

纸片型 1-MCP 处理对‘朝霞’水蜜桃果实活性氧清除系统的影响

张惠丽^{1,2}, 肖烟云¹, 曾玲珍^{1,2}, 郑江枫¹, 林艺芬^{1,2}, 林河通^{1,2*}

[1. 福建农林大学食品科学学院, 福州 350002; 2. 亚热带特色农产品采后生物学(福建农林大学)福建省高等学校重点实验室, 福州 350002]

摘要: **目的** 研究纸片型 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)处理对‘朝霞’水蜜桃果实活性氧(reactive oxygen species, ROS)清除系统的影响。**方法** 用 1.2 $\mu\text{L/L}$ 纸片型 1-MCP 处理‘朝霞’水蜜桃 12 h, 以没有 1-MCP 处理的‘朝霞’水蜜桃为对照, 果实在 $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 下贮藏 12 d, 每隔 2 d 取样分析果实超氧阴离子自由基($\text{O}_2^{\cdot-}$)产生速率、丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量、内源抗氧化物质含量和 ROS 清除酶活性的变化。**结果** 与对照‘朝霞’水蜜桃比较, 1-MCP 处理的‘朝霞’水蜜桃显示出较低的 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率和 MDA 含量, 较高的还原型谷胱甘肽和抗坏血酸含量, 以及较高的过氧化氢酶、超氧化物歧化酶和抗坏血酸过氧化物酶活性。**结论** 纸片型 1-MCP 处理能增强‘朝霞’水蜜桃 ROS 清除能力, 有效减少其果实 ROS 的产生与 MDA 的积累, 减轻‘朝霞’水蜜桃膜脂过氧化, 维持细胞膜结构的完整性, 从而保持‘朝霞’水蜜桃果实采后品质、增强其耐贮性。

关键词: 水蜜桃果实; 耐贮性; 活性氧; 活性氧清除系统; 膜脂过氧化; 1-甲基环丙烯

Influences of paper-containing 1-methylcyclopropene treatment on reactive oxygen species scavenging system of ‘Zhaoxia’ peach fruit

ZHANG Hui-Li^{1,2}, XIAO Yan-Yun¹, ZENG Ling-Zhen^{1,2},
ZHENG Jiang-Feng¹, LIN Yi-Fen^{1,2}, LIN He-Tong^{1,2*}

[1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Key Laboratory of Postharvest Biology of Subtropical Special Agricultural Products (Fujian Agriculture and Forestry University), Fujian Province University, Fuzhou 350002, China]

ABSTRACT: Objective To investigate the influences of paper-containing 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on reactive oxygen species (ROS) scavenging system of ‘Zhaoxia’ peach fruit. **Methods** The postharvest ‘Zhaoxia’ peaches were treated with 1.2 $\mu\text{L/L}$ of paper-containing 1-MCP for 12 h, and the peaches without 1-MCP treatment were used as control, afterwards, the above-treated peaches were stored at $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$ for 12 days. During storage, at 2-days interval, superoxide anion radical ($\text{O}_2^{\cdot-}$) generation rate, malondialdehyde (MDA) content, the levels of endogenous antioxidant substances, and ROS-scavenging enzymes activities were measured. **Results** Compared with the control peaches, 1-MCP treated-peaches exhibited lower levels of $\text{O}_2^{\cdot-}$ generation rate and MDA content, but higher values

基金项目: 福建农林大学科技创新基金项目(KFb22078XA、KFb22079XA)

Fund: Supported by the Science and Technology Innovation Foundation of Fujian Agriculture and Forestry University, China (KFb22078XA, KFb22079XA)

*通信作者: 林河通, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为果蔬保鲜。E-mail: hetonglin@163.com

*Corresponding author: LIN He-Tong, Ph.D, Professor, College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, No.15, Shangxiadian Road, Cangshan District, Fuzhou 350002, China. E-mail: hetonglin@163.com

of glutathione and ascorbic acid, and higher activities of catalase, superoxide dismutase and ascorbate peroxidase.

Conclusion The postharvest treatment of paper-containing 1-MCP can enhance the ROS-scavenging ability to reduce ROS production and MDA accumulation, and then mitigate the peroxidation of membrane lipids and stabilize the structure integrity of cell membrane, and thus retain the quality and enhance the storability of postharvest ‘Zhaoxia’ peach fruit.

KEY WORDS: peach fruit; storability; reactive oxygen species; reactive oxygen species scavenging system; membrane lipids peroxidation; 1-methylcyclopropene

0 引言

水蜜桃(*Prunus persica* L.)属蔷薇科(Rosaceae)、桃亚科(Amygdaloideae),集中栽培于福建、浙江、山东等地区^[1]。水蜜桃果实细腻软糯、甜蜜脆嫩,因此深受消费者的喜爱。水蜜桃果皮薄且裹有柔毛,采收及采后处理过程中受到的机械损伤和采收时的高温环境容易使其柔毛和细胞结构受损,最后导致品质劣变^[2]。此外,相关研究认为,果实活性氧(reactive oxygen species, ROS)清除能力的下降、ROS的产生和丙二醛(malondialdehyde, MDA)的积累等会导致水蜜桃果实细胞膜结构的破坏和贮藏品质的降低^[3]。所以,如何平衡采后水蜜桃果实 ROS 的产生与消除而减少 ROS 对果实的损伤已成为增强采后水蜜桃果实品质与耐贮性亟需解决的问题。目前,国内外研究主要采用物理保鲜技术(如低温冷藏^[3]、减压贮藏^[4]等)以提高采后水蜜桃果实的贮藏品质与耐贮性,但其存在成本高、操作困难等问题,而化学保鲜方法(如 CaC_2 ^[5])存在危害人体健康的安全性问题。因此,亟需发展一种高效便捷、低成本、绿色环保的保鲜技术以提高水蜜桃果实采后贮藏品质、增强果实耐贮性。

ROS 清除系统在果蔬成熟衰老中扮演着重要的角色。果蔬在正常成熟过程中,组织内的 ROS[包括过氧化氢(hydrogen peroxide, H_2O_2)、超氧阴离子自由基(superoxide anion, $\text{O}_2^{\cdot-}$)等]水平保持着相应的平衡状态^[6]。果蔬组织中的 ROS 清除酶,主要包括过氧化氢酶(catalase, CAT)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX);果蔬组织中的内源抗氧化物质,主要包括还原型谷胱甘肽(glutathione, GSH)和还原型抗坏血酸(ascorbic acid, AsA)。前人研究认为,ROS 清除酶和内源抗氧化物质在果蔬组织的 ROS 清除系统中起着重要作用。较高水平的 ROS 清除酶和内源抗氧化物质能够稳定细胞膜结构,减少膜脂过氧化产物 MDA 的产生,减缓采后果蔬衰老^[7]。然而,当采后果蔬衰老或遭受外界胁迫时,ROS 大量积累会反过来致使 ROS 代谢失调,进而破坏细胞膜结构,促进 MDA 含量的增加,加快细胞膜膜脂过氧化,加速果蔬采后衰老、品质劣变^[8]。有研究报道,热处理^[9]、脱落酸处理^[10]能提高采后桃果实的 ROS 清除能力,降低 ROS 水平和 MDA 含量,减缓采后桃果实细胞膜

膜脂过氧化,保持细胞膜的完整性,进而提高采后果蔬的贮藏品质和耐贮性。据此认为,ROS 水平,即 ROS 产生与清除平衡,与采后果蔬贮藏品质和耐贮性具有重要关系。

1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)是一种新型乙烯受体抑制剂,能够有效抑制果蔬成熟衰老^[11]。近年研究发现,1-MCP 处理能有效地延缓苹果^[12]、猕猴桃^[13]、榴莲^[14]、安溪油柿^[15-17]、黄花梨^[18-19]、香蕉^[20]、油棕^[21]等果实采后腐烂和衰老,较好地保持果实风味及营养,延长采后贮藏期。但是,所采用的 1-MCP 产品为粉末状或药片型,其在采后果蔬保鲜时应用难以精确控制使用浓度,且不利于现场操作^[18,21]。因此,这类剂型的 1-MCP 尚未在农产品采后保鲜实践中得到大量推广使用。然而,纸片型 1-MCP (AnsiP-S)在安溪油柿^[8,15-17]、‘油棕’李^[21]、黄花梨^[18-19]等农产品产地保鲜处理中使用十分方便,生产者可根据所需而裁剪相对应面积的纸片以精准控制采后农产品保鲜所需的 1-MCP 浓度^[8]。‘朝霞’水蜜桃是福建省等中国南方的主要水蜜桃栽培品种,其果实采后极易品质劣变,保鲜期短。本课题组前期研究发现,纸片型 1-MCP 处理能够有效抑制‘朝霞’水蜜桃采后成熟衰老,较好保持其果实品质和增强耐贮性^[22-23]。目前,ROS 清除系统在 1-MCP 延缓‘朝霞’水蜜桃品质劣变的作用机制尚不清楚。因此,本研究探究纸片型 1-MCP 对‘朝霞’水蜜桃果实 ROS 清除系统的影响,旨在为提高‘朝霞’水蜜桃果实采后贮藏品质、延长保鲜期提供技术指导和科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

八成熟的‘朝霞’水蜜桃果实采收于福建省古田县兰坦村果园,果实采收后运至福州的实验室,选择成熟度、色泽、大小较为一致的健康果实进行实验。

纸片型 1-MCP(台湾利统股份有限公司);抗坏血酸、氮蓝四唑、过氧化氢、甲醇、 α -萘胺、红菲罗啉(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

T6 紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司);GL-20G-II 高速冷冻离心机(上海安亭科学仪器

厂); ZRY-250 冷光源人工气候箱(宁波赛福实验仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

在前期预实验中,采用不同浓度纸片型 1-MCP (0.3、0.6、0.9、1.2、1.5、1.8 $\mu\text{L/L}$)处理‘朝霞’水蜜桃果实 12 h。研究表明,1.2 $\mu\text{L/L}$ 纸片型 1-MCP 处理能保持采后水蜜桃果实最低的果实腐烂率和病害指数,保持最高的果实商品率^[22],发现 1.2 $\mu\text{L/L}$ 为纸片型 1-MCP 保鲜‘朝霞’水蜜桃果实的最佳浓度,因此,本研究采用 1.2 $\mu\text{L/L}$ 浓度做进一步实验。

在本研究中,将挑选、清洗、晾干之后的‘朝霞’水蜜桃果实(500 个)随机、平均分成两组(250 个/组),并进行以下处理:

1-MCP 处理组:把 250 个‘朝霞’水蜜桃果实放入泡沫箱,再根据所采用的处理剂量裁剪纸片型 1-MCP,用蒸馏水喷湿之后平铺在果实上方,密封后在(25±1)°C下放置 12 h。

对照(control)组:将 250 个‘朝霞’水蜜桃果实放入未含有纸片型 1-MCP 的泡沫箱,密封后在(25±1)°C下放置 12 h。

‘朝霞’水蜜桃果实经以上处理后,用 0.015 mm 厚的聚乙烯薄膜袋分装(每袋装果实 5 个,每组处理 50 袋),置于(25±1)°C、相对湿度 90%条件下贮藏。每隔 2 d 取 10 袋(共 50 个‘朝霞’水蜜桃果实)用于测定 ROS 清除系统相关指标。

1.3.2 O_2^- 产生速率和 MDA 含量测定

参照 TANG 等^[24]的方法,从 5 个‘朝霞’水蜜桃果实中取果肉样品 2.0 g,用于测定 O_2^- 产生速率和 MDA 含量,其单位分别为 $\text{nmol}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 、 nmol/g 。

1.3.3 SOD、CAT、APX 活性和酶提取液蛋白质含量测定

参照 LIN 等^[7]的方法,从 5 个‘朝霞’水蜜桃果实中取果肉样品 2.0 g,用于测定 SOD、CAT、APX 活性;参照 TANG 等^[24]的方法,测定‘朝霞’水蜜桃酶提取液的蛋白质含量。上述酶的活性单位以 $\text{U}/\text{mg protein}$ 表示。

1.3.4 AsA 和 GSH 含量测定

参照 SUN 等^[25]的方法,从 5 个‘朝霞’水蜜桃果实中取果肉样品 2.0 g,用于测定 AsA 和 GSH 含量,单位为 mg/g 。

1.4 数据统计与分析

以上实验的测定均进行 3 次重复,采用 Microsoft Office Excel 2016 进行分析并制图,采用 SPSS 21.0 进行数

2 结果与分析

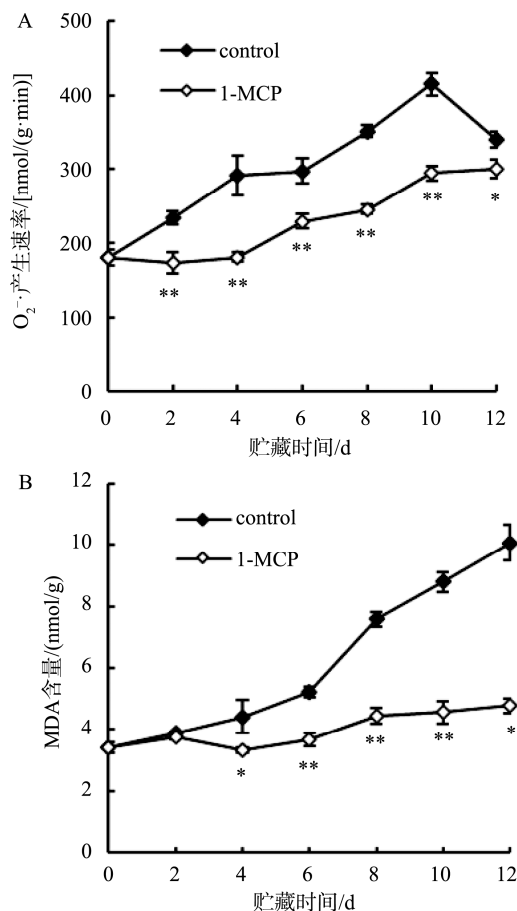
2.1 ‘朝霞’水蜜桃果实 O_2^- 产生速率和 MDA 含量的变化

由图 1A 所示,对照组果实的 O_2^- 产生速率在贮藏 0~10 d 快速上升,10~12 d 快速下降。而 1-MCP 处理组水蜜桃果实的 O_2^- 产生速率在整个贮藏期间缓慢上升。进一

步比较分析可得,1-MCP 处理组水蜜桃果实的 O_2^- 产生速率均低于对照组,并在贮藏 2~10 d 达极显著($P<0.01$)水平,在贮藏 12 d 达显著($P<0.05$)水平。

如图 1B 所示,对照组水蜜桃果实 MDA 含量在贮藏期 0~12 d 快速上升,尤其在贮藏 12 d 时,其果实 MDA 含量比贮藏 0 d 增加了 66.2%。然而,1-MCP 处理组水蜜桃果实的 MDA 含量在贮藏 0~4 d 先缓慢上升而后下降,4~12 d 缓慢升高。进一步比较分析可得,与对照组果实相比,1-MCP 处理组水蜜桃果实 MDA 含量均保持较低水平,且在贮藏 4 d 达到显著($P<0.05$)差异性,在贮藏 6~12 d 达到极显著($P<0.01$)差异性。

上述结果表明,纸片型 1-MCP 处理能有效保持采后‘朝霞’水蜜桃果实较低的 O_2^- 产生速率与 MDA 含量,延缓果实细胞内 ROS 积累、细胞膜脂质过氧化,有效稳定‘朝霞’水蜜桃果实的细胞结构。



注: *、**分别表示在同一贮藏时间内,对照组和 1-MCP 处理组的‘朝霞’水蜜桃果实之间具有显著($P<0.05$)水平、极显著($P<0.01$)水平,下同。

图 1 1-MCP 处理对‘朝霞’水蜜桃 O_2^- 产生速率(A)和 MDA 含量(B)的影响($n=3$)

Fig.1 Effects of 1-MCP treatment on the O_2^- production rates (A) and MDA content (B) of harvested ‘Zhaoxia’ peaches ($n=3$)

2.2 ‘朝霞’水蜜桃果实 SOD、CAT 和 APX 活性的变化

由图 2A 所示, 对照组水蜜桃果实 SOD 活性在贮藏 0~2 d 快速上升, 2~12 d 快速下降。然而, 1-MCP 处理组水蜜桃果实 SOD 活性在贮藏 0~2 d 快速上升, 2~4 d 快速下降, 4~6 d 缓慢上升, 6~12 d 快速下降。进一步比较分析发现, 1-MCP 处理组的水蜜桃果实 SOD 活性在贮藏 4 d 显著 ($P<0.05$) 高于对照组果实, 在贮藏 2、6~12 d 极显著 ($P<0.01$) 高于对照组果实。

由图 2B 所示, 对照组水蜜桃果实 CAT 活性在贮藏 0~4 d 快速下降, 4~8 d 缓慢下降, 8~12 d 快速上升。而 1-MCP 处理组水蜜桃果实 CAT 活性在贮藏 0~4 d 快速下降, 4~10 d 缓慢下降, 10~12 d 快速上升。进一步分析发现, 在整个贮藏期, 1-MCP 处理组水蜜桃果实 CAT 活性均高于对照组, 尤其在贮藏 4~8、12 d 具有极显著 ($P<0.01$) 的差异性。

由图 2C 所示, 两组不同处理的水蜜桃果实 APX 活性在贮藏 0~12 d 均不断上升。与对照组果实相比, 1-MCP 处理组的水蜜桃果实 APX 活性在整个贮藏期均保持较高水平, 且在贮藏 6~12 d 呈现出极显著 ($P<0.01$) 较高水平。

上述结果表明, 纸片型 1-MCP 处理能有效保持采后

‘朝霞’水蜜桃果实较高的 SOD、CAT 和 APX 活性, 增强 ROS 清除能力以有效减少 ROS 的产生, 延缓‘朝霞’水蜜桃果实采后品质劣变。

2.3 ‘朝霞’水蜜桃果实 AsA 和 GSH 含量的变化

由图 3A 可知, 对照组水蜜桃果实 AsA 含量在贮藏 0~4 d 呈快速升高趋势, 而 4~12 d 呈快速下降趋势。而 1-MCP 处理组果实 AsA 含量在贮藏 0~6 d 快速升高, 6~10 d 快速下降, 10~12 d 缓慢下降。进一步分析发现, 1-MCP 处理组的水蜜桃果实 AsA 含量在贮藏 6~12 d 保持较高水平, 且在贮藏 6~8、12 d 具有极显著 ($P<0.01$) 差异性, 在贮藏 10 d 具有显著 ($P<0.05$) 差异性。

由图 3B 可知, 两组不同处理的水蜜桃果实 GSH 含量在贮藏期间不断下降。进一步比较可得, 与对照组果实相比, 1-MCP 处理组的水蜜桃果实 GSH 含量在贮藏期 0~12 d 始终保持较高水平, 在贮藏 2~6 d 达到极显著 ($P<0.01$) 水平, 在贮藏 10~12 d 达到显著 ($P<0.05$) 水平。

上述结果表明, 纸片型 1-MCP 处理能有效保持采后‘朝霞’水蜜桃果实较高的 AsA 和 GSH 含量, 提高其果实 ROS 清除能力, 从而维持‘朝霞’水蜜桃果实较好的贮藏品质和耐贮性。

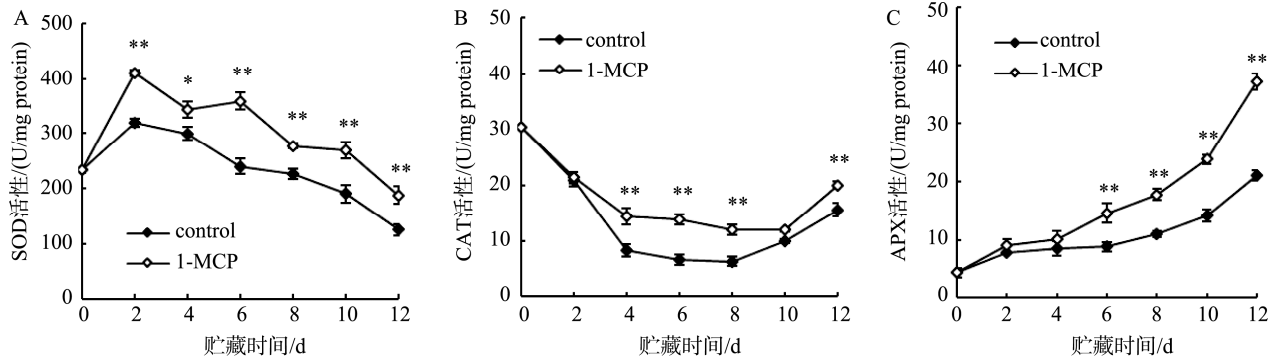


图2 1-MCP 处理对‘朝霞’水蜜桃 SOD (A)、CAT (B)和 APX (C)活性的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of 1-MCP treatment on activities of SOD (A), CAT (B) and APX (C) of harvested ‘Zhaoxia’ peaches ($n=3$)

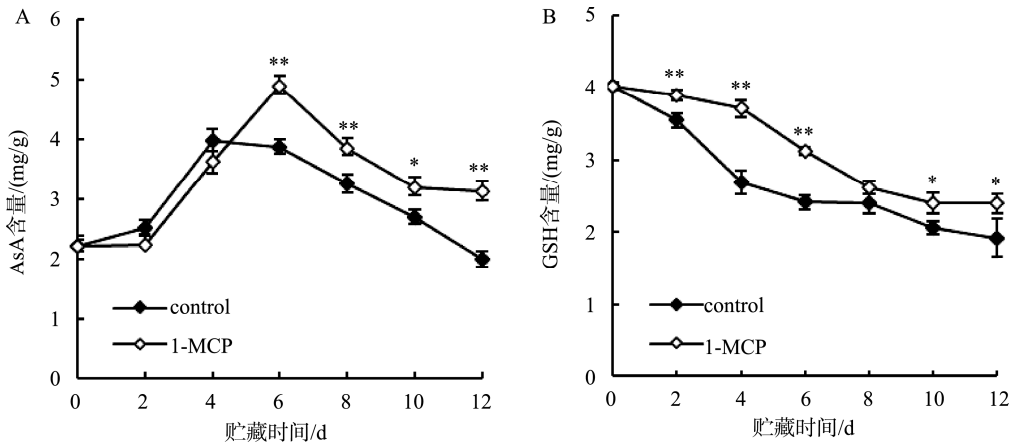


图3 1-MCP 处理对‘朝霞’水蜜桃 AsA (A)和 GSH (B)含量的影响($n=3$)

Fig.3 Effects of 1-MCP treatment on content of AsA (A) and GSH (B) of harvested ‘Zhaoxia’ peaches ($n=3$)

3 讨 论

3.1 纸片型 1-MCP 处理对‘朝霞’水蜜桃果实 O_2^- 产生速率和 MDA 含量的影响及其与耐贮性的关系

正常情况下,低水平的 ROS 作为果实生理代谢的信号分子,能够有效激活果实对衰老、热伤害、冷害、病原菌感染等逆境胁迫的应激反应^[26]。采后果实在成熟、衰老过程中或受到逆境胁迫时易发生氧化反应,导致果实积累过多的 ROS,例如 O_2^- 和 $\cdot OH$, 进而导致 ROS 代谢失调,引发细胞膜氧化损伤^[6]。大量产生的 O_2^- 和 $\cdot OH$ 会与果蔬组织内的物质进行反应,其产生的活性产物会进一步破坏果实细胞结构及正常机体功能。另外,采后果实中大量累积的 ROS 会加剧细胞膜脂过氧化,促进 MDA(膜脂过氧化最终产物)的不断累积,加速 MDA 对果实细胞膜的破坏。因此, O_2^- 和 MDA 可用于评估采后果实衰老、品质劣变程度^[26]。

本课题组前期研究发现,‘朝霞’水蜜桃果实经 1-MCP 处理后,其能够更好地保持果实细胞膜完整性,延缓衰老,增强采后‘朝霞’水蜜桃果实采后品质和耐贮性^[22-23]。本研究结果发现,对照组‘朝霞’水蜜桃果实 O_2^- 产生速率在贮藏期间呈先升后降趋势。这说明,采后‘朝霞’水蜜桃果实在贮藏期间,其体内 ROS 水平不断上升。但是,在贮藏后期,随着其衰老进程的加剧,其生命代谢活动减弱,ROS 水平下降。同时,MDA 含量在贮藏期间不断积累(图 1B),这说明,‘朝霞’水蜜桃果实膜脂过氧化程度加深。由相关性分析可知,在整个贮藏期间,‘朝霞’水蜜桃果实 O_2^- 产生速率(图 1A)和 MDA 含量(图 1B)与果实好果率^[22]呈负相关关系(相关系数分别为 $r=-0.8861, -0.9796$)。这说明,随着 ROS 的积累,采后‘朝霞’水蜜桃果实细胞膜结构受到破坏,从而导致‘朝霞’水蜜桃果实品质下降。然而,与对照组‘朝霞’水蜜桃果实相比,1-MCP 处理降低了‘朝霞’水蜜桃果实 O_2^- 的产生速率(图 1A)和 MDA 含量的积累(图 1B)。在贮藏 0~4 d,经 1-MCP 处理组的 O_2^- 的产生速率缓慢上升,而 MDA 含量先缓慢上升再下降,‘朝霞’水蜜桃果实中 ROS 水平的上升及膜脂过氧化受到抑制,延缓了品质劣变的发生,这与 1-MCP 处理能够保持采后‘朝霞’水蜜桃果实较高的好果率结论相一致^[22]。在贮藏后期 10~12 d,对照组‘朝霞’水蜜桃果实衰老进程加剧, O_2^- 的产生速率快速下降,而 1-MCP 处理则延缓了果实 ROS 水平的上升,即延缓了衰老进程。这说明 1-MCP 处理可以有效延缓采后‘朝霞’水蜜桃果实 ROS 产生及膜脂过氧化,有效减少对细胞膜结构的破坏,从而有利于维持细胞膜的完整性。同时,其他相关研究结论也与本研究结论相一致,如热处理^[9]、脱落酸处理^[10]、1-MCP 处理^[12]能降低 ROS 水平而延缓果实膜脂过氧化进程,从而有效延缓了苹果等果实的衰老。

3.2 纸片型 1-MCP 处理对‘朝霞’水蜜桃果实 ROS 清除酶的影响及其与耐贮性的关系

在 ROS 清除系统中,ROS 酶清除系统与非酶清除系

统能清除多余 ROS 及其氧化中间产物,延缓果蔬后熟衰老和品质劣变^[27-28]。ROS 清除酶(SOD、CAT、APX)在 ROS 清除中扮演着重要的角色。SOD 促进 O_2^- 生成 O_2 和 H_2O_2 , H_2O_2 在 CAT 和 APX 的作用下被进一步清除,从而延缓 $\cdot OH$ 的生成,进而延缓果实品质劣变的发生^[29]。研究发现,褪黑素处理^[27]通过增强 SOD、CAT 和 APX 活性,清除果实体内过量的 ROS,因而能够延缓采后桃果实的衰老、品质劣变,提高其耐贮性。XI 等^[30]研究发现,绿原酸能够有效提高采后桃果实 ROS 清除酶的活性,保持果实细胞膜完整性,减少 ROS 的产生与积累,从而延缓桃果实品质劣变。因此,采后果实的贮藏品质和耐贮性与 ROS 清除酶活性具有密切关系。

本研究结果发现,对照组‘朝霞’水蜜桃果实 SOD 活性在贮藏 0~2 d 快速上升(图 2A),这可能是因为在贮藏初期果实 ROS 大量产生而做出的应激反应,即 SOD 在 ROS 爆发初期时作为首道防线将过量产生的 O_2^- 催化形成 H_2O_2 ^[31]。在贮藏 2~10 d,‘朝霞’水蜜桃果实 SOD 活性(图 2A)下降,而 O_2^- 产生速率(图 1A)和 MDA 含量(图 1B)增加。由相关性分析可知,在贮藏 2~10 d, SOD 活性(图 2A)与 O_2^- 产生速率(图 1A)和 MDA 含量(图 1B)呈负相关关系($r=-0.9276, -0.9333$)。此外, CAT 活性在 0~8 d 逐渐下降(图 2),同时果实好果率^[22]在贮藏 2~12 d 下降。进一步分析表明, SOD 活性(图 2A)在贮藏 2~10 d 与果实好果率^[22]呈正相关关系($r=0.9903$),而 CAT(图 2B)在贮藏 0~8 d 与果实好果率^[22]呈正相关关系($r=0.7825$)。因此说明,‘朝霞’水蜜桃果实 SOD 和 CAT 等 ROS 清除酶活性的降低致使其 ROS 清除能力的下降,进而促进‘朝霞’水蜜桃果实 ROS 大量积累,从而导致‘朝霞’水蜜桃果实品质下降。

然而,与对照组‘朝霞’水蜜桃果实相比,1-MCP 处理组的‘朝霞’水蜜桃果实保持较高的 SOD、CAT、APX 活性(图 2)和过氧化物酶(peroxidase, POD)活性^[23],并保持较低的细胞膜渗透率^[22]和较高的果实好果率^[22]。在贮藏初期,经 1-MCP 处理的‘朝霞’水蜜桃果实能够更快速地做出应激反应以清除 ROS 的爆发,这与 1-MCP 处理组的‘朝霞’水蜜桃果实 O_2^- 产生速率(图 1A)在贮藏 0~4 d 缓慢上升的结果相一致。同时,这也与 SOD 作为 ROS 清除酶系统的首道防线以清除过量产生的 O_2^- 结论一致^[31]。此外,在贮藏后期 8~12 d,1-MCP 处理增强了‘朝霞’水蜜桃果实的 CAT 和 APX 活性,这可能因为在贮藏后期,由 CAT 和 APX 清除‘朝霞’水蜜桃果实在贮藏前期所积累的由 O_2^- 歧化而产生的 H_2O_2 以及果实自身因衰老而产生的 H_2O_2 。这与前期研究发现的 1-MCP 处理能够使‘朝霞’水蜜桃果实保持较高 POD 活性结果一致^[23]。但是,后续还需要进一步研究 H_2O_2 含量水平变化。因此,1-MCP 处理可以提升‘朝霞’水蜜桃果实 ROS 清除酶活性以提升 ROS 清除能力,减少 ROS 的积累,有效维持细胞膜结构的完整性,从而提升其贮藏性

能。TANG 等^[24]研究报道与本研究结果一致,即电解水处理能有效增强龙眼果实 ROS 清除能力,与其较高的 ROS 清除酶活性水平有关。另外,桃果实经热处理^[9]或褪黑素处理^[27]后,其能够更好地调节 ROS 代谢水平,减少 ROS 积累,进而延缓衰老、延长保质期。

3.3 纸片型 1-MCP 处理对‘朝霞’水蜜桃果实内源抗氧化物质的影响及其与耐贮性的关系

在 ROS 非酶清除系统中,内源抗氧化物质(AsA、GSH)具有防御氧化应激功能,起到延缓自由基产生和清除过多自由基的作用,且能够与 APX 相互协作,促进单脱氢抗坏血酸的生成,而单脱氢抗坏血酸易被歧化成 AsA 和双脱氢抗坏血酸, GSH 进一步将双脱氢抗坏血酸还原成 AsA^[32]。前人研究发现,外源钙和三氟拉嗪处理可以提升水蜜桃果实 ROS 清除能力,保持较高的 GSH 含量,减少 ROS 的积累,保持较好的果实贮藏品质^[33]。ZHANG 等^[10]研究发现,100 $\mu\text{mol/L}$ 脱落酸处理采后桃果实,可通过提高其果实 ROS 清除酶活性和抗氧化能力,从而保持采后桃果实的贮藏品质。由此推测,AsA 和 GSH 含量关系着采后果实组织内的 ROS 清除能力,会影响果实品质劣变进程。

本研究表明,对照组‘朝霞’水蜜桃果实 AsA 含量(图 3A)在贮藏 0~4 d 快速增加,在贮藏 4 d 达到峰值。这可能是因为 ROS 非酶清除系统对采后‘朝霞’水蜜桃果实 ROS 产生而做出的应激反应,以累积 AsA 而清除多余 ROS。然而,‘朝霞’水蜜桃果实 AsA 含量在贮藏 4~12 d 及 GSH 含量在贮藏 0~12 d 不断快速下降。在贮藏 4~12 d, AsA 含量(图 3A)和 GSH 含量(图 3B)与 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率(图 1A)呈负相关关系($r=-0.6245, -0.6718$), AsA 含量(图 3A)和 GSH 含量(图 3B)也与 MDA 含量(图 1B)呈负相关关系($r=-0.9789, -0.9420$)。这说明,‘朝霞’水蜜桃果实采后品质劣变与 ROS 抗氧化能力下降、ROS 的产生和累积有关。然而,与对照组‘朝霞’水蜜桃果实相比,在贮藏 2~6 d, 1-MCP 处理的‘朝霞’水蜜桃果实 AsA 含量快速上升达到峰值,这可能是 1-MCP 处理诱导积累更多的抗氧化物质以清除 ROS 的结果。1-MCP 处理的‘朝霞’水蜜桃果实在贮藏 6~12 d 保持较高的 AsA 含量,这与其保持较高的 APX 活性(图 2C)结果一致。此外,1-MCP 处理的‘朝霞’水蜜桃果实在整个贮藏期保持较高的 GSH 含量(图 3)。这可能是由于 1-MCP 处理通过维持较高的 AsA 含量和 GSH 以平衡果实中 AsA-GSH 的氧化还原反应,使果实保持较高的 ROS 抗氧化能力,从而清除果实中多余 ROS,保护果实细胞膜结构的完整性,延迟果实品质的下降。这与 1-MCP 处理可使桃果实保持较低的 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率(图 1A)和 MDA 含量(图 1B)结果一致。此外,这还与前期研究发现的 1-MCP 处理能够减缓‘朝霞’水蜜桃果实细胞膜透性上升,使其保持较好贮藏品质的结论一致^[22]。因此得出,1-MCP 处理能够促进‘朝霞’水蜜桃果实积累非酶抗氧化物质,增强其果实 ROS 清除能力而清除 ROS,减轻

‘朝霞’水蜜桃果实细胞膜氧化损伤和膜脂过氧化,稳定其果实细胞膜结构,从而保持较好的‘朝霞’水蜜桃果实采后品质。前人的研究结果也与本研究的结果相似。例如, ZHANG 等^[10]研究发现,100 $\mu\text{mol/L}$ 脱落酸能够显著提升桃果实的抗氧化能力而延缓品质劣变的发生。另外,经卡多赞处理^[7]的龙眼果实含有较高的 AsA 和 GSH 含量,其通过增强清除积累 ROS 的能力,以延长采后龙眼果实的货架期。相反地,病原菌侵染采后龙眼果实后,病原菌降低了果实中 AsA 和 GSH 含量,使果实无法及时清除自由基,导致果实中 ROS 的产生与清除失衡,造成龙眼果实细胞膜的氧化损伤,从而导致龙眼果实采后品质劣变发生。

4 结 论

综上所述,1.2 $\mu\text{L/L}$ 的纸片型 1-MCP 处理‘朝霞’水蜜桃果实,能保持较高的果实 ROS 清除酶(SOD、CAT、APX)活性和较高的内源抗氧化物质(AsA、GSH)含量,进而提高其果实 ROS 清除能力而降低 ROS 水平,即减少其果实 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的产生和 MDA 含量的积累,维持‘朝霞’水蜜桃果实 ROS 产生与清除系统的平衡能力,从而延缓‘朝霞’水蜜桃果实细胞膜的氧化损伤与膜脂过氧化,较好保持其果实细胞膜的结构完整性,进而维持‘朝霞’水蜜桃果实较好的贮藏品质和耐贮性,延长其果实采后保鲜期。

参考文献

- [1] 孙佳丽. 我国水蜜桃保鲜技术研究进展[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(8): 1553-1555, 1633.
- [2] SUN JL. Research progress on fresh keeping technology of *Prunus persica* in China [J]. Zhejiang Agric Sci, 2020, 61(8): 1553-1555, 1633.
- [3] 杜小龙, 李建龙, 刘影, 等. 水蜜桃采后防腐、保鲜与贮藏研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(9): 3295-3303.
- [4] DU XL, LI JL, LIU Y, et al. Research progress of antisepsis, preservation and storage of postharvest juicy peach [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(9): 3295-3303.
- [5] KAN J, WANG HM, JIN CH. Changes of reactive oxygen species and related enzymes in mitochondrial respiration during storage of harvested peach fruits [J]. Agric Sci China, 2011, 10(1): 149-158.
- [6] ZHANG XD, LI XX, WANG C, et al. Short-term hypobaric treatment enhances chilling tolerance in peaches [J]. J Food Proc Pres, 2021, 45(9): 15362.
- [7] IRFAN M, ABBAS S, AZHAR BJ, et al. Variations in mineral/heavy metals profiling and preventive role of trichomes in peach fruits treated with CaC_2 [J]. Comb Chem High, 2021, 24(4): 598-604.
- [8] ZHANG WL, ZHAO HD, JIANG HT, et al. Multiple 1-MCP treatment more effectively alleviated postharvest nectarine chilling injury than conventional one-time 1-MCP treatment by regulating ROS and energy metabolism [J]. Food Chem, 2020, 330: 127256.
- [9] LIN YZ, CHEN G, LIN HT, et al. Chitosan postharvest treatment suppresses the pulp breakdown development of longan fruit through regulating ROS metabolism [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 165: 601-608.
- [10] 王慧, 陈燕华, 林河通, 等. 纸片型 1-MCP 处理对采后安溪油柑果实活性氧代谢和细胞膜透性的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(11): 2283-2289.

- WANG H, CHEN YH, LIN HT, *et al.* Effects of paper containing 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on reactive oxygen species (ROS) metabolism and cell membrane permeability of harvested Anxi persimmon fruit [J]. *Chin J Trop Crops*, 2018, 39(11): 2283–2289.
- [9] CHEN H, SHUAI H, LI J, *et al.* Postharvest hot air and hot water treatments affect the antioxidant system in peach fruit during refrigerated storage [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2017, 126: 1–14.
- [10] ZHANG QT, ZHANG LL, GENG B, *et al.* Interactive effects of abscisic acid and nitric oxide on chilling resistance and active oxygen metabolism in peach fruit during cold storage [J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(7): 3367–3380.
- [11] CHANG LY, BRECHT JK. Responses of 1-methylcyclopropene (1-MCP)-treated banana fruit to pre- and post-treatment ethylene exposure [J]. *Sci Hortic*, 2023, 309: 111636.
- [12] LV JY, ZHANG YZ, SUN MY, *et al.* 1-Methylcyclopropene (1-MCP) treatment differentially mediated expression of vacuolar processing enzyme (VPE) genes and delayed programmed cell death (PCD) during ripening and senescence of apple fruit [J]. *Sci Hortic*, 2023, 307: 111489.
- [13] SALAZAR J, JORQUERA C, CAMPOS-VARGAS R, *et al.* Effect of the application timing of 1-MCP on postharvest traits and sensory quality of a yellow-fleshed kiwifruit [J]. *Sci Hortic*, 2019, 244: 82–87.
- [14] THONGKUM M, IMSABAI W, BURNS P, *et al.* The effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on expression of ethylene receptor genes in durian pulp during ripening [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2018, 125: 232–238.
- [15] WANG H, CHEN YH, LIN HT, *et al.* 1-Methylcyclopropene containing-papers suppress the disassembly of cell wall polysaccharides in Anxi persimmon fruit during storage [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 151: 723–729.
- [16] WANG H, CHEN G, SHI LL, *et al.* Influences of 1-methylcyclopropene-containing papers on the metabolisms of membrane lipids in Anxi persimmons during storage [J]. *Food Qual Saf*, 2020, 4: 143–150.
- [17] ZENG LZ, SHI LL, LIN HT, *et al.* Paper-containing 1-methylcyclopropene treatment suppresses fruit decay of fresh Anxi persimmons by enhancing disease resistance [J]. *Food Qual Saf*, 2021, 5: 1–8.
- [18] CHEN YH, LIN HT, SHI J, *et al.* Effects of a feasible 1-methylcyclopropene postharvest treatment on senescence and quality maintenance of harvested Huanghua pears during storage at ambient temperature [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2015, 64: 6–13.
- [19] CHEN YH, SUN JZ, LIN HT, *et al.* Paper-based 1-MCP treatment suppresses cell wall metabolism and delays softening of Huanghua pears during storage [J]. *J Sci Food Agric*, 2017, 97: 2547–2552.
- [20] 孟祥春, 黄泽鹏, 凡超, 等. 1-甲基环丙烯保鲜贴纸延缓香蕉后熟衰老进程的研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(9): 2527–2532.
- MENG XC, HUANG ZP, FAN C, *et al.* Post-ripen and senescence progress of banana delayed by 1-methylcyclopropene fresh-keeping sticking paper [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(9): 2527–2532.
- [21] LIN YF, LIN YX, LIN HT, *et al.* Effects of paper containing 1-MCP postharvest treatment on the disassembly of cell wall polysaccharides and softening in Younai plum fruit during storage [J]. *Food Chem*, 2018, 264: 1–8.
- [22] 曾玲珍, 肖烟云, 林河通, 等. 不同浓度 1-MCP 处理对“朝霞”水蜜桃果实的保鲜效应[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(1): 25–32.
- ZENG LZ, XIAO YY, LIN HT, *et al.* Effect of different concentrations of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatments on keeping qualities of harvested ‘Zhaoxia’ peach fruits [J]. *Storage Process*, 2021, 21(1): 25–32.
- [23] 高志强, 郑江枫, 林育钊, 等. 纸片型 1-MCP 处理对“朝霞”水蜜桃抗病物质代谢的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(16): 5329–5336.
- GAO ZQ, ZHENG JF, LIN YZ, *et al.* Effects of paper-containing 1-methylcyclopropene treatment on the disease resistance metabolism of harvested ‘Zhaoxia’ peach fruit [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(16): 5329–5336.
- [24] TANG JY, CHEN HB, LIN HT, *et al.* Acidic electrolyzed water treatment delayed fruit disease development of harvested Longans through inducing the disease resistance and maintaining the ROS metabolism systems [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2021, 171: 111349.
- [25] SUN JZ, LIN HT, ZHANG S, *et al.* The roles of ROS production-scavenging system in *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griff. & Maubl.-induced pericarp browning and disease development of harvested longan fruit [J]. *Food Chem*, 2018, 247: 16–22.
- [26] SONG LL, YI RX, LUO HB, *et al.* Postharvest 1-methylcyclopropene application delays leaf yellowing of pak choi (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*) by improving chloroplast antioxidant capacity and maintaining chloroplast structural integrity during storage at 20 °C [J]. *Sci Hortic*, 2020, 270: 109466.
- [27] GAO H, ZHANG ZS, CHAI HK, *et al.* Melatonin treatment delays postharvest senescence and regulates reactive oxygen species metabolism in peach fruit [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2016, 118: 103–110.
- [28] WANG Y, JI DC, CHEN T, *et al.* Production, signaling, and scavenging mechanisms of reactive oxygen species in fruit-pathogen interactions [J]. *Int J Mol Sci*, 2019, 20(12): 2994.
- [29] LUO T, YIN FL, LIAO LY, *et al.* Postharvest melatonin treatment inhibited longan (*Dimocarpus longan* Lour.) pericarp browning by increasing ROS scavenging ability and protecting cytomembrane integrity [J]. *Food Sci Nutr*, 2021, 9(9): 4963–4973.
- [30] XI Y, JIAO WX, CAO JK, *et al.* Effects of chlorogenic acid on capacity of free radicals scavenging and proteomic changes in postharvest fruit of nectarine [J]. *PLoS One*, 2017, 12(8): 0182494.
- [31] LIN YX, LIN HT, CHEN YH, *et al.* The role of ROS-induced change of respiratory metabolism in pulp breakdown development of longan fruit during storage [J]. *Food Chem*, 2020, 305: 125439.
- [32] YAO MM, GE WY, ZHOU Q, *et al.* Exogenous glutathione alleviates chilling injury in postharvest bell pepper by modulating the ascorbate-glutathione (AsA-GSH) cycle [J]. *Food Chem*, 2021, 352: 129458.
- [33] LING C, XIE B, HONG YJ, *et al.* Effects of exogenous calcium and calmodulin antagonist treatments on chilling tolerance of cold-stored peach fruit [J]. *Food Sci*, 2019, 40(1): 240–248.

(责任编辑: 于梦娇 黄周梅)

作者简介



张惠丽, 硕士研究生, 主要研究方向为果蔬保鲜。

E-mail: zhaghuit@163.com



林河通, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为果蔬保鲜。

E-mail: hetonglin@163.com