州奥盛仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　分组及处理条件　将杨梅果实进行预冷处理，用娃哈哈水浸泡 1 min 后捞出沥干，以消除杨梅自身带的余温。试验采用双因素设计，共设置两个温度梯度：常温（20±1 ℃）和冷藏（4±1 ℃）；13 个处理组，每组处理约 5 kg 杨梅：处理 1 组为对照（CK），用娃哈哈水浸泡 2 min 自然晾干；处理 2、3、4 组果实分别用浓度为 45、90、180 mg/L 的咪鲜胺浸泡果实 2 min，然后自然晾干；处理 5、6、7 组果实分别用浓度为 15、30、60 mg/L的 DCCNa 浸泡果实 2 min，然后自然晾干；处理 8、9、10 组果实分别用浓度为 0.15、0.3、0.6 mmol/L 的脱氢乙酸钠试剂浸泡果实 2 min，然后自然晾干；处理 11、12、13 组为每盒放置 2、4、6 g 的 1-MCP 保鲜剂粉包；每个处理 3 个重复。其中一组样品放入温度为 4±1 ℃、相对湿度为 80%~90% 的冰箱中贮藏；另一组样品置于 20±1 ℃、相对湿度为 45%~60% 的常温环境中贮藏。采样期设置为：0、1、2、3、4、5、6 d。每天观察果实外观变化，并拍照记录和取样，测定下列各项指标。

1.2.2　腐烂率测定　每天观察杨梅贮藏后果实的腐烂情况，果实出现软化、发霉、变色均视为腐烂，对腐烂的杨梅进行腐烂率测定，公式如下：

$$B(\%) = \frac{G_1}{G_2} \times 100$$

式中：B 为腐烂率；G_1 为每平行烂果数；G_2 为每平行总果数。

1.2.3　硬度测定　果实硬度使用水果硬度质构分析仪测定，实验参数设置为：探头直径 5.0 mm，穿刺深度 4.0 mm，测试速度 1.0 mm/s，以最大硬度值为测定指标。每个浓度处理组随机选取 3 个杨梅果实，在围绕果实的赤道部位，间隔等距离的 2 个位点进行测定，最终结果取平均值作为该处理组的硬度值。

1.2.4　乙烯含量测定　选取 5 颗杨梅置于锥形瓶内，用封口膜密封，常温 25 ℃ 下，放置 6 h 后，使用排水法收集乙烯气体，收集完的气体装入气体采样袋送检。

1.2.5　丙二醛含量及酶活性测定　分别使用 MDA 试剂盒和 CAT、POD、SOD、PPO 试剂盒测定果实 MDA 含量及酶活性，测定方法参照试剂盒说明书。酶的比活力（U/mg 蛋白）表示每毫克蛋白质中含有的酶活力单位数，反映酶的纯化程度，计算公式为：

比活力(U/mg) = 总酶活性(U)/总酶蛋白质量(mg)

1.2.6　可溶性固形物和可滴定酸含量测定　可溶性固形物（TSS）含量测定方法为将杨梅汁液挤出滴至手持糖酸度计上，读数即可；可滴定酸（TA）含量测定方法为吸取 1 mL 杨梅汁液，加入 50 mL 的蒸馏水稀释（1∶50, v/v），混合均匀，吸取 0.3 mL 稀释后样品滴至手持糖酸度计上，读数即可。

1.3　数据处理

运用 Excel 2019 对基础数据表格整理，使用 SPSS 22.0 对数据进行统计分析（Duncan 法），$P<0.05$ 表示差异显著水平，使用 GraphPad prism 绘图软件作图，所有结果均以均值±标准差（Mean±SD）的形式呈现。

2　结果与分析

2.1　不同保鲜剂处理对杨梅贮藏品质的影响

2.1.1　不同处理对杨梅腐烂率的影响　腐烂率是衡量果实品质变化及保鲜效果的一个重要直观指标[8−9]。对贮藏期间各处理杨梅果实腐烂率的统计结果如图 1 所示。

低温冷藏条件下，经 45 mg/L 和 180 mg/L 咪鲜胺处理后的杨梅果实表现出显著的抑菌效果（$P<0.05$）。贮藏第 6 d 对照组腐烂率升至 36% 时，经 45、90 和 180 mg/L 咪鲜胺处理的杨梅果实的腐烂率分别为 4%、7% 和 8%，防腐效果持续性强。60 mg/L DCCNa 处理组在储藏初期抑菌效果低于对照组，但在杨梅贮藏后期（4~6 d）优于对照组（$P<0.05$）。脱氢乙酸处理组在贮藏期间显著增加果实腐烂率（$P<0.05$），且随时间延长差异加剧。至贮藏末期时，0.15 mmoL/L 脱氢乙酸组的腐烂率为 68% 高于对照组（36%）。而经 1-甲基环丙烯处理组与对照组差异不显著（$P>0.05$）。

常温条件下，咪鲜胺处理呈现剂量效应：45 mg/L 组仅延缓腐烂进程（第 4 d 腐烂率 74%），而 90 mg/L 与 180 mg/L 组表现出强抑菌活性（腐烂率 32% 和 31%），分别较对照组（86%）降低 64% 和 63%（图 1B）。在杨梅贮藏 1~2 d 期间，经 DCCNa 和脱氢乙酸处理的杨梅果实腐烂率虽高于对照组，但无显著性差异（$P>0.05$），而含量为 2 g 的 1-MCP 处理组在常温贮藏 1 d 时果实腐烂率显著低于对照组（$P<0.05$），可抑制杨梅腐烂。

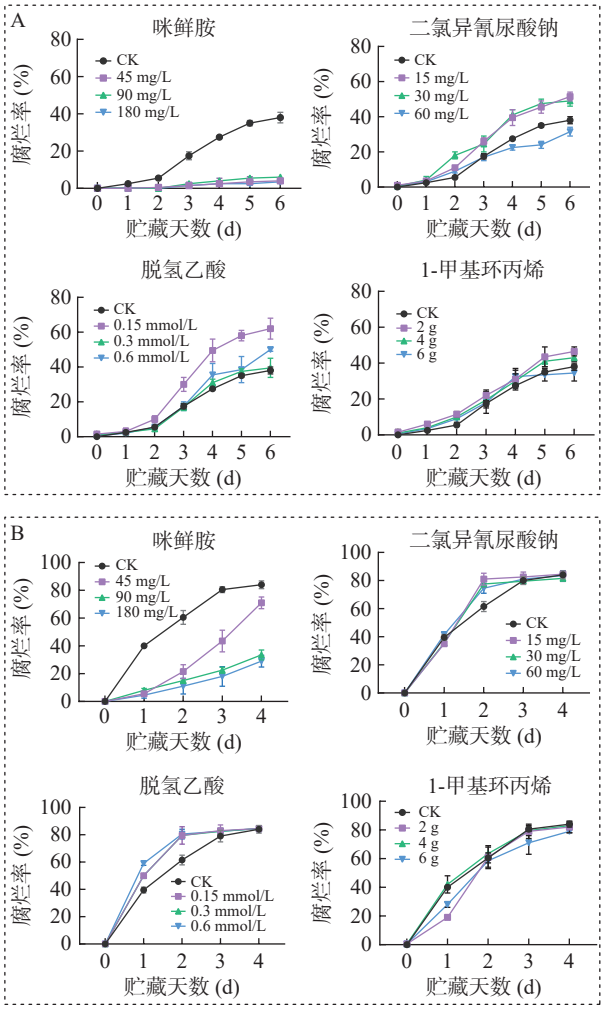


图 1 不同浓度杀菌保鲜剂结合贮藏温度对杨梅果实腐烂率的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of sterilization preservative combined with storage temperature on the rot rate of bayberry fruits

注: A: 冷藏 4±1 ℃, B: 常温 20±1 ℃, 图 2~图 10 同。

咪鲜胺通过抑制真菌病原菌增殖显著延缓腐烂进程, 其最佳浓度为 45 mg/L; 而二氯异氰尿酸钠 DCCNa(60 mg/L)在低温下仅表现中等抑菌效果, 常温下完全失效。然而, 脱氢乙酸在低浓度处理组下, 腐败率显著高于对照组(从初期至贮藏末期增加 8%~25%)。其原因可能与病原菌群落结构变化及药物制剂有关, 例如破坏有益微生物群落或抑制果实自身的防御系统, 从而打破果实(宿主)-病原微生物-环境平衡, 导致优势腐败菌更快繁殖[10]。脱氢乙酸抗菌谱较窄, 对引起杨梅腐烂的主要病原菌(如青霉菌、酵母菌)抑制效果有限, 无法有效阻断腐败进程[11]。

2.1.2 不同处理对杨梅硬度的影响 果实硬度是衡量果实品质优劣、耐贮性及保鲜作用效果的关键指标之一[12−14]。如图 2 所示, 在贮藏过程中, 果实硬度会随着时间延长而逐渐下降, 本研究中对照组果实硬度在整个贮藏周期内便呈现出缓慢下降的态势。

在冷藏条件下, 对照组果实硬度从初始值 3.57 kg/cm^2 持续下降至第 6 d 的 1.82 kg/cm^2(下降

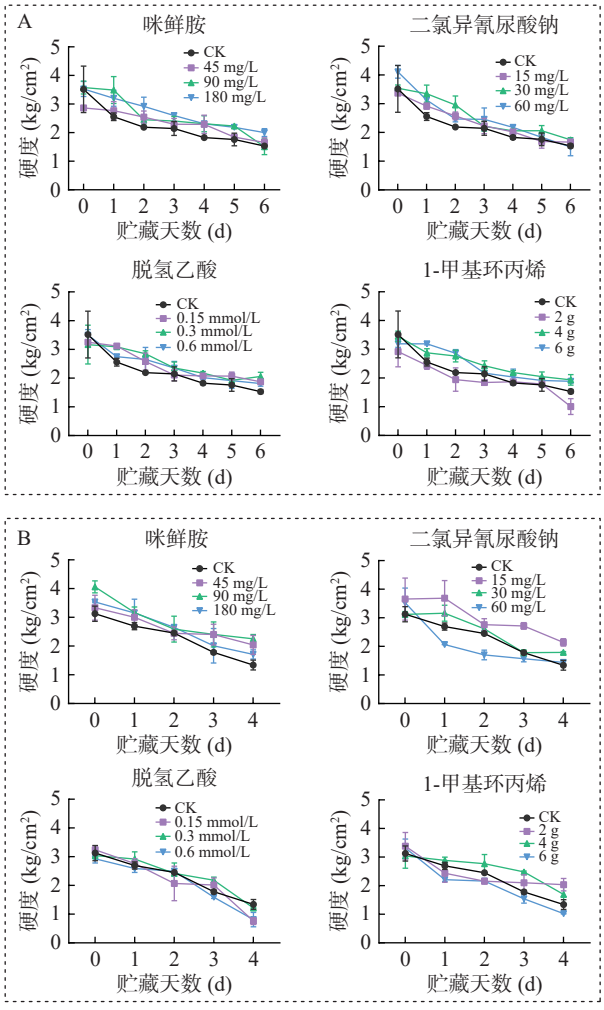


图 2 不同浓度杀菌保鲜剂结合贮藏温度对杨梅果实硬度的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of sterilization preservative combined with storage temperature on the hardness of bayberry fruits

26%), 而咪鲜胺(180 mg/L)处理组在贮藏末期仍保持较高硬度(2.00 kg/cm^2), 显著高于对照组(P<0.05), 而经 DCCNa、脱氢乙酸和 1-MCP 处理的杨梅果实硬度与对照组差异不显著, 且 4 种杀菌保鲜剂不同浓度处理间硬度差异不显著。

常温条件下, 对照组硬度下降速率显著加快(P<0.05), 第 4 d 即降至 1.53 kg/cm^2(下降 46%)。咪鲜胺处理呈现浓度依赖性: 90 mg/L 处理组硬度显著高于 45 mg/L 处理组和对照组(P<0.05); DCCNa(15 mg/L)与 1-MCP(4 g)处理组分别维持 1.89 和 1.85 kg/cm^2, 显著优于对照组(P<0.05)。脱氢乙酸处理组硬度与对照组差异不显著。

经咪鲜胺处理的杨梅果实硬度在整个低温贮藏期间相较于对照组有显著提升(P<0.05)。在常温条件下, 不同处理组表现出差异。其中, 咪鲜胺、1-MCP(4 g)以及 DCCNa(15 mg/L)处理组, 均能显著提高杨梅果实硬度(P<0.05), 有效延缓果实软化, 进而提升杨梅的耐贮性; 但脱氢乙酸处理组与 CK 在果实硬度上的差异不显著(P>0.05), 并不能改善杨梅果实的硬度进行保鲜。

2.2　不同保鲜剂处理对杨梅生理生化的影响

2.2.1　不同处理对杨梅乙烯含量的影响　乙烯作为果实采后进程中最为关键的催熟激素，对果实的成熟调控起着核心作用[15−16]。本研究中，整个贮藏期间内 4 个处理组和对照组杨梅果实的乙烯释放速率变化趋势一致，即先逐渐上升，于第 2 d 达到峰值后转而下降（图 3）。这与胡西琴等[17] 在八成熟‘荸荠’杨梅贮藏期间检测到乙烯释放高峰出现于采后第 2 d 的结果相一致。

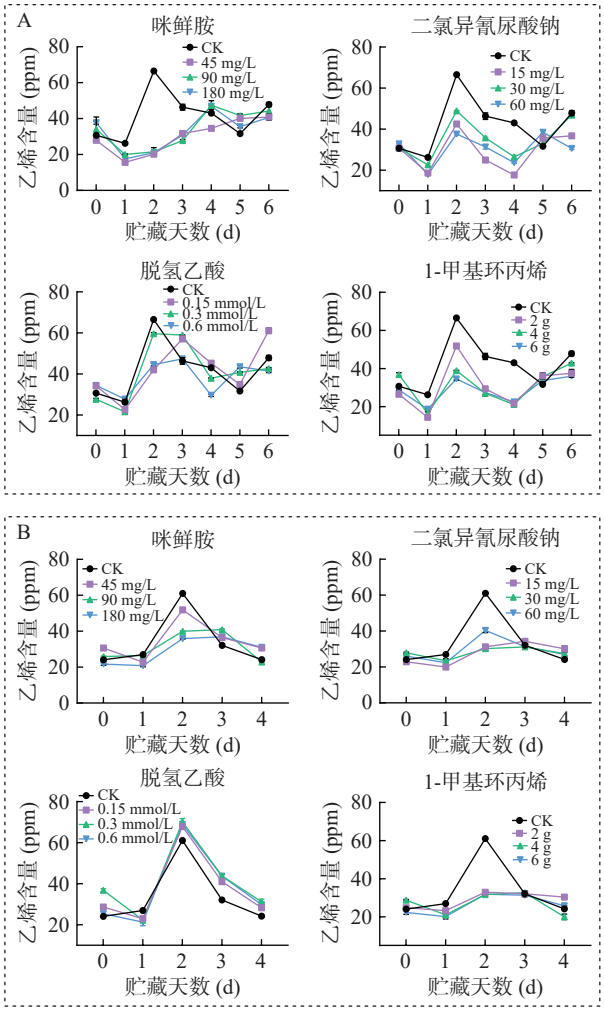


图 3　不同浓度杀菌保鲜剂结合贮藏温度对杨梅果实乙烯含量的影响

Fig.3　Effects of different concentrations of sterilization preservative combined with storage temperature on ethylene content of bayberry fruits

冷藏条件下，与对照组相比，咪鲜胺、DCCNa 和 1-MCP 处理不同程度降低了果实乙烯释放的峰值，贮藏至 2 d 时，对照组和 DCCNa、1-MCP 处理组的乙烯含量均达到最高值，0.15 和 0.3 mmol/L 脱氢乙酸处理的杨梅果实乙烯释放速率在第 3 d 显著高于对照组（P<0.05）；相较于对照组，咪鲜胺处理组在贮藏 1~3 d 可显著抑制乙烯释放量（P<0.05）。贮藏后期，各处理组杨梅果实中的乙烯含量逐渐增加，可能是由于随着保鲜时间的延长，果实抵抗力会下降，微生物病菌突破果实防御系统侵染果实[10]。

常温条件下，4 个处理组与对照相比，DCCNa、咪鲜胺和 1-MCP 不同程度降低了果实乙烯释放的峰值。相反，经脱氢乙酸处理的杨梅果实促进了杨梅乙烯释放量。由此可见，杨梅果实在贮藏期间，DCCNa、咪鲜胺和 1-MCP 处理结合低温的贮藏条件能够有效抑制乙烯释放含量，延缓果实衰老，而脱氢乙酸在常温下表现出促乙烯效应，可能与其干扰细胞氧化还原平衡有关[18]。

2.2.2　不同处理对杨梅丙二醛的影响　丙二醛（MDA）作为果实膜脂过氧化作用的关键产物，其含量可有效表征果实的衰老程度[19−20]。一般来说，MDA 越高，细胞膜受损越严重，导致细胞渗漏，果实软化腐烂。杀菌保鲜剂处理杨梅果贮藏期间的 MDA 含量变化如图 4。随着贮藏天数延长，各处理杨梅果实中 MDA 含量逐渐增加。

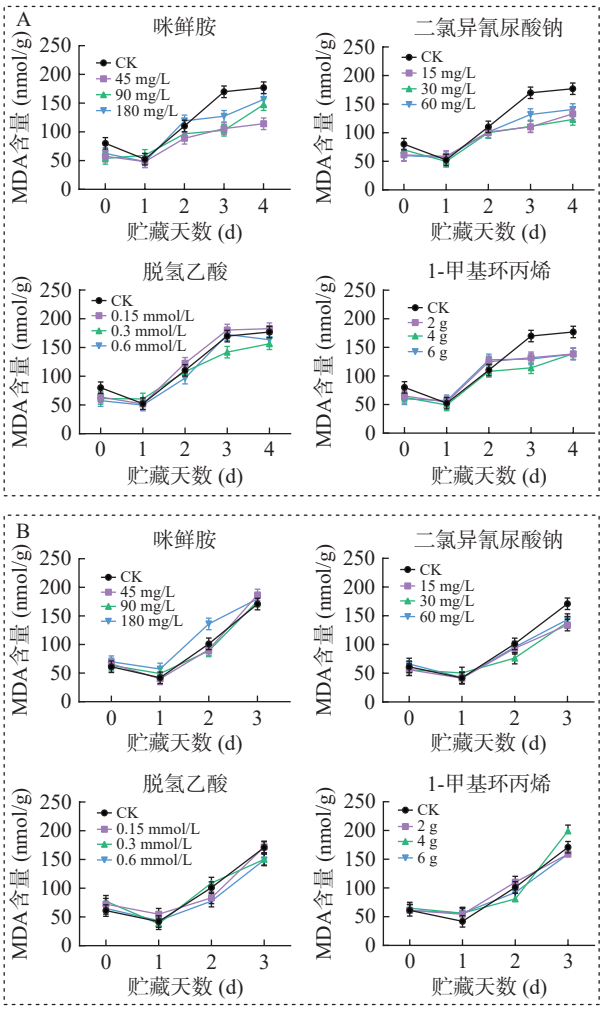


图 4　不同浓度杀菌保鲜剂结合贮藏温度对杨梅果实 MDA 含量的影响

Fig.4　Effects of different concentrations of sterilization preservative combined with storage temperature on MDA content of bayberry fruits

冷藏条件下，贮藏前 2 d，各处理组 MDA 含量差异不显著（P>0.05），随后的贮藏过程中，经咪鲜胺、DCCNa 和 1-MCP 处理的果实，其 MDA 含量的总体水平显著低于对照组（P<0.05）；而经脱氢乙酸处理的杨梅果实 MDA 含量与对照组之间不存在显著差异（P>0.05）。可能是由于脱氢乙酸分子在杨梅中

未解离，导致无法进入细胞和抑制膜质过氧化，进而降低 MDA 含量。由此可见，咪鲜胺、DCCNa 及 1-MCP 处理能够有效抑制杨梅果实贮藏期间 MDA 含量的累积，维持细胞膜的完整性。

常温条件下，对照组和处理组杨梅果实 MDA 含量在贮藏末期达到最高，且各浓度处理间、处理组与对照组间的 MDA 含量差异不显著（$P>0.05$）。可能由于常温温度较高，加速杨梅果实细胞衰老，导致无法降低 MDA 含量。由此可知，常温条件下 4 种保鲜杀菌剂处理对杨梅果实贮藏期间 MDA 含量的累积无显著作用。

2.2.3 不同处理对杨梅过氧化氢酶活性的影响 果实成熟衰老的重要原因之一是活性氧积累，过氧化氢酶（CAT）作为一种内源性抗氧化酶，能够在植物遭遇逆境胁迫时，有效清除细胞内过量的活性氧，有助于延缓细胞的衰老进程，进而延缓果实贮藏时间[21−22]。如图 5 所示，杨梅采后低温贮藏时，经过杀菌保鲜剂处理的果实和对照组的果实 CAT 酶活性变化趋势基本一致，先降低后增加。常温贮藏下，处理组和对照组的果实 CAT 酶活性值随着贮藏时间延长而缓慢升高。

低温冷藏下，果实在刚经过杀菌保鲜剂处理时，CAT 酶活性比较高，对照组和处理组酶活性差异不显著（$P>0.05$）；在贮藏期第 2 d 时含量最低，对照值为 8.87 U/g，在 0~2 d 贮藏期间，处理果显著低于对照果（$P<0.05$）；贮藏期 3~4 d 时，DCCNa、脱氢乙酸和咪鲜胺在部分处理浓度下对杨梅果实 CAT 酶活性高于对照组。说明在杨梅贮藏初期，低温下 4 种杀菌保鲜剂能够抑制杨梅果实的 CAT 活性，而随贮藏时间增加其抑制效果可能逐渐下降。

常温下，处理果和对照果 CAT 酶活性均逐渐增加，贮藏初期，处理组和对照组差异不显著，贮藏至第 3 d 时，90 mg/L 咪鲜胺处理的杨梅果实中 CAT 活性较高，为 542.3 U/g，与对照组相比存在显著差异（$P<0.05$）；而 1-MCP 处理的杨梅果实中的 CAT 活性与对照组差异不显著（$P>0.05$），说明使用 90 mg/L 咪鲜胺的杨梅果实可以在一定程度上减缓果实衰老，保护膜结构，延长贮藏时间。

2.2.4 不同处理对杨梅过氧化物酶活性的影响 过氧化物酶（POD）作为果实中一种关键的氧化还原酶，

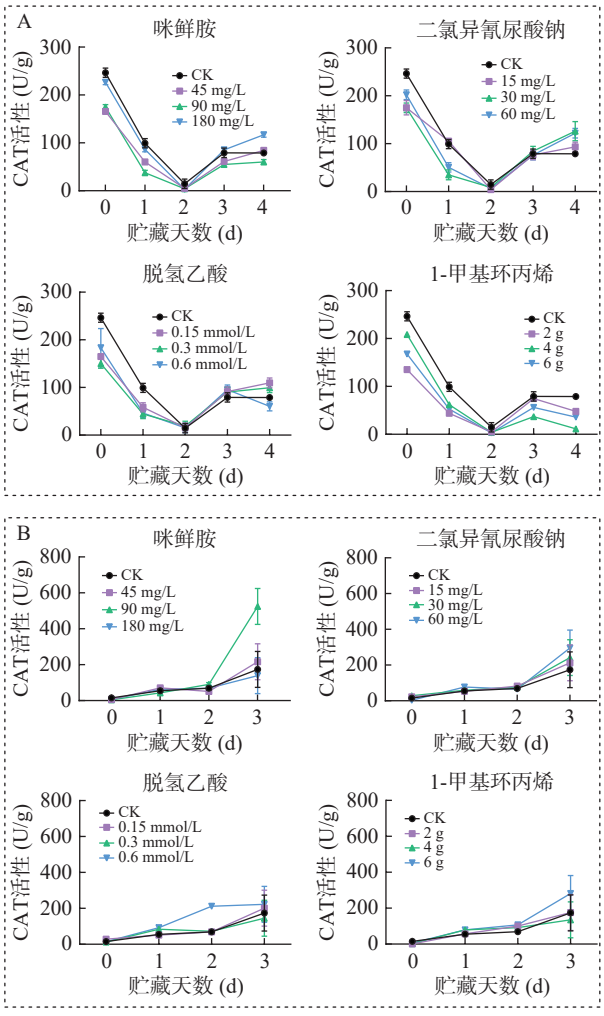


图 5 不同浓度杀菌保鲜剂结合贮藏温度对杨梅果实 CAT 活性的影响

Fig.5 Effects of different concentrations of sterilization preservative combined with storage temperature on CAT activity of bayberry fruits

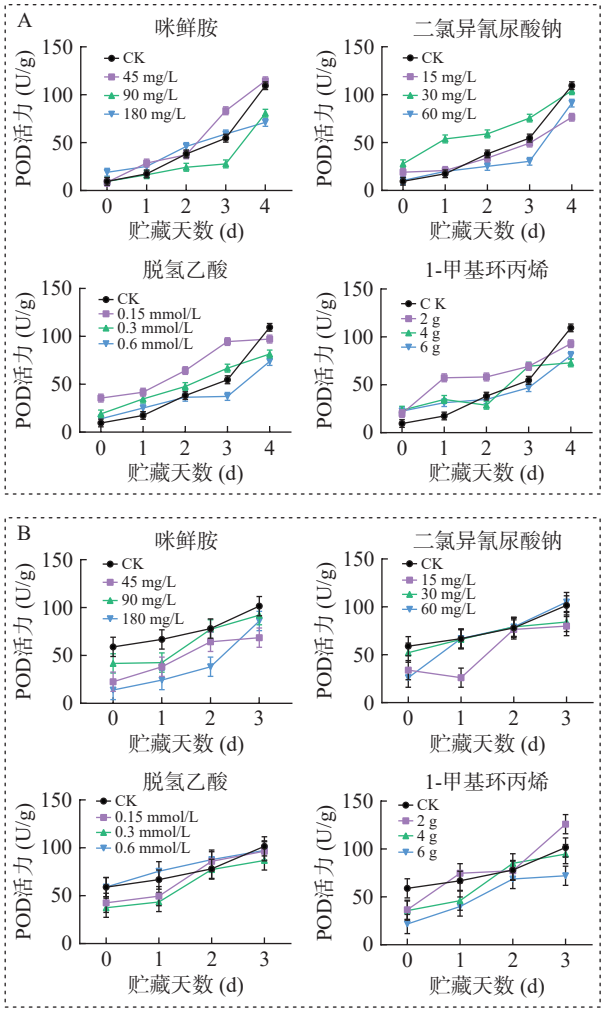


图 6 不同浓度杀菌保鲜剂结合贮藏温度对杨梅果实 POD 活性的影响

Fig.6 Effects of different concentrations of sterilization preservative combined with storage temperature on POD activity of bayberry fruits

具有清除过氧化物的作用，能够将 H_2O_2 分解为 H_2O 和 O_2，进而维持活性氧系统的代谢平衡[23−24]。POD 活性越高，果实抗病保鲜能力越强。杨梅果实贮藏期间 POD 活性变化如图 6 所示。随着贮藏天数延长，杨梅果实中 POD 活性呈逐渐缓慢上升态势。

冷藏条件下贮藏初期（0~3 d），与对照组相比，经 DCCNa（30 mg/L）、脱氢乙酸（0.15 mmoL/L）和 1-MCP（2 g）处理的果实均显著提高杨梅果实的 POD 活性（P<0.05）；整体咪鲜胺处理组未显示出对果实 POD 活性的提升作用，45 mg/L 和 180 mg/L 处理后果实 POD 活性虽略高于对照组，但无显著差异（P>0.05）。至贮藏末期，处理组与对照组相比 POD 活性降低，可能是由于细胞衰老导致酶蛋白降解，且酚类底物耗竭，失去清除 H_2O_2 能力[25]。

常温条件下，杨梅果实贮藏第 0~2 d，多数处理组的 POD 活性值低于对照组，但差异不显著（P>0.05），说明常温状态下杨梅果实贮藏期间不适用杀菌保鲜剂，同时可以看出冷藏对杨梅果实贮藏更优。

2.2.5　不同处理对杨梅超氧化物歧化酶活性的影响　超氧化物歧化酶（SOD）是抗氧化防御系统的核心酶类，能够清除植物体在新陈代谢过程中产生的有害物质，活性越高，表明果实的耐贮性越强[26−27]。如图 7 所示，随着贮藏天数延长，处理果和对照果 SOD 酶活性变化趋势基本一致，逐渐降低后增加。低温冷藏和常温状态下，初期 SOD 活性较高，随着天数增加，SOD 活性缓慢降低，且各浓度处理果显著低于对照果（P<0.05），贮藏至第 2 d，SOD 活性值达到最低，贮藏至最后一天时，各药物浓度处理果仍显著低于对照果（P<0.05），降低杨梅果实中的酶活性。结果说明，杨梅果实无论在冷藏还是常温下贮藏，使用杀菌保鲜剂对 SOD 酶活性的提升无显著效果。

2.2.6　不同处理对杨梅多酚氧化酶活性的影响　多酚氧化酶（PPO）是致使杨梅发生褐变的关键因素之一，其能够催化多种简单酚类物质氧化生成醌类物质，而醌类物质会进一步聚合形成褐色聚合物，从而导致杨梅果实外观颜色的改变[28−29]。PPO 活性越高，果实酚类氧化褐变越快，加速酶促褐变导致色泽劣变。本研究中不同处理方式对杨梅 PPO 酶活性的影响如图 8 所示。

在贮藏过程中，随着贮藏天数的增加，杨梅果实

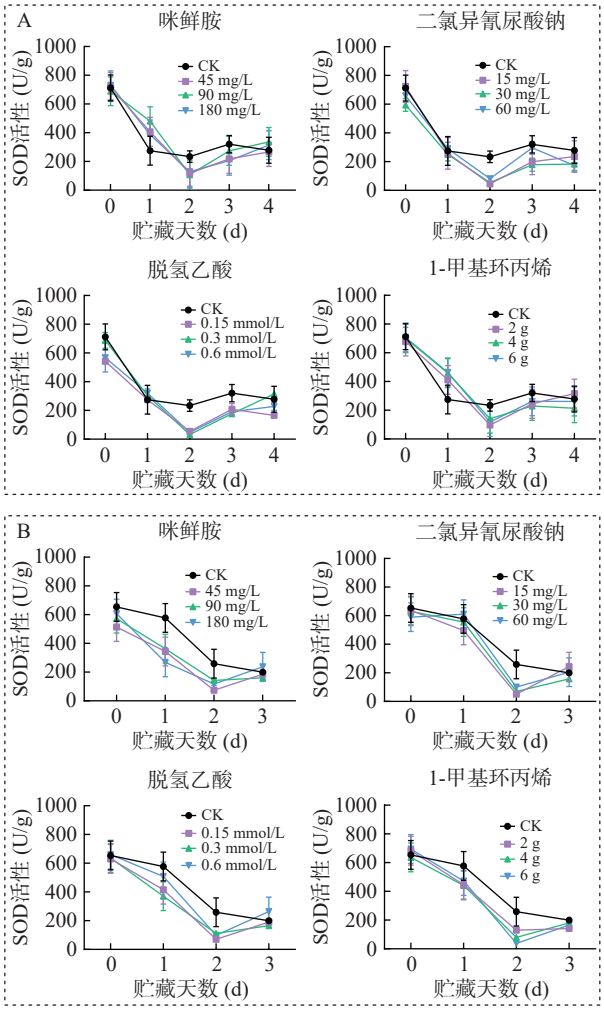


图 7　不同浓度杀菌保鲜剂结合贮藏温度对杨梅果实 SOD 活性的影响

Fig.7　Effects of different concentrations of sterilization preservative combined with storage temperature on SOD activity of bayberry fruits

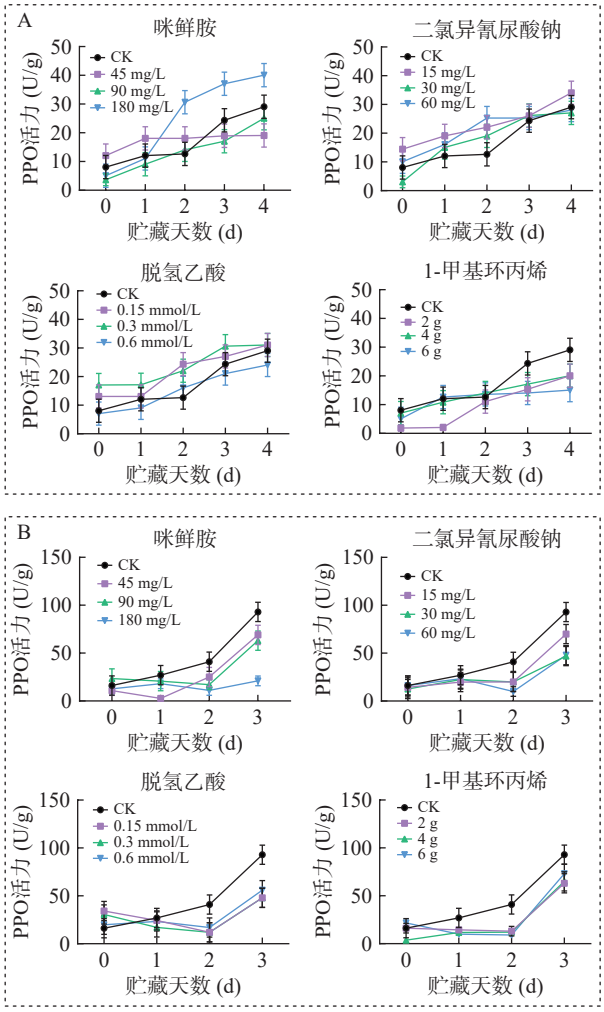


图 8　不同浓度杀菌保鲜剂结合贮藏温度对杨梅果实 PPO 活性的影响

Fig.8　Effects of different concentrations of sterilization preservative combined with storage temperature on PPO activity of bayberry fruit

中的 PPO 活性呈现逐渐且缓慢上升的趋势。冷藏条件下，整个贮藏周期内，经 1-MCP 处理杨梅果实，其 PPO 活性与其他处理组相比，显著低于对照组（$P<0.05$），其中，经 1-MCP（2 g）处理几乎在贮藏周期内均表现出延缓果实 PPO 活性上升的显著效果，整体对杨梅保鲜效果最优。经 1-MCP（6 g）处理的杨梅在第 3~4 d PPO 活性最低。其他处理组杨梅果实的 PPO 活性高于对照组，可能是由于脱氢乙酸、DCC-Na 和咪鲜胺通过杀菌作用减少了果实表面微生物对酚类底物的竞争性利用，间接提高了 PPO 可利用底物浓度，加速 PPO 酶反应速率[5]。

在常温条件下，当贮藏至第 3 d，对照组杨梅果实的 PPO 活性值达到 92.9 U/g。在整个常温贮藏期间，各处理组杨梅果实的 PPO 活性值均显著低于对照组（$P<0.05$）。这一结果充分表明，在常温贮藏条件下，对杨梅果实施用杀菌保鲜剂能够有效抑制 PPO 活性的增加，进而在一定程度上延缓杨梅果实的褐变进程。

2.3 不同保鲜剂处理对杨梅营养品质的影响

2.3.1 不同处理对杨梅可溶性固形物的影响 果实中可溶性固形物（TSS）含量是衡量果实成熟度及品质的重要指标之一[30−31]。如图 9 所示，在整个贮藏期间，无论是对照组还是处理组，杨梅果实的 TSS 含量均呈现先上升后下降的趋势。

在低温冷藏条件下，贮藏至第 3 d 时，杨梅果实的 TSS 含量达到峰值；然而，各处理组与对照组之间的 TSS 含量在整个贮藏期间均无显著性差异（$P>0.05$），表明低温冷藏条件下杀菌保鲜剂对 TSS 含量的影响不显著。

在常温贮藏条件下，处理组和对照组的杨梅果实在第 2 d 时 TSS 含量达到最高值，随后逐渐下降。各处理组与对照组之间的 TSS 含量在整个贮藏期间均无显著性差异（$P>0.05$），表明常温贮藏条件下杀菌保鲜剂对 TSS 含量的影响不显著。综上所述，低温和常温贮藏条件下杀菌保鲜剂对杨梅果实中的 TSS 含量均无明显效果。

2.3.2 不同处理对杨梅可滴定酸的影响 如图 10 所示，杨梅果实在贮藏期间，其可滴定酸（TA）含量呈现快速下降趋势。在低温冷藏条件下，与对照组相比，

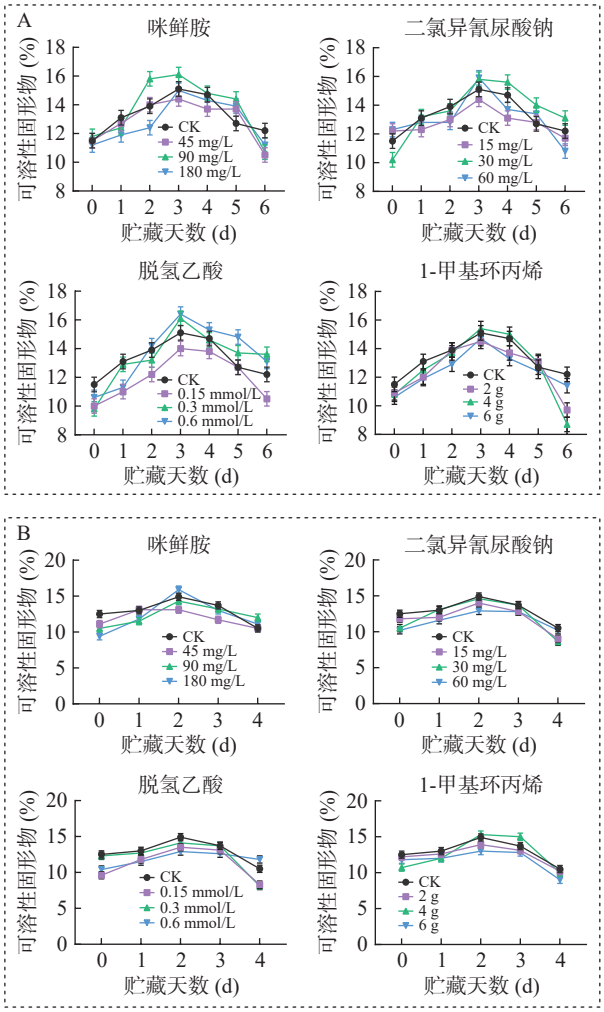


图 9 不同浓度杀菌保鲜剂结合贮藏温度对杨梅果实 TSS 含量的影响

Fig.9 Effects of different concentrations of sterilization preservative combined with storage temperature on TSS content of bayberry fruit

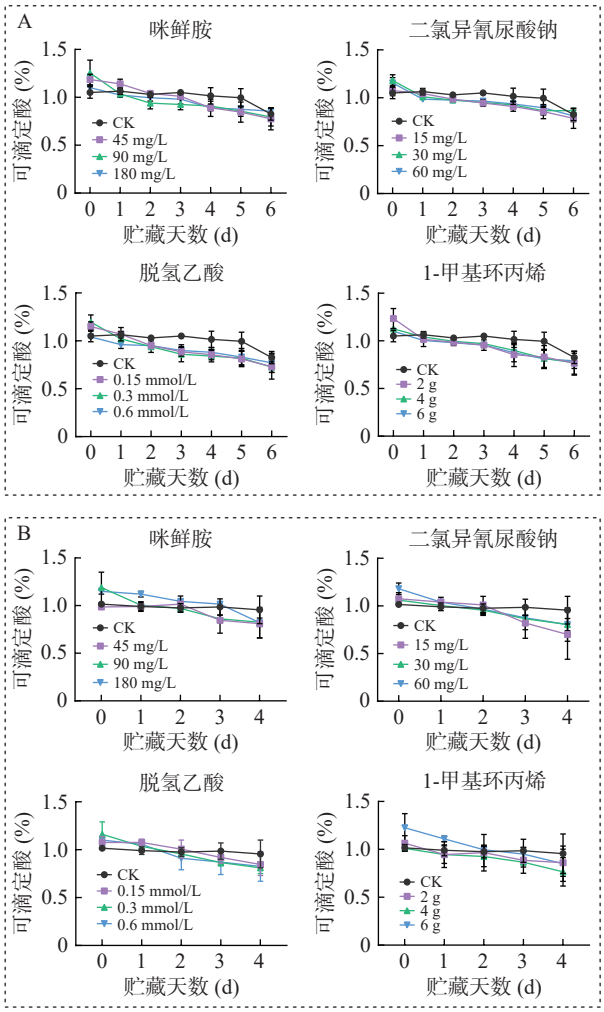


图 10 不同浓度杀菌保鲜剂结合贮藏温度对杨梅果实 TA 含量的影响

Fig.10 Effects of different concentrations of sterilization preservative combined with storage temperature on TA content of bayberry fruit

各浓度处理组的 TA 降解速率无显著性差异（$P>0.05$），表明低温贮藏条件下杀菌保鲜剂对 TA 含量的变化无明显影响。

在常温贮藏条件下，贮藏初期（0~2 d），各浓度处理组的 TA 含量显著高于对照组（$P<0.05$）；然而，贮藏 2 d 后，处理组的 TA 含量逐渐低于对照组。这一结果表明，杀菌保鲜剂在贮藏初期能够延缓 TA 的降解，但在后期则加速了 TA 含量的下降。综合来看，常温贮藏条件下，杀菌保鲜剂对杨梅果实 TA 含量的影响具有阶段性特征，即在贮藏前期可有效抑制 TA 降解，而在后期则可能促进其降解。

3　讨论

本研究中，4 种杀菌保鲜剂对杨梅采后品质与抗氧化系统的调控效果呈现显著差异，其保鲜效能与生理响应之间存在密切联系。1-MCP 作为一种无毒、无污染的乙烯竞争抑制剂，已被广泛应用于包括杨梅在内的果蔬采后保鲜领域[32−33]。本研究发现，冷藏条件下，1-MCP（2~4 g）处理虽均可抑制 PPO 活性、维持果实硬度并降低乙烯释放量，但其腐烂率与对照组无显著性差异，整体保鲜效果有限。且常温条件下，在杨梅贮藏初期（0~2 d），低浓度 1-MCP 处理的果实腐烂率较低，但高浓度下抑制各种抗氧化酶活性，这一结果表明，高浓度 1-MCP 可能导致免疫力下降而增加果实腐烂进程。使用 1-MCP 过度抑制乙烯信号通路后，可能会同时抑制果实的这些天然免疫防御机制，使果实对病原菌更加敏感，更易感病。根据 Zhang 等[34] 的研究，乙烯信号抑制在延缓成熟的同时可能负调控苯丙烷代谢和病程相关蛋白的表达，从而削弱果实对病原菌的免疫能力。因此推测，对于杨梅这类非呼吸跃变型果实而言，前期可能需使用较低浓度的 1-MCP 才能有效阻断乙烯信号并同时激活抗病响应。冷藏条件下，0.15 mmol/L 脱氢乙酸处理仅能短暂提升 POD 活性，对腐烂率、硬度及 MDA 积累无显著改善，反而加速贮藏后期 TA 降解（较对照组下降 22.4%）。而常温贮藏下，经脱氢乙酸处理促进杨梅果实的腐烂率。该现象可能与戴宝玲等[35] 所研究的实验结果类似，即脱氢乙酸处理后，并不能降低杨梅中的微生物起到保鲜作用，其原因可能是脱氢乙酸更有效地抑制了某些对腐败不敏感的细菌或酵母，但却对杨梅主要的腐败霉菌（如青霉、灰霉等）效果不佳，消除了这些竞争者后，主要的腐败菌反而获得了更多的空间和营养，加速生长。

相比之下，DCCNa 与咪鲜胺作为登记于采前施用的农业杀菌剂，本试验中表现出一定保鲜效果：冷藏条件下，60 mg/L DCCNa 可降低果实腐烂率、乙烯含量，保持 MDA 含量，30 mg/L DCCNa 处理可促进 POD 活性升高，缓解氧化损伤；咪鲜胺（90 mg/L）则有效抑制乙烯释放量与 TSS 的流失。常温条件下，DCCNa（15 mg/L）处理降低果实软化和乙烯含量，还可抑制 PPO 活性增加；咪鲜胺可延缓杨梅腐烂程度、降低果实软化，还可降低果实乙烯释放量、抑制 PPO 活性增加；表明其可通过协调抗氧化响应与衰老相关代谢途径更全面地维持果实采后品质，这与刘鹏等[7] 在南丰蜜橘上的研究结论相一致，即咪鲜胺处理可通过多重生理调控机制延缓果实采后品质劣变。

然而，尽管 DCCNa 和咪鲜胺在生理指标上表现出一定的保鲜潜力，且根据前期研究开展的二氯异氰尿酸钠、咪鲜胺及其代谢物在杨梅贮藏保鲜中的消解动态及安全评价表明，用质量浓度为 15、60 mg/L 的 DCCNa 和 45、180 mg/L 的咪鲜胺溶液分别浸泡杨梅进行保鲜，最高残留水平下杨梅中两种农药的急性膳食摄入风险均在可接受的范围内，尚不会对消费者健康产生危害[36]。但二者均为采前登记农药，在我国暂未批准登记在采后环节使用，且使用后可能会引发农产品质量安全舆情风险。从品质与舆情安全双重角度考量，应加强对二氯异氰尿酸钠、咪鲜胺和脱氢乙酸在新鲜杨梅采后环节的残留监测和合规性监管，且亟需开展杨梅采后保鲜技术研究，研发兼顾生理调控、抗氧化效果与绿色安全的新型保鲜技术。

4　结论

本研究中经脱氢乙酸处理的杨梅果实腐烂率较对照增加，TA 损失加剧，证实其保鲜效果不佳；DCCNa（60 mg/L）与咪鲜胺（90 mg/L）在冷藏下可分别通过激活 POD 活性、保持 MDA 含量及抑制果实腐烂和乙烯释放延缓品质劣变；1-MCP 作为无毒、无残留的乙烯抑制剂，可显著维持杨梅硬度（4 g）、降低 TSS 含量并延缓 PPO 活性上升（2 g），在常温保存条件下，可一定程度上抑制杨梅中乙烯释放，在高浓度下对指标（MDA 含量、SOD 酶活性）起反作用。目前鲜食杨梅的采后运输等环节多采用低温冷链结合气调包装进行防腐保鲜，但成本普遍较高，因此部分商家会采用低成本的化学保鲜手段。因此，针对杨梅采后保鲜问题，亟需研发和推广绿色高效的物理保鲜技术和天然保鲜剂等新型保鲜产品，从而保障杨梅产业绿色健康发展。

© 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] YANG Zhenfeng, ZHENG Yonghua, CAO Shifeng. Effect of high oxygen atmosphere storage on quality, antioxidant enzymes, and DPPH-radical scavenging activity of Chinese bayberry fruit[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(1): 176−181.

[2] XUE Liping, XIAO Zhenlei, LUO Yangchao, et al. Effects of induced electric field on quality enhancement and shelf-life extension of bayberry juice during storage[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2025, 100: 103917.

[3] 程晓建，王白坡，喻卫武，等. 杨梅果实贮藏保鲜技术研究[J]. 江西农业大学学报，2009，31(2)：226−230. [CHENG Xiaojian, WANG Baipo, YU Weiwu, et al. A study on the technology for

storing and preserving *Myrica rubra* fruit[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition), 2009, 31(2): 226−230.]

[4] 财经新闻. 三亚客家福商贸有限公司经营的杨梅食品安全抽检不合格, 脱氢乙酸及其钠盐(以脱氢乙酸计)、0.0579 g/kg 超标)[R]. 金融界, 2024. [FINANCIAL N. A food safety inspection of the yangmei (bayberry) sold by Sanya Kejiafu Commerce and Trade Co., Ltd. failed, with the level of dehydroacetic acid and its sodium salt (calculated as dehydroacetic acid) exceeding the standard at 0.0579 g/kg[R]. Financial Sector, 2024.]

[5] 黄钰萍, 刘青娥. 1-MCP 处理对杨梅果实贮藏期间品质及活性氧代谢的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(9): 13−20. [HUANG Yuping, LIU Qinge. Effects of 1-MCP treatment on qualities and reactive oxygen metabolism of *Myrica rubra* fruits during storage[J]. Storage and Process, 2021, 21(9): 13−20.]

[6] 朱汉斌, 周飞. 一种香蕉保鲜剂和贮藏保鲜方法: 中国, ZL201810291872.6[P/OL]. 2021. https://paper.sciencenet.cn/htmlnews/2021/10/467748.shtm. [ZHAO H B, ZHOU F. A banana preservative and method for preserving bananas during storage: China, ZL201810291872.6[P/OL]. 2021. https://paper.sciencenet.cn/htmlnews/2021/10/467748.shtm.]

[7] 刘鹏, 廖雅汶, 朱博, 等. 咪鲜胺和百可得对南丰蜜橘保鲜效果的协同效应[J]. 核农学报, 2024, 38(10): 1961−1967. [LIU Peng, LIAO Yawen, ZHU Bo, et al. Synergistic effect of prochloraz and iminoctadine tris on preservation of *Citrus reticulata* cv. Kinokuni[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(10): 1961−1967.]

[8] 张丽丽, 沈佳鑫, 曹晶晶, 等. 不同贮藏温度下红心火龙果的品质变化[J]. 山西农业科学, 2013, 41(12): 1385−1387,1390. [ZHANG Lili, SHEN Jiaxin, CAO Jingjing, et al. Quality changes of red pitaya under different storage temperature[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2013, 41(12): 1385−1387,1390.]

[9] 李欢, 薛洁, 王香兰, 等. 1-MCP 处理对软枣猕猴桃的保鲜效果[J]. 陕西农业科学, 2022, 68(2): 39−46. [LI Huan, XUE Jie, WANG Xianglan, et al. Preservation effect of 1-MCP on hardy kiwifruit[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2022, 68(2): 39−46.]

[10] 胡春红, 李俐俐, 刘坤, 等. 食品防腐剂对产毒黄曲霉孢子萌发及菌丝生长的抑制作用研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(15): 282−285. [HU Chunhong, LI Lili, LIU Kun, et al. Study the inhibition of food preservatives on spore germination and *Mycelium* growth of poisonous *Aspergillus flavus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(15): 282−285.]

[11] 杨悦. 杨梅果实中违规保鲜剂的残留分析研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2019. [YANG Yue. Study on residue analysis of illegal preservatives in waxberry fruits[D]. Ningbo: Ningbo University, 2019.]

[12] 叶美娟, 余柯达, 邵俊怡, 等. 柠檬醛对杨梅采后保鲜的作用研究[J]. 微生物学杂志, 2016, 36(3): 24−31. [YE Meijuan, YU Keda, SHAO Junyi, et al. Effects of citral treatment on post harvest preservation of Chinese bayberry[J]. Journal of Microbiology, 2016, 36(3): 24−31.]

[13] 杨鹏. N_2 协同 CO_2 处理对软枣猕猴桃常温贮藏品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023. [YANG Peng. Effect of N_2 and CO_2 treatment on the quality of kiwifruit under normal temperature storage[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.]

[14] 王兢业. 1-MCP 与壳聚糖/纳米 SiO_2 复合涂膜处理对草莓冷藏品质和生理代谢影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2019. [WANG Jingye. Effects of 1-MCP and chitosan/nano-SiO_2 composite coating on cold storage quality and physiological metabolism of strawberry[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019.]

[15] SAEED M, ZHAO L, RASHWAN A K, et al. Ethylene-induced postharvest changes in five Chinese bayberry cultivars affecting the fruit ripening and shelf life[J]. Horticulturae, 2024, 10(11): 1144.

[16] 张建军. ClO_2 结合 1-MCP 处理对草莓货架期保鲜效果的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018. [ZHANG Jianjun. Effect of ClO_2 combined with 1-MCP treatment on shelf life of strawberry [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.]

[17] 胡西琴, 余歆, 陈力耕. 杨梅果实贮藏期间若干生理特性的研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2001, 27(2): 179−182. [HU Xiqin, YU Xin, CHEN Ligeng. Studies of Chinese bayberry fruits on some physiological characters during the storage [J]. Journal of Zhejiang University, 2001, 27(2): 179−182.]

[18] 林炎娟, 叶新福, 梁华俤, 等. 贮藏温度对芙蓉李采后保鲜效果的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(5): 1520−1523. [LIN Yanjuan, YE Xinfu, LIANG Huadi, et al. The effects of storage temperature on the postharvest preservation of Furong plum[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(5): 1520−1523.]

[19] FENG Baozhen, DING Chunshuang, LI Peiqian, et al. Combined application of the endophyte *Bacillus* K1 and sodium dehydroacetate alleviates postharvest gray mold in grapes[J]. Food Microbiology, 2025, 125: 104637.

[20] 李朋超, 孟陆丽, 程谦伟, 等. 不同温度对香蕉果实丙二醛, 呼吸速率和能量代谢影响[J]. 食品工业, 2021, 42(9): 152−157. [LI Pengchao, MENG Luli, CHENG Qianwei, et al. Effects of different temperature on malondialdehyde respiration rate and energy metabolism of banana fruits[J]. The Food Industry, 2021, 42(9): 152−157.]

[21] LI H, JAMES A, HE X M, et al. Effect of hypobaric treatment on the quality and reactive oxygen species metabolism of blueberry fruit at storage[J]. CyTA - Journal of Food, 2019, 17(1): 937−948.

[22] 李辉, 林毅雄, 陈莲, 等. 1-甲基环丙烯处理对'红香 1 号'番石榴果实活性氧代谢和软化的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(16): 57−66. [LI Hui, LIN Yixiong, CHEN Lian, et al. Effects of 1-MCP on reactive oxygen metabolism and softening of'Hongxiang No.1' Guava fruits[J]. Food Research and Development, 2024, 45(16): 57−66.]

[23] 任丽花, 韦航, 潘葳, 等. 冷藏对百香果采后果实品质及活性氧代谢的影响[J]. 福建农业科技, 2024, 55(7): 26−32. [REN Lihua, WEI Hang, PAN Wei, et al. Effects of cold storage on fruit quality and active oxygen metabolism of *Passiflora edulis* after harvest[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2024, 55(7): 26−32.]

[24] CHAROENPHUN N, PHAM N H, RATTANAWUT J, et al. Exogenous application of melatonin on the preservation of physicochemical and enzymatic qualities of pepper fruit from chilling injury[J]. Horticulturae, 2024, 10(6): 550.

[25] WANG Luyao, SHEN Xuemeng, CHEN Xiumei, et al. Exogenous application of melatonin to green horn pepper fruit reduces chilling injury during postharvest cold storage by regulating enzymatic activities in the antioxidant system[J]. Plants, 2022, 11(18): 2367.

[26] LIN Yuanxiu, MAO Zhi, ZHANG Xing, et al. L-cysteine and L-methionine application preserve strawberries by reducing fruit decay and maintaining postharvest fruit quality[J]. LWT, 2025, 231:

118348.
［27］ 石慧敏, 任新雅, 张昱, 等. 苹果酸对采后杏果实品质和活性氧代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 289−296. ［SHI Huimin, REN Xinya, ZHANG Yu, et al. Effects of malic acid treatment on quality and active oxygen metabolism of postharvest apricot fruits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(22): 289−296.］
［28］ 陈国刚, 郭璟瑜, 于译, 等. 1-MCP 和壳聚糖处理保持红枣贮藏品质及其机理研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 338−344. ［CHEN Guogang, GUO Jingyu, YU Yi, et al. 1-methylcyclopropene（1-MCP）and chitosan maintaining quality and its mechanization of postharvest jujube fruit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(22): 338−344.］
［29］ 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 Peng, ZHAO Qian, JIA Xiaoyu, et al. Effects of 1-MCP combined with EA on storage quality and reactive oxygen species metabolism of blue honeysuckle[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(13): 63−73.］
［30］ ZHANG Yanzi, LI Pengmin, CHENG Lailiang. Developmental changes of carbohydrates, organic acids, amino acids, and phenolic compounds in ‘Honeycrisp’ apple flesh[J]. Food Chemistry, 2010, 123(4): 1013−1018.
［31］ LIU Changhong, ZHENG Huanhuan, SHENG Kangliang, et al. Effects of melatonin treatment on the postharvest quality of strawberry fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 139: 47−55.
［32］ MAHAJAN B V C, SINGH K, DHILLON W S. Effect of 1-methylcyclopropene（1-MCP）on storage life and quality of pear fruits[J]. Journal of Food Science and Technology, 2010, 47(3): 351−354.
［33］ WAN Ran, SONG Jinhui, LÜ Zhenyang, et al. Effects of 1-MCP treatment on postharvest fruit of five pomegranate varieties during low-temperature storage[J]. Horticulturae, 2023, 9(9): 1031.
［34］ ZHANG Y, GAO C C, MASUM M M I, et al. Dynamic microbiome changes reveal the effect of 1-methylcyclopropene treatment on reducing post-harvest fruit decay in “doyenne du comice” pear[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 729014.
［35］ 戴宝玲, 杨华, 杨桂玲, 等. 脱氧乙酸钠对杨梅保鲜的效果评价[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(7): 1252−1253. ［DAI Baoling, YANG Hua, YANG Guiling, et al. Effect evaluation of sodium deoxyacetate on preservation of *Myrica rubra*[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2017, 58(7): 1252−1253.］
［36］ 高萨, 史冉冉, 滕玲, 等. 二氯异氰尿酸钠、咪鲜胺及其代谢物在杨梅贮藏保鲜中的消解动态及安全评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(12): 97−105. ［GAO Sa, SHI Ranran, TENG Ling, et al. Degradation dynamics and safety evaluation of sodium dichloroisocyanurate, prochloraz and its metabolites in *Myrica rubra* Sieb. & Zucc storage and preservation[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(12): 97−105.］