

陈雨馨, 罗巧, 皮学娜, 等. 水杨酸甲酯和茉莉酸甲酯对郁金香花香挥发物的影响[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(5): 88-97.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.05.009

水杨酸甲酯和茉莉酸甲酯对郁金香花香挥发物的影响

陈雨馨, 罗巧, 皮学娜, 邬梦玥, 侯健琦, 王艳平, 产祝龙, 向林

华中农业大学园艺林学学院/果蔬园艺作物种质创新与利用全国重点实验室, 武汉 430070

摘要 为探究不同浓度的水杨酸甲酯(methyl salicylate, MeSA)和茉莉酸甲酯(methyl jasmonate, MeJA)对郁金香花香挥发物的影响, 采用50、200、600 $\mu\text{mol/L}$ MeSA和MeJA喷施郁金香花苞, 利用顶空固相微萃取(HS-SPME)和气相色谱质谱联用技术(GC-MS)对挥发性成分进行测定和分析。结果显示, 郁金香花香挥发物的成分主要包括醇类、烷烃类、萜烯类、苯环类、酮类和酯类, 其中醇类的总释放量最高; 喷施不同浓度MeSA和MeJA, 六类化合物含量呈现不同变化趋势, 萜烯类化合物释放量在50 $\mu\text{mol/L}$ MeSA或200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA处理下增加量尤其明显; 4-十二醇、(E)- β -罗勒烯和反式-3-己烯-1-醇为郁金香花朵主要挥发物, 其中(E)- β -罗勒烯在不同浓度MeSA和MeJA处理下释放量均有所增加, 50 $\mu\text{mol/L}$ MeSA和200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA处理下释放量分别是对照组的10倍和3.3倍。以上结果表明, 外源喷施水杨酸甲酯和茉莉酸甲酯对郁金香花香挥发物的释放具有明显的促进作用。

关键词 郁金香; 花香; 挥发性成分; 水杨酸甲酯; 茉莉酸甲酯

中图分类号 S682.2⁺63

文献标识码 A

文章编号 1000-2421(2025)05-0088-10

花香是植物体内一种重要的次生代谢产物。它是由花朵释放出的一系列低分子量、低水溶性和低极性的挥发性化合物所组成的复杂混合物。这些化合物赋予了花朵独特的香气和味道, 不同植物的花香物质种类和含量各异, 因此形成了丰富多彩的香气体验^[1]。迄今为止, 已经在植物中鉴别出超过1 700种香气化合物, 植物的花香挥发物主要由烷烃类、烯类、醇类、酮类、醛类、醚类、酯类及苯环类化合物等组成^[2], 其中以萜类化合物最为丰富, 含有超过556种不同的气味化合物^[3]。植物花香的组成和含量不仅受其自身生理活动的影响, 还受多种外界条件的影响, 其中植物激素是影响花香合成和释放的关键因素之一^[4]。

水杨酸是一种小分子酚类化合物, 作为植物的信号传感器调节植物的反应, 且易转化为水杨酸甲酯(methyl salicylate, MeSA)。MeSA是植物体内一种重要的气态甲酯分子, 同时也是构成花香的主要成分之一^[5]。MeSA在植物应对胁迫的反应过程中发挥着信号分子的作用, 被视为一种新型的植物激素, 并在多个领域得到广泛应用^[6]。大量研究表明,

水杨酸甲酯(MeSA)能够诱导植物防御酶活性的变化, 从而增强植物对胁迫的抵抗力^[7-9], 但是水杨酸甲酯在植物花香方面的作用还未见报道。

茉莉酸甲酯(methyl jasmonate, MeJA)最早是从茉莉花中分离出的一种植物激素, 作为挥发性的茉莉酸衍生物, MeJA在植物生长和次生代谢物合成过程中发挥着重要的诱导作用, 外施MeJA可以调控植物体内次生代谢产物的积累^[10-11]。研究表明, 外源喷施MeJA可诱导茶叶(*Camellia japonica*)挥发物的产生和释放^[12]。在百合(*Lilium* spp.)和玫瑰(*Rosa rugosa*)中, 喷施茉莉酸甲酯可以促进花香挥发物的合成^[13-14]。

郁金香(*Tulipa* \times *gesneriana* L.)是百合科郁金香属的球根花卉, 同时也是一种重要的切花和观赏植物。其花型独特、花色丰富、栽培品种众多, 具有非常高的园林应用价值, 因而被广泛应用于园林绿地。经过长期的杂交栽培, 全球的郁金香品种数量已经超过了8 000种, 并且还在逐年增加, 但具有怡人花香的郁金香品种较少。因此, 采用不同措施提高郁金香花香物质的含量, 对改善郁金香香气品质

收稿日期: 2024-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(32170372); 华中农业大学创新训练项目(2023YLSRF04)

陈雨馨, E-mail: chen-yuxin8665@163.com

通信作者: 向林, E-mail: xianglin@mail.hzau.edu.cn

具有重要意义。目前,郑伟颖^[15]、Oyama-Okubo等^[16]鉴定了不同品种的郁金香属植物花香挥发性成分,但关于外源茉莉酸甲酯和水杨酸甲酯对郁金香花香挥发性成分影响的研究尚未见报道。为提高郁金香的园艺观赏价值,结合前人研究结果,本研究选择不同浓度的茉莉酸甲酯和水杨酸甲酯处理着色期郁金香花朵,收集并比较分析其初开期挥发物成分含量,观察提升花香效应,以期后续在生产上选择合适浓度外源喷施 MeJA 和 MeSA 改善郁金香花朵香气提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试材及样品处理

试验材料为郁金香品种‘道琼斯’(*Tulipa × gesneriana* ‘Dow Jones’),购买后种球置于实验楼 5℃冷库保存。将郁金香种球种植于玻璃温室,温度控制在 18~22℃,栽培基质为泥炭土:蛭石:珍珠岩=1:1:1(体积比)混合,湿度 60%~70%,通风良好。每 3 d 浇 1 次水,待花蕾硕大并开始显色,即可使用 MeSA 和 MeJA 处理郁金香花苞。

按照袁媛^[17]对郁金香花朵发育阶段的划分方法,选取株高、长势基本一致的着色期郁金香花苞进行试验,参照吴琦等^[13]的处理浓度,分别使用 50、200、600 μmol/L 的 MeSA 和 MeJA 于 08:00—10:00 喷施花苞。另外,使用 5% 无水乙醇(MeSA 和 MeJA 的溶剂)喷施的植株作为对照。花朵初开后第 3 天 08:00—10:00,选择长势、花朵大小及开放程度一致的初开期郁金香花朵进行花香挥发物的收集,每个处理设置 3 个生物学重复。

1.2 采集方法

采用顶空固相微萃取-气相色谱质谱(HS-SPME-GC-MS)的方法测定郁金香花香成分。初次使用 SPME 萃取头时将其插入进样口于 260℃条件下老化 1 h。取采集的郁金香花朵装于样品瓶中,称量并记录净质量。取样完成后,立即加入质量浓度为 8.447 mg/mL 的 10 μL 癸酸乙酯标准品于进样瓶,盖上聚四氟乙烯胶垫瓶盖。室温(25±2)℃下平衡 30 min,插入 SPME 萃取头顶空吸附 30 min,最后取出固相微萃取纤维头,插入 GC 进样口解吸 2 min。

1.3 检测方法

使用三重四级杆气相色谱质谱联用仪(Gas Chromatograph Coupled Triple Quadrupole Mass Spectrometer, Thermo Fisher Scientific)进行检测,

色谱和质谱条件参照郑伟颖^[15]的方法。

气相色谱条件:TRACE TR-5MS 毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm; Thermo Fisher Scientific);柱流量:恒流 1 mL/min;升温程序:起始柱温 50℃保持 1 min,然后以 5℃/min 的速率升温至 220℃,保持 5 min;载气:高纯氦气,氦气流量 1 mL/min;进样模式:分流进样,分流比 30:1;进样口温度 220℃;进样量 1 μL。

质谱条件:电离方式 EI,电子能量 70 eV,正离子模式;离子源温度 230℃;四极杆温度 150℃;传输线温度 220℃;质量扫描:全扫描,范围 m/z 50~350,扫描速率 500 Da/s。

1.4 香气物质的定性定量分析

定性分析参照郑伟颖^[15]的方法。将待测物色谱峰对应的质谱图与 NIST08 标准质谱数据库进行匹配,并结合特征离子信息实现初步识别。在程序升温条件一致的前提下,通过测定(C8~C20)正构烷烃参照物的保留时间,计算其保留指数(RI)。综合 RI 值、人工谱图解析结果以及文献资料,最终完成目标组分的定性确认。

定量分析采用内标法进行。选定癸酸乙酯作为内标物,依据目标挥发物与内标物的比值,计算各香气物质的含量。各香气组分含量的计算方法如式(1)所示:

$$C=(S_1/S_2 \times C_1)/M \quad (1)$$

式(1)中, C 为各香气组分的含量,ng/g; S_1 为组分的峰面积; S_2 为内标的峰面积; C_1 为内标含量,μg; M 为样品质量,g。

1.5 数据分析

使用 Microsoft Excel 2010 软件进行试验数据的整理与统计;利用 IBM SPSS Statistics 20.0 软件进行 Duncan's 新复极差法显著性检验;采用 Origin 2021 软件绘图。

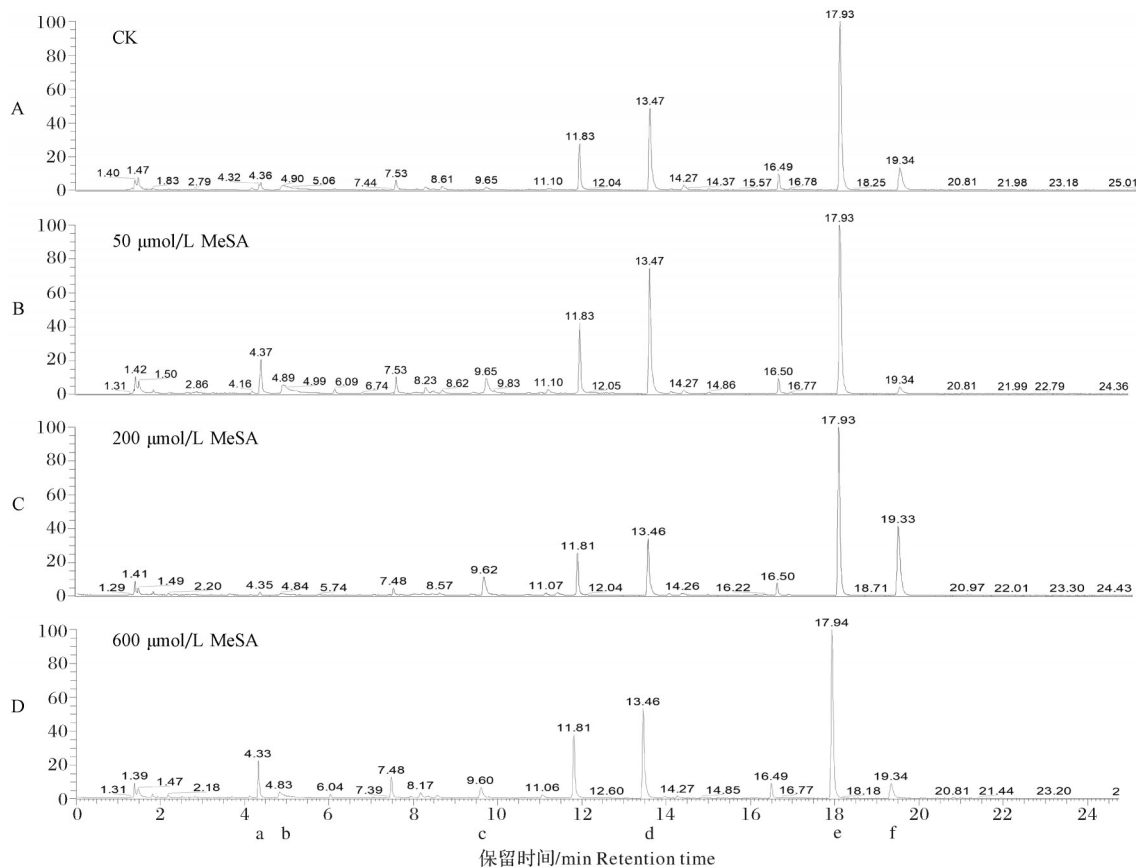
2 结果与分析

2.1 外源 MeSA 处理对郁金香花香挥发物总释放量的影响

由图 1 和表 1 可知,郁金香花香挥发物中共检测出 13 种组分,分为醇类、烷烃类、萜烯类、苯环类、酮类、酯类 6 大类,其中相对含量最高的是醇类,占总量一半以上,其余烷烃类、萜烯类、酯类、酮类和苯环类含量依次降低。单一成分以 4-十二醇、(E)-β-罗勒烯和反式-3-己烯-1-醇含量较高,占比分别为

62.51%、7.21%和3.31%。由图2可知,郁金香花香挥发物总释放量在50 $\mu\text{mol/L}$ MeSA处理下达到最高值,较对照总释放量增长了5.8倍;600 $\mu\text{mol/L}$

MeSA处理下的花香挥发物增加量为对照组的2.4倍;200 $\mu\text{mol/L}$ MeSA处理对花香挥发物总释放量的影响不显著。



A: 对照 CK; B: 50 $\mu\text{mol/L}$ MeSA 处理 50 $\mu\text{mol/L}$ MeSA treatment; C: 200 $\mu\text{mol/L}$ MeSA 处理 200 $\mu\text{mol/L}$ MeSA treatment; D: 600 $\mu\text{mol/L}$ MeSA 处理 600 $\mu\text{mol/L}$ MeSA treatment. a: 2,2-二甲基-1-丁醇 2,2-Dimethyl-1-butanol; b: 反式-3-己烯-1-醇 (*E*)-3-Hexen-1-ol; c: (*E*)- β -罗勒烯 *trans*- β -Ocimene; d: 3-甲基十一烷 3-Methylundecane; e: 4-十二醇 4-Dodecanol; f: 癸酸甲酯 Decanoic acid, methyl ester.

图1 不同浓度MeSA处理后郁金香花香成分的气相色谱图

Fig. 1 Gas chromatography-mass spectrometry of tulip floral components after treatment with different concentrations of MeSA

2.2 外源 MeSA 处理对郁金香不同种类花香挥发物释放量的影响

由图3可知,经50、600 $\mu\text{mol/L}$ MeSA处理后,不同种类花香挥发物含量均明显增加,200 $\mu\text{mol/L}$ MeSA处理对醇类和酯类的释放有抑制作用;萜烯类受MeSA处理影响明显,在50 $\mu\text{mol/L}$ MeSA处理下花香挥发物释放量明显提高,达到了对照组的11倍,在200、600 $\mu\text{mol/L}$ MeSA处理下释放量均为对照组的4.2倍。

2.3 外源 MeSA 处理对郁金香花朵主要花香挥发物释放量的影响

郁金香花香挥发物中4-十二醇、(*E*)- β -罗勒烯和反式-3-己烯-1-醇含量相对较高,故将这3种花香挥发物作为郁金香花朵主要花香挥发物,并检测不

同浓度MeSA处理下这些物质的释放量。由图4可知, (*E*)- β -罗勒烯受MeSA处理影响最显著,不同浓度下该物质的释放量均显著增加,在50 $\mu\text{mol/L}$ MeSA处理下, (*E*)- β -罗勒烯的释放量达到了对照组的10倍。在50 $\mu\text{mol/L}$ 的MeSA处理下,4-十二醇和反式-3-己烯-1-醇的释放量达到最高,分别为对照组的4.6倍和13.4倍,但在200 $\mu\text{mol/L}$ 的MeSA处理下,二者的释放量与对照相比均有不同程度的下降。

2.4 外源 MeJA 处理对郁金香花香挥发物总释放量的影响

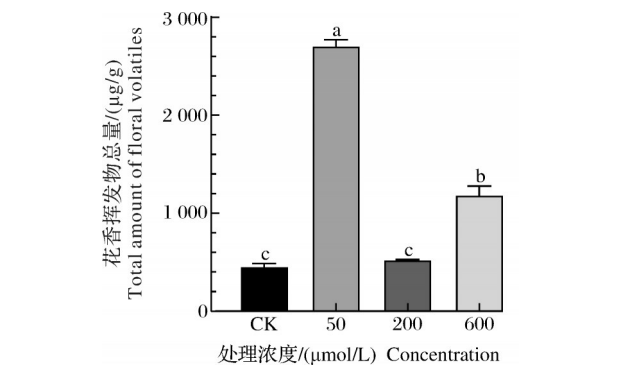
由图5和表2可知,200 $\mu\text{mol/L}$ 的MeJA处理下郁金香中花香挥发物共包括13种组分,这与对照组检测结果一致,而50 $\mu\text{mol/L}$ 和600 $\mu\text{mol/L}$ 处理后花香挥发物组分均有所减少,分别为11种和12种。

表 1 MeSA 处理后郁金香花香挥发物释放量

Table 1 Release of volatiles from tulip fragrance after MeSA treatments μg/g

序号 No.	化合物名称 Compounds name	保留时间/min Retention time	对照 CK	MeSA/(μmol/L)		
				50	200	600
萜烯类 Terpene						
1	罗勒烯 Ocimene	9.35	1.38 ±0.09	20.24 ±10.01	10.00 ±4.02	6.85 ±0.52
2	(E)-β-罗勒烯 <i>trans</i> -β-Ocimene	9.65	33.69 ±3.90	334.33 ±183.07	123.66 ±4.22	133.69 ±13.29
3	β-石竹烯 Caryophyllene	20.06	1.51 ±0.45	10.21 ±5.91	0.41 ±0.20	1.99 ±0.64
	合计 Subtotal		36.58	364.78	134.07	142.53
醇类 Alcohol						
4	S-2-甲基丁醇 (S)-2-Methyl-1-butanol	2.85	5.38 ±2.14	52.16 ±28.23	—	—
5	2,2-二甲基-1-丁醇 2,2-Dimethyl-1-butanol	4.37	25.66±7.49	199.07±38.07	13.95±5.08	80.42±25.28
6	反式-3-己烯-1-醇 (E)-3-Hexen-1-ol	4.86	14.66 ±2.04	196.71 ±9.07	11.76 ±1.53	60.85 ±0.16
7	2-乙基己醇 2-Ethylhexanol	9.19	0.89 ±0.29	5.16 ±3.10	0.46 ±0.37	1.51 ±0.48
8	4-十二醇 4-Dodecanol	17.49	292.13 ±53.70	1337.69 ±104.55	259.66 ±19.41	615.65 ±36.80
	合计 Subtotal		338.72	1790.79	285.83	758.43
酯类 Ester						
9	异戊酸甲酯 Methyl isovalerate	3.24	2.06 ±1.02	31.28 ±28.77	0.78 ±0.03	2.73 ±0.09
10	己酸甲酯 Hexanoic acid, methyl ester	6.48	0.27 ±0.06	5.25 ±4.28	0.80 ±0.08	2.67 ±0.64
	癸酸甲酯 Decanoic acid, methyl ester	19.33	2.00 ±0.17	8.22 ±0.53	2.69 ±0.26	3.65 ±0.20
	合计 Subtotal		4.33	44.73	4.27	9.05
烷烃类 Alkane						
11	3-甲基十一烷 3-Methylundecane	13.47	85.19±12.34	486.92 ±32.83	82.31 ±24.40	223.96 ±45.11
	合计 Subtotal		85.19	486.92	82.31	223.96
酮类 Ketone						
12	6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one	8.05	1.62 ±0.43	10.26 ±2.06	2.43 ±1.14	7.57 ±0.39
	合计 Subtotal		1.62	10.26	2.43	7.57
苯环类 Benzenoids						
13	3,5-二甲氧基甲苯 3,5-Dimethoxytoluene	16.04	0.93 ±0.15	9.20 ±2.61	5.34 ±2.99	3.22 ±1.64
	合计 Subtotal		0.93	9.20	5.34	3.22

注:Note:—为未检出 Not detected。下同 The same as below.



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),下同。Different lowercase letters indicate significant differences between treatments($P<0.05$), the same as below.

图 2 不同浓度 MeSA 处理后郁金香花香挥发物总释放量

Fig. 2 The total release of tulip fragrance volatiles after treatment with different concentrations of MeSA

由图 6 可知,花香挥发物总释放量在 200 μmol/L 处理下达到最高值,较对照组的郁金香花香挥发物的总释放量增长了 1.6 倍;而 50 μmol/L 和 600 μmol/L 的 MeJA 处理均对郁金香花香挥发物的释放产生了抑制作用,并且 50 μmol/L 的 MeJA 处理抑制效果显著。

2.5 外源 MeJA 处理对郁金香不同种类花香挥发物释放量的影响

由图 7 可知,经过 200 μmol/L MeJA 喷施后,苯环类、萜烯类、醇类、酯类和酮类郁金香花香挥发物释放量均有升高。苯环类、萜烯类、醇类和酮类在 200 μmol/L 的 MeJA 处理下释放量达到最高,其中萜烯类化合物受 MeJA 影响显著,其释放量是对照组的 3.3 倍。酯类化合物在 600 μmol/L 的 MeJA 处理下

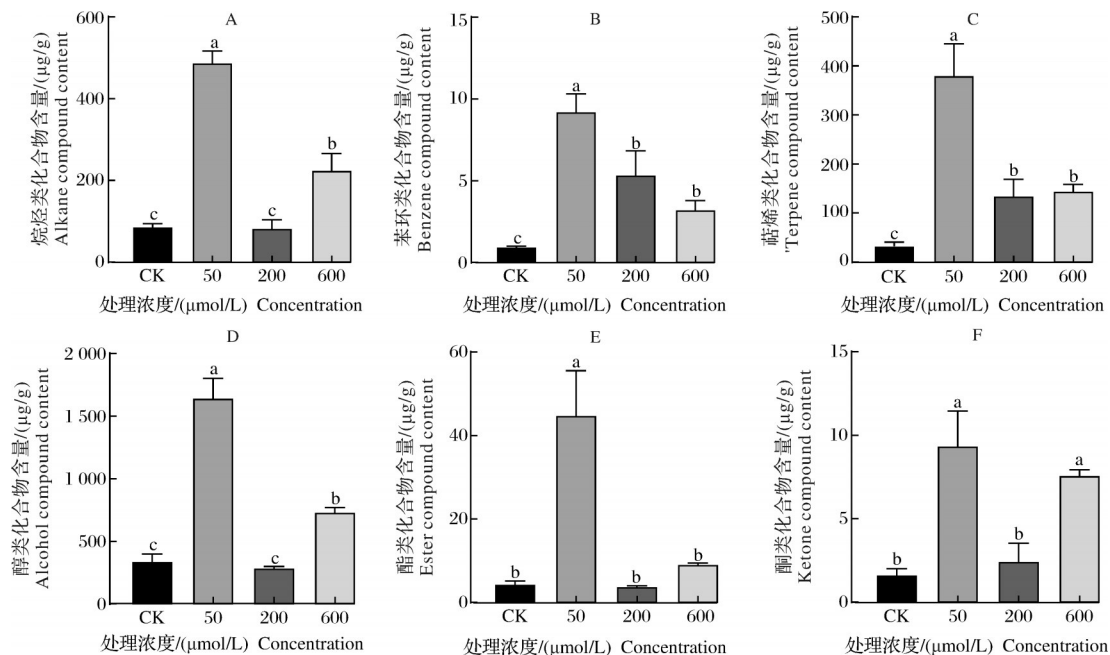


图3 不同浓度MeSA处理后郁金香不同种类花香成分含量

Fig. 3 The content of different kinds of floral components in tulip after treatment with different concentrations of MeSA

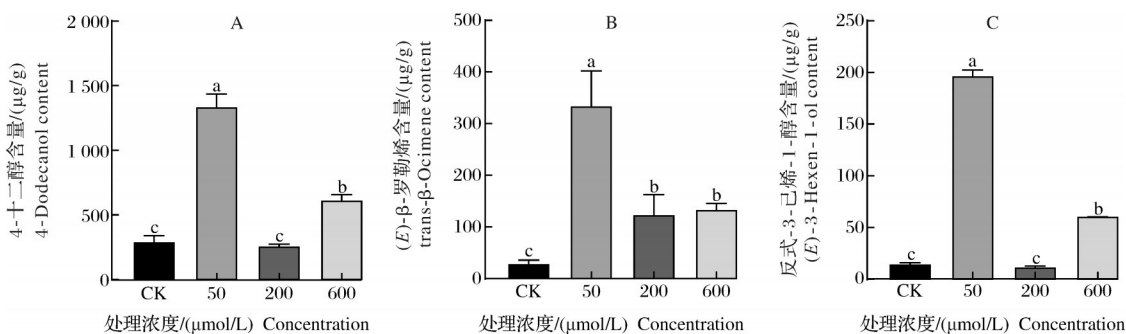


图4 不同浓度MeSA处理后郁金香主要花香成分含量

Fig. 4 The content of main floral components of tulip after treatment with different concentrations of MeSA

释放量最多,烷烃类化合物释放量在不同浓度的MeJA处理下均受到抑制。

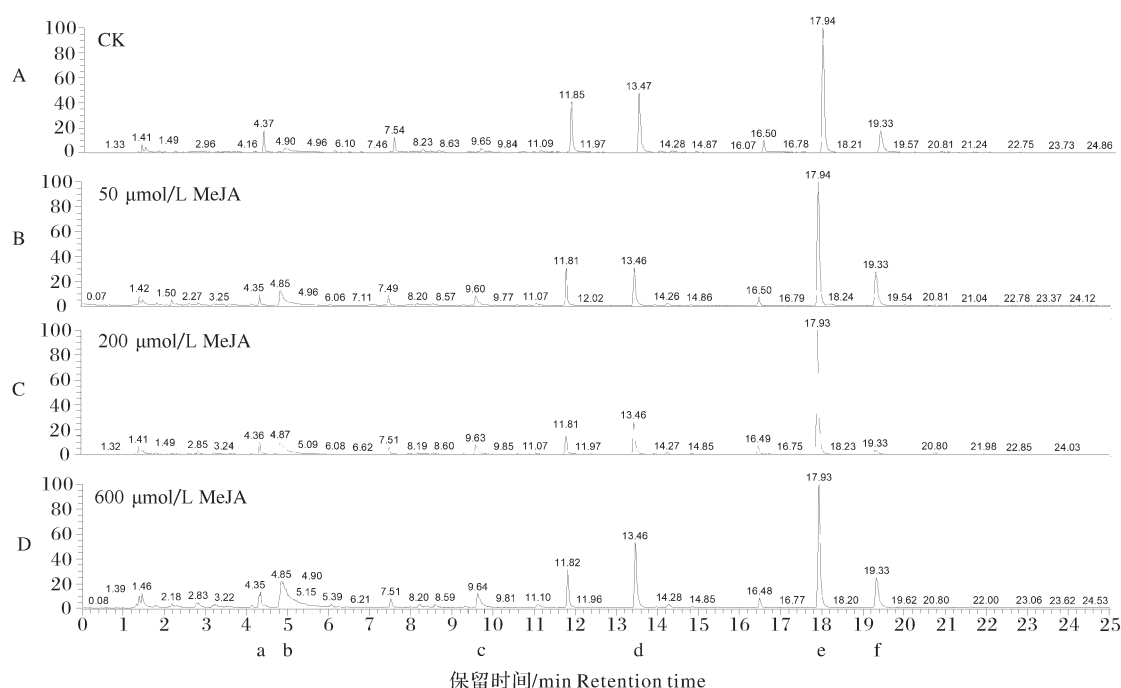
2.6 外源MeJA处理对郁金香花朵主要花香挥发物释放量的影响

由图8可知,不同浓度的MeJA处理对3种主要挥发物的影响不同。反式-3-己烯-1-醇在不同浓度MeJA处理下释放量均显著增加,且释放量随MeJA浓度升高呈现上升趋势。(E)-β-罗勒烯在200 μmol/L的MeJA处理下释放量达到最高,为对照组的3.3倍。50、600 μmol/L的MeJA对4-十二醇的释放产生了明显的抑制作用。

3 讨论

植物花香是植物花朵释放的次生代谢产物,由许多低分子质量的化合物混合而成^[18],是评价园艺

植物品质的重要指标。花香研究在农业、生物学、医药和香水化妆品工业等方面有着重要的价值,因此有关花香的研究已经成为近年来热门的研究领域之一。本研究使用50、200、600 μmol/L的MeSA和MeJA对郁金香品种‘道琼斯’花朵进行喷施,发现50 μmol/L MeSA或200 μmol/L MeJA均可以促进郁金香花香挥发物的释放,但二者在其他浓度处理下对花香挥发物释放量的促进作用差异较大。肖殿昭^[8]使用1 mmol/L的MeSA处理小麦叶片,发现经MeSA诱导24 h后,芳香族类挥发物的相对含量会显著高于对照,而萜烯类挥发物虽然种类会增加,但占总挥发物的相对含量和对照差异并不显著。焦龙等^[19]使用4、20 mmol/L的MeSA喷施茶树叶片,结果显示,萜烯类和芳香族类挥发物的种类及释放量均没有显著变化。Wang等^[20]用MeSA处理番茄时,



A: 对照 CK; B: 50 $\mu\text{mol/L}$ MeJA 处理 50 $\mu\text{mol/L}$ MeJA treatment; B: 200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA 处理 200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA treatment; D: 600 $\mu\text{mol/L}$ MeJA 处理 600 $\mu\text{mol/L}$ MeJA treatment. a: 2,2-二甲基-1-丁醇 2,2-Dimethyl-1-butanol; b: 反式-3-己烯-1-醇 (*E*)-3-Hexen-1-ol; c: (*E*)- β -罗勒烯 trans- β -Ocimene; d: 3-甲基十一烷 3-Methylundecane; e: 4-十二醇 4-Dodecanol; f: 癸酸甲酯 Decanoic acid, methyl ester.

图5 不同浓度MeJA处理后郁金香花香成分的气相色谱图

Fig. 5 Gas chromatography-mass spectrometry of tulip floral components after treatment with different concentrations of MeSA

番茄果实挥发物含量会显著增加。本研究使用不同浓度的MeSA处理郁金香花朵,发现50、600 $\mu\text{mol/L}$ 的MeSA处理均能显著促进花香挥发物的释放,而200 $\mu\text{mol/L}$ 处理对花香挥发物总释放量的影响不显著。由此推测,不同浓度MeSA处理对不同植物种类挥发物的作用效果不一致,而低浓度的MeSA可以更有效地促进萜烯类化合物的释放。

研究表明,外源MeJA能够调节植物的基因表达和次生代谢^[21],促进植物挥发性物质的释放。使用MeJA喷施西伯利亚百合花瓣后,百合花香挥发物释放量显著增加,且200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA处理的效果最佳,而50 $\mu\text{mol/L}$ 的处理使挥发物释放量明显下降^[13]。使用100 $\mu\text{mol/L}$ 外源茉莉酸甲酯处理牡丹‘洛阳红’时也能有效提高花香挥发物的含量^[22]。王煥^[23]研究发现,600 $\mu\text{mol/L}$ MeJA处理比200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA处理更能有效促进阳春砂果皮中萜类物质的积累,而在种子团中的结果却相反,600 $\mu\text{mol/L}$ MeJA处理抑制了萜类物质的散发。本研究利用不同浓度的MeJA对郁金香花朵进行喷施,经200 $\mu\text{mol/L}$ 或600 $\mu\text{mol/L}$ MeJA处理后,花香挥发物总含量显著增加,50 $\mu\text{mol/L}$ 反而抑制花香挥发物的释放。以

上结果表明,外源MeJA能促进植物挥发物的释放,但不同浓度MeJA处理对植物不同部位的作用效果可能不一致。此外,Rahnamaie-Tajadod等^[24]研究证实,外源MeJA处理可以调控植物体内MVA途径和MEP途径。Li等^[25]研究表明,MeJA处理葡萄可诱导萜烯类化合物合成途径的*DXS*、*HMGCR*、*TPS14*等基因表达,从而促进葡萄果皮中挥发性萜类化合物的积累。萜类合成酶(TPS)是处于萜类化合物合成下游的关键酶,与萜类化合物积累息息相关。使用100 $\mu\text{mol/L}$ 的MeJA处理双瓣茉莉后,6个茉莉花TPS家族基因*JsTPS1*、*JsTPS2*、*JsTPS3*、*JsTPS5*、*JsTPS6*和*JsTPS7*均显著上调^[26]。由此推测,外源MeJA通过气孔进入植物细胞后,可以通过诱导MVA和MEP途径上多种萜类合成酶基因的表达,促进萜烯类花香挥发物的合成和释放,最终达到调控植物香气的效果。

本研究中,50 $\mu\text{mol/L}$ MeJA处理郁金香后,烷烃类挥发物含量显著下降,与MeJA处理牡丹‘洛阳红’的结果一致^[22]。马海云等^[27]采用100 $\mu\text{mol/L}$ MeJA处理番茄果实,结果显示,醛类、醇类、酮类、酯类物质挥发量上升,烃类物质数量和含量下降,说明

表 2 MeJA 处理后的郁金香花香挥发物释放量

Table 2 Release of volatiles from tulip fragrance after MeJA treatments

Table 2 Release of volatiles from tulip fragrance after MeJA treatments						μg/g
序号 No.	化合物名称 Compounds name	保留时间/min Retention time	对照 CK	MeJA/(μmol/L)		
				50	200	600
萜烯类 Terpene						
1	罗勒烯 Ocimene	9.35	1.38 ±0.09	3.65 ±1.46	5.42 ±0.23	4.42 ±2.53
2	(E)-β-罗勒烯 trans-β-Ocimene	9.65	33.69 ±3.90	55.09 ±3.33	109.60 ±8.82	38.45 ±1.75
3	β-石竹烯 Caryophyllene	20.06	1.51 ±0.45	5.23 ±3.77	4.92 ±3.32	3.03 ±0.45
	合计 Subtotal		36.58	63.97	119.94	45.90
醇类 Alcohol						
4	S-2-甲基丁醇 (S)-2-Methyl-1-butanol	2.85	5.38 ±2.14	—	15.44 ±9.44	14.81 ±3.35
5	2,2-二甲基-1-丁醇 2,2-Dimethyl-1-butanol	4.37	25.66 ±7.49	13.42±2.78	20.80±0.47	27.05±8.12
6	反式-3-己烯-1-醇 (E)-3-Hexen-1-ol	4.86	14.66 ±2.04	24.82 ±1.24	52.76±12.34	102.88 ±35.60
7	2-乙基己醇 2-Ethylhexanol	9.19	0.89 ±0.29	—	1.21 ±0.05	1.11 ±0.14
8	4-十二醇 4-Dodecanol	17.49	292.13 ±53.70	160.96 ±26.01	400.47 ±29.41	185.87 ±30.52
	合计 Subtotal		338.72	199.20	490.68	331.72
酯类 Ester						
9	异戊酸甲酯 Methyl isovalerate	3.24	2.06 ±1.02	2.87 ±0.08	4.79 ±1.45	10.75 ±1.40
10	己酸甲酯 Hexanoic acid, methyl ester	6.48	0.27 ±0.06	1.05 ±0.08	0.65 ±0.32	0.94 ±0.55
	癸酸甲酯 Decanoic acid, methyl ester	19.33	2.00 ±0.17	2.01 ±1.09	2.73 ±0.93	2.92 ±0.58
	合计 Subtotal		4.33	5.93	8.17	14.61
烷烃类 Alkane						
11	3-甲基十一烷 3-Methylundecane	13.47	85.19±12.34	32.66 ±0.88	118.68 ±3.70	54.07 ±12.00
	合计 Subtotal		85.19	32.66	118.68	54.07
酮类 Ketone						
12	6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one	8.05	1.62 ±0.43	1.58 ±0.33	6.34 ±2.34	—
	合计 Subtotal		1.62	1.58	6.34	0.00
苯环类 Benzenoids						
13	3,5-二甲氧基甲苯 3,5-Dimethoxytoluene	16.04	0.93 ±0.15	1.75 ±1.26	2.11 ±0.11	1.43 ±0.37
	合计 Subtotal		0.93	1.75	2.11	1.43

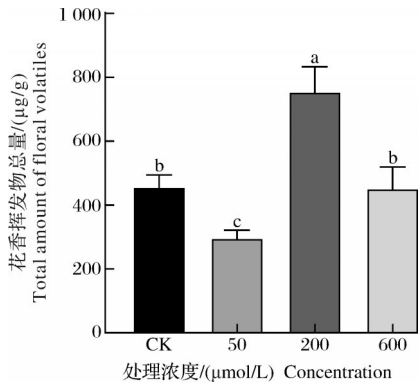


图 6 不同浓度 MeJA 处理后郁金香花香挥发物总释放量

Fig.6 The total release of tulip fragrance volatiles after treatment with different concentrations of MeJA

MeJA 可能对烷烃类挥发物的合成具有抑制作用。在植物芳香评价中,一般认为烷烃的香气阈值高,对香气的贡献率不大^[28]。因此,喷施 MeJA 后植物花朵或果实中烃类物质含量显著降低,使其他香气化合物含量占比随之升高,这可以达到调控植物香气

的效果。

对不同郁金香品种的花香挥发物测定结果表明,(E)-β-罗勒烯是郁金香属植物主要的单萜类气味化合物之一^[16]。(E)-β-罗勒烯常被描述为温暖的草本气息^[29],是蜡梅、浓香型百合‘Sorbonne’等植物的主要花香成分之一,与其他单萜类化合物一起主导了大多数蜡梅和百合品种的花香^[30-31]。本研究结果显示,(E)-β-罗勒烯是郁金香主要花香挥发物之一,在不同浓度 MeSA 和 MeJA 溶液处理下,其释放量均有显著提高。由此推测,通过喷施 50 μmol/L MeSA 溶液或 200 μmol/L MeJA 溶液来提高 (E)-β-罗勒烯的释放量,可以有效改善郁金香的花香性状。

综上所述,外源水杨酸甲酯和茉莉酸甲酯对郁金香花香挥发物的释放具有促进作用,但二者对于萜烯类合成途径的调控机制还有待深入研究,因此,将水杨酸甲酯及茉莉酸甲酯合成途径中的关键基因

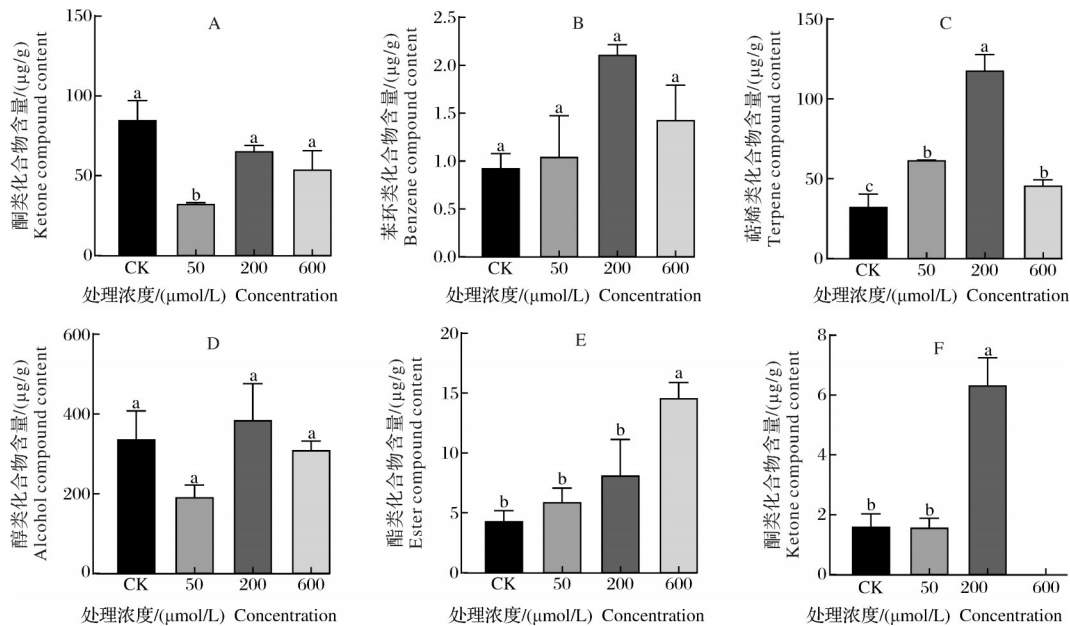


图7 不同浓度MeJA处理后郁金香不同种类花香成分含量

Fig. 7 The content of different kinds of floral components in tulip after treatment with different concentrations of MeJA

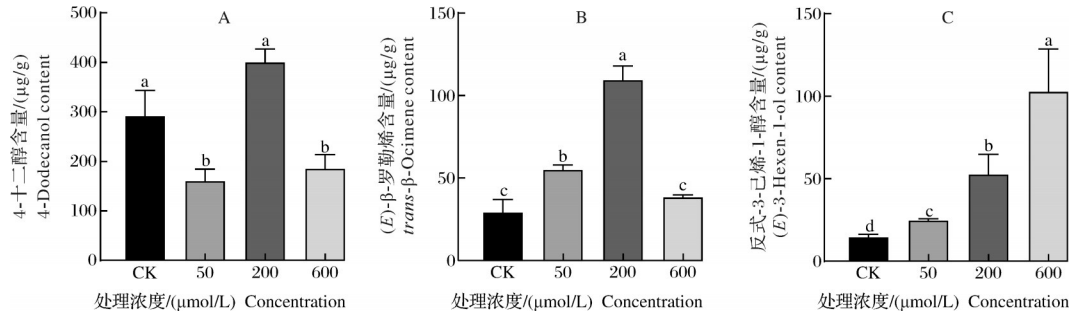


图8 不同浓度MeJA处理后郁金香主要花香成分含量

Fig. 8 The content of main floral components of tulip after treatment with different concentrations of MeJA

作为切入点,探究二者与萜烯合成途径中关键基因表达情况之间的调控关系,是今后从基因水平上进行花香改良和花香育种的有效途径之一。

参考文献References

[1] 吴琦,付宇辰,冷平生,等.茉莉酸甲酯(MeJA)处理时长对‘西伯利亚’百合花香的影响[C]//张启翔.中国观赏园艺研究进展.北京:中国林业出版社,2017:306-311.WU Q,FU Y C,LENG P S,et al.Effects of different treatment time of methyl jasmonate (MeJA) on the floral scent of *Lilium* ‘siberia’ [C]//ZHANG Q X.Advances in ornamental horticulture of China. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017: 306-311(in Chinese).

[2] 李莹莹.花香挥发物的主要成分及其影响因素[J].北方园艺,2012(6):184-187.LI Y Y.The main composition and affecting factors of aroma volatiles in flowers[J].Northern horticulture,2012(6):184-187 (in Chinese with English abstract).

[3] MUHLEMANN J K,KLEMPIEN A,DUDAREVA N.Floral volatiles: from biosynthesis to function[J].Plant, cell & en-

vironment,2014,37(8):1936-1949.

[4] 杨玲,田估,黄清俊.脱落酸处理对‘索邦’百合花香的影响[J/OL].分子植物育种,2023:1-8.[2024-08-06].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230516.1345.016.html>. YANG L, TIAN J,HUANG Q J.Effect of abscisic acid treatment on flower fragrance of ‘Sorbonne’ lily [J/OL]. Molecular plant breeding, 2023; 1-8. [2024-08-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230516.1345.016.html> (in Chinese with English abstract).

[5] 林江波,王伟英,邹晖,等.中国水仙水杨酸甲酯合成酶基因克隆与表达分析[J].热带亚热带植物学报,2013,21(2):141-146.LIN J B,WANG W Y,ZOU H,et al.Cloning and expression analysis of *NtSAMT1* gene from *Narcissus tazetta* var. *chinensis* [J]. Journal of tropical and subtropical botany, 2013,21(2):141-146 (in Chinese with English abstract).

[6] 邓雅楠,严俊鑫,杨慧颖,等.水杨酸甲酯对东北玉簪单宁含量和抗虫相关酶活性的影响[J].草业科学,2018,35(9):2087-2094.DENG Y N,YAN J X,YANG H Y,et al.Effect of methyl salicylate on tannin content and the activity of five in-

- sect-related enzyme in *Hosta ensata* [J]. Pratacultural science, 2018, 35(9): 2087-2094 (in Chinese with English abstract).
- [7] 史庆华, 朱祝军, 徐敏, 等. 外源水杨酸对黄瓜叶片几种酶活性和抗氧化物质含量的影响[J]. 园艺学报, 2004, 31(5): 666-667. SHI Q H, ZHU Z J, XU M, et al. Effects of exogenous salicylic acid on activities of some enzymes and antioxidants in cucumber leaves [J]. Acta horticulturae sinica, 2004, 31(5): 666-667 (in Chinese with English abstract).
- [8] 肖殿昭. 外源施用水杨酸甲酯诱导小麦间接防御反应的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023. XIAO D Z. Studies on the indirect defense response of wheat plant induced by exogenous methyl salicylate application [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张耀. 茉莉酸甲酯、水杨酸甲酯诱导木薯对二斑叶螨的防御效应研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023. ZHANG Y. Study on the defense effect of cassava induced by methyl jasmonate and methyl salicylate against *Tetranychus urticae* [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [10] PASTÍROVÁ A, REPČÁK M, ELIAŠOVÁ A. Salicylic acid induces changes of coumarin metabolites in *Matricaria chamomilla* L. [J]. Plant science, 2004, 167(4): 819-824.
- [11] NARAYANI M, SRIVASTAVA S. Elicitation: a stimulation of stress in *in vitro* plant cell/tissue cultures for enhancement of secondary metabolite production [J]. Phytochemistry reviews, 2017, 16(6): 1227-1252.
- [12] 孙晓玲, 董文霞, 蔡晓明, 等. 外用不同浓度茉莉酸甲酯诱导的茶树挥发物的种类和时序变化[J]. 应用昆虫学报, 2016, 53(3): 499-506. SUN X L, DONG W X, CAI X M, et al. Variation in tea-plant volatiles induced by exogenous application of different concentrations of methyl jasmonate [J]. Chinese journal of applied entomology, 2016, 53(3): 499-506 (in Chinese with English abstract).
- [13] 吴琦, 付宇辰, 闫子飞, 等. 喷施茉莉酸甲酯对百合花香的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(6): 100-104. WU Q, FU Y C, YAN Z F, et al. Effect of methyl jasmonate (MeJA) on floral scent of *Lilium* "Siberia" [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2018, 46(6): 100-104 (in Chinese with English abstract).
- [14] 周金鑫, 魏恬恬, 袁晓雨, 等. 外源茉莉酸甲酯处理对玫瑰花香成分及含量的影响[J]. 分子植物育种, 2019, 17(14): 4776-4784. ZHOU J X, WEI T T, YUAN X Y, et al. Effects of exogenous methyl jasmonate treatment on the volatile composition and content of *Rosa rugosa* [J]. Molecular plant breeding, 2019, 17(14): 4776-4784 (in Chinese with English abstract).
- [15] 郑伟颖. 气质联用技术在植物花叶挥发性成分分析中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016. ZHENG W Y. Study on the volatile analysis of the flowers and leaves in plants by gas chromatography-mass spectrometry [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [16] OYAMA-OKUBO N, TSUJI T. Analysis of floral scent compounds and classification by scent quality in tulip cultivars [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2013, 82(4): 344-353.
- [17] 袁媛. 郁金香花色苷合成基因的克隆及其表达差异与花色变化的关系[D]. 上海: 上海交通大学, 2015. YUAN Y. Cloning of genes related to anthocyanin biosynthesis and relationship between their differential expression and flower color mutation in tulip [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [18] 孔滢, 孙明, 潘会堂, 等. 花香代谢与调控研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(2): 146-154. KONG Y, SUN M, PAN H T, et al. Advances in metabolism and regulation of floral scent [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(2): 146-154 (in Chinese with English abstract).
- [19] 焦龙, 边磊, 罗宗秀, 等. 茉莉酸、水杨酸类激发子外源诱导的茶树挥发物比较[J]. 园艺学报, 2020, 47(5): 927-938. JIAO L, BIAN L, LUO Z X, et al. Comparison of tea plant volatiles exogenously induced by jasmonates or salicylates elicitors [J]. Acta horticulturae sinica, 2020, 47(5): 927-938 (in Chinese with English abstract).
- [20] WANG L B, BALDWIN E A, PLOTTO A, et al. Effect of methyl salicylate and methyl jasmonate pre-treatment on the volatile profile in tomato fruit subjected to chilling temperature [J]. Postharvest biology and technology, 2015, 108: 28-38.
- [21] 雒晓鹏, 朱冬寅, 黄云吉, 等. 茉莉酸甲酯对芽期苦荞黄酮积累及相关基因表达的影响[J]. 基因组学与应用生物学, 2015, 34(5): 1040-1046. LUO X P, ZHU D Y, HUANG Y J, et al. Effects of methyl jasmonate accumulation of flavonoids and related gene expression of buckwheat sprouts [J]. Genomics and applied biology, 2015, 34(5): 1040-1046 (in Chinese with English abstract).
- [22] 牛童非, 薛嫻, 郭丽丽, 等. 外源茉莉酸甲酯对温室牡丹'洛阳红'挥发性成分及含量的影响[J]. 林业科学, 2023, 59(5): 53-60. NIU T F, XUE X, GUO L L, et al. Effects of exogenous methyl jasmonate on volatile components and content of *Paeonia suffruticosa* 'Luoyanghong' in greenhouse [J]. Scientia silvae sinicae, 2023, 59(5): 53-60 (in Chinese with English abstract).
- [23] 王煥. MeJA 影响阳春砂挥发性萜类和转录组变化的研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2015. WANG H. Study on the effect of MeJA on the changes of volatile terpenoids and transcriptome in *Anomum villosum* [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [24] RAHNAMAIE-TAJADOD R, GOH H H, MOHD NOOR N. Methyl jasmonate-induced compositional changes of volatile organic compounds in *Polygonum minus* leaves [J/OL]. Journal of plant physiology, 2019, 240: 152994 [2024-08-06]. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2019.152994>.
- [25] LI W, LI W F, YANG S J, et al. Transcriptome and metabolite conjoint analysis reveals that exogenous methyl jasmonate regulates monoterpene synthesis in grape berry skin [J]. Journal of

- agricultural and food chemistry, 2020, 68(18):5270-5281.
- [26] 洪雅萍, 陈雪津, 王鹏杰, 等. 茉莉花萜类合成酶基因的转录组鉴定及响应外源激素的表达研究[J]. 生物技术通报, 2022, 38(3):41-49. HONG Y P, CHEN X J, WANG P J, et al. Transcriptome identification of terpenoid synthase genes in *Jasminum sambac* and their expressions responding to exogenous hormones[J]. Biotechnology bulletin, 2022, 38(3):41-49 (in Chinese with English abstract).
- [27] 马海云, 张忠林, 霍静. 外源施用茉莉酸甲酯对番茄果实挥发性风味成分及含量的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(7):182-190. MA H Y, ZHANG Z L, HUO J. Effect of exogenous application of methyl jasmonate on volatile flavor components and contents of tomato fruits[J]. Food science, 2024, 45(7):182-190 (in Chinese with English abstract).
- [28] ZHOU X Y, DENG J, LI F Z, et al. Studies on the volatile components in fermented chili products[J]. Journal of food science and biotechnology, 2007, 26(1):54-59.
- [29] CHARLES S. Fundamentals of fragrance chemistry[M]. New York: John Wiley & Sons, 2019.
- [30] 李莹莹. 蜡梅花挥发物组分测定及芳樟醇合成酶启动子分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. LI Y Y. Study of floral volatile components and *LINS* promoter structure in wintersweet (*Chimonanthus praecox*) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [31] 张辉秀, 胡增辉, 冷平生, 等. 不同品种百合花挥发性成分定性与定量分析[J]. 中国农业科学, 2013, 46(4):790-799. ZHANG H X, HU Z H, LENG P S, et al. Qualitative and quantitative analysis of floral volatile components from different varieties of *Lilium* spp. [J]. Scientia agricultura sinica, 2013, 46(4):790-799 (in Chinese with English abstract).

Effects of methyl salicylate and methyl jasmonate on volatile compounds of tulip flowers

CHEN Yuxin, LUO Qiao, PI Xuena, WU Mengyue, HOU Jianqi,
WANG Yanping, CHAN Zhulong, XIANG Lin

College of Horticulture & Forestry Sciences/National Key Laboratory for Germplasm Innovation & Utilization of Horticultural Crops, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract The effects of different concentrations of methyl salicylate (MeSA) and methyl jasmonate (MeJA) on the volatile compounds of tulip flowers were studied. Petals of tulip were sprayed with MeSA and MeJA of 50 $\mu\text{mol/L}$, 200 $\mu\text{mol/L}$ and 600 $\mu\text{mol/L}$. The volatile compounds of tulip flowers were determined and analyzed with headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) coupled with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that the volatile compounds of tulip flowers mainly included alcohols, alkanes, terpenes, benzenes, ketones, and esters, with the highest total release of alcohols. The content of the six types of compounds showed different trends of changing after spraying MeSA and MeJA of different concentrations. The release of terpenes increased significantly under the treatment with 50 $\mu\text{mol/L}$ MeSA or 200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA. 4-Dodecanol, (*E*)- β -ocimene, and *trans*-3-hexen-1-ol were the main volatile compounds in tulip flowers. Among them, the release of (*E*)- β -ocimene increased under the treatment with different concentrations of MeSA and MeJA. The release of (*E*)- β -ocimene under the treatment with 50 $\mu\text{mol/L}$ MeSA and 200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA was 10 times and 3.3 times higher than that of the control group. It is indicated that exogenous spraying of MeJA and MeSA significantly promotes the release of volatile compounds from tulip flowers. It will provide an important theoretical basis for selecting the appropriate concentration of MeJA and MeSA to improve the fragrance of tulip flowers.

Keywords tulip; flower fragrance; volatile compounds; methyl salicylate (MeSA); methyl jasmonate (MeJA)

(责任编辑:葛晓霞)