

# 纸片型 1-MCP 处理对‘朝霞’水蜜桃抗病物质代谢的影响

高志强<sup>1,2,3</sup>, 郑江枫<sup>2</sup>, 林育钊<sup>2,3,4</sup>, 肖烟云<sup>2</sup>, 曾玲珍<sup>2,3,4</sup>, 林河通<sup>2,3,4\*</sup>

(1. 漳州职业技术学院食品工程学院, 漳州 363000; 2. 福建农林大学食品科学学院, 福州 350002;  
3. 亚热带特色农产品采后生物学福建省高校重点实验室, 福州 350002;  
4. 福建农林大学农产品产后技术研究所, 福州 350002)

**摘要:** **目的** 研究纸片型 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)处理对采后水蜜桃果实抗病物质代谢的影响。**方法** ‘朝霞’水蜜桃果实采后通过 0(对照组)和 1.2  $\mu\text{L/L}$  纸片型 1-MCP 分别处理 12 h, 在(25 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$ 、85% 相对湿度下贮藏, 每 2 d 取样, 评价和测定水蜜桃果实感病指数、抗病相关物质(总酚、木质素)含量及抗病相关酶[过氧化物酶(peroxidase, POD)、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、几丁质酶(chitinase, CHI)、苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia-lyase, PAL)和  $\beta$ -1,3-葡聚糖酶( $\beta$ -1,3-glucanase, GLU)]活性。**结果** 与对照组水蜜桃果实相比, 纸片型 1-MCP 处理能有效延缓水蜜桃果实采后感病指数的上升, 维持较高的果实果肉木质素和总酚含量, 保持较高的果肉 POD、PPO、CHI、PAL 和 GLU 活性。**结论** 纸片型 1-MCP 处理可升高水蜜桃果实采后果肉抗病相关酶的活性, 加速果肉累积抗病物质, 进一步提升水蜜桃果实的采后抗病能力, 最终减慢果实采后发生病害及延长果实采后贮藏期。

**关键词:** 水蜜桃果实; 采后病害; 抗病物质代谢; 1-甲基环丙烯

## Effects of paper-containing 1-methylcyclopropene treatment on the disease resistance metabolism of harvested ‘Zhaoxia’ peach fruit

GAO Zhi-Qiang<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Jiang-Feng<sup>2</sup>, LIN Yu-Zhao<sup>2,3,4</sup>, XIAO Yan-Yun<sup>2</sup>,  
ZENG Ling-Zhen<sup>2,3,4</sup>, LIN He-Tong<sup>2,3,4\*</sup>

(1. College of Food Engineering, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, China; 2. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Key Laboratory of Postharvest Biology of Subtropical Special Agricultural Products, Fujian Province University, Fuzhou 350002, China; 4. Institute of Postharvest Technology of Agricultural Products, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the effects of paper-containing 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on the disease resistance metabolism of harvested peach fruit. **Methods** The fresh harvested ‘Zhaoxia’ peach fruit was

**基金项目:** 福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2020115A)、福建省科技计划项目(2018N2002)、福建省漳州市 2022 年中青年领军人才和急需紧缺专业人才访学进修计划项目(漳人社【2022】27号)

**Fund:** Supported by the Science and Technology Innovation Foundation at Fujian Agriculture and Forestry University of China (CXZX2020115A), the Science and Technology Plan Project of Fujian Province, China (2018N2002), and the Visiting Study Program of 2022 Young and Middle-aged Leading Talents and Urgently Needed Professionals of Zhangzhou, Fujian Province, China (Zhangzhou Human Resources and Social Security Bureau【2022】27)

\***通信作者:** 林河通, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为农产品加工及贮藏工程。E-mail: hetonglin@163.com

\***Corresponding author:** LIN He-Tong, Ph.D, Professor, College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China. E-mail: hetonglin@163.com

treated by paper-containing 1-MCP at the dosages of 0 (control group) and 1.2  $\mu\text{L/L}$  for 12 h, then stored at  $(25\pm 1)^\circ\text{C}$  and relative humidity of 85%. During the storage, the fruit disease index, content of substances related to disease resistance, including total phenolics as well as lignin, and activities of disease resistance-related enzymes, such as peroxidase (POD), polyphenol oxidase (PPO), chitinase (CHI), phenylalanine ammonia-lyase (PAL) and  $\beta$ -1,3-glucanase (GLU) in pulp of peach fruit were assayed every 2 days. **Results** In contrast to control peach fruit, the paper-containing 1-MCP treatment might effectively delay the increase of fruit disease index of peach fruit during storage. In addition, the paper-containing 1-MCP treatment might maintain the higher content of lignin and total phenolics, and the higher activities of POD, PPO, CHI, PAL and GLU in pulp of peach fruit during storage. **Conclusion** The paper-containing 1-MCP treatment can improve the disease resistance, suppress the disease development and extend the storage-life of harvested peaches by enhancing the activities of disease resistance-related enzymes and accumulating the amounts of disease resistance-related substances.

**KEY WORDS:** peach fruit; postharvest disease; disease resistance metabolism; 1-methylcyclopropene

## 0 引言

水蜜桃(*Prunus persica* L.)原产我国, 鲜美味甜, 芳香浓郁, 营养丰富, 果实富含有机酸、维生素、矿物质与膳食纤维等不同的营养成分, 因而受到消费者的喜爱<sup>[1-4]</sup>。然而, 水蜜桃果实主要成熟、采摘于6~7月高温高湿季节, 因其果皮较薄、果肉多汁, 极易遭受机械损伤, 再加上病原菌的侵染, 采后水蜜桃果实容易发生腐烂变质现象, 这不利于水蜜桃果实采后品质的保持、远距离的运销。有研究报道, 匍枝根霉(*Rhizopus stolonifer*)<sup>[5-6]</sup>、褐腐病菌(*Monilinia fructicola*)<sup>[7]</sup>等病原微生物侵染所致的病害发生是引起采后水蜜桃果实品质丧失、耐贮性降低的主要原因之一。如何控制或延缓水蜜桃果实采后病害发生, 进而提高果实贮藏品质已经成为推动水蜜桃果实采后商业化发展急需解决的重要问题。目前, 减压贮藏<sup>[8-9]</sup>、低温贮藏<sup>[10]</sup>等物理保鲜技术、多菌灵和甲托托布津<sup>[11]</sup>等化学杀菌剂均能稳定水蜜桃果实采后品质, 延缓果实腐烂变质, 延长果实保鲜期。然而, 这些保鲜技术存在成本较高或存在化学残留、危害人体健康等问题, 因而不适宜水蜜桃果实采后保鲜处理及其商业化推广。因此, 急需寻找一种安全的、环境友好的、低成本的采后保鲜方法, 进一步减缓采后水蜜桃发生病害、提升果实采后品质与耐贮性。

1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)作为一种特殊的乙烯受体抑制剂, 可以和乙烯受体进行结合, 减少乙烯的释放, 最终起到延缓果实采后衰老、腐烂变质的作用<sup>[3,12-13]</sup>。1-MCP具有安全、无残留、无毒等特点, 已运用在采后园艺产品的贮藏保鲜中<sup>[3,13]</sup>。近年来已有研究报道, 1-MCP处理能有效减缓杏<sup>[14]</sup>、香蕉<sup>[15]</sup>、苹果<sup>[16]</sup>等果实采后腐烂的发生, 提升果实采后品质、增强果实采后耐贮性。然而, 目前在市面上, 采后园艺产品保鲜处理过程中所使用的1-MCP大多是粉末状。粉末状1-MCP在采后园艺产品实际运用中存在现场采后处理不方便、浓度控制

不精准等问题, 难以在园艺产品采后保鲜实践、现场快速处理中推广使用<sup>[3,17]</sup>。近年来, 由台湾利统股份有限公司研究开发的纸片型1-MCP (AnsiP-S)能有效解决上述问题, 即纸片型1-MCP能快速对采后园艺产品进行现场处理, 又能精准控制所需浓度, 使用方便快捷。本课题组近期研究表明, 使用纸片型1-MCP进行采后处理油棕<sup>[13]</sup>与油柿<sup>[17-18]</sup>等果实, 可以有效延缓果实采后品质劣变, 提高果实采后品质, 增强果实耐贮性。然而, 目前较少见关于纸片型1-MCP处理减缓水蜜桃果实采后病害发生的研究报道。因此, 本研究以福建省主栽水蜜桃品种‘朝霞’果实作为供试材料, 研究纸片型1-MCP处理对采后水蜜桃果实的病害指数、抗病物质(总酚、木质素)含量、抗病相关酶[过氧化物酶(peroxidase, POD)、苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia-lyase, PAL)、几丁质酶(chitinase, CHI)、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)和 $\beta$ -1,3-葡聚糖酶( $\beta$ -1,3-glucanase, GLU)]活性等的影响, 旨在为延缓水蜜桃果实采后病害发生、提高果实采后品质和延长果实贮藏期提供科学的理论与技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

将采收于福建省古田县大桥镇兰坦村果园的‘朝霞’水蜜桃(*Prunus persica* L. cv. Zhaoxia)作为本研究的实验材料, 果实成熟度约为八成熟。水蜜桃果实采后并于当天运送至实验室, 挑选成熟度、大小一致, 无病虫害、机械损伤, 健康的果实进行相关实验。

纸片型1-MCP(台湾利统股份有限公司); 甲醇、愈创木酚、邻苯二酚、三氯乙酸、L-苯丙氨酸、磷酸氢二钠、盐酸、磷酸二氢钠、四硼酸钾、几丁质、硫酸、昆布多糖、3,5-二硝基水杨酸、聚乙烯吡咯烷酮等(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

## 1.2 仪器与设备

HH-4 型数显恒温水浴锅(国华电器有限公司); SHZ-IIIID 型循环水真空泵(上海亚荣生化仪器厂); T6 新世纪型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 型高速冷冻离心机(上海安亭科学仪器厂); DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司); DRX-260 型人工气候箱(宁波江南仪器厂); BSA224S 型电子天平[精度 0.0001 g, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 果实采后处理

1.2  $\mu\text{L/L}$  1-MCP 处理组: 一片纸片型 1-MCP 在一个密闭的环境中可以释放浓度为 0.9  $\mu\text{L/L}$  的 1-MCP 气体。在本研究中, 将挑选出的水蜜桃果实放入泡沫箱(0.04  $\text{m}^3$ )中, 根据所需浓度(1.2  $\mu\text{L/L}$ )裁剪合适大小的纸片型 1-MCP(即 4/3 片的纸片型 1-MCP), 经过蒸馏水均匀喷洒纸片型 1-MCP 后, 将其平铺在果实上方, 密封泡沫箱 12 h。本研究所使用的纸片型 1-MCP 处理浓度是前期预实验结果所得<sup>[3]</sup>。

对照组(Control): 将挑选出的水蜜桃果实放入泡沫箱中, 不放纸片型 1-MCP 直接密封处理 12 h。

通过上述两个不同处理之后, 再采用聚乙烯薄膜袋(厚度为 15  $\mu\text{m}$ )进行包装果实, 每袋装果 5 个, 每一处理均为 50 袋, 再将装袋之后的果实放置于(25 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$ 、85%相对湿度下贮藏 12 d。在贮藏期, 每 2 d 从两个不同处理组中各随机取出 3 袋果实, 评价果实感病指数并测定相关指标。

### 1.3.2 指标测定

#### (1) 果实感病指数测定

随机取出 30 个水蜜桃果实, 参照陈艺晖等<sup>[19]</sup>的方法进行测定果实感病指数。

#### (2) 果肉木质素含量测定

参照鞠志国等<sup>[20]</sup>的方法, 测定水蜜桃果实采后果肉的木质素含量, 单位为%。

#### (3) 果肉总酚含量测定

参照 LIN 等<sup>[21-22]</sup>的方法对水蜜桃果实果肉的总酚含量进行测定, 结果以  $\text{mg/kg}$  表示。

#### (4) 果肉 PAL、POD、PPO、CHI 和 GLU 活性

参照 LUO 等<sup>[23]</sup>的方法测定水蜜桃果实果肉 CHI、GLU 与 PAL 的活性。参照林河通等<sup>[24]</sup>的方法测定水蜜桃果实果肉 POD、PPO 的活性。水蜜桃果肉的蛋白质含量的测定参照 BRADFORD<sup>[25]</sup>的方法。上述酶活性均以果肉蛋白质含量进行计算, 结果均采用  $\text{U/mg protein}$  表示。

## 1.4 数据处理和分析

本研究的指标测定都进行 3 次重复。数据统计、相关性、显著性等分析等都使用 SPSS 20.0 进行处理。\*或\*\*分别表示在同一贮藏时间内, 1-MCP 处理组与对照组差异显著( $P<0.05$ )

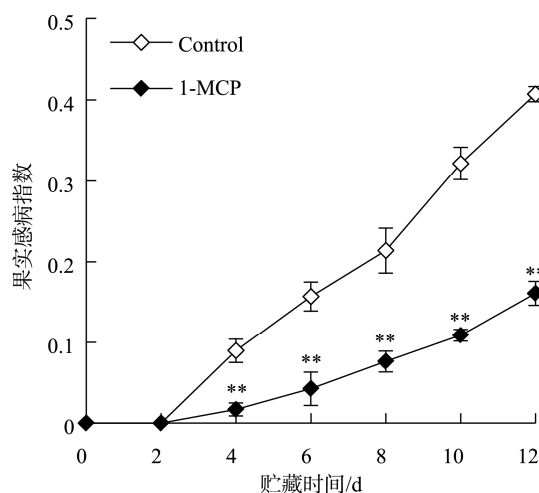
或极显著( $P<0.01$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 1-MCP 处理对采后水蜜桃果实感病指数的影响

由图 1 可知, 两组处理组的水蜜桃果实感病指数在 0~2 d 基本不变, 2~12 d 加快升高。与对照组比较, 1-MCP 处理组在贮藏期具有较低的果实感病指数。进一步分析可知, 在贮藏 4~12 d, 1-MCP 处理组的水蜜桃果实感病指数极显著( $P<0.01$ )低于对照组。

因此, 1-MCP 处理能减缓水蜜桃果实采后感病指数的升高, 抑制果实采后病害发生、增强果实采后品质。



注: \*\*表示在同一贮藏时间时, 1-MCP 处理果实与对照果实之间的差异极显著( $P<0.01$ ), 下同。

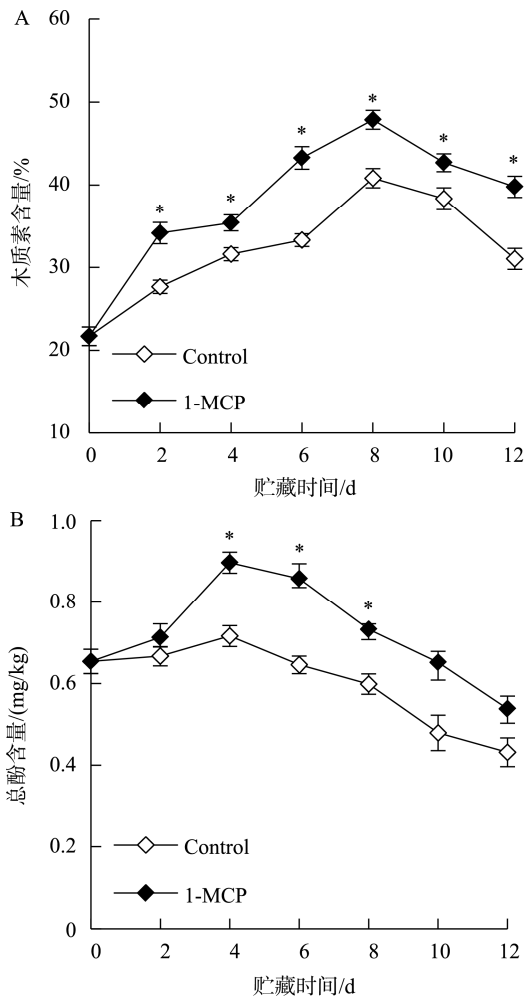
图 1 1-MCP 处理对采后水蜜桃果实感病指数的影响  
Fig.1 Effects of 1-MCP treatment on the fruit disease index of postharvest peach fruit

### 2.2 1-MCP 处理对采后水蜜桃果实果肉木质素和总酚含量的影响

从图 2A 发现, 对照水蜜桃果实的果肉木质素含量于贮藏 0~8 d 快速升高, 8~12 d 快速降低。然而, 1-MCP 处理的水蜜桃果实果肉木质素含量在贮藏 0~2 d 快速升高, 2~4 d 缓慢上升, 4~8 d 加速增高, 8~12 d 快速减少。进一步对比可得, 与对照组果实相比, 1-MCP 处理组的果肉木质素含量在贮藏期均保持较高水平, 且达到了显著( $P<0.05$ )水平。

由图 2B 可知, 对照组的水蜜桃果实果肉总酚含量在贮藏 0~4 d 缓慢升高, 4~12 d 快速降低。然而, 1-MCP 处理的果肉总酚含量在贮藏 0~4 d 快速上升, 4~12 d 快速减小。进一步对比得, 1-MCP 处理的果实果肉总酚含量在贮藏期始终高于对照组, 并在贮藏 4~8 d 达到显著( $P<0.05$ )水平。

因此, 1-MCP 处理能有效累积水蜜桃果实果肉木质素、总酚等抗病物质含量, 提高果实采后抗病能力, 这有助于控制果实发生病害、保持采后果实品质。



注: \*表示在同一贮藏时间时, 1-MCP 处理果实与对照果实之间的差异显著( $P < 0.05$ ), 下同。

图 2 1-MCP 处理对采后水蜜桃果实果肉木质素(A)和总酚(B)含量的影响

Fig.2 Effects of 1-MCP treatment on the lignin (A) and total phenolics (B) content in pulp of postharvest peach fruit

### 2.3 1-MCP 处理对采后水蜜桃果实果肉 PAL 活性的影响

由图 3 可知, 对照组的水蜜桃果实果肉 PAL 活性在贮藏 0~4 d 快速上升, 4~6 d 稍有降低, 6~8 d 快速升高, 8~12 d 加速降低。然而, 1-MCP 处理组的果实果肉 PAL 活性在贮藏 0~4 d 加快升高, 4~6 d 稍有上升, 6~8 d 快速升高, 8~12 d 加速下降。进一步比较发现, 与对照组相比, 1-MCP 处理组在贮藏期保持较高的果肉 PAL 活性, 并在贮藏 4~10 d 达到显著( $P < 0.05$ )差异性。

因此, 1-MCP 处理能有效提升水蜜桃果实果肉 PAL 活性, 提升采后果实抗病性, 有利于减轻果实病害的发生, 增强果实的贮藏品质。

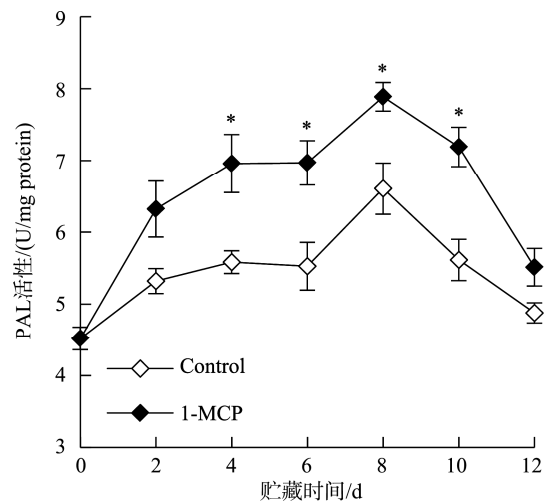


图 3 1-MCP 处理对采后水蜜桃果实果肉 PAL 活性的影响

Fig.3 Effects of 1-MCP treatment on the PAL activities in pulp of postharvest peach fruit

### 2.4 1-MCP 处理对采后水蜜桃果实果肉 POD 和 PPO 活性的影响

由图 4A 可知, 对照组的水蜜桃果实果肉 POD 活性在贮藏 0~4 d 较快上升, 4~6 d 快速下降, 6~8 d 快速上升, 8~10 d 缓慢减小, 10~12 d 快速增高。然而, 1-MCP 处理组的果实果肉 POD 活性在贮藏 0~4 d 急剧上升, 4~6 d 快速降低, 6~10 d 快速升高, 10~12 d 较缓降低。进一步比较可知, 在贮藏期, 1-MCP 处理组保持较高水平的果实果肉 POD 活性, 并在贮藏 4、10 d 具有显著( $P < 0.05$ )水平。

由图 4B 可知, 对照组的水蜜桃果实果肉 PPO 活性在贮藏 0~2 d 快速上升, 2~4 d 缓慢降低, 4~12 d 较快增高。然而, 1-MCP 处理组的果实果肉 PPO 活性在贮藏 0~2 d 快速升高, 2~4 d 缓慢减小, 4~10 d 快速增高, 10~12 d 快速下降。进一步比较可得, 1-MCP 处理组维持较高水平的果实果肉 PPO 活性, 并在贮藏 6~10 d 具有显著( $P < 0.05$ )的差异性。

因此, 1-MCP 处理能有效提升水蜜桃果实果肉 POD 和 PPO 活性, 提升果实采后抗病水平, 减轻果实感病症状, 稳定果实的采后品质。

### 2.5 1-MCP 处理对采后水蜜桃果实果肉 CHI 和 GLU 活性的影响

由图 5A 可知, 对照组与 1-MCP 处理组的水蜜桃果实果肉 CHI 活性均在贮藏 0~8 d 快速上升, 8~12 d 快速减小。进一步对比可知, 与对照组相比, 1-MCP 处理组能保持水蜜桃果实较高水平的果肉 CHI 活性, 并在贮藏 6~10 d 达到显著( $P < 0.05$ )水平。

由图 5B 可知, 对照组的水蜜桃果实果肉 GLU 活性在贮藏 0~2 d 加速上升, 2~4 d 快速降低, 4~8 d 快速升高, 8~10 d 快速减小, 10~12 d 变化不大。然而, 1-MCP 处理组的果实果肉 GLU 活性均在贮藏 0~2 d 快速升高, 2~4 d 较快

减少, 4~8 d 加速增高, 8~12 d 加速下降。进一步相比发现, 1-MCP 处理组的果肉 GLU 活性在贮藏期均高于对照组果实, 并在贮藏 6 d 达到显著( $P<0.05$ )水平。

因此, 1-MCP 处理可提高水蜜桃果实果肉 CHI 和 GLU 活性, 增强果实采后抗病能力, 延缓果实发生病害, 提高果实采后品质。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 抗病物质在 1-MCP 处理延缓采后水蜜桃果实病害发生中的作用

当病原菌侵染采后园艺产品时, 园艺产品自身会激

活相应的抵御反应, 诱导抗病相关酶活性的上升, 促进累积抗病物质, 进而应对病原菌的侵染, 延缓园艺产品采后病害的发生<sup>[26]</sup>。木质素和酚类物质(例如总酚)是植物中重要的抗病物质, 并在植物组织抵抗病原微生物入侵中起着关键的作用<sup>[13,26-27]</sup>。郭欣等<sup>[26]</sup>研究报道, 采后西番莲果实经过壳聚糖处理之后, 可有效加速果实抗病物质(例如总酚、木质素等)的不断累积, 进而提高果实抗病性、抑制果实采后病害发生。WU 等<sup>[27]</sup>研究发现, 采后解淀粉芽孢杆菌 LY-1 处理能促进荔枝果实累积木质素含量, 提高荔枝果实采后抗病性, 进而延缓果实采后病害的发生、稳定果实的采后品质。

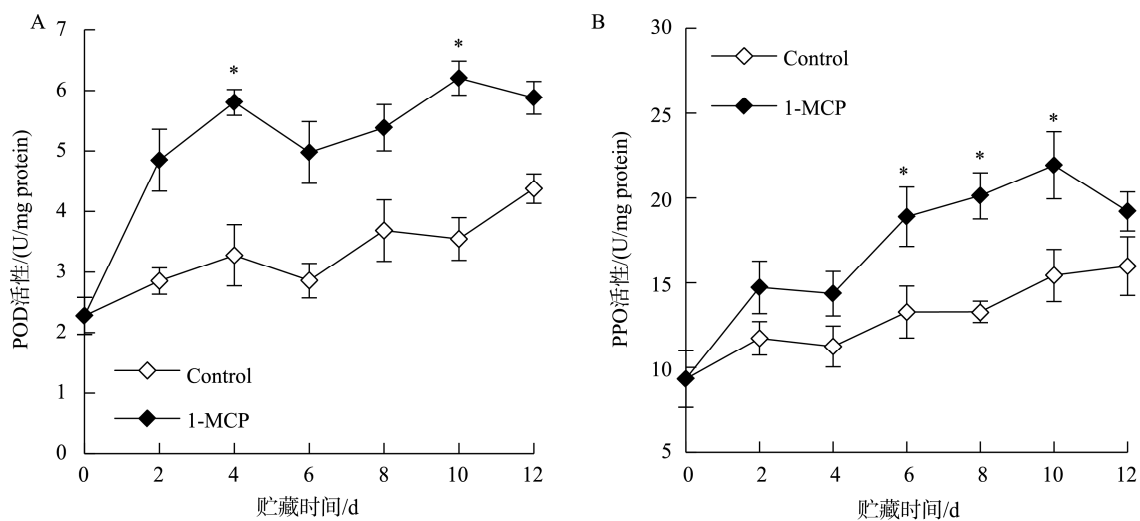


图 4 1-MCP 处理对采后水蜜桃果实果肉 POD (A)和 PPO (B)活性的影响  
Fig.4 Effects of 1-MCP treatment on the POD (A) and PPO (B) activities in pulp of postharvest peach fruit

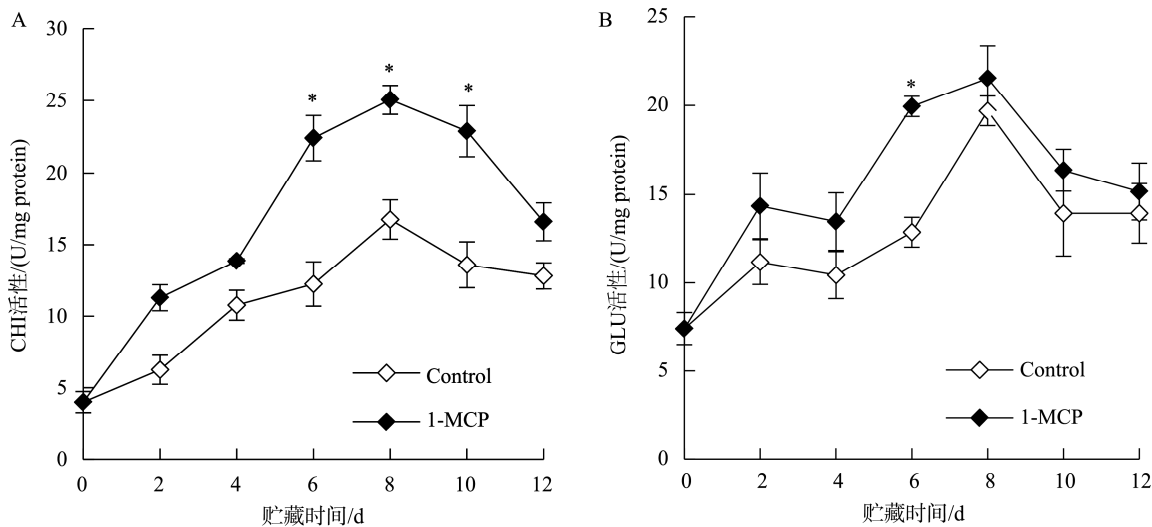


图 5 1-MCP 处理对采后水蜜桃果实果肉 CHI (A)和 GLU (B)活性的影响  
Fig.5 Effects of 1-MCP treatment on the CHI (A) and GLU (B) activities in pulp of postharvest peach fruit

本研究发现, 对照水蜜桃果实果肉木质素(图 2A)、总酚(图 2B)含量分别于贮藏 0~8 d、0~4 d 呈现上升变化, 据此可以推测, 在贮藏前中期, 水蜜桃果实因自身遭到病原菌的侵染而产生应激反应, 激发果肉组织累积木质素与总酚等抗病相关物质的含量, 以提升果实采后抗病性。然而, 在采后贮藏中后期, 水蜜桃果实果肉木质素(图 2A)、总酚(图 2B)含量分别在贮藏 8~12 d、4~12 d 呈下降变化趋势。经相关性分析可得, 水蜜桃的果实感病指数(图 1)与果肉木质素含量(图 2A)在贮藏 8~12 d 呈现极显著的负相关水平( $r=-0.941, P<0.01$ ); 与果肉总酚含量(图 2B)在贮藏 4~12 d 也呈现极显著的负相关水平( $r=-0.995, P<0.01$ )。由此可以推测, 水蜜桃果实采后果肉木质素与总酚含量的下降是致使果实采后抗病能力下降、果实感病指数(图 1)升高、果实采后病害发生的重要因素。然而, 进一步与对照果实相比, 1-MCP 处理能有效保持较高水平的果肉木质素(图 2A)、总酚(图 2B)等抗病物质含量, 维持降低的果实感病指数(图 1)。因此认为, 1-MCP 处理能通过提升水蜜桃果实果肉中抗病物质(木质素与总酚)含量的累积, 增强果实采后抗病能力, 进而减缓果实病害发生、稳定果实采后品质。

### 3.2 抗病相关酶在 1-MCP 处理延缓采后水蜜桃果实病害发生中的作用

园艺产品的采后抗病水平、贮藏品质与抗病关键酶(POD、PAL、CHI、PPO 与 GLU 等)的活性有着密切关系<sup>[26,28-31]</sup>。其中, PAL 能够参与一些抗病物质(比如酚类、木质素等)的合成, 进而提高植物组织的抗病能力<sup>[13,26-28]</sup>。因此, PAL 活性的高低能反映植物抗病能力的大小。JIANG 等<sup>[28]</sup>研究发现, 壳聚糖采后处理荔枝果实, 能有效提升果实 PAL 活性, 进而增强果实抗病性, 延缓果实采后病害的发生。TANG 等<sup>[32]</sup>研究报道, 酸性电解水处理能提高采后龙眼果实 PAL 活性, 进而延缓果实采后病害发生、稳定果实采后品质。本研究发现, 对照果实果肉 PAL 活性在贮藏 0~8 d 呈现上升趋势(图 3), 这可能是水蜜桃果实在贮藏期因遭受病原菌侵染而激发果实果肉 PAL 活性上升以应对病原菌, 进而提高果实抗病性。然而, 在贮藏 8~12 d, 果实果肉 PAL 活性(图 3)、木质素含量(图 2A)及总酚含量(图 2B)都不断下降。经过相关性分析可得, 其果肉 PAL 活性(图 3)分别与木质素(图 2A)、总酚(图 2B)含量表现出极显著的正相关关系, 相关系数分别为 0.935、0.987; 另外, 对照果实果肉 PAL 活性(图 3)与果实感病指数(图 1)呈现极显著的负相关关系, 相关系数为-1.000。因此可以推测, 水蜜桃果实采后病害发生、品质劣变是因为水蜜桃果肉 PAL 活性下降而致使果肉木质素与总酚含量降低, 进而导致果实采后抗病性下降。然而, 与对照水蜜桃果实相比, 1-MCP 处理能维持水蜜桃果实较高水平的果肉 PAL 活性(图 3)、木质素含量(图 2A)、总酚含量(图 2B)及较低水平的果实感病指数

(图 1)。据此认为, 1-MCP 处理通过增强水蜜桃果实果肉 PAL 活性促进木质素与总酚的累积, 进而提高果实抗病性, 最终延缓果实病害的发生。

POD 与 PPO 也属于植物体内重要的抵御病原菌侵染的关键酶, 它们均能被病原菌侵染所诱导产生<sup>[14,33]</sup>。POD 在有  $H_2O_2$  存在的前提下可将酚氧化成醌, 并参与黑色素物质合成(可毒害病原菌); 另外, POD 还能参与木质素等抗病物质的生物合成过程<sup>[14]</sup>。PPO 能氧化酚类物质使其生成黑色素物质, 进而起到抵御病原菌的侵染<sup>[14,26]</sup>。因此, POD 与 PPO 活性的高低和植物抗病水平紧密相关。郭欣等<sup>[26]</sup>研究发现, 壳聚糖处理能提高西番莲果实抗病性、延缓果实病害发生与其提升果实 POD、PPO 活性有关。SHU 等<sup>[34]</sup>研究报道, 阿魏酸处理可增强采后番茄果实抗病性与其保持较高的 PPO 活性有关。本研究发现, 和对照水蜜桃果实对比, 1-MCP 处理保持较高的果实果肉 POD 与 PPO 活性(图 4)、较低的果实感病指数(图 1)。因此, 1-MCP 处理提高水蜜桃果实采后抗病性、减缓果实病害发生, 是和 1-MCP 处理提升果实果肉 POD 与 PPO 活性有关。

CHI 与 GLU 能直接作用于病原微生物, 从而降解、破坏病原微生物细胞壁中的几丁质和  $\beta$ -1,3-葡聚糖等重要组成成分, 破坏病原微生物的细胞壁结构, 起到了抑制病原微生物生长的重要作用<sup>[14,26]</sup>。因此, CHI、GLU 活性的大小与植物本身抗病性的大小紧密相关。JIANG 等<sup>[28]</sup>研究发现, 壳聚糖处理能提高荔枝果实采后抗病性, 与其提升果实 CHI 和 GLU 活性有关。REN 等<sup>[30]</sup>研究报道, 一氧化氮处理增强芒果果实采后 CHI 与 GLU 活性, 进而提高果实抗病能力, 稳定果实采后贮藏品质。本研究发现, 对照果实果肉 CHI、GLU 活性贮藏 0~8 d 整体呈现上升趋势(图 5), 这可能是由于水蜜桃果实在贮藏期遭受病原菌侵染, 进而激发果肉 CHI 与 GLU 活性以提升果实抗病性。然而, 在贮藏 8~12 d, 其果肉 CHI、GLU 活性都不断下降变化(图 5)。经相关性分析可得, 在贮藏 8~12 d, 水蜜桃的果实感病指数(图 1)与果肉 CHI 活性(图 5A)呈现极显著的负相关关系( $r=-0.964, P<0.01$ ), 然而和果肉 GLU 活性(图 5B)具有显著的负相关关系( $r=-0.898, P<0.05$ )。因此, 水蜜桃果实采后病害发生、品质劣变与水蜜桃果肉 CHI 与 GLU 活性下降、果实抗病性降低有关。然而, 与对照水蜜桃果实相比, 1-MCP 处理保持较高的果实果肉 CHI 和 GLU 活性(图 5)、较低的果实感病指数(图 1)。据此认为, 1-MCP 处理提高水蜜桃果实果肉 CHI 和 GLU 活性, 有助于降解病原菌细胞壁中的几丁质及  $\beta$ -1,3-葡聚糖, 进而延缓果实采后病害的发生, 稳定果实采后品质。

因此, 1-MCP 处理能提升水蜜桃果实果肉抗病相关酶的活性, 即保持较高的果肉 PAL、POD、PPO、CHI 和 GLU 活性, 进而提高采后水蜜桃果实的抗病能力, 保持采后果实的贮藏品质。

综上所述, 1.2  $\mu\text{L/L}$  纸片型 1-MCP 处理能提升水蜜桃果实采后果肉 PAL、POD、PPO、CHI 和 GLU 等抗病相关酶活性, 促进水蜜桃果实果肉累积木质素和总酚等抗病物质, 进而增强果实采后抗病水平、减慢果实发生病害、维持果实较好的采后品质与耐贮性。因此, 纸片型 1-MCP 处理在控制水蜜桃果实采后病害发生、稳定果实采后贮藏保鲜中具有良好的应用发展前景。

## 参考文献

- [1] 齐淑宁, 赵焱焱, 唐继兴, 等. 不同保鲜袋包装对水蜜桃贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2021, 42(19): 55–62.  
QI SN, ZHAO YY, TANG JX, *et al.* Effect of different fresh-keeping bags on storage quality of juicy peach [J]. Packag Eng, 2021, 42(19): 55–62.
- [2] 千春录, 朱芹, 高姗, 等. 外源褪黑素处理对采后水蜜桃贮藏品质及冷害发生的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(3): 702–708.  
QIAN CL, ZHU Q, GAO S, *et al.* Effects of exogenous melatonin treatment on cold storage quality and chilling injury of postharvest peach fruit [J]. Jiangsu J Agric Sci, 2020, 36(3): 702–708.
- [3] 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.  
ZHENG LZ, XIAO YY, LIN HT, *et al.* Effects 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.
- [4] 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.  
DU XL, LI JL, LIU Y, *et al.* Research progress of antiseptics, preservation and storage of postharvest juicy peach [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(9): 3295–3303.
- [5] 刘晨霞, 乔勇进, 黄宇斐, 等. 酸性硫酸钙处理对水蜜桃采后菌核根霉致病力的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(7): 1377–1385.  
LIN CX, QIAO YJ, HUANG YF, *et al.* Effect of acidic calcium sulfate treatment on pathogenicity of postharvest *Rhizopus stolonifer* in honey peach [J]. J Nucl Agric Sci, 2019, 33(7): 1377–1385.
- [6] ZHANG XY, WU F, GU N, *et al.* Postharvest biological control of *Rhizopus* rot and the mechanisms involved in induced disease resistance of peaches by *Pichia membranefaciens* [J]. Postharv Biol Technol, 2020, 163: 111146.
- [7] LIU J, SHI Y, WISNIEWSKI M, *et al.* Effect of heat treatment on inhibition of *Monilinia fructicola* and induction of disease resistance in peach fruit [J]. Postharv Biol Technol, 2012, 65: 61–68.
- [8] 周慧娟, 乔勇进, 张绍铃, 等. 低温减压对大团蜜露水蜜桃软化及膜伤害生理的影响[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(4): 802–807.  
ZHOU HJ, QIAO YJ, ZHANG SL, *et al.* Effects of low temperature and hypobaric on softening and membrane injury physiology of Datuanmili peach [J]. Jiangsu J Agric Sci, 2010, 26(4): 802–807.
- [9] WANG JH, YOU YL, CHEN WX, *et al.* Optimal hypobaric treatment delays ripening of honey peach fruit via increasing endogenous energy status and enhancing antioxidant defence systems during storage [J]. Postharv Biol Technol, 2015, 101: 1–9.
- [10] 陈杭君, 毛金林, 宋丽丽, 等. 温度对南方水蜜桃贮藏生理及货架期品质的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1567–1572.  
CHEN HJ, MAO JL, SONG LL, *et al.* Effects of different temperatures on postharvest physiology and shelf quality in china southern peaches [J]. Sci Agric Sin, 2007, 40(7): 1567–1572.
- [11] 和岳, 王明力. 桃果实贮藏保鲜技术的发展现状[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(11): 181–183.  
HE Y, WANG ML. Developing status of peach fresh-keeping technology in China [J]. Guizhou Agric Sci, 2011, 39(11): 181–183.
- [12] WIN NM, YOO J, NAING AH, *et al.* 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment delays modification of cell wall pectin and fruit softening in “Hwangok” and “Picnic” apples during cold storage [J]. Postharv Biol Technol, 2021, 180: 111599.
- [13] 李辉, 林毅雄, 林河通, 等. 1-甲基环丙烯控制采后‘油棕’果实腐烂与抗病相关酶诱导的关系[J]. 热带作物学报, 2015, 36(4): 786–791.  
LI H, LIN YX, LIN HT, *et al.* The relationship between inhibition of decay and induction of disease defense-related enzymes in harvested ‘Younai’ plum fruit by 1-methylcyclopropene (1-MCP) [J]. Chin J Trop Crop, 2015, 36(4): 786–791.
- [14] DONG L, LURIE S, ZHOU HW. Effect of 1-methylcyclopropene on ripening of ‘Canino’ apricots and ‘Royal Zee’ plums [J]. Postharv Bio Technol, 2002, 24(2): 135–145.
- [15] 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.
- [16] 孙庆申, 梁璐, 李梦洋, 等. 1-甲基环丙烯或乙烯吸收剂处理减轻机械损伤苹果劣变的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 3906–3912.  
SUN QS, LIANG L, LIMY, *et al.* Study on the effects of 1-methylcyclopropene or ethylene absorbent treatment on alleviating deterioration of mechanically damaged apples [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(12): 3906–3912.
- [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-Oxford, 2021, 5: 1–8.
- [18] 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-Oxford, 2020, 4(3): 143–150.
- [19] 陈艺晖, 林河通, 林艺芬, 等. 拟茎点霉侵染对龙眼果实采后果皮褐变和活性氧代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(23): 4858–4866.  
CHEN YH, LIN HT, LIN YF, *et al.* Effects of *Phomopsis longanae* Chi infection on browning and active oxygen metabolism in pericarp of harvested longan fruits [J]. Sci Agric Sin, 2011, 44(23): 4858–4866.
- [20] 鞠志国, 刘成连, 原永兵, 等. 莱阳茌梨酚类物质合成的调节及其对果实品质的影响[J]. 中国农业科学, 1993, 26(4): 44–48.  
JU ZG, LIU CL, YUAN YB, *et al.* Regulation of phenolics synthesis and its effects on fruit quality of Laiyang Chili (pear) [J]. Sci Agric Sin, 1993, 26(4): 44–48.
- [21] LIN YX, LIN HT, FAN ZQ, *et al.* Inhibitory effect of propyl gallate on pulp breakdown of longan fruit and its relationship with ROS metabolism [J]. Postharv Biol Technol, 2020, 168: 111272.
- [22] LIN YX, LIN YF, LIN MS, *et al.* Influence of hydrogen peroxide on the ROS metabolism and its relationship to pulp breakdown of fresh longan during storage [J]. Food Chem, 2021, 12: 100159.

- [23] LUO Y, ZENG KF, MING J. Control of blue and green mold decay of citrus fruit by *Pichia membranefaciens* and induction of defense responses [J]. *Sci Hort*, 2012, 135: 120–127.
- [24] 林河通, 席珂芳, 陈绍军. 龙眼果实采后失果皮褐变与活性氧及酚类代谢的关系[J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2005, 31(3): 287–297.  
LIN HT, XI YF, CHEN SJ. The relationship between the desiccation-induced browning and the metabolism of active oxygen and phenolics in pericarp of postharvest longan fruit [J]. *J Plant Physiol Mol Biol*, 2005, 31(3): 287–297.
- [25] BRADFORD MM. Rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing principle of protein-dye binding [J]. *Anal Biochem*, 1976, 72: 248–254.
- [26] 郭欣, 林育钊, 林河通, 等. 壳聚糖处理对西番莲果实感病指数、抗病相关酶活性和抗病物质含量的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(15): 206–212.  
GUO X, LIN YZ, LIN HT, *et al.* Effect of chitosan treatment on disease index, disease resistant-related enzyme activities and disease resistance-related substance contents in *Passiflora caerulea* L. fruit during storage [J]. *Food Sci*, 2021, 42(15): 206–212.
- [27] WU YJ, LIN HT, LIN YF, *et al.* Effects of biocontrol bacteria *Bacillus amyloliquefaciens* LY-1 culture broth on quality attributes and storability of harvested litchi fruit [J]. *Postharv Biol Technol*, 2017, 132: 81–87.
- [28] JIANG XJ, LIN HT, LIN MS, *et al.* A novel chitosan formulation treatment induces disease resistance of harvested litchi fruit to *Peronophythora litchii* in association with ROS metabolism [J]. *Food Chem*, 2018, 266: 299–308.
- [29] PAN LY, ZHAO XY, CHEN M, *et al.* Effect of exogenous methyl jasmonate treatment on disease resistance of postharvest kiwifruit [J]. *Food Chem*, 2020, 305: 125483.
- [30] REN YF, XUE YH, TIAN D, *et al.* Improvement of postharvest anthracnose resistance in mango fruit by nitric oxide and the possible mechanisms involved [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68: 15460–15467.
- [31] WU YF, YIN CX, HUANG RM, *et al.* Enhanced resistance in ‘shatang’ mandarin fruit against *Penicillium italicum* caused by 2-methoxy-1,4-naphthoquinone [J]. *Physiol Mol Plant P*, 2022, 119: 101828.
- [32] 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]. *Postharv Biol Technol*, 2021, 171: 111349.
- [33] PAN LY, CHEN XR, XU W, *et al.* Methyl jasmonate induces postharvest disease resistance to decay caused by *Alternaria alternata* in sweet cherry fruit [J]. *Sci Hort*, 2022, 292: 110624.
- [34] SHU P, LI YJ, WANG XY, *et al.* Exogenous ferulic acid treatment increases resistance against *Botrytis cinerea* in tomato fruit by regulating nitric oxide signaling pathway [J]. *Postharv Biol Technol*, 2021, 182: 111678.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

## 作者简介



高志强, 硕士, 讲师, 主要研究方向为农产品加工及贮藏工程。  
E-mail: 66349210@qq.com



林河通, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为农产品加工及贮藏工程。  
E-mail: hetonglin@163.com