

# 茉莉酸甲酯诱导的采后果蔬抗病性及其 机制研究进展

温晓丽<sup>1,2</sup>, 罗维巍<sup>1,2</sup>, 范翌婷<sup>3</sup>, 葛永红<sup>3\*</sup>

(1. 鞍山师范学院化学与生命科学学院, 鞍山 114000; 2. 辽宁省天然产物活性分子开发及利用重点实验室, 鞍山 114000; 3. 渤海大学食品科学与工程学院, 锦州 121013)

**摘要:** 茉莉酸甲酯(methyl jasmonate, MeJA)是一种广泛存在于植物中的天然植物激素, 参与植物的许多代谢过程包括生长、发育、成熟、衰老、抵御生物和非生物胁迫等。由病原真菌侵染引起的果蔬采后病害是导致果蔬贮藏和运输过程中品质劣变和腐烂的原因之一, 不仅对生产者和消费者造成巨大经济损失, 还会在组织体内产生危害人体健康的有毒次生代谢产物。因此, 开发绿色安全的果蔬采后病害控制技术具有重要意义。本文总结了采前和采后 MeJA 单独或与其他物理、生物方法复合处理对果蔬采后主要真菌性病害的控制作用, 并从活性氧代谢、病程相关蛋白的积累、苯丙烷代谢、多胺代谢、能量代谢、细胞壁物质代谢、转录调控等方面详细阐述了其诱导抗性机制, 以期为 MeJA 广泛用于控制果蔬采后病害提供实践参考和理论依据。

**关键词:** 果蔬; 茉莉酸甲酯; 采后病害; 诱导抗病性

## Advances in methyl jasmonate-induced disease resistance in fruits and vegetables and its involved mechanisms

WEN Xiao-Li<sup>1,2</sup>, LUO Wei-Wei<sup>1,2</sup>, FAN Yi-Ting<sup>3</sup>, GE Yong-Hong<sup>3\*</sup>

(1. College of Chemistry and Life Science, Anshan Normal University, Anshan 114000, China; 2. Liaoning Key Laboratory of Development and Utilization for Natural Products Active Molecules, Anshan 114000, China; 3. College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, China)

**ABSTRACT:** Methyl jasmonate (MeJA) is a natural plant hormone widely existing in plants, which involves in many metabolism processes of plant including growth, development, maturity, senescence, responding to biotic and abiotic stresses. Postharvest disease of fruits and vegetables caused by pathogenic fungus infection is one of the causes of quality deterioration and decay during storage and transportation, which not only results in huge economic losses for producers and consumers, but also produces toxic secondary metabolites in tissues that harmful to human health. Therefore, it is of great significance to develop green and safe technology to control postharvest disease of fruits and vegetables. This paper reviewed the effects of pre-harvest and postharvest MeJA alone or combined with other physical and biological methods treatments on the control of major postharvest fungal diseases of fruits and vegetables in detail. The mechanisms involved in its action including reactive oxygen species metabolism, pathogenesis-related protein accumulation, phenylpropanoid pathway, polyamine metabolism, energy metabolism,

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究项目(SYSF202004)

Fund: Supported by the Scientific Research Projects of the Education Department of Liaoning Province (SYSF202004)

\*通信作者: 葛永红, 博士, 教授, 主要研究方向为果蔬采后生物学与技术。E-mail: geyh1979@163.com

\*Corresponding author: GE Yong-Hong, Ph.D, Professor, College of Food Science and Engineering, Bohai University, No.19 Keji Road, Songshan New District, Jinzhou 121013, China. E-mail: geyh1979@163.com

cell wall metabolism and transcriptional regulation were also represented. All these findings could provide practice reference and theoretical basis for postharvest decay control of fruits and vegetables.

**KEY WORDS:** fruits and vegetables; methyl jasmonate; postharvest disease; induced disease resistance

## 0 引言

果蔬采后仍保持着旺盛的生理代谢, 极易发生营养物质流失和病原微生物侵染, 不仅影响果实的品质和货架期, 还给生产者和消费者造成巨大的经济损失<sup>[1-2]</sup>。此外, 有很多病原真菌还能够产生有毒的次生代谢产物, 如粉红单端孢(*Trichothecium roseum*)、扩展青霉(*Penicillium expansum*)、互隔交链孢(*Alternaria alternata*)等, 对人体健康产生潜在的危害<sup>[3]</sup>。随着人民生活水平的提高和健康意识的增强, 对果蔬的品质和营养需求越来越高。因此, 如何保证果蔬的品质和安全是采后贮藏保鲜领域的研究热点, 也是促进果蔬产业健康可持续发展的需要。

茉莉酸甲酯(methyl jasmonate, MeJA)是一种广泛存在于植物中的天然植物激素, 可介导果实对非生物和生物胁迫的防卫反应<sup>[4-5]</sup>。此外, MeJA 还可作为信号分子参与植物体内其他激素的生物合成<sup>[6]</sup>。研究表明, MeJA 能够调控果蔬产品呼吸代谢、类胡萝卜素合成、乙烯合成、苯丙烷代谢以及花青素代谢等<sup>[5,7]</sup>。已有研究证明, MeJA 不仅具有直接的抑菌作用, 而且可以诱导相关抗性酶的活性和基因表达来提高果蔬的抗病性<sup>[8]</sup>。随着果蔬防腐保鲜研究的逐步深入, MeJA 在采后病害控制中的应用得到了广泛的关注。然而, 从采后病害控制角度系统分析 MeJA 在果蔬防腐保鲜中的应用及其机制的研究尚未见报道。本文就 MeJA 对果蔬采后病害的控制及抗性诱导机制等方面的研究进行总结和分析, 以期对果蔬采后病害绿色控制提供理论和技术支撑。

## 1 MeJA 对果蔬采后抗病性的诱导

### 1.1 采前处理

MeJA 作为一种与植物免疫相关的信号分子, 能够调控植物对不同病原真菌侵染的防卫反应。梨果实上的研究发现, 采前 10、20 和 30 d 分别喷洒 MeJA 溶液可以抑制由葡萄座腔菌(*Botryosphaeria dothidea*)引起的采后金梨秋轮纹病的发生<sup>[9]</sup>; 果实成熟前 30 d 每隔 10 d 用 7 mmol/L 的 MeJA 浸泡处理显著抑制了损伤接种互隔交链孢(*Alternaria alternata*)的“新梨 7 号”果实发病率和病斑扩展<sup>[10]</sup>。说明采前 MeJA 喷洒或浸泡处理均能够诱导梨果实采后抗病性。也有研究发现, 盛花后 60 d 用 50 μmol/L 的 MeJA 喷洒芒果果实可以抑制采后损伤接种盘长孢状刺盘孢(*Colletotrichum gloeosporioides*)果实病斑的扩展<sup>[11]</sup>。采前 3 d 喷洒 0.2 mmol/L MeJA 降低了损伤接种美澳型褐腐

病菌(*Monilinia fructicola*)甜樱桃果实的病斑面积<sup>[12]</sup>。此外, 采前 30 d 用 0.5 mmol/L 的 MeJA 浸果显著降低了猕猴桃果实采后软腐病的发生率<sup>[13]</sup>。由此说明, 采前不同时期喷洒一定浓度的 MeJA 能够诱导果实产生对采后病害的抗性, 诱导不同果实产生抗性的 MeJA 浓度存在很大差异, 同时表现出一定的果实种类差异性。但关于采前喷洒 MeJA 对果实采后自然腐烂的影响报道很少, 是今后重点研究的内容之一。

### 1.2 采后处理

#### 1.2.1 单独处理

近年来, 采后 MeJA 处理(浸泡、真空渗透、喷洒或熏蒸处理)对果蔬抗病性的诱导也得到了广泛的关注。浸泡处理是最简单、最经济的处理方法, 同时还能够清洗果蔬表面的泥沙等杂质。研究表明, 采后浸泡处理能够诱导多种果蔬的采后病害, 如 0.1 mmol/L MeJA 显著降低了损伤接种扩展青霉(*Penicillium expansum*)的苹果和梨果实、接种 *Penicillium expansum* 的桃果实和接种 *Botryosphaeria dothidea* 的猕猴桃果实病斑的生长<sup>[14-18]</sup>。此外, 低浓度的 MeJA 处理也能诱导果蔬的采后抗病性, 如 0.05 mmol/L MeJA 浸泡处理降低了甜樱桃果实由 *Alternaria alternata* 引起的黑斑病<sup>[19]</sup>, 诱导了葡萄和番茄果实对灰葡萄孢(*Botrytis cinerea*)的抗性<sup>[20-22]</sup>; 0.01 mmol/L MeJA 浸泡处理抑制了损伤接种尖孢炭疽菌(*Colletotrichum acutatum*)枇杷果实的病斑直径和褐变指数<sup>[23]</sup>。这些研究结果表明, MeJA 浸泡处理诱导的果蔬采后抗病性与果实种类、MeJA 的使用浓度有关。

真空渗透具有处理时间短、效果好等优点, 但需要专门的设备投入。研究发现, 0.1 mmol/L MeJA 真空渗透处理 30 s 结合常压浸泡 2 min 诱导了番茄果实对 *Penicillium expansum*、茄链格孢(*Alternaria solani*)、*Botrytis cinerea* 和匍枝根霉(*Rhizopus stolonifer*)的抗性<sup>[24-25]</sup>, 说明 MeJA 能够诱导果实的广谱抗性。由于常温条件下 MeJA 具有一定的挥发性, 因此采用熏蒸也是常用的采后处理方法之一, 并且取得了一定的效果。例如, 1.0 μmol/L MeJA 熏蒸显著抑制了八成熟草莓果实贮藏过程中的自然腐烂率, 但对全熟草莓果实的自然腐烂率无显著影响<sup>[26]</sup>, 说明 MeJA 诱导的抗病性与果实成熟度相关, 成熟度越低, 诱抗效果越好。适当提高 MeJA 的浓度, 也能够诱导不同果实的采后抗病性, 不仅降低了损伤接种优势病原菌的果实病斑扩展, 还降低了贮藏过程中的自然腐烂率。如采后 10 μmol/L MeJA 熏蒸处理诱导了葡萄果实对 *Botrytis cinerea* 的抗性<sup>[27]</sup>,

降低了杨梅果实贮藏期间的自然腐烂率和由 *Penicillium citrinum* 引起的腐烂<sup>[28-29]</sup>。此外, 采后 0.1 mmol/L MeJA 熏蒸处理降低了鳄梨果实贮藏和运输过程中炭疽病的发生率<sup>[30]</sup>, 而 0.05 mmol/L MeJA 熏蒸处理诱导了脐橙果实对意大利青霉 (*Penicillium italicum*) 和蓝莓果实对 *Botrytis cinerea* 的抗性<sup>[31-32]</sup>。近年来的研究还发现, 采后 0.05 mmol/L 或 10  $\mu$ mol/L MeJA 喷雾处理也能够降低损伤接种香蕉炭疽病菌 (*Colletotrichum musae*) 或 *Colletotrichum gloeosporioides* 的香蕉或芒果果实的病斑直径和贮藏过程中的果实自然腐烂率<sup>[33-34]</sup>。以上研究结果表明, 采后不同浓度的 MeJA 浸泡、真空渗透、熏蒸或喷雾处理均能够诱导仁果类、核果类、浆果类果实的采后病害, 且对不同病原菌的诱导浓度有差异。为了提高诱抗的效果, 可以选择在果实成熟度较低的时间进行处理, 同时根据果实特性选择适宜的处理方法。

### 1.2.2 复合处理

采用物理方法、植物生长调节物质、食品添加剂、植物天然提取物、生防菌复合 MeJA 处理, 不仅能够提高对果实抗病性的诱导效果, 还能降低使用药剂的浓度, 并节省成本。例如, 10  $\mu$ mol/L MeJA 复合热空气处理比单独的 MeJA 和热空气处理更有效地降低了草莓、杨梅和桃果实分别接种 *Botrytis cinerea*、*Verticillium dahliae* 和 *Rhizopus stolonifer* 的病斑直径和发病率<sup>[35-37]</sup>。此外, 15  $\mu$ mol/L MeJA 结合简易气调包装降低了蓝莓果实贮藏期间的自然腐烂率<sup>[38]</sup>。由此说明, 物理方法结合 MeJA 处理能够获得良好的采后病害控制效果。也有研究表明, 采后 MeJA 与 0.1% 壳聚糖或异亮氨酸结合处理提高了番茄果实对 *Alternaria solani* 和 *Botrytis cinerea* 的抗性, 且效果优于单独处理<sup>[39-40]</sup>。

生物防治是采后病害控制的有效措施之一, 尤其是酵母菌在采后病害控制中的研究受到了广泛的关注。研究发现, 采后 0.1 mmol/L MeJA 复合罗伦隐球酵母 (*Cryptococcus laurentii*) 处理显著抑制了接种指状青霉 (*Penicillium digitatum*) 的柑橘果实病斑直径和发病率, 同时促进了伤口中 *Cryptococcus laurentii* 的快速增殖, 以此提高与病原菌的营养和空间竞争<sup>[41]</sup>。添加 0.01 mmol/L MeJA 到膜醭毕赤酵母 (*Pichia membranifaciens*) 菌悬液提高了枇杷果实对 *Colletotrichum acutatum* 和杨梅果实对 *Penicillium citrinum* 的抗性<sup>[42-43]</sup>。此外, 补充 0.2 mmol/L MeJA 提高了粘红酵母 (*Rhodotorula glutinis*) 和季也蒙毕赤酵母 (*Meyerozyma guilliermondii*) 诱导的梨和苹果果实对 *Penicillium expansum* 的抗性<sup>[44-45]</sup>。这些结果表明, 外源添加 MeJA 能够加速酵母菌的生长, 在果实中形成营养和空间的竞争, 从而降低病原菌的生长速度, 起到了一定的协同增效作用, 还能降低 MeJA 和生防菌的使用浓度, 更适合于商业应用。

## 2 MeJA 诱导果实抗性的机制

### 2.1 激活活性氧代谢

活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 主要包括超氧阴离子自由基 ( $O_2^{\cdot-}$ )、过氧化氢 ( $H_2O_2$ )、羟基自由基 ( $\cdot OH$ ) 和单线态氧 ( $^1O_2$ ), 在植物防御反应的激活过程中具有重要作用<sup>[46]</sup>。 $H_2O_2$  是一种较稳定的 ROS 分子, 且已证明与果实的抗病性有关, 不仅具有直接的抑菌作用, 可以作为信号分子启动防卫反应, 还参与细胞壁结构的交联<sup>[47]</sup>。研究表明, 采后 MeJA 处理诱导苹果、芒果、枇杷、番茄、蓝莓、杨梅果实抗病过程中, 促进了果实中  $H_2O_2$  的积累<sup>[11,16,20-21,31-32]</sup>。然而, 过量积累的  $H_2O_2$  对细胞本身具有直接的伤害作用。因此, 植物在进化过程中形成了酶促和非酶促  $H_2O_2$  清除系统, 以降低  $H_2O_2$  对细胞的伤害。MeJA 诱导猕猴桃、番茄、香蕉、梨、蓝莓、葡萄、脐橙等果实抗病的研究中发现, 果实中超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT) 和抗坏血酸过氧化物酶 (ascorbate peroxidase, APX) 活性被 MeJA 诱导显著提高<sup>[10,17-18,21,24,31-33]</sup>。这些酶活性的提高有利于降低果实中大量产生的 ROS, 从而降低对细胞的伤害。MeJA 处理提高了苹果果实 SOD 活性和抗坏血酸 (ascorbic acid, AsA) 含量, 但抑制了 CAT 活性<sup>[20]</sup>。番茄果实抗灰霉病的研究中也发现, MeJA 处理抑制了贮藏前期果实中 CAT 活性<sup>[21]</sup>。此外, 芒果与枇杷果实中的研究也得到了相同的结果, MeJA 通过调控  $H_2O_2$  积累提高果实抗病性<sup>[16,34]</sup>。综上所述, 外源 MeJA 可以通过调控 ROS 代谢相关酶活性及抗氧化剂含量增强果实贮藏过程中的抗病性, 但不同果实中 MeJA 对酶促和非酶促清除系统的影响存在明显的差异。

### 2.2 活化苯丙烷代谢

苯丙烷代谢是重要的植物次生代谢途径之一, 在调节植物抗病中起着重要的作用。该途径起始于糖代谢, 通过莽草酸途径合成苯丙氨酸, 随后在苯丙氨酸解氨酶 (phenylalanine ammonia-lyase, PAL)、肉桂酸 4-羟化酶 (cinnamic acid 4-hydroxylase, C4H)、4-香豆酸辅酶 A 连接酶 (4-coumarate coenzyme A ligase, 4CL) 和过氧化物酶 (peroxidase, POD) 等一系列酶的作用下合成具有抗菌活性的类黄酮、酚酸、木质素等物质<sup>[48]</sup>。研究发现, 采后 MeJA 处理通过激活葡萄和蓝莓果实中 PAL、C4H 和 POD 活性来增强对 *Botrytis cinerea* 的抗性<sup>[18,32,38]</sup>。此外, 采用代谢组学研究发现, MeJA 处理促进了蓝莓果实中阿魏酸、没食子酸、芦丁、原儿茶酸和芥子酸等抗菌物质的积累<sup>[49]</sup>。JI 等<sup>[50]</sup>研究发现, MeJA 处理提高了桃果实 PAL 和 4CL 活性, 促进了绿原酸、新绿原酸、表儿茶素、总黄酮和木质素的积累; 同时, MeJA 处理后果实 *PpPAL* 和 *Pp4CL* 的表

达在接种病原菌后显著增加, 表明 MeJA 通过增强苯丙烷途径引发了桃果实的防御系统。类似的结果在草莓、蓝莓、番茄、葡萄、梨和杨梅果实中也有发现, 采后 MeJA 处理能够提高 PAL 活性, 促进酚类、木质素、花青苷类物质的积累, 提高果实的抗病性<sup>[8,10,22,24,28,31-32]</sup>。由此发现, MeJA 诱导的果实抗病性与激活苯丙烷代谢关键酶活性及次生代谢产物的积累密切相关, 同时也证实苯丙烷代谢在果实抗病应答过程中具有重要作用。

### 2.3 诱导病程相关蛋白的积累

诱导病程相关蛋白(pathogenesis-related proteins, PRs)是植物受病原物侵染或非生物胁迫过程中, 诱导产生的小分子化合物, 主要表现活性的是  $\beta$ -1,3-葡聚糖酶( $\beta$ -1,3-glucanase, GLU)和几丁质酶(chitinase, CHI)。现有研究表明, MeJA 处理能够诱导果蔬体内 GLU 和 CHI 活性的提高, 以加强对病原菌侵染的抵抗力。例如, 果实成熟前 30 d 每隔 10 d 喷洒 MeJA 诱导了采后梨果实中 GLU 和 CHI 活性的提高, 从而增强对黑斑病的抗性<sup>[10]</sup>; 采后 MeJA 熏蒸诱导的脐橙果实抗病性与果实 GLU 和 CHI 活性的升高有关<sup>[29]</sup>。此外, MeJA 浸泡诱导了葡萄、番茄、杨梅、鳄梨、蓝莓、甜樱桃果实 GLU 和 CHI 活性的升高<sup>[17,21,22,26-28,32]</sup>。分子生物学研究表明, MeJA 处理能够诱导果蔬体内 PRs 基因的表达, 如 MeJA 处理显著提高了香蕉果实 *MaPR1-1*、*MaPR2*、*MaPR10c*、*MaCHI3*、*MaCHI4* 和 *MaCHIL1* 的表达水平<sup>[51]</sup>, 猕猴桃果实中 *GLU* 和 *CHI* 表达水平<sup>[17]</sup>以及番茄果实中 *PR1*、*PR2a*、*PR2b* 和 *PR3b* 的表达水平<sup>[52]</sup>。草莓果实抗灰霉病的研究中发现, 花期喷洒 MeJA 提高了采后果实中 *GLU* 和 *CHI* 的表达水平<sup>[8]</sup>。综上所述, 采前或采后 MeJA 处理均可以通过激活 PRs 活性及其基因表达, 激发“priming”机制, 提高果实的抗病性。

### 2.4 调控多胺代谢

多胺是普遍存在于生物体内的胺分子, 在植物中具有传递信号和抵御非生物和生物胁迫的作用<sup>[53]</sup>。研究发现, MeJA 处理诱导枇杷果实对 *Colletotrichum acutatum* 的抗性与促进果实体内精胺、腐胺和亚精胺含量升高有关<sup>[54]</sup>。此外, 精氨酸代谢中精氨酸脱羧酶、精氨酸酶和鸟氨酸转氨酶的活性及其基因表达被 MeJA 诱导表达, 并且参与番茄果实对灰霉病的抗性<sup>[55]</sup>。由此说明, 多胺代谢在 MeJA 诱导抗病过程中具有一定的作用, 但其深入的机制有待进一步揭示。

### 2.5 转录调控

转录因子 WRKY 和 MYC 在调控果实抗病过程和能量代谢中具有重要作用。研究表明, 桃果实中 PAL 和 4CL 的转录调控因子 *WRKY70* 被显著诱导表达, 并且参与果实抵抗软腐病的发生<sup>[50]</sup>。此外, MeJA 处理通过上调

*PpWRKY46* 的表达激活 *PpSDH* 和 *PpCOX15* 表达, 而 *PpWRKY53* 的表达被 MeJA 下调, 同时抑制了 *PpSDH* 和 *PpCOX15* 表达, 从而保持桃果实能量状态, 提高对软腐病的抗性<sup>[56]</sup>。还有研究发现, 花期喷洒 MeJA 提高了采后草莓果实中内源茉莉酸的含量和茉莉酸信号转导相关基因 *MYC2* 的表达<sup>[8]</sup>。

### 2.6 其他

果蔬采后病害的发生与体内能量代谢密切相关, 能量匮乏会加速病害的发生。研究发现, MeJA 处理提高了枇杷和桃果实中能荷水平、三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)含量、钙 ATP 酶( $\text{Ca}^{2+}$ -adenosinetriphosphatase,  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase)、氢 ATP 酶( $\text{H}^{+}$ -adenosinetriphosphatase,  $\text{H}^{+}$ -ATPase)、细胞色素 C 氧化酶和琥珀酸脱氢酶活性, 从而保证果实的能量供应并提高抗性<sup>[50,54]</sup>。此外, 果实细胞壁物质降解引起的果实软化也降低了果实的抗病性, 极易引起病原真菌的侵染。李灿婴等<sup>[18]</sup>研究发现, MeJA 处理通过抑制  $\beta$ -葡萄糖苷酶、果胶甲基反式消除酶、多聚半乳糖醛酸反式消除酶等细胞壁降解酶活性降低桃果实青霉病的发生。植物在受到生物或非生物胁迫时, 细胞通过特定的信号转导途径将胁迫信号传递到细胞核, 从而启动寄主的防卫反应表达。例如采后 MeJA 处理诱导了甜樱桃和番茄果实茉莉酸信号转导相关基因 *COII*、*AOS*、*LOX*、*MYC2* 和 *OPR3* 的表达, 同时提高了内源茉莉酸的含量<sup>[17,24,52,57]</sup>。综上, 可以发现 MeJA 可以通过调控能量代谢, 细胞壁物质降解和茉莉酸信号转导途径诱导果实抗性, 但对其机制仍需进一步的研究探讨。

## 3 结束语

MeJA 作为植物中天然存在的生长调节物质, 可以通过诱导防御基因的表达、ROS 代谢、苯丙烷代谢等来提高果实的抗性。但有关 MeJA 控制病害的分子机制研究还不够深入, 同时现有研究涉及的果蔬和病原菌种类不多。今后的研究应该继续扩大 MeJA 的应用范围, 同时考虑与其他物理或生物处理方法结合以提高其作用效果。此外, 采用蛋白组、代谢组、转录组等多组学联合分析以及遗传学等分子生物学技术系统研究其诱抗机制。

### 参考文献

- [1] 唐建新, 王佳莉, 英丽美, 等. 果蔬采后生理代谢变化及调控机制研究进展[J]. 包装工程, 2016, 5: 91-99.
- [2] YU JX, WANG JL, YING LM, et al. Advances in physiological metabolism changes and regulation mechanism of harvested fruits and vegetables [J]. Pack Eng, 2016, 5: 91-99.
- [2] 王安杏, 曹川, 张庆, 等. 壳聚糖复合膜在果蔬保鲜中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 164-172.

- WANG ANX, CAO C, ZHANG Q, *et al.* Application of chitosan composite film in fruits and vegetables preservation [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(5): 164–172.
- [3] 白小东, 毕阳, 李永才, 等. 果蔬采后病害的潜伏侵染机理研究进展[J]. *食品科学*, 2015, 36(7): 278–282.
- BAI XD, BI Y, LI YC, *et al.* Mechanism of latent infection for postharvest diseases of fruits and vegetables [J]. *Food Sci*, 2015, 36(7): 278–282.
- [4] 闫艳华. 茉莉酸甲酯处理对采后杏果实品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(4): 23–28.
- YAN YH. Effects of methyl jasmonate treatments on fruit qualities of postharvest apricots [J]. *Storage Process*, 2021, 21(4): 23–28.
- [5] ASGHARI M. Impact of jasmonates on safety, productivity and physiology of food crops [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2019, 91: 169–183.
- [6] WANG HB, WU Y, YU RP, *et al.* Effects of postharvest application of methyl jasmonate on physicochemical characteristics and antioxidant system of the blueberry fruit [J]. *Sci Hort*, 2019, 258: 108785.
- [7] 齐海萍, 刘程惠, 田密霞, 等. 茉莉酸甲酯在采后果蔬品质控制中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(7): 2415–2419.
- QI HP, LIU CH, TIAN MX, *et al.* Application of methyl jasmonate on the quality controlling of fruits and vegetables [J]. *J Food Saf Qual*, 2015, 6(7): 2415–2419.
- [8] VALENZUELA-RIFFO F, ZÚÑIGA PE, MORALES-QUINTANA L, *et al.* Priming of defense systems and upregulation of MYC2 and JAZ1 genes after *Botrytis cinerea* inoculation in methyl jasmonate-treated strawberry fruits [J]. *Plants*, 2020, 9(4): 447.
- [9] 李丽, 彭舒, 宋情来, 等. 采前茉莉酸甲酯处理对金秋梨果实抗病性及品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(5): 14–19.
- LI L, PENG S, SONG QL, *et al.* Effects of pre-harvest methyl jasmonate treatment on disease resistance and qualities of ‘Jinqiu’ pear fruits [J]. *Storage Process*, 2021, 21(5): 14–19.
- [10] 王英珍, 程瑞, 张绍铃, 等. 采前茉莉酸甲酯(MeJA)处理对梨果实抗病性的影响[J]. *果树学报*, 2016, 33(6): 694–700.
- WANG YZ, CHENG R, ZHANG SL, *et al.* Effect of pre-harvest methyl jasmonate treatment on disease resistance in pear fruit [J]. *J Fruit Sci*, 2016, 33(6): 694–700.
- [11] 弓德强, 谷会, 张鲁斌, 等. 芒果采前喷施茉莉酸甲酯对其抗病性和采后品质的影响[J]. *园艺学报*, 2013, 40(1): 49–57.
- GONG DQ, GU H, ZHANG LB, *et al.* Effects of preharvest methyl jasmonate spraying on disease resistance and postharvest quality of mango fruits [J]. *Acta Hort*, 2013, 40(1): 49–57.
- [12] YAO HJ, TIAN SP. Effects of pre-and post-harvest application of salicylic acid or methyl jasmonate on inducing disease resistance of sweet cherry fruit in storage [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2005, 35: 253–262.
- [13] 黎晓茜, 龙友华, 尹显慧, 等. 茉莉酸甲酯处理对猕猴桃软腐病菌作用机制及果实品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(15): 239–248.
- LI XQ, LONG YH, YIN XH, *et al.* Mechanism of action of methyl jasmonate against kiwifruit soft rot and its effect on fruit quality [J]. *Food Sci*, 2019, 40(15): 239–248.
- [14] 李灿婴, 葛永红, 朱丹实, 等. 采后茉莉酸甲酯处理对富士苹果青霉病和贮藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(2): 255–259.
- LI CY, GE YH, ZHU DS, *et al.* Effects of methyl jasmonate treatment after harvest on blue mould and storage quality of ‘Fuji’ apple fruit [J]. *Food Sci*, 2015, 36(2): 255–259.
- [15] 吴帆, 肖刘华, 赵显阳, 等. 外源茉莉酸甲酯处理对梨果实青霉病和贮藏品质的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2021, 43(6): 1250–1258.
- WU F, XIAO LH, ZHAO XY, *et al.* Effects of exogenous methyl jasmonate treatment on blue mold and storage quality of pear fruit [J]. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2021, 43(6): 1250–1258.
- [16] 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.
- [17] 盘柳依, 赵显阳, 陈明, 等. 茉莉酸甲酯调控防御酶活性诱导猕猴桃果实抗采后软腐病[J]. *植物保护*, 2019, 45(1): 75–80.
- PAN LY, ZHAO XY, CHEN M, *et al.* Regulation of defense enzymes by methyl jasmonate to induce the resistance of kiwifruits against soft rot [J]. *Plant Protect*, 2019, 45(1): 75–80.
- [18] 李灿婴, 张丽华, 葛永红, 等. 采后茉莉酸甲酯处理对桃果实青霉病及细胞壁降解酶的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(20): 326–330.
- LI CY, ZHANG LH, GE YH, *et al.* Effect of jasmonic acid methylester treatment on blue mould and cell wall degrading enzymes activities in peach fruit [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(20): 326–330.
- [19] 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.
- [20] 李娇卓, 闵德栋, 李子龙, 等. 精氨酸酶在茉莉酸甲酯介导采后番茄果实灰霉病抗性中的作用[J]. *北方园艺*, 2021, (11): 97–104.
- LI JZ, MIN DD, LI ZL, *et al.* Arginase involves in methyl jasmonate-induced postharvest tomato fruit resistance against gray mold [J]. *Northern Hort*, 2021, (11): 97–104.
- [21] 郑素慧, 何庆, 张健, 等. 茉莉酸甲酯对红地球葡萄采后贮藏品质和病害的影响[J]. *新疆农业科学*, 2022, 59(1): 190–198.
- ZHENG SH, HE Q, ZHANG J, *et al.* Effects of exogenous methyl jasmonate on quality and disease of grapefruit [J]. *Xinjiang Agric Sci*, 2022, 59(1): 190–198.
- [22] MIN DD, LI ZL, FU XD, *et al.* Autophagy is involved in methyl jasmonate-mediated resistance against *Botrytis cinerea* in postharvest tomato fruit by regulating jasmonate signaling and reactive oxygen species homeostasis [J]. *Sci Hort*, 2022, 305: 111361.
- [23] CAO SF, ZHENG YH, YANG ZF, *et al.* Effect of methyl jasmonate on the inhibition of *Colletotrichum acutatum* infection in loquat fruit and the possible mechanisms [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2008, 49: 301–307.

- [24] 于萌萌, 申琳, 生吉萍. 茉莉酸甲酯诱导采后番茄果实抗病的作用[J]. 食品科学, 2012, 33(9): 11–15.  
YU MM, SHEN L, SHENG JP. MeJA-induced disease resistance in postharvest tomato fruits [J]. Food Sci, 2012, 33(9): 11–15.
- [25] 石慧, 励映聪, 罗云波, 等. 外源茉莉酸甲酯处理对采后绿熟番茄果实根霉果腐病抗病性的影响[J]. 食品科技, 2008, 33(5): 255–258.  
SHI H, LI YC, LUO YB, *et al.* Effects of exogenous methyl jasmonate on disease resistance to *Rhizopus* fruit rot in postharvest mature green tomato fruits [J]. Food Sci Technol, 2008, 33(5): 255–258.
- [26] 唐双双, 郑永华, 汪开拓, 等. 茉莉酸甲酯处理对不同成熟度草莓果实采后腐烂和品质的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(6): 448–452.  
TANG SS, ZHENG YH, WANG KT, *et al.* Effect of methyl jasmonate on decay and quality of postharvest strawberry fruit at different maturity stages [J]. Food Sci, 2008, 29(6): 448–452.
- [27] JIANG LL, JIN P, WANG L, *et al.* Methyl jasmonate primes defense responses against *Botrytis cinerea* and reduces disease development in harvested table grapes [J]. Sci Hortic, 2015, 192: 218–223.
- [28] 汪开拓, 郑永华, 唐双双, 等. 茉莉酸甲酯对草莓果实采后腐烂、苯丙烷类代谢及抗氧化活性的影响[J]. 食品科技, 2011, 36(8): 40–46.  
WANG KT, ZHENG YH, TANG SS, *et al.* Effects of methyl jasmonate (MeJA) on postharvest decay, phenylpropanoid metabolism and antioxidant activity in strawberry fruit [J]. Food Sci Technol, 2011, 36(8): 40–46.
- [29] WANG KT, JIN P, HAN L, *et al.* Methyl jasmonate induces resistance against *Penicillium citrinum* in Chinese bayberry by priming of defense responses [J]. Postharvest Biol Technol, 2014, 98: 90–97.
- [30] GLOWACZ M, ROETS N, SIVAKUMAR D. Control of anthracnose disease via increased activity of defence related enzymes in ‘Hass’ avocado fruit treated with methyl jasmonate and methyl salicylate [J]. Food Chem, 2017, 234: 163–167.
- [31] 王印宝, 吴帆, 肖刘华, 等. 茉莉酸甲酯处理对脐橙果实青霉菌及防御酶活性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(3): 560–568.  
WANG YB, WU F, XIAO LH, *et al.* Effects of methyl jasmonate treatment on blue mold and defense enzymes activity of navel orange fruit [J]. Acta Agric Univ Jiangxiensis, 2022, 44(3): 560–568.
- [32] WANG HB, KOU XH, WU CE, *et al.* Methyl jasmonate induces the resistance of postharvest blueberry to gray mold caused by *Botrytis cinerea* [J]. J Sci Food Agric, 2020, 100: 4272–4281.
- [33] 麻宝成, 朱世江. 苯并噻重氮和茉莉酸甲酯对采后香蕉果实抗病性及相关酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1220–1227.  
MA BC, ZHU SJ. Induction of disease resistance by benzothiadiazole and methyl jasmonate in relation to activities of defense-related enzymes [J]. Sci Agric Sin, 2006, 39(6): 1220–1227.
- [34] 弓德强, 黄训才, 黄光平, 等. 茉莉酸甲酯处理对采后芒果果实抗病性的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(12): 2294–2299.  
GONG DQ, HUANG XC, HUANG GP, *et al.* Effect of methyl jasmonate treatment on disease resistance in harvested mango fruit [J]. Chin J Trop Crop, 2016, 37(12): 2294–2299.
- [35] 焦凤. 热空气和 MeJA 复合处理对桃果实软腐病的影响及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.  
JIAO F. Study on effect and mechanism of hot air treatment combined with MeJA on postharvest mango fruit [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [36] 孔繁渊. 热空气和 MeJA 复合处理对草莓果实采后病害影响及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.  
KONG FY. Effects of hot air treatment combined with MeJA on harvested peach fruit soft rot and the mechanisms [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [37] 廖云霞, 伍冬至, 熊琦, 等. 热空气复合茉莉酸甲酯处理对杨梅果实采后腐烂和品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(8): 3318–3326.  
LIAO YX, WU DZ, XIONG Q, *et al.* Effects of the combined treatment of heat air and methyl jasmonate on postharvest mold decay and quality in Chinese bayberry fruit [J]. J Food Saf Qual, 2016, 7(8): 3318–3326.
- [38] 姜爱丽, 周福慧, 胡文忠, 等. 采后茉莉酸甲酯处理对蓝莓果实抗病性的影响[J]. 包装工程, 2018, 39(17): 75–83.  
JIANG AIL, ZHOU FH, HU WZ, *et al.* Effect of postharvest methyl jasmonate treatment on blueberry fruit disease resistance during storage [J]. Pack Eng, 2018, 39(17): 75–83.
- [39] CHEN JP, ZOU X, LIU Q, *et al.* Combination effect of chitosan and methyl jasmonate on controlling *Alternaria alternata* and enhancing activity of cherry tomato fruit defense mechanisms [J]. Crop Protect, 2014, 56: 31–36.
- [40] 罗吉庆, 张永杰, 吴艾频, 等. 外源茉莉酸甲酯和异亮氨酸对灰霉菌侵染后圣女果抗病性酶活性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(4): 123–130.  
LUO JQ, ZHANG YJ, WU AIP, *et al.* Effect of exogenous methyl jasmonate and isoleucine on resistance related enzyme activity of cherry tomatoes after *Botrytis cinerea* infection [J]. J Food Sci Technol, 2021, 39(4): 123–130.
- [41] GUO J, FANG WW, LU HP, *et al.* Inhibition of green mold disease in mandarins by preventive applications of methyl jasmonate and antagonistic yeast *Cryptococcus laurentii* [J]. Postharvest Biol Technol, 2014, 88: 72–78.
- [42] 汪开拓, 郑永华, 尚海涛, 等. 茉莉酸甲酯提高膜醌毕赤酵母对杨梅果实采后绿霉病生防效力的研究[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(7): 11–16.  
WANG KT, ZHENG YH, SHANG HT, *et al.* Study on improved biocontrol of *Pichia membranifaciens* for control of green mold decay on Chinese bayberry fruit by methyl jasmonate [J]. Food Ferment Ind, 2011, 37(7): 11–16.
- [43] CAO SF, ZHENG YH, WANG KT, *et al.* Effect of yeast antagonist in

- combination with methyl jasmonate treatment on postharvest anthracnose rot of loquat fruit [J]. *Biol Control*, 2009, 50: 73–77.
- [44] HE FT, ZHAO LN, ZHENG XF, *et al.* Investigating the effect of methyl jasmonate on the biocontrol activity of *Meyerozyma guilliermondii* against blue mold decay of apples and the possible mechanisms involved [J]. *Physiol Mol Plant*, 2020, 109: 101454.
- [45] ZHANG HY, MA LC, TURNER M, *et al.* Methyl jasmonate enhances biocontrol efficacy of *Rhodotorula glutinis* to postharvest blue mold decay of pears [J]. *Food Chem*, 2009, 117: 621–626.
- [46] MITTLER R, ZANDALINAS SI, FICHMAN Y, *et al.* Reactive oxygen species signalling in plant stress responses [J]. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 2022, 23(10): 663–679.
- [47] LIU HN, PEI MS, WEI TL, *et al.* ROS scavenger hypotaurine delays postharvest softening of ‘Kyoho’ grape by regulating pectin and cell metabolism pathway [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2022, 186: 111833.
- [48] ZHANG MY, WANG DJ, GAO XX, *et al.* Exogenous caffeic acid and epicatechin enhance resistance against *Botrytis cinerea* through activation of the phenylpropanoid pathway in apples [J]. *Sci Hort*, 2020, 268: 109348.
- [49] YAN ZC, WANG HB, KOU XH, *et al.* Metabolomics analysis reveals that MeJA treatment induces postharvest blueberry resistance to *Botrytis cinerea* [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2022, 194: 112075.
- [50] JI NN, WANG J, LI YF, *et al.* Involvement of *PpWRKY70* in the methyl jasmonate primed disease resistance against *Rhizopus stolonifer* of peaches via activating phenylpropanoid pathway [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2021, 174: 111466.
- [51] TANG Y, KUANG JF, WANG FY, *et al.* Molecular characterization of PR and WRKY genes during SA-and MeJA-induced resistance against *Colletotrichum musae* in banana fruit [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2013, 79: 62–68.
- [52] FU XD, LI XA, ALI M, *et al.* Methionine sulfoxide reductase B5 plays vital roles in tomato fruit defense response against *Botrytis cinerea* induced by methyl jasmonate [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2023, 196: 112165.
- [53] GERLIN L, BAROUKH C, GENIN S. Polyamines: Double agents in disease and plant immunity [J]. *Trends Plant Sci*, 2021, 26(10): 1061–1071.
- [54] CAO SF, CAI YT, YANG ZF, *et al.* Effect of MeJA treatment on polyamine, energy status and anthracnose rot of loquat fruit [J]. *Food Chem*, 2014, 145: 86–89.
- [55] MIN DD, AI W, ZHOU JX, *et al.* SIARG2 contributes to MeJA-induced defense responses to *Botrytis cinerea* in tomato fruit [J]. *Pest Manag Sci*, 2020, 76(9): 3292–3301.
- [56] JI NN, LI YF, WANG J, *et al.* Interaction of *PpWRKY46* and *PpWRKY53* regulates energy metabolism in MeJA primed disease resistance of peach fruit [J]. *Plant Phy Bioch*, 2022, 171: 157–168.
- [57] FU XD, LI JZ, MIN DD, *et al.* LncRNA4504 involved in methyl jasmonate-induced resistance to *Botrytis cinerea* in postharvest tomato fruit [J]. *Sci Hort*, 2022, 305: 111381.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

## 作者简介



温晓丽, 硕士, 讲师, 主要研究方向为采后生物学与技术和食品营养学。  
E-mail: wengxiaoli2003@163.com



葛永红, 博士, 教授, 主要研究方向为果蔬采后生物学与技术。  
E-mail: geyh1979@163.com