

吴俊阳, 叶淑萍, 赵嘉科, 等. 采后环境温度对茉莉花物理特性及挥发性物质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 71–84. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030325

WU Junyang, YE Shuping, ZHAO Jiako, et al. Effects of the Postharvest Ambient Temperature on the Physical Characteristics and Volatile Components of Jasmine Flowers[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 71–84. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030325

· 研究与探讨 ·

采后环境温度对茉莉花物理特性及挥发性物质的影响

吴俊阳^{1,2}, 叶淑萍^{1,3}, 赵嘉科¹, 张芳婷¹, 孔维艺¹, 田维素¹, 潘冠均¹, 王金源¹,
林宏政^{1,2}, 黄翔翔^{1,3}, 张芬^{4,*}, 郝志龙^{1,2,*}

(1. 福建农林大学园艺学院, 茶学福建省高校重点实验室, 福建福州 350002;
2. 福建省 6·18 协同创新院茶产业分院, 福建福州 350002;
3. 福州市茉莉花茶行业技术创新中心, 福建福州 350002;
4. 广西壮族自治区亚热带作物研究所, 广西南宁 530001)

摘要: 为探究采后环境温度对茉莉花物理特性和挥发性物质的影响, 本研究以双瓣茉莉花蕾为实验材料, 对采后不同环境温度 (29±2、35±2、41±2 °C, 85%±3%) 处理的茉莉花物理特性 (容重、含水率、花温、堆温、CO₂ 浓度和 O₂ 浓度) 进行测定, 采用自动热脱附-气相色谱-质谱联用仪 (Automatic Thermal Desorption-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, ATD-GC-MS) 对采后不同环境温度处理的茉莉花挥发性物质进行分析。结果表明, 采后环境温度 29 °C 处理的茉莉花生理活动受到抑制, 开放进程延缓; 采后环境温度 35 °C 处理更有利于茉莉花释香。采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花开放程度最大, 开放状态最好, 开放进程加快。鲜花感官评价结果表明, 采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花香气浓郁, 花色洁白。从采后不同环境温度处理的茉莉花中共鉴定出 102 种挥发性物质, 包括 28 种酯类、19 种萜烯类、15 种醇类、11 种烷烃类、7 种芳香烃类、4 种卤代烃类、4 种醛类、2 种环状烃类、2 种醚类、2 种酮类、2 种酚类、2 种酸类和 4 种其他类物质。采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花在虎爪状、全开放和衰败期的部分挥发性物质相对含量都显著高于其他环境温度处理的茉莉花 ($P<0.05$)。其中, 具有花香、果香的 α -法呢烯、反式石竹烯等萜烯类物质, 作为茉莉花“清新花香”的重要物质基础, 在采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花虎爪状和全开放时期相对含量显著高于其他环境温度处理的茉莉花 ($P<0.05$)。因此, 采后环境温度 35 °C 处理更有利于茉莉花的开放和香气释放。

关键词: 茉莉花, 挥发性物质, 物理特性, 采后环境温度, 相对气味活度值

中图分类号: TS272.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2026)09-0071-14

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030325



本文网刊:

Effects of the Postharvest Ambient Temperature on the Physical Characteristics and Volatile Components of Jasmine Flowers

WU Junyang^{1,2}, YE Shuping^{1,3}, ZHAO Jiako¹, ZHANG Fangting¹, KONG Weiyi¹, TIAN Weisu¹, PAN Guanjun¹,
WANG Jinyuan¹, LIN Hongzheng^{1,2}, HUANG Xiangxiang^{1,3}, ZHANG Fen^{4,*}, HAO Zhilong^{1,2,*}

(1. Key Laboratory of Tea Learning University in Fujian Province, College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

收稿日期: 2025-03-25

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划课题“特色花(果)茶智能化窖制及数字化拼配关键技术研究及示范”(2022YFD2101102); 广西重点研发项目: 茉莉花高效利用加工技术及配套装备研发与应用示范(桂科 AB25069173); 福建省现代农业(茶叶)产业技术体系专项(闽财指[2025]593号)。

作者简介: 吴俊阳(2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 茶叶智慧生产与加工工程, E-mail: 1205329015@qq.com。

* 通信作者: 张芬(1985-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 茶叶加工, E-mail: 553412949@qq.com。

郝志龙(1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 茶叶加工工程与装备, E-mail: haozhilong@126.com。

2.Tea Industry Branch of 6·18 Collaborative Innovation Institute in Fujian Province, Fuzhou 350002, China;

3.Jasmine Tea Industry Technology Innovation Center of Fuzhou, Fuzhou 350002, China;

4.Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530001, China)

Abstract: In order to investigate the effects of postharvest ambient temperature on the physical characteristics and volatile components of jasmine flowers, *J. sambac* 'Shuangban-moli' flowers buds was employed as experimental materials in this study. The physical characteristics of jasmine flowers (bulk density, moisture content, floral temperature, jasmine pile temperature, CO₂ concentration, and O₂ concentration) were examined under different postharvest ambient temperatures (29±2, 35±2, and 41±2 °C, humidity: 85%±3%). Automated thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry (ATD-GC-MS) was employed to analyze the volatile components of jasmine flowers under different postharvest ambient temperatures. The results showed that the physiological activities of jasmine flowers were suppressed, and the blooming process was delayed at the postharvest ambient temperature 29 °C. In contrast, it was more conducive to their fragrance release, and jasmine flowers exhibited the highest degree of blooming, the peak flowering condition, and the faster blooming process at the postharvest ambient temperature 35 °C. Sensory evaluation also indicated that jasmine flowers had a rich aroma and pure white color at the postharvest ambient temperature 35 °C. A total of 102 volatile components were identified from jasmine flowers maintained at different postharvest ambient temperatures, including 28 esters, 19 terpenes, 15 alcohols, 11 alkanes, 7 aromatic hydrocarbons, 4 halogenated hydrocarbons, 4 aldehydes, 2 cyclic hydrocarbons (non-aromatic), 2 ethers, 2 ketones, 2 phenols, 2 acids, and 4 other substances. Jasmine flowers exhibited significantly higher relative abundance of some volatile components during the flower starts blooming stage, flower fully blooming stage, and flower starts senescence stage at the postharvest ambient temperature 35 °C compared to other temperatures ($P<0.05$). As the key contributors to the "fresh floral scent" of jasmine flowers, such as α -farnesene and trans-caryophyllene etc terpenes with floral and fruity fragrances had significantly higher relative content during the flower starts blooming stage and flower fully blooming stage at the postharvest ambient temperature 35 °C than other temperatures ($P<0.05$). In summary, it was beneficial for jasmine flower blooming and fragrance release at the postharvest ambient temperature 35 °C.

Key words: jasmine flowers; volatile components; physical characteristics; postharvest ambient temperature; relative odor activity value (ROAV)

茉莉花(*Jasminum sambac* (L.) Ait)是木樨科(Oleaceae)素馨属(*Jasminum* Linn)香料植物,属典型的气质花,因其洁白芬芳的花朵闻名于世,具有不开不香的特点,其特征香气随花蕾的开放而逐步释放出来,被广泛用于食品、日化、工业等行业^[1-2]。其中茉莉花茶是典型的应用茉莉鲜花窈制而成的一种茶产品,茉莉花茶因其具有镇静、抗抑郁、抗衰老、降血压、调节心律失常的保健功效,深受消费者喜爱^[3-6]。目前,茉莉花茶主要由双瓣茉莉花窈制而成^[7]。茉莉花茶的香气品质与茉莉花释放的挥发性物质直接相关,茉莉花的挥发性物质是茉莉花茶香气的物质基础,茉莉花释放香气的含量与进程是影响茉莉花茶香气品质形成的关键因素之一^[8]。因此,研究促进茉莉花香气释放的采后环境条件对提高鲜花利用率和提升茉莉花茶香气品质至关重要。

鲜花处理是将采摘后的茉莉花蕾进行摊放散热和收堆升温交替进行,使花蕾开放呈虎爪状的开放率达80%以上,促进茉莉花开放吐香的过程^[9]。鲜花处理主要是促进茉莉花充分开放释香,为花茶加工提供香气来源^[10]。茉莉花释放的香气成分和浓度,不仅与品种、生长环境、肥水供给等因素有关,还与茉莉花开放时的环境温度、相对湿度、通气状况、机械胁迫等因素密切相关,其中温度是主要的影响因素^[11]。适宜的采后环境条件不仅可以使茉莉花充分开放,还

可以提高其香气浓度和质量,为茶坯吸附花香提供优质的香气来源^[12]。前人研究认为,采后环境温度30~40 °C、花堆温度35~38 °C是茉莉花开放吐香的适宜条件^[13-16]。目前,关于茉莉花的采后处理已有部分研究,但关于采后环境温度对茉莉花物理特性和挥发性物质影响的研究尚无报道。现有的挥发性物质富集方法包括同时蒸馏和萃取、顶空固相微萃取、固相萃取、加速溶剂萃取等^[17]。自动热脱附法作为一种新型的气相色谱的无溶剂萃取技术,具有操作简单、富集率高、重现性好和不使用有机溶剂等优点,也可以更加准确、真实地反映已经挥发出来的物质组成,其富集的挥发性有机物含量远高于固相微萃取^[18]。因此,本研究采用自动热脱附-气相色谱-质谱联用仪测定分析茉莉花的挥发性物质。

本研究以采后双瓣茉莉花蕾为实验材料,通过测定采后不同环境温度(29±2、35±2、41±2 °C, 85%±3%)处理的茉莉花物理特性(容重、含水率、花温、堆温、CO₂浓度、O₂浓度)和挥发性物质,分析采后不同环境温度对茉莉花生命活动和挥发性物质释放的影响。通过ATD-GC-MS测定分析采后不同环境温度处理的茉莉花挥发性物质种类与含量差异,筛选茉莉花释香品质较好、开放时间较长的环境温度,为确定适宜的茉莉花采后处理环境条件,促进茉莉花香气释放,进而提高茉莉花茶香气品质提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

双瓣茉莉花 (*Jasminum sambac* ‘Shuangban-moli’) 采摘标准为大小均匀的茉莉花蕾, 于 2023 年 9 月晴天午后采摘自福建省福州市闽侯县。

HWS-600Y 恒温恒湿箱 宁波科晟实验仪器有限公司; PC-16A 水分测定仪、QC-1S 大气采样仪 上海浦春计量仪器有限公司; AR8200 CO₂ 气体测定仪、AR8100 O₂ 检测计 希玛仪表公司; COTD A010 自动热脱附分析仪 成都科林分析技术有限公司; GCMS-TQ8040 气相色谱质谱联用仪 日本岛津公司; 聚四氟乙烯管 大金氟化工(中国)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 茉莉花样品处理 采后茉莉花蕾运送至实验室, 稳定 2 h 后进行物理特性(容重、含水率、花温、堆温、CO₂ 浓度、O₂ 浓度)和挥发性物质测定。然后将花蕾分别均匀摊放在设置不同温度(29±2、35±2、41±2 °C, 85%±3%)的恒温恒湿箱中, 堆高为 10±1 cm 进行鲜花处理。本实验参考熊一帆^[1]的方法划分茉莉花开放周期, 将茉莉花开放过程分为 4 个时期: 花蕾期、虎爪状、全开放和衰败期。分别在花蕾期和采后不同环境温度处理的茉莉花到达虎爪状、全开放和衰败期三个时期时进行物理特性和挥发性物质的测定, 并记录茉莉花到达各时期的时间。每个实验重复三次。茉莉花开放时期具体描述如表 1 所示, 开放状态如图 1 所示。

表 1 茉莉花开放时期具体描述

Table 1 Jasmine flower bloom period specific description

茉莉花时期	描述
花蕾期	鲜花呈花苞状, 未开放
虎爪状	花心处花瓣开始打开, 似虎爪
全开放	鲜花花瓣全部打开
衰败期	30%左右花瓣开始泛黄、萎缩



图 1 茉莉花四个时期开放状态

Fig.1 Bloom state of jasmine flowers in four periods

1.2.2 茉莉花物理特性测定 茉莉花容重的测定: 采用量筒法测定茉莉花容重^[19]。将茉莉花堆放在容积固定(10 cm×10 cm×10 cm)的玻璃容器中, 茉莉花堆放表面与容器刻度线齐平, 读取容积数值, 称量茉莉花质量。茉莉花容重计算公式为:

$$\gamma = GV^{-1}$$

式中, γ 为茉莉花容重(kg/m³); G 为茉莉花质量

(kg); V 为茉莉花所占容器容积(m³)。

茉莉花含水率的测定: 参考 GB 5009.3-2016 直接干燥法测定茉莉花的水分含量^[20]。称取 3.0 g 茉莉花样品剪碎后放入水分测定仪中, 设置温度为 120 °C, 通过干燥前后的称量数值计算出水分含量。

茉莉花温度的测定: 采用数字温度计测定花堆表面温度为花温, 选取花堆表面上均匀的等距离的三个点为重复; 同时采用水银温度计测定花堆中心温度为堆温, 将温度计竖直插入花堆内中心点, 稳定 10 min 后读取数值并记录。

花堆环境气体的测定: 将 CO₂ 气体测定仪和 O₂ 检测计放置在花堆表面, 稳定 10 min 后读取仪器数值并记录。

1.2.3 茉莉花感官品质分析 感官评价小组由 5 名受过专业训练的审评人员(2 名男性, 3 名女性, 年龄在 35~40 岁之间)组成, 评价方法参考 GB/T 3776-2018, 以茉莉花样品的香气浓度、青气、花香、鲜灵度作为感官评价指标, 小组成员以 8 分等级评定相关属性的强度, 范围从 0(不存在)~8(极强)^[7]。在评估之前, 使用相同的样品训练小组成员以标准化属性。茉莉花感官品质评语与各品质因子评分如表 2 所示。

表 2 茉莉花感官品质评语与各品质因子评分

Table 2 Sensory evaluation terminology and qualitative characteristics scoring of jasmine flowers

因子	品质特征	分数(分)
香气浓度	浓郁, 纯正	7~8
	较浓郁, 较纯正	4~6
	尚浓郁, 较纯正	0~3
青气	青气尚显	7~8
	青气较显	4~6
	青气明显	0~3
花香	花香明显	7~8
	花香较显	4~6
	花香尚显	0~3
鲜灵度	鲜灵	7~8
	较鲜灵	4~6
	尚鲜灵	0~3

1.2.4 茉莉花挥发性物质分析 挥发性物质的萃取: 参照 Wang 等^[18]方法, 采用自动热脱附-气相色谱-质谱法(Automatic Thermal Desorption-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, ATD-GC-MS)测定茉莉花挥发性物质。根据吸附管的流向用聚四氟乙烯(PTFE)管连接到大气采样仪和茉莉花花堆中心, 以 200 mL/min 的流速收集挥发性组分 30 min。样品收集后, 将吸附管的两端用 PTFE 帽密封并运送到实验室进行分析。

自动热脱附-解吸仪条件: 阀温度 200 °C; 传输温度 200 °C; 一级解吸温度 250 °C; 一级解吸时间 5 min; 冷阱吸附温度-25 °C; 冷阱加热时间 3 min; 二

级解吸温度 300 ℃; 进样时间 60 s; 循环时间 56 min。

GC 条件: 色谱柱: Rtx-5MS 毛细柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 柱箱温度 40 ℃, 进样口温度 240 ℃, 柱流量 1 mL/min; 升温程序: 初始温度 40 ℃ 保持 3 min, 以 5 ℃/min 升至 120 ℃, 保持 5 min, 再以 30 ℃/min 升至 240 ℃, 保持 8 min; 载气(He)流速 3 mL/min, 压力 49.5 kPa; 分流比 5:1。

MS 条件: 电子轰击离子源; 接口温度 280 ℃; 检测器电压 0.8 kV; 离子源温度 230 ℃; 质量扫描范围 m/z 28~500。

挥发性物质定性和定量方法: 将质谱图与质谱库(NIST11.L 和 Wiley 7)相匹配, 以匹配度大于 80% 为定性鉴定依据^[18]。挥发性物质的化学结构、名称和气味根据 PubChem(<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>) 和风味成分库(<https://www.femaflavor.org>) 确定。采用各色谱峰面积与总峰面积比值的面积归一化法计算茉莉花各香气组分的相对含量^[21]。

1.2.5 ROAV 值分析 参照刘登勇等^[22] 和裴鹏正等^[23] 方法, 采用气味活度值(Relative Odor Activity Value, ROAV)分析确定茉莉花的关键香气成分。规定对茉莉花香气贡献最大的组分 $ROAV_{max}=100$, 其他组分的 ROAV 值计算公式如下:

$$ROAV_i = \frac{C_i}{C_{max}} \times \frac{T_{max}}{T_i} \times 100$$

式中, C_i 为各挥发性物质的相对含量, %; T_i 为各挥发性物质的感觉阈值, μg/L; C_{max} 为对茉莉花香气贡献值最大的挥发性物质所对应的相对含量, %; T_{max} 为对茉莉花香气贡献值最大的挥发性物质所对应的感觉阈值, μg/L。

一般认为 $ROAV \geq 1$ 的挥发性物质为茉莉花的关键香气成分, ROAV 值越大, 则该物质对总体香气

的贡献度越大, $ROAV > 10$ 表明该挥发性物质对茉莉花的整体香气具有核心贡献作用, 通常被定义为主要贡献物质, $0.10 \leq ROAV < 1$ 的挥发性物质对茉莉花总体香气具有重要的修饰作用, 而 $ROAV < 0.10$ 为潜在香气成分。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Office 2019 Excel 软件整理分析数据; Microsoft Office 2019 PPT 软件绘制柱形图和百分比堆积图; 利用 TBtools 软件对挥发性物质进行可视化聚类分析; SIMCA-P 14.0 软件进行 OPLS-DA 分析, 并计算预测变量重要性投影(variable importance in projection, VIP); 采用 IBM SPSS Statistics 26 软件对数据进行方差分析, 使用 Duncan 法对数据进行差异显著性检验 ($P < 0.05$)。每个实验重复三次。

2 结果与分析

2.1 采后环境温度对茉莉花物理特性的影响

2.1.1 采后环境温度对茉莉花容重的影响 容重指供试材料单位体积的重量, 茉莉花开放过程中容重大小能体现茉莉花的开放程度。由图 2A 可知, 随着茉莉花的开放, 茉莉花容重逐渐减小, 可见茉莉花开放后体积逐渐增大。采后不同环境温度处理的茉莉花容重存在显著差异 ($P < 0.05$), 说明采后环境温度对茉莉花的开放程度影响较大, 采后环境温度 35 ℃ 处理的茉莉花容重在虎爪状 (115 kg/m³)、全开放 (89.5 kg/m³) 和衰败期 (79.5 kg/m³) 都显著低于采后环境温度 29 ℃ 和 41 ℃ 处理的茉莉花 ($P < 0.05$), 说明采后环境温度 35 ℃ 处理的茉莉花开放程度最大, 更有利于促进茉莉花开放。

2.1.2 采后环境温度对茉莉花含水率的影响 茉莉花含水率是体现茉莉花状态的一项重要指标, 从

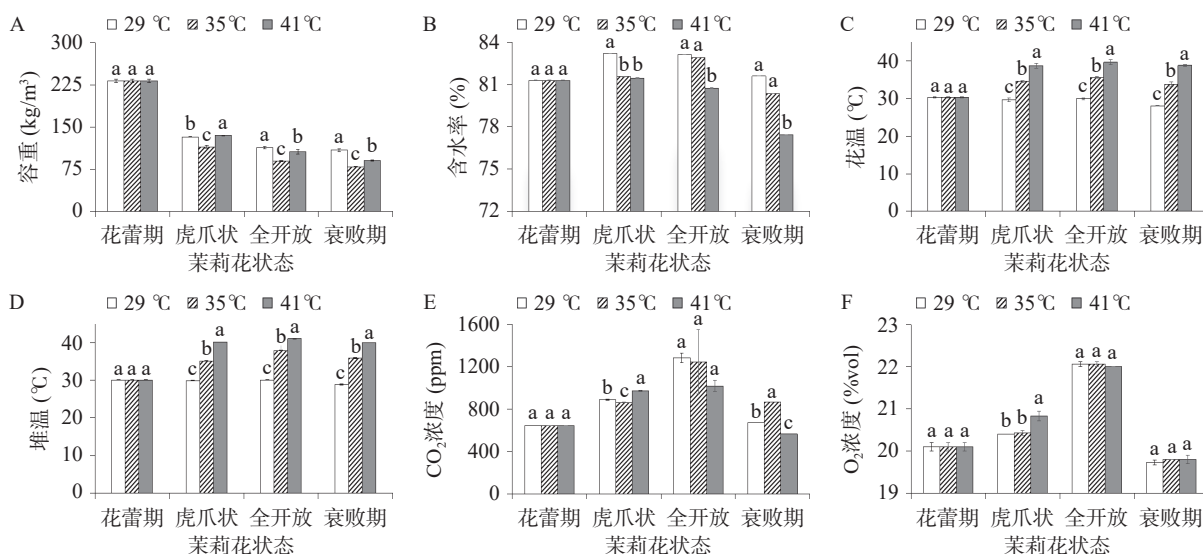


图 2 采后环境温度对茉莉花物理特性的影响

Fig.2 Effects of the postharvest ambient temperature on the physical characteristics of jasmine flowers

注: (A)茉莉花容重; (B)茉莉花含水率; (C)茉莉花温度; (D)茉莉花堆温度; (E)茉莉花堆 CO₂ 浓度; (F)茉莉花堆 O₂ 浓度; 英文小写字母代表相同时期采后不同环境温度处理间的显著性差异水平 ($P < 0.05$), 图 4 同。

图 2B 可以看出, 相同开放时期, 随着采后环境温度的升高, 茉莉花含水率降低。从茉莉花虎爪状到衰败期, 采后环境温度 29 °C 与 41 °C 处理的茉莉花含水率之间都存在显著差异($P<0.05$), 说明采后环境温度相差较大对茉莉花含水率影响显著。在茉莉花虎爪状时期, 采后环境温度 35 °C 和 41 °C 处理的茉莉花含水率都显著低于采后环境温度 29 °C, 采后环境温度 35 °C 以上, 完全开放后的茉莉花含水率显著下降($P<0.05$), 可见采后环境温度高低会显著影响鲜花的含水率, 进而影响鲜花的生命活力和香气释放。结合采后不同环境温度对茉莉花容重与含水率的影响可知, 采后环境温度 35 °C 能维持较好的茉莉花开放状态。

2.1.3 采后环境温度对茉莉花花温的影响 鲜花温度是重要的生理状态指标, 花温过高, 会导致鲜花呼吸过旺, 提早衰败; 花温过低, 会抑制鲜花的正常生理活动, 影响茉莉花开放与释香^[24]。从图 2C 可以看出, 花温随着采后环境温度的升高而升高, 不同环境温度处理的茉莉花花温在虎爪状、全开放和衰败期都存在显著差异($P<0.05$), 同一环境温度处理的茉莉花花温在不同时期较为稳定。可以看出, 鲜花温度在稳定的环境温度下变化较小, 不同环境温度对鲜花温度影响较大。采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花花温稳定在 30~35 °C 之间, 与前人研究的适宜鲜花处理花温为 30~32 °C 相一致^[12]。因此, 采后环境温度 35 °C 是茉莉花处理的适宜温度。

2.1.4 采后环境温度对茉莉花堆温的影响 传统茉莉花茶窰制过程中, 堆温是对茉莉花茶品质影响较大的因素, 茉莉花释放香气是一个酶促水解的过程, 堆温过高会让茉莉花体内的酶失去活性, 不利于香气的释放^[25]。同时堆温是判断是否扬花的重要指标, 也反映了鲜花呼吸作用的强弱。从图 2D 可以看出, 采后不同环境温度处理的茉莉花的堆温在不同开放时期都存在显著差异($P<0.05$), 环境温度越高, 花堆温度越高。采后不同环境温度处理的茉莉花堆温差异与花温差异相同, 可见, 采后环境温度不仅会影响鲜花表面的温度, 还会影响鲜花堆内的温度, 其中采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花堆温稳定在 35~38 °C。有研究发现, 将窰堆温度变化幅度维持在 36~41 °C, 以保证花内芳香物质水解酶处于活性最强状态, 维持茉莉花正常吐香^[26]。因此, 采后环境温度 35 °C 有利于茉莉花堆温稳定在 35~38 °C, 促进茉莉花释香。

2.1.5 采后环境温度对茉莉花堆 CO₂ 浓度的影响

茉莉花堆的 CO₂ 浓度既反映鲜花的生命活动强度, 又直接影响茉莉花的生命活力。CO₂ 主要来源于鲜花的呼吸作用, 浓度越高, 表明茉莉花生命活动越旺盛, 浓度过高也会抑制鲜花的正常呼吸作用, 从而影响鲜花的生命活力和香气的释放^[27-28]。从图 2E 可以看出, 在茉莉花虎爪状时期, 采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花花堆 CO₂ 浓度最低, 有利于茉莉花呼吸作用及其他生命活动的进行。在茉莉花全开放时期, 鲜花 CO₂ 浓度达到最高, 衰败期鲜花 CO₂ 浓度大幅下降。在茉莉花虎爪状和衰败期, 采后不同环境温度处理的茉莉花花堆 CO₂ 浓度之间都存在显著差异($P<0.05$), 表明采后环境温度对花堆 CO₂ 浓度影响较大。茉莉花虎爪状和全开放时期是香气释放最多的时期, 也是茉莉花茶窰吸附香气的主要时期, 虎爪状时期采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花花堆 CO₂ 浓度最低, 全开放时期采后不同环境温度处理的茉莉花花堆 CO₂ 浓度并无显著差异, 因此, 采后环境温度 35 °C 处理茉莉花, 有利于鲜花的开放、释香和生命活动的进行。

2.1.6 采后环境温度对茉莉花堆 O₂ 浓度的影响 茉莉花堆的 O₂ 浓度直接影响茉莉花的生命活力, 浓度过低, 缺乏鲜花正常生理呼吸作用所需的 O₂ 供应, 影响其正常的生命活动, 不利于香气的释放^[29]。从图 2F 可以看出, 茉莉花堆 O₂ 浓度在衰败期浓度较低, 该时期如果没有较好的通风换气, 将严重影响鲜花的正常生理功能, 从而影响香气的释放。在茉莉花虎爪状时期, 采后环境温度 29 °C 与 41 °C 处理的茉莉花花堆 O₂ 浓度之间存在显著差异($P<0.05$), 可见采后环境温度相差较大对茉莉花堆 O₂ 浓度影响显著。与其他环境温度相比, 采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花花堆的 O₂ 浓度在全开放和衰败期都维持在较高浓度。因此, 采后环境温度 35 °C 处理茉莉花有利于其生命活动的进行。

2.2 茉莉花感官品质分析

对采后不同环境温度处理的茉莉花感官品质进行评价, 结果如表 3 所示, 发现采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花香气浓郁, 花色洁白, 开放程度大, 且虎爪状和衰败期的感官评价总分显著高于采后环境温度 29 °C 和 41 °C 处理的茉莉花($P<0.05$); 采后环境温度 29 °C 处理的茉莉花带有青气; 采后环境温度 41 °C 处理的茉莉花闷味较重。因此, 采后环境温度 35 °C 更有利于维持茉莉鲜花的状态和香气的释放。

表 3 采后不同环境温度处理茉莉花感官评价结果

Table 3 Evaluation results of sensory aroma of jasmine flowers in different periods of different postharvest ambient temperatures

温度(°C)	花蕾	虎爪状	总分(分)	全开放	总分(分)	衰败期	总分(分)
29	花色洁白, 带有青气	开放度小, 色洁白, 香气较淡, 略带青气	4.2±0.8 ^b	开放度偏小, 色洁白, 香偏青	4.4±0.5 ^b	开放度小, 色较黄, 刺激性	1.8±0.8 ^b
35		开放度大, 色洁白, 香浓郁	7.0±1.0 ^a	开放度大, 色洁白, 香浓郁	8.0±1.0 ^a	开放度大, 色较黄, 香气较浓	5.0±0.7 ^a
41		开放度小, 色较白, 闷味重	2.8±0.8 ^c	开放度小, 闷味, 色偏黄	8.0±1.0 ^a	开放度小, 水闷味极重	1.8±0.4 ^b

注: 采取满分0~8分制, 1分-弱、2分-较弱、4分-中等、6分-较强、8分-极强; 不同小写字母代表相同时期采后不同环境温度处理间的显著性差异水平($P<0.05$), 表4同。

2.3 采后环境温度对茉莉花挥发性物质的影响

2.3.1 采后环境温度对茉莉花总挥发性物质影响分析

经 ATD-GC-MS 分析, 在采后不同环境温度处理的茉莉花中共鉴定出 102 种挥发性物质, 包括 28 种酯类、19 种萜烯类、15 种醇类、11 种烷烃类、7 种芳香烃类、4 种卤代烃类、4 种醛类、2 种环状烃类、2 种醚类、2 种酮类、2 种酚类、2 种酸类和 4 种其他类物质。不同挥发性物质种类对茉莉花香气的贡献不同。如图 3A 所示, 酯类、萜烯类、醇类和烷烃类是茉莉花主要的挥发性物质种类, 其中, 酯类是茉莉花相对含量最高的一类挥发性物质种类, 有 28 种, 也是茉莉花香气的主要贡献源, 与赵国飞等^[2]对采后茉莉花香气成分的研究结果一致。醇类物质对茉莉花的花香和清香具有重要贡献, 相对含量仅次于酯类, 其中, 芳樟醇是茉莉花茶的关键花香成分, 对香气至关重要^[30]。烷烃类和萜烯类物质主要呈现木香和花果香, 其中, α -法呢烯是茉莉花鲜花的标志性成分^[31]。芳香烃类是茉莉花茶挥发性物质的 16 大类之一, 通常具有特殊香气^[29]。醛类物质主要呈现青草香, 例如, 正己醛和 2-乙基丁醛^[29]。部分酮类物质可以增强花香和甜香, 例如, β -异佛尔酮具有花香^[32]。而酚类与酸类物质更多影响香气的稳定性和生理背景, 而非直接呈香^[33]。采后环境温度不同, 茉莉花的挥发性物质种类及相对含量也有差异, 其中, 具有花果香的萜烯类物质总相对含量, 在采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花虎爪状和全开放时期都显著高于其他采后环境温度处理的茉莉花($P<0.05$)(图 3A、

表 4)。如图 3B 所示, 采后环境温度还会影响茉莉花到达各开放时期的时间, 采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花从花蕾期到虎爪状和虎爪状到全开放的时间都最短, 表明采后环境温度 35 °C 处理能促进茉莉花较早开放。

如图 3C 所示, 茉莉花的挥发性物质在不同开放时期组成和含量都有较大差异, 相同开放时期茉莉花的挥发性物质组成较稳定。前人研究采后茉莉花开放过程中挥发性物质的动态变化规律也表明, 在相同开放阶段, 挥发性物质的组成和含量相对稳定^[34]。茉莉花相对含量较高的挥发性物质有水杨酸甲酯、苯甲酸甲酯、邻氨基苯甲酸甲酯、邻苯二甲酸二乙酯、乙酸苄酯、苯甲醇、反式-3-己烯-1-醇、芳樟醇和 α -法呢烯, 并且大部分集中在全开放时期(图 3C、表 4), 与前人研究结果一致^[35-37]。采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花在虎爪状、全开放和衰败期三个时期的大部分挥发性物质相对含量都高于其他环境温度处理的茉莉花(图 3C)。其中, 具有花香、果香的 α -法呢烯、反式石竹烯等萜烯类物质, 作为茉莉花“清新花香”的重要物质基础^[7], 在采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花虎爪状和全开放时期相对含量都显著高于其他环境温度处理的茉莉花($P<0.05$)(表 4)。综上所述, 采后环境温度 35 °C 处理有利于茉莉花释香。

2.3.2 采后环境温度对茉莉花差异挥发性物质的影响分析

采用正交偏最小二乘判别分析(Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis, OPLS-DA)对茉莉花挥发性物质进行分析, 以有效筛选关

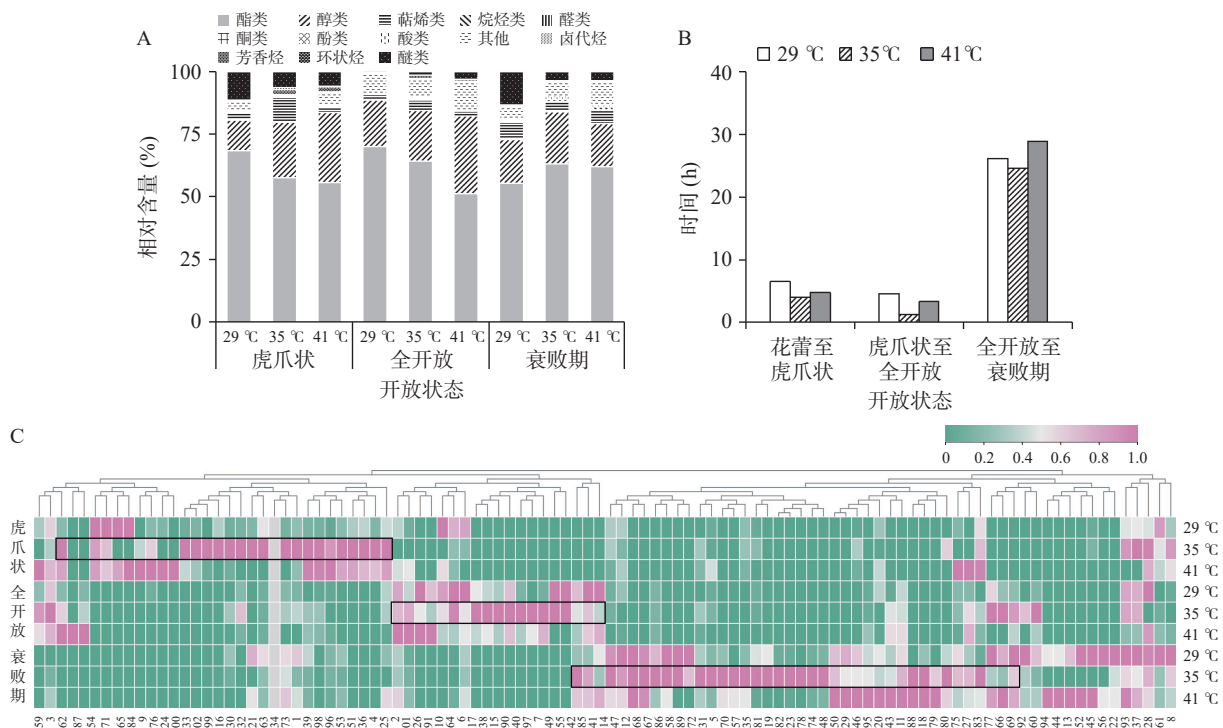


图 3 采后环境温度对茉莉花挥发性物质的影响

Fig.3 Effects of postharvest ambient temperature on volatile components of jasmine flowers

注: (A)茉莉花挥发性物质种类占比; (B)茉莉花花态转变所需时长; (C)茉莉花挥发性物质相对含量聚类热图; 图 C 中茉莉花挥发性物质相对含量聚类热图的序号与表 4 的挥发性物质序号一致。

表 4 采后不同环境温度处理的茉莉花挥发性物质相对含量
Table 4 Relative content of volatile components in jasmine flowers under different postharvest ambient temperatures treatments

序号	挥发性物质	CAS号	相对含量(%)											
			虎爪状			全开放			衰败期					
			29 °C	35 °C	41 °C	29 °C	35 °C	41 °C	29 °C	35 °C	41 °C			
1	苯甲酸叶醇酯	25152-85-6	0.29±0.17 ^b	2.25±2.26 ^a	-	0.43±0.02 ^b	0.72±0.04 ^a	0.01±0.001 ^c	1.24±0.80 ^a	1.01±0.78 ^a	1.43±0.86 ^c			
2	丁二酸二乙酯	123-25-1	1.08±0.23 ^a	2.55±1.75 ^a	2.07±1.73 ^a	0.92±0.06 ^a	0.87±0.06 ^a	0.1±0.01 ^b	0.57±0.07 ^b	-	1.46±0.17 ^a			
3	水杨酸甲酯	119-36-8	4.76±0.58 ^{ab}	3.14±1.77 ^b	5.46±0.34 ^a	5.08±0.37 ^b	7.37±0.42 ^a	5.58±0.21 ^b	0.94±0.41 ^c	1.78±0.26 ^b	3.02±0.32 ^a			
4	2-甲基丁酸甲酯	868-57-5	0.08±0.04 ^b	0.21±0.05 ^a	0.15±0.05 ^{ab}	-	-	-	-	-	-			
5	苯甲酸2-乙基酯	5444-75-7	0.02±0 ^a	0.01±0.01 ^a	0.12±0.2 ^a	0.02±0 ^b	0.04±0 ^a	-	0.05±0.01 ^a	0.27±0.45 ^a	0.05±0.02 ^a			
6	苯甲酸甲酯	93-58-3	11.6±2.24 ^a	4.1±2.96 ^b	3.77±0.32 ^b	15.44±0.91 ^a	14.67±3.62 ^a	5.6±0.14 ^b	0.96±0.6 ^b	0.66±0.23 ^b	2.18±0.69 ^a			
7	丙烯酸异辛酯(2-EHA)	103-11-7	-	-	-	-	0.02±0 ^b	0.01±0.01 ^b	-	-	-			
8	环己基异氰酸酯	3173-53-3	0.05±0.01 ^a	0.12±0.08 ^a	0.08±0.02 ^a	0.02±0.01 ^b	0.01±0 ^c	0.03±0 ^a	0.14±0.07 ^a	0.09±0.03 ^a	0.06±0.01 ^a			
9	甲基丙烯酸甲酯	80-62-6	0.06±0.03 ^a	-	0.06±0.04 ^a	-	-	-	-	-	-			
10	甲酸苯酯	104-57-4	-	-	-	0.02±0 ^b	0.01±0 ^c	0.03±0 ^b	-	-	-			
11	邻氨基苯甲酸甲酯	134-20-3	-	-	-	1.56±0.19 ^b	1.69±0.07 ^b	2.13±0.32 ^a	2.14±0.99 ^a	2.8±0.53 ^a	3.87±0.93 ^a			
12	邻苯二甲酸二乙酯	84-66-2	5.44±0.8 ^a	2.61±4.02 ^a	5.2±0.4 ^a	4.11±0.28 ^a	0.11±0.08 ^c	0.97±0.04 ^b	15.61±4.03 ^a	13.32±6.08 ^a	9.05±0.48 ^a			
13	肉豆蔻酸甲酯	124-10-7	-	-	-	-	-	-	0.04±0.01 ^a	-	0.06±0.02 ^a			
14	顺-3-己烯基丁酯	16491-36-4	-	-	-	1.02±0.06 ^a	0.39±0.01 ^c	0.75±0.02 ^b	0.5±0.14 ^{ab}	0.29±0.1 ^b	0.76±0.15 ^a			
15	顺-3-己烯酸顺-3-己烯酯	61444-38-0	-	-	-	0.04±0.01 ^b	0.1±0.02 ^a	0.05±0 ^b	-	-	-			
16	碳酸二乙酯	105-58-8	0.02±0.02 ^b	4.75±3.2 ^a	0.35±0.21 ^b	-	-	-	-	-	-			
17	乙酸苯酯	140-11-4	30.03±5.82 ^a	21.83±6.61 ^{ab}	19.05±1.42 ^b	32.9±2.58 ^a	26.3±1.16 ^b	25.95±0.61 ^b	23.68±3.2 ^a	22.77±7.89 ^a	25.24±1.82 ^a			
18	乙酸己酯	142-92-7	-	-	-	-	-	-	0.01±0.01 ^a	0.04±0.03 ^a	0.04±0.01 ^a			
19	乙酸异戊酯	123-92-2	-	-	-	-	-	-	0.02±0 ^a	0.04±0.02 ^a	-			
20	棕榈酸甲酯	112-39-0	0.3±0.09 ^a	0.03±0.01 ^b	0.43±0.19 ^a	0.4±0.03 ^a	0.01±0.01 ^b	0.04±0.04 ^b	0.52±0.04 ^a	0.42±0.14 ^a	1.05±0.63 ^a			
21	丁酸-(E)-3-己烯酯	53398-84-8	0.74±0.17 ^a	0.49±0.07 ^b	0.47±0.06 ^b	-	-	-	-	-	-			
22	(Z)-2-己烯乙酸酯	56922-75-9	-	-	-	-	-	-	0.1±0.03 ^a	0.41±0.27 ^a	0.22±0.06 ^a			
23	反式-4-己烯-1-醇乙酸酯	0-00-0	13.96±1.86 ^a	15.47±8.14 ^a	18.51±1.24 ^a	7.93±0.82 ^c	11.86±0.69 ^a	9.93±0.15 ^b	8.78±1.11 ^b	18.94±4.14 ^a	13.27±2.3 ^b			
24	4-己烯酸甲酯	2396-79-4	0.05±0.03 ^a	-	0.04±0.01 ^a	-	-	-	-	-	-			
25	2-甲基-2-丁烯-1-醇乙酸酯	33425-30-8	-	-	-	0.13±0.02 ^a	0.09±0.02 ^b	0.06±0 ^b	0.05±0 ^a	0.19±0.15 ^a	0.12±0.02 ^a			
26	碳酸十三烷基烯酯	0-00-0	-	-	-	-	-	-	-	0.01±0 ^a	0.01±0 ^a			
27	二乙丙二酸庚基四氢糠基酯	0-00-0	-	-	-	0.02±0 ^a	0.01±0 ^b	0.02±0 ^a	-	-	-			
28	间甲基苯甲酸-2-乙基酯	16397-66-3	-	-	-	-	-	-	0.01±0 ^a	-	0.02±0.01 ^a			
	酯类		63.73±7.58 ^a	54.42±0.96 ^b	50.3±1.18 ^b	64.53±2.35 ^a	56.17±2.24 ^b	45.67±0.68 ^c	52.61±2.06 ^b	60.24±10.18 ^a	56±3.04 ^a			

续表 4

序号	挥发性物质	CAS号	相对含量(%)											
			虎爪状			全开放			衰败期					
			29 °C	35 °C	41 °C	29 °C	35 °C	41 °C	29 °C	35 °C	41 °C			
29	2-甲基丁醇	137-32-6	0.02±0.01 ^b	0.15±0.02 ^a	-	0.03±0 ^b	0.1±0.01 ^a	0.02±0 ^b	-	-	-	-	-	
30	2-乙基己醇	104-76-7	-	-	-	-	-	-	0.48±0.2 ^a	0.21±0.1 ^a	0.24±0.13 ^a	0.21±0.1 ^a	0.24±0.13 ^a	
31	3-甲基-2-丁烯-1-醇	556-82-1	-	-	-	-	-	-	-	0.02±0.01 ^a	0.27±0.24 ^a	0.27±0.24 ^a	0.01±0 ^a	
32	3-甲基-3-丁烯-1-醇	763-32-6	0.02±0.01 ^b	0.06±0.04 ^{ab}	0.1±0.02 ^a	0.01±0	-	-	-	-	-	-	-	
33	6-甲基-3-庚醇	18720-66-6	0.01±0.01 ^a	0.06±0.08 ^a	0.04±0.02 ^a	-	-	-	-	-	-	-	-	
34	苯甲醇	100-51-6	3.76±0.96 ^b	2.57±0.68 ^b	8.47±0.24 ^a	7.23±0.51 ^c	11.56±0.69 ^b	14.43±0.15 ^a	3.54±0.77 ^a	4.11±1.15 ^a	5.18±0.71 ^a	4.11±1.15 ^a	5.18±0.71 ^a	
35	反式-3-己烯-1-醇	928-97-2	0.01±0 ^b	0.02±0.01 ^b	11.88±2.1 ^a	2.23±0.13 ^c	6.64±0.52 ^b	8.65±0.44 ^a	3.73±0.98 ^a	8.32±4.8 ^a	5.47±1.4 ^a	8.32±4.8 ^a	5.47±1.4 ^a	
36	芳樟醇	78-70-6	4.79±2.34 ^a	8.57±2.4 ^a	6.89±0.37 ^a	8.8±2.64 ^a	1.33±0.08 ^b	7.67±0.32 ^a	8.41±1.75 ^a	6.75±2.09 ^a	5.63±1.51 ^a	6.75±2.09 ^a	5.63±1.51 ^a	
37	顺-A,Δ-5-三甲基-5-乙炔基四氢吡喃-2-甲醇	5989-33-3	-	-	-	-	-	-	0.03±0.02 ^a	0.02±0 ^a	0.04±0.01 ^a	0.02±0 ^a	0.04±0.01 ^a	
38	叶醇	928-96-1	3.06±1.12 ^b	8.78±3.97 ^a	0.05±0.02 ^b	-	-	-	0.03±0.01 ^a	0.12±0.09 ^a	0.05±0.01 ^a	0.12±0.09 ^a	0.05±0.01 ^a	
39	异戊醇	123-51-3	0.01±0 ^b	0.09±0.04 ^a	0.06±0.03 ^{ab}	0.01±0 ^c	0.09±0.01 ^a	0.03±0 ^b	0.1±0.06 ^a	0.28±0.23 ^a	0.1±0.03 ^a	0.28±0.23 ^a	0.1±0.03 ^a	
40	正丁醇	71-36-3	0.27±0.08 ^b	1.73±0.33 ^a	0.27±0.09 ^b	0.12±0.01 ^b	0.58±0.03 ^a	0.13±0.02 ^b	0.54±0.24 ^a	0.28±0.15 ^{ab}	0.11±0.07 ^b	0.28±0.15 ^{ab}	0.11±0.07 ^b	
41	正戊醇	71-41-0	-	-	0.02±0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	
42	(2E,4S,7E)-4-异丙基-1,7-二甲基环癸二烯-2,7-醇	198991-79-6	0.04±0.02 ^b	0.23±0.08 ^a	-	-	-	-	0.17±0.08 ^a	-	0.12±0.09 ^a	0.17±0.08 ^a	0.12±0.09 ^a	
43	氧化芳樟醇(呋喃型)	34995-77-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
44	(+)-柠檬烯	5989-27-5	12.01±3.55 ^b	22.26±7.34 ^a	27.78±1.82 ^a	18.43±3.07 ^b	20.3±0.76 ^b	30.93±0.42 ^a	17.49±0.9 ^a	20.81±5.05 ^a	17.35±0.37 ^a	20.81±5.05 ^a	17.35±0.37 ^a	
45	(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-十八烷三烯	3338-55-4	0.65±0.18 ^a	1.26±1.22 ^a	-	0.13±0.01 ^a	0.12±0.03 ^a	0.12±0.01 ^a	0.69±0.58 ^a	0.29±0.15 ^a	0.29±0.22 ^a	0.29±0.15 ^a	0.29±0.22 ^a	
46	α-石竹烯	6753-98-6	0.43±0.07 ^a	0.49±0.05 ^a	0.28±0.06 ^b	-	-	-	0.4±0.07 ^b	1.89±0.71 ^a	0.95±0.05 ^b	1.89±0.71 ^a	0.95±0.05 ^b	
47	β-榄香烯	515-13-9	0.05±0.02 ^a	0.15±0.1 ^a	0.12±0.09 ^a	-	-	-	-	-	-	-	-	
48	反式石竹烯	87-44-5	0.02±0.01 ^{ab}	0.04±0.02 ^a	-	0.03±0 ^b	0.03±0 ^a	0.01±0 ^c	0.04±0.02 ^a	0.02±0.02 ^a	0.03±0.02 ^a	0.02±0.02 ^a	0.03±0.02 ^a	
49	α-法呢烯	502-61-4	-	-	-	0.05±0 ^b	0.1±0.01 ^a	0.04±0.03 ^b	-	-	-	-	-	
50	萜品油烯	586-62-9	1.82±0.53 ^b	7.68±4.03 ^a	1.79±2.05 ^b	1.2±0.07 ^b	2.97±0.7 ^a	-	4.87±1.46 ^a	1.41±1.65 ^b	3.4±0.98 ^{ab}	1.41±1.65 ^b	3.4±0.98 ^{ab}	
51	月桂烯	123-35-3	-	-	-	0.02±0 ^b	0.03±0 ^a	0.02±0 ^c	-	-	-	-	-	
52	(-)-大牻牛儿苗D	317819-80-0	-	-	-	0.34±0.02 ^a	0.22±0.01 ^b	0.21±0.01 ^b	0.09±0.04 ^a	0.27±0.15 ^a	0.22±0.14 ^a	0.27±0.15 ^a	0.22±0.14 ^a	
53	(E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯	19945-61-0	0.01±0 ^a	0.05±0.04 ^a	0.04±0.02 ^a	0.01±0 ^c	0.03±0 ^b	0.05±0.01 ^a	-	-	-	-	-	
54	(E)-α-香柠檬烯	13474-59-4	0.11±0.02 ^a	-	0.06±0.02 ^b	0.09±0.02 ^a	0.06±0 ^b	0.04±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.04±0.02 ^a	0.01±0.01 ^a	0.04±0.02 ^a	
55	顺式-芳樟醇氧化物(吡喃型)	39028-58-5	-	-	-	-	-	-	0.04±0 ^a	0.04±0.01 ^a	0.04±0.01 ^a	0.04±0.01 ^a	0.04±0.01 ^a	
56	(R)-γ-杜松烯	39029-41-9	-	-	-	0.03±0 ^b	0.11±0.04 ^a	0.05±0 ^b	0.13±0.09 ^a	0.08±0.05 ^a	0.1±0.06 ^a	0.08±0.05 ^a	0.1±0.06 ^a	

续表 4

序号	挥发性物质	CAS号	相对含量(%)											
			虎爪状			全开放			衰败期					
			29 °C	35 °C	41 °C	29 °C	35 °C	41 °C	29 °C	35 °C	41 °C			
57	(1Z,4Z,7Z)-1,5,9,9-四甲基环十一碳-1,4,7-三烯	0-00-0	-	-	-	0.07±0.004 ^b	0.12±0.01 ^a	-	0.12±0.08 ^a	0.04±0.03 ^a	0.1±0.06 ^a			
58	α -杜松烯	24406-05-1	-	-	-	0.01±0 ^b	0.01±0 ^a	0.01±0 ^b	0.05±0.02 ^a	0.07±0.11 ^a	0.02±0.01 ^a			
59	双环吉玛烯	24703-35-3	-	-	-	0.02±0 ^b	0.02±0 ^b	1.22±0.54 ^a	-	-	-			
60	顺式-愈创木-3,5-二烯	0-00-0	-	-	-	-	-	-	0.01±0 ^a	0.01±0 ^a	-			
61	γ -罗罗烯	30021-74-0	-	-	-	-	0.02±0.01	-	0.03±0.02 ^a	0.01±0 ^a	0.01±0.01 ^a			
62	大香叶烯D	23986-74-5	0.14±0.07 ^{ab}	0.23±0.12 ^a	0.03±0.01 ^b	0.21±0.01 ^a	0.21±0.02 ^a	0.08±0 ^b	0.26±0.19 ^a	0.16±0.17 ^a	0.25±0.19 ^a			
63	萜烯类		3.21±0.84 ^b	9.91±3.39 ^a	2.31±2.02 ^b	2.2±0.07 ^b	4.09±0.85 ^a	1.85±0.55 ^b	6.75±1.38 ^a	4.31±1.9 ^a	5.45±0.97 ^a			
64	3-甲基己烷	589-34-4	-	-	-	0.02±0.01 ^b	0.19±0.01 ^a	0.22±0.09 ^a	0.14±0.04 ^a	0.18±0.28 ^a	0.4±0.5 ^a			
65	3-甲基十七烷	6418-44-6	-	-	-	-	-	-	0.01±0 ^a	-	0.02±0.01 ^a			
66	二十烷	112-95-8	0.01±0 ^b	0.02±0 ^b	-	-	-	-	0.14±0.01 ^a	-	0.14±0.07 ^a			
67	二十一烷	629-94-7	0.01±0 ^b	0.1±0.05 ^a	0.03±0.02 ^b	-	-	-	0.19±0.01 ^a	0.15±0.12 ^a	0.3±0.03 ^a			
68	正十六烷	7667-80-3	-	-	-	-	-	-	0.01±0 ^a	0.07±0.07 ^a	0.01±0.01 ^a			
69	正十九烷	629-92-5	-	-	-	0.02±0 ^c	0.18±0.01 ^a	0.13±0.03 ^b	-	-	-			
70	正十七烷	629-78-7	-	-	-	-	-	-	0.02±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a			
71	正十四烷	629-59-4	0.04±0.01 ^b	0.19±0.1 ^a	0.15±0.03 ^{ab}	-	-	-	0.05±0.02 ^a	0.02±0.01 ^a	0.04±0.01 ^a			
72	正五十四烷	5856-66-6	-	-	-	-	-	-	0.01±0 ^a	-	0.01±0 ^a			
73	2,6,10,15-四甲基十七烷	54833-48-6	-	-	-	-	-	-	-	0.08±0.04 ^a	0.13±0.04 ^a			
74	2-甲基二十六烷	1561-02-0	-	0.03±0.02	-	-	-	-	0.02±0.005 ^a	0.05±0.09 ^a	0.03±0.02 ^a			
75	烷烃类		0.07±0.01 ^c	0.35±0.03 ^a	0.17±0.01 ^b	0.05±0.01 ^b	0.37±0.02 ^a	0.35±0.06 ^a	0.56±0.05 ^a	0.52±0.45 ^a	1.07±0.52 ^a			
76	环己酮	108-94-1	0.01±0.01 ^a	0.21±0.12 ^a	0.24±0.29 ^a	0.01±0 ^b	-	0.02±0 ^b	0.04±0.02 ^a	0.03±0.02 ^a	0.02±0.01 ^a			
77	异佛尔酮	78-59-1	-	-	-	0.02±0 ^c	0.04±0 ^b	0.11±0.01 ^a	-	-	-			
78	酮类		0.01±0.01 ^a	0.21±0.12 ^a	0.24±0.29 ^a	0.03±0 ^b	0.04±0 ^b	0.13±0.01 ^a	0.04±0.02 ^a	0.03±0.02 ^a	0.02±0.01 ^a			
79	2,5-二叔丁基酚	5875-45-6	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
80	2,6-二叔丁基苯酚	128-39-2	-	-	-	-	-	-	0.02±0.02 ^a	-	0.01±0 ^a			
81	酚类		0±0	0±0	0±0	0.01±0 ^a	0.01±0 ^a	0±0 ^b	0.02±0.02 ^a	0±0 ^a	0.01±0 ^a			
82	磷酸	33795-18-5	-	-	-	-	-	-	-	1.17±1.21 ^a	0.6±0.51 ^a			
83	邻苯二甲酸	84-74-2	0.09±0.06 ^c	-	0.51±0.69 ^a	0.1±0.02 ^b	0.11±0.1 ^a	0.03±0.02 ^c	0.28±0.08 ^a	0.35±0.48 ^a	0.19±0.11 ^a			
84	酸类		0.09±0.06 ^c	0±0 ^a	0.51±0.69 ^a	0.1±0.02 ^a	0.11±0.1 ^a	0.03±0.02 ^a	0.28±0.08 ^b	1.51±0.93 ^a	0.79±0.4 ^{ab}			
85	2-乙基丁醛	97-96-1	-	-	-	-	-	-	0.04±0 ^a	0.04±0.01 ^a	0.02±0 ^b			

续表 4

序号	挥发性物质	CAS号	相对含量(%)											
			虎爪状			全开放			衰败期					
			29 °C	35 °C	41 °C	29 °C	35 °C	41 °C	29 °C	35 °C	41 °C			
81	苯甲醛	100-52-7	0.07±0.03 ^b	-	0.22±0.04 ^a	0.05±0.01 ^c	0.19±0.03 ^a	0.12±0.01 ^b	-	-	-	-	-	
82	正己醛	66-25-1	-	-	-	0.01±0 ^c	0.06±0 ^c	0.02±0 ^b	0.04±0.03 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	
83	13-异丙基弥罗松酚-8,11,13-三烯-19-醛 醛类	24035-50-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01±0	-	
84	1,2-二氯丙烷	78-87-5	0.07±0.03 ^b	0±0 ^c	0.22±0.04 ^a	0.06±0.01 ^c	0.26±0.04 ^a	0.14±0.01 ^b	0.09±0.04 ^a	0.06±0.02 ^a	0.06±0.02 ^a	0.04±0.02 ^a	0.04±0.02 ^a	
85	六氟-1,1,3,4-四氯丁烷	423-38-1	-	-	-	0.01±0 ^a	0.01±0 ^a	-	-	-	-	-	-	
86	1,1,2,3,4,5-六氟-1,2,3,4,5,5-六氟戊烷	55975-93-4	0.03±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.01±0 ^b	0.01±0.002 ^a	0.01±0.001 ^a	0.001±0.0004 ^b	0.08±0.01 ^a	0.09±0.15 ^a	0.09±0.15 ^a	0.05±0.003 ^a	0.05±0.003 ^a	
87	1,1,2,3,4,5,6,6-八氟-1,2,3,4,5,6-六氟己烷 卤代烃	307-25-5	0.11±0.03 ^a	0.09±0.01 ^a	0.09±0.01 ^a	-	-	-	-	-	-	-	-	
88	1,2,4,5-四异丙苯	635-11-0	0.13±0.04 ^a	0.11±0.02 ^a	0.1±0.02 ^a	0.01±0 ^a	0.01±0 ^a	0±0 ^b	0.01±0.01 ^a	0.1±0.16 ^a	0.1±0.16 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	
89	1,3,5-三叔丁基苯	1460-02-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
90	3,4-二乙基联苯	61141-66-0	-	-	0.05±0.08 ^a	-	-	-	-	-	-	-	-	
91	对二甲苯	106-42-3	0.09±0.03 ^b	0.76±0.43 ^a	0.73±0.35 ^{ab}	0.03±0 ^c	0.2±0.01 ^a	0.14±0 ^b	-	-	-	-	-	
92	甲苯	108-88-3	-	-	-	0.11±0.03 ^c	0.75±0.03 ^a	0.26±0.06 ^b	-	-	-	-	-	
93	邻二甲苯	95-47-6	0.23±0.07 ^b	1.2±0.48 ^a	1.17±0.26 ^a	0.08±0.01 ^c	0.39±0.02 ^a	0.36±0.02 ^b	0.52±0.45 ^a	0.22±0.13 ^a	0.22±0.13 ^a	0.24±0.14 ^a	0.24±0.14 ^a	
94	邻伞花烃 芳香烃	527-84-4	0.01±0 ^b	0.07±0.01 ^a	0.02±0 ^b	-	-	-	-	-	-	-	-	
95	1-乙烯基-1-甲基-2-(1-甲基乙烯基)-4-(1-甲基亚乙基)环己烷	490377.00	0.34±0.1 ^b	2.05±0.92 ^a	1.96±0.68 ^a	0.22±0.02 ^c	1.35±0.07 ^a	0.76±0.04 ^b	0.54±0.44 ^a	0.45±0.25 ^a	0.45±0.25 ^a	0.25±0.14 ^a	0.25±0.14 ^a	
96	环庚三烯	544-25-2	0.08±0.05 ^b	0.84±0.53 ^a	0.34±0.12 ^{ab}	-	-	-	-	-	-	-	-	
97	环状烃	107-98-2	0.08±0.05 ^b	0.84±0.53 ^a	0.34±0.12 ^{ab}	0.01±0 ^b	0.03±0 ^b	0.01±0 ^c	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0	
98	丙二醇甲醚 乙二醇丁醚 醚类	111-76-2	11.3±6.49 ^a	6.37±2.34 ^a	5.32±0.71 ^a	0.16±0.05 ^c	1.39±0.06 ^b	3.11±0.74 ^a	13.3±4.59 ^a	3.58±4.83 ^b	3.58±4.83 ^b	3.56±4.17 ^b	3.56±4.17 ^b	
99	1,2,3-三甲基-4-(E)-丙-1-烯基]萘	26137-53-1	0.07±0.04 ^a	-	5.76±0.34 ^a	0.16±0.05 ^c	1.39±0.06 ^b	3.11±0.74 ^a	13.3±4.59 ^a	3.58±4.83 ^b	3.58±4.83 ^b	3.56±4.17 ^b	3.56±4.17 ^b	
100	2-甲基丁腈	18936-17-9	0.04±0.02 ^b	0.14±0.07 ^a	-	0.06±0.01 ^a	0.05±0 ^b	-	0.31±0.11 ^{ab}	0.67±0.37 ^a	0.67±0.37 ^a	0.03±0.01 ^b	0.03±0.01 ^b	
101	甲氧基苯基酚	0-00-0	-	-	-	0.24±0.08 ^b	0.22±0.01 ^b	0.82±0.01 ^a	1.27±1.01 ^a	1.50±1.51 ^a	1.50±1.51 ^a	3.06±1.14 ^a	3.06±1.14 ^a	
102	吡啶 其他类 总和	120-72-9	4.08±1.56 ^a	0.23±0.13 ^b	4.84±1.09 ^a	8.38±0.68 ^b	7.51±0.46 ^b	10.62±0.45 ^a	3.88±2 ^a	3.36±1.12 ^a	3.36±1.12 ^a	6.39±1.94 ^a	6.39±1.94 ^a	
			4.12±1.54 ^a	0.36±0.19 ^b	4.84±1.09 ^a	8.68±0.67 ^b	7.77±0.44 ^b	11.45±0.46 ^a	5.45±0.92 ^b	5.53±2.47 ^b	5.53±2.47 ^b	9.48±0.87 ^a	9.48±0.87 ^a	
			100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

注：“-”代表未检出。

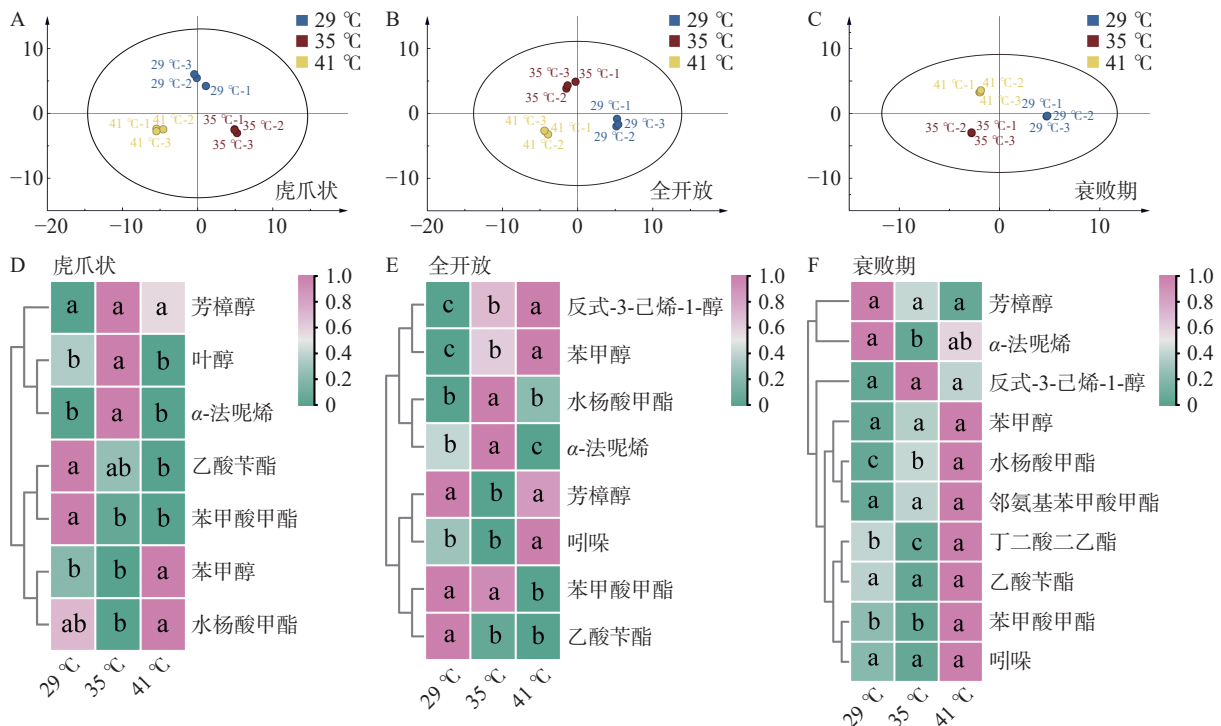


图 4 采后不同环境温度处理的茉莉花差异挥发性物质筛选

Fig.4 Differential volatile compounds screening of jasmine flowers treated with different postharvest ambient temperatures
注: (A~C)茉莉花挥发性物质 OPLS-DA 得分散点图; (D~F)茉莉花差异挥发性物质相对含量聚类热图。

键标志性差异物质^[38-39], 生成的 OPLS-DA 模型的质量参数表现出较好的拟合度及高预测能力(虎爪状: $R^2X=0.997$, $R^2Y=0.980$, $Q^2=0.940$; 全开放: $R^2X=0.878$, $R^2Y=0.983$, $Q^2=0.970$; 衰败期: $R^2X=0.990$, $R^2Y=0.976$, $Q^2=0.951$)。如图 4(A~C)所示, 采后不同环境温度(29、35 和 41 °C)处理的茉莉花在不同开放时期都能得到较好的区分, 说明采后不同环境温度处理的茉莉花挥发性物质差异明显, 进一步筛选出茉莉花不同开放时期 VIP>1 的差异挥发性物质共 11 种。

在采后不同环境温度处理的茉莉花虎爪状时期, 共鉴定出乙酸苄酯、苯甲酸甲酯、叶醇、 α -法呢烯、苯甲醇、芳樟醇和水杨酸甲酯 7 种差异挥发性物质(图 4D)。其中具有花香的 α -法呢烯在采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花中相对含量显著高于采后环境温度 29 °C 和 41 °C 处理的茉莉花($P<0.05$), α -法呢烯的积累有助于提高茉莉花和茉莉花茶香气品质^[40-41], 因此, 可推测采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花虎爪状时期花香更突出。

在采后不同环境温度处理的茉莉花全开放时期, 共鉴定出苯甲酸甲酯、芳樟醇、苯甲醇、乙酸苄酯、反式-3-己烯-1-醇、吡嗪、 α -法呢烯和水杨酸甲酯 8 种差异挥发性物质(图 4E)。采后环境温度 41 °C 处理的茉莉花中具有花香的苯甲酸甲酯和 α -法呢烯相对含量都显著低于采后环境温度 29 °C 和 35 °C 处理的茉莉花($P<0.05$), 同时具有青味的反式-3-己烯-1-醇相对含量显著高于采后环境温度 29 °C 和 35 °C 处理的茉莉花($P<0.05$), 可以得出较高温度环境不利于

茉莉花香气的释放。而采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花中 α -法呢烯相对含量显著高于采后环境温度 29 °C 和 41 °C 处理的茉莉花($P<0.05$), 表明采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花全开放时期香气较浓郁。

在采后不同环境温度处理的茉莉花衰败期, 共鉴定出反式-3-己烯-1-醇、乙酸苄酯、吡嗪、 α -法呢烯、芳樟醇、水杨酸甲酯、苯甲酸甲酯、丁二酸二乙酯、邻氨基苯甲酸甲酯和苯甲醇 10 种差异挥发性物质(图 4F)。其中, 采后环境温度 29 °C 处理的茉莉花中具有花果香的邻氨基苯甲酸甲酯、苯甲醇和水杨酸甲酯等挥发性物质相对含量都低于采后环境温度 35 °C 和 41 °C 处理的茉莉花, 因此, 可推测采后环境温度 29 °C 处理的茉莉花的香气较弱。

综合茉莉花差异挥发性物质分析结果, 采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花在虎爪状和全开放时期花香较突出。

2.3.3 采后环境温度对茉莉花关键呈香物质的影响分析 香气的呈现除了与挥发性物质含量相关外, 还与该物质的气味阈值密切相关^[42]。为分析不同挥发性物质对茉莉花香气的贡献度(ROAV), 对 11 种 VIP 值大于 1 的差异挥发性物质进行 ROAV 分析, 进一步筛选出 $ROAV \geq 1$ 的挥发性物质, 如表 5 所示。

在采后不同环境温度处理的茉莉花虎爪状时期, 具有花香的芳樟醇($ROAV=100$)是茉莉花香气贡献最大的挥发性物质。芳樟醇($ROAV=100$)、叶醇($ROAV=29.50$)、苯甲酸甲酯($ROAV=19.89$)、水杨酸甲酯($ROAV=14.90$)和乙酸苄酯($ROAV=13.93$)

表5 采后不同环境温度处理的茉莉花关键香气成分分析

Table 5 Analysis of key aroma components of jasmine at different postharvest ambient temperatures

开放状态	香气成分	VIP值	阈值 ⁽⁴³⁻⁴⁷⁾ ($\mu\text{g/L}$)	ROAV			香气描述
				29 °C	35 °C	41 °C	
虎爪状	乙酸苄酯	2.53	270	13.93	5.66	6.14	果香
	苯甲酸甲酯	2.22	73	19.89	3.94	4.49	香草、生菜、西梅、紫罗兰
	叶醇	2.12	13	29.50	47.27	0.37	青草、青味水果、绿叶、草本植物、未成熟的香蕉
	α -法呢烯	1.87	87	2.62	6.18	1.79	水煮蔬菜、花香、木香
	苯甲醇	1.78	100	4.71	1.80	7.37	煮樱桃、苔藓、烤面包、玫瑰花
	芳樟醇	1.47	6	100	100	100	香菜、花香、薰衣草、柠檬、玫瑰
	水杨酸甲酯	1.11	40	14.90	5.49	11.89	甜香、薄荷香、清凉感、果香、花香
	苯甲酸甲酯	3.05	73	14.42	39.35	6.00	香草、生菜、西梅、紫罗兰
	芳樟醇	2.75	6	100	43.26	100	香菜、花香、薰衣草、柠檬、玫瑰
	苯甲醇	2.39	100	4.93	22.64	11.29	煮樱桃、苔藓、烤面包、玫瑰花
全开放	乙酸苄酯	2.39	270	8.31	19.07	7.52	果香
	反式-3-己烯-1-醇	2.27	13	11.69	100	52.09	青味
	吲哚	1.66	140	4.08	10.50	5.94	花香、烧焦、樟脑丸
	α -法呢烯	1.63	87	0.94	6.68	-	水煮蔬菜、花香、木香
	水杨酸甲酯	1.49	40	8.66	36.06	10.91	甜香、薄荷香、清凉感、果香、花香
	反式-3-己烯-1-醇	2.15	13	20.49	56.87	32.67	青味
	乙酸苄酯	2.05	270	6.26	7.49	7.25	果香
	吲哚	1.94	140	1.98	2.14	3.54	花香、烧焦、樟脑丸
	α -法呢烯	1.85	87	4.00	1.44	3.03	水煮蔬菜、花香、木香
	芳樟醇	1.66	6	100	100	72.80	香菜、花香、薰衣草、柠檬、玫瑰
衰败期	水杨酸甲酯	1.52	40	1.67	3.95	5.86	甜香、薄荷香、清凉感、果香、花香
	苯甲酸甲酯	1.40	73	0.94	0.80	2.32	香草、生菜、西梅、紫罗兰
	邻氨基苯甲酸甲酯	1.34	3	50.89	82.90	100	花朵、蜂蜜、桃子
	苯甲醇	1.33	100	2.53	3.65	4.02	煮樱桃、苔藓、烤面包、玫瑰花

注：“-”表示无法计算其ROAV值，香气描述根据风味成分库确定(<https://www.femaflavor.org>)。

是采后环境温度 29 °C 处理的茉莉花香气主要贡献物质 (ROAV>10); 芳樟醇 (ROAV=100) 和叶醇 (ROAV=47.27) 是采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花香气主要贡献物质 (ROAV>10); 芳樟醇 (ROAV=100) 和水杨酸甲酯 (ROAV=11.89) 是采后环境温度 41 °C 处理的茉莉花香气的贡献物质 (ROAV>10)。其中, 在采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花虎爪状时期, 具有花香的 α -法呢烯的相对含量显著高于采后环境温度 29 °C 和 41 °C 处理的茉莉花 ($P<0.05$), 有利于茉莉花馥郁香气的形成。

在采后不同环境温度处理的茉莉花全开放时期, 分析发现具有花香的 α -法呢烯是采后环境温度 35 °C (ROAV=6.68) 处理的茉莉花全开放时期的关键香气成分 (ROAV \geq 1), 但在采后环境温度 29 °C (ROAV=0.94) 和 41 °C (ROAV=0) 处理的茉莉花中 α -法呢烯均不是关键香气成分, 进一步说明 α -法呢烯对采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花香气形成具有重要作用。同时, 采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花中具有花香的苯甲酸甲酯 (ROAV=39.35)、苯甲醇 (ROAV=22.64)、吲哚 (ROAV=10.50) 和具有果香的乙酸苄酯 (ROAV=19.07)、 α -法呢烯 (ROAV=6.68) 和水杨酸甲酯 (ROAV=36.06) 的香气贡献都高于采后环境温度 29 °C 和 41 °C 处理的茉莉花。

在采后不同环境温度处理的茉莉花衰败期, 芳樟

醇 (ROAV=100)、邻氨基苯甲酸甲酯 (ROAV=50.89)、反式-3-己烯-1-醇 (ROAV=20.49) 是采后环境温度 29 °C 处理的茉莉花香气主要贡献物质 (ROAV>10); 芳樟醇 (ROAV=100)、邻氨基苯甲酸甲酯 (ROAV=82.90)、反式-3-己烯-1-醇 (ROAV=56.87) 是采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花香气主要贡献物质 (ROAV>10); 邻氨基苯甲酸甲酯 (ROAV=100)、芳樟醇 (ROAV=72.80)、反式-3-己烯-1-醇 (ROAV=32.67) 是采后环境温度 41 °C 处理的茉莉花香气主要贡献物质 (ROAV>10)。由此可见, 构成茉莉花衰败期的关键呈香物质差异较小, 具有青味的反式-3-己烯-1-醇是这一时期的特征香气。

综上所述, 茉莉花的关键呈香物质受环境温度的影响较大, 采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花在全开放时期能释放出更多的花香物质, 尤其是全开放时期, 更有利于呈花果香的苯甲酸甲酯、苯甲醇、吲哚、乙酸苄酯和 α -法呢烯等物质的释放。

3 结论

本研究通过测定采后不同环境温度处理的茉莉花物理特性和挥发性物质, 分析不同环境温度对茉莉花开放释香的影响。结果表明, 采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花开放程度最大, 开放状态最好, 既能保证茉莉花的含水率相对稳定, 又能维持较大的开放程度, 同时采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花花温和堆

温稳定在 35 °C 上下,更有利于释香。通过茉莉花感官评价分析,发现环境温度 35 °C 处理的茉莉花香气浓郁,花色洁白,开放程度大,且茉莉花从花蕾到虎爪状和虎爪状到全开放的时间都最短,有利于促进茉莉花蕾的开放。此外,经 ATD-GC-MS 分析,采后不同环境温度处理的茉莉花挥发性物质类别和含量差异较大,酯类、萜烯类、醇类和烷烃类是茉莉花相对含量较高的挥发性物质种类,酯类香气物质达 28 种,是最多的一类香气物质,也是茉莉花香气的物质来源。采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花在虎爪状、全开放和衰败期的部分挥发性物质(α -法呢烯、反式石竹烯、碳酸二乙酯、2-甲基丁醇、萜品油烯、甲苯、邻伞花烃等)相对含量显著高于采后环境温度 29 °C 和 41 °C 处理的茉莉花($P<0.05$)。其中,具有花香、果香的 α -法呢烯、反式石竹烯等萜烯类物质,作为茉莉花“清新花香”的重要物质基础,在采后环境温度 35 °C 处理的茉莉花虎爪状和全开放时期相对含量显著高于采后环境温度 29 °C 和 41 °C 处理的茉莉花($P<0.05$)。

本研究结果表明,采后不同环境温度处理的茉莉花具有相似的香气成分,但在含量上有较大差异,采后环境温度 35 °C 处理更有利于茉莉花的开放和香气释放,是茉莉花适宜的采后处理环境温度,能促进茉莉花香气释放,为提高茉莉花茶香气品质提供参考。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 熊一帆. 茉莉鲜花释香机制与挥发性成分变化规律研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020. [XIONG Yifan. Study on the release mechanism of jasmine flowers and the change of volatile constituents[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020.]
- [2] 赵国飞, 罗理勇, 常睿, 等. 离体茉莉花释香过程的香气成分特征[J]. 食品科学, 2015, 36(18): 120–126. [ZHAO Guofei, LUO Liyong, CHANG Rui, et al. Aroma characteristics of jasmine during postharvest release of fragrance[J]. Food Science, 2015, 36(18): 120–126.]
- [3] ZHAO Yueling, LI Shunyu, DU Xiao, et al. Insights into momentous aroma dominating the characteristic flavor of jasmine tea[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(12): 7841–7854.
- [4] 叶乃兴, 杨江帆. 福州茉莉花与茶文化系统研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017. [YE N X, YANG J F. Study on the Fuzhou jasmine and tea culture system[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017.]
- [5] ZHANG Yangbo, HUANG Jianan, XIONG Yifan, et al. Jasmine tea attenuates chronic unpredictable mild stress-induced depressive-like behavior in rats via the gut-brain axis[J]. Nutrients, 2021, 14(1): 99.
- [6] SENGAR N, JOSHI A, PRASAD S K, et al. Anti-inflammatory, analgesic and anti-pyretic activities of standardized root extract of *Jasminum sambac*[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2015, 160: 140–148.
- [7] 张宇航, 谷梦雅, 徐梦婷, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 对笔尖单瓣茉莉花不同开放阶段香气成分差异分析[J/OL]. 食品科学, 1–18 [2024-11-12]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2206.TS.20240308.1133.028>. [ZHANG Y H, GU M Y, XU M T, et al. Analysis of aroma composition in different open stages of single jasmine based on HS-SPME-GC-MS[J/OL]. Food Science, 1–18 [2024-11-12]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2206.TS.20240308.1133.028>.]
- [8] WANG Yueguang, HUANG Zifeng, ZHOU Taoyi, et al. Progress of research on aroma absorption mechanism and aroma fixation pathway of jasmine green tea[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(15): 9111–9127.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 茉莉花茶加工技术规范: GB/T 34779-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technique specification for processing of jasmine tea: GB/T 34779-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
- [10] 张振发. 福州传统茉莉花茶提高质量增效的重要技术[J]. 福建茶叶, 2022, 44(12): 30–32. [ZHANG Zhenfa. Important techniques for improving quality and increasing efficiency of Fuzhou traditional jasmine tea[J]. Fujian Tea, 2022, 44(12): 30–32.]
- [11] 王黎明. 茉莉花(*Jasminum sambac*. Ait)开放释香机理研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2002. [WANG L M. Study on the mechanism of jasmine (*Jasminum sambac*. Ait)[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2002.]
- [12] 陈发来. 鲜花养护与茶坯吸香效果的关系与工艺探究[J]. 福建茶叶, 2022, 44(12): 16–18. [CHEN Falai. Study on the relationship between flower conservation and aroma absorption effect of tea blank and its technology[J]. Fujian Tea, 2022, 44(12): 16–18.]
- [13] 陈成忠. 茉莉花茶湿坯连窨工艺长期应用总结[J]. 中国茶叶加工, 2005(2): 32–33. [CHEN Chengzhong. Application of the continuous wet scenting process for jasmine tea[J]. China Tea Processing, 2005(2): 32–33.]
- [14] 张钰婷, 叶秋萍, 程淑华, 等. 茉莉花茶加工技术与吸香机理研究现状[J]. 热带作物学报, 2016, 37(1): 203–207. [ZHANG Yuting, YE Qiuping, CHENG Shuhua, et al. Technology and mechanism of jasmine tea scenting[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(1): 203–207.]
- [15] 沈寒竹. 茉莉花茶窨制中的鲜花培养[J]. 茶业通报, 1986, 8(4): 33–34. [SHEN Hanzhu. Cultivation of flowers in tea-making of jasmine[J]. Journal of Tea Business, 1986, 8(4): 33–34.]
- [16] AN Huimin, OU Xingchang, ZHANG Yangbo, et al. Study on the key volatile compounds and aroma quality of jasmine tea with different scenting technology[J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132718.
- [17] 陆宁, 宛晓春, 潘冬. 茉莉花茶香气成分与品质之间关系的初步研究[J]. 食品科学, 2004, 25(6): 93–97. [LU Ning, WAN Xiaochun, PAN Dong. Extraction and analysis of jasmine tea aroma constituents of three different grades[J]. Food Science, 2004, 25(6): 93–97.]
- [18] WANG Shuyan, ZHAO Feng, WU Wenxi, et al. Comparison of volatiles in different jasmine tea grade samples using electronic nose and automatic thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry followed by multivariate statistical analysis[J]. Molecules, 2020, 25(2): 380.
- [19] 张永华, 张海东, 赵玉清, 等. 云南晒青毛茶物理特性研究[J]. 湖南农业科学, 2013(4): 43–44. [ZHANG Yonghua, ZHANG Haidong, ZHAO Yuqing, et al. Study on physical characteristics of Yunnan sun-dried green tea[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2013(4): 43–44.]
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard de-

- termination of moisture in food: GB 5009.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
- [21] 魏昊, 蓝天梦, 缪伊雯, 等. 基于感官组学分析不同足火方式对金牡丹工夫红茶香气的影响[J]. 茶叶科学, 2023, 43(1): 109-123. [WEI Hao, LAN Tianmeng, MIAO Yiwen, et al. Analysis of the effect of different full firing methods on the aroma of jinfudan congou black tea based on sensomics characterization[J]. Journal of Tea Science, 2023, 43(1): 109-123.]
- [22] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: "ROAV"法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370-374. [LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, XU Xinglian. "ROAV" method: A new method for determining key odor compounds of Rugao ham[J]. Food Science, 2008, 29(7): 370-374.]
- [23] 裴鹏正, 负建民, 贾琦, 等. 软儿梨果酒发酵过程中挥发性风味物质变化分析[J]. 生物技术进展, 2021, 11(6): 758-769. [PEI Pengzheng, YUN Jianmin, JIA Qi, et al. Analysis on changes of volatile flavor compounds in Ruan'er pear wine during fermentation[J]. Current Biotechnology, 2021, 11(6): 758-769.]
- [24] 高丽萍, 王黎明, 王云生, 等. 影响茉莉花开放释香的环境因素研究[J]. 茶叶科学, 2001, 21(1): 72-75.68. [GAO Liping, WANG Liming, WANG Yunsheng, et al. Effects of environmental factors on the blooming and aroma releasing of jasmine flower[J]. Journal of Tea Science, 2001, 21(1): 72-75.68.]
- [25] 郑亚楠, 张华, 张群峰, 等. 低温长窨工艺对茉莉花茶滋味品质的影响[J]. 中国茶叶, 2025, 47(1): 68-73. [ZHENG Yanan, ZHANG Hua, ZHANG Qunfeng, et al. Effect of long scenting at low temperature on the taste quality of jasmine tea[J]. China Tea, 2025, 47(1): 68-73.]
- [26] 郑亚楠, 胡佳卉, 李依岚, 等. 茉莉花茶吸香机理及窨制工艺研究现状[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2023(1): 28-30. [ZHENG Yanan, HU Jiahui, LI Yilan, et al. Research status of aroma absorption mechanism and scenting technology of jasmine tea[J]. Sericulture Tea Communication, 2023(1): 28-30.]
- [27] DÖTTERL S, GERSHENZON J. Chemistry, biosynthesis and biology of floral volatiles: Roles in pollination and other functions[J]. Natural Product Reports, 2023, 40(12): 1901-1937.
- [28] 圣倩倩, 高顺, 顾舒文, 等. CO₂浓度升高对植物生理生化影响的研究进展[J]. 西部林业科学, 2021, 50(3): 171-176. [SHENG Qianqian, GAO Shun, GU Shuwen, et al. Research progress on physiological and biochemical effects of elevated CO₂ concentration on plants[J]. Journal of West China Forestry Science, 2021, 50(3): 171-176.]
- [29] ZHANG Cheng, ZHOU Chengzhe, TIAN Caiyun, et al. Volatilomics analysis of jasmine tea during multiple rounds of scenting processes[J]. Foods, 2023, 12(4): 812.
- [30] CHEN G, MOSTAFA S, LU Z G, et al. The jasmine (*Jasminum sambac*) genome provides insight into the biosynthesis of flower fragrances and jasmonates[J]. Genomics, Proteomics & Bioinformatics, 2023, 21(1): 127-149.
- [31] YU Ying, LYU Shiheng, CHEN Dan, et al. Volatiles emitted at different flowering stages of *Jasminum sambac* and expression of genes related to α -farnesene biosynthesis[J]. Molecules, 2017, 22(4): 546.
- [32] HOU Zhiwei, CHEN Ziyue, LI Le, et al. Comparison of volatile compounds in Jingshan green tea scented with different flowers using GC-IMS and GC-MS analyses[J]. Foods, 2024, 13(17): 2653.
- [33] BRILIANTAMA A, OKTAVIANI N M D, RAHMAWATI S, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction (UAE) for simultaneous determination of individual phenolic compounds in 15 dried edible flowers[J]. Horticulturae, 2022, 8(12): 1216.
- [34] 李鹤, 俞滢, 陈桂信, 等. 双瓣茉莉花(*Jasminum sambac* (L.) Ait)开放过程香气成分的动态变化[J]. 茶叶学报, 2015, 56(1): 29-38. [LI He, YU Ying, CHEN Guixin, et al. Changes on aromatics of double disc jasmine during petal-opening[J]. Acta Tea Sinica, 2015, 56(1): 29-38.]
- [35] ZHOU Chengzhe, ZHU Chen, TIAN Caiyun, et al. Integrated volatile metabolome, multi-flux full-length sequencing, and transcriptome analyses provide insights into the aroma formation of postharvest jasmine (*Jasminum sambac*) during flowering[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 183: 111726.
- [36] ZHANG Yangbo, XIONG Yifan, AN Huimin, et al. Analysis of volatile components of jasmine and jasmine tea during scenting process[J]. Molecules, 2022, 27(2): 479.
- [37] CHEN Yuan, ANHuimin, HUANGYiwen, et al. Analysis of non-volatile compounds in jasmine tea and jasmine based on metabolomics and sensory evaluation[J]. Foods, 2023, 12(19): 3708.
- [38] SU Dan, HE Jiaojiao, ZHOU Yanzhu, et al. Aroma effects of key volatile compounds in Keemun black tea at different grades: HS-SPME-GC-MS, sensory evaluation, and chemometrics[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131587.
- [39] 邱晓红, 张丹丹, 韦航, 等. 基于 PTR-TOF-MS 与 GC-MS 技术的武夷水仙和武夷肉桂香气特征分析[J]. 天然产物研究与开发, 2018, 30(7): 1195-1201. [QIU Xiaohong, ZHANG Dandan, WEI Hang, et al. Analysis of aroma of different varieties of Wuyi rock tea by PTR-TOF-MS and GC-MS[J]. Natural Product Research and Development, 2018, 30(7): 1195-1201.]
- [40] ZHANG Yuhang, GU Mengya, YANG Shiwei, et al. Dynamic aroma characteristics of jasmine tea scented with single-petal jasmine "Bijian": A comparative study with traditional double-petal jasmine[J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141735.
- [41] HONG Yaping, GU Mengya, ZHANG Yuhang, et al. Aroma formation in single- and double-petal jasmines (*Jasminum sambac*) during flowering via volatile metabolome and transcriptome[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 333: 113289.
- [42] 邵淑贤, 王淑燕, 王丽, 等. 基于 ATD-GC-MS 技术的不同品种白牡丹茶香气成分分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(1): 261-268. [SHAO Shuxian, WANG Shuyan, WANG Li, et al. Analysis of aroma components of different cultivars of white peony tea based on ATD-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(1): 261-268.]
- [43] 徐梦婷, 邵淑贤, 陈静, 等. 不同茶树品种工夫红茶挥发性成分及其关键香气成分分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39(1): 281-290. [XU Mengting, SHAO Shuxian, CHEN Jing, et al. Analysis of volatile and key aroma components in congou black tea varieties[J]. Modern Food Science & Technology, 2023, 39(1): 281-290.]
- [44] 胡腾飞, 萧涵, 谢贺, 等. 基于 GC×GC-TOFMS-O 分析 3 种武夷岩茶的关键香气成分[J]. 现代食品科技, 2024, 40(6): 221-230. [HU Tengfei, XIAO Han, XIE He, et al. Analysis of key aroma compounds in three varieties of Wuyi rock tea based on GC×GC-TOFMS-O[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(6): 221-230.]
- [45] 安会敏, 欧行畅, 熊一帆, 等. 茉莉花茶特征香气成分研究[J]. 茶叶科学, 2020, 40(2): 225-237. [AN Huimin, OU Xingchang, XIONG Yifan, et al. Study on the characteristic aroma components of jasmine tea[J]. Journal of Tea Science, 2020, 40(2): 225-237.]
- [46] 王金源, 张佳慧, 庄莉萍, 等. HS-SPME-GC-TOF-MS 结合 ROAV 分析花果香型红茶特征香气成分[J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(12): 2015-2026. [WANG Jinyuan, ZHANG Jiahui, ZHUANG Liping, et al. Analysis of characteristic aroma compounds of black tea with flowery-fruity flavour by HS-SPME-GC-TOF-MS combined with ROAV[J]. Natural Product Research and Development, 2023, 35(12): 2015-2026.]
- [47] 里奥. 范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-476. [LEO Van Hemert. Compendium of olfactory thresholds for compounds[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2015: 1-476.]