

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240930003

引用格式: 陈山乔, 宣晓婷, 何思睿, 等. 1-甲基环丙烯与纳米分子筛共混聚乙烯膜对水蜜桃低温贮藏期间品质及氧化应激的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 137-144.

CHEN SQ, XUAN XT, HE SR, *et al.* Study on the effects of 1-methylcyclopropene and nano molecular sieve blended polyethylene film on the quality and oxidative stress of *Prunus persica* during cold storage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 137-144. (in Chinese with English abstract).

1-甲基环丙烯与纳米分子筛共混聚乙烯膜对水蜜桃低温贮藏期间品质及氧化应激的影响研究

陈山乔^{1,2}, 宣晓婷¹, 何思睿^{1,3}, 杨涵涵^{1,4}, 孙志栋¹, 朱麟^{1*}

(1. 宁波市农业科学研究院, 宁波 315040; 2. 宁波市特色农产品质量安全检测与控制重点实验室, 宁波 315040; 3. 浙江万里学院生物与环境学院, 宁波 315040; 4. 宁波大学食品科学与工程学院, 宁波 315800)

摘要: **目的** 探讨 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)和 ZSM-5 纳米分子筛共混聚乙烯膜对水蜜桃在低温贮藏期间品质及氧化应激的影响。**方法** 设立 4 种处理: 聚乙烯(polyethylene, PE)包装(P 组)、PE 包装联合 1-MCP (PM 组)、ZSM-5 纳米分子筛共混 PE 膜(PN 组)及两者联合(PMN 组)。样品在 0~2 °C 条件下贮藏, 每 7 d 共 35 d 取样, 进行质构、色差、可溶性固形物、可滴定酸、电导率等理化指标及多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)等活性测定与丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量测定。**结果** 1-MCP 和纳米分子筛共混 PE 膜有效抑制了果实的软化、色变和纤维化。第 21 d 时, PM 组和 PMN 组果实硬度极显著高于其他组($P<0.01$); PMN 组在第 27 d 的内聚性极显著低于 P 组($P<0.01$)。色差分析表明, 与 P 组相比, 其他处理组的果皮红色和黄色变化显著减少($P<0.05$), PMN 组在第 35 d 的颜色较黄, 但过熟过程得到抑制。理化指标方面, PM 组和 PMN 组的电导率比值和可滴定酸损失极显著低于 P 组($P<0.01$), 表明 1-MCP 和纳米分子筛共混 PE 膜能有效减缓细胞膜透性增加和滋味与营养物质降低。生理指标显示, 第 35 d PMN 组的 MDA 水平极显著低于 P 组($P<0.01$), POD 和 PPO 活性峰值时间延迟, PMN 组的 PPO 活性极显著低于 P 组($P<0.01$)。**结论** 1-MCP 和 ZSM-5 纳米分子筛共混 PE 膜的联合使用显著缓解了水蜜桃在低温贮藏期间的色变、过熟和氧化应激, 具有良好的应用前景。

关键词: 水蜜桃; ZSM-5; 纳米分子筛; 1-甲基环丙烯

Study on the effects of 1-methylcyclopropene and nano molecular sieve blended polyethylene film on the quality and oxidative stress of *Prunus persica* during cold storage

CHEN Shan-Qiao^{1,2}, XUAN Xiao-Ting¹, HE Si-Rui^{1,3}, YANG Han-Han^{1,4},
SUN Zhi-Dong¹, ZHU Lin^{1*}

收稿日期: 2024-09-30

基金项目: 宁波市农技推广项目(2023NT011); 宁海县科技项目(kj202400014)

第一作者: 陈山乔(1987—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为农产品保鲜与加工。E-mail: csq1306@gmail.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

(1. Ningbo Academy of Agricultural Sciences, Ningbo 315040, China; 2. Ningbo Key Laboratory of Testing and Control for Characteristic Agro-product Quality and Safety, Ningbo 315040, China; 3. College of Biological and Environmental Sciences, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315040, China; 4. College of Food Sciences and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315800, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) and ZSM-5 nano molecular sieve blended polyethylene (PE) film on the quality and oxidative stress of *Prunus persica* during cold storage. **Methods** The 4 kinds of treatments were set up: PE packaging (P), PE packaging combined with 1-MCP (PM), PE film blended with ZSM-5 Nano molecular sieve blended polyethylene film (PN), and the combination of ZSM-5 and 1-MCP (PMN). Samples were stored at 0–2 °C for 35 days with sampling every 7 days. Texture, chromatic indexes, soluble solids content, titratable acidity, electrical conductivity, and the activities or content of polyphenol oxidase (PPO), peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD) and malondialdehyde (MDA) were measured. **Results** 1-MCP and the nano molecular sieve blended polyethylene film effectively inhibited fruit softening, color change and fibrosis. On day 21, the fruit hardness in the PM and PMN groups was significantly higher than in other groups ($P<0.01$), while the cohesiveness of the PMN group was significantly lower than the P group on day 27 ($P<0.01$). Color analysis showed that the redness and yellowness changes in other treated groups were significantly reduced compared to the P group ($P<0.05$). Although the PMN group's fruit appeared more yellow by day 35, the over-ripening process was suppressed. In terms of physicochemical indicators, the PM and PMN groups exhibited significantly lower electrical conductivity ratio and titratable acidity loss than the P group ($P<0.01$), indicating that 1-MCP and the nano molecular sieve blended polyethylene film effectively slowed down the increase in cell membrane permeability and the decrease in flavor and nutrients. Physiological measurements showed that by day 35, the MDA level in the PMN group was significantly lower than in the P group ($P<0.01$), with delayed peak POD and PPO activities. The PMN group's PPO activity was significantly lower than the P group ($P<0.01$). **Conclusion** The combination of 1-MCP and ZSM-5 nano molecular sieve blended polyethylene film significantly alleviates color change, over-ripening, and oxidative stress in *Prunus persica* during cold storage, demonstrating promising application potential.

KEY WORDS: *Prunus persica*; ZSM-5; nano molecular sieves; 1-methylcyclopropene

0 引言

水蜜桃因其香甜多汁、口感鲜美、营养丰富等众多特点,一直深受广大消费者们的喜爱。随着电商快递逐渐成为水蜜桃主要的流通方式之一^[1],水蜜桃也因在贮运过程中易受到机械损伤,高温下容易腐烂,导致其在电商快递物流过程中存在耐贮藏性较差,可储存期较短的问题。因此为提高地方经济效益,加快水蜜桃产业的发展,需要解决水蜜桃的保鲜技术难题。目前常见的水蜜桃贮藏保鲜技术主要包括应用乙烯抑制剂可以有效延缓水蜜桃的成熟过程,保持果实的硬度和质地,从而延长货架期^[2];以及应用可食性涂层能够减少水分流失并提供抗菌作用,延长果实的保鲜期^[3]。然而上述这些技术在实际的产业应用中依然有着各自局限性,例如长期低温贮藏容易导致水蜜桃出现冷害现象,果肉木质化和无汁液等问题,这限制了其在冷藏中的应用^[4],可食性涂层缺乏大规模应用的经济性和实用性^[3],乙烯抑制技术处理方式的协同效应不足甚至某些情况下也可能出现相互抵消的现象^[5]。而立足于成本和

易实时性上,延缓水蜜桃过熟和缓解冷害发生,最有效的着眼点便在于对能够诱导果实呼吸跃变的植物激素—乙烯进行抑制或移除。借助不同原理的乙烯应对措施,同时进行抑制和移除^[6],有潜力形成协同作用,提高乙烯抑制或移除的效率。

纳米分子筛共混聚乙烯(polyethylene, PE)膜保鲜技术具有很好的发展前景,已广泛应用于果蔬的贮藏保鲜。ZSM-5分子筛是结晶态的硅酸盐或硅铝酸盐,通过氧桥键将硅氧四面体和铝氧四面体连接起来,并按照一定的连接方式形成相互贯通的空腔体系^[7]。这种特殊的晶体结构赋予其规整、均一的孔道,较大的比表面和孔体积,以及强大的表面极性和优异的吸附性能^[8]。而常规负载型催化剂存在活性组分烧结、流失和中毒等缺陷,通过构建合适孔径的纳米分子筛材料,采用活性组分封装技术法,把活性组分封装到纳米材料内部,大幅提升催化分解乙烯活性。其中ZSM-5分子筛被报道具有吸附和催化乙烯降解的活性^[9–10],有潜力应用于水蜜桃的采后保鲜。而将沸石型分子筛与膜材共混,应用于果蔬采后贮藏,也已经有诸多研究案例^[11],特

别是 ZSM-5 分子筛,已经被应用于苹果和猕猴桃的贮藏期延长中^[12],但目前对于此技术在水蜜桃上的应用尚需要进行研究。

基于此,本研究引入了 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)作为乙烯抑制剂,并联合应用共混于 PE 膜中的 ZSM-5 纳米分子筛共混 PE 膜作为乙烯清除措施,强化水蜜桃的低温贮藏保鲜效果,并以贮藏实验中对质构、色差、滋味和抗氧化酶活性等的考察验证其协同性,为水蜜桃物流和贮藏技术的后续开发提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

水蜜桃(*Prunus persica* var. *nucipersica*, 品种为‘湖景蜜露’,八成熟,采购于宁波市奉化区也盛农业发展有限公司);纳米分子筛共混 PE 薄膜套袋和常规 PE 薄膜套袋为相同基材和规格,厚度 0.1 mm,氧气透过量 $\leq 85 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ (24 h, 0.1 Mpa 条件下),分子筛共混量 5%,由宁波爱博瑞斯环保科技有限公司提供;3.3% 1-MCP 5 mg 小袋装采购于咸阳西秦生物科技有限公司。

磷酸盐缓冲液、NaCl、邻苯二胺-乙醇溶液、过氧化氢、液氮、三氯乙酸、硫代巴比妥酸溶液(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);过氧化物酶(polyphenol oxidase, POD)试剂盒、过氧化氢酶(catalase, CAT)试剂盒、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)试剂盒、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)试剂盒、丙二醛(malondialdehyde, MDA)试剂盒(北京索莱宝科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

PAL-BX/ACID F5 糖酸度仪[日本爱拓(ATAGO)公司];DDS-308A 数显电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司);X-Rite 色差仪[爱色丽(上海)色彩科技有限公司];TA.XT.plus 质构仪(英国 Stable Micro System 公司);Readmax1900 光吸收全波长酶标仪(上海闪谱生物科技有限公司)。

1.3 样品处理

将一批大小均一、品质优良的水蜜桃分别以下述 4 种包装处理方法。PE 包装设为 P 组。PE 包装并进行 1-MCP 处理设为 PM 组。ZSM-5 纳米分子筛共混 PE 膜共混 PE 膜套袋包装设为 PN 组。ZSM-5 纳米分子筛共混 PE 膜共混 PE 膜套袋联合 1-MCP 处理设为 PMN 组。上述套袋使用非破坏性的封口夹进行封口。将上述样品置于 0~2 °C 冷库下冷藏并观察桃的品质,每 7 d 每组取样进行相关指标测定。

1.4 指标测定

1.4.1 可溶性固形物和可滴定酸的测定

利用 ATAGO 糖酸度仪 PAL-BX/ACID F5 测定可溶性

固形物(total soluble solids, TSS)和可滴定酸(titratable acid, TA)。

1.4.2 电导率测定

将果肉切成 1 cm×1 cm×1 cm 的小块,放入 10 倍体积的去离子水中,使用数显电导率仪测定未煮沸时果肉与水的混合液电导率值。之后将果肉和水的混合物放入锅中加热,保持沸腾状态 10 min,并冷却至室温后测定其电导率。

1.4.3 色差测定

每个处理设置 6 个果实,在每个取样时间点,利用色差仪测定其果实赤道面上平均 4 个点的色差值。

1.4.4 质构测定

质构仪配备 TA/1S 探头,以全质构模式进行测定,具体参数为:预试验速度:1.0 mm/s;测试速度:5 mm/s;后试验速度:5 mm/s;位移:10 mm;时间:5 s;触发力:5.0 g。

1.4.5 质量维持率的测定

贮藏前果实重量为 X_1 ,取样时果实重量为 X_2 。质量维持率根据公式(1)计算:

$$\text{质量维持率}/\% = X_2/X_1 \times 100\% \quad (1)$$

1.4.6 多酚氧化酶活性测定

利用 PPO 活性测定试剂盒测定,其大致过程为将果肉匀浆后,与适量底物混合,测定其吸光度变化。通过监测 410 nm 下吸光度的增加速率来计算 PPO 活性。

1.4.7 过氧化物酶活性测定

利用 POD 活性测定试剂盒测定,其大致过程为将样品匀浆后,用适量缓冲液提取酶,加入过氧化氢和愈创木酚,通过比色法测定在 470 nm 下的吸光度变化,计算酶活性。

1.4.8 过氧化氢酶活性测定

CAT 活性测定试剂盒测定,大致过程为提取果实中的酶液后,加入过氧化氢溶液,测定其分解速率。使用分光光度计在 240 nm 波长下记录吸光度的变化,计算酶的活性。

1.4.9 超氧化物歧化酶活性测定

利用 SOD 活性测定试剂盒测定,其大致过程为样品匀浆后,加入邻苯三酚自氧化反应体系,利用 SOD 抑制自氧化产生的蓝色物质,测定在 560 nm 处的吸光度变化来计算 SOD 活性。

1.4.10 丙二醛含量测定

利用 MDA 活性测定试剂盒测定,大致过程为将样品与硫代巴比妥酸混合,加热形成 MDA-硫代巴比妥酸复合物,检测其 532 nm 和 600 nm 下吸光度,以此评估脂质过氧化程度。

1.5 数据处理

实验中数据处理基于 R 语言^[13]进行,处理间的差异

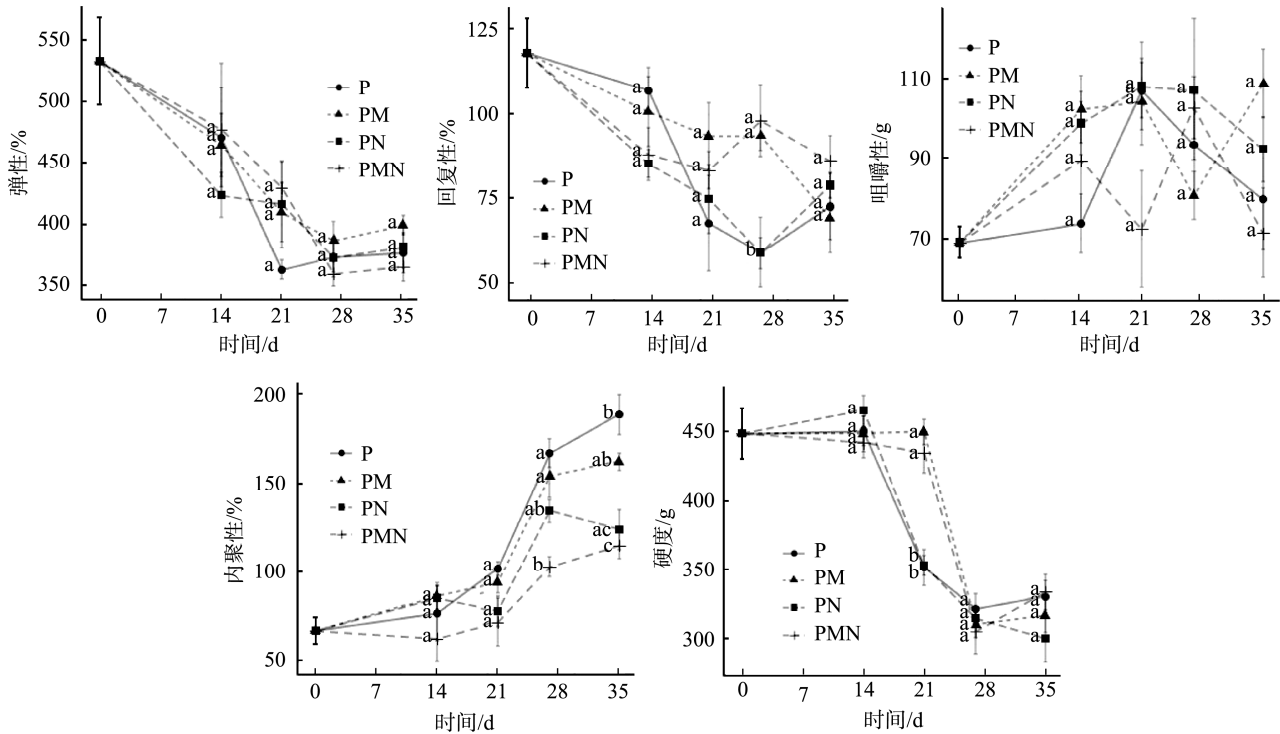
显著性分析由单因素方差分析-图奇事后检验进行计算。绘图基于 ggplot2 软件包^[14]。

2 结果与分析

2.1 质构

贮藏过程中的 5 个质构指标的变化如图 1 所示。在 35 d 的贮藏过程中,弹性指标在前 21 d 内呈下降趋势,之后大致维持在同一水平,但贮藏条件没有表现出统计学显著性差异。此外回复性指标也表现出类似的变化模式但是在 28 d 引入了 1-MCP 的两组相对其他两组呈现出极显著差异($P<0.01$)。但贮藏条件之间弹性和回复性没有表现出统计学显著性差异。弹性是指变形材料在变形力消失后恢复到未变形状态的速度,通过跟踪样品在初始压缩后的回弹力,可以计算出产品与“完美弹簧”的接近程度,而回弹力通过测量样品在压缩过程中的最大变形与去除外力后的恢复高度之比来量化^[15]。这两个指标都和食物的“嚼劲”“弹牙”等口感相关,而水蜜桃随着贮藏过程中后熟作用的推进,其口感也逐渐丧失其弹性向着“绵软”“入口即化”等方向变化。而水蜜桃的咀嚼性在贮藏过程中并未表现出变化规律,且各处理之间没有统计学差异。咀嚼性是一种描述固体食物质构的指标^[15],水蜜桃特有的绵软口感使其在质构测试中此指标无法稳定测量。而水蜜桃的内聚性随着贮藏时间延长,表现出了升高的趋势,并且能够观察到

1-MCP 和 ZSM-5 纳米分子筛共混聚乙烯膜共混 PE 膜包装相比单纯 PE 膜包装,能够减少贮藏过程中的内聚性升高。其中在第 27 d 的测试中同时使用了 1-MCP 和共混 PE 膜的 PMN 组水蜜桃其内聚性极显著低于单纯 PE 膜贮藏的 P 组($P<0.01$),相对于 PE 组,PN 组在 35 d 时内聚性上升得到缓解。内聚性是指食品在第一次压缩后,在第二次压缩时能够保持其形状和结构的能力。其计算方式通常是第二次压缩所需的力量与第一次压缩所需的力量之比^[15]。内聚性高的水蜜桃在口感上会显得少汁、口感不够细腻,缺少了水蜜桃应有的“化口”体验^[16],这与桃果肉在具有冷害风险的低温贮藏过程中的纤维化有关^[17]。而随着贮藏过程中水蜜桃后熟作用的进行,果实硬度也开始逐渐降低,而从质构实验的结果来看,其中第 21 d 时,PM 和 PMN 组的硬度极显著高于其他组($P<0.01$),而再之后各组之间不再表现出统计学差异,可见 1-MCP 的处理能够延迟后熟过程中果实的软化。1-MCP 对于桃类果实在低温短期贮藏过程中存在着显著的质构维持作用已经得到了文献报道的证实^[18]。已有文献报道证实,抑制乙烯对桃类果实在具有冷害风险的低温贮藏过程中具有显著的质构维持作用^[19],并且桃果肉纤维化与乙烯跃变的相关性也已有文献报道^[20],而 1-MCP 对果实乙烯受体的抑制与 ZSM-5 纳米分子筛共混 PE 膜对乙烯的吸收分解,则起到了呼吸跃变的抑制和延迟作用,从而缓解了果肉纤维化。



注: 其中误差线代表标准误差, 字母差异代表 $P < 0.01$ 水平差异显著性(只要含有相同的字母, 就表明两组之间没有显著性差异)。

图 3~4 同。

图 1 低温贮藏水蜜桃的质构特性($n=6$)

Fig.1 Textural characteristics of *Prunus persica* stored at low temperature ($n=6$)

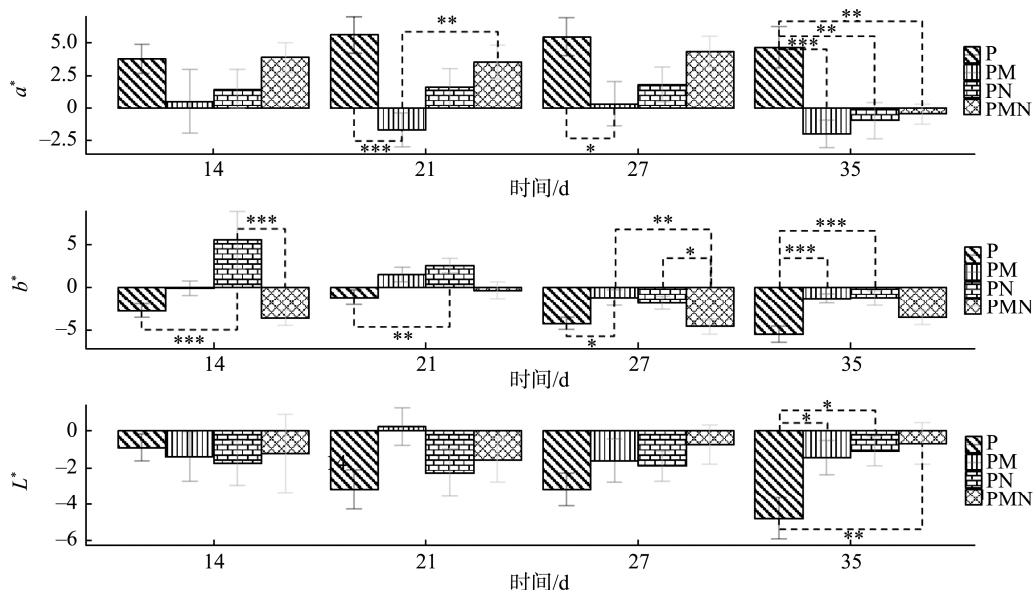
2.2 色差

水蜜桃贮藏过程中的色差测量结果相对各组样品初始值的变化如图2所示。如图2所示相比只有PE膜包装的P组,存在乙烯抑制措施的其他3组, a^* 更低,其中在贮藏终点的35 d,存在着显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)差异。 a^* 是CIELab颜色空间中的一个参数,用于表示颜色的红绿分量,数值越大越倾向红色,反之则为绿色^[21]。而 b^* 在贮藏初期未表现出明显的规律,而在贮藏后期(第27、35 d)则表现出P组和PMN组相对其他两组 b^* 更低的倾向,并且有一定的统计学显著性。和 a^* 相似,更高的 b^* 代表更倾向黄色,反之则为蓝色^[21]。对于 L^* 即明度^[21],在贮藏过程中会逐渐降低,直至35 d时,无乙烯应对措施措施的P组,其 L^* 已显著($P<0.05$)或略显著($P<0.1$)低于其他3组。明度降低代表果皮颜色偏向暗色、褐色。从结果可见,1-MCP和纳米分子筛共混PE膜能够抑制果皮变红。单独应用的1-MCP和纳米分子筛共混PE膜能够抑制果皮变黄。最重要的是,乙烯应对措施能够很好地缓解果皮颜色变暗。桃果实的颜色变化与果实的成熟和过熟密切相关。随着桃果实的成熟,果皮中的色素会发生变化,主要表现为类胡萝卜素(橙色和黄色色素)和花青素(红色和紫色色素)的积累^[22],过熟的桃子果皮颜色通常会变得更暗。果皮颜色的变化因此可以作为判断桃果实过熟的一个视觉指标。桃果实过熟的过程中,乙烯的生成、冷害和氧化应激等生理变化会影响果皮色素的分解或转化,导致颜色进一步加深^[23]。而1-MCP和纳米分子筛共混PE膜对乙烯的抑制和清除作用,能够有效缓解果实的色变。但是必须强调的是,对于消费

者来说,偏红和偏黄的果实颜色通常有着更强的吸引力^[24],因此PMN组果实颜色虽然偏黄,但是如MDA、质构等指标表明其过熟过程得到了抑制,意味着此包装处理方式是更加适应市场需求的选择。

2.3 理化指标

贮藏期间水蜜桃的TSS、TA、电导率比值和质量维持率如图3所示。从图3中结果可见,贮藏过程中水蜜桃的重量随着时间不断下降,至贮藏终点35 d时,已损失接近10%的重量,然而各组之间没有统计学差异。这可能是由于质量维持率的下降主要来自于果实水分的蒸发,而各处理中PE膜对水蒸气的阻隔能力没有显著区别所致。其中TSS呈现出先升高后降低的趋势,对于包括桃在内的多种存在采后后熟作用的水果,其先升高后降低的变化趋势已经有诸多文献报道^[25-26]。而TA则大致表现出逐渐降低的趋势,而在贮藏35 d时,具备乙烯应对措施措施的3组处理,其TA水平极显著大于只有PE膜包裹的P组($P<0.01$)。果肉在煮沸前后电导率的比值通常用于评估细胞膜完整性和果肉组织受损程度^[27]。由结果所知,电导率比值总体上随着贮藏时间的增加程上升趋势,而在贮藏35 d时,使用1-MCP抑制乙烯的PM组和PMN组相对PE组其电导率比值更低并表现出极显著差异($P<0.01$)。果肉煮沸前后电导率比值反映细胞膜受损、质地变化及健康状况。比值越大,说明细胞破损越严重,质地越差或老化越明显。果实在后熟过程中,细胞壁大分子化合物发生分解,导致TSS水平与电导率比值上升^[28]。有机酸作为果实采后生理活动的主要能量来源^[29],在贮藏过程中逐渐被消耗,水平下降。合



注: 其中误差线代表标准误差,***代表 $P<0.01$ 水平差异显著性,**代表 $P<0.05$ 水平差异显著性,*代表 $P<0.1$ 水平差异显著性,无标记为不显著。

图2 低温贮藏水蜜桃的色差指标($n=6$)

Fig.2 Chromatic indexes of *Prunus persica* stored at low temperature ($n=6$)

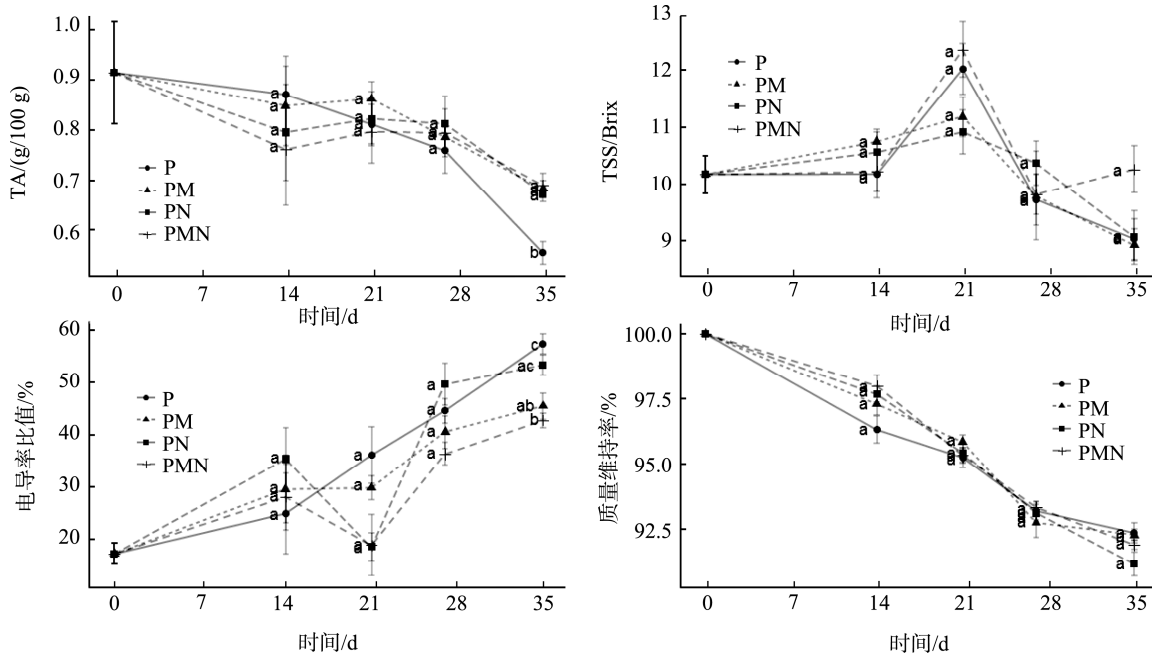


图 3 低温贮藏水蜜桃的理化指标(n=6)
Fig.3 Physico-chemical indices of *Prunus persica* stored at low temperature (n=6)

理的乙烯应对措施已被证实可有效抑制乙烯诱导的细胞呼吸强度增加^[30]。因此,实验结果表明,1-MCP 和纳米分子筛共混 PE 膜能够有效缓解桃果实 TA 的减少和电导率比值的上升。

2.4 生理指标

不同包装处理的水蜜桃,在贮藏期间 MDA 水平、

POD 活性、PPO、SOD 和 CAT 活性如图 4 所示。在贮藏前 14 d 内,水蜜桃的 MDA 水平维持在检出限量附近,而从 21 d 开始大幅上升,直至达到 35 d 时,相比于仅有 PE 膜包裹的 P 组,在两种乙烯应对措施联合作用下,PMN 组的 MDA 水平上升得到了极显著的抑制(P < 0.01)。POD 活性随着贮藏时间持续上升,而之后活性开始回落,其中

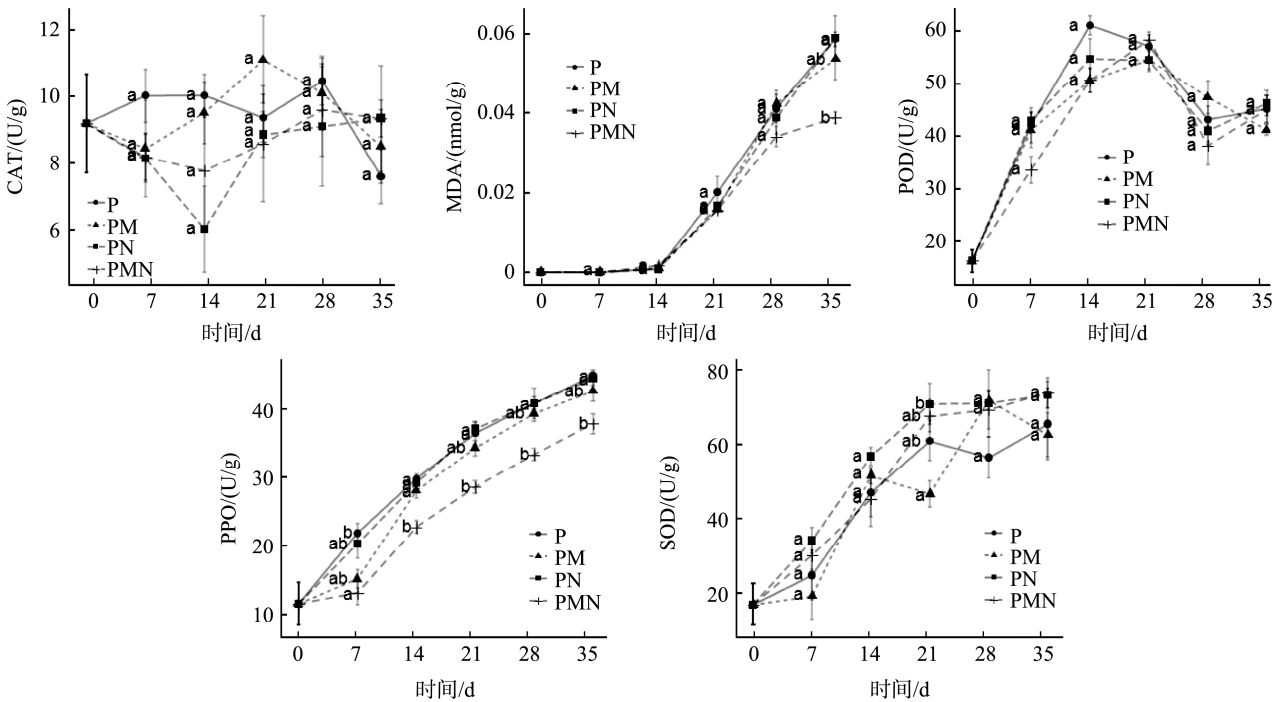


图 4 低温贮藏水蜜桃的生理指标(n=6)
Fig.4 Physiological indices of *Prunus persica* stored at low temperature (n=6)

PM组和PMN组相对其他两组,从实验数据来看其活性达峰时间延迟了7d。PPO的活性则随着贮藏持续上升,其中PMN组相在贮藏全程均极显著小于无乙烯应对措施P组($P<0.01$)。SOD活性的变化也遵循类似的规律,但是仅在21d的抽样中,PM组活性极显著小于P组($P<0.01$),其他时间点的抽样中,各处理组无显著差异。而CAT活性结合其标准误差来看,表现出贮藏全程维持在稳定的水平,且各组之间也均未表现出统计学差异。果实在采后贮藏过程中,据报道其CAT活性会逐渐上升^[31],但是有文献报道在小于40d的贮藏下,即使引入了乙烯应对措施,CAT活性也有可能保持稳定^[32]。此外,由于本研究所使用的PE膜基材有着较高的氧阻隔性,也有可能在水蜜桃自身呼吸的作用下,形成了自气调环境,而对CAT变化活性形成了影响。MDA是生物体内脂质过氧化反应的最终产物之一,常用于评估果实膜脂过氧化的程度^[33]。随着储存时间的增加,膜脂过氧化反应加剧,导致细胞膜受损,进而引发果肉质地变化和纤维化^[34]。氧化应激通常是由储存条件如冷害引发的,这些处理会加速膜脂氧化,从而导致果肉的纤维化^[35]。而1-MCP和纳米分子筛共混PE膜能够通过抑制或移除乙烯,降低水蜜桃呼吸跃变诱导的果肉过氧化水平升高^[36]。而POD、PPO、SOD等组成的抗氧化酶系的活性,表现出被贮藏过程所诱导,说明在采后贮藏过程中水蜜桃经历了显著的氧化应激。而通过实验数据,能够观察到对乙烯的抑制和移除,能够有效缓解其氧化应激。此外,作为果实酶促褐变的关键酶,POD和PPO的活性受到抑制^[37],以及其活性峰值时间的延迟,表明乙烯应对措施在缓解水蜜桃褐变方面起到了积极作用。

3 结 论

相比于单纯的PE膜包装,本研究结合了1-MCP乙烯受体抑制剂处理和PE膜共混具有乙烯移除活性ZSM-5纳米分子筛共混PE膜包装,均能够显著缓解水蜜桃在低温贮藏过程中的色变、过熟、果肉纤维化、滋味劣化和冷害风险等不利因素。而且通过实验观察可知,两者联合使用,能够达到更好的效果。综上所述,本研究报道的乙烯抑制技术是一种高效、安全、且节能的储存方案,在水蜜桃的低温贮藏及物流运输过程中具有广泛的应用前景,能够有效延长保鲜期并提高产品的市场竞争力。

参考文献

- [1] 肖光燕,杨小康,揭育行. “互联网+农业”销售推广中的实际应用研究——以宁波奉化水蜜桃为例[J]. 南方农机, 2019, 50(10): 2.
XIAO GY, YANG XK, JIE YX. Practical application research of “internet+agriculture” in sales promotion: A case study of fenghua peaches in Ningbo [J]. Southern Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 2.
- [2] HAYAT U, LI W, BIE H, *et al.* An overview on post-harvest technological advances and ripening techniques for increasing peach fruit quality and

- shelf life [J]. Horticulturae, 2024, 10(1): 4.
- [3] AAQIL M, PENG C, KAMAL A, *et al.* Recent approaches to the formulation, uses, and impact of edible coatings on fresh peach fruit [J]. Foods, 2024, 13(2): 267.
- [4] FRANZONI G, SPADAFORA ND, SIRANGELO TM, *et al.* Biochemical and molecular changes in peach fruit exposed to cold stress conditions [J]. Molecular Horticulture, 2023, 3(1): 24.
- [5] SHIN JS, PARK HS, LEE KW, *et al.* Advances in the strategic approaches of pre- and post-harvest treatment technologies for peach fruits (*Prunus persica*) [J]. Horticulturae, 2023, 9(3): 315.
- [6] 宋欢,蔡君,晏家瑛,等. 栅栏技术在果蔬保鲜中的应用[J]. 食品工业科技, 2010(11): 408–412.
SONG H, CAI J, YAN JY, *et al.* Application of fencing technology in fruit and vegetable preservation [J]. Food Industry Science and Technology, 2010(11): 408–412.
- [7] LIU B, WU Y, LIU D, *et al.* Molecular simulation and experimental studies of a mesoporous zsm-5 type molecular sieve [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2013, 15(8): 2741–8.
- [8] 吴育藩. 以分子筛为载体的两种缓释型保鲜包装膜的制备与应用[D]. 长沙: 湘潭大学, 2019.
WU YF. Preparation and application of two types of controlled-release fresh-keeping packaging films with molecular sieves as carriers [D]. Changsha: Xiangtan University, 2019.
- [9] 丁雪,耿嫻,刘富余,等. 乙烯在 zsm-5 催化剂上低聚反应规律的研究[J]. 燃料化学学报(中英文), 2009, 37(5): 560–566.
DING X, GENG P, LIU FY, *et al.* Oligomerization of ethene on ZSM-5 catalyst [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2009, 37(5): 560–566.
- [10] KIM S, JEONG GH, KIM SW. Ethylene gas decomposition using zsm-5/wo3-pt-nanorod composites for fruit freshness [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(13): 11250–11257.
- [11] HOSSEINIA M, ALAEE R, TABARZADI P, *et al.* Zeolite-based polymer composite films for vegetables and fruits packaging: A review [J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2024, 30(2): 363–382.
- [12] KIM SG, LEE HW, MOK YS, *et al.* Improvement of storage stability of apple and kiwi at room temperature using pd/zsm-5 catalyst and nonthermal plasma [J]. Applied Chemistry for Engineering, 2021, 32(5): 547–555.
- [13] R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing [M]. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2024.
- [14] HADLEY WICKHAM. GGLOT2: Elegant graphics for data analysis [M]. New York: Springer, 2016.
- [15] NISHINARI K, KOHYAMA K, KUMAGAI H, *et al.* Parameters of texture profile analysis [J]. Food Science and Technology Research, 2013, 19(3): 519–521.
- [16] HARKER FR, STEC MG, HALLETT IC, *et al.* Texture of parenchymatous plant tissue: A comparison between tensile and other instrumental and sensory measurements of tissue strength and juiciness [J]. Postharvest Biology and Technology, 1997, 11(2): 63–72.
- [17] LURIE S, CRISOSTO CH. Chilling injury in peach and nectarine [J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 37(3): 195–208.
- [18] XIONG ZF, LI H, LIU ZY, *et al.* Effect of 1-mcp on postharvest quality of

- french prune during storage at low temperature [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(8): 8.
- [19] LI X, PENG S, YU R, *et al.* Co-application of 1-MCP and laser microporous plastic bag packaging maintains postharvest quality and extends the shelf-life of honey peach fruit [J]. *Foods*, 2022, 11(12): 1733.
- [20] NAKANO R, KAWAI T, FUKAMATSU Y, *et al.* Postharvest properties of ultra-late maturing peach cultivars and their attributions to melting flesh (m) locus: Re-evaluation of m locus in association with flesh texture [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 2020: 11554158.
- [21] LUO MR, CIELAB-LUO R. *Encyclopedia of color science and technology* [M]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [22] TANG T, ZHOU H, WANG L, *et al.* Post-harvest application of methyl jasmonate or prohydrojasmon affects color development and anthocyanins biosynthesis in peach by regulation of sucrose metabolism [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 2022: 9871467.
- [23] VALENZUELA JL, MANZANO S, PALMA F, *et al.* Oxidative stress associated with chilling injury in immature fruit: Postharvest technological and biotechnological solutions [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(7): 1467.
- [24] CAMPBELL BL, MHLANGA S, LESSCHAEVE I. Consumer preferences for peach attributes: Market segmentation analysis and implications for new marketing strategies [J]. *Agricultural and Resource Economics Review*, 2013, 42(3): 518–541.
- [25] SINGH SP, SINGH Z, SWINNY EE. Postharvest nitric oxide fumigation delays fruit ripening and alleviates chilling injury during cold storage of japanese plums (*Prunus salicina* Lindell) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, 53(3): 101–108.
- [26] CASTELO BMNF, DE-MENDONÇASOARES BL, MARQUES D, *et al.* Effects of fungal chitosan nanoparticles as eco-friendly edible coatings on the quality of postharvest table grapes [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 139(5): 56–66.
- [27] XU R, CHEN Q, ZHANG Y, *et al.* Research on flesh texture and quality traits of kiwifruit (cv. Xuxiang) with fluctuating temperatures during cold storage [J]. *Foods*, 2023, 12(21): 3892.
- [28] MITALO OW, TOKIWA S, KASAHARA Y, *et al.* Determination of optimum temperature for long-term storage and analysis of ripening-related genes in “rainbow red” kiwifruit [J]. *Acta Horticulturae*, 2018(1218): 517–524.
- [29] SCHOUTEN RE, WOLTERING EJ, TIJSKENS LMM. Sugar and acid interconversion in tomato fruits based on biopsy sampling of locule gel and pericarp tissue [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 2016: 11183–11192.
- [30] KAFKALETOU M, FASSEAS C, TSANTILI E. Increased firmness and modified cell wall composition by ethylene were reversed by the ethylene inhibitor 1-methylcyclopropene (1-MCP) in the non-climacteric olives harvested at dark green stage—possible implementation of ethylene for olive quality [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2019, 2019: 23863–23871.
- [31] 王乐兵, 彭承祥, 孙晨晨, 等. 种不同涂膜处理对软枣猕猴桃贮藏品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(9): 232–239.
- WANG LB, PENG CX, SUN CC, *et al.* Effects of 4 kinds of different coating treatments on the storage quality of *Actinidia arguta* [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(9): 232–239.
- [32] 安娜, 赵志永, 贾晓昱, 等. 1-甲基环丙烯结合茉莉酸甲酯雾化熏蒸对石榴采后品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(15): 287–296
- AN N, ZHAO ZY, JIA XY, *et al.* Effects of 1-methylcyclopropene combined with methyl jasmonate aerosol fumigation on postharvest quality of pomegranate fruit [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(15): 287–296
- [33] ALI S, KHAN AS, MALIK AU. Postharvest l-cysteine application delayed pericarp browning, suppressed lipid peroxidation and maintained antioxidative activities of litchi fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 1211: 35–42.
- [34] YAN H, CHEN J, LIU J. The involvement of energy metabolism and lipid peroxidation in lignin accumulation of postharvest pumelos [J]. *Membranes*, 2020, 10(10): 269.
- [35] WU X, WU H, YU M, *et al.* Effect of combined hypobaric and cold storage on defense-related enzymes in postharvest peach fruit during ripening [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2022, 44(9): 93.
- [36] SIRANGELO TM, ROGERS HJ, SPADAFORA ND. Molecular investigations of peach post-harvest ripening processes and voc biosynthesis pathways: A review focused on integrated genomic, transcriptomic, and metabolomic approaches [J]. *Chemistry Proceedings*, 2022, 10(1): 8.
- [37] PASQUARIELLO MS, DI-PATRE D, MASTROBUONI F, *et al.* Influence of postharvest chitosan treatment on enzymatic browning and antioxidant enzyme activity in sweet cherry fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology* 2015, 109: 45–56.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)