



振动对三角梅苞片脱落和乙烯合成的影响

马文, 吴榕榕, 孙宇晨, 蔡净蓉, 郭志雄, 余文琴

引用本文:

马文, 吴榕榕, 孙宇晨, 蔡净蓉, 郭志雄, 余文琴. 振动对三角梅苞片脱落和乙烯合成的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(3): 378–386.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4752>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三角梅*cDOPA 5GT*基因的克隆和光照对其表达的影响

Cloning of Cyclo-DOPA-5-glucosyltransferase Gene from *Bougainvillea glabra* and Effect of Illumination on Its Expression
热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 75–81 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4233>

盐度、温度和光照强度对针叶蕨藻的生长及光合活性的影响

Effects of Salinity, Temperature and Light Intensity on Growth and Photo-synthetic Activity of *Caulerpa sertularioides*
热带亚热带植物学报. 2021, 29(6): 626–633 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4378>

马尾松*PmPGK1*和*PmGPIC*基因的克隆和表达分析

Cloning and Expression Analysis on *PmPGK1* and *PmGPIC* Genes in *Pinus massoniana*
热带亚热带植物学报. 2021, 29(4): 339–348 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4315>

红苞凤梨实时荧光定量PCR分析中内参基因的筛选

Screening of Reference Genes in *Ananas comosus* var. *bracteatus* for qRT-PCR
热带亚热带植物学报. 2017, 25(3): 250–256 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3659>

高温胁迫对‘黄冠’、‘翠玉’梨耐热生理指标及相关基因表达的影响

Effects of High Temperature Stress on Heat Resistance and Related Genes Expression of Pear Trees
热带亚热带植物学报. 2017, 25(1): 43–50 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3616>

向下翻页，浏览PDF全文

振动对三角梅苞片脱落和乙烯合成的影响

马文, 吴榕榕, 孙宇晨, 蔡净蓉, 郭志雄, 余文琴*

(福建农林大学园艺学院, 园艺产品贮藏保鲜研究所, 福州 350002)

摘要: 为探究振动对盆栽三角梅苞片脱落和乙烯生成的影响, 对盆栽‘马尼拉小姐’三角梅(*Bougainvillea × buttiana* ‘Miss Manila’) 在振动、密闭环境和振动+密闭环境下苞片的脱落率及处理后 4~24 h 的乙烯合成相关指标进行测定。结果表明, 振动+密闭环境和振动处理后 7 d 三角梅苞片脱落率显著高于对照(无处理), 苞径长 0.5~1.4 cm 的苞片(S1)和苞径长 1.5~2.4 cm 的苞片(S2)的乙烯释放量、1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)含量、ACC 合成酶(ACS)和 ACC 氧化酶(ACO)活性均显著高于对照, 随着处理后时间的延长, 总体呈先上升后下降的变化趋势。苞片 S1 和 S2 的 *BsSAMS*、*BsACS* 和 *BsACO* 基因相对表达量显著上升, 与 ACS 活性和 ACO 活性的变化一致, 总体呈先上升后下降的变化趋势。因此, 盆栽三角梅在受到振动后苞片的脱落率、乙烯生成、乙烯生物合成关键酶活性、乙烯合成酶基因 *BsSAMS*、*BsACS*、*BsACO* 的相对表达量均显著上升, 且密闭环境对振动的效应具有促进作用。

关键词: 三角梅; 振动处理; 乙烯合成; 基因表达

doi: 10.11926/jtsb.4752

Effects of Vibration on Shedding and Ethylene Synthesis in *Bougainvillea glabra* Bracts

MA Wen, WU Rongrong, SUN Yuchen, CAI Jingrong, GUO Zhixiong, SHE Wenqin*

(College of Horticulture, Institute of Postharvest Science and Technology of Horticultural Products, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In order to investigate the effects of vibration on shedding and ethylene biosynthesis of potted *Bougainvillea glabra*, the shedding rate of bracts of potted *Bougainvillea × buttiana* ‘Miss Manila’ under vibration, closed environment and vibration+closed environment, and the related indexes of ethylene synthesis were measured for 4–24 h after treatment. The results showed that the shedding rate of bracts was significantly higher than that of the control within 7 days after vibration+closed environment and vibration treatments, and the ethylene release, 1-amino-cyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) content, ACC synthase (ACS) and ACC oxidase (ACO) activities in bracts of bracteoles 0.5–1.4 cm long (S1) and 1.5–2.4 cm long (S2) were significantly higher than those of the control, which overall trends were first increased and then decreased. The relative expression of *BsSAMS*, *BsACS*, *BsACO* genes in S1 and S2 increased significantly, and which change trends were consistent with those of ACS and ACO activities. Therefore, shedding rate of bracts, ethylene content, key enzyme activities of ethylene biosynthesis, the expression of ethylene synthesis genes *BsSAMS*, *BsACS*, *BsACO* of potted ‘Miss Manila’ all increased significantly after vibration, and the closed environment could promote the effect of vibration.

Key words: *Bougainvillea glabra*; Vibration; Ethylene biosynthesis; Gene expression

收稿日期: 2022-11-15 接受日期: 2023-03-31

基金项目: 福建省水仙花品种选育工程技术研究中心项目资助

This work was supported by the Project of Daffodil Variety Breeding Engineering Technology Research Center of Fujian Province.

作者简介: 马文(1995年生), 男, 硕士, 研究方向为花卉生理生化与生态。E-mail: 1679875585@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wenqinshe@163.com

三角梅(*Bougainvillea glabra*)是我国南方重要的优良观赏花卉,三角梅盆花在远距离运输过程中存在大面积落苞的问题,严重影响三角梅的销售、观赏品质和商品价值,因此改善三角梅在运输期间落苞现象成为生产上亟待解决的问题。车辆运输过程中的振动会导致植物受到机械损伤,进而生成乙烯。研究振动与三角梅苞片乙烯合成以及苞片脱落的关系对改善落苞现象和提高商品价值具有重要的理论和实践意义。

乙烯是抵御外界逆境胁迫的植物激素之一^[1],植物在受到逆境胁迫如振动、冲击等时产生的乙烯被称为“伤乙烯”,“伤乙烯”遵循正常乙烯生成途径^[2]。前人研究表明,植物在振动处理后,乙烯生物合成加快,乙烯生成量显著增加。玫瑰花(*Rosa rugosa*)在模拟运输振动下乙烯释放量上升,加速凋谢,缩短瓶插寿命^[3]。‘赛买提’杏(*Prunus armeniaca*)在模拟运输过程中随着振动时间的延长,乙烯生成量呈极显著上升趋势,果实品质下降^[4]。猕猴桃(*Actinidia chinensis*)在模拟运输振动后,乙烯释放量升高,可滴定酸含量、抗坏血酸含量下降^[5]。振动可明显增加苹果(*Malus pumila*)果实的乙烯产量、呼吸频率、MDA含量,从而缩短了货架期,降低了苹果果实的商业品质^[6]。乙烯参与叶片与花的脱落、组织器官衰老、果实成熟等生理过程的调控,并且对生物和非生物胁迫的应对有重要作用^[7]。前人对三角梅乙烯代谢的研究集中在衰老过程和黑暗环境下苞片乙烯释放量的初步分析^[8-9]。针对三角梅苞叶在贮运期间脱落的问题,洪燕红等^[10]对模拟贮运期间的三角梅采用荧光灯补光处理,探讨补光对贮运期间三角梅叶片脱落的影响;陈毅勇等^[11]筛选出口盆栽三角梅最佳无土栽培基质,降低落花落叶率。

三角梅是乙烯敏感植物,苞片的脱落与乙烯相关,但盆栽三角梅在运输振动过程中乙烯生成以及乙烯对苞片脱落的影响机制未明。本研究以盆栽三角梅‘马尼拉小姐’(*Bougainvillea × buttiana* ‘Miss Manila’)为试验材料,测定振动下三角梅苞片的脱落率、乙烯释放量、ACC含量、乙烯合成关键酶活性的动态变化,以及不同发育苞片乙烯生物合成酶基因相对表达量的动态变化,探讨振动对三角梅苞片乙烯生物合成的影响,为盆栽三角梅在运输期间苞片脱落机理和调控的研究提供理论基础,促进三角梅的产业发展。

1 材料和方法

1.1 材料和处理

试验于2020—2021年在福建农林大学进行,选取生长健壮,无病虫害,长势、花期、花量、生长状况等一致、株高为60~70 cm的2 a生盆栽‘马尼拉小姐’三角梅(*Bougainvillea × buttiana* ‘Miss Manila’)植株,共设置3个处理:振动+密闭环境处理(Z+M):用黑色塑料袋密封包裹植株放在摇床振动,转速为140 r/min,振动时间为1 h;振动处理(Z):植株放在摇床振动,转速为140 r/min,振动时间为1 h;密闭环境处理(M):用黑色塑料袋密封包裹植株。以正常生长植株作为对照。于处理后4、8、12、16、20、24 h各取样1次,共6次。试验设3个生物学重复,每个重复6盆。

参考刘芳吟^[12]的方法将植株苞片按发育时期分成3种类型进行取样,分别为苞径长为0.5~1.4 cm (S1)、苞径长1.5~2.4 cm (S2)和苞径长2.5 cm及以上(S3)(图1)。在三角梅植株东、西、南、北方位取大小适中、均匀一致,无病虫、无损伤的苞片,部分鲜样用于测定乙烯释放量,用于提取RNA的苞片样品用液氮速冻后置于-80℃冰箱保存,其余样品置于-40℃冰箱保存备用。



图1 三角梅3种类型的苞片

Fig. 1 Three types of bracts of *Bougainvillea*

1.2 苞片脱落率的测定

处理后每隔1 d统计三角梅盆栽S1、S2和S3苞片脱落的情况,共统计7次。苞片脱落率(%)= $N_n/N_1 \times 100\%$,式中, N_1 为处理前每盆三角梅总苞片数, N_n 为处理后每盆三角梅脱落的苞片数。

1.3 乙烯释放量的测定

取处理后的S1、S2和S3苞片各10朵,分别放入样品室,采用ETD-300乙烯测定仪(Sensor Sense公司)乙烯气体监测系统的积累测定模式,测定乙烯

的释放量, 重复 3 次。

1.4 ACC 含量的测定

参考王瑶等^[13]的方法, 并进行适当改进。取存放于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的三角梅苞片样品, 在研钵中加液氮研磨成粉末, 称取 1 g 粉末放入 10 mL 离心管中, 再加入 4 mL 0.2 mmol/L 的三氯乙酸, 置于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中静提 12 h, 在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $13\ 201\times g$ 下离心 40 min, 吸取上清液于 10 mL 离心管, 置于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中备用。取 1 mL 上清液于青霉素瓶中, 然后再加入 0.4 mL 5% NaClO-饱和 NaOH (2:1, *V/V*) 的混合液, 置于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱静置 2 h 后, 剧烈震荡 5 s, 静置 5 min 后用注射器吸取 2 mL 的气体至气体采样袋中, 后用 ETD-300 乙烯测定仪测定乙烯的含量, 重复 3 次。

1.5 ACS 活性的测定

采用酶联免疫吸附法(Elisa)试剂盒(晴百旺生物科技有限公司)测定 ACS 含量。

1.6 ACO 活性的测定

参考王瑶等^[13]和许文平等^[14]的方法, 并进行适当改进。取存放于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱的三角梅苞片样品, 在研钵中加液氮研磨成粉末, 称取 1 g 粉末放入 10 mL 离心管中, 加入 1.5 mL 浸提液[含 100 mmol/L、pH=7.5 的 Tris-HCl 缓冲液, 10%甘油(*V/V*), 30 mmol/L 抗坏血酸钠, 5% PVP, 0.1 mmol/L FeSO_4 , 5 mmol/L DTT], 摇匀后, 在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $13\ 201\times g$ 下离心 30 min; 取

0.8 mL 上清液到装有 1.8 mL 酶反应液[100 mmol/L、pH 7.5 的 Tris-HCl 缓冲液, 10%甘油(*V/V*), 30 mmol/L 抗坏血酸钠, 30 mmol/L NaHCO_3 , 1.0 mmol/L ACC, 0.1 mmol/L FeSO_4]的青霉素瓶中, 塞紧瓶盖后放在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水浴锅中水浴 20 min, 抽 2 mL 气体打入气体采样袋中, 后用 ETD-300 乙烯测定仪测定乙烯的含量, 重复 3 次。

1.7 苞片 RNA 的提取与定量分析

采用 CTAB 法^[15]提取苞片样品的 RNA。RNA 经 DNase 清除 DNA 后, 用反转录试剂盒 PrimeScriptTM RT reagent Kit with gDNA Eraser (Perfect Real Time) (宝日医生物技术(北京)有限公司)进行反转录, 按照嵌合荧光法检测试剂盒 2×RealStar Green Fast Mixture 说明书(福州康润生物科技有限公司)进行定量分析。定量 PCR 仪为 qTOWER3 荧光定量 PCR 仪(Jena)。参照三角梅转录组数据, 使用 Real-time PCR (TaqMan) Primer and Probes Design Tool 在线软件设计引物, 选择 *BsActin* 为内参基因, 设计 1 对引物, 所有引物委托上海生物工程有限公司合成(表 1)。采用 $2^{-\Delta\Delta C_T}$ 法^[16]计算待测基因相对表达量。

1.8 数据处理

应用 WPS 2020 进行数据处理和绘图, 应用 SPSS 20.0 软件进行数据的显著性和相关性分析, 以 Duncan's *t* 检验差异显著性, 以 $P<0.05$ 表示差异显著。

表 1 引物序列

Table 1 Primer sequences

基因 Gene	上游引物 Forward primer (5'-3')	下游引物 Reverse primer (5'-3')
<i>BsSAMs_q</i>	CGCAGATGCATCGTTCAGAT	GGATCTTCCCGGTTCCGTAT
<i>BsACS_q</i>	TTGTTACAACAGCGCGTAGG	GCTAGTTGGCTCGTCAAGTG
<i>BsACO_q</i>	GCACTACAGGAAGTGCATGG	TCGAGATCAGGGACTTCAGC
<i>BsAct_q</i>	TACGGCAACATTGTGCTCAG	TCCTTTCAGGTGGAGCAACA

2 结果和分析

2.1 振动对苞片脱落率的影响

从表 2 可见, 随处理后时间的延长, Z+M 处理的 S1 苞片脱落率呈先上升后下降的变化趋势, 在处理 5 d 苞片脱落率达到最高(6.27%), 显著高于 Z、M 和 CK ($P<0.05$), 处理 7 d 后 S1 苞片总脱落率为 22.56%。Z 处理的 S1 苞片脱落率呈先上升后下降的变化趋势, 处理后 6 d 达最高, 显著高于同期的 M 和 CK ($P<0.05$), 处理后 7 d 的苞片总脱落

率为 20.99%, 这说明振动会导致三角梅苞片脱落, 振动和密闭环境对苞片脱落起协同促进作用。

随处理后时间的延长, Z+M 处理的 S2 苞片脱落率呈先上升后下降的变化趋势, 处理后 5 d 苞片脱落率达最高, 显著高于 M 和 CK ($P<0.05$), 处理后 7 d S2 苞片的总脱落率为 25.22%。Z 处理的 S2 苞片脱落率呈先上升后下降的变化趋势, 处理后 6 d 达最高, 显著高于同期的 Z+M、M 和 CK ($P<0.05$), 处理后 7 d 苞片总脱落率为 19.35%, 表明振动会导致三角梅 S2 苞片的脱落。

表 2 振动对三角梅苞片脱落率(%)的影响

Table 2 Effect of vibration on shedding rate S1 bract of bougainvillea (%)

苞片 Bract	处理 Treatment	处理后时间 Time after treatment (d)						
		1	2	3	4	5	6	7
S1	Z+M	0	0.77±0.69a	4.06±0.76a	5.57±0.25a	6.27±0.81a	3.74±0.36a	2.16±0.79a
	Z	0	0.41±0.71a	3.31±0.38a	3.68±0.73b	4.75±0.30b	5.85±0.34b	2.99±0.91a
	M	0	0a	0b	0c	0c	0c	0b
	CK	0	0a	0b	0c	0c	0c	0b
S2	Z+M	0	0.37±0.64a	2.28±0.37a	7.12±3.92a	9.03±4.24a	4.23±1.22b	2.20±1.03a
	Z	0	0.33±0.57a	2.21±0.25a	3.64±0.32ab	5.16±0.92a	6.22±1.60a	1.80±0.50ab
	M	0	0a	0b	0.33±0.57b	0b	0.35±0.61c	0.67±0.58bc
	CK	0	0a	0b	0b	0b	0c	0.37±0.65c
S3	Z+M	0	0	1.83±0.45a	4.55±0.73a	4.63±1.79a	2.92±0.86a	4.75±2.82a
	Z	0	0	1.80±0.50a	1.84±0.69b	2.54±0.38b	2.21±0.25ab	1.52±0.83b
	M	0	0	0.33±0.57b	1.36±0.59b	1.71±0.60b	1.36±0.59b	2.07±1.10ab
	CK	0	0	0b	0c	1.38±0.56b	1.37±0.53b	1.71±0.51ab

Z: 振动; M: 密闭环境; CK: 对照; 同列数据后不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同

Z: Vibration; M: Closed environment; CK: Control. Different letters within column indicate significant differences 0.05 level. The same below

随处理后时间的延长, Z+M 处理的 S3 苞片脱落率呈先上升后下降再上升的变化趋势, 处理后 7 d 苞片脱落率达最高, S3 苞片总脱落率为 18.69%。Z 处理的 S3 苞片脱落率呈先上升后下降的变化趋势, 处理后 5 d 达最高, 处理后 7 d 的 S3 苞片总脱落率为 9.9%。

2.2 振动对苞片乙烯释放量的影响

Z 处理后 S1 和 S2 苞片的乙烯释放量明显上升(图 2)。随处理后时间的推移, Z+M 处理的 S1 和 S2 苞片的乙烯释放量呈先上升后下降的趋势, 均在处理后 16 h 达最高, 分别比同期 CK 高 10.75、2.89 nL/(h·g), 处理后 8~24 h 的乙烯释放量显著高于其他处理(P<0.05)。Z 处理的 S1 和 S2 苞片的乙烯释放量呈先上升后下降的趋势, 均在处理后 12 h 急剧上升至最高, 分别比 CK 高 5.21、2.24 nL/(h·g), 且处理后 8~24 h 的乙烯释放量显著高于 M 和 CK (P<0.05)。

处理后的 4~24 h, S1 和 S2 苞片的乙烯释放量总体表现为 Z+M>Z>M>CK。而 S3 苞片的乙烯释放量在处理间无显著差异, 处理后 4~24 h 也无明显变化趋势。

2.3 振动对苞片 ACC 含量的影响

从图 3 可见, Z+M 处理后的 S1 和 S2 苞片的 ACC 含量显著高于其他处理(P<0.05), 随处理后时间的延长, S1 苞片的 ACC 含量呈先上升后下降的变化趋势, 处理后 20 h 达最高(6.24 nmol/g), 是对照的 2.14 倍; S2 苞片的 ACC 含量呈现先上升后下降再上升的变化趋势, 处理后 24 h 升至最高(3.9 nmol/g)。Z 处理后 S1 和 S2 苞片的 ACC 含量显著高于 M 和 CK (P<0.05), 且随处理后时间延长呈先上升后下降的变化趋势, 处理后 16 h 升至最高。而 Z+M 处理的 S3 苞片的 ACC 含量显著高于 M 和 CK (P<0.05), 随着处理后时间的延长, Z+M 和 Z 处理的 S3 苞片

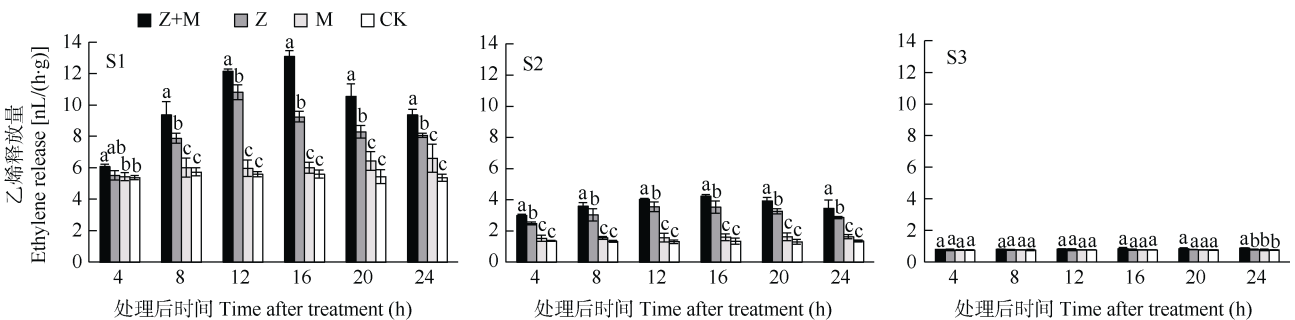


图 2 振动对三角梅苞片乙烯释放量的影响

Fig. 2 Effects of vibration on ethylene release from bracts of *Bougainvillea*

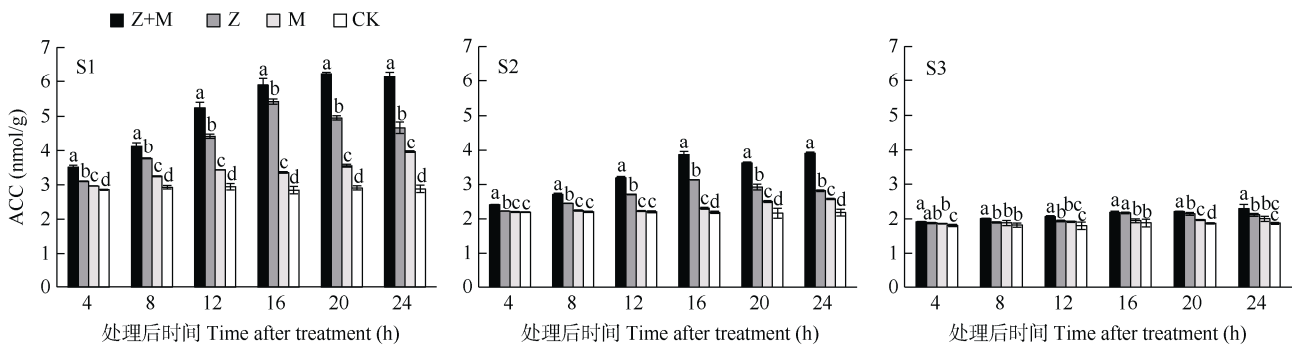


图3 振动对三角梅苞片 ACC 含量的影响

Fig. 3 Effects of vibration on ACC content in *Bougainvillea* bracts

的 ACC 含量呈上升趋势。

2.4 振动对苞片 ACS 活性的影响

从图 4 可见, Z+M 处理的 S1 和 S2 苞片 ACS 活性在处理后的 8~24 h 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 随处理后时间的延长, S1 苞片的 ACS 活性呈先上升后下降的变化趋势, 处理后 16 h 出现峰值(9.44 U/g), 是对照的 1.36 倍; S2 苞片则呈先上升-下降-上升-下降的变化趋势, 处理后 12 h 急剧升高至最高(6.84 U/g),

是对照的 1.24 倍; 而 S3 苞片在处理后的 16~24 h 显著高于 M 和 CK, 与 Z 处理无显著差异, 随处理后时间的延长, 苞片 S3 的 ACS 活性呈上升趋势。Z 处理的 S1 苞片 ACS 活性在处理后的 8~24 h 均显著高于 M 和 CK, S2 苞片显著高于 CK ($P<0.05$), 随处理后时间的延长, S1 和 S2 苞片的 ACS 活性呈先上升后下降的变化趋势, 均在处理后 12 h 急剧上升至最高, 而 S3 苞片则呈先上升后下降趋势。

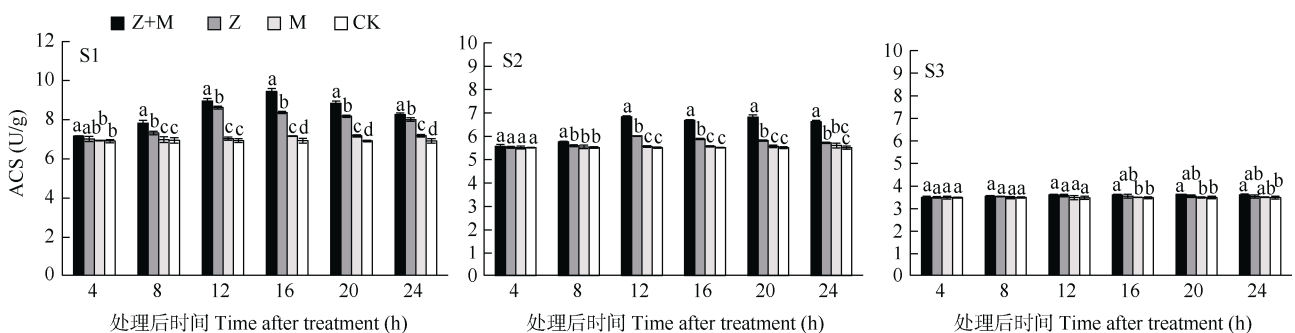


图4 振动对三角梅苞片 ACS 活性的影响

Fig. 4 Effects of vibration on ACS activity in *Bougainvillea* bracts

2.5 振动对苞片 ACO 活性的影响

从图 5 可见, 随着处理后时间的延长, Z+M 处理的 3 种苞片 ACO 活性均呈先上升后下降的变化趋势, 均于处理后 16 h 达峰值, 分别是 CK 的 1.91、1.54 和 1.13 倍; Z 处理的呈先上升后下降的变化趋势, 均在处理后 12 h 最高, 分别是 CK 的 1.5、1.25 和 1.07 倍。Z+M 处理的 3 种苞片 ACO 活性在处理后的 4~24 h 显著高于 M 和 CK ($P<0.05$); 而 Z 处理后的 8~24 h 显著高于 M 和 CK ($P<0.05$)。

2.6 振动处理对苞片乙烯合成酶基因表达的影响

Z+M 处理后 S1 和 S2 苞片的 *BsSAMS* 基因相对表达量明显上升, 随着处理后时间的延长, 其相

对表达量呈先上升后下降的变化趋势, 均于处理后 20 h 达最高, 分别是 CK 的 1.78 和 1.26 倍(图 6), 而 Z 处理后呈先上升后下降的变化趋势, S1 苞片在处理后的 16 h 达最高, S2 苞片的在处理后的 20 h 达最高。

随处理后时间的延长, Z+M 处理的 S1 和 S2 苞片的 *BsACS* 基因相对表达量的变化趋势存在差异, 苞片 S1 呈先上升后下降的变化趋势, 处理后的 4~24 h 显著高于 M 和 CK ($P<0.05$), 处理后 16 h 达最高, 是 CK 的 2.02 倍; 而 S2 苞片表现出先上升后下降再上升的变化趋势, 处理后 16~24 h 显著高于 M 和 CK ($P<0.05$), 处理后 20 h 达最高, 是 CK

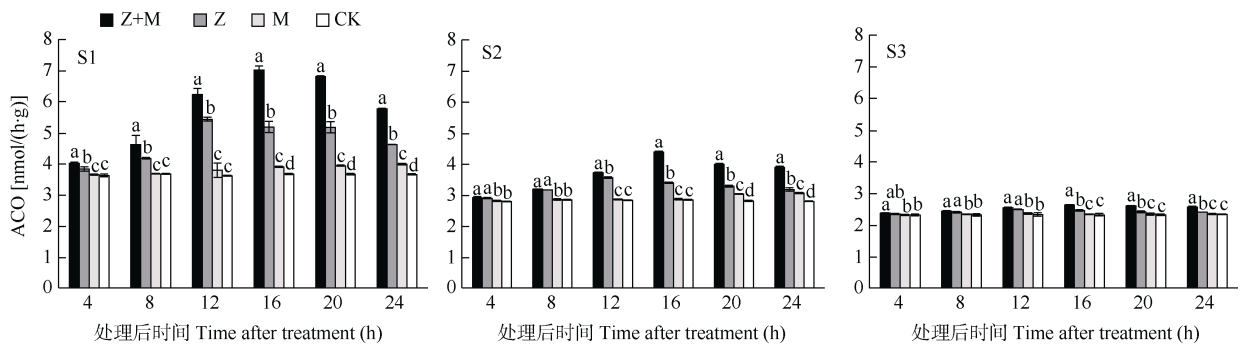


图 5 振动对三角梅苞片 ACO 活性的影响
 Fig. 5 Effect of vibration on ACO activity in *Bougainvillea* bracts

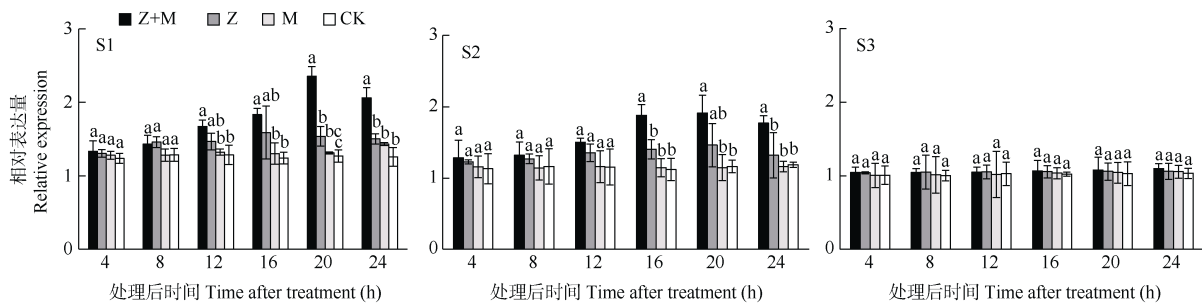


图 6 振动对三角梅苞片的 *BsSAMS* 基因相对表达量的影响
 Fig. 6 Effect of vibration on relative expression of *BsSAMS* gene in *Bougainvillea* bracts

的 1.47 倍。Z 处理的 S1 和 S2 苞片的 *BsACS* 基因相对表达量呈先上升后下降的变化趋势, 均在处理后 12 h 达最高, 分别是同期 CK 的 1.6 和 1.24 倍(图 7)。

Z+M 处理后 8~24 h 的 S1 和 S2 苞片 *BsACO* 基因相对表达量上升, 显著高于 M 和 CK ($P < 0.05$), 随处理后时间的延长, S1 苞片表现出先上升后下降再上升的变化趋势, S2 苞片表现出先上升后下降的变化趋势, 均在处理后 16 h 达到最高。Z 处理的 S1 苞片的 *BsACO* 基因相对表达量呈现上升-下降-上升-下降的变化趋势, 处理后 20 h 达峰值; S2 苞片呈先上升后下降的变化趋势, 处理后 12 h 达最高。而

S3 苞片的 *BsSAMS*、*BsACS*、*BsACO* 的表达量在 3 种处理后无显著变化, 且处理间无显著差异(图 8)。

3 结论和讨论

本研究结果表明, 盆栽三角梅受振动+密闭环境和振动处理后 7 d 的苞片脱落率显著高于密闭处理与对照。植物器官脱落的过程中激素发挥了重要的作用, 其中乙烯和生长素间的相互作用影响很明显, 乙烯可促进植物器官脱落, 是诱导叶片脱落的主要激素^[17], 而生长素是可起到相反的调节作用^[18]。

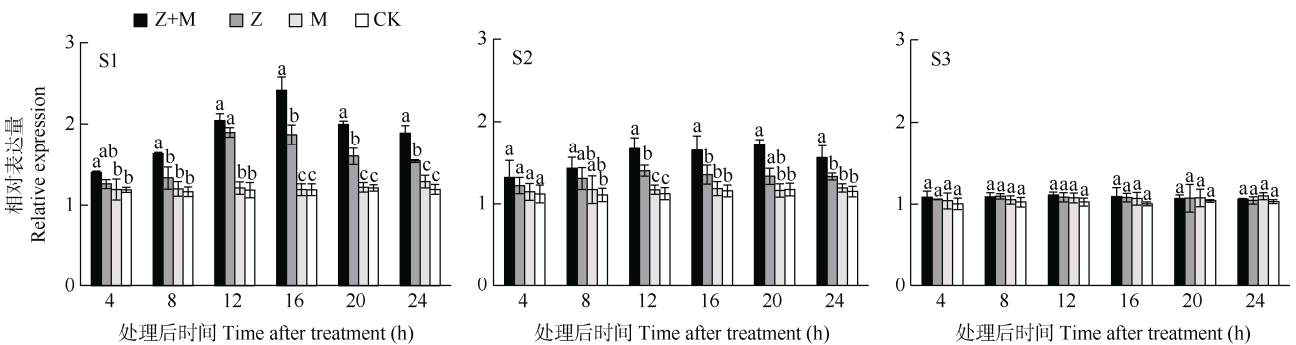


图 7 振动对三角梅苞片的 *BsACS* 基因相对表达量的影响
 Fig. 7 Effect of vibration on relative expression of *BsACS* gene in *Bougainvillea* bracts

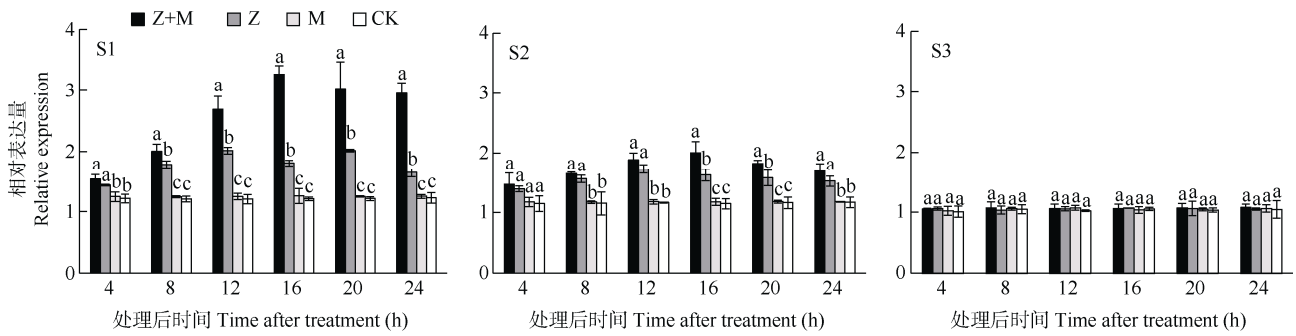


图 8 振动对三角梅苞片的 *BsACO* 基因相对表达量的影响

Fig. 8 Effect of vibration on relative expression of *BsACO* gene in *Bougainvillea* bracts

当植物在受到机械伤害后会导致乙烯释放量增加,即产生“伤乙烯”^[19]。有的植物受机械损伤后,在几分钟内就会引起乙烯生成,但多数植物在 1 h 左右才会引起乙烯大量生成,6~12 h 达峰值,随后下降^[20]。本研究表明三角梅 S1 和 S2 苞片在振动+密闭环境和振动处理后乙烯释放量显著高于密闭处理与对照,总体呈现先上升后下降的变化趋势,在处理后 12~16 h 出现释放高峰,与香石竹(*Dianthus caryophyllus*)切花^[21]、玫瑰花切花^[3]受到振动后乙烯释放量的变化趋势相近。前人研究表明,乙烯通过促进细胞壁的降解,从而引发脱落^[22],细胞壁的纤维素和果胶物质降解后,其离区细胞离开,叶片受机械力的影响而脱落^[23]。而苞片 S3 在振动+密闭环境处理和振动处理后乙烯释放量与未振动处理的乙烯释放量无明显差异,可能是由于 S3 时期苞片的生理状态稳定,细胞代谢不如 S1、S2 时期旺盛,受到振动处理后,对乙烯代谢影响小^[8]。

ACS 和 ACO 是植物“伤乙烯”生物合成的关键酶,果蔬组织受机械伤害后会导致 ACO 和 ACS 活性提高,从而引起乙烯释放量的增加^[24]。本研究表明三角梅受振动+密闭环境和振动处理后苞片的 ACC 含量、ACS 和 ACO 活性明显上升,高于同期密闭环境处理和对照,总体呈现先上升后下降的变化趋势,其中 ACS 和 ACO 活性在处理后 12~16 h 达到最高,与乙烯释放高峰期相一致。机械损伤使果蔬体内 ACS 和 ACO 活性升高,乙烯释放速率快速升高,增加了贮藏环境中的乙烯浓度,环境中的高乙烯浓度会反过来刺激果实乙烯合成^[25]。本研究表明振动+密闭环境处理对 ACO 和 ACS 活性的影响大于振动处理,说明三角梅苞片受到振动影响后,ACS 和 ACO 活性升高,促进乙烯释放速率升高,从而使密闭环境中乙烯浓度升高,环境中的高乙烯浓

度反过来刺激苞片乙烯合成。

本研究表明,盆栽三角梅在受到振动+密闭环境和振动处理后,S1 和 S2 苞片的 *BsSAMS*、*BsACS* 和 *BsACO* 基因相对表达量高于密闭处理和对照,随处理后时间延长总体呈现先上升后下降的变化趋势。*ACS*、*ACO* 基因是乙烯生物合成的限速酶基因,拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)受到外界胁迫时,大量的 *ACS*、*ACO* 基因被诱导^[26-27]。笋瓜(*Cucurbita maxima*)受机械损伤后,*ACS* 和 *ACO* 基因被诱导表达,伤口处乙烯大量生成^[28]。花椰菜(*Brassica oleracea*)受到机械损伤后表层细胞中的 *BO-ACS1* 和 *BO-ACS2* 基因被诱导表达,乙烯释放量升高^[29]。Lu 等^[6]报道苹果在振动处理后,乙烯生物合成关键酶基因 *MdACS1*、*MdACO1* 的相对表达量显著增加。刘春娣^[2]报道富士苹果振动 6 h 后,乙烯生物合成酶基因 *MdACS1*、*MdACO1* 表达量呈先上升后下降的变化趋势。本研究结果与前人的相似,ACO 和 ACS 活性变化总体表现一致,说明振动诱导了三角梅乙烯合成关键酶基因上调表达从而促进乙烯生物合成,加速苞片脱落。而振动+密闭环境处理下,苞片的 *BsSAMS*、*BsACS* 和 *BsACO* 基因相对表达量则高于振动处理,说明环境中的乙烯浓度上升会刺激苞片中乙烯合成酶基因的表达,从而使乙烯释放量上升,苞片脱落加速。

综上,振动加剧了三角梅苞片的脱落,而密闭环境会进一步促进脱落。本研究结果揭示了三角梅运输过程中乙烯释放量增加加速了苞片脱落的机制,振动使盆栽三角梅苞片上调乙烯合成酶基因 *BsSAMS*、*BsACS*、*BsACO* 的表达,诱导乙烯合成关键酶 ACS 和 ACO 的活性升高,促进 ACC 含量和乙烯释放量大幅度升高,从而引起苞片脱落率上升;而运输过程中的密闭环境会使环境中乙烯浓度

升高, 反过来刺激乙烯合成, 从而进一步促进运输过程中三角梅苞片的脱落。

参考文献

- [1] TIAN Y, LU X Y. The molecular mechanism of ethylene signal transduction [J]. *S Afr J Bot*, 2006, 72(4): 487–491. doi: 10.1016/j.sajb.2006.03.010.
- [2] LIU C D. Effect of stimulated vibration and impact on the qualities of Fuji apples and its molecular mechanism [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. [刘春娣. 模拟振动和冲击对富士苹果品质影响及其分子机理研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.]
- [3] LI C W, CHEN Y C, WANG H C, et al. The effects on quality of rose cut flowers due to vibration [J]. *J Agric For*, 2002, 51(4): 65–86. [李仲晖, 陈昱全, 王信智, 等. 振动对玫瑰花切花品质影响之研究 [J]. *农林学报*, 2002, 51(4): 65–86.]
- [4] CHENG X, WANG Y, XU L D, et al. Effect of simulating transportation vibration stress on the quality of “Saimaiti” apricot fruits [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(14): 340–344. [程曦, 王英, 许禄鼎, 等. 模拟运输振动胁迫对赛买提杏果品质的影响 [J]. *食品工业科技*, 2015, 36(14): 340–344. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.14.061.]
- [5] XIE D D. Effects of simulated transport vibration on the physiology and quality of kiwifruit [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. [谢丹丹. 模拟运输振动对猕猴桃果实生理及品质的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.]
- [6] LU F, XU F X, LI Z, et al. Effect of vibration on storage quality and ethylene biosynthesis-related enzyme genes expression in harvested apple fruit [J]. *Sci Hort*, 2019, 249: 1–6. doi: 10.1016/j.scienta.2019.01.031.
- [7] GAO H Y, ZHOU L Y, LUO B, et al. Ethylene signal transduction and its role in plant stress response [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2020, 48(12): 15–19. [高弘扬, 周良云, 罗碧, 等. 乙烯信号转导及其在植物逆境响应中的作用 [J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(12): 15–19. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2020.12.004.]
- [8] LIU J X, ZHAO G L. Changes of antioxidant enzymes, ethylene production and polyamines in *Bougainvillea glabra* [J]. *Acta Hort Sin*, 2005, 32(4): 722–724. [刘建新, 赵国林. 叶子花衰老过程中抗氧化酶、乙烯生成速率和多胺含量的变化 [J]. *园艺学报*, 2005, 32(4): 722–724. doi: 10.16420/j.issn.0513-353x.2005.04.041.]
- [9] LIU F Y, CHANG Y S. Growth regulators prolong bract longevity of potted *Bougainvillea* [J]. *Kor J Hort Sci Technol*, 2011, 29(4): 326–335.
- [10] HONG Y H, ZHUANG X F, YE Q H, et al. Mitigative effects of supplementary light intensity on the leaves shedding of *Bougainvillea spectabilis* during storage and transportation [J]. *Acta Bot Boreali Occid Sin*, 2020, 40(2): 271–278. [洪燕红, 庄小芬, 叶清华, 等. 不同光照强度补光对模拟贮运三角梅叶片脱落的缓解效应 [J]. *西北植物学报*, 2020, 40(2): 271–278. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2020.02.0271.]
- [11] CHEN Y Y, GUO X F, LIN J X, et al. Selection of the best soilless culture medium for potted *Bougainvillea* for export [J]. *Mod Agric*, 2015(8): 34–35. [陈毅勇, 郭笑凡, 林金璇, 等. 出口盆栽三角梅最佳无土栽培基质的筛选 [J]. *现代化农业*, 2015(8): 34–35. doi: 10.3969/j.issn.1001-0254.2015.08.022.]
- [12] LIU F Y. Effects of plant growth regulators on the growth and flowering of *Bougainvillea* spp. and *Passiflora* spp. [D]. Taipei: Taiwan University, 2010. [刘芳吟. 生长调节剂对九重葛及百香果生长及开花之影响 [D]. 台北: 台湾大学, 2010.]
- [13] WANG Y, LUO S F, HU H L, et al. Effects of exogenous NO treatment on the postharvest quality and ethylene metabolism of fresh lotus seeds [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2019, 35(11): 100–108. [王瑶, 罗淑芬, 胡花丽, 等. 外源NO处理对采后鲜莲子品质及乙烯代谢的影响 [J]. *现代食品科技*, 2019, 35(11): 100–108. doi: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.11.014.]
- [14] XU W P, CHEN K S, LI F, et al. Regulations of lipoygenase, jasmonic acid and salicylic acid on ethylene biosynthesis in ripening kiwifruit [J]. *Acta Phytophysiol Sin*, 2000, 26(6): 507–514. [许文平, 陈昆松, 李方, 等. 脂氧合酶、茉莉酸和水杨酸对猕猴桃果实熟软化进程中乙烯生物合成的调控 [J]. *植物生理学报*, 2000, 26(6): 507–514.]
- [15] GASIC K, HERNANDEZ A, KORBAN S S. RNA extraction from different apple tissues rich in polyphenols and polysaccharides for cDNA library construction [J]. *Plant Mol Biol Rep*, 2004, 22(4): 437–438. doi: 10.1007/BF02772687.
- [16] KENNETH J L, THOMAS D S. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta CT}$ method [J]. *Methods*, 2002, 25(4): 402–408. doi: 10.1006/meth.2001.1262.
- [17] ZHANG R C, FENG J F, XIAO X, et al. Effects of ethylene and abscisic acid on the shedding rate of waterlogged willow leaves [J]. *Teach Middle Sch Biol*, 2017(10): 52–54. [张芮初, 冯九飞, 肖襄, 等. 乙烯和脱落酸对水插柳枝叶片脱落速率的影响 [J]. *中学生物教学*, 2017(10): 52–54.]
- [18] ESTORNELL L H, AGUSTÍ J, MERELO P, et al. Elucidating mechanisms underlying organ abscission [J]. *Plant Sci*, 2013, 199–200: 48–60. doi: 10.1016/j.plantsci.2012.10.008.
- [19] FAN H F, HU W Z, PANG K. The progress in ethylene biosynthesis and brown reaction of fresh-cut fruits and vegetables [J]. *Food Mach*, 2008, 24(4): 128–132. [樊会芬, 胡文忠, 庞坤. 鲜切果蔬乙烯生物合成与酶促褐变的研究进展 [J]. *食品与机械*, 2008, 24(4): 128–132.]

- doi: 10.13652/j.issn.1003-5788.2008.04.028.]
- [20] ZHU X X. Cloning and expression analysis of three genes encoding ethylene biosynthetic enzymes from *Hosta plantaginea* flowers [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2012. [朱晓仙. 玉簪花中 3 个乙烯生物合成相关基因的克隆及其表达分析 [D]. 金华: 浙江师范大学, 2012. doi: 10.7666/d.y2193708.]
- [21] ZHENG K J, LIN R S, HUANG Y Y, et al. The effects on quality of carnation cut flowers due to simulated transit vibration [J]. *J Agric Mach*, 2000, 9(1): 1–18. [郑可均, 林瑞松, 黄裕益, 等. 模拟运输振动对香石竹切花影响之研究 [J]. *农业机械学报*, 2000, 9(1): 1–18.]
- [22] ZHANG Y Y, HE Y M, DU T T, et al. Research progress of plant organ abscission [J]. *J Inner Mongolia Univ Sci Technol*, 2021, 40(3): 209–216. [张羽云, 何永梅, 杜婷婷, 等. 植物器官脱落研究进展 [J]. *内蒙古科技大学学报*, 2021, 40(3): 209–216. doi: 10.16559/j.cnki.2095-2295.2021.03.002.]
- [23] WANG Y J. Gene screening and functional analysis of aquaporin induced leaf abscission in tomato [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. [王禹佳. 调控番茄叶片脱落的水通道蛋白基因筛选及功能分析 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020. doi: 10.27327/d.cnki.gshnu.2020.000452.]
- [24] ZHAO Y Y. Responses of phospholipase D and antioxidant system to mechanical wounding in postharvest cucumber fruits [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. [赵宇瑛. 黄瓜磷脂酶 D 和抗氧化系统对采收机械损伤胁迫的响应 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.]
- [25] LI F J, ZHANG X H, LIU L Q, et al. Effects of 1-MCP on wound-induced ethylene synthesis of Starking apple fruits during storage period [J]. *Storage Process*, 2007, 7(5): 14–17. [李富军, 张新华, 刘禄强, 等. 1-MCP 对红星苹果贮藏期间伤乙烯合成的影响 [J]. *保鲜与加工*, 2007, 7(5): 14–17. doi: 10.3969/j.issn.1009-6221.2007.05.007.]
- [26] LU C W, PAN X Q. Ethylene signal transduction and its role in plant stress response [J]. *Agric Jilin*, 2012(9): 261. [卢丞文, 潘晓琪. 乙烯信号转导及其在植物胁迫应答中的作用 [J]. *吉林农业*, 2012(9): 261.]
- [27] CHEN X J, LIU G S, CHEN Z K, et al. A review of the pathway of ethylene biosynthesis and the relevant genetic engineering [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2002, 10(1): 83–98. [陈新建, 刘国顺, 陈占宽, 等. 乙烯生物合成途径及其相关基因工程的研究进展 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2002, 10(1): 83–98. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2002.01.018.]
- [28] KATO M, HAYAKAWA Y, HYODO H, et al. Wound-induced ethylene synthesis and expression and formation of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) synthase, ACC oxidase, phenylalanine ammonia-lyase, and peroxidase in wounded mesocarp tissue of *Cucurbita maxima* [J]. *Plant Cell Physiol*, 2000, 41(4): 440–447. doi: 10.1093/pcp/41.4.440.
- [29] YAN Y Y, HU W Z, JIANG A L, et al. Research progress in mechanical wounding stimulation signal molecules transduction and defensive reaction for fresh-cut fruits and vegetables [J]. *J Food Saf Qual*, 2015, 6(7): 2439–2444. [闫媛媛, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 鲜切果蔬机械伤害刺激信号分子转导及防御反应的研究进展 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(7): 2439–2444. doi: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2015.07.009.]