

茉莉酸甲酯对果蔬抗性、 抗氧化活性及品质影响的研究进展

赵曼如^{1,2}, 胡文忠^{1,2,*}, 于皎雪^{1,2}, 管玉格^{2,3}, 高红豆^{1,2}, 龙 娅^{1,2}

(1.大连民族大学生命科学学院, 辽宁大连 116600;

2.生物技术与资源利用教育部重点实验室, 辽宁大连 116600;

3.大连理工大学生命科学与技术学院, 辽宁大连 116024)

摘 要:茉莉酸甲酯作为与抗损伤相关的植物激素和信号分子,外源应用可激发植物防御基因的表达,诱导其产生与机械伤害相似的防御效果。采后果蔬在贮藏和运输期间总酚、抗坏血酸以及谷胱甘肽等抗氧化物质含量下降,致使其抗氧化活性降低,且品质和抗性受到了不良影响,大大缩短了果蔬的货架期,造成了一定的经济损失。研究发现茉莉酸甲酯可通过提高果蔬抗性物质合成酶和抗氧化相关酶的活性增强果蔬抗性,有效维持果蔬的抗氧化活性、降低品质损失、延长货架期。本文对近些年国内外茉莉酸甲酯在果蔬应用上的研究进展进行了综述,聚焦于其对果蔬抗性、抗氧化活性及品质等方面的影响及作用机理,为今后茉莉酸甲酯在果蔬保鲜上的研究及应用提供参考。

关键词:茉莉酸甲酯,抗性,抗氧化活性,品质

Research Progress on Effects of Methyl Jasmonate on Resistance, Antioxidant Activity and Quality of Fruits and Vegetables

ZHAO Man-ru^{1,2}, HU Wen-zhong^{1,2,*}, YU Jiao-xue^{1,2}, GUAN Yu-ge^{2,3}, GAO Hong-dou^{1,2}, LONG Ya^{1,2}

(1.College of Life Science, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China;

2.Key Laboratory of Biotechnology and Bioresources Utilization, Ministry of Education, Dalian 116600, China;

3.College of Life Science and Biotechnology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Methyl jasmonate as a phytohormone and signal molecule related to anti-injury can stimulate the expression of plant defense gene and induce the protective effect similar to mechanical injury. During the storage and transportation, the contents of antioxidant substance such as total phenol, ascorbic acid and glutathione decreased, as a result, its antioxidant activity is reduced, and quality and resistance are adversely affected, ultimately shortening the shelf life of fruits and vegetables, resulting in a certain economic losses. It is found that methyl jasmonate enhances the resistance of fruits and vegetables, effectively maintains the antioxidant activity of fruits and vegetables, reduces the loss of quality, and prolongs the shelf life by increasing the activity of synthetic enzymes and antioxidant-related enzymes in fruits and vegetables. This paper reviews the research progress of methyl jasmonate in fruits and vegetables application in recent years, focus on the effects of methyl jasmonate on the resistance, antioxidant activity and quality of fruits and vegetables and its mechanism. It provides reference for the research and application of methyl jasmonate in fruits and vegetables preservation in the future.

Key words: methyl jasmonates; resistance; antioxidant ability; quality

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2020)04-0328-05

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2020.04.056

引文格式: 赵曼如, 胡文忠, 于皎雪, 等. 茉莉酸甲酯对果蔬抗性、抗氧化活性及品质影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(4): 328-332.

采后果蔬经过采摘后生理代谢依然活跃, 导致糖类、有机酸等营养物质含量不断下降, 且贮藏期间容易受到微生物污染, 从而使果蔬的抗性及抗氧化

活性不断下降, 影响果蔬食用品质和货架期。近年来, 随着消费者健康意识的不断提高, 对果蔬产品的新鲜度和营养价值的要求也越来越严格, 因此如何

收稿日期: 2019-04-30

作者简介: 赵曼如(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: 1329486451@qq.com。

* 通讯作者: 胡文忠(1959-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: h wz@dl nu.edu.cn。

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0400903); 国家自然科学基金项目(31471923, 31172009); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD38B05)。

延长果蔬的货架期并保证果蔬的品质显得尤为重要^[1-2]。

茉莉酸甲酯 (Methyl Jasmonate, MeJA) 被认为是一种重要的细胞调节因子。作为植物组织中的天然激素, MeJA 不仅参与植物种子萌发、生长发育、果实成熟等与生长发育有关的生理生化过程, 还参与植物在机械伤害、病虫害等条件下的抗逆反应。当采后果蔬在运输和加工过程中受到损伤时, 其体内 MeJA 含量显著增加, 促使果蔬形成防御结构, 有效地保证果蔬的品质。此外 MeJA 还作用于植物受体细胞, 参与植物防御信号的转导过程, 调控植物次生代谢, 激活多种防御基因的表达, 调控植物的防御反应, 提高植物对生物胁迫和非生物胁迫的抗性。例如, MeJA 可以通过调节果蔬组织中的苯丙烷代谢, 激活苯丙氨酸解氨酶等抗氧化相关酶的基因表达, 增强抗氧化相关酶的活性, 从而有效提高果蔬抗氧化活性^[3-5]。随着果蔬市场逐步扩大, 茉莉酸甲酯对果蔬保鲜方面的研究也得到了广泛关注。

本文对近年来国内外茉莉酸甲酯对果蔬抗性、抗氧化活性及品质的相关研究进行了综述, 其中包括 MeJA 对相关抗性酶的活性的影响, 对酚类物质、抗坏血酸以及谷胱甘肽积累的诱导作用等, 为今后 MeJA 的在果蔬保鲜上的研究及实际推广应用提供参考。

1 茉莉酸甲酯对果蔬抗性的影响

1.1 茉莉酸甲酯对果蔬抗病性的影响

果蔬在贮藏和运输期间因自身生理生化反应或受到微生物浸染, 导致果蔬出现腐败, 并且由此产生的致病菌会给消费者带来各种不良影响^[2]。因此很多研究中使用茉莉酸甲酯对果蔬进行处理, 因为茉莉酸甲酯与果蔬抗机械伤害和抗病性有着密切的关系, 作为对病原微生物和虫害防御反应的关键植物激素, MeJA 不但具有直接抗菌功效, 还可以通过提高相关抗性酶的活性和诱导相关抗病性基因的表达, 达到抗病防御的效果^[6-7]。于萌萌等^[8]将不同病原菌接种于绿熟期“丽春”番茄, 随后研究茉莉酸甲酯处理对番茄采后抗病的反应, 结果发现 0.1 mmol/L MeJA 处理能够有效抑制灰葡萄孢霉等病原菌侵染, 并且诱导了番茄果实内的番茄红素等抗病性成分积累, 提高了果实体内相关病程蛋白 (PR_s) 含量, 番茄红素含量体现采后果实防御程度强弱, PR_s 为植物抵御病原主要抗性产物, 因此证明 MeJA 可以有效抑制番茄果实采后病害的发生。李灿婴等^[9]用茉莉酸甲酯处理富士苹果, 研究处理后的果实对扩展青霉抑制效果的影响, 结果发现 100 $\mu\text{mol/L}$ MeJA 处理有效提高了苹果果实超氧化物歧化酶 (SOD) 的活性, 抑制了过氧化氢酶 (CAT) 活性, 显著抑制了接种扩展青霉的果实的病斑直径, 有效提高了富士苹果的抗病能力。Jiang 等^[10]用 10 $\mu\text{mol/L}$ 茉莉酸甲酯对采后葡萄进行处理, 研究 MeJA 对葡萄灰霉菌的防治效果及作用机制。实验结果证明, MeJA 处理显著提高了几丁质酶 (CHI) β -1, 3-葡聚糖酶 (GNS) 等防御相关酶的活性, 显著降低了葡萄灰霉菌的产生率, 从而有效

提高了采后葡萄的抗病性。在蓝莓的研究中证明 20 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA 浓度处理更有利于诱导过氧化物酶 (POD)、多酚氧化酶 (PPO) 等抗病酶的活性提高, 降低病害的发生, 最后增强了果实的抗病性^[11]。综上所述, MeJA 对 POD、SOD 以及几丁质酶等防御相关酶有激活作用, 可以通过提高促进相关抗病酶基因表达, 提高他们的活性防止病原微生物对果实的浸染, 有效控制果实病斑面积, 从而提高了果实的抗病性。

1.2 茉莉酸甲酯对果蔬抗冷性的影响

低温贮藏是提高果蔬保质期的主要措施, 主要是通过降低呼吸速率和减少真菌的生长来提高果蔬的保质期。然而果蔬在低温贮藏下容易发生冷害, 会破坏果蔬细胞的完整性。因此为了避免果蔬品质受到影响, 甜橙^[12]和杨桃^[13]等研究中使用茉莉酸甲酯对果蔬进行处理, 从而提高果蔬的抗冷性, 减轻果蔬在低温下膜脂过氧化和乙烯速率加剧等冷害症状, 提高采后果实低温贮藏下的品质^[14-15]。Cao 等^[15]以枇杷为实验材料, 用茉莉酸甲酯处理 24 h, 观察 MeJA 对枇杷果实冷害的影响及变化情况。结果表明 10 mmol/L MeJA 处理提高了抗氧化酶活性和不饱和与饱和脂肪酸的比值, 从而可能诱导果实的抗冷性提高, 减轻果实采后冷害反应。刘瑶等^[16]用 5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 茉莉酸甲酯处理“金英达”尖椒, 并研究 MeJA 对低温贮藏下的尖椒生理生化反应的影响, 结果发现 MeJA 处理可以抑制尖椒丙二醛 (MDA) 含量的积累, 保持低温下细胞的完整性, 同时提高了贮藏期间尖椒 POD、CAT 酶的活性, 诱导抗氧化相关酶基因量的表达, 有效抑制尖椒冷害的发生。李喜宏等^[17]以新鲜槟榔为实验材料, 研究不同浓度 (0、10、100 $\mu\text{mol/L}$) 茉莉酸甲酯对槟榔果实冷害症状的影响, 结果发现 MeJA 处理降低了槟榔组织中 PPO、POD 等酶的活性, 显著抑制了槟榔的核心褐变等冷害症状。所以 MeJA 可以提高与抗冷害相关的酶的活性, 从而有效抑制果蔬组织中 MDA 含量, 降低乙烯呼吸速率, 保持低温下细胞的完整性, 以控制果蔬发生冷害现象。

2 茉莉酸甲酯对果蔬抗氧化活性的影响

采后果蔬在贮藏和运输期间其生理生化方面会产生一些不良的变化, 包括果蔬组织表面会氧化褐变, 膜脂过氧化程度加剧, 致使果蔬产品的水分和营养物质流失, 货架期显著缩短^[18]。大量研究表明, 茉莉酸甲酯作为天然保鲜剂作用于果蔬, 可以增强苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、谷胱甘肽还原酶 (GR) 等酶的活性, 有效调控果蔬组织中的苯丙烷代谢、抗坏血酸代谢、谷胱甘肽代谢以及谷胱甘肽-抗坏血酸循环, 进而刺激酚类物质、抗坏血酸 (ascorbic acid, AsA)、谷胱甘肽 (reduced glutathione, GSH) 等抗氧化物质累积, 减少果蔬的氧化损伤, 最终有效提高果蔬的抗氧化活性。

2.1 茉莉酸甲酯对果蔬中的酚类物质的影响

酚类物质在果蔬体内含量丰富, 种类繁多, 是生物体内的活性物质, 又是重要的抗氧化成分。果蔬

抗氧化活性的变化与其含量的变化有直接关系^[18]。在植物体内,酚类物质合成的主要途径为苯丙氨酸代谢途径。过程示意图如图1所示,莽草酸途径的莽草酸转化成苯丙氨酸进入苯丙烷代谢途径,生成反式肉桂酸、香豆酸等,再经过进一步代谢生成类黄酮、木质素等。其中,苯丙氨酸解氨酶、肉桂酸-4-羟化酶(C4H)和4-香豆酸辅酶A连接酶(4CL)是苯丙烷代谢途径中的关键酶^[19-20],因此维持关键酶活性有利于酚类物质积累,提高抗氧化活性。

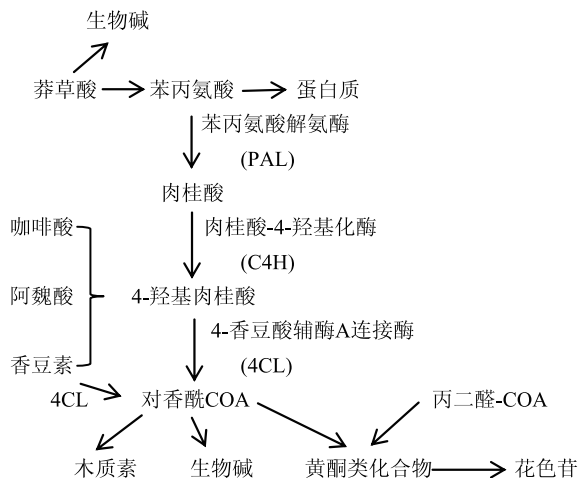


图1 苯丙烷代谢途径示意图

Fig.1 Schematic diagram of phenylpropanol metabolic pathway

李悦等^[21]发现10 $\mu\text{mol/L}$ MeJA能诱导鲜切菠萝贮藏期间苯丙氨酸解氨酶和肉桂酸-4-羟化酶活力的上升,延缓4-香豆酸辅酶A连接酶活力的下降,进而通过调控苯丙烷代谢,促进鲜切菠萝总酚和总黄酮含量积累,并且能够提高1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)清除自由基能力,从而有效提高鲜切菠萝的抗氧化活性。同样汪开拓等^[20]的实验发现MeJA处理可同时提高PAL和C4H的活力,提高了总酚和花色苷的含量,保持了果实的抗氧化活性。此外MeJA除了作用于苯丙烷代谢途径中的三个关键酶,还能通过提高其他苯丙烷代谢途径中的相关酶活性诱导酚类物质合成,并保持果实抗氧化活性。李喜宏等^[17]用不同浓度(0、10、100 $\mu\text{mol/L}$)茉莉酸甲酯处理新鲜槟榔,并研究MeJA处理后槟榔果实变化情况,结果发现MeJA处理降低了苯丙氨酸解氨酶、肉桂醇脱氢酶等酶的活性,抑制了木质素等酚类物质含量的积累,并且有效抑制了多酚氧化酶和过氧化物酶的活性,从而控制了槟榔的核心褐变等不良影响症状,显著提高了槟榔的抗氧化活性。盘柳依等^[4]研究0.1 mmol/L MeJA对采后‘金魁’猕猴桃果实抗氧化能力的影响,结果发现用茉莉酸甲酯处理促进总酚含量的积累,同时提高超氧化物歧化酶(SOD)活性,与CAT、POD等酶共同清除活性氧,控制膜脂过氧化程度,因此提高了猕猴桃的抗氧化活性。另一方面,MeJA还能够显著提高李子^[22]果实中绿原酸、咖啡酸、芦丁、柚皮素和山奈酚等酚类物质的含量,进而有效提高果实的抗氧化能力。通过以上研究证明MeJA能够影响植物组织中PAL、C4H关键酶的活性,通过调控苯丙烷代谢过程,从而促进总

酚、总黄酮等相关的抗氧化物质合成,并且增加CAT、POD等抗氧化相关酶活性,增加清除活性氧能力,进而提高果蔬的抗氧化活性,维持鲜切果蔬品质。

2.2 茉莉酸甲酯对果蔬中的抗坏血酸的影响

抗坏血酸是人体所必需的维生素,对保持健康至关重要。由于人体无法合成抗坏血酸,所以果蔬成为人类摄取的主要来源^[23]。抗坏血酸主要来源于果实组织中的抗坏血酸代谢及抗坏血酸-谷胱甘肽循环过程,当果蔬受到胁迫伤害时,体内活性氧含量升高,使用茉莉酸甲酯处理可以提高体内抗坏血酸含量,使果蔬维持较高的抗氧化活性^[18]。闫媛媛等^[24]用茉莉酸甲酯处理鲜切富士苹果,经过研究发现MeJA处理提高了抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性,增加了抗坏血酸的含量,同时维持了多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶的活性,从而能够有效提高鲜切苹果的抗氧化能力。Zhu^[25]等研究外源茉莉酸甲酯对番茄果实抗氧化能力的影响,结果证明了10 mmol/L MeJA能够通过促进SOD、APX酶基因的表达,刺激抗坏血酸含量的积累。进而有利于清除过量的活性氧,提高番茄的抗氧化活性。此外鲜切莴苣^[26]和猕猴桃^[27]的实验发现MeJA不仅有效维持了果蔬中的抗坏血酸含量,并且能够用通过影响PPO、POD、CAT等抗氧化相关酶的活性,改变活性氧消耗速率,进而有效提高了果实的抗氧化活性。综上,使用茉莉酸甲酯处理可以有效调控果蔬组织中的抗坏血酸代谢,影响抗坏血酸过氧化物酶等相关抗氧化酶的活性,抑制果蔬中抗坏血酸含量的下降,从而提高果蔬的抗氧化能力,有效维持果蔬新鲜度。

2.3 茉莉酸甲酯对果蔬中的其他抗氧化物质的影响

上述研究证明,茉莉酸甲酯处理能够通过提高酚类物质和抗坏血酸含量以维持果蔬品质。此外,MeJA还能调节谷胱甘肽的代谢,影响谷胱甘肽的含量。谷胱甘肽是果蔬体内的高活性三肽化合物^[18]。MeJA处理能够提高果蔬中谷胱甘肽的含量,增强与抗坏血酸协同发挥抗氧化作用的能力,进而提高果蔬消除自由基能力,增强抗氧化活性。在董宇等^[28]MeJA处理冬枣实验中发现,外源MeJA处理能够有效延缓果实还原型谷胱甘肽的降解,并且降低组织中的超氧阴离子生成速率,从而有效提高冬枣果实的抗氧化活性。同样在Cai等^[29]的枇杷果实研究中也发现,茉莉酸甲酯能调节枇杷果实中谷胱甘肽的代谢,增加谷胱甘肽的含量,从而提高了枇杷果实的抗氧化活性。此外抗坏血酸-谷胱甘肽循环是生物体内重要的抗氧化途径,MeJA能够影响该循环过程调节谷胱甘肽含量,影响果实抗氧化能力。在Zhu等^[25]实验中发现MeJA通过诱导增强APX活力刺激抗坏血酸含量积累,进而调控了抗坏血酸-谷胱甘肽循环过程,增加了谷胱甘肽含量,最终提高了番茄果实的抗氧化活性。而在猕猴桃^[30]实验中也发现茉莉酸甲酯能增强高温胁迫下猕猴桃苗中抗坏血酸过氧化物酶(APX)、谷胱甘肽还原酶(GR)、脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)活性,维持抗坏血酸-谷胱甘肽代

谢途径平衡,在保持谷胱甘肽含量的同时也保持了猕猴桃的抗氧化能力。由于外源茉莉酸甲酯对果蔬组织中谷胱甘肽等其他抗氧化物质影响的研究较少,因此需要进一步深入研究。

3 茉莉酸甲酯对果蔬生理品质的影响

近年来,随着果蔬行业的兴起和消费者生活水平的提高,对果蔬市场的需求量加大,果蔬颜色、风味和营养价值成为了消费者接受这些产品成功与否的关键因素。然而新鲜果蔬在贮藏和运输过程中其组织会受到损伤,致使其品质发生一系列不良劣变,保持新鲜果蔬的质量是开发和生产新鲜产品的一个主要关切的事项^[31-32]。Liu 等^[33]用 0.01 和 0.05 $\mu\text{mol/L}$ 茉莉酸甲酯处理番茄果实,经过研究发现 MeJA 可以防止果实软化,有效维持果实中的健康成分如番茄红素和类胡萝卜素含量的积累,同时保持蔗糖、葡萄糖、果糖等可溶性固形物和可滴定酸等与品质优劣有关的重要营养物质含量,这些结果都表明 MeJA 在维持番茄的品质和营养价值方面有着积极作用。在张馨跃等^[34]研究中发现,茉莉酸甲酯处理能抑制鲜切芹菜失重率提高,降低丙二醛(MDA)含量,进而减缓膜脂过氧化程度,保持了芹菜细胞的完整性。鲜切马铃薯实验中证明 MeJA 能通过抑制多酚氧化酶、POD 活性,延缓鲜切马铃薯的衰老,保持较好的贮藏品质^[35]。同样在水果产品研究中,鲜切梨的实验也证明了经过茉莉酸甲酯处理的鲜切梨较好地保持了可滴定酸、可溶性蛋白、还原糖、总糖、 V_c 含量,与上述番茄研究结果类似^[36]。蓝莓的实验表明茉莉酸甲酯能够显著抑制果实腐烂率的上升,由此证明在采后贮藏期间 MeJA 能够有效保持蓝莓等果蔬的生理品质^[36]。在茉莉酸甲酯处理对软枣猕猴桃生理生化变化的影响的研究中也发现,0.15 mmol/L MeJA 处理除了能够保持果实中 POD 和 CAT 活性,还能抑制脂氧合酶(LOX)活性,从而有效抑制软枣猕猴桃硬度的下降,有利于保持猕猴桃中 V_c 含量,因此证明 MeJA 处理能更好的延缓软枣猕猴桃衰老进程,保持猕猴桃的品质^[27]。综上,使用茉莉酸甲酯对采后果蔬进行处理,可以良好地保持果实中可溶性固形物、可滴定酸等营养品质,能够提高 POD、CAT 以及 LOX 等酶活性控制不良反应的发生,保持果实细胞的完整,有效延长果蔬的货架期,维持其商业价值。

4 展望

茉莉酸甲酯处理可以刺激果蔬的防御基因表达,诱导防御反应相关酶的合成,对生物或非生物胁迫起防御作用,对维持新鲜果蔬品质有着积极的作用,起到防腐保鲜的效果。目前,茉莉酸甲酯已经在提高果蔬抗性、抗氧化活性以及延长货架期等方面中取得了一些成果,并且逐渐引起人们的关注,但仍然存在一些问题,例如 MeJA 对组织中谷胱甘肽等与果蔬保鲜有重要关系的生物活性成分的作用机理尚有待深入探索。

参考文献

[1] 崔席席,李富军,张新华,等.茉莉酸甲酯调控果蔬采后品

质的机制及应用研究进展[J].食品科学,2019,40(13):304-311.

[2] 老莹,胡文忠,冯可,等.天然抑菌剂的抑菌机理及其在果蔬保鲜中的应用[J].食品与发酵工业,2018,44(9):288-293.

[3] Ma Liang, Zhang Min, Bhandari B, et al. Recent developments in novel shelf life extension technologies of fresh-cut fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 64: 23-38.

[4] 盘柳依,赵显阳,陈明,等.外源茉莉酸甲酯处理对采后猕猴桃果实品质和抗氧化酶活性的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(9):190-196.

[5] 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.

[6] 冯叙桥,黄晓杰,赵宏侠,等.MeJA(茉莉酸甲酯)处理对采后蓝莓品质和抗氧化能力的影响[J].食品工业科技,2014,35(22):330-335.

[7] 刘芳宏,曾凯芳,邓丽莉.茉莉酸类物质诱导果蔬抗性机制研究进展[J].食品工业科技,2015,36(7):392-395,400.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Jiang Lu-Lu, Jin Peng, Wang Lei, et al. Methyl jasmonate primes defense responses against Botrytis cinerea and reduces disease development in harvested table grapes[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 192: 218-223.

[11] Saracouglu O, Ozturk B, Yildiz K, et al. Pre-harvest methyl jasmonate treatments delayed ripening and improved quality of sweet cherry fruits[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 226: 19-23.

[12] Rehman M, Singh Z, Khurshid T. Methyl jasmonate alleviates chilling injury and regulates fruit quality in 'Midnight' Valencia orange[J]. Postharvest Biology & Technology, 2018, 141: 58-62.

[13] Mustafa M A. Enhancing the antioxidant content of carambola (*Averrhoa carambola*) during cold storage and methyl jasmonate treatments[J]. Postharvest Biology & Technology, 2016, 118: 79-86.

[14] Aghdam M S, Bodboask S. Physiological and biochemical mechanisms regulating chilling tolerance in fruits and vegetables under postharvest salicylates and jasmonates treatments[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 156(156): 73-85.

[15] Cao Shi-Feng, Zheng Yong-Hua, Wang Kai-Tuo, et al. Methyl jasmonate reduces chilling injury and enhances antioxidant enzyme activity in postharvest loquat fruit[J]. Food Chemistry, 2009, 115(4): 1458-1463.

[16] 刘瑶,郝秋丽,左进华,等.茉莉酸甲酯结合低温预贮对尖椒采后品质及生理特性的研究[J/OL].食品科学:1-9[2020-01-03].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20190409.1410.040.html>.

[17] 李喜宏,张姣姣,郝晓磊,等.茉莉酸甲酯对鲜食槟榔冷害调控研究[J].现代食品科技,2016,32(12):260-265,203.

[18] 张越,胡文忠,管玉格,等.鲜切果蔬抗氧化物质生物合

成机制的研究进展[J].食品发酵工业,2019,45(4):236-241.

[19] 马杰,胡文忠,毕阳,等.鲜切果蔬苯丙烷代谢的研究进展[J].食品工业科技,2012,33(15):391-393.

[20] 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(8):40-46.

[21] 季悦,李静,王雷,等.茉莉酸甲酯处理对鲜切菠萝品质及抗氧化活性的影响[J].食品科学,2018,39(1):258-263.

[22] Kucuker E, Ozturk B, Celik S M, et al. Pre-harvest spray application of methyl jasmonate plays an important role in fruit ripening, fruit quality and bioactive compounds of Japanese plums[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 176:162-169.

[23] Leong S Y, Liu T, Oey I, et al. Ascorbic acid in processed plant-based foods[J]. Ascorbic Acid in Plant Growth, Development and Stress Tolerance, 2017:431-469.

[24] 闫媛媛,胡文忠,姜爱丽,等.茉莉酸甲酯和乙烯利处理对鲜切富士苹果抗氧化酶活力和苯丙烷代谢的影响[J].食品工业科技,2015,36(16):324-327,332.

[25] Zhu Z, Tian S. Resistant responses of tomato fruit treated with exogenous methyl jasmonate to *Botrytis cinerea* infection[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 142(none).

[26] 马杰,胡文忠,毕阳,等.外源乙烯和茉莉酸甲酯处理对鲜切茼蒿活性氧代谢的影响[J].食品工业科技,2013,34(17):338-341.

[27] 胡文忠,姜爱丽,蔡慧,等.茉莉酸甲酯处理对软枣猕猴桃生理生化变化的影响[J].食品工业科技,2013,34(4):331-334,340.

[28] 董宇,支欢欢,徐娟,等.外源茉莉酸甲酯处理对冬枣冷藏

抗氧化代谢及褐变的影响[J].现代食品科技,2017,33(1):152-158.

[29] Cai Yu-Ting, Cao Shi-Feng, Yang Zhen-Feng, et al. MeJA regulates enzymes involved in ascorbic acid and glutathione metabolism and improves chilling tolerance in loquat fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 59(3):324-326.

[30] 耶兴元.茉莉酸甲酯对高温胁迫下猕猴桃苗膜脂过氧化及相关抗氧化酶的影响[J].江苏农业科学,2015,43(5):173-175.

[31] G R Velderrain-Rodriguez, A E Quiros-Sauceda, G A Gonzalez Aguilar, et al. Technologies in fresh-cut fruit and vegetables[J]. Food Engineering, 2015, 104(3):6-11.

[32] Barrett D M, Beaulieu J C, Shewfelt R. Color, flavor, texture, and nutritional quality of fresh-cut fruits and vegetables: Desirable levels, instrumental and sensory measurement, and the effects of processing[J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2010, 50(5):369-389.

[33] Liu Hao-Ran, Meng Fan-Liang, Miao Hui-Ying, et al. Effects of postharvest methyl jasmonate treatment on main health-promoting components and volatile organic compounds in cherry tomato fruits[J]. Food Chemistry, 2018, 263:194-200.

[34] 张馨跃,王艳颖,李天,等.茉莉酸甲酯处理对鲜切芹菜贮藏品质的影响[J].保鲜与加工,2013,13(5):24-28.

[35] 张冉,王艳颖,胡丽莎,等.茉莉酸甲酯对鲜切马铃薯生理生化品质的影响[J].现代园艺,2018,367(19):23-25.

[36] 王艳颖,胡文忠,金黎明.茉莉酸甲酯对鲜切水晶梨营养品质的影响[J].食品与发酵工业,2012(6):209-212.

(上接第327页)

enzymatic browning of fresh-cut lotus root slices by regulating phenolic metabolism[J]. Food Chemistry, 2015, 177:376-381.

[58] 郑吉练.硫化氢延缓苹果采后成熟衰老的信号机制研究[D].合肥:合肥工业大学,2016.

[59] 杜国辉,姜勇,郭风军.果蔬保鲜技术研究进展[J].食品安全导刊,2016(30):61-61.

[60] Ustun D, Candir E, Ozdemir A E, et al. Effects of modified atmosphere packaging and ethanol vapor treatment on the chemical composition of 'Red Globe' table grapes during storage[J]. Postharvest Biology & Technology, 2012, 68:8-15.

[61] Liu W W, Qi H Y, Xu B H, et al. Ethanol treatment inhibits internal ethylene concentrations and enhances ethyl ester production during storage of oriental sweet melons (*Cucumis melo* var. makuwa Makino)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 67(none):75-83.

[62] Millar A H, Day D A. Nitric oxide inhibits the cytochrome oxidase but not the alternative oxidase of plant mitochondria[J]. Febs Letters, 1996, 398(2-3):155-158.

[63] A M Lazalt, M V Beligni, L Lamattina. Nitric oxide preserves the level of chlorophyll in potato leaves infected by *Phytophthora infestans*. [J]. European Journal of Plant Pathology, 1997, 103(7):643-651.

[64] M Delledonne, Y Xia, R A Dixon, et al. Nitric oxide functions as a signal in plant disease resistance. [J]. Progress in Biotechnology, 2001, 394(6693):585-588.

[65] Rumer S, Gupta K J, Kaiser W M. Plant cells oxidize hydroxylamines to NO[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(7):2065-2072.

[66] Liu, Yong-Biao. Nitric oxide fumigation for control of western flower thrips and its safety to postharvest quality of fresh fruit and vegetables[J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2016, 19(4):1191-1195.

[67] Wang Y, Luo Z, Du R. Nitric oxide delays chlorophyll degradation and enhances antioxidant activity in banana fruits after cold storage[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2015, 37(4):74.

[68] Palou Lluis, Ali A, Fallik E, et al. GRAS, plant- and animal-derived compounds as alternatives to conventional fungicides for the control of postharvest diseases of fresh horticultural produce[J]. Postharvest Biology & Technology, 2016, 122:41-52.

[69] Shao X, Cheng S, Wang H, et al. Optimization of tea tree oil fumigation for keeping quality of harvested strawberry fruit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(19):279-286.