

孙晓文,郭景南,高登涛,等.茉莉酸类物质的生理效应及在园艺作物上的应用[J].江苏农业科学,2016,44(12):54-57.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.12.013

茉莉酸类物质的生理效应及在园艺作物上的应用

孙晓文,郭景南,高登涛,魏志峰,宋英琿

(中国农业科学院郑州果树研究所,河南郑州 450009)

摘要:以茉莉酸(jasmonic acid,简称 JA)和茉莉酸甲酯(methyl jasmonate,简称 MeJA)为代表的茉莉酸类物质(jasmonates,简称 JAs)是一种广泛存在于植物体中的新型植物生长调节物质,具有广谱的生理效应,不仅能提高植物体对逆境胁迫的抵御能力,而且在植物体生长发育过程中发挥重要调节作用。JAs 能使作物增强对病虫害的抵御能力,提高作物抗旱性,促进细胞膨大、分裂,调节种子萌发、促进植物生殖生长等。在园艺作物生产中,可以应用 JAs 改善果实色泽、香气,提高果实品质,降低果实冷害,抑制真菌发展,提高贮藏品质等。本文通过对茉莉酸类物质在植物抗逆性、生长发育过程方面的影响以及它们在园艺作物中的应用进行综述,旨在为茉莉酸类物质的深入研究以及在园艺作物生产中的推广应用提供参考依据。

关键词:茉莉酸类物质;生长调节物质;生理效应;抗逆性;生长发育

中图分类号:S482.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2016)12-0054-04

茉莉酸(jasmonic acid,简称 JA)及其挥发性甲酯衍生物茉莉酸甲酯(methyl jasmonate,简称 MeJA)和氨基酸衍生物统称为茉莉酸类物质(jasmonates,简称 JAs),在植物信号网络中发挥着重要作用。1962 年,研究人员首次从茉莉属素馨花的香精油中成功提取并分离出 MeJA^[1],MeJA 为茉莉属植物花香味的重要组成成分。1971 年,游离的 JA 在真菌 *Lasiodiplodia theobromae* 的培养液中分离得到^[2],并且人们已于 1980 年成功合成人工 JA。Wasternack 研究发现,JAs 具有生长物质活性^[3],随后关于 JAs 的生物学作用引起了人们广泛关注。JAs 是植物体内广泛存在的生长调节物质^[4],具有广谱的生理效应,主要包括作为内源信号分子参与植物抗逆反应(介导植物对病原菌、昆虫及非生物胁迫等的防御),调节植物生长发育(诱导种子萌发、植物开花、果实成熟等)。

1 茉莉酸类物质的生物合成

茉莉酸类物质起源于 α -亚麻酸,经由十六烷或十八烷途径合成^[5]。 α -亚麻酸由磷脂酶催化膜脂水解释放,由脂氧合酶(lipoxygenase,简称 LOX)氧化为 13-氢过氧亚麻酸(13-HPOT),然后在丙二烯氧化物合成酶(allene oxide synthase,简称 AOS)作用下转变为高度不稳定的环氧化物。而这种环氧化物又在丙二烯氧化物环化酶(allene oxide cyclase,简称 AOC)作用下环化为 12-氧-植物二烯酸(12-oxo-phytodienoic acid,简称 12-OPDA)。经过还原与 β -氧化形

成 JA。JA 在茉莉酸甲基转移酶作用下催化形成 MeJA^[6]。此外,JA 还可以通过羟基化、糖基化等多种途径形成各种各样的 JAs。

2 茉莉酸类物质的生理效应

2.1 茉莉酸类物质在植物体中的分布

Knofel 等通过应用放射免疫及生理学技术对自然界中茉莉酸类物质的分布调查研究发现,160 多个科的 206 种植物材料中均有 JAs 的存在,其中 JAs 在被子植物中分布最为普遍,在裸子植物、藻类、蕨类植物和真菌中也有分布^[7]。JAs 在植物体中的含量因植物种类、器官、发育阶段不同而存在差异,鲜质量含量一般为 10 ng/g ~ 3 μ g/g。通常在生长组织如茎尖、嫩叶、未成熟的果实及根尖中 JAs 含量较高;生殖器官中 JAs 的含量高于营养器官^[8]。在苹果(呼吸跃变型果实)生长早期,果肉中 JAs 含量较高,随着果实发育,JAs 含量降低,果实成熟阶段 JAs 含量再次升高;而在甜樱桃(非呼吸跃变型果实)生长早期,果肉中 JAs 含量较高,随着果实发育直至采收,JAs 含量降低^[9]。这些结果表明,JAs 在不同果实的不同发育时期含量不同,发挥着不同的生理作用。

2.2 茉莉酸类物质在逆境胁迫中的作用

JAs 在植物响应生物与非生物胁迫反应中发挥着重要作用^[10]。逆境条件下,许多植物内源 JAs 含量急剧上升,诱导特异基因表达,促进诸如脯氨酸、腐胺等与逆境胁迫相关物质的生物合成,提高植物对逆境的抵御能力。

2.2.1 诱导植物产生抗病性 JAs 不仅具有直接抗菌功效,而且能诱导植物特异基因的表达,进而诱导防御蛋白的合成,包括查尔酮合酶(chalcone synthase,简称 CHS)、苯丙氨酸裂解酶(phenylalanine ammonia-lyase,简称 PAL)等防御反应关键酶,进而促使植物产生植保素、木质素等防御相关物质,分别通过抗菌作用以及利用伤害部位木质化形成结构及化学屏障,限制病原菌的扩展^[11]。病原物入侵拟南芥时,寄主拟南芥中内源 JA 含量升高,从而活化相关基因编码抗性蛋白以产

收稿日期:2015-11-22

基金项目:中国农业科学院科技创新工程专项经费(编号:CAAS-ASTIP-2015-RIP-04-07);河南省科技攻关项目(编号:142102110075);公益性行业(农业)科研专项经费(编号:nyhyzx 201203075-05)。

作者简介:孙晓文(1989—),男,山东烟台人,硕士,研究方向为果树栽培。E-mail: 992826973@qq.com。

通信作者:郭景南,硕士,研究员,研究方向为果树栽培。E-mail: guojinnan@sina.com。

生抗病作用。与正常野生型相比,不能积累 JA 的突变型拟南芥极易感染由根部真菌病原物甘蓝腐霉菌引起的根腐病^[12]。低浓度的 MeJA 能够提高野生稻的抗病性,MeJA 施入后能迅速提高野生稻植株中超氧化物歧化酶(SOD)活性,显著增加叶片内香草酸和咖啡酸的含量,从而提高普通野生稻对稻瘟病的抵御能力^[13]。

2.2.2 增强植物抗虫能力 JAs 经由硬脂酸途径或直接激活防御基因,促使代谢途径重新配制,进而通过促进植物体内有毒物质积累、延迟害虫幼化时间或诱导植物释放挥发性有机物吸引害虫天敌等措施,提高植物体对害虫的抵御能力^[14]。番茄植株中 JA 通过诱导十八烷基醇信号传递途径产生毒素、氧化酶及蛋白酶抑制物,从而对草食昆虫产生抗性^[15]。MeJA 能够促使烟草产生诸如昆虫信息素等挥发性有机化合物,通过吸引烟草天蛾的天敌淡色大眼长蜡来捕食植株上天蛾卵块,从而达到控制虫害的目的^[16]。

2.2.3 提高植物抗旱能力 外源施用 JAs 可以提高作物对于干旱胁迫的抵御能力。以 0.01 mg/L 的二氢茉莉酸丙酯(propyl dihydrojasmonate,简称 PDJ)浸种处理花生种子 12 h, 28 °C 下催芽 24 h,长出第 2 张复叶后进行干旱处理,结果表明,经 PDJ 处理后可促进花生叶片中可溶性糖、脯氨酸的积累,维持叶片较高的含水量,提高干旱胁迫下叶片中过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶活性,缓解膜系统的伤害,提高花生对干旱胁迫的抵御能力^[17]。干旱胁迫下,以二氢茉莉酸甲酯(methyl dihydrojasmonate,简称 MDJ)处理高羊茅幼苗,可以提高叶片的相对含水量,增强抗氧化酶活性,降低叶片电解质渗透率,提高幼苗的抗旱能力^[18]。外源 JA 能够提高干旱条件下生长的梨树叶片中渗透调节物质甜菜碱的含量,进而提高梨树抗旱性^[19]。

2.3 茉莉酸类物质对植物生长发育的影响

2.3.1 促进细胞膨大,加速细胞分裂 JA 有利于细胞中蔗糖的积累,促使微管、微丝增粗,从而促进细胞膨大。在含有 JA 浓度为 3×10^{-5} mol/L 的培养基中培养马铃薯块茎,1 d 后,块茎明显膨大;5 d 后,鲜质量增加 1 倍^[20]。0.01 ~ 1 μ mol/L JA 能够促进马铃薯组培苗叶片的细胞分裂^[21]。以先锋葡萄为试材,在盛花期后 18 ~ 28 d 内,经 JA 处理可以诱导愈伤组织的形成,表明外源 JA 可以促进葡萄果实的细胞分裂^[22]。

2.3.2 调节种子的萌发 JAs 影响植物种子的萌发。低浓度的 JAs 促进种子萌发,高浓度的 JAs 抑制种子萌发。0.1 ~ 1.0 mmol/L 的 JA 能够促进毛薯萌芽,而 30 ~ 100 mmol/L 的 JA 对毛薯的萌发产生抑制作用^[23]。低浓度的 MeJA 能显著提高种子中可溶性糖的含量,增强 α -淀粉酶的活性,从而加快种子的萌发。一定浓度的 MeJA 会缩短烟草种子的萌发时间,促进玉米种子的萌发和生长^[24]。此外,JA 及 MeJA 促进休眠种子的萌发,却抑制非休眠种子的萌发。

2.3.3 调节植物开花 JAs 在植物有性生殖中发挥着重要作用。JAs 可以诱导颖花开放,在水稻、高粱、小麦等作物中已得到证实^[25]。花的发育与 JAs 的生物合成及信号传导密切相关。花粉发育、花丝延伸以及花药开裂均受到 JAs 调控^[26]。受 JA 生物合成影响的拟南芥突变体(如 dad1, dde2-2)以及在 JA 信号传导过程中的突变体(如 coi1)为花的表型

在发育过程中对 JA 的依赖提供了充足证据。这些突变体因花粉发育延迟或花药开裂不完全导致雄性不育^[27]。拟南芥雄性不育突变体 dad1 在植物体内茉莉酸含量较低,花丝伸长受到抑制,花药不能正常开裂,施用外源 JA 后,该突变体恢复正常^[28]。

3 茉莉酸类物质在园艺作物上的应用

3.1 改善果实色泽

近年来研究人员发现,茉莉酸类物质在果蔬组织色泽形成方面具有重要作用。呼吸跃变前用 MeJA 处理,能够促进苹果果实中乙烯及酯类物质的生物合成,提高花色苷、 β -胡萝卜素含量,促进叶绿素降解,改善果实色泽。盛花后 169 d,经 10 mmol/L MeJA 处理苹果品种粉红佳人,采收时果皮中花色苷含量提高 4.6 倍,果实着色度提高 2.2 倍^[29]。在非呼吸跃变果实中,采前用 MeJA 对山莓果实处理后,蔗糖、葡萄糖及花色苷含量显著增加,果实色泽得以改善^[30]。葡萄采收后用 MeJA 处理,能够显著提高葡萄果实中花色苷、多酚类化合物含量,增强果实抗氧化能力,改善果实色泽^[31]。研究人员对模式植物拟南芥以及萝卜幼苗的研究发现,MeJA 可以通过上调苯丙氨酸途径中二氢黄酮醇还原酶(dihydroflavonol 4-reductase,简称 DFR)、无色花色素双加氧酶(leucoanthocyanidin dioxygenase,简称 LDOX)、类黄酮糖基转移酶(UDPglucose-flavonoid 3-O-glucosyl-transferase,简称 UFGT)等基因的表达促进花色苷生物合成,进而对色泽产生影响^[32-33]。

3.2 提高园艺作物香气品质

外源 MeJA 处理草莓,能够提高果实中影响香气的重要挥发性成分含量,从而提高草莓香气,改善果实品质^[34];以外源 MeJA 诱导甜罗勒,其中重要芳香物质丁子香酚与芳樟醇含量较对照增加了 50% 左右^[35];此外,以 MeJA 处理茶树,采制的成品绿茶、红茶及乌龙茶中萜烯类、己烯酯类等香气组分的相对含量均有所提高,促进了茶叶香气品质的提升^[36]。

3.3 改善果实品质

采前用 MeJA 处理黑彩李与皇家罗莎李后,果实体积、质量均有增加,总酚含量与抗氧化活性均升高,果实品质得到改善^[37];10 μ mol/L MeJA 熏蒸处理葡萄,通过诱导葡萄果实苯丙烷类代谢酶——苯丙氨酸裂解酶、肉桂酸-4-羟化酶(cinnamate-4-hydroxylase,简称 C4H)和查尔酮合酶活性的上升,延缓 4-香豆酰 CoA 连接酶(4-coumarate:CoA ligase,简称 4CL)活性的下降,从而促进果实中酚酸的积累,最终提升葡萄果实营养品质^[38]。采前用 MeJA 处理山莓和黑莓,果实中总酚、花色苷含量升高、抗氧化活性增强,而且经 MeJA 处理后还增强了黑莓提取物在抑制癌细胞增殖、诱导癌细胞凋亡方面的作用效果^[39]。研究发现,采后以 MeJA 处理枇杷、石榴均能显著提高果实中次生代谢产物总酚、类黄酮含量,改善果实营养品质^[40-41]。此外,经 MeJA 处理后还可以提高葡萄果实中白藜芦醇含量,促进水果、蔬菜中番茄红素与维生素 E 等脂溶性化学成分的合成,改善园艺作物品质^[42]。

3.4 降低果实冷害,抑制真菌发展

低温贮藏是延缓园艺作物采后成熟、抑制病原菌发展及保持果实品质最常用的方法,然而一些亚热带、热带园艺产品对低温十分敏感,贮藏温度过低,容易造成冷害,从而影响果

实品质及商业价值。以 10 $\mu\text{mol/L}$ MeJA 蒸汽处理芒果 20 h, 可以缓解果实冷害, 抑制真菌发展, 减少腐烂与鲜质量损失, 改善果实色泽, 而且不会对果实品质产生不良影响^[43]; MeJA 通过调控葡萄果实中苯丙烷类代谢相关酶系的活性, 从而有效诱导果实中酚酸的合成, 明显降低葡萄冷藏期间果实的褐变指数、腐烂率以及落粒率, 保持果实感官品质^[44]。研究发现, 采前以 0.2 mmol/L MeJA 处理甜樱桃, 能显著降低褐腐病的发病率以及减轻发病程度^[45]; 以 MeJA 采后处理草莓、葡萄柚, 能有效抑制草莓中由灰霉菌引起的灰霉病, 以及减少葡萄柚中由青霉菌引起的腐烂; MeJA 能延长新鲜采收的芹菜与辣椒的货架期, 减少细菌侵染^[46]。低温胁迫会增加植株体内活性氧含量, 降低体内自由基的清除水平, 从而对植株产生伤害^[47], 而外源 MeJA 处理可有效提高枇杷、桃等果实中过氧化氢酶、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶等活性氧代谢酶活性, 减缓细胞膜脂过氧化进程, 从而控制果实采后衰老及冷害症状的发展^[48-49]。

4 茉莉酸类物质的应用方法

4.1 茉莉酸类物质的应用形式及浓度效应

JAs 以多种形式应用于植物。密闭环境中, JAs 以气态形式应用于植物体, 也可以以溶液的形式应用到水培试验中, 或以雾剂的形式喷洒到植物体上。研究发现, 微量的 JAs 可在代谢过程中发挥重要作用, JAs 与其他植物激素类似, 具有显著的浓度效应, 在不同浓度下, JAs 分别起诱导、促进或抑制作用。此外, 不同作物、同种作物的不同组织、器官对 JAs 的敏感程度亦不同, JAs 的施用时期也会对作用效果产生重要影响。因此, 在应用 JAs 之前, 必须通过试验确定适宜的浓度、时期, 然后进行应用。

4.2 茉莉酸类物质与其他试剂的复合应用

长效油菜素内酯(TS303)和二氢茉莉酸丙酯协同作用, 可以增加大豆光合叶面积, 提高净光合速率, 增强大豆光合能力^[50]; 不同浓度组合的香草醛与二氢茉莉酸甲酯能够改善套袋富士苹果的果实品质, 增加果实风味, 促进果实着色^[51]; 用人工紫外光与茉莉酸甲酯共同处理富士苹果, 促进花色苷的生物合成以及 β -类胡萝卜素、叶绿素 b 的合成; 光照或 JA 处理悬浮培养的酿酒葡萄细胞, 花色苷的生物合成均会显著增强, 此外, 光照与 JA 在促进花色苷生物合成方面表现出协同作用; 钙与 MeJA 复合施用能够显著提高番茄对灰霉病的抵御能力, 外源钙通过促进 MeJA 诱导番茄抗氧化酶活性的提高, 激活番茄抗灰霉病的防御途径, 降低番茄灰霉病发病指数^[52]。

5 总结与展望

JAs 作为一种新型植物生长调节物质, 不仅在植物防御病虫害干扰及伤害中具有积极作用, 而且在植物生长发育过程中也发挥着重要作用。此外, JA 及其衍生物, 作为天然植物成分, 具有对人体无毒、环境友好以及应用浓度低等特点, 因此应用前景十分广阔。现阶段研究成果表明, 茉莉酸类物质主要是以信号分子的形式调控相关基因、蛋白质表达以及影响关键酶活性等途径对植物生长发育及抗逆性进行调控, 此外茉莉酸类物质在作用过程中与其他植物激素如脱落酸

(ABA)、水杨酸(SA)、乙烯等联系密切, 它们既协同作用又相互独立, 然而作为信号分子的调控网络、具体作用机制以及与其他植物激素之间的具体联系尚不明确, 有待于进一步研究、探讨, 以便更好地应用茉莉酸类物质服务于园艺作物生产。

参考文献:

- [1] Demole E, Lederer E, Mercier D. Isolement et détermination de la structure du jasmonate de méthyle, constituant odorant caractéristique de l'essence de jasmin[J]. Helvetica Chimica Acta, 1962, 45(2): 675-685.
- [2] Aldridge D C, Galt S, Giles D, et al. Metabolites of *Lasiodiplodia theobromae*[J]. Journal of the Chemical Society C Organic, 1971, 29(9): 1623-1627.
- [3] Wasternack C. Jasmonates: an update on biosynthesis, signal transduction and action in plant stress response, growth and development[J]. Annals of Botany, 2007, 100(4): 681-697.
- [4] 董桃杏, 蔡昆争, 张景欣, 等. 茉莉酸甲酯(MeJA)对水稻幼苗的抗旱生理效应[J]. 生态环境学报, 2007, 16(4): 1261-1265.
- [5] Farmer E E, Weber H, Vollenweider S. Fatty acid signaling in *Arabidopsis*[J]. Planta, 1998, 206(2): 167-174.
- [6] Seo H S, Song J T, Cheong J J, et al. Jasmonic acid carboxyl methyltransferase: a key enzyme for jasmonate-regulated plant responses[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2001, 98(8): 4788-4793.
- [7] Knofel H D, Brückner C, Kramell R, et al. Radioimmunoassay for the natural plant growth regulator (-)-jasmonic acid[J]. Biochemie und Physiologie der Pflanzen, 1990, 186(5/6): 387-394.
- [8] 王芳, 陈子林. 茉莉酸类植物激素分析研究进展[J]. 生命科学, 2010, 22(1): 45-58.
- [9] Kondo S. The roles of jasmonates in fruit color development and chilling injury[J]. Acta Horticulturae, 2006, 727(727): 45-56.
- [10] Mur L A J, Kenton P, Atzorn R, et al. The outcomes of concentration-specific interactions between salicylate and jasmonate signaling include synergy, antagonism, and oxidative stress leading to cell death[J]. Plant Physiology, 2006, 140(1): 249-262.
- [11] 王瑜, 吴丽芳, 余增亮. 茉莉酸及其甲酯在植物诱导抗病性中的作用[J]. 生物学杂志, 2000, 17(1): 11-12.
- [12] Vijayan P, Shockey J, André Lévesque C, et al. A role for jasmonate in pathogen defense of *Arabidopsis*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1998, 95(12): 7209-7214.
- [13] 吴国昭, 谢丽君, 宋圆圆, 等. 外源信号物质诱导广东高州普通野生稻抗稻瘟病的生理生化机理[J]. 西北农业学报, 2009, 18(3): 254-258.
- [14] Baldwin I T, Preston C A. The eco-physiological complexity of plant responses to insect herbivores[J]. Planta, 1999, 208(2): 137-145.
- [15] Thaler J S. Jasmonate-inducible plant defences cause increased parasitism of herbivores[J]. Nature, 1999, 399(6737): 686-688.
- [16] Kessler A, Halitschke R, Baldwin I T. Silencing the jasmonate cascade: induced plant defenses and insect populations[J]. Science, 2004, 305(5684): 665-668.
- [17] 董登峰, 江立庚, 聂呈荣. TS303 和 PDJ 对花生幼苗抗旱能力的影响[J]. 花生学报, 2002, 31(3): 29-32.

- [18] 钱云妹, 朱昌华, 夏凯, 等. 二氢茉莉酮酸甲酯对高羊茅幼苗生长及抗旱性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(3): 47–51.
- [19] Gao X P, Pan Q H, Li M J, et al. Absciscic acid is involved in the waterstress – induced betaine accumulation in pear leaves[J]. Plant and Cell Physiology, 2004, 27(6): 497–507.
- [20] Takahashi K, Fujino K, Kikuta Y, et al. Expansion of potato cells in response to jasmonic acid[J]. Plant Science, 1994, 100(1): 3–8.
- [21] Ravnikar M, Vilhar B, Gogala N. Stimulatory effects of jasmonic acid on potato stem node and protoplast culture[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 1992, 11(1): 29–33.
- [22] Kondo S, Fukuda K. Changes of jasmonates in grape berries and their possible roles in fruit development[J]. Scientia Horticulturae, 2001, 91(3/4): 275–288.
- [23] Ranjan R, Miersch O, Sembdner G, et al. Presence and role of jasmonate in apple embryos[J]. Physiologia Plantarum, 1994, 90(3): 548–552.
- [24] 汪宝卿, 李召虎, 段留生, 等. 冠菌素和茉莉酸甲酯对玉米种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 现代农业科技, 2008(12): 163–164.
- [25] 李清清, 李大鹏, 李德全. 茉莉酸和茉莉酸甲酯生物合成及其调控机制[J]. 生物技术通报, 2010, (1): 53–57.
- [26] Sanders P M, Lee P Y, Biesgen C, et al. The *arabidopsis* delayed dehiscence1 gene encodes an enzyme in the jasmonic acid synthesis pathway[J]. The Plant Cell, 2000, 12(7): 1041–1061.
- [27] Turner J G, Ellis C, Devoto A. The jasmonate signal pathway[J]. The Plant Cell, 2002, 14(S1): 153–164.
- [28] Muruais G, Lalioti V, Sandoval I V. The Cdk5 inhibitor roscovitine strongly inhibits glucose uptake in 3T3 – L1 adipocytes without altering GLUT4 translocation from internal pools to the cell surface[J]. Journal of cellular physiology, 2009, 220(1): 238–244.
- [29] Shafiq M, Singh Z, Khan A S. Time of methyl jasmonate application influences the development of ‘Cripps Pink’ apple fruit colour[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(3): 611–618.
- [30] Wang S Y, Zheng W. Preharvest application of methyl jasmonate increases fruit quality and antioxidant capacity in raspberries[J]. Journal of Food Science Technology, 2005, 40(2): 187–195.
- [31] Flores G, Blanch G P, Castillo M L R D. Postharvest treatment with (–) and (+) – methyl jasmonate stimulates anthocyanin accumulation in grapes[J]. LWT – Food Science and Technology, 2015, 62(1): 807–812.
- [32] Shan X, Zhang Y, Peng W, et al. Molecular mechanism for jasmonate – induction of anthocyanin accumulation in *Arabidopsis*[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(13): 3849–3860.
- [33] 李丽, 董银卯, 姚霞. 茉莉酸甲酯对植物酚类成分代谢影响研究进展[J]. 中药材, 2014, 37(11): 2109–2112.
- [34] Ayala – Zavala J F, Wang S Y, Wang C Y, et al. Methyl jasmonate in conjunction with ethanol treatment increases antioxidant capacity, volatile compounds and postharvest life of strawberry fruit[J]. European Food Research and Technology, 2005, 221(6): 731–738.
- [35] Kim H J, Chen F, Wang X, et al. Effect of methyl jasmonate on secondary metabolites of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(6): 2327–2332.
- [36] 王力. 外源茉莉酸甲酯对茶叶香气影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [37] Martínez – Esplá A, Zapata P J, Castillo S, et al. Preharvest application of methyl jasmonate (MeJA) in two plum cultivars. 1. Improvement of fruit growth and quality attributes at harvest[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 98(3): 98–105.
- [38] 汪开拓, 郑永华, 唐文才, 等. 茉莉酸甲酯处理对采后葡萄果实酚酸合成和抗氧化活性的影响及其机理研究[J]. 食品科学, 2013, 34(6): 260–265.
- [39] Wang S Y, Bowman L, Ding M. Methyl jasmonate enhances antioxidant activity and flavonoid content in blackberries (*Rubus* sp.) and promotes antiproliferation of human cancer cells[J]. Gynecologic Oncology, 2008, 107(3): 1261–1269.
- [40] Cao S F, Zheng Y H, Yang Z F, et al. Effect of methyl jasmonate on quality and antioxidant activity of postharvest loquat fruit[J]. Journal of the Science of Food Agriculture 2009, 89(12): 2064–2070.
- [41] Sayyari M, Babalar M, Kalantari S, et al. Vapour treatments with methyl salicylate or methyl jasmonate alleviated chilling injury and enhanced antioxidant potential during postharvest storage of pomegranates[J]. Food Chemistry, 2011, 124(3): 964–970.
- [42] Wasternack C. Jasmonates: an update on biosynthesis, signal transduction and action in plant stress response, growth and development[J]. Annals of Botany, 2007, 100(4): 681–697.
- [43] González – Aguilar G A, Buta J G, Wang C Y. Methyl jasmonate reduces chilling injury symptoms and enhances color development of ‘Kent’ mangoes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2001, 81(13): 1244–1249.
- [44] 汪开拓, 郑永华. 茉莉酸甲酯处理对采后葡萄离区膜脂过氧化及果实落粒的影响[J]. 食品科技, 2012, 37(8): 42–47.
- [45] Yao H, Tian S. 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 Biology and Technology, 2005, 35(3): 253–262.
- [46] Buta J G, Moline H E. Methyl jasmonate extends shelf life and reduces microbial contamination of fresh – cut celery and peppers[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(4): 1253–1256.
- [47] 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.
- [48] Cao S F, Zheng Y H, Yang Z F, et al. Effect of methyl jasmonate on quality and antioxidant activity of postharvest loquat fruit[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(12): 2064–2070.
- [49] Jin P, Zheng Y H, Tang S S, et al. Enhancing disease resistance in peach fruit with methyl jasmonate[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(5): 802–808.
- [50] 董登峰, 李杨瑞, 江立庚. 长效油菜素内酯 TS303 和二氢茉莉酸丙酯协同提高大豆光合能力[J]. 植物研究, 2008, 28(6): 751–756.
- [51] 刘玲玲, 翟丙年, 李展飞. 二氢茉莉酸甲酯和香草醛不同浓度组合对“富士”苹果内在品质的影响[J]. 北方园艺, 2013(16): 21–24.
- [52] 李天来, 张亢亢, 余朝阁, 等. 外源钙和茉莉酸甲酯诱导番茄植株抗灰霉病研究[J]. 西北植物学报, 2012, 32(3): 505–510.