浙 江 农 林 大 学 学 报, 2026, **43**(5): 983−991 https://zlxb.zafu.edu.cn
Journal of Zhejiang A&F University DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20260184

引用格式: 金晟康, 张典铨, 华陈杰, 等. 茉莉酸甲酯对栀子花朵产量及花香成分的调控机制[J]. 浙江农林大学学报, 2026, **43**(5): 983−991. JIN Shengkang, ZHANG Dianquan, HUA Chenjie, *et al*. Regulatory mechanism of methyl jasmonate on *Gardenia jasminoides* yield and floral aroma components[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, **43**(5): 983−991.

茉莉酸甲酯对栀子花朵产量及花香成分的调控机制

金晟康[1,2]，张典铨[3]，华陈杰[1,2]，欧泽慧[1,2]，李　娟[1,2]，李金燃[1,2]，邹双全[1,2]

（1. 福建农林大学 林学院，福建 福州 350002；2. 福建农林大学 自然生物资源保育利用福建省高校工程研究中心，福建 福州 350002；3. 福鼎市桐城林业工作站，福建 福鼎 355200）

摘要：【目的】探究茉莉酸甲酯 (MeJA) 对栀子 *Gardenia jasminoides* 花朵产量、挥发性有机物 (VOCs) 合成及香气特征的调控作用，明确其最佳施用浓度以提升栀子花香气品质。**【方法】**以 2 年生栀子‘分关 1 号’‘Fenguan No. 1’扦插苗为材料，设置喷施 0.25 (M1)、0.50 (M2)、0.75 (M3)、1.00 (M4) 和 1.25 (M5) mmol·L^{-1} MeJA 的 5 种处理，以喷施清水为对照 (ck)，采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术 (HS-SPME-GC-MS) 分析 VOCs 组成，并结合香气活性值 (OAV) 评估其香气贡献。**【结果】**MeJA 处理影响了栀子花单株产量、VOCs 的种类和比例，其中萜烯类、醇类和酯类为主要成分。M5 处理可显著提高栀子花的单株产量 ($P<0.05$)，M1 和 M4 处理可提升芳樟醇等关键香气物质的质量分数和 OAV，呈现双峰型剂量-响应效应；而 M2 及 M5 处理则出现抑制现象。聚类分析显示：M4 处理在香气轮廓上与其他组差异明显，为最佳施用浓度。**【结论】**明确了 MeJA 调控栀子花香气的最佳浓度为 1.00 mmol·L^{-1}，提升产量的最佳浓度为 1.25 mmol·L^{-1}；MeJA 对香气合成呈双峰型非线性浓度依赖效应，芳樟醇、大马氏酮和 *α*-法尼烯为关键贡献物质。图 4 表 3 参 28

关键词：栀子；茉莉酸甲酯；挥发性有机物；香气活性值；剂量-响应效应

中图分类号：S682　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2026)05-0983-09

Regulatory mechanism of methyl jasmonate on *Gardenia jasminoides* yield and floral aroma components

JIN Shengkang[1,2], ZHANG Dianquan[3], HUA Chenjie[1,2], OU Zehui[1,2], LI Juan[1,2], LI Jinran[1,2], ZOU Shuangquan[1,2]

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Fujian Colleges and Universities Engineering Research Center for Conservation & Utilization of Natural Bioresources, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 3. Tongcheng Forestry Workstation of Fuding City, Fuding 355200, Fujian, China)

Abstract: [**Objective**] To investigate the regulatory effects of methyl jasmonate (MeJA) on flower yield, volatile organic compounds (VOCs) synthesis, and aroma characteristics in *Gardenia jasminoides*, and to determine its optimal application concentration for enhancing floral fragrance quality. [**Method**] Two-year-old *G. jasminoides* ‘Fenguan No. 1’ cuttings were used as materials. MeJA was applied at 5 concentrations (0.25, 0.50, 0.75, 1.00, and 1.25 mmol·L^{-1}), corresponding to treatments M1, M2, M3, M4, M5, with water spray as the control (ck). Headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) was utilized to analyze the composition of volatile organic compounds, and the odour

收稿日期：2026-03-06；修回日期：2026-08-14

基金项目：中央财政林业科技推广示范项目 (闽〔2024〕TG22)；福建省科技厅高校产学合作项目 (2022N5009)；福州市林业科技项目 (2024RLKY02)

作者简介：金晟康 (ORCID: 0009-0000-3475-2372)，从事药用植物科技与利用研究。E-mail: klaus1204@163.com。通信作者：邹双全 (ORCID: 0000-0002-4125-7916)，研究员，博士生导师，从事森林培育和观赏药用植物研究。E-mail: zou@fafu.edu.cn

activity value (OAV) was employed to evaluate their aromatic contributions. [**Result**] MeJA treatments influenced the per-plant flower yield, as well as the types and proportions of volatiles, which mainly consisted of terpenes, alcohols, and esters. M5 treatment significantly increased per-plant yield ($P<0.05$), while M1 and M4 treatments elevated the content and OAV of key aroma compounds such as linalool, exhibiting a bimodal dose-response pattern; whereas M2 and M5 treatments showed inhibitory effects. Cluster analysis revealed that M4 treatment exhibited a distinct aroma profile compared to other groups, confirming it as the optimal concentration. [**Conclusion**] The optimal concentration of MeJA for enhancing floral aroma quality was determined to be 1.00 mmol·L^{-1}, whereas the optimal concentration for maximizing flower yield was 1.25 mmol·L^{-1}. Aroma compound biosynthesis showed a nonlinear, bimodal concentration-dependent response to MeJA, with linalool, *β*-damascenone, and *α*-farnesene identified as the key contributing compounds. [Ch, 4 fig. 3 tab. 28 ref.]

Key words: *Gardenia jasminoides*; methyl jasmonate (MeJA); volatile organic compounds (VOCs); odour activity value (OAV); dose-response effect

栀子 *Gardenia jasminoides* 凭借其观赏价值、药用功效及独特香气，在园艺和中医药领域具有重要的经济地位[1]。当前，围绕其传统药用成分 (如栀子苷、总黄酮等) 的研究已日趋成熟[2]。近年来，优化栀子花的香气品质，已成为提升栀子花附加值和药用价值的新突破口[3]。栀子花的香气主要由挥发性有机物 (VOCs) 构成，其组成与相对含量直接决定了香气的感官特征[4]。因此，探究栀子花 VOCs 合成的有效途径，调控栀子花香气特征，已成为当前研究的热点。

茉莉酸甲酯 (MeJA) 是一种天然的植物激素，已被广泛用于植物次生代谢的调控。作为植物体内特殊的信号分子，MeJA 可以通过激活或抑制植物体内特定代谢途径，对 VOCs 的合成发挥调控作用[5]。相关研究表明：MeJA 不仅能促进草莓 *Fragaria×ananassa*、葡萄 *Vitis vinifera*、芒果 *Mangifera indica*、番茄 *Solanum lycopersicum* 等植物香气成分的合成，还能调控芳香醛、萜烯和醇类等 VOCs 成分[6]。MeJA 能通过改变茶叶[7] 中香气物质的种类及强度来影响茶香，并且与其浓度有一定的关联性。在玫瑰 *Rosa damascena* 花香气的研究中，MeJA 能显著提高萜烯类和芳香醛类物质的合成，从而提升玫瑰花的香气特征[8]。

除次生代谢外，MeJA 在某些植物的生殖生长及花朵产量调控方面也有实证研究。例如，在油菜 *Brassica napus* 中，外源 MeJA 可促进早花品种增加开花数，并调节花器官形态及花期[9]；在金盏菊 *Calendula officinalis* 中，MeJA 与抗坏血酸结合能显著提升花朵数量与直径，以及枝叶与根的生物量[10]；在枣 *Ziziphus jujuba* 中，喷施 MeJA 可提高果实的可溶性固形物含量，维持抗氧化活性[11]。这些发现表明 MeJA 在协调植物产量与品质方面具有双重潜力。

虽然近些年的研究已说明在少数植物中 MeJA 对 VOCs 合成具有显著的调控作用，但关于 MeJA 对栀子花香气物质的调控，以及其剂量效应和机制，仍然存在较大的研究空白，且不同浓度 MeJA 对栀子花香气物质的影响及提升香气物质的最佳浓度尚不明确。因此，探索不同浓度 MeJA 对栀子花朵产量及香气物质合成的剂量与响应关系，对揭示其调控机制，提升栀子花朵产量与香气品质，增强其药用价值，具有重要的理论和实践价值。

为此，本研究以栀子‘分关 1 号’‘Fenguan No. 1’为材料，设置不同浓度的外源 MeJA 喷施处理，采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用 (HS-SPME-GC-MS) 技术检测香气成分，结合香气活性值 (OAV) 定量评估关键物质的香气贡献，并基于聚类分析筛选最优处理浓度，揭示 MeJA 调控栀子花香气物质的剂量-响应规律，为栀子花香气品质的定向栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验地位于三明市沙县区桂山自然村 (26°26′N，117°41′E)，属亚热带季风性气候，年平均气温为

17.5~19.5 ℃，年平均降水为 1 600~1 800 mm，无霜期为 305 d，试验地为平坦菜园地。选择健康且长势基本一致的 2 年生栀子‘分关 1 号’扦插苗，每盆种植 1 株，于 2022 年 12 月定植。盆栽土壤基质为珍珠岩与红壤土混合土，按体积比 1∶4 混匀，露天培养，统一浇水、除草，生长期内不使用任何植物生长调节剂。

1.2　试验设计

选用 MeJA 为外源激素，分别设置喷施 0.25 (M1)、0.50 (M2)、0.75 (M3)、1.00 (M4) 和 1.25 (M5) mmol·L^{-1} MeJA 的 5 种处理，并以喷施清水为对照 (ck)。每处理 20 株，共 120 株。2023 年 4 月初 (开花前) 进行喷施试验，喷施方式为叶片喷施，喷施量为 50 mL·株$^{-1}$，每 7 d 喷 1 次，连续喷施 2 次。

1.3　花样采集与花香物质提取

于 5 月中旬盛花期进行集中采样。该时期花朵生理代谢旺盛，与 VOCs 合成相关的酶活性达到峰值，香气释放最为完全，能最准确地反映 MeJA 处理对最终香气品质的调控效应[12]。为保证生物学重复的典型性与一致性，在排除边缘效应的前提下，各处理均随机选取 6 株长势一致、表型一致 (株高、冠幅等) 的健康植株作为代表性样本[13]，对每株选取发育状态完全一致的标准盛开花朵 (花瓣完全展开、颜色洁白、花药已开裂且无褐变萎蔫) 进行采集。将每处理的采集样本均随机分为 2 组：其中一组的花朵经去离子水洗净并吸干表面水分后，称取鲜质量，记录单株花朵产量 (g·株$^{-1}$)；另一组的花朵样本在采集后迅速经干冰处理，并转移至−80 ℃ 超低温冰箱中冻存，用于后续花香挥发性成分的测定。

1.4　花香成分检测

采用 HS-SPME-GC-MS 进行检测。称样放入 20 mL 顶空瓶，加入内标 2-辛醇 (5 mg·L^{-1}) 与饱和的 NaCl，加热至 80 ℃ 持续 30 min，顶空萃取 30 min，再 250 ℃ 解吸 5 min[14]。色谱条件为：使用 HP-5MS 色谱柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm)，程序升温至 50 ℃ 保持 2 min，再以 5 ℃·min^{-1} 升至 180 ℃，保持 5 min，再以 10 ℃·min^{-1} 升至 250 ℃，保持 5 min；进样口 250 ℃，传输线 280 ℃，载气流速 1.0 mL·min^{-1}。质谱条件为：EI 离子源 230 ℃，四极杆 150 ℃，全扫描范围质荷比 (*m/z*) 40~600。结果通过 AMDIS 与 NIST11 库进行比对，结合保留指数 (RI) 鉴定化合物，并以 2-辛醇为内标进行定量分析[15]。

1.5　关键香气物质筛选

各化合物香气阈值主要参考文献 [16−18]，对于不同来源存在差异的阈值，本研究综合选取较为公认的数值。计算各挥发性化合物的香气活性值 (OAV)[19]，基于各物质在所有处理中可达到的最高 OAV，将 OAV＞1 000 的化合物定义为“主导性香气”，100＜OAV≤1 000 的定义为“关键香气”，1＜OAV≤100 的定义为“特征香气”，并筛选关键香气物质。

1.6　数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理。数据统计分析及可视化均使用 R (v4.3.1) 完成。利用 stats 程序包对花朵产量的差异进行单因素方差分析 (one-way ANOVA)，并采用 agricolae 包进行 Duncan’s 多重比较检验 (P＜0.05)。采用 ggplot2 包绘制化合物种类堆积图，采用 UpSetR 包绘制 Upset 图。OAV 评估的指标计算参考张铭铭等[20] 的方法。差异倍数 (F_C) 比较：将各处理中香气物质的质量分数与 ck 进行比较，计算 $\log_2 F_C$ 转换倍数，以展示各物质的变化倍数与方向；相对组成分析：对关键香气物质的质量分数进行 *Z*-score 标准化，并利用标准化数据进行层次聚类分析 (HCA)，以热图呈现处理组与物质间的整体调控关系。

2　结果与分析

2.1　不同浓度 MeJA 处理对栀子花朵产量的影响

喷施 MeJA 对栀子花朵产量的影响如表 1 所示。结果表明：不同浓度 MeJA 对花朵产量具有显著影响 (F＝3.43，P＜0.05)。M5 处理的花朵产量最高，平均达 (20.16±0.66) g·株$^{-1}$，且显著高于 ck (P＜0.05)，其余处理的花朵产量与 ck 相比，虽也有提高但均不显著。

2.2　不同浓度 MeJA 处理栀子花 VOCs 多样性的变化

由图 1 可知：不同浓度 MeJA 处理下，栀子花 VOCs 总质量分数发生变化，M1 处理的总质量分数

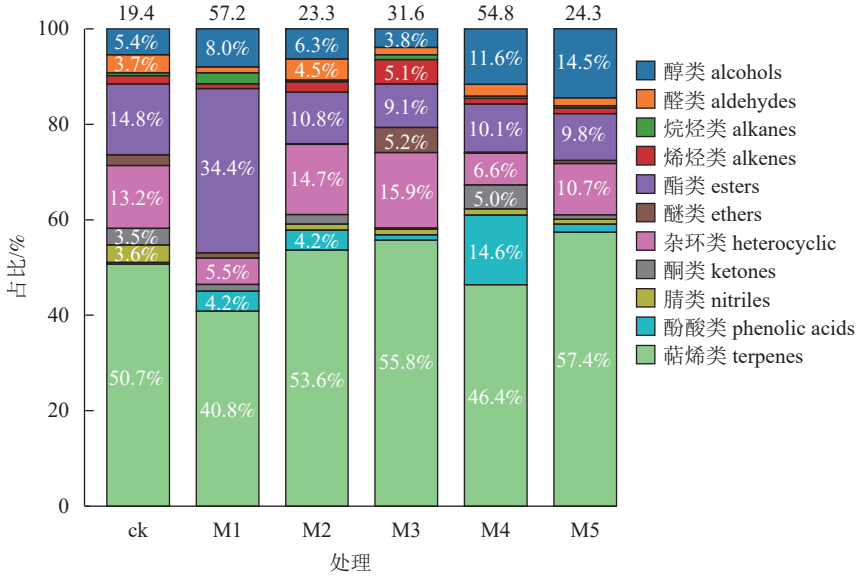
最多，M4 处理次之。各处理栀子花的 VOCs 可分为萜烯类、酯类、杂环类、醇类、酚酸类、烷烃类、醛类、腈类、酮类、醚类、烯烃类等 11 类，且 VOCs 的组成比例有明显差异。ck 的萜烯类化合物占比最高，为 50.7%，其次为酯类 (14.8%) 和杂环类 (13.2%)，说明自然状态下萜烯类化合物为最主要的香气成分。M1 处理中，萜烯类占比为 40.8%，但酯类比例大幅提升至 34.4%，为各处理中最高。M2 处理中，萜烯类占比为 53.6%，醇类和酯类占比降低。M3 处理中，萜烯类占比升至 55.8%，并伴随醇类进一步下降。M4 和 M5 处理中，萜烯类占比分别为 46.4% 和 57.4%，M5 处理的萜烯类和醇类占比为各处理中最高，而酯类占比相比 ck 明显减少。

表 1　不同浓度 MeJA 对栀子花朵产量的影响

Table 1　Effects of different concentrations of MeJA treatment on *G. jasminoides* flower yield

处理	MeJA浓度/(mmol·L^{-1})	花朵产量/(g·株$^{-1}$)		
		最大值	最小值	平均值
ck	0	16.23	11.86	13.85±2.21 b
M1	0.25	20.07	13.64	16.59±3.25 ab
M2	0.50	21.41	15.32	17.79±3.20 ab
M3	0.75	20.78	13.41	15.90±4.22 ab
M4	1.00	17.05	13.45	15.56±1.88 ab
M5	1.25	20.78	19.47	20.16±0.66 a

说明：数据为平均值±标准差 (n>3)。同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 (P<0.05)。



柱状图顶部数值表示各处理中化合物的总质量分数 (mg·kg^{-1})。

图 1　不同浓度 MeJA 处理对栀子花各类化合物占比的影响

Figure 1　Effects of MeJA treatments at different concentrations on the proportion of compound types in *G. jasminoides* flowers

2.3　不同浓度 MeJA 处理栀子花各类花香物质的交集分析

由图 2 可知：各处理的化合物总数由大到小依次为 ck、M5、M1、M3、M2、M4。其中 M4 处理的独有化合物数量最少，为 46 个，M5 处理的独有化合物数量最多，说明这 2 个浓度下激发产生的香气物质效果较为特殊。整体来看，所有处理拥有 9 种共有挥发物，它们可能是 MeJA 信号通路中最稳定被激活的代谢产物。不同浓度处理会诱导出不同数量的化合物，化合物种类也有较大差异，但各处理间存在 2 或 3 个相同的化合物。这说明 MeJA 对栀子花香气合成存在复杂的调控机制，主要体现在对 MeJA 浓度的依赖上，不同浓度会激活略微不同的代谢路径，形成不同的香气轮廓。

2.4　栀子花关键花香物质对不同浓度 MeJA 处理的差异响应模式

栀子花的关键花香物质积累与响应模式如图 3~4 所示。芳樟醇在所有处理中的 $\log_2 F_C$ 最高，并在 M4 处理下达峰值，其 Z-score 标准化值在 M5 处理中也最为突出，表明芳樟醇是栀子花基础花香的稳定核心成分，且其合成受 MeJA 浓度影响。苯乙醇与香叶醇的响应模式相似，两者在 M4 处理下的 $\log_2 F_C$ 均处于较高水平，说明 M4 处理可能协同促进栀子花中玫瑰花香物质的合成通路。

从横向聚类看，M1 与 M4 处理聚为一类，表明两者对关键香气物质的调控模式较为相似。例如，两者对芳樟醇、香叶醇等物质的促进效应一致。ck 与 M2 处理聚为一类，最终与 M3 和 M5 处理汇合，

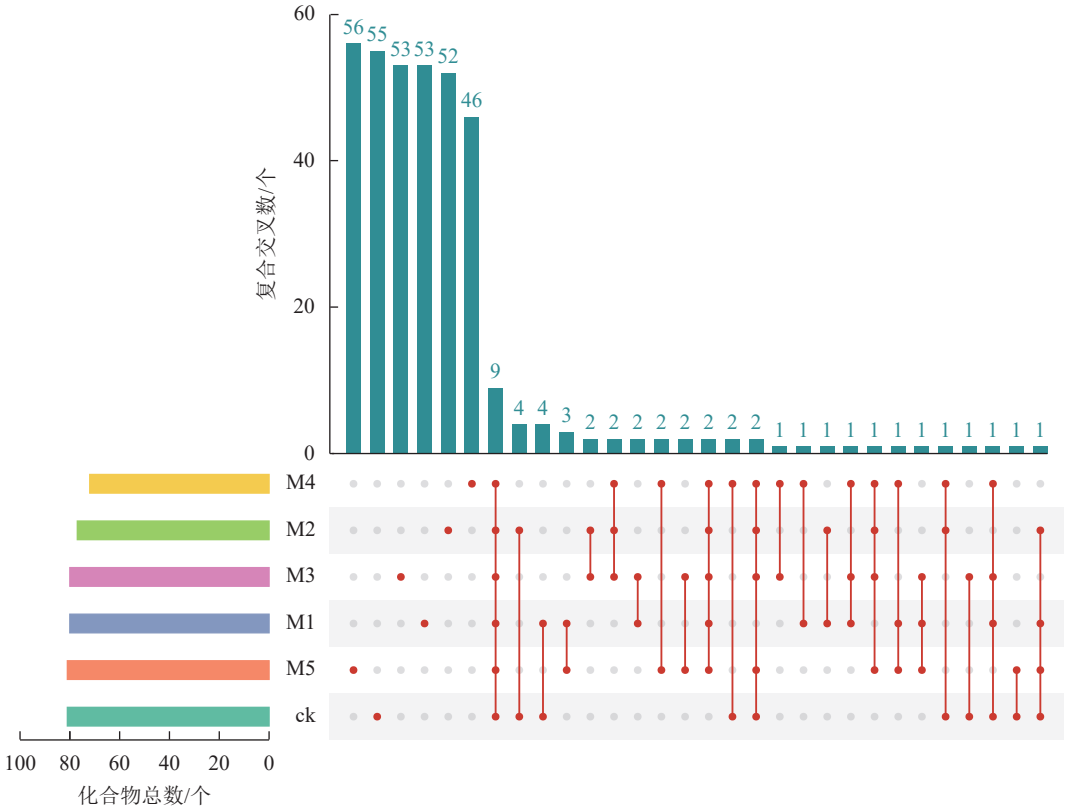


图 2　不同浓度 MeJA 处理栀子花各类化合物的 Upset 图

Figure 2　Upset plot of various compounds in *G. jasminoides* flowers under different MeJA treatments

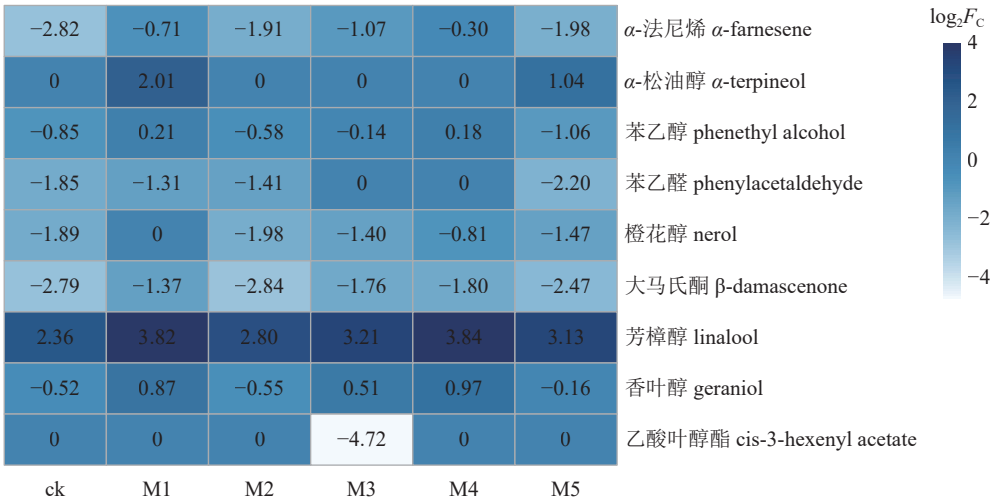


图 3　不同浓度 MeJA 处理栀子花关键香气物质倍数变化的 $\log_2 F_C$ 热图

Figure 3　Heatmap of $\log_2 F_C$ values for key aroma compounds in *G. jasminoides* flowers under different MeJA treatments

这一非线性的聚类结构说明：不同 MeJA 处理对关键香气物质合成调控并非呈线性梯度，特定浓度可能通过相似的代谢网络产生双峰型的剂量-响应效应。

从纵向聚类看，关键香气物质根据其响应模式被分为两大类。第 1 类以大马氏酮等物质为代表，其在 M3 处理中维持较高的 *Z*-score 标准化值；第 2 类以芳樟醇、橙花醇为代表，呈现复杂的浓度依赖性。这种分化的响应模式，揭示了 MeJA 信号对不同香气物质的合成通路存在特殊的调控机制。

2.5　MeJA 处理对栀子花香气物质 OAV 的调控效应

由表 2 可知：栀子花香气品质由多种 VOCs 组成，其香气阈值差异明显，直接决定了不同的感官贡献水平。大马氏酮的香气阈值极低，为 0.002 μg·kg^{-1}，决定了其极高的 OAV，存在微量即可产生明显的感官影响；*α*-法尼烯 (1.000 μg·kg^{-1})、芳樟醇 (0.820 μg·kg^{-1}) 及橙花醇 (0.290 μg·kg^{-1}) 等较低的香气阈

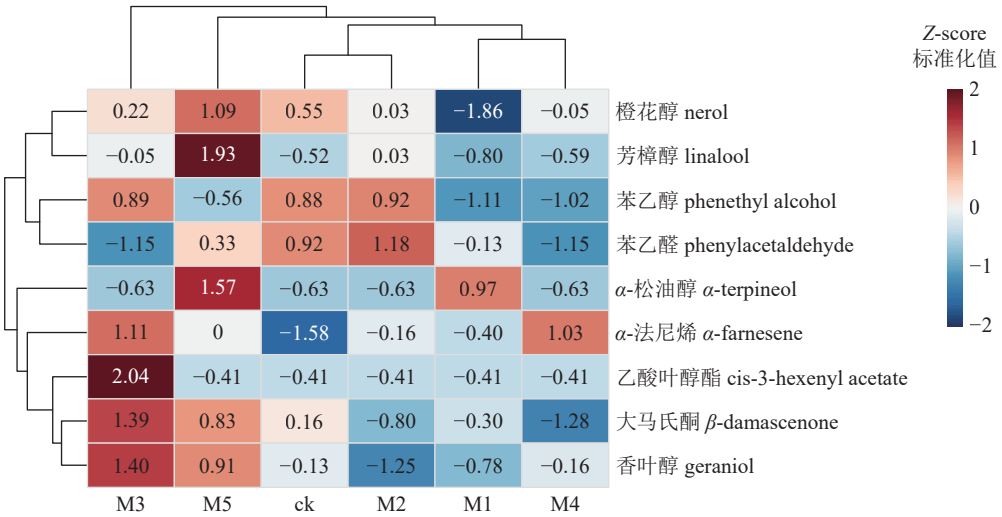


图 4 基于 Z-score 标准化的栀子花关键香气物质热图

Figure 4 Heatmap of key aroma compounds in *G. jasminoides* flowers based on *Z*-score normalization

值，也使其成为高敏感性物质。它们分别赋予了栀子花青苹果、花香、木香和甜橙基调的香气轮廓，并与 α-松油醇 (紫丁香、木香)、苯乙醛 (风信子、蜂蜜)、香叶醇 (玫瑰花香) 和苯乙醇 (玫瑰花香) 等共同构成了多层次、复合型的栀子香气特征。

表 2 栀子花关键香气物质的阈值和香气品质

Table 2 Aroma thresholds and aroma quality of key aroma compounds in *G. jasminoides* flowers

化合物	CAS号	类别	香气阈值/(μg·kg^{-1})	香气描述	感官影响评价
大马氏酮β-damascenone	23726-93-4	萜烯酮terpenones	0.002	苹果、烟草	主导性香气
芳樟醇linalool	78-70-6	单萜醇monoterpenols	0.820	花香、木香	主导性香气
橙花醇nerol	106-25-2	单萜醇monoterpenols	0.290	甜橙花、玫瑰	主导性香气
α-松油醇α-terpineol	98-55-5	单萜醇monoterpenols	1.800	紫丁香、木香	主导性香气
α-法尼烯α-farnesene	502-61-4	倍半萜烯sesquiterpenes	1.000	青苹果、木质	关键香气
苯乙醛phenylacetaldehyde	122-78-1	芳香醛aromatic aldehydes	4.000	风信子、蜂蜜	关键香气
香叶醇geraniol	106-24-1	单萜醇monoterpenols	4.100	玫瑰花香	关键香气
乙酸叶醇酯cis-3-hexenyl acetate	3681-71-8	酯类esters	9.000	青草、水果	特征香气
苯乙醇phenethyl alcohol	60-12-8	芳香醇aromatic alcohols	1 100.000	玫瑰花香	特征香气

由表 3 可知：不同浓度 MeJA 处理对香气物质 OAV 的调控存在明显差异与浓度特异性。在 M1 与 M4 处理下，芳樟醇的 OAV 极高，分别为 17 264.63 和 17 423.17，说明 M1 与 M4 处理会促进栀子花香特征的表达，增强其花香和木香。大马氏酮的 OAV 在各处理都处于最高水平 (70 000.00~193 500.00)，且在 M1 处理下达到峰值，表明 M1 处理可极大增强其苹果香。

α-松油醇凭借其极低的香气阈值，即使在花香成分中质量分数很低，却对整体香气仍具有极大贡献，该化合物虽仅在 M1 和 M5 处理被检出，但其 OAV 均达到千数量级，说明在 M1 与 M5 处理下会形成特殊通路，表达出极强的紫丁香气味。α-法尼烯、香叶醇和苯乙醇等均在 M1 或 M4 处理出现 OAV 双峰值，其中青苹果香、玫瑰花香在 M1 和 M4 处理下大幅增加，α-法尼烯的 OAV 分别达 613.00 和 814.00。

整体上，各物质 OAV 对 MeJA 浓度的响应呈非线性变化，表明其合成调控存在复杂的生理与生化途径依赖。M1 与 M4 处理下芳樟醇 OAV 大幅升高，与感官评价中花香增强一致；M5 处理香气减弱，可能与高浓度 MeJA 抑制萜烯合成有关。从 OAV 综合响应来看，M4 处理为最优浓度，该浓度下芳樟醇、香叶醇、橙花醇和 α-法尼烯等关键花香物质的香气活性均处于较高水平，表明该浓度可促进多条代谢通路，实现香气品质的整体提升。相比之下，M5 处理下多数物质的 OAV 大幅下降，说明高浓度 MeJA 抑制代谢，导致香气合成效率降低。

表 3　不同浓度 MeJA 处理栀子花关键香气物质的香气活性值 (OAV)

Table 3　Odour activity value (OAV) values of the key aroma compounds in *G. jasminoides* flowers under different MeJA treatments

化合物	OAV					
	ck	M1	M2	M3	M4	M5
大马氏酮 *β*-damascenone	72 500.00	193 500.00	70 000.00	148 000.00	144 000.00	90 500.00
芳樟醇 linalool	6 279.27	17 264.63	8 464.63	11 276.83	17 423.17	10 703.66
橙花醇 nerol	931.03	–	875.86	1 303.45	1 965.52	1 248.28
α-法尼烯 *α*-farnesene	142.00	613.00	267.00	476.00	814.00	253.00
α-松油醇 *α*-terpineol	–	2 230.00	–	–	–	1 142.22
苯乙醛 phenylacetaldehyde	69.50	100.75	94.00	–	–	54.50
香叶醇 geraniol	170.24	447.32	166.59	346.83	478.05	219.02
乙酸叶醇酯 cis-3-hexenyl acetate	–	–	–	4.22	–	–
苯乙醇 phenethyl alcohol	0.51	1.05	0.61	0.82	1.03	0.38

说明：–表示未检测到该化合物。

3　讨论

不同浓度的 MeJA 不仅影响了栀子花的单株产量，还大幅重塑了挥发性化合物的种类与比例。其中，M5 (1.25 mmol·L^{-1}) 处理显著提高了栀子花的单株产量，而 M1 (0.25 mmol·L^{-1}) 与 M4 (1.00 mmol·L^{-1}) 处理提高了芳樟醇、香叶醇等主要香气物质的 OAV。这种差异化响应模式揭示了不同浓度 MeJA 在栀子花香气调控中的复杂性，这与 CHEN 等[3] 关于萜烯合酶底物选择性调控机制的研究结论一致。

本研究发现：M5 处理虽获得了最高的单株产量，但其关键香气物质的 OAV 并非最高；而单株产量仅处于中等水平的 M4 处理却表现出最优的香气品质。这一现象符合植物生理生态学中的资源权衡理论，即植物体内的光合产物和资源是有限的，当 MeJA 作为信号分子引导资源向生长和生殖 (如花朵产量) 倾斜时，可能会在一定程度上削弱对次生代谢产物 (如香气物质) 合成的投入[21−23]。这种生长与防御次生产物之间的资源竞争，可能是导致高产伴随香气品质下降的重要原因。

MeJA 对栀子花香气物质的影响呈复杂的浓度依赖性，在 M1 与 M4 处理均出现双峰值的响应模式，这可能与 MeJA 所调控的不同次生代谢通路及其相互竞争有关。低浓度 M1 和中高浓度 M4 处理下，MeJA 增强了芳樟醇、香叶醇等香气成分的 OAV，可能是该浓度的 MeJA 有效激活了质体中的甲基赤藓醇磷酸 (MEP) 途径，苯乙醇、苯乙醛等芳香族化合物在高浓度下被抑制，这可能与细胞质中苯丙烷代谢途径的差异调控有关[24]。而高浓度 MeJA 下的高产 M5 处理的香气品质下降，可能与茉莉酸信号通路下游防御基因过度激活导致的资源分配有关[25−26]。

通过计算 OAV，本研究定量解析了栀子花香气的物质基础。结果显示：芳樟醇、大马氏酮和 *α*-法尼烯是栀子花香气的关键物质。其中，芳樟醇在 M1 和 M4 处理中 OAV 极高，尤其在 M4 处理下，其 OAV 为 17 423.17，体现了其对栀子花香气的主导作用。大马氏酮的 OAV (70 000.00~193 500.00) 在所有物质中占据绝对主导地位，其浓郁的苹果香构成了栀子花香气的基础。这与庄玥莹等[27] 和 DONG 等[28] 关于其他芳香植物中花香物质合成与调控的研究一致，进一步证实了萜烯类物质在栀子花香气中的主体地位。

4　结论

本研究揭示了 MeJA 对栀子花朵产量、香气物质合成的非线性浓度依赖效应，结果显示：M5 处理可显著提升栀子单株花朵产量，M4 处理为优化栀子花香气品质的最优浓度，芳樟醇、大马氏酮和 *α*-法尼烯是栀子花香气的核心贡献物质。该结果体现了产量与香气品质间的权衡关系，表明在生产中可通过精准调控 MeJA 喷施浓度，在维持一定产量的前提下优化栀子花香气品质。可进一步研究 MeJA 与水肥管理、修剪等农艺措施间的协同效应，以实现栀子花优质高产的精准栽培。

5 参考文献

[1] 史永平, 孔浩天, 李昊楠, 等. 栀子的化学成分、药理作用研究进展及质量标志物预测分析[J]. 中草药, 2019, **50**(2): 281−289. SHI Yongping, KONG Haotian, LI Haonan, *et al*. Research progress on chemical composition and pharmacological effects of *Gardenia jasminoides* and predictive analysis on quality marker (Q-marker)[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2019, **50**(2): 281−289. DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2019.02.003.

[2] 陈榕, 何梓炫, 颜烨, 等. 栀子及其主要成分的药理及毒性作用研究进展[J]. 中草药, 2023, **54**(18): 6092−6105. CHEN Rong, HE Zixuan, YAN Ye, *et al*. Research progress on pharmacological and toxic effects of gardeniae fructus and its main components[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2023, **54**(18): 6092−6105. DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2023.18.027.

[3] CHEN Qizhen, WANG Menglan, GAO Longlong, *et al*. A pivotal switch in β-domain determines the substrate selectivity of terpene synthases involved in *Gardenia jasminoides* floral scent synthesis[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, **288**: 138333. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.138333.

[4] CAI Yan, CHEN Hannan, ZHANG Xin, *et al*. Benefits of *Gardenia jasminoides* Ellis's floral volatile components on human emotions and moods[J]. *Scientific Reports*, 2025, **15**: 4194. DOI: 10.1038/s41598-024-84190-w.

[5] JEYASRI R, MUTHURAMALINGAM P, KARTHICK K, *et al*. Methyl jasmonate and salicylic acid as powerful elicitors for enhancing the production of secondary metabolites in medicinal plants: an updated review[J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 2023, **153**(3): 447−458. DOI: 10.1007/s11240-023-02485-8.

[6] SHI Ruixi, YU Jinlan, CHANG Xiaorong, *et al*. Recent advances in research into jasmonate biosynthesis and signaling pathways in agricultural crops and products[J]. *Processes*, 2023, **11**(3): 736. DOI: 10.3390/pr11030736.

[7] 施江. 外源茉莉酸甲酯诱导对茶树鲜叶次生代谢产物的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014. SHI Jiang. *Effect on Secondary Metabolites in Tea Leaves Induced by Exogenous Methyl Jasmonate*[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.

[8] ZAMANI M, SABOORA A, EBADI M T, *et al*. Impact of foliar applications of MeJA and MgO-NPs on secondary metabolites and essential oil of *Rosa damascena* Mill.[J]. *Functional Plant Biology*, 2025, **52**(10): FP25025. DOI: 10.1071/FP25025.

[9] PAK H, GUO Yuan, CHEN Mingxun, *et al*. The effect of exogenous methyl jasmonate on the flowering time, floral organ morphology, and transcript levels of a group of genes implicated in the development of oilseed rape flowers (*Brassica napus* L.)[J]. *Planta*, 2009, **231**(1): 79−91. DOI: 10.1007/s00425-009-1029-9.

[10] LASHKARI A, SAADATI S, SAFFARI V R. Methyl jasmonate and ascorbic acid enhance salinity tolerance in pot marigold (*Calendula officinalis* L.) through improved morphophysiological and biochemical traits[J]. *Scientific Reports*, 2025, **15**: 30434. DOI: 10.1038/s41598-025-16597-y.

[11] OZTURK B, KARAKAYA O, AGLAR E, *et al*. Impacts of methyl jasmonate treatments on quality properties and bioactive compounds of jujube fruit (*Ziziphus jujuba*) during cold storage[J]. *BMC Plant Biology*, 2025, **25**(1): 1064. DOI: 10.1186/s12870-025-07140-2.

[12] GUO Yuhong, CHEN Xiling, LI Jinhong, *et al*. Single-cell RNA sequencing reveals a high-resolution cell atlas of petals in *Prunus mume* at different flowering development stages[J]. *Horticulture Research*, 2024, **11**(9): uhae189. DOI: 10.1093/hr/uhae189.

[13] WALTER A, LIEBISCH F, HUND A. Plant phenotyping: from bean weighing to image analysis[J]. *Plant Methods*, 2015, **11**(1): 14. DOI: 10.1186/s13007-015-0056-8.

[14] 徐晓俞, 李爱萍, 吴思逢, 等. 栀子鲜花花水和鲜花细胞液气相和液相的成分分析[J]. 中国农业科学, 2020, **53**(22): 4710−4726. XU Xiaoyu, LI Aiping, WU Sifeng, *et al*. Composition analysis of gas phase and liquid phase of fresh floral water extract and fresh flowers cell sap from *Gardenia jasminoides*[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, **53**(22): 4710−4726. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2020.22.017.

[15] 胡卫珍, 何家浩, 韦新航, 等. 基于气相色谱-质谱法分析栀子果和花的纯露成分[J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2025, **51**(6): 896−903. HU Weizhen, HE Jiahao, WEI Xinhang, *et al*. Analysis of hydrosol components in fruit and flower of *Gardenia jasminoides* based on gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)[J]. *Journal of Zhejiang*

University (*Agriculture and Life Sciences*), 2025, **51**(6): 896−903. DOI: 10.3785/j.issn.1008-9209.2024.12.182.

[16] van GEMERT L J. *Odour thresholds: Compilations of Odour Threshold Values in Air, Water and Other Media*[M]. Utrecht: Oliemans Punter & Partners BV, 2011.

[17] ELSHARIF S A, BUETTNER A. Structure-odor relationship study on geraniol, nerol, and their synthesized oxygenated derivatives[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, **66**(10): 2324−2333. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b04534.

[18] SALES A, de OLIVEIRA FELIPE L, BICAS J L. Production, properties, and applications of α-terpineol[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, **13**(8): 1261−1279. DOI: 10.1007/s11947-020-02461-6.

[19] ZHU Jiancai, NIU Yunwei, XIAO Zuobing. Characterization of the key aroma compounds in Laoshan green teas by application of odour activity value (OAV), gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (GC-MS-O) and comprehensive two-dimensional gas chromatography mass spectrometry (GC×GC-qMS)[J]. *Food Chemistry*, 2021, **339**: 128136. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128136.

[20] 张铭铭, 尹洪旭, 邓余良, 等. 基于 HS-SPME/GC×GC-TOFMS/OAV 不同栗香特征绿茶关键香气组分分析[J]. 食品科学, 2020, **41**(2): 244−252. ZHANG Mingming, YIN Hongxu, DENG Yuliang, *et al*. Analysis of key odorants responsible for different chestnut-like aromas of green teas based on headspace solid-phase microextraction coupled with comprehensive two-dimensional gas chromatography time-of-flight mass spectrometry and odor activity value[J]. *Food Science*, 2020, **41**(2): 244−252. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20190126-337.

[21] HERMS D A, MATTSON W J. The dilemma of plants: to grow or defend[J]. *The Quarterly Review of Biology*, 1992, **67**(3): 283−335. DOI: 10.1086/417659.

[22] HUOT B, YAO Jian, MONTGOMERY B L, *et al*. Growth-defense tradeoffs in plants: a balancing act to optimize fitness[J]. *Molecular Plant*, 2014, **7**(8): 1267−1287. DOI: 10.1093/mp/ssu049.

[23] THALER J S, HUMPHREY P T, WHITEMAN N K. Evolution of jasmonate and salicylate signal crosstalk[J]. *Trends in Plant Science*, 2012, **17**(5): 260−270. DOI: 10.1016/j.tplants.2012.02.010.

[24] SHI Jiang, MA Chengying, QI Dandan, *et al*. Transcriptional responses and flavor volatiles biosynthesis in methyl jasmonate-treated tea leaves[J]. *BMC Plant Biology*, 2015, **15**: 233. DOI: 10.1186/s12870-015-0609-z.

[25] HE Zuhua, WEBSTER S, HE Shengyang. Growth-defense trade-offs in plants[J]. *Current Biology*, 2022, **32**(12): R634−R639. DOI: 10.1016/j.cub.2022.04.070.

[26] GAO Mingjun, HAO Zeyun, NING Yuese, *et al*. Revisiting growth-defence trade-offs and breeding strategies in crops[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2024, **22**(5): 1198−1205. DOI: 10.1111/pbi.14258.

[27] 庄玥莹, 周利君, 程璧瑄, 等. 基于转录组测序的香水月季花香代谢基因研究[J]. 园艺学报, 2021, **48**(11): 2262−2274. ZHUANG Yueying, ZHOU Lijun, CHENG Bixuan, *et al*. Study on the fragrance metabolic genes of *Rosa odorata* based on transcriptome sequencing[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2021, **48**(11): 2262−2274. DOI: 10.16420/j.issn.0513-353x.2020-0944.

[28] DONG Yanmei, LI Jingrui, ZHANG Wenying, *et al*. Exogenous application of methyl jasmonate affects the emissions of volatile compounds in lavender (*Lavandula angustifolia*)[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, **185**: 25−34. DOI: 10.1016/j.plaphy.2022.05.022.