

引用格式: 胡桂婷, 杨丽媛, 任广兵, 等. 3种蜡梅属植物花香物质及白天释放节律[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(1): 124-132. HU Guiting, YANG Liyuan, REN Guangbing, et al. Floral substances and daytime release rhythms of 3 *Chimonanthus* species[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(1): 124-132.

3种蜡梅属植物花香物质及白天释放节律

胡桂婷¹, 杨丽媛¹, 任广兵², 赵宏波¹

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院 浙江省园林植物种质创新与利用重点实验室/国家林业和草原局南方园林植物种质创新与利用重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 济南市公园发展服务中心, 山东 济南 250100)

摘要: 【目的】花香是观赏植物的重要特性, 对植物的繁殖至关重要。探讨蜡梅属 *Chimonanthus* 植物花香物质的生物合成和释放机制, 为蜡梅属植物资源开发及利用提供理论基础。【方法】采用顶空-固相微萃取 (HS-SPME) 结合气相色谱-质谱联用技术 (GC-MS) 对蜡梅 *C. praecox*、柳叶蜡梅 *C. salicifolius* 和山蜡梅 *C. nitens* 等3种蜡梅属植物的花香物质进行鉴定和分析。【结果】3种蜡梅属植物共鉴定出44种花香物质, 蜡梅、柳叶蜡梅和山蜡梅的花中分别鉴定出19、23和18种物质。蜡梅花中醇类和酯类化合物的相对含量最高, 而柳叶蜡梅与山蜡梅的花香物质中烯类化合物的相对含量最高。3种蜡梅属植物花香物质的白天释放节律存在差异。柳叶蜡梅和山蜡梅在上午、中午和下午的花香物质差异较大, 但蜡梅的花香物质在不同时段变化较小。系统发育分析表明: 柳叶蜡梅和山蜡梅的亲缘关系比蜡梅更近。【结论】柳叶蜡梅和山蜡梅的花香物质较为相似, 验证了两者在系统发育上的关联性。鉴于蜡梅特殊的低温开花环境, 其传粉昆虫与花香之间的相互作用可能是花香物质产生独特性的原因。图3表3参35

关键词: 蜡梅属植物; 花香物质; 释放节律

中图分类号: S685.99 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)01-0124-09

Floral substances and daytime release rhythms of 3 *Chimonanthus* species

HU Guiting¹, YANG Liyuan¹, REN Guangbing², ZHAO Hongbo¹

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Germplasm Innovation and Utilization for Garden Plants/Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Germplasm Innovation and Utilization for Southern Garden Plants, College of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Ji'nan Park Development Service Center, Ji'nan 250100, Shandong, China)

Abstract: [Objective] Flower fragrance is an important characteristic of ornamental plants, which is very crucial for plants reproduction. This study aims to reveal the biosynthesis and release mechanism of floral substances in *Chimonanthus*, and to provide a solid theoretical basis for the utilization and development of *Chimonanthus* resources. [Method] Headspace solid phase microextraction (HS-SPME) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) were used to identify and analyze floral substances of 3 *Chimonanthus* species, including *C. praecox*, *C. salicifolius* and *C. nitens*. [Result] A total of 44 floral substances were identified in 3 *Chimonanthus* species, among which 19, 23 and 18 substances were identified in *C. praecox*, *C. salicifolius* and *C. nitens* respectively. The floral substances of alcohols and esters were the highest in *C. praecox*, while the content of alkenes was the highest in the floral substances of *C. salicifolius* and *C. nitens*. The daytime release rhythms of floral substances in 3 *Chimonanthus* species were different. The floral

收稿日期: 2024-03-31; 修回日期: 2024-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31401902)

作者简介: 胡桂婷 (ORCID: 0009-0001-9876-3705), 从事蜡梅属植物花香花色及其传粉者研究。E-mail: hgt1851506848@163.com。通信作者: 赵宏波 (ORCID: 0000-0003-4714-8240), 教授, 博士, 从事观赏植物遗传育种研究。E-mail: zhaohb@zafu.edu.cn

substances of *C. salicifolius* and *C. nitens* in the morning, noon and afternoon were different, but the floral substances of *C. praecox* changed little. Phylogenetic analysis showed that *C. salicifolius* and *C. nitens* were more closely related than *C. praecox*. [Conclusion] The floral substances of *C. salicifolius* and *C. nitens* are similar, which caters to the phylogenetic relationship between them. In view of the special low-temperature flowering environment of *C. praecox*, the interaction between pollination insects and floral fragrance may be the reason for the uniqueness of floral substances. [Ch, 3 fig. 3 tab. 35 ref.]

Key words: *Chimonanthus*; floral substances; release rhythms

蜡梅属 *Chimonanthus* 是中国的特有属, 公认的蜡梅属植物有 4 个物种, 即蜡梅 *C. praecox*、山蜡梅 *C. nitens*、柳叶蜡梅 *C. salicifolius* 和西南蜡梅 *C. campanulatus*^[1-2]。蜡梅广泛分布于中国东南部和中部的多个省份^[3-4]; 山蜡梅仅在长江以南有较窄的分布^[5]; 柳叶蜡梅主要生长在江西、安徽南部和浙江^[6]。蜡梅属植物具有镇咳、抗炎、解热、抗菌和降压作用, 花可用于提取精油, 根、茎和叶可入药^[7-9], 其干燥的叶被用于治疗感冒和流感^[10-13]。其中, 柳叶蜡梅和山蜡梅茎叶中的次生代谢产物, 如黄酮类、香豆素类、生物碱类和甾体类被认为是药理作用的有效成分^[14-15]。

植物种类不同, 其花香物质的种类与含量也不同^[16]。蜡梅花香的主要物质为萜类化合物(单萜和倍半萜)和苯环类化合物^[17-18], 山蜡梅和柳叶蜡梅干花的主要花香物质为 α -月桂烯、桉叶素和四甲基环癸二烯甲醇^[19]。蜡梅在一天的不同时段内释放的花香物质, 即日释放节律存在波动。盛开的磬口蜡梅 *C. praecox* var. *grandiflorus* 在 13:00 释放的花香物质种类多于乔种蜡梅 *C. praecox* var. *intermedius*^[20]。在不同昼夜节律下, 磬口蜡梅释放的主要花香物质种类接近, 但其数量在 12:00 最多^[21]。

由于蜡梅属植物不同物种以及不同时间段内的花香物质存在差异, 有必要对其进行系统的比较分析, 以揭示不同物种间以及不同释放节律下花香物质的异同。本研究采用顶空-固相微萃取(HS-SPME)结合气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)对 3 种蜡梅属植物(蜡梅、柳叶蜡梅和山蜡梅)的花香物质进行鉴定和分析, 旨在比较 3 种蜡梅属植物的花香物质及其白天的释放节律。

1 材料与方 法

1.1 植物材料及其花香物质收集

使用 3 种蜡梅属植物: 蜡梅、柳叶蜡梅和山蜡梅(图 1), 均栽培于浙江农林大学校园内。研究区属亚热带季风气候, 年平均气温为 16.4 °C, 年降水量为 1 628.6 mm。蜡梅、柳叶蜡梅与山蜡梅的采集时间分别为 2023 年 1 月 9—11 日、2022 年 11 月 5—7 日与 2022 年 11 月 8—10 日。在晴天的 9:00、12:00 和 15:00 分别收集 3 种蜡梅属植物花的挥发物。从每株植物上选取 2 朵盛开期的花(约 2.0 g)作为样品。每个物种各选择 3 个植株进行重复试验。

1.2 HS-SPME 分析

使用 SPME 装置收集挥发物。将新鲜盛开的花密封在顶空萃取瓶中, 并在鉴定挥发物前平衡 30



A. 蜡梅 *C. praecox*; B. 柳叶蜡梅 *C. salicifolius*; C. 山蜡梅 *C. nitens*

图 1 3 种蜡梅属植物的花部形态特征

Figure 1 Flower morphological characteristics of 3 *Chimonanthus* species

min。将 SPME 纤维 (65 μm) 插入气相色谱-质谱联用仪入口, 在 250 $^{\circ}\text{C}$ 下预处理 30 min。将 SPME 纤维插入萃取瓶的顶部并提取挥发物, 持续 30 min。

1.3 GC-MS 分析

提取挥发物后, 使用带有 HP-5MS 毛细管柱 (30 $\text{m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$) 的 GC/MS 系统 (5977B GC/MSD) 进行 GC-MS 分析。GC 烘箱温度的初始值设定为 50 $^{\circ}\text{C}$, 保持 3 min, 升温程序先以 3 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度升至 100 $^{\circ}\text{C}$, 再以 5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度升至 250 $^{\circ}\text{C}$, 保持 3 min。高纯度氦气 (99.999%) 被用作载气, 流速为 0.4 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。MS 分析: 记录质谱仪以 70 eV 的电子能量在 30~550 扫描范围内获得的数据。离子源温度为 230 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.4 数据分析

使用 Qualitative Analysis 10.0 将试验数据与 NIST11.L 和 NIST05a.L 标准谱库数据 (<https://webbook.nist.gov/chemistry/name-ser/>) 比较来鉴定花香物质。通过正构烷烃 C7~C30 计算保留指数, 并结合网站资料, 参考花香物质保留指数辅助质谱定性分析。用峰面积归一化法计算花香物质的相对含量。统计相对含量大于 1% 的物质, 并使用 Origin 2023 进行主成分堆积图分析和层次聚类分析。

2 结果与分析

2.1 3 种蜡梅属植物花香物质分析

3 种蜡梅属植物共鉴定出 44 种花香物质, 蜡梅、柳叶蜡梅和山蜡梅的花分别含有 19、23 和 18 种花香物质 (表 1)。由表 2 和 3 可知: 蜡梅的花香物质被分为 6 类, 其中, 醇类 (60.83%~65.33%) 和酯类 (27.53%~31.71%) 化合物含量最高。柳叶蜡梅和山蜡梅各鉴定出 6 类花香物质, 其中, 烯类化合物含量最高, 分别为 85.55%~92.96%、93.98%~98.60%。

表 1 3 种蜡梅属植物花香物质的相对含量

Table 1 Relative content of floral substances of 3 *Chimonanthus* species

物质类别	物质名称	保留指数	相对含量/%		
			蜡梅	柳叶蜡梅	山蜡梅
烯类	苈烯 Camphene	964	-/-/-	2.31 \pm 0.22/2.32 \pm 0.08/ 2.71 \pm 0.33	1.04 \pm 0.25/-/ 1.63 \pm 0.06
	(-)-苈烯 L-Camphene	965	-/-/-	-/-/-	-/0.83 \pm 0.22/-
	β -水芹烯 β -Phellandrene	989	0.40 \pm 0.11/-/-	80.65 \pm 8.97/77.49 \pm 4.52/ 79.98 \pm 4.54	54.96 \pm 5.58/42.02 \pm 3.59/ 55.50 \pm 1.46
	β -蒎烯 β -Pinene	1 006	-/-/-	-2.95 \pm 0.72/ 6.43 \pm 0.62	5.00 \pm 0.77/2.29 \pm 0.64/ 5.43 \pm 0.64
	月桂烯 β -Myrcene	1 007	0.99 \pm 0.15/1.01 \pm 0.05/ 1.02 \pm 0.03	4.91 \pm 1.42/-/-	-/-/-
	4-萜烯 (+)-4-Carene	1 027	-/-/-	1.09 \pm 0.31/0.70 \pm 0.17/ 1.22 \pm 0.04	0.67 \pm 0.13/1.09 \pm 0.26/ 1.38 \pm 0.16
	(+)-柠檬烯 D-Limonene	1 039	-/-/-	-/-/-	30.67 \pm 7.26/47.41 \pm 6.08/ 31.70 \pm 7.57
	(E)-B-罗勒烯 trans- β -Ocimene	1 048	-/-/-	-/-/0.06 \pm 0.01	-/-/-
	γ -松油烯 γ -Terpinene	1 067	-/-/-	2.49 \pm 0.45/1.88 \pm 0.08/ 2.21 \pm 0.07	1.54 \pm 0.12/2.65 \pm 0.40/ 2.46 \pm 0.29
	别罗勒烯 Allocimene B	1 135	1.26 \pm 0.23/1.36 \pm 0.06/ 1.31 \pm 0.03	-/-/-	-/-/-
	(-)- α -萜澄茄油烯 α -Cubebene	1 352	-/-/-	-/-/-	-/-/0.08 \pm 0.02
	毕澄茄烯 Cubebene	1 392	-/-/-	-/-/-	-/-/0.11 \pm 0.02
	β -榄香烯 β -Elemen	1 394	-/0.09 \pm 0.03/-	-/-/-	-/-/-
	β -石竹烯 Caryophyllene	1 425	0.17 \pm 0.02/0.30 \pm 0.07/ 0.13 \pm 0.02	0.21 \pm 0.02/0.12 \pm 0.03/ 0.11 \pm 0.04	0.10 \pm 0.03/-/ 0.31 \pm 0.03
	Δ -杜松烯 δ -Cadinene	1 513	-/-/-	-/0.09 \pm 0.03/ 0.24 \pm 0.06	-/-/-

表 1 (续)

Table 1 Continued

物质类别	物质名称	保留指数	相对含量/%		
			蜡梅	柳叶蜡梅	山蜡梅
醇类	苯甲醇 Benzyl alcohol	1 044	10.76±2.02/7.49±0.54/ 5.05±0.58	-/-/-	-/-/-
	顺-A,A-5-三甲基-5-乙烯基四氢吡喃-2-甲醇 2-Furanmethanol, 5-ethenyltetrahydro- $\alpha,\alpha,5$ -trimethyl-, cis-	1 096	0.60±0.24/-/ 0.53±0.08	-/-/-	-/-/-
	反式-4-(异丙基)-1-甲基环己-2-烯-1-醇 2-Cyclohexen-1-ol, 1-methyl-4-(1-methylethyl)-, trans-	1 103	-/-/-	2.48±0.76/-/-	-/-/-
	芳樟醇 Linalool	1 112	49.14±8.82/55.59±2.81/ 59.16±3.64	-/0.41±0.12/-	-/-/-
	苯乙醇 Phenylethyl Alcohol	1 117	-/-/-	-/0.55±0.21/ 0.78±0.28	-/-/-
	冰片 endo-Borneol	1 167	-/-/-	0.83±0.20/-/-	-/-/-
	桃金娘烯醇 Myrtenol	1 174	-/0.06±0.01/-	-/-/-	-/-/-
	2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-吡喃-3-醇 2H-Pyran-3-ol, 6-ethenyltetrahydro-2,2,6-trimethyl-	1 178	-/0.09±0.01/ 0.12±0.01	-/-/-	-/-/-
	4-萜烯醇 Terpinen-4-ol	1 179	-/-/-	-/0.14±0.02	0.17±0.04/-/-
	α -松油醇 α -Terpineol	1 192	-/-/-	2.06±0.20/7.31±2.76/ 1.80±0.25	4.05±1.87/0.24±0.05/ 0.69±0.28
	橙花醇 cis-Geraniol	1 260	0.07±0.02/0.11±0.01/ 0.07±0.02	-/-/-	-/-/-
	2,6-二甲基辛-2,7-二烯-1,6-二醇 2,7-Octadiene-1,6-diol, 2,6-dimethyl-	1 278	-/0.11±0.01/ 0.05±0.01	-/-/-	-/-/-
	肉桂醇 Cinnamyl alcohol	1 306	0.26±0.06/0.41±0.04/ 0.35±0.03	-/-/-	-/-/-
	酯类	乙酸苯酯 Benzyl acetate	1 172	24.34±1.73/19.33±0.47/ 17.67±0.78	-/-/-
水杨酸甲酯 Methyl salicylate		1 197	7.37±1.77/8.60±0.79/ 9.86±1.16	-/-/-	-/-/-
乙酸异龙脑酯 Isobornyl acetate			-/-/-	-/0.11±0.03/-	-/-/-
癸酸甲酯 Decanoic acid, methyl ester		1 328	-/-/-	-/0.18±0.05/-	-/-/-
二乙二醇丁醚醋酸酯 Ethanol, 2-(2-butoxyethoxy)-, acetate		1 371	-/-/-	0.28±0.04/ 0.40±0.12/-	0.32±0.13/ 0.06±0.02/-
2-癸烯酸甲酯 2-Decenoic acid, methyl ester		1 374	-/-/-	-/0.33±0.08/-	-/-/-
2,4-癸二烯酸甲酯 2,4-Decadienoic acid, methyl ester, (E,Z)-		1 397	-/-/-	0.97±0.33/2.81±0.16/ 2.62±0.44	0.29±0.05/-/-
乙酸桂酯 Cinnamyl acetate		1 447	-/0.04±0.01/-	-/-/-	-/-/-
酚类	丁香酚 Eugenol	1 360	1.20±0.21/1.26±0.12/ 0.99±0.19	-/-/-	-/-/-
	醛类	苯甲醛 Benzaldehyde	977	0.15±0.02/0.12±0.00/ 0.11±0.00	-/-/-
2-(4-甲基-3-环己烯-1-基)丙醛 3-Cyclohexene-1-acetaldehyde, $\alpha,4$ -dimethyl-		1 176	-/-/-	-/-/-	0.96±0.19/2.55±0.78/ 0.40±0.14
杂环类	吲哚 Indole	1 294	3.30±0.23/4.03±0.09/ 3.60±0.20	-/-/-	-/-/-
芳香烃类	对二甲苯 p-Xylene	915	-/-/-	1.00±0.27/1.82±0.54/ 1.12±0.32	-/0.46±0.12/ 0.18±0.05
酮类	樟脑 Camphor	1 147	-/-/-	-/0.09±0.02/ 0.12±0.04	-/-/-
	其他	(+)-氧化柠檬烯 (+)-Limonene oxide	1 137	-/-/-	0.74±0.13/0.45±0.02/ 0.46±0.04
石竹素 Caryophyllene oxide		1 533	-/-/-	-/-/-	0.05±0.01/-/-
总计	44		14/17/15	13/18/15	14/11/13

说明: 相对含量的3个数据依次在9:00/12:00/15:00检测, 数值为平均值±标准差。-表示未检出。

表2 不同节律下3种蜡梅属植物花香物质的种类

Table 2 Statistics on the variety of floral substances of 3 *Chimonanthus* species different rhythms

物质类别	蜡梅		柳叶蜡梅		山蜡梅		物质类别	蜡梅		柳叶蜡梅		山蜡梅	
	种数	小计	种数	小计	种数	小计		种数	小计	种数	小计	种数	小计
烯类	4/4/3	5	6/7/8	9	7/6/9	10	杂环类	1/1/1	1	-/-/-	-	-/-/-	-
醇类	5/7/7	8	3/3/3	6	2/1/1	2	芳香烃类	-/-/-	-	1/1/1	1	-/1/1	1
酯类	2/3/2	3	2/5/1	5	2/1/-	2	酮类	-/-/-	-	-/1/1	1	-/-/-	-
酚类	1/1/1	1	-/-/-	-	-/-/-	-	其他	-/-/-	-	1/1/1	1	2/1/1	2
醛类	1/1/1	1	-/-/-	-	1/1/1	1	合计	14/17/15	19	13/18/15	23	14/11/13	18

说明：种数的3个数据依次在9:00/12:00/15:00检测。-表示未检出。

表3 不同节律下3种蜡梅属植物花香物质的相对含量

Table 3 Statistics on the relative content of floral substances of 3 *Chimonanthus* species different rhythms

类别	相对含量/%		
	蜡梅	柳叶蜡梅	山蜡梅
烯类	2.82/2.76/2.46	91.66/85.55/92.96	93.98/96.29/98.60
醇类	60.83/63.86/65.33	5.37/8.27/2.72	4.22/0.24/0.69
酯类	31.71/27.97/27.53	1.25/3.83/2.62	0.61/0.06/-
酚类	1.20/1.26/0.99	-/-/-	-/-/-
醛类	0.15/0.12/0.11	-/-/-	0.96/2.55/0.40
杂环类	3.30/4.03/3.60	-/-/-	-/-/-
芳香烃类	-/-/-	1.00/1.82/1.12	-/0.46/0.18
酮类	-/-/-	-/0.09/0.12	-/-/-
其他	-/-/-	0.74/0.45/0.46	0.24/0.41/0.12

说明：相对含量的3个数据依次在9:00/12:00/15:00检测。-表示未检出。

2.2 3种蜡梅属植物主要的花香物质

由图2可知：在3种蜡梅属植物中，共有19种物质占花香物质总相对含量的1%以上，主要为烯类(8种)、醇类(4种)和酯类(3种)化合物。

蜡梅中有8种物质占花香物质总相对含量的1%以上，主要包括芳樟醇(49.14%~59.16%)、乙酸苜酯(17.67%~24.34%)、水杨酸甲酯(7.37%~9.86%)、苯甲醇(5.05%~10.76%)。芳樟醇和乙酸苜酯在蜡梅花香物质中所占比例较大。

在柳叶蜡梅和山蜡梅花中，分别有10和8种物质占花香物质总相对含量的1%以上。与蜡梅不同的是，柳叶蜡梅花香物质中的主要成分是 β -水芹烯(77.49%~80.65%)，山蜡梅的主要花香物质是 β -水芹烯(42.02%~55.50%)和(+)-柠檬烯(30.67%~47.41%)。

2.3 3种蜡梅属植物花香物质的白天释放节律

3种蜡梅属植物在上午、中午和下午的花香物质的组成和相对含量存在差异(图3)。蜡梅中含有8种花香物质，其中，芳樟醇和水杨酸甲酯的相对含量随着时间的变化递增，而乙酸苜酯与苯甲醇的相对含量随着时间的变化呈现逐渐减少的趋势，其他物质在上午、中午和下午的相对含量相近。在柳叶蜡梅的花香物质中，占比最大的 β -水芹烯的相对含量无明显变化趋势，而 β -蒎烯的相对含量随着时间的推移递增，此外，月桂烯仅存在于9:00的柳叶蜡梅花中。山蜡梅主要的花香物质在不同时间呈现不同的比例。 β -水芹烯在上午和下午的相对含量比中午高，但(+)-柠檬烯在中午的相对含量最高， α -松油醇仅于9:00的山蜡梅花中被检测到。

3 讨论

3.1 3种蜡梅属植物花香物质的种类与相对含量

本研究在蜡梅、柳叶蜡梅和山蜡梅花中共检测出44种花香物质。其中，从不同节律的蜡梅花中鉴

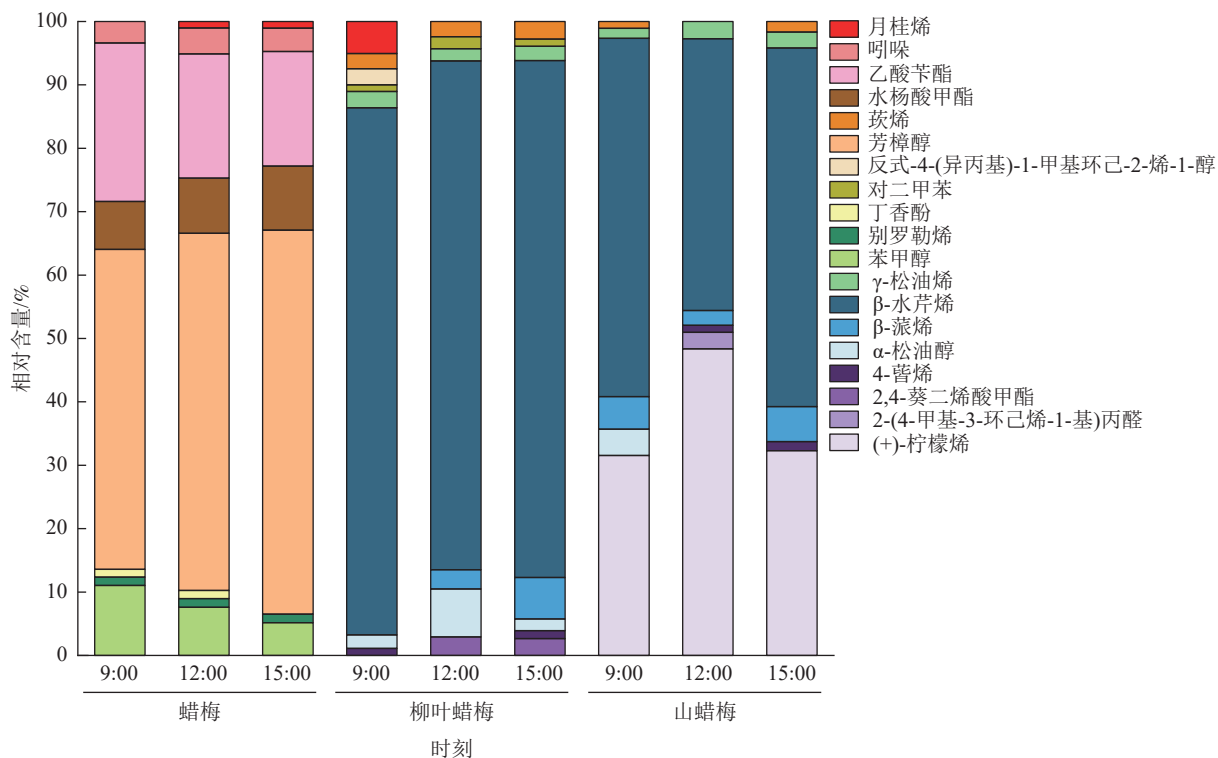


图 2 不同节律下 3 种蜡梅属植物花香物质的主成分堆积图

Figure 2 PCA stacking diagram of floral substances of 3 *Chimonanthus* species under different rhythms

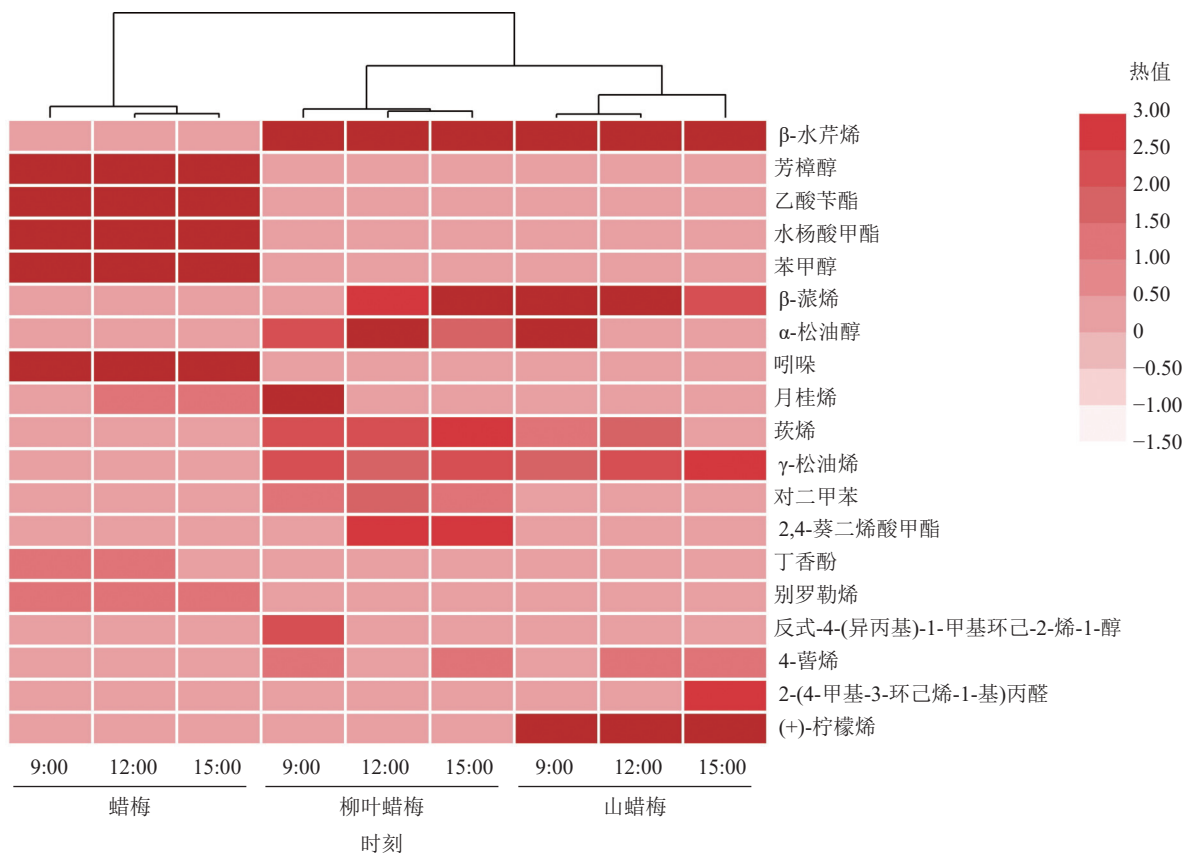


图 3 不同节律下 3 种蜡梅属植物主要花香物质的热图和层次聚类分析图

Figure 3 Heatmap and hierarchical cluster analysis of the main floral substances of 3 *Chimonanthus* species under different rhythms

定出 19 种花香物质，主要为芳樟醇和乙酸苜酯，这 2 种物质在其他针对蜡梅花香变化的研究中也证明大量存在^[22-24]，这进一步验证了其在蜡梅花香中的核心作用。另外，蜡梅的主要花香成分包括烯类、

醇类和酯类化合物, 这与他人研究结果一致^[25]。目前有关柳叶蜡梅和山蜡梅鲜花花香物质的研究较少, 只在其干花中鉴定出 α -月桂烯^[26]。本研究表明柳叶蜡梅花中含量最多的花香物质是 β -水芹烯, β -水芹烯和(+)-柠檬烯在山蜡梅的花中也占有很大比例。

3.2 3种蜡梅属植物花香物质的差异

从蜡梅、柳叶蜡梅和山蜡梅中分别鉴定出19、23和18种花香物质。结果表明3种蜡梅属植物之间的花香物质差异较大。3种蜡梅属植物鉴定出的花香物质中, 只有 β -水芹烯和 β -石竹烯是3个物种共有的, 多达30种物质仅在其中一种物种中检测到。仅存在于蜡梅花中的物质(15种)比仅存在于柳叶蜡梅(9种)和山蜡梅(6种)花中的物质多。2种花香物质(芳樟醇和 β -月桂烯)在蜡梅和柳叶蜡梅花中存在, 而在山蜡梅花中未检测到; 10种物质是柳叶蜡梅和山蜡梅花共有的, 而在蜡梅花中未检测到。

在9类花香物质中, 烯类、醇类和酯类是种类与含量最丰富的类别。物种间的差异性与多样性也表现在这3个类别中。从3种蜡梅属植物中检测到15种烯类化合物, 蜡梅中仅检测出5种, 而柳叶蜡梅和山蜡梅花中分别检测到9和10种。只有2种烯类(β -水芹烯和 β -石竹烯)为3个物种所共有。共检测到13种醇类化合物, 蜡梅和柳叶蜡梅花中分别检测到8和6种, 而山蜡梅花中仅检测到2种。其中, 芳樟醇为蜡梅与柳叶蜡梅共有, 4-萜烯醇和 α -松油醇为柳叶蜡梅和山蜡梅共有。共检测到8种酯类化合物, 其中2种为柳叶蜡梅和山蜡梅共有, 3种为蜡梅特有, 3种为柳叶蜡梅特有。

柳叶蜡梅和山蜡梅的花香物质含量较为相似, 但蜡梅与其他2种植物的花香物质相对含量差异较大。在柳叶蜡梅和山蜡梅中, β -水芹烯是相对含量最丰富的花香物质, 而在蜡梅中并未检测到。在蜡梅中, 芳樟醇(49.14%~59.16%)与乙酸苜酯(17.67%~24.34%)是相对含量最高的花香物质, 而柳叶蜡梅和山蜡梅花中不含芳樟醇与乙酸苜酯。这可能与系统发育关系有关。系统发育分析表明, 柳叶蜡梅和山蜡梅的亲缘关系比蜡梅更近^[27]。另一方面, 作为常见的花香物质, 芳樟醇和乙酸苜酯对传粉昆虫具有一定的吸引作用^[28-29]。鉴于蜡梅特殊的低温开花环境, 可以推测蜡梅的传粉昆虫影响其花香物质的释放。

3.3 3种蜡梅属植物花香物质的释放节律

3种蜡梅属植物花香物质的白天释放节律存在差异。柳叶蜡梅和山蜡梅花在上午、中午和下午的花香物质差异较大, 而蜡梅的花香物质在3个时间段内变化相对较小。本研究显示: 蜡梅在中午检测出的花香物质种类最多, 这与先前关于蜡梅花香释放节律的报道结果一致^[24]。同样, 柳叶蜡梅也在中午释放出种类最为丰富的花香物质。然而, 山蜡梅在3个时间段内检测出的花香物质的种类数接近, 上午检测到的花香物质种类较多。相关研究揭示了矮牵牛 *Petunia hybrida*、烟草 *Nicotiana suaveolens* 等多种园艺植物释放花香物质的昼夜节律模式^[30-31]。矮牵牛作为模式物种被用于研究植物花香物质的释放节律^[32], 其在夜间散发出强烈的香味, 这可能与传粉综合症有关。矮牵牛花香物质的释放遵循内源性昼夜节律, 大约在黑暗4~6小时后达到峰值^[33-34]。由此可见, 温度、湿度与光照强度可能对花香物质的释放产生了影响。一般而言, 植物挥发性物质随着温度、光照等强度的增加而增加^[35]。

4 结论

从3种蜡梅属植物中共鉴定出44种花香物质, 蜡梅、柳叶蜡梅和山蜡梅中分别鉴定出19、23和18种花香物质。这44种物质被划分为9类, 其中烯类、醇类和酯类是种类与含量最丰富的类别。通过比较分析可知, 柳叶蜡梅和山蜡梅花香物质较为相似, 验证了两者在系统发育上的关联性。蜡梅的主要花香物质为芳樟醇和乙酸苜酯, 与其他2种植物的花香物质种类差异较大。由于蜡梅特殊的低温开花环境, 其传粉昆虫与花香之间的相互作用可能是花香物质产生独特性的原因。本研究揭示了蜡梅属3个物种花香物质的异同, 为蜡梅属植物遗传育种、资源利用及开发更深层次的价值提供理论基础。

5 参考文献

- [1] 陈龙清, 陈俊愉. 蜡梅属植物的形态、分布、分类及其应用[J]. 中国园林, 1999(1): 76-77.
CHEN Longqing, CHEN Junyu. Morphology, distribution, classification and application of *Chimonanthus* [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 1999(1): 76-77.
- [2] ZHOU Mingqin, CHEN Longqing, RUAN Rui. Genetic diversity of *Chimonanthus nitens* Oliv. complex revealed using

- inter-simple sequence repeat markers [J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, **136**: 38–42.
- [3] 伍碧华, 徐恒伟, 明军, 等. 四川大巴山野生蜡梅资源现状与保护利用[J]. *中国野生植物资源*, 2009, **28**(5): 33–36.
WU Bihua, XU Hengwei, MING Jun, *et al.* Existence status, protection and utilization of wild wintersweet (*Chimonanthus Lindley*) in Dabashan Sichuan [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2009, **28**(5): 33–36.
- [4] 赵冰, 张启翔. 中国蜡梅属种质资源的分布及其特点[J]. *广西植物*, 2007(5): 730–735.
ZHAO Bing, ZHANG Qixiang. Distribution and characteristic of *Chimonanthus* germplasm in China [J]. *Guihaia*, 2007(5): 730–735.
- [5] 张川英, 李婷婷, 龚笑飞, 等. 遂昌乌溪江流域山蜡梅生境群落特征与物种多样性[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(4): 848–858.
ZHANG Chuanying, LI Tingting, GONG Xiaofei, *et al.* Habitat community characteristics and species diversity of *Chimonanthus nitens* in Wuxi River Basin, Suichang [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(4): 848–858.
- [6] 黎鑫, 杨菲, 陈美霞, 等. 柳叶蜡梅化学成分及生物活性研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2023, **36**(1): 25–28, 33.
LI Xin, YANG Fei, CHEN Meixia, *et al.* Research progress on chemical constituents and biological activities of *Chimonanthus salicifolius* [J]. *Cereals and Oils*, 2023, **36**(1): 25–28, 33.
- [7] 涂昆, 邹峥嵘. 蜡梅属植物生物碱的生物活性和合成研究进展[J]. *中草药*, 2017, **48**(11): 2340–2352.
TU Kun, ZOU Zhengrong. Research progress on biological activities and synthesis of alkaloids in plants from *Chimonanthus Lindl* [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2017, **48**(11): 2340–2352.
- [8] 徐金标, 潘俊杰, 吕群丹, 等. 蜡梅科植物化学成分及其药理活性研究进展[J]. *中国中药杂志*, 2018, **43**(10): 1957–1968.
XU Jinbiao, PAN Junjie, LÜ Qundan, *et al.* Research advances on chemical constituents from Calycanthaceae plants and their pharmacological activities [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2018, **43**(10): 1957–1968.
- [9] 李琦, 周君美, 邢丙聪, 等. 蜡梅属药用植物分子生物学研究进展[J]. *中国现代应用药学*, 2022, **39**(12): 1646–1654.
LI Qi, ZHOU Junmei, XING Bingcong, *et al.* Research progress on the molecular biology of genus *Chimonanthus* medicinal plants [J]. *Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy*, 2022, **39**(12): 1646–1654.
- [10] ZHOU Xiaojie, YU Yang, CHENG Zhang, *et al.* Anti-depression effect of *Chimonanthus salicifolius* essential oil in chronic stressed rats [J]. *Journal of Medicinal Plants Research*, 2014, **8**: 430–435.
- [11] WANG Kuiwu, LI Dan, WU Bin, *et al.* New cytotoxic dimeric and trimeric coumarins from *Chimonanthus salicifolius* [J]. *Phytochemistry Letters*, 2016, **16**: 115–120.
- [12] 李帅岚, 邹峥嵘. 蜡梅属植物中黄酮和香豆素类成分及药理活性研究进展[J]. *中草药*, 2018, **49**(14): 3425–3431.
LI Shuailan, ZOU Zhengrong. Research progress on flavonoids and coumarins from *Chimonanthus* plants and its pharmacological activities [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2018, **49**(14): 3425–3431.
- [13] WANG Ning, CHEN Hui, XIONG Lei, *et al.* Phytochemical profile of ethanolic extracts of *Chimonanthus salicifolius* S. Y. Hu. leaves and its antimicrobial and antibiotic-mediated activity [J]. *Industrial Crops & Products*, 2018, **125**: 328–334.
- [14] 熊义权, 肖纯, 龙秀娟. 蜡梅属植物叶、花化学成分及药理性质研究进展[J]. *中国野生植物资源*, 2008(1): 8–10, 15.
XIONG Yiquan, XIAO Chun, LONG Xiujuan. Research progress on chemical constituents and pharmacological properties of leaves and flowers of *Chimonanthus* [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2008(1): 8–10, 15.
- [15] 董瑞霞, 潘俊杰, 金叶, 等. 两种蜡梅属药食兼用茶化学成分及药理活性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, **42**(16): 429–437.
DONG Ruixia, PAN Junjie, JIN Ye, *et al.* Research advances on chemical constituents and their pharmacological activities of two kinds of medicinal and edible tea from *Chimonanthus Lindl* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, **42**(16): 429–437.
- [16] 杨钰, 王艺光, 董彬, 等. 不同梅花品种花香成分鉴定与分析[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(2): 262–274.
YANG Yu, WANG Yiguang, DONG Bin, *et al.* Identification and analysis of floral scent compounds of *Prunus mume* cultivars [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(2): 262–274.
- [17] SHANG Junzhong, TIAN Jingpu, CHENG Huihui, *et al.* The chromosome-level wintersweet (*Chimonanthus praecox*) genome provides insights into floral scent biosynthesis and flowering in winter [J/OL]. *Genome Biology*, 2020, **21**(1): 200[2023-03-20]. DOI: 10.1186/s13059-020-02088-y.
- [18] TIAN Jingpu, MA Zhiyao, ZHAO Kaige, *et al.* Transcriptomic and proteomic approaches to explore the differences in monoterpene and benzenoid biosynthesis between scented and unscented genotypes of wintersweet [J]. *Physiologia Plantarum*, 2019, **166**: 478–493.
- [19] 徐萌, 张经纬, 吴令上, 等. HS-SPME-GC-MS 联用测定蜡梅属植物花的挥发性成分[J]. *林业科学*, 2016, **52**(12): 58–65.

- XU Meng, ZHANG Jingwei, WU Lingshang, *et al.* Determination of volatile components from *Chimonanthus* flowers by HS-SPME-GC-MS [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, **52**(12): 58–65.
- [20] LI Yue, JIA Weijia, WANG Qiong, *et al.* Comparative analysis of floral scent profiles between two *Chimonanthus praecox* plants under different rhythms and blooming stages [J/OL]. *Scientia Horticulturae*, 2022, **301**: 111129[2023-03-20]. DOI: [10.1016/j.scienta.2022.111129](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111129).
- [21] 蒙柳贝. 三个品种蜡梅花香成分的差异及动态变化研究[D]. 昆明: 西南林业大学, 2024.
MENG Liubei. *Study on the Differences and Dynamic Changes of Floral Fragrance Compounds of Three Varieties of Chimonanthus praecox* [D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2024.
- [22] 周继荣, 倪德江. 蜡梅不同品种和花期香气变化及其花茶适制性[J]. 园艺学报, 2010, **37**(10): 1621–1628.
ZHOU Jirong, NI Dejiang. Changes in flower aroma compounds of cultivars of *Chimonanthus praecox* (L.) Link and at different stages relative to *Chimonanthus* tea quality [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, **37**(10): 1621–1628.
- [23] 陆安霞, 周心如, 叶玉龙, 等. 蜡梅花离体摊放过程中香气感官评价和挥发性物质分析[J]. 园艺学报, 2020, **47**(1): 73–84.
LU Anxia, ZHOU Xinru, YE Yulong, *et al.* Changes of sensory characteristic and volatiles of harvested flowers of *Chimonanthus praecox* during spreading process [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2020, **47**(1): 73–84.
- [24] 余莉. 蜡梅花挥发性组分与花色色素分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
YU Li. *The Study of Volatile Components and Flower Pigments in Chimonanthus praecox* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [25] 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.
FENG Nan. *Determination of Floral Volatile Components and Preliminary Study on Function of Two Terpene Synthases in Wintersweet* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [26] 林霞. 蜡梅属植物中挥发性成分的研究进展[J]. 福建农业科技, 2019, **50**(7): 57–64.
LIN Xia. Research progress on volatile components of *Chimonanthus* Lindl. [J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2019, **50**(7): 57–64.
- [27] ZHOU Shiliang, RENNER S S, WEN Jun. Molecular phylogeny and intra- and intercontinental biogeography of Calycanthaceae [J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2006, **39**(1): 1–15.
- [28] YANG Xiulian, YUE Yuanzheng, LI Haiyan, *et al.* The chromosome-level quality genome provides insights into the evolution of the biosynthesis genes for aroma compounds of *Osmanthus fragrans* [J]. *Horticulture Research*, 2018, **5**: 72[2023-03-20]. DOI: [10.1038/s41438-018-0108-0](https://doi.org/10.1038/s41438-018-0108-0).
- [29] ZHANG Liangsheng, CHEN Fei, ZHANG Xingtang, *et al.* The water lily genome and the early evolution of flowering plants [J]. *Nature*, 2020, **577**(7788): 79–84.
- [30] ROEDER S, HARTMANN A, EFFMERT U, *et al.* Regulation of simultaneous synthesis of floral scent terpenoids by the 1, 8-cineole synthase of *Nicotiana suaveolens* [J]. *Plant Molecular Biology*, 2007, **65**: 107–124.
- [31] CHENG Sihua, FU Xiumin, MEI Xin, *et al.* Regulation of biosynthesis and emission of volatile phenylpropanoids/benzenoids in *petunia*×*hybrida* flowers by multi-factors of circadian clock, light, and temperature [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, **107**: 1–8.
- [32] FENSKE M P, IMAIZUMI T. Circadian rhythms in floral scent emission [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, **7**: 462[2023-03-20]. DOI: [10.3389/fpls.2016.00462](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00462).
- [33] UNDERWOOD B A, TIEMAN D M, SHIBUYA K, *et al.* Ethylene-regulated floral volatile synthesis in *petunia* corollas [J]. *Plant Physiology*, 2005, **138**: 255–266.
- [34] FENSKE M P, HEWETT HAZELTON K D, HEMPTON A K, *et al.* Circadian clock gene LATE ELONGATED HYPOCOTYL directly regulates the timing of floral scent emission in *Petunia* [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, **112**: 9775–9780.
- [35] 蒋冬月, 李永红, 沈鑫. 芸香叶片和花瓣释放挥发性有机物成分及其变化规律[J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(3): 572–580.
JIANG Dongyue, LI Yonghong, SHEN Xin. Components and variations of volatile organic compounds released from leaves and flowers of *Ruta graveolens* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, **35**(3): 572–580.