

赵书珂, 芦 瑞, 刘琛琛, 等. 植物花香挥发物释放规律及其提取和检测方法的研究进展[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(3): 615-624.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2025.03.020

植物花香挥发物释放规律及其提取和检测方法的研究进展

赵书珂, 芦 瑞, 刘琛琛, 杜 方, 韩美玲

(山西农业大学城乡建设学院, 山西 晋中 030801)

摘要: 植物的花香挥发物在植物的生长发育过程中起着重要作用, 不仅能吸引昆虫传粉, 还能驱赶天敌。近年来, 花香挥发物已在化妆品、食品、香料以及药物等领域被广泛应用。基于此, 本文对常见植物的花香挥发物成分进行了介绍, 归纳总结了花香挥发物的释放规律, 并总结评价了现有花香挥发物的提取和检测方法。本文为植物香气挥发物的基础研究和应用开发提供了理论依据。

关键词: 花香挥发物; 释放规律; 提取方法; 检测方法

中图分类号: S68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)03-0615-10

Research progress on the release patterns of floral volatile organic compounds and their extraction and detection methods

ZHAO Shuke, LU Rui, LIU Chencheng, DU Fang, HAN Meiling

(College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China)

Abstract: The floral volatile organic compounds play an important role in the growth and development of plants. They can not only attract insects for pollination, but also repel predators. In recent years, floral volatile organic compounds have been widely used in cosmetics, food, spices, and pharmaceuticals. Based on this, we introduced the components of floral volatile organic compounds in common plants, summarized the release patterns of floral volatile organic compounds, and reviewed the methods for extraction and detection of floral volatile organic compounds. This review provides a theoretical basis for the basic research and application development of plant volatile organic compounds.

Key words: floral volatile organic compounds; release patterns; extraction methods; detection methods

芳香植物是指在根、茎、叶、花、果、种子中有芳香物质的植物, 其中花是植物释放挥发性有机

化合物(VOC)的主要器官。花香挥发物能够吸引昆虫传粉、驱赶食花动物及抵御病原体的侵害^[1-2]。花香挥发物在人类的生产生活中也有着广泛应用。从植物中分离出来的花香挥发物可用于制作调味料、香水、化妆品等^[3]; 花香挥发物可用于芳香疗法, 帮助人们缓解精神压力、改善血管功能等^[4]; 花香挥发物也是中国古典园林中营造意境的重要元素^[5]。

目前, 已有多种植物的花香挥发物成分被报道, 如百合(*Lilium brownii* var. *viridulum*)、牡丹(*Paeonia*

收稿日期: 2024-05-31

基金项目: 山西省自然科学基金项目(20210302124687); 山西农业大学博士科研启动基金项目(2020BQ52); 山西农业大学教学改革创新项目(JG-202242)

作者简介: 赵书珂(2001-), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事乡土土质资源开发与利用研究。(E-mail) 1181724912@qq.com

通讯作者: 韩美玲, (E-mail) hmlnxy1215@163.com

suffruticosa)、桂花 (*Osmanthus fragrans*) 等。研究表明,不同植物的花香挥发物成分的种类和含量差异显著,植物不同部位、不同生长发育阶段的挥发物成分的种类和含量也存在显著差异。并且由于挥发物稳定性较差,不同的提取方法和检测方法会对试验结果产生较大影响。此外,温度、湿度等外界环境因素也可能影响检测结果。因此,如何根据试验目的和植物特性选择适合的提取与检测方法是科研设计中需要重点考虑的问题。

现有研究中,大部分文献已对植物花香物质、花香物质的分子调控机制及其基因工程进行了综述^[6-9],但对花香物质的合成和释放规律仍缺乏系统性的研究^[10-17]。尽管有少量文献介绍了植物香气成分的提取和检测方法^[18-24],但这些研究局限于单一方法,缺乏对不同方法的全面比较和总结。基于此,本文对常见芳香植物的花香挥发物的主要成分进行了总结,并归纳了花香挥发物的合成与释放规律,比较和分析了常用的花香挥发物提取和检测的方法。本文旨在为芳香植物花香挥发物的理论研究提供参考。

1 主要花香挥发物种类

1.1 植物中的花香挥发物种类

目前已有 2 000 多种有机挥发物从 90 属 991 种植物类群中被检测出来^[25],这些挥发物主要由低分子量的烷烃类、烯类、醇类、酮类、醛类、醚类、酯类以及芳香族化合物组成^[26]。根据生物合成途径的不同,可将花香挥发物分为萜烯类化合物、苯丙烷类化合物以及脂肪类化合物^[27],这些化合物普遍具有分子量低、亲脂性强特点。植物体内较常见的芳香物质包括芳樟醇、柠檬烯、 α -蒎烯、 β -罗勒烯、 β -蒎烯、石竹烯等萜烯类化合物以及苯甲醛、苯甲醇、水杨酸甲酯等苯丙烷类化合物,不同物种的芳香物质在组成、数量、特性和相对含量上存在显著差异^[28]。

萜烯类化合物是花香挥发物中占比最高的挥发性有机物^[29],包括单萜、倍半萜、二萜等化合物^[6]。单萜化合物是植物与昆虫相互作用中的通讯化合物;二萜烯可以有效抵抗非生物胁迫和病原体攻击,同时可以调节植物的生长速度、氧化还原状态和内部接收信号机制^[30]。挥发性苯丙烷类化合物在吸引传粉媒介、激活植物抗病性以及驱逐害虫方面起

着至关重要的作用^[1]。脂肪类化合物在植物中参与调控多种防御途径,能有效提高植物的抗逆性^[31]。

1.2 常见园林植物的花香挥发物

目前,在园林观赏植物中,关于花香挥发物成分研究较深入的植物包括百合 (*L. brownii* var. *viridulum*)^[13]、紫丁香 (*Syringa oblata*)^[32]、月季 (*Rosa chinensis*)^[24]、桂花 (*O. fragrans*)^[28]、鸳鸯茉莉 (*Brunfelsia brasiliensis*)^[16]、牡丹 (*P. suffruticosa*)^[14]、蜡梅 (*Chimonanthus praecox*)^[33]、含笑 (*Michelia figo*)^[34]、百里香 (*Thymus mongolicus*)^[35] 等。图 1 对部分常见园林植物的花香成分进行了总结,西伯利亚百合 (*L. siberia*) 主要花香挥发物包括芳樟醇、 β -罗勒烯、 β -月桂烯^[13];金玉台阁桂花 (*O. fragrans* cv 'Jin Yu Tai Ge') 主要花香挥发物包括芳樟醇、 β -紫罗兰酮、正己醛^[28];鸳鸯茉莉 (*B. brasiliensis*) 主要花香挥发物包括 β -罗勒烯、芳樟醇、甲酸香叶酯等^[16]。

2 花香挥发物释放规律

不同物种的花香挥发物成分的种类和数量差异显著。不同的花香挥发物可能会吸引不同的传粉媒介,减少交叉授粉的可能性,导致物种间产生生殖隔离^[36]。不同研究中同一植物的花香挥发物成分也难以进行比较,一方面由于不同试验使用的提取和检测方法不同,另一方面由于试验所用植物部位和植物所处发育阶段不同^[3]。除此之外,环境因素(图 2)如温度、光照、土壤、相对湿度、水分情况、营养状况、传粉媒介以及病菌虫害等都会影响花香挥发物的合成与释放^[37-38]。

2.1 花香挥发物的释放受花发育进程和释放部位的显著影响

在植物花发育过程中,花香挥发物的释放受到酶活性、底物可用性与相关合成基因的调控^[39-40]。通常,随着植物开花,花香挥发物成分的种类和含量逐渐增加,当花朵进入授粉准备阶段,即花药开裂时,花香挥发物释放水平达到最高。完成授粉后,单朵花花香挥发物的释放水平就会降低,以防止继续吸引传粉媒介授粉^[41]。Máñez 等^[42]发现,随着器官的成熟,挥发物的组成与其高环化率和脱水率直接相关。

在不同部位,花香挥发物成分的种类和含量

存在差异。大花黄牡丹 (*P. ludlowii*) 的花瓣、雄蕊、雌蕊和萼片的挥发物成分各不相同,花瓣中挥发物主要成分为反式-2-己烯醛、芳樟醇、苯乙酮等;雄蕊中挥发物主要成分为苯乙酮、苯甲醇、芳樟醇等;雌蕊中挥发物主要成分为(1R)-(+)-诺蒎

酮、2,7-二甲基氧杂卓、紫苏醇等;萼片中挥发物主要成分为(1R)-(+)-诺蒎酮、紫苏醇、苯甲醛等;研究表明,大花黄牡丹(*P. ludlowii*)花香的关键释放部位是花瓣和雄蕊,因此花瓣和雄蕊的花香挥发物对大花黄牡丹的花香贡献较大^[15]。

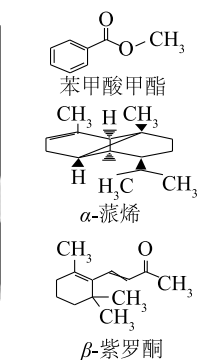
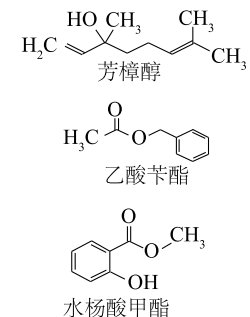
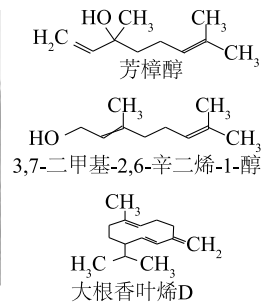
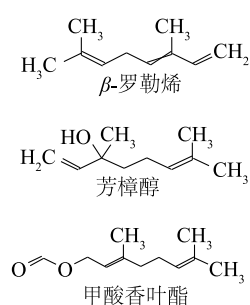
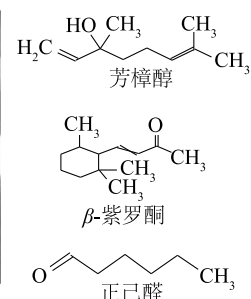
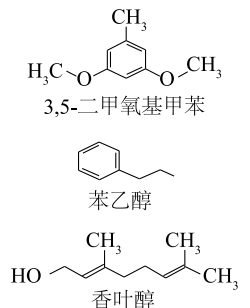
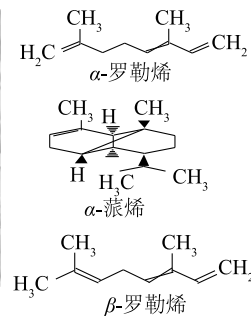
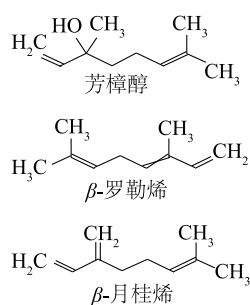


图1 常见园林植物主要花香挥发物

Fig.1 Major floral volatile organic compounds of common garden plants

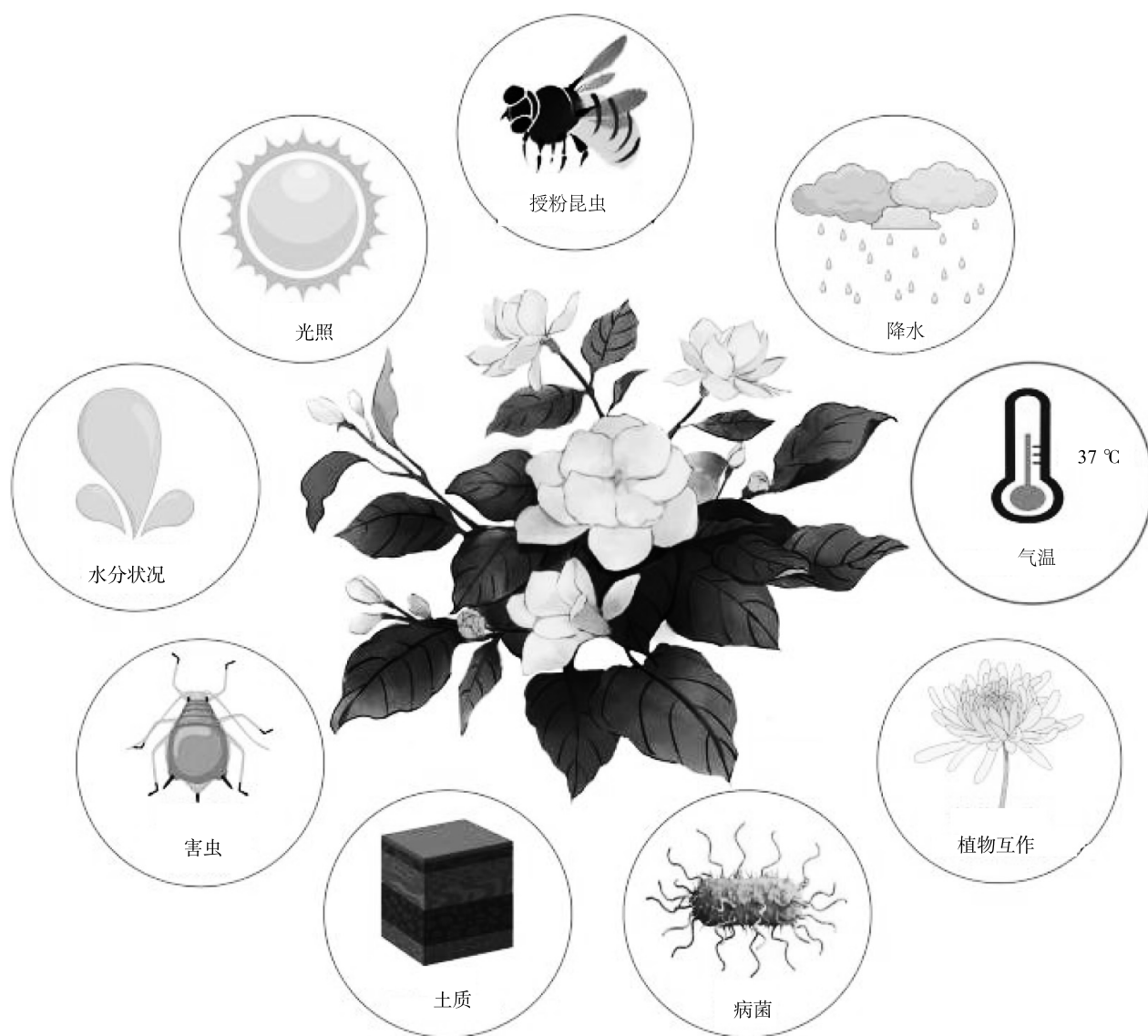


图 2 影响花香挥发物的环境因素

Fig.2 Environmental factors affecting floral volatile organic compounds

2.2 花香挥发物的释放受到昼夜节律的影响

植物通过有规律地释放花香物质,优化能量利用以适应传粉者的活动规律。以蜜蜂等昆虫为媒介授粉的植物,通常在白天释放较浓郁的香气;而依赖夜间活动的蛾类传粉的植物,则在夜晚产生更强的香气^[1]。植物光合作用的高低与昼夜变化密切相关,萜烯类化合物的合成受到光合作用的影响^[3]。波叶金桂 (*O. fragrans* ‘Boye Jingui’) 花香挥发物成分的种类及其释放量随花朵开放进程呈现出先增大后减小的规律,初花期挥发物成分的种类及其释放量达到最大。并且花香挥发物的释放量具有明显的日变化规律:清晨与傍晚花

香挥发物种类和释放量较低,而在 9:00 与 15:00 花香挥发物种类和释放量达到高峰,在 11:00 和 13:00 花香挥发物种类和释放量略低于峰值^[19]。花香挥发物的昼夜节律性释放受到特定基因的调控^[43]。研究发现,*LHY* 是一个生物钟基因,其调控 2 种茄科 (*Solanaceae*) 植物花香释放的速度^[44]。在早上,牵牛花 *LHY* 转录因子抑制花香挥发物合成和调控基因 *ODO1* 和 *FVBP* 的表达,因此牵牛花香挥发物在晚上释放^[43]。

2.3 花香挥发物的释放受到环境因素的影响

植物花香物质的释放受到光照长度和光质的影响。光可调节单萜生物合成途径中转录因子的

表达水平,进而调节花香挥发物的释放^[45]。Kegge等^[46]的研究结果表明,远红光能够促进大麦挥发性有机化合物的释放。蝴蝶兰属(*Phalaenopsis*)植物花香挥发物主要在白天释放,其释放量受到生物钟和光照条件的影响。如果遇到光照不足的阴雨天气,蝴蝶兰属植物的花香挥发物的释放量会降低^[46]。

植物花香挥发物释放规律还与温度密切相关。一般而言,增温对植物花香挥发物的释放具有促进作用^[47],这主要是由于温度升高能够促进萜烯类化合物合成酶活性的提高^[48]。在香水文心兰(*Oncidium* ‘Sharry Baby’)、万代兰属植物(*Vanda*)和鼓槌石斛(*Dendrobium chrysotoxum*)中,花香挥发物成分的种类和释放量在一天内呈先增多后减少的趋势,在温度较高、光照充足的时段花香挥发物释放量大^[10-11]。

除了温度和光照,其他环境因子也会影响植物花香挥发物的释放模式。例如,干旱胁迫会抑制植物花香挥发物的释放,导致传粉昆虫的减少^[49]。干旱胁迫还会抑制植物的光合作用,改变植物对营养物质的吸收效率^[3]。Glenny等^[50]的研究结果表明,提高CO₂浓度可以促进花瓣面积和花朵数量增加,提高花香挥发物的释放量。空气污染如臭氧、车辆排放的尾气也会影响花香挥发物的释放,在污染较重的采石场,白毛岩蔷薇(*Cistus albidus*)和意大利松(*Pinus pinea*)精油产量高于污染较轻的农场,但精油成分没有差异;然而,空气污染常与其他环境因素相混合,难以单独进行研究,因而研究结果有时是相互矛盾的^[3]。

2.4 花香挥发物的释放受到其他生物的影响

植物会通过花香挥发物吸引或驱赶其他生物。在昆虫食草时,植物可以释放出驱赶食草动物的挥发性有机化合物的混合物,以保护自身安全^[51]。研究者通过顶空法对青蒿(*Artemisia caruifolia*)和菊花(*Chrysanthemum morifolium*)挥发性有机化合物进行检测,结果表明,蚜虫侵染导致植物释放大量挥发性有机化合物,其中(E)- β -法尼烯和青蒿酮可能具有抗蚜虫作用,可用于蚜虫的生态防治^[52]。在被啃食时,一些植物也会释放挥发性信号以吸引攻击者的天敌(如节肢动物)^[53]。此外,有些开花植物会模仿蘑菇子实体的气味和外观,有些真菌也会散发出花的香味,吸引媒介传播真菌孢子,从而帮助其繁衍后

代。原产于哥伦比亚安第斯山脉的小龙兰属植物(*Dracula*)可以模拟蘑菇的气味和蘑菇菌褶的形状,吸引昆虫来帮助它传播花粉^[54]。

3 芳香植物挥发物的提取与检测方法

由于植物花香挥发物的成分、结构和生物合成过程比较复杂,如何快速准确地收集和分析花香挥发物成分一直是困扰研究者的难题^[8]。选择合适的提取和检测方法是准确解析植物主要香气成分的关键^[25]。

3.1 芳香植物挥发物的提取方法

随着研究的深入,芳香植物花香挥发物的提取方法不断发展。目前,花香挥发物的提取方法主要有同时蒸馏萃取法(Simultaneous distillation extraction, SDE)、减压蒸馏萃取法(Vacuum distillation extraction, VDE)、水蒸气蒸馏法(Steam distillation, SD)、有机溶剂萃取法(Solvent extraction, SE)、超临界流体提取法(Supercritical fluid extraction, SFE)、加速溶剂萃取法(Accelerated solvent extraction, ASE)、浸渍法(Maceration)、热脱附法(Thermal desorption, TD)、顶空吸附法(Headspace absorption, HAS)、过柱吸附法(Tea liquid absorption, TLA)、微波辅助萃取法(Microwave-assisted extraction, MAE)、吹气冷冻法(Blow air freezing method)、固相微萃取法(Solid phase micro-extraction, SPME)、超声波协助萃取法(Ultrasonic assisted extraction, UAE)、压榨法(Press)、索氏萃取法(Sohlet extraction)、动态顶空套带吸附采集法(Dynamic headspace, DHS)、吸附丝累积法(Adsorption method)等^[18-23, 29]。

同种植物采用不同的提取方法获得的精油、净油、香气成分存在显著差异。在提取过程中,不同方法适用于不同提取物,有些方法适用于挥发性香气成分的提取,有些适用于芳香植物整株芳香物质的提取。每种方法都具有优势和局限性,因此需首先明确提取对象,并根据提取需求选择合适的提取技术。

表1总结了几种常用提取方法的优缺点。本文以目前常用的3种花香挥发物提取方法为例进行讨论。超临界流体提取法具有溶解性强、扩散性好、操作易于控制等优点;固相微萃取法是一种集采样、萃取、浓缩于一体的非溶剂型萃取技术;动态顶空套袋吸附采集法具有取样量少、富集效率高、受基体干扰小和可以在线检测等特点。

表 1 花香挥发物提取方法对比
Table 1 Comparison of extraction methods for floral volatile organic compounds

提取方法	优点	缺点	适用对象
同时蒸馏萃取法	溶剂使用量少,成本低;高温加热时间短,可较大程度保留精油中易挥发组分 ^[22]	对水溶性成分提取效果不理想;高温易导致某些低沸点挥发物质受热分解,影响鉴定结果 ^[22,55] ;提取过程需消耗大量能量,试验过程漫长 ^[20]	茉莉(<i>Jasminum sambac</i>) ^[18] 、蜡梅(<i>Chimonanthus praecox</i>) ^[56]
减压蒸馏萃取法	可避免高温对提取物的影响;提取的精油能较好地反映原料的香气特征 ^[19]	需要大量样品和药品,试验时间长,目前已被其他提取方法取代 ^[22]	茶汤 ^[19]
水蒸气蒸馏法	设备简单、操作安全、不污染环境,成本低,避免了有机溶剂残留对提取物的影响 ^[22]	原料易受热而发生焦化反应,导致成分发生变化 ^[22]	欧李(<i>Prunus humilis</i>) ^[21]
有机溶剂萃取法	价格便宜,可用于香气浓郁的果实和果酒的香气成分分析	操作复杂,耗时较长、提取物杂质多、分离和浓缩困难 ^[21,57-58]	槐花(<i>Styphnolobium japonicum</i>) ^[59] 、月季(<i>Rosa chinensis</i>) ^[24]
超临界流体提取法	能有效防止热敏性物质氧化和降解;最大程度保留精油成分;需要样品量比固相微萃取法少;无需有机溶剂 ^[19,60] ;对环境无污染 ^[18]	对设备要求较高,很难实现产业化 ^[60]	紫丁香(<i>Syringa oblata</i>) ^[61] 、杭白菊(<i>Chrysanthemum morifolium</i>) ^[62]
加速溶剂萃取法	萃取时间短;溶剂用量较少 ^[20]	不适用于热不稳定的样品;现有的商品化的仪器较少 ^[20]	赤芍(<i>Paeonia lactiflora</i>) ^[63]
索氏萃取法	操作简单易行;成本较低	溶剂消耗量大,耗时较长;需冷凝水;长时间的加热会破坏提取物有效成分 ^[21]	欧李(<i>P. humilis</i>) ^[21]
固相微萃取法	程序和操作简单、检测速度快;不需要使用溶剂;主要用于提取挥发性、半挥发性物质 ^[22]	纤维萃取涂层只适用于特定的提取物,涂层较易脱落,使用寿命短;只能用于化合物的定性分析,不能用于提取化合物 ^[20]	桂花(<i>Osmanthus fragrans</i>) ^[64] 、月季(<i>R. chinensis</i>) ^[24]
顶空吸附法	操作较简便;用水较少;能够避免非挥发性物质造成的污染 ^[22]	不适用于微量成分的提取 ^[22]	紫玉兰(<i>Yulania liliiflora</i>)、白玉兰(<i>Y. denudata</i>) ^[65]
过柱吸附法	可以高效分离、纯化目标物质;操作简单;试验材料可以多次重复使用	需根据不同的提取物质选择合适的吸附剂 ^[19]	茉莉(<i>J. sambac</i>) ^[66]
动态顶空套袋吸附采集法	可避免基质成分的干扰;无需有机溶剂萃取、程序多样化、灵敏度较高 ^[67]	在采集过程中袋内空气湿度发生改变,会影响检测结果	锦绣杜鹃(<i>Rhododendron × pulchrum</i>)叶片 ^[68]
吹气冷冻法	能够避免溶剂的干扰,保持鲜花真实的香气 ^[18]	空气净化操作复杂,难以完全隔绝空气污染物	茉莉(<i>J. sambac</i>) ^[18]
压榨法	生产条件要求低,操作简单,能在室温条件下提取 ^[22]	出油率较低,提取物中可能含有杂质 ^[22]	柑橘属植物(<i>Citrus</i>) ^[22]
浸渍法	经济实用,广泛用于香料生产 ^[18]	易引起交叉污染;难以控制浸渍时间和浸渍剂浓度	白兰花(<i>Michelia alba</i>)、梔子花(<i>Gardenia jasminoides</i>) ^[18]
热脱附法	样品易处理、耗时短 ^[65]	高温易引起高敏性成分分解或与其他成分发生化学反应,低温易使提取物中残留杂质 ^[69]	小报春(<i>Primula forbesii</i>) ^[70]
吸附丝累积法	操作简单、灵敏度高、能够保留低沸点的香气组分、无溶剂污染,可以方便地用于鲜花“活体”的采样 ^[23]	吸附量较少,使用时易出现饱和现象	水仙花(<i>Narcissus tazetta</i> subsp. <i>chinensis</i>) ^[23]
超声波协助萃取法	可改善产品品质、节约成本、缩短提取时间、提高效率 ^[58]	为辅助萃取方法,无法单独使用	玫瑰(<i>R. rugosa</i>)花露 ^[71]
微波辐射诱导萃取法	设备简单、适用范围广、萃取效率高、节省试剂和污染小,可避免长时间高温引起的物质分解,升温快速均匀 ^[22]	提取出的有效成分比例较低 ^[22] ;为辅助萃取方法,不可单独使用	白丁香(<i>Syringa oblata</i> ‘Alba’) ^[20]

与其他顶空技术相比,动态顶空套袋吸附采集法的灵敏度通常高出一个数量级^[72]。固相微萃取法、超临界流体提取法和动态顶空套袋吸附采集法在芳香植物花香挥发物的提取中均有广阔的应用前景^[73]。对比不同提取方法,发现固相微萃取法

SPME 可较好提取欧李的香气挥发物,提取物中化合物种类较多,含量较高^[21]。采用动态顶空套袋吸附采集法与固相微萃取法萃取玉凤花属(*Habenaria*)植物的花香挥发物,动态顶空套袋吸附采集法提取到的酮类化合物和醛类化合物的数量和含量均高

于固相微萃取法,而采用固相微萃取法收集到的萜烯类化合物和芳香族化合物的数量和含量均高于动态顶空套袋吸附采集法^[61]。超临界流体提取法提取到的芳香挥发物种类少于固相微萃取法,但是试验需要的样品量少于固相微萃取法,并且超临界流体提取法不需要使用有机溶剂,不会干扰提取物成分的检测^[61]。

芳香植物花香挥发物提取过程中,不同技术的联合使用也被广泛研究^[19]。孟微微^[74]将超声微波与萃取技术相结合,利用超声波振动能和微波同时萃取挥发物,降低了萃取过程的能量消耗。此外,为了实现对花香挥发物动态变化的实时监测,越来越多的研究从对挥发物的不连续监测发展为连续监测技术^[75]。Rice 等^[76]改良动态顶空套袋吸附采集法,可对整株葡萄(*Vitis vinifera*)以及单个葡萄果实进行无损取样,检测出葡萄释放的挥发性有机物在时间和空间上的差异。

现有的提取方法仍存在改进空间,如动态顶空套袋吸附采集法具有较高的精度,但其所需设备成本较高且操作较复杂,近年研究中多使用固相微萃取法替代动态顶空套袋吸附采集法^[72]。超临界流体提取法通常需要对植物组织进行破坏,这可能导致植物释放保护性挥发物,从而对试验结果的准确性产生影响^[61]。

3.2 芳香植物挥发物的检测方法

植物的花香成分会因检测技术的不同而呈现差异。目前芳香植物挥发性有机化合物的检测方法包括气相色谱-质谱法、气相色谱-嗅觉法、气相色谱火焰离子化检测法、质子转移反应质谱联用技术、选择离子流动管质谱法、半高效液相色谱-质谱串联技术、实时直接分析质谱法、气相色谱-飞行时间质谱联用法、电子鼻技术、基于智能手机的实地检测技术、拉曼光谱法、红外光谱法、紫外吸收光谱法、核磁共振技术等^[8,55,77]。

全二维气相色谱-飞行时间质谱技术是基于传统一维气相色谱技术发展起来的一种新的色谱分析技术。相比于一维气相色谱,这一技术能够分离更多的物质,且定性分析更加准确^[78]。李栋等^[79]利用传统一维气相色谱从牡丹(*P. suffruticosa*)花香挥发物中检测出 39 种香气成分,而利用全二维气相色谱-飞行时间质谱技术从洛阳红牡丹(*p. suffruticosa* ‘Luo Yang Hong’)和皇冠牡丹(*p. suffruticosa*

‘Huang Guan’)花香挥发物中分别检测出 117 种和 133 种香气成分,全二维气相色谱-飞行时间质谱技术检测能力更强。此外,多种检测方法的联合使用可进一步提升检测效果,例如二维气相色谱可结合质谱、火焰离子化检测法或元素特异性检测器测量法等^[80]。

尽管目前植物花香挥发物的提取与检测方法不断发展,并引入了众多新技术^[72],但当前仍存在检测速度较慢、设备昂贵、操作复杂以及对使用者技术要求较高的问题^[75]。在未来的研究中,可以进一步提高检测效率、降低成本并简化操作流程。

4 总结与展望

花香挥发物的成分和含量因植物科、属、种及品种的差异而表现出显著的差异性^[81]。同一种植物在不同发育阶段、不同释放部位以及昼夜交替下,其花香挥发物的含量和成分也有显著差异。光照、水分、温度等环境因素也会对花香挥发物的释放产生影响。因此,在对花香挥发物的研究中,需考虑多种影响因素以更加准确地解析花香释放机制。全面地总结花香释放规律,不仅为后续试验取材提供理论支持,也为花香物质相关基因的生物合成途径和代谢途径研究提供理论基础。

对植物而言,花香化合物具有重要的生物功能;对人类而言,花香化合物也有重要的应用价值。花香挥发物的含量和种类极易受到提取和检测方式、植物材料状态和环境因素的影响,如何根据试验材料和试验条件选择适合的提取与检测方法仍然是一个关键问题。提取与检测方法不同可能导致结果存在差异,增加了试验结果的比较和归纳难度。因此优化和创新花香挥发物提取与检测技术具有重要意义。未来的技术改进需简化试验步骤、提升分析效率,从实验室不连续检测方式向现场实时检测方式转变,从传统的分离后检测向直接检测转变^[76]。同时,应优先选择无损检测技术,以避免因植物释放干扰性化合物对试验结果产生的影响^[61]。通过持续优化和创新检测方法,不仅能提高研究效率,还能为植物花香挥发物的基础研究和应用开发提供更加有力的技术支持。

参考文献:

- [1] MUHLEMAN J K, KLEMPIEN A, DUDAREVA N. Floral vola-

- tiles; from biosynthesis to function[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2014, 37(8): 1936-1949.
- [2] RAMYA M, JANG S, AN H R, et al. Volatile organic compounds from orchids: from synthesis and function to gene regulation[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(3): 1160-1160.
- [3] FIGUEIREDO C A, BARROSO G J, PEDRO G L, et al. Factors affecting secondary metabolite production in plants: volatile components and essential oils[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2008, 23(4): 213-226.
- [4] BAIK J H, KIM J H, JAE Y S, et al. Effects of fragrance components of *Abies holophylla* Max. on stress relief and improvement of vascular Function[J]. *Journal of People, Plants, and Environment*, 2018, 21(3): 223-232.
- [5] 廖宇兰, 包盛妃, 赵纪元, 等. 芳香植物在园林中的应用[J]. *现代园艺*, 2021, 44(19): 120-121.
- [6] 王文静, 吕思佳, 汪庆昊, 等. 植物花香物质代谢与调控研究进展[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(22): 7612-7617.
- [7] 袁媛, 孙叶, 李凤童, 等. 植物花香代谢和基因工程研究进展[J]. *南方园艺*, 2017, 28(5): 48-52.
- [8] 张强, 田彦彦, 孟月娥, 等. 植物花香基因工程研究进展[J]. *基因组学与应用生物学*, 2009, 28(1): 159-166.
- [9] 李海媚, 范燕萍. 花朵萜类花香主要成分、代谢通路和关键功能基因[J/OL]. *分子植物育种*, 2024; 1-17 [2024-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230719.1244.006.html>.
- [10] 黄昕蕾, 郑宝强, 王雁. 鼓槌石斛不同花期香气成分及盛花期香气日变化规律研究[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(4): 142-149.
- [11] 张莹, 田敏, 王彩霞, 等. 不同温度条件下香水文心兰花香气的成分分析及感官评定[J]. *植物资源与环境学报*, 2015, 24(2): 112-114.
- [12] 施婷婷, 杨秀莲, 王良桂. ‘波叶金桂’花香成分的释放规律[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(2): 97-104.
- [13] 张辉秀, 胡增辉, 冷平生, 等. 不同品种百合花挥发性成分定性定量分析[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(4): 790-799.
- [14] 李瑞雅. ‘海黄’牡丹花挥发物测定及部分萜烯合酶基因功能研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2022.
- [15] 徐慧. 大花黄牡丹花香成分分析及释香规律研究[D]. 林芝: 西藏农牧学院, 2023.
- [16] 叶家桐, 邓涛, 胡兴华, 等. 鸳鸯茉莉花两种花色香气成分及盛花期香气日变化规律[J/OL]. *分子植物育种*, 2024; 1-20 [2024-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230720.1417.006.html>.
- [17] 朱园园. 丁香不同种和品种间花香成分比较和转录组分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
- [18] 刘建军, 耶兴元, 郭桂义, 等. 茉莉花香气分析及收集方法研究进展[J]. *河南农业*, 2011(6): 58-60.
- [19] 黄玉清, 陈艺欣, 田厚军. 植物香气成分提取方法的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(7): 245-247.
- [20] 朱国华. 微波辅助萃取植物挥发性成分的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2008.
- [21] 关蕊, 王红霞, 赵书岗, 等. 不同方法提取欧李香气成分的比较[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(20): 4260-4265.
- [22] 包秀霞, 廉勇, 包秀平. 植物花香成分提取方法的比较研究进展[J]. *北方农业学报*, 2016, 44(5): 126-130.
- [23] 黄巧巧, 冯建跃. 吸附丝/色谱/质谱法研究水仙花的香气变化[J]. *分析化学*, 2003(11): 1408.
- [24] 孙海楠, 吕运舟, 汪有良. 基于不同提取方法的月季香气成分比较分析[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(5): 1342-1344.
- [25] DUNKEL M, SCHMIDT U, STRUCK S, et al. SuperScent—a database of flavors and scents[J]. *Nucleic Acids Research*, 2009, 37: 291-294.
- [26] DUDAREVA N, NEGRE F, NAGEGOWDA A D, et al. Plant volatiles: recent advances and future perspectives[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2006, 25(5): 417-440.
- [27] HADI E M A M, ZHANG F J, WU F F, et al. Advances in fruit aroma volatile research[J]. *Molecules*, 2013, 18(7): 8200-8229.
- [28] 鲜小林. 桂花花期不同阶段代谢组与比较转录组分析及花色和花香关键基因的克隆[D]. 成都: 四川农业大学, 2019.
- [29] SHEIBANI E, DUNCAN S E, KUHN D D, et al. SDE and SPME analysis of flavor compounds in Jin Xuan Oolong tea[J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(2): 348-358.
- [30] ROSENKRANZ M, CHEN Y Y, ZHU P Y, et al. Volatile terpenes—mediators of plant-to-plant communication[J]. *The Plant Journal: for Cell and Molecular Biology*, 2021, 108(3): 617-631.
- [31] 刘文献, 刘志鹏, 谢文刚, 等. 脂肪酸及其衍生物对植物逆境胁迫的响应[J]. *草业科学*, 2014, 31(8): 1556-1565.
- [32] 回瑞华, 侯冬岩, 李铁纯, 等. 紫丁香花与花蕾挥发性化学成分 HS-SPME-GC-MS 分析[J]. *鞍山师范学院学报*, 2020, 22(6): 26-28.
- [33] 冯楠. 蜡梅花香挥发物测定及 2 个萜烯合酶基因功能初步研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [34] 袁婕俐. 紫花含笑花器官特征及挥发性成分分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- [35] 司家屹. 百里香(*Thymus mongolicus*)挥发性物质释放节律研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2021.
- [36] SCHIESTL P F. Ecology and evolution of floral volatile-mediated information transfer in plants[J]. *The New Phytologist*, 2015, 206(2): 571-577.
- [37] DUDAREVA N, KLEMPHEN A, MUHLEMANN K J, et al. Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds[J]. *The New Phytologist*, 2013, 198(1): 16-32.
- [38] JIN J Y, ZHAO M Y, JING T T, et al. Volatile compound-mediated plant-plant interactions under stress with the tea plant as a model[J]. *Horticulture Research*, 2023, 10(9): 143.
- [39] PICHESKY E, LEWINSOHN E, CROTEAU R. Purification and characterization of S-linalool synthase, an enzyme involved in the production of floral scent in *Clarkia breweri*[J]. *Archives of Bio-*

- chemistry & Biophysics, 1995, 316(2): 803-807.
- [40] COLQUHOUN A T, VERDONK C J, SCHIMMEL C B, et al. Petunia floral volatile benzenoid/ phenylpropanoid genes are regulated in a similar manner[J]. Phytochemistry, 2009, 71(2): 158-167.
- [41] RODRIGUEZ S C, PARRA L, QUIROZ A, et al. Variation in highbush blueberry floral volatile profiles as a function of pollination status, cultivar, time of day and flower part: implications for flower visitation by bees[J]. Annals of Botany, 2011, 107(8): 1377-1390.
- [42] MÁÑEZ S, JIMENEZ A, VILLAR A. Volatiles of *Sideritis mugronensis* flower and leaf[J]. Journal of Essential Oil Research, 2011, 3(6): 395-397.
- [43] EFENSKE M, EIMAIZUMI T. Circadian rhythms in floral scent emission[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 462.
- [44] YON F, JOO Y, LLORCA C L, et al. Silencing *Nicotiana attenuata LHY* and *ZTL* alters circadian rhythms in flowers[J]. The New Phytologist, 2016, 209(3): 1058-1066.
- [45] CHUANG Y C, LEE M C, CHANG Y L, et al. Diurnal regulation of the floral scent emission by light and circadian rhythm in the *Phalaenopsis orchids*[J]. Botanical Studies, 2017, 58(1): 50.
- [46] KEGGE W, NINKOVIC V, GLINWOOD R, et al. Red: far-red light conditions affect the emission of volatile organic compounds from barley (*Hordeum vulgare*), leading to altered biomass allocation in neighbouring plants[J]. Annals of Botany, 2015, 116(5): 845.
- [47] KIVIMAENPAA M, RIIKKONEN J, VALOLAHTI H, et al. Effects of elevated ozone and warming on terpenoid emissions and concentrations of Norway spruce depend on needle phenology and age[J]. Tree Physiology, 2022, 42(8): 1570-1586.
- [48] BAGGESEN N, LI T, SECO R, et al. Phenological stage of tundra vegetation controls bidirectional exchange of BVOCs in a climate change experiment on a subarctic heath[J]. Global Change Biology, 2021, 27(12): 2928-2944.
- [49] RERING C C, FRANCO G J, YEATER M K, et al. Drought stress alters floral volatiles and reduces floral rewards, pollinator activity, and seed set in a global plant[J]. Ecosphere, 2020, 11(9): e03254.
- [50] GLENNY R W, RUNYON B J, BURKLE A L. Drought and increased CO₂ alter floral visual and olfactory traits with context-dependent effects on pollinator visitation[J]. The New Phytologist, 2018, 220(3): 785-798.
- [51] ESTELL E R, JAMES K D, FREDRICKSON L E, et al. Within-plant distribution of volatile compounds on the leaf surface of *Flourensia cernua*[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2013, 48: 144-150.
- [52] SUN H, ZHANG F, CHEN S, et al. Effects of aphid herbivory on volatile organic compounds of *Artemisia annua* and *Chrysanthemum morifolium* [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2015, 60: 225-233.
- [53] DEGENHARDT J, GERSHENZON J, BALDWIN T I, et al. Attracting friends to feast on foes: engineering terpene emission to make crop plants more attractive to herbivore enemies[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2003, 14(2): 169-176.
- [54] KAISER R. Flowers and fungi use scents to mimic each other[J]. Science, 2006, 311(5762): 806-807.
- [55] 晏芳. 同时蒸馏萃取肉桂精油及其 GC-MS 分析[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(11): 117-120.
- [56] 熊敏, 周明芹, 向林, 等. 蜡梅花挥发油成分的 GC-MS 分析[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(2): 182-186.
- [57] 李意, 赵华. 牡丹花提取工艺的综述[J]. 天津化工, 2022, 36(3): 5-8.
- [58] 宋婉瑶, 刘玉亮, 姚雷. 有机溶剂萃取与 SPME 提取的玫瑰水挥发性成分对比分析[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2016, 34(4): 57-64.
- [59] 王丽艳, 周颖, 逯相霞, 等. 槐花挥发油化学成分 GC-MS 分析[J]. 辽宁化工, 2008(9): 646-648.
- [60] LIU Z X, WANG M Y, WU M, et al. Volatile organic compounds (VOCs) from plants: from release to detection[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2023, 158: 116872.
- [61] 焦淑清, 宗希明, 张楠楠, 等. 紫丁香干花的超临界 CO₂ 萃取物化学成分分析[J]. 林产化学与工业, 2012, 32(1): 85-88.
- [62] 金建忠, 童建颖. 超临界 CO₂ 萃取杭白菊挥发油的工艺研究[J]. 食品科学, 2010, 31(14): 125-127.
- [63] 马冰, 王晶, 刘春明, 等. 不同提取方法对赤芍中药药苷含量影响的高效液相色谱法对比研究[J]. 时珍国医国药, 2013, 24(8): 1820-1822.
- [64] WANG L M, LI M W, JIN W W, et al. Variations in the components of *Osmanthus fragrans* Lour. essential oil at different stages of flowering[J]. Food Chemistry, 2009, 114(1): 233-236.
- [65] 袁婕俐, 金晓玲, 余秋岫, 等. 木兰科植物花香成分提取与鉴定研究进展[J]. 湖南生态科学学报, 2022, 9(3): 96-105.
- [66] 郭友嘉, 戴亮, 杨兰萍, 等. 福州小花茉莉全花期中的花源质量稳定性研究 I. 精油化学成分分析[J]. 色谱, 1993, 11(4): 191-196.
- [67] 张茜, 刘伟伦, 路亚楠, 等. 顶空气相色谱-质谱联用技术的应用进展[J]. 色谱, 2018, 36(10): 962-971.
- [68] 史先慧, 张国祥, 方依汉, 等. 锦绣杜鹃叶片挥发物 GC-MS 分析[J]. 河北林业科技, 2018(1): 11-13, 17.
- [69] 吴岳华. 热脱附法用于玫瑰和乳香香气成分分析的应用研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [70] 胡荻. 小报春(*Primula forbesii*) 花香成分以及发香部位研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2016.
- [71] 雷春妮, 王波, 王新潮, 等. 超声辅助分散液微萃取-气相色谱/质谱联用分析玫瑰花香成分[J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(12): 2073-2081.
- [72] WOJNOWSKI W, MAJCHRZAK T, DYMERSKI T, et al. Dynamic headspace sampling as an initial step for sample preparation in chromatographic analysis[J]. Journal of AOAC International, 2017, 100(6): 1599-1606.

- [73] CHAITANYA K, KRISHNA R C, BEEBI K S, et al. Supercritical fluid extraction of functional ingredients from plants; a review[J]. Current Biochemical Engineering, 2015, 2(1): 24-32.
- [74] 孟微微. 超声微波协同萃取技术在植物挥发性成分中的应用研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- [75] EPPING R, KOCH M. On-site detection of volatile organic compounds (VOCs)[J]. Molecules, 2023, 28(4): 1598.
- [76] RICE S, MAURER L D, FENNELL A, et al. Evaluation of volatile metabolites emitted in-vivo from cold-hardy grapes during ripening using SPME and GC-MS; a proof-of-concept[J]. Molecules, 2019, 24(3): 536.
- [77] MARQUEZ V, MARTINEZ N, GUERRA M, et al. Characterization of aroma-impact compounds in yerba mate (*Ilex paraguariensis*) using GC-olfactometry and GC-MS[J]. Food Research International, 2013, 53(2): 808-815.
- [78] BENTOSILVA A, DUARTE N, SANTOS M, et al. Comprehensive two-dimensional gas chromatography as a powerful strategy for the exploration of broas volatile composition[J]. Molecules, 2022, 27(9): 2728.
- [79] 李 栋, 张立攀, 赵梦瑶, 等. GC×GC-TOFMS 法研究牡丹花香气成分[J]. 河南科学, 2022, 40(10): 1592-1601.
- [80] MILANI N B L, GILST E V, PIROK B W J, et al. Comprehensive two-dimensional gas chromatography-a discussion on recent innovations[J]. Journal of Separation Science, 2023, 46(21): e2300304.
- [81] 马 迪, 肖文芳, 李 佐, 等. 兰科植物花香成分研究进展[J]. 中国农学通报, 2023, 39(16): 52-60.

(责任编辑: 成纾寒)