

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(X): 1-9. 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(X): 1-9.

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 处理显著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, 为最优处理浓度。【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)00-0001-09

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

JIN Shengkang^{1,2}, ZHANG Dianquan³, 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. [Methods] 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~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 activity value (OAV) was employed to evaluate their aromatic contributions. [Results] MeJA treatments significantly

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研合作项目 (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。Email: 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、观赏药用植物研究。Email: zou@fafu.edu.cn

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 $1.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, whereas the optimal concentration for maximizing flower yield was $1.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. 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

梔子 *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 (如梔子苷、总黄酮等) 的研究已日趋成熟^[2]。近年来, 优化梔子花的香气品质, 已成为提升梔子花附加值和药用价值的新突破口^[3]。梔子花的香气主要由挥发性有机物 (VOCs) 构成, 其组成与相对比例直接决定了香气的感官特征^[4]。因此, 探究梔子花 VOCs 合成的有效途径, 调控梔子花香气特征, 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 对梔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 对梔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 对梔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, 提升梔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, 本研究以梔子 ‘分关 1 号’ ‘Fenguan No. 1’ 为材料, 设置不同浓度的外源 MeJA 喷施处理, 系统解析其对梔子花单株花朵产量及 VOCs 组成与质量分数的影响; 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 调控梔子花香气物质的剂量-响应规律, 为梔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 (117°41'E, 26°26'N), 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，适宜盆栽试验。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，生长期不内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 1 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 1 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 ($P<0.05$)，来评估各处理间的差异。基于各类 VOCs 相对占比，采用 ggplot2 包绘制化合物种类堆积图，直观展示 VOCs 组成的整体变化。采用 UpSetR 包绘制 Upset 图，展示共有与特有化合物的交集分布。OAV 评估的指标计算参考张铭铭等^[20]的方法，对筛选出的关键香气物质进行分析。差异倍数比较：将各处理中香气物质的质量分数与 ck 进行比较，计算 log₂FC 转换倍数，消除不同物质间量级差异过大带来的视觉偏差，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，以消除量纲影响，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。

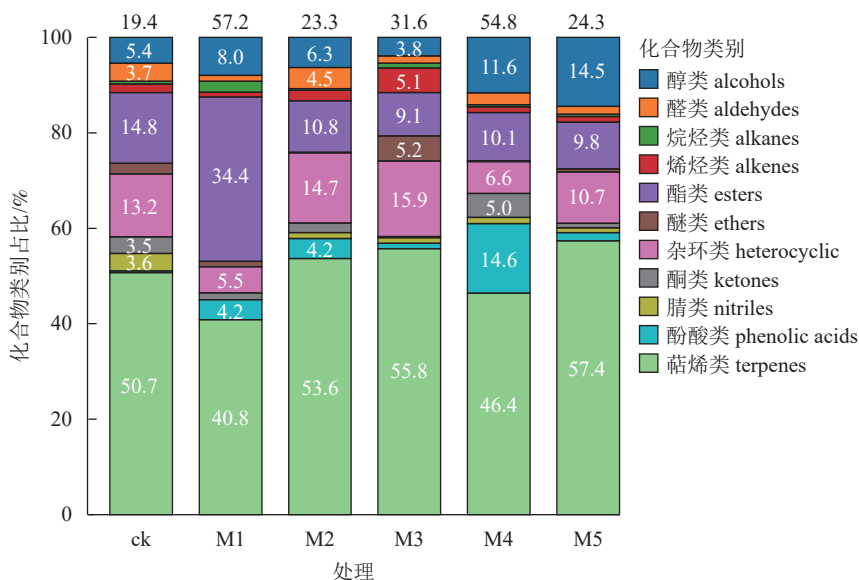
2 结果与分析

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、烯炔类等 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。



柱状图顶部数值表示各处理中化合物的总质量分数 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

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 $\log_2\text{FC}$ 最高，并在 M4 处理下达峰，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，二者在 M4 处理下的 $\log_2\text{FC}$ 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。

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/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	花朵产量/($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)		
		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 ($P<0.05$)。

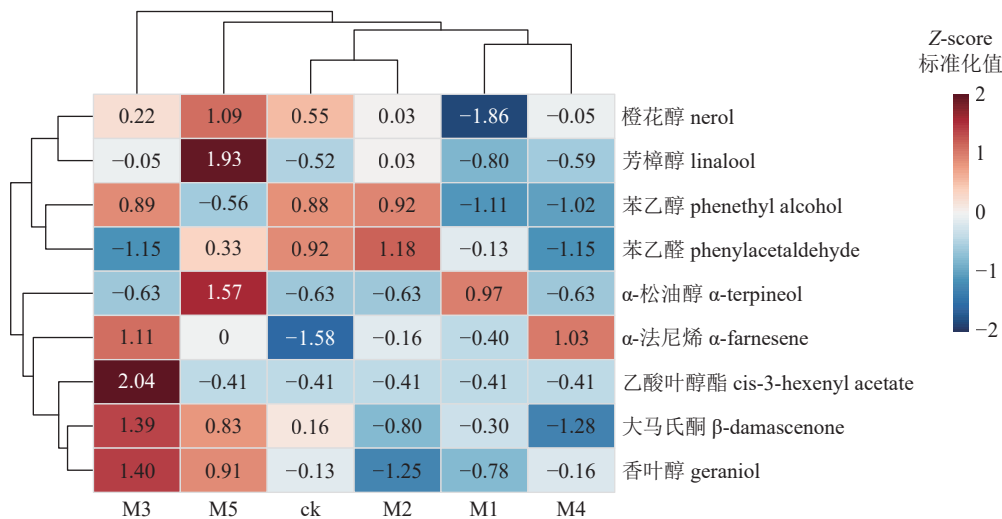


图 4 基于 Z-score 标准化的栀子花关键香气物质热图

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

献水平。大马氏酮的香气阈值极低，为 $0.002\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，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 ($1.000\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、芳樟醇 ($0.820\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 及橙花醇 ($0.290\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 等较低的香气阈值，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

化合物	CAS号	类别	香气阈值/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	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

表 3 不同浓度 MeJA 处理栀子花关键香气物质的 OAV

Table 3 OAV values of the key aroma compounds in *G. jasminoides* 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。

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。

3 讨论

本研究结果显示：不同浓度的 MeJA 不仅显著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。未来可进一步研究 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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 $\times$ GC-qMS)[J]. *Food Chemistry*, 2021, **339**: 128136. DOI: [10.1016/j.foodchem.2020.128136](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128136).
- [20] 张铭铭, 尹洪旭, 邓余良, 等. 基于 HS-SPME/GC $\times$ 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](https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20190126-337).
- [21] HERMS D A, MATTSO 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.05.022).