

4个桂花品种开花进程释放 VOCs 动态变化分析

蔡宙霏, 陈雅奇, 许馨露, 王小东, 汪俊宇, 张汝民, 高 岩

(浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 为揭示自然条件下桂花 *Osmanthus fragrans* 开花进程中挥发性有机化合物(VOCs)释放动态变化, 采用动态顶空气体循环采集法与热脱附-气相色谱-质谱(TDS-GC-MS)联用技术, 选择金桂(Luteus group), 银桂(Albus group), 丹桂(Aurantiacus group)和四季桂(Asiaticus group)各1个品种进行开花进程所释放的 VOCs 成分收集测定。结果表明: 4个桂花品种 VOCs 释放量依次为四季桂(1 704.56)>银桂(1 675.26)>金桂(1 383.48)>丹桂(1 062.76), 均为单峰曲线, 盛花期达到最大值; 丹桂释放 VOCs 种类最多; 4个桂花品种盛花期释放的 VOCs 主要是萜烯类, 含量均大于63.0%, 还有烃类、醛类、醇类、酮类、酯类及芳香族类化合物。其中金桂 VOCs 中主要成分为 β -紫罗兰酮、萜品醇, 银桂主要为 β -紫罗兰酮、芳樟醇, 丹桂主要为 β -蒎烯、乙酸-3-己烯酯, 四季桂主要为萜品醇、 β -紫罗兰酮。图2表4参35

关键词: 植物学; 桂花; 开花进程; 挥发性有机化合物; 动态变化

中图分类号: S685.13; Q946.82 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2017)04-0608-12

Changes of volatile organic compounds released during flowering in four *Osmanthus fragrans* cultivar groups

CAI Zhoufei, CHEN Yaqi, XU Xinlu, WANG Xiaodong, WANG Junyu, ZHANG Rumin, GAO Yan

(School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To reveal dynamic changes of the volatile organic compounds (VOCs) released in the flowering process of *Osmanthus fragrans*, the composition and content of flower VOCs in the four groups of cultivars (Lutens group, Albus group, Aurantiacus group and Asiaticus group) were analyzed under near-natural conditions using the dynamic headspace air-circulation method and the thermal desorption system/gas chromatography/mass spectrometer (TDS-GC-MS) technique. Results of the four groups listed in descending order towards VOCs release were as follows: Asiaticus group(1 704.56)>Albus group(1 675.26)>Luteus group(1 383.48)>Aurantiacus group (1 062.76). The VOCs release of four groups had single-peak-curves. During the full bloom stage, the Aurantiacus group of cultivar released the most kinds of VOCs. More than 63% of the VOCs in the four groups was terpene, and the left contained hydrocarbons, aldehydes, alcohols, ketones, esters, and aromatic compounds. Major VOCs in each group of cultivar were as follows: mostly β -ionone and terpineol in Luteus group; mainly β -ionone and linalool in Albus group; mostly β -pinene and acetate-3-hexen-1-ol in Aurantiacus group; and mostly terpineol and β -ionone in Asiaticus groups. [Ch, 2 fig. 4 tab. 35 ref.]

Key words: botany; *Osmanthus fragrans*; the flowering process; volatile organic compounds; dynamic changes

植物在生长发育过程中合成并释放低沸点、小分子量的次生代谢产物, 统称为挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)^[1]。VOCs 具有多种生理生态功能, 是重要的植保素、引诱剂, 能直接或间接参与植物的防御反应^[2]。番茄 *Lycopersicon esculentum*^[3], 黄花蒿 *Artemisia annua*^[4]的腺毛是其

收稿日期: 2016-06-29; 修回日期: 2016-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31270756, 31470704)

作者简介: 蔡宙霏, 从事植物生理生态研究。E-mail: caizhoufei2008@163.com。通信作者: 高岩, 教授, 博士, 从事植物生理生态研究。E-mail: gaoyan1960@sohu.com

合成并存储代谢产物最主要场所, 主要分布在花、茎、叶等地上组织, 而花部位释放的萜类物质含量较高。植物鲜花释放的气味与植物种类、发育时期、生长环境和营养状态等有密切关系。目前, 玫瑰 *Rosa rugosa*, 玉兰 *Magnolia denudata*, 蜡梅 *Chimonanthus praecox*, 桂花 *Osmanthus fragrans* 等多种具有重要观赏价值园林树木鲜花释放的 VOCs 已被鉴定^[5-8]。不同桂花品种的香气在 VOCs 组分、数量、含量上存在差异^[9], 但金桂(Luteus group), 银桂(Albus group)和丹桂(Aurantiacus group)的花香又具有一定相似性^[10], 而且每种桂花释放的 VOCs 成分及含量均与环境因子紧密关联, 生长环境、气温和光强是造成其差异的主要影响因素^[11]。日本紫藤 *Wisteria floribunda* 在开花进程中, 释放的 VOCs 以萜烯类为主, 并随着花朵发育物质成分发生显著的变化^[12]; 梅花 *Prunus mume* 在开放过程中, 其香气成分也具有时空动态变化特征^[13]。自然条件下有关 4 个桂花品种群开花进程中鲜花释放 VOCs 动态变化却鲜见报道。桂花是中国传统十大名花之一。其花香、花色、花朵数量及花期持续时间是育种的重要目标, 因此, 本研究以金桂、银桂、丹桂和四季桂(Asiaticus group)等 4 个桂花品种群的鲜花为研究对象, 在自然环境中利用动态顶空气体循环采集法与热脱附-气相色谱-质谱(TDS-GC-MS)联用技术, 以花蕾期、初花期、盛花期、衰败期为时间点, 进行 VOCs 的采集与分析。综合分析相关参数在各时期的变化特征及种类与物质含量的差异。揭示 4 个桂花品种群在自然条件下鲜花开放过程释放 VOCs 的动态变化规律, 为进一步研究桂花鲜花 VOCs 对人体健康的影响提出理论依据, 从而为园林植物的合理配置提供科学的参考。

1 材料与方法

1.1 材料

实验选取金桂、银桂、丹桂和四季桂各 1 个品种(未确定品种名), 均来自于浙江农林大学东湖校区, 在自然条件下选取长势良好、无病虫害、无机械损伤, 树龄为 15~20 a, 树高为 5 m, 冠幅为 3 m, 胸径为 20 cm 且分枝点低, 花蕾繁茂的树种。

1.2 方法

1.2.1 VOCs 的采集 于 2015 年 9~10 月, 监测花期, 并对花蕾期、初花期、盛花期、衰败期释放的 VOCs 进行采集。在晴朗无风的天气, 用 QC-2 型大气采样仪采用动态顶空气体循环采集法^[14]分别采集 4 个桂花品种不同开花阶段的 VOCs。各个时期采样重复 3 次, 气体循环流量为 100 mL·min⁻¹, 采气时间 20 min, 采集后采摘鲜花称量。

1.2.2 VOCs 的分析 VOCs 用 TDS-GC-MS 技术分析, 仪器及参数设置条件参考文献[15]。TDS(TD3 型, 德国 GERSTEL 公司)工作条件: 系统载气压力 20 kPa; 进样口温度 250 °C; 脱附温度 250 °C(10 min); 冷阱温度 -100 °C(保持 3 min); 冷阱进样时温度骤然升温至 260 °C。GC(7890A 型, Agilent 公司)工作条件: 色谱柱为 30 m × 250.00 μm × 0.25 μm 的 HP-5MS 柱; 程序升温: 初始温度 40 °C(保持 4 min), 以 6 °C·min⁻¹ 的速率升至 250 °C(保持 3 min), 以 10 °C·min⁻¹ 的速率升至 270 °C(保持 5 min)。MS(5975C 型, Agilent 公司)工作条件: 电离方式为 EI, 电子能量为 70 eV, 原子质量范围为 28~450, 接口温度为 280 °C, 离子源温度为 230 °C, 四级杆温度为 150 °C。

1.3 数据分析

通过 TDS-GC-MS 技术分析, 获得 VOCs 的总离子流量色谱图, 对比气质联用仪计算机的 NIST 2008 谱库, 以色谱峰的峰面积计算相对含量, 并兼顾色谱保留时间, 结合手工检索定性。再用 Origin 8 和 SPSS 18.0 软件进行制图和方差分析。

2 结果与分析

2.1 4 个桂花品种不同开花阶段鲜花 VOCs 分析

2.1.1 金桂 金桂鲜花 VOCs 成分的总离子流图见图 1A, 其所释放的 VOCs 相对含量在开放进程中呈现先上升后下降的变化趋势, 伴随着花朵发育, 香味随之浓郁, 所释放的 VOCs 成分和相对含量也随之显著增加。在开花进程中, 共发现 43 种物质。从花蕾期到衰败期分别检测出 23, 32, 38 和 18 种物质, 总释放量依次为 302.2, 353.3, 556.8 和 171.2(峰面积 $A \times 10^5 \cdot g^{-1}$)。在盛花期 VOCs 种类和相对含量达到

最大值,与花蕾期相比较,种类增加了16种,释放量增加了1.8倍。其中萜类增加到了23种,占盛花期总量的78.2%,醛类4种占盛花期总量的3.7%,烃类3种占盛花期总量的2.8%,醇类1种占盛花期总量的2.6%,酮类1种占盛花期总量的0.2%,酯类2种占盛花期总量的7.8%,4种芳香族类化合物占盛花期总量的3.9%及1种酸类化合物占盛花期总量的0.8%(表1)。随着开花进程,β-紫罗兰酮、萜品醇和乙酸-3-己烯酯释放量呈现低—高—低的动态变化,而罗勒烯和β-蒎烯在花蕾期达到最大值之后呈逐步下降趋势。

2.1.2 银桂 银桂鲜花 VOCs 成分的总离子流图见图 1B。在整个花期中,银桂鲜花共检测出39种物质。与金桂相似,开花进程中所释放的物质种类和相对含量最高峰也出现在盛花期。据感官判断,其整体香味不似其他桂花浓烈,所散发出来的香味较为淡雅。从花蕾期到衰败期分别检测出20, 29, 36及18种成分,总释放量依次为106.3, 287.9, 1 100.1和180.9。经比较,盛花期较花蕾期多出了16种物质,相对含量也增加了10.3倍。其中萜类增加到了22种,占盛花期总量的93.8%,醛类4种占盛花期总量的1.4%,烃类1种占盛花期总量的0.2%,醇类4种占盛花期总量的0.9%,酯类1种占盛花期总量的3.0%,芳香族类4种占盛花期总量的0.6%(表2)。随着花瓣的展开,β-紫罗兰酮、芳樟醇、石竹烯、二氢-紫罗兰酮和罗勒烯释放量也均呈现低—高—低的动态变化。

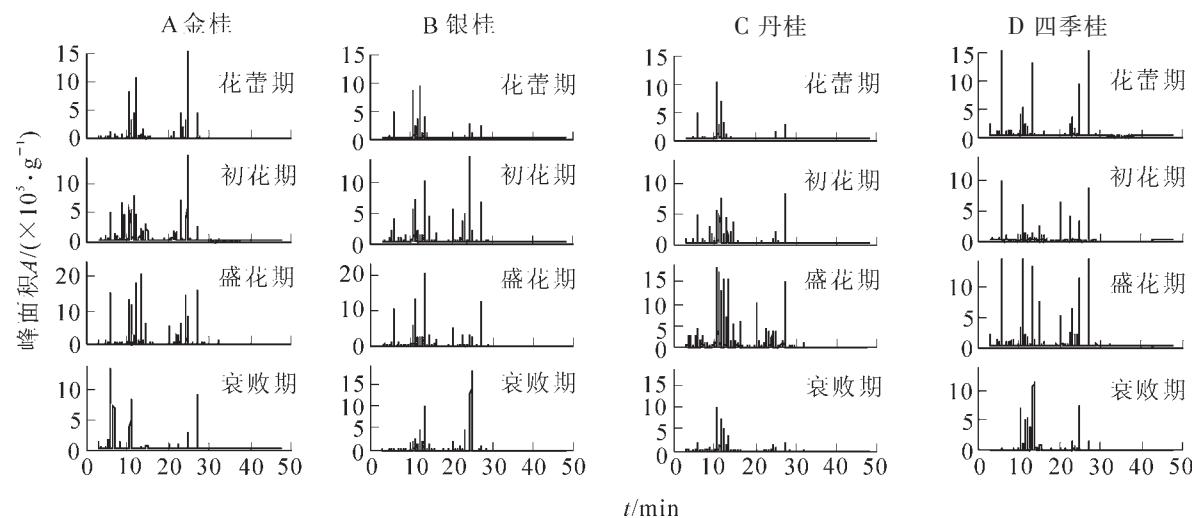


图 1 4个桂花品种开花进程鲜花 VOCs 成分的总离子流图

Figure 1 TIC of VOCs from the fresh flowers of four *Osmanthus fragrans* cultivars' blooming process

2.1.3 丹桂 丹桂鲜花 VOCs 成分的总离子流图见图 1C。随着丹桂鲜花的开放,所释放的鲜花 VOCs 成分逐渐增多,相对含量也随之升高,在盛花期达到最大值。而随着花的衰败,VOCs 种类和相对含量也逐渐减少。在开花进程中,共检测到52种物质,从花蕾期到衰败期分别检测出18, 33, 52及21种成分,总释放量依次为76.6, 284.5, 478.2, 223.4。从中可以发现,与花蕾期比较,盛花期物质种类多了34种,相对含量增加了6.2倍。其中萜类增加到了30种,占盛花期总量的65.7%,醛类7种占盛花期总量的13.1%,烃类2种占盛花期总量的1.2%,醇类2种占盛花期总量的3.3%,酮类2种占盛花期总量的1.6%,酯类3种占盛花期总量的13.0%,4种芳香族类化合物占盛花期总量的1.5%及2种酸类化合物占盛花期总量的0.6%(表3)。开花进程中,芳樟醇、乙酸-3-己烯酯和罗勒烯释放量呈现低—高—低的动态变化,而β-蒎烯和柠檬烯含量则逐步上升,在衰败期达到最大值。

2.1.4 四季桂 四季桂鲜花 VOCs 成分的总离子流图见图 1D。与其他品种的桂花相似,四季桂在整个花期中所释放的 VOCs 种类和含量也在盛花期达到最大值,在衰败期又有所下降。这与四季桂开花过程中所散发出来的香气浓度变化趋势相同。整个花期中,共发现46种物质,从花蕾期到衰败期分别检测出29, 36, 42及22种成分,总释放量依次为150.7, 227.4, 1 202.1和124.3。经分析,盛花期物质种类较花蕾期多13种,相对含量也大幅增加了8.0倍。其中萜类增加到了23种,占盛花期总量的94.4%,醛类7种占盛花期总量的2.0%,烃类1种占盛花期总量的0.1%,醇类3种占盛花期总量的0.9%,酮类1种占盛花期总量的0.2%,酯类2种占盛花期总量的1.5%,芳香族类5种占盛花期总量的0.9%(表4)。

随着开花的进程, 蒽品醇、 β -紫罗兰酮、 β -蒎烯、罗勒烯和柠檬烯释放量也均呈现低—高—低的动力学变化。

综上所述, 同个桂花品种在整个花期的不同阶段, 鲜花释放的 VOCs 成分和相对含量存在差异。均表现为花蕾期种类少、相对含量低; 盛开期种类多、相对含量高, 释放量表现为单峰曲线。4个桂花品种进行比较, 四季桂在盛花期释放的 VOCs 量最大; 而丹桂在盛花期释放的 VOCs 种类最多, 即为 52 种。在每种桂花花蕾期、初花期、盛花期和衰败期 VOCs 的成分中均含有萜类、烃类、醛类、醇类、酮类、酯类及芳香族化合物, 其中萜类化合物占大多数(均高于 70%以上)。金桂、银桂、丹桂及四季桂盛花期萜类物质相对含量分别为 78.2%, 93.8%, 65.7% 及 94.4%, 其中四季桂中萜烯物质相对含量最高。

2.2 4个桂花品种盛花期 VOCs 主要物质比较

4个桂花品种在整个开花过程中盛花期所释放的 VOCs 种类和相对含量均达到最高值。对比盛花期高相对含量的前几种物质发现, 不同品种的桂花, VOCs 组成及相对含量存在显著的差异(图 2)。金桂在盛花期阶段相对含量最高的物质成分为 β -紫罗兰酮(46.2%), 蒽品醇(11.5%), 乙酸-3-己烯酯(6.7%), 罗勒烯(4.8%), β -蒎烯(3.3%), 占盛花期总量的 72.5%。银桂在盛花期阶段含量最高的物质成分包括 β -紫罗兰酮(50.5%), 芳樟醇(20.4%), 石竹烯(5.3%), 二氢-紫罗兰酮(3.5%), 罗勒烯(3.5%), 占盛花期总量的 83.1%。丹桂在盛花期阶段含量最高的物质成分包括 β -蒎烯(10.2%), 芳樟醇(9.8%), 乙酸-3-己烯酯(9.6%), 罗勒烯(7.2%), 柠檬烯(5.8%), 占盛花期总量的 42.6%。四季桂在盛花期阶段含量最高的物质成分为 蒽品醇(40.5%), β -紫罗兰酮(13.6%), β -蒎烯(12.2%), 罗勒烯(5.7%), 柠檬烯(5.4%), 占盛花期总量的 77.5%。

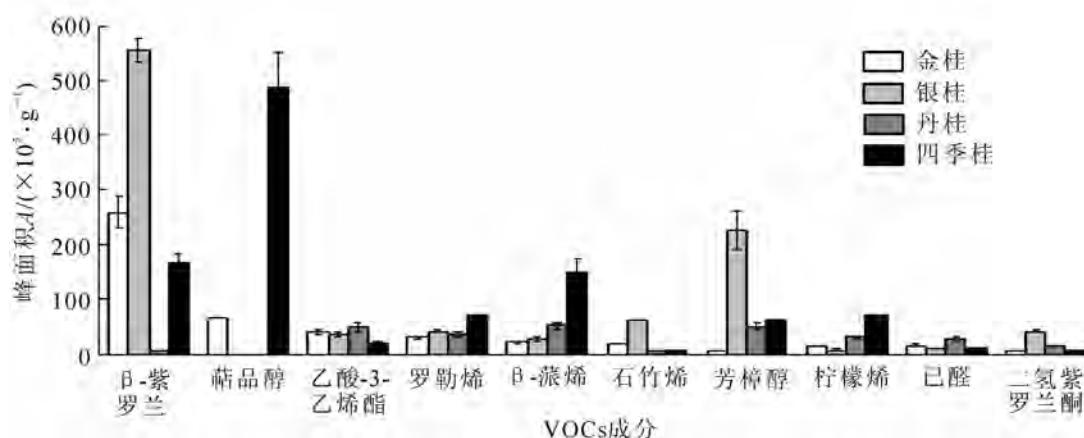


图 2 4个桂花品种盛花期鲜花 VOCs 主要成分的比较

Figure 2 Contrast of major VOCs from the fresh flowers of four *Osmanthus fragrans* cultivars at full-bloom stage

通过对比 4 个桂花品种盛花期鲜花释放的 VOCs 主要成分和相对含量, 发现它们存在很大的差异, 虽然萜烯类是它们释放的主要物质, 但是每种萜烯在 4 种桂花中的组成和相对含量相差较大, 构成了 4 个桂花品种各自具有独特的主要 VOCs 组分。例如莰烯、2-蒈烯、大马酮(盛花期无)是金桂的特有成分; 檀香脑、脱氢芳樟醇、4-庚烯-1-醇是银桂的特有成分; 蒽品油烯、柠檬醛、反式-2-癸烯醇、去氢白菖烯、葑烯、杜松烯、甲基紫罗兰烯、戊醛、羟丙酮、水杨酸甲酯、安息香醛、顺式-3-己烯异戊酸是丹桂的特有成分; 二氢香茅醇、二氢甲基紫罗兰酮(盛花期无)、辛醛、山梨醛、辛醇、正丙烯酸己酯、间乙基甲苯、苯丙烯是四季桂的特有成分。

3 结论与讨论

3.1 4个桂花品种在开花过程中鲜花释放 VOCs 的总体变化趋势

蜡梅、日本紫藤、“西伯利亚”百合 *Lilium ‘Siberia’* 等观赏植物在花发育过程中 VOCs 的种类和含量均发生显著的变化, 随着花的开放, 释放 VOCs 的种类及含量逐渐增多, 并随着花瓣的展开释放量增加^[7,12,16]。本研究表明: 4 个桂花品种开花进程中鲜花所释放的 VOCs 成分种类和相对含量总体呈现单

表1 金桂不同开花阶段鲜花 VOCs 组分测定

Table 1 The VOCs from the fresh flowers of Luteus cultivar in blooming process

序号	t/min	挥发性有机化合物	分子式	峰面积 A/(×10 ⁵ ·g ⁻¹)			
				花蕾期	初花期	盛花期	衰败期
1	3.50	2-甲基环己醇 2-methyl cyclohexanol	C ₇ H ₁₄ O	2.40 ± 0.34	1.45 ± 0.61	14.49 ± 2.13	4.96 ± 0.55
2	5.23	辛烯 octene	C ₈ H ₁₆	5.39 ± 0.49	10.76 ± 0.48	7.05 ± 0.48	5.28 ± 0.21
3	5.36	己醛 hexanal	C ₆ H ₁₂ O	—	—	12.70 ± 1.92	—
4	6.35	糠醛 furfural	C ₅ H ₈ O ₂	5.41 ± 0.41	2.30 ± 0.30	2.29 ± 0.35	12.53 ± 2.08
5	6.82	2-己烯醛 2-hexenal	C ₆ H ₁₀ O	—	—	—	2.88 ± 0.87
6	6.98	乙苯 ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	6.10 ± 0.11	5.22 ± 0.19	12.38 ± 2.35	1.73 ± 0.64
7	7.20	二甲苯 xylylene	C ₈ H ₁₀	—	5.45 ± 0.64	5.65 ± 0.78	—
8	7.77	环辛四烯 cyclooctatetraene	C ₈ H ₈	3.50 ± 0.35	5.45 ± 0.41	3.78 ± 0.73	—
9	7.98	壬烷 nonane	C ₉ H ₂₀	—	—	4.96 ± 0.66	—
10	8.07	庚醛 heptanal	C ₇ H ₁₄ O	—	—	2.62 ± 0.53	—
11	8.92	α-蒎烯 α-pinene	C ₁₀ H ₁₆	3.63 ± 0.37	21.98 ± 1.31	1.67 ± 0.60	—
12	9.32	莰烯 camphene	C ₁₀ H ₁₆	—	—	2.29 ± 0.41	—
13	10.46	7-辛烯-2-酮 7-octen-2-one	C ₈ H ₁₄ O	11.61 ± 1.54	4.51 ± 0.57	1.25 ± 0.34	0.38 ± 0.09
14	10.53	β-蒎烯 β-pinene	C ₁₀ H ₁₆	41.71 ± 2.08	3.46 ± 0.43	18.55 ± 1.64	0.33 ± 0.05
15	10.86	水芹烯 phellandrene	C ₁₀ H ₁₆	3.67 ± 0.34	7.33 ± 0.43	2.32 ± 0.40	—
16	10.99	乙酸-3-己烯酯 3-hexenyl acetate	C ₈ H ₁₄ O ₂	16.86 ± 3.37	10.70 ± 1.41	37.52 ± 3.00	17.60 ± 1.28
17	11.20	α-萜品烯 α-terpinene	C ₁₀ H ₁₆	3.25 ± 0.33	—	1.58 ± 0.59	—
18	11.42	邻伞花烃 o-cymene	C ₁₀ H ₁₄	—	9.08 ± 1.10	0.95 ± 0.06	—
19	11.53	柠檬烯 limonene	C ₁₀ H ₁₆	18.54 ± 0.85	15.49 ± 2.11	11.47 ± 1.53	—
20	11.80	反式-罗勒烯 trans-ocimene	C ₁₀ H ₁₆	15.90 ± 3.15	1.44 ± 0.42	5.18 ± 0.18	—
21	12.07	顺式-罗勒烯 cis-ocimene	C ₁₀ H ₁₆	56.96 ± 9.09	8.80 ± 0.98	26.90 ± 3.61	0.34 ± 0.05
22	12.74	顺式-氧化芳樟醇 cis-linalool oxide	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	1.55 ± 0.44	—	1.60 ± 0.22	—
23	13.43	芳樟醇 linalool	C ₁₀ H ₁₈ O	3.46 ± 0.31	6.27 ± 0.04	1.35 ± 0.47	—
24	13.48	萜品醇 terpineol	C ₁₀ H ₁₈ O	3.29 ± 0.35	1.58 ± 0.33	63.78 ± 0.75	18.82 ± 1.22
25	13.88	紫苏烯 perillen	C ₁₀ H ₁₄ O	—	1.63 ± 0.39	3.37 ± 0.49	—
26	13.96	1,3,8-薄荷三烯 1,3,8-mentatriene	C ₁₀ H ₁₄	2.59 ± 0.56	3.41 ± 0.73	1.30 ± 0.26	—
27	14.16	2-蒈烯 2-carene	C ₁₀ H ₁₆	—	—	1.54 ± 0.59	—
28	14.18	香芹醇 carveol	C ₁₀ H ₁₆ O	6.49 ± 0.34	6.20 ± 0.71	2.36 ± 0.48	5.85 ± 0.54
29	15.19	马鞭草烯醇 verbenol	C ₁₀ H ₁₆ O	—	—	0.95 ± 0.04	0.73 ± 0.03
30	15.32	环氧芳樟醇 epoxylinalool	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	—	—	1.34 ± 0.18	0.97 ± 0.03
31	15.59	3-己烯基丁酸 3-hexenyl butyrate	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	—	—	4.63 ± 0.70	—
32	16.14	癸醛 decanal	C ₁₀ H ₂₀ O	—	—	2.78 ± 0.71	—
33	17.78	香叶醇 geraniol	C ₁₀ H ₁₈ O	—	—	—	8.87 ± 0.40
34	20.49	大马酮 damascone	C ₁₃ H ₂₀ O	—	2.78 ± 0.65	—	7.60 ± 0.53
35	21.16	紫罗兰酮 ionene	C ₁₃ H ₁₈	—	1.36 ± 0.51	1.87 ± 0.61	—
36	22.41	巨豆三烯酮 megastigmatrienone	C ₁₃ H ₁₈ O	—	5.66 ± 0.38	2.65 ± 0.47	—
37	22.58	长叶烯 longifolene	C ₁₅ H ₂₄	—	3.75 ± 0.32	8.35 ± 0.46	1.88 ± 0.87
38	22.96	石竹烯 caryophyllene	C ₁₅ H ₂₄	26.57 ± 4.45	11.72 ± 1.93	15.35 ± 0.08	1.69 ± 0.83
39	23.17	α-紫罗兰酮 α-ionone	C ₁₃ H ₂₀ O	—	3.60 ± 0.22	—	—
40	23.45	二氢-紫罗兰酮 dihydro-ionone	C ₁₃ H ₂₂ O	11.85 ± 2.31	5.24 ± 0.76	2.76 ± 0.01	0.39 ± 0.08
41	24.20	癸内酯 decalactone	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	24.00 ± 4.03	8.62 ± 0.39	5.87 ± 0.74	34.13 ± 3.10
42	24.42	衣兰油烯 muurolene	C ₁₅ H ₂₄	—	2.25 ± 0.19	2.35 ± 0.41	—
43	24.64	β-紫罗兰酮 β-ionone	C ₁₃ H ₂₀ O	27.42 ± 3.48	175.75 ± 24.47	257.05 ± 28.95	44.28 ± 6.06
总峰面积				302.15	353.26	556.82	171.24

说明：“—”代表未检测到 VOCs。

峰曲线状态，并在盛花期达到顶峰。花香 VOCs 成分和释放量的变化主要取决于不同发育阶段花香成分

表2 银桂不同开花阶段鲜花 VOCs 组分测定

Table 2 The VOCs from the fresh flowers of Albus cultivar in blooming process

序号	t/min	挥发性有机化合物	分子式	峰面积 A/(×10 ⁵ ·g ⁻¹)			
				花蕾期	初花期	盛花期	衰败期
1	3.50	2-甲基环己醇 2-methyl cyclohexanol	C ₇ H ₁₄ O	0.57 ± 0.08	2.38 ± 0.36	2.43 ± 0.29	—
2	4.26	5-辛烯-1-醇 5-octen-1-ol	C ₈ H ₁₆ O	—	—	1.18 ± 0.15	—
3	4.72	芳庚 tropilidene	C ₇ H ₈	—	5.23 ± 0.27	3.74 ± 0.35	8.04 ± 0.35
4	5.36	己醛 hexanal	C ₆ H ₁₂ O	—	17.17 ± 2.29	6.59 ± 0.26	—
5	6.82	2-己烯醛 2-hexenal	C ₆ H ₁₀ O	—	—	3.67 ± 0.35	—
6	6.95	反式-3-己烯-1-醇 trans-3-hexen-1-ol	C ₆ H ₁₂ O	—	3.72 ± 0.38	4.58 ± 0.44	—
7	7.20	二甲苯 xylene	C ₈ H ₁₀	1.15 ± 0.18	2.26 ± 0.27	1.48 ± 0.08	—
8	7.78	壬烯 nonene	C ₉ H ₁₈	—	3.49 ± 0.33	2.42 ± 0.24	—
9	8.07	庚醛 heptanal	C ₇ H ₁₄ O	—	—	1.09 ± 0.07	—
10	8.45	4-庚烯-1-醇 4-hepten-1-ol	C ₇ H ₁₄ O	—	—	1.51 ± 0.20	—
11	8.92	α-蒎烯 α-pinene	C ₁₀ H ₁₆	0.13 ± 0.04	3.87 ± 0.59	1.52 ± 0.13	—
12	10.53	β-蒎烯 β-pinene	C ₁₀ H ₁₆	16.81 ± 2.57	17.72 ± 2.33	23.35 ± 3.71	3.46 ± 0.33
13	10.86	水芹烯 phellandrene	C ₁₀ H ₁₆	1.37 ± 0.09	2.26 ± 0.22	2.60 ± 0.40	—
14	10.99	乙酸-3-己烯酯 3-hexenyl acetate	C ₈ H ₁₄ O ₂	5.23 ± 0.27	17.48 ± 2.46	33.44 ± 4.40	26.33 ± 3.76
15	11.20	α-萜品烯 α-terpinene	C ₁₀ H ₁₆	1.20 ± 0.17	0.64 ± 0.06	1.26 ± 0.13	—
16	11.42	邻伞花烃 o-cymene	C ₁₀ H ₁₄	1.17 ± 0.15	0.48 ± 0.02	0.65 ± 0.05	—
17	11.53	柠檬烯 limonene	C ₁₀ H ₁₆	7.67 ± 0.39	2.49 ± 0.61	4.58 ± 0.42	8.92 ± 0.21
18	11.61	桉树脑 eucalyptol	C ₁₀ H ₁₈ O	—	6.56 ± 0.76	4.48 ± 0.67	—
19	11.80	反式罗勒烯 trans-ocimene	C ₁₀ H ₁₆	6.45 ± 0.36	1.22 ± 0.27	2.61 ± 0.33	13.47 ± 3.96
20	12.07	顺式罗勒烯 cis-ocimene	C ₁₀ H ₁₆	16.73 ± 2.50	2.69 ± 0.59	38.31 ± 1.94	5.72 ± 0.68
21	12.74	顺式氧化芳樟醇 cis-linalool oxide	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	1.65 ± 0.24	2.31 ± 0.11	23.67 ± 3.70	4.82 ± 0.67
22	13.43	芳樟醇 linalool	C ₁₀ H ₁₈ O	25.39 ± 3.59	55.14 ± 3.87	224.43 ± 33.24	8.96 ± 0.50
23	13.61	脱氢芳樟醇 hotrienol	C ₁₀ H ₁₆ O	0.77 ± 0.03	4.35 ± 0.39	4.56 ± 0.59	—
24	13.88	紫苏烯 perillene	C ₁₀ H ₁₄ O	—	—	1.69 ± 0.21	—
25	14.18	香芹醇 carveol	C ₁₀ H ₁₆ O	—	—	0.72 ± 0.06	3.47 ± 0.44
26	15.19	马鞭草烯醇 verbenol	C ₁₀ H ₁₆ O	8.43 ± 0.44	4.42 ± 0.41	27.93 ± 1.60	3.77 ± 0.19
27	15.32	环氧芳樟醇 epoxylinalol	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	—	—	3.39 ± 0.43	1.76 ± 0.18
28	16.14	癸醛 decanal	C ₁₀ H ₂₀ O	—	4.69 ± 0.69	4.48 ± 0.59	—
29	17.78	香叶醇 geraniol	C ₁₀ H ₁₈ O	—	—	—	13.14 ± 2.49
30	21.16	紫罗烯 ionene	C ₁₃ H ₂₀ O	—	1.60 ± 0.37	1.62 ± 0.23	11.04 ± 0.70
31	22.41	巨豆三烯酮 megastigmatrienone	C ₁₃ H ₁₈ O	0.56 ± 0.04	1.43 ± 0.23	—	—
32	22.58	长叶烯 longifolene	C ₁₅ H ₂₄	—	11.51 ± 1.70	8.45 ± 0.37	—
33	22.75	雪松烯 cedrene	C ₁₅ H ₂₄	—	—	0.74 ± 0.05	—
34	22.96	石竹烯 caryophyllene	C ₁₅ H ₂₄	1.38 ± 0.17	14.58 ± 1.94	58.46 ± 0.64	1.13 ± 0.01
35	23.17	α-紫罗兰酮 α-ionone	C ₁₃ H ₂₀ O	—	3.74 ± 0.31	—	51.42 ± 0.44
36	23.45	二氢-紫罗兰酮 dihydro-ionone	C ₁₃ H ₂₂ O	0.56 ± 0.05	5.25 ± 0.34	38.42 ± 2.06	0.94 ± 0.05
37	24.48	兔耳草醛 cyclamen aldehyde	C ₁₃ H ₁₈ O	0.43 ± 0.08	3.43 ± 0.36	0.56 ± 0.08	7.66 ± 0.51
38	24.64	β-紫罗兰酮 β-ionone	C ₁₃ H ₂₀ O	8.67 ± 0.89	85.82 ± 2.54	555.05 ± 21.32	6.83 ± 0.31
39	25.27	甲基紫罗兰酮 methyl ionone	C ₁₄ H ₂₂ O	—	—	4.47 ± 0.58	—
总峰面积				106.32	287.93	1 100.13	180.88

说明: “—”代表未检测到 VOCs。

相关合成酶的活性及基因表达的差异^[17]。所以, 可能是酶活性和基因表达的差异导致了桂花在开花过程中, 鲜花 VOCs 成分及含量的不同。

辣薄荷 *Mentha × piperita*, 金鱼草 *Antirrhinum majus* 中的萜类物质含量及组分随着其发育阶段的不同而发生显著的差异: 薄荷中单萜快速合成阶段主要集中在叶片发育初期, 随着叶片的生长发育, 主要

表3 丹桂不同开花阶段鲜花 VOCs 组分测定

Table 3 The VOCs from the fresh flowers of Aurantiacus cultivar in blooming process

序号	t/min	挥发性有机化合物	分子式	峰面积 A/(×10 ⁵ ·g ⁻¹)			
				花蕾期	初花期	盛花期	衰败期
1	3.38	戊醛 pentanal	C ₅ H ₁₀ O	0.24 ± 0.05	8.80 ± 0.57	2.34 ± 0.58	—
2	3.50	2-甲基环己醇 2-methyl cyclohexanol	C ₇ H ₁₄ O	—	—	6.36 ± 0.50	0.65 ± 0.05
3	4.21	羟丙酮 hydroxyacetone	C ₃ H ₆ O ₂	—	—	6.41 ± 0.48	—
4	4.72	芳庚 tropilidene	C ₇ H ₈	3.96 ± 0.23	0.49 ± 0.09	1.10 ± 0.25	9.50 ± 0.46
5	5.23	辛烯 octene	C ₈ H ₁₆	—	3.51 ± 0.63	1.54 ± 0.64	2.45 ± 0.50
6	5.36	己醛 hexanal	C ₆ H ₁₂ O	2.28 ± 0.25	18.87 ± 1.96	24.19 ± 3.61	—
7	6.35	糠醛 furfural	C ₅ H ₄ O ₂	—	7.82 ± 0.81	3.91 ± 0.54	—
8	6.82	2-己烯醛 2-hexenal	C ₆ H ₁₀ O	—	2.60 ± 0.48	5.41 ± 0.41	—
9	6.95	反式-3-己烯-1-醇 trans-3-hexen-1-ol	C ₆ H ₁₂ O	—	25.69 ± 4.03	9.43 ± 0.58	—
10	7.20	二甲苯 xylene	C ₈ H ₁₀	2.72 ± 0.52	2.84 ± 0.50	2.56 ± 0.61	5.83 ± 0.80
11	7.78	壬烯 nonene	C ₉ H ₁₈	1.14 ± 0.08	2.64 ± 0.14	4.13 ± 0.40	3.69 ± 0.42
12	8.07	庚醛 heptanal	C ₇ H ₁₄ O	—	—	2.38 ± 0.42	—
13	8.92	α-蒎烯 α-pinene	C ₁₀ H ₁₆	0.87 ± 0.05	0.77 ± 0.08	2.90 ± 0.52	4.51 ± 0.66
14	9.70	安息香醛 benzaldehyde	C ₇ H ₆ O	—	—	1.37 ± 0.02	—
15	10.19	月桂烯 myrcene	C ₁₀ H ₁₆	0.92 ± 0.06	2.84 ± 0.72	4.37 ± 0.48	2.40 ± 0.54
16	10.53	β-蒎烯 β-pinene	C ₁₀ H ₁₆	26.39 ± 3.39	6.48 ± 0.68	48.82 ± 6.96	56.91 ± 7.94
17	10.86	水芹烯 phellandrene	C ₁₀ H ₁₆	2.41 ± 0.22	1.35 ± 0.04	10.16 ± 1.53	5.44 ± 0.34
18	10.99	乙酸-3-己烯酯 3-hexenyl acetate	C ₈ H ₁₄ O ₂	2.69 ± 0.45	29.37 ± 3.80	45.93 ± 6.79	5.58 ± 0.39
19	11.20	α-萜品烯 α-terpinene	C ₁₀ H ₁₆	—	1.87 ± 0.49	6.23 ± 0.59	5.70 ± 0.29
20	11.42	邻伞花烃 o-cymene	C ₁₀ H ₁₄	—	5.41 ± 0.31	2.13 ± 0.36	5.24 ± 0.32
21	11.53	柠檬烯 limonene	C ₁₀ H ₁₆	14.03 ± 0.18	2.37 ± 0.39	27.69 ± 2.01	38.36 ± 5.18
22	11.80	反式-罗勒烯 trans-ocimene	C ₁₀ H ₁₆	5.35 ± 0.34	1.67 ± 0.46	17.14 ± 2.77	16.67 ± 2.62
23	12.07	顺式-罗勒烯 cis-ocimene	C ₁₀ H ₁₆	6.51 ± 0.15	14.68 ± 1.90	34.45 ± 4.41	21.45 ± 0.30
24	12.33	γ-萜品烯 γ-terpinene	C ₁₀ H ₁₆	—	0.87 ± 0.05	3.13 ± 0.14	—
25	12.60	葑烯 fenchene	C ₁₀ H ₁₆	—	—	1.30 ± 0.32	—
26	12.74	顺式-氧化芳樟醇 cis-linalool oxide	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	0.87 ± 0.07	21.97 ± 2.75	11.75 ± 2.06	2.55 ± 0.49
27	13.11	萜品油烯 terpinolene	C ₁₀ H ₁₆	4.19 ± 0.20	22.02 ± 2.53	23.02 ± 3.26	7.95 ± 0.36
28	13.43	芳樟醇 linalool	C ₁₀ H ₁₈ O	—	15.44 ± 3.08	46.98 ± 7.17	16.48 ± 2.56
29	13.52	壬醛 nonanal	C ₉ H ₁₈ O	0.38 ± 0.09	7.75 ± 0.35	12.25 ± 1.75	1.48 ± 0.31
30	13.96	1,3,8-薄荷三烯 1,3,8-mentatriene	C ₁₀ H ₁₄	—	0.66 ± 0.07	2.35 ± 0.13	—
31	14.18	香芹醇 carveol	C ₁₀ H ₁₆ O	1.24 ± 0.23	1.69 ± 0.34	5.36 ± 0.48	2.43 ± 0.30
32	15.17	2-癸烯醇 2-decenol	C ₁₀ H ₂₀ O	—	—	1.50 ± 0.39	—
33	15.32	环氧芳樟醇 epoxylinalol	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	—	5.37 ± 0.49	8.44 ± 0.48	—
34	15.59	3-己烯基丁酸 3-hexenyl butyrate	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	—	—	1.29 ± 0.40	—
35	15.86	水杨酸甲酯 methyl salicylate	C ₈ H ₈ O ₃	—	6.6 ± 0.89	3.48 ± 0.54	—
36	16.14	癸醛 decanal	C ₁₀ H ₂₀ O	—	—	12.28 ± 2.12	—
37	17.09	3-己烯异戊酸 3-hexenyl isovalerate	C ₁₁ H ₂₀ O ₂	—	—	1.68 ± 0.40	—
38	18.34	柠檬醛 citral	C ₁₀ H ₁₆ O	—	—	1.62 ± 0.05	—
39	21.16	紫罗烯 ionene	C ₁₃ H ₁₈	—	—	4.43 ± 0.39	—
40	22.08	绿叶烯 patchoulene	C ₁₅ H ₂₄	—	0.61 ± 0.06	1.77 ± 0.32	—
41	22.41	巨豆三烯酮 megastigmatrienone	C ₁₃ H ₁₈ O	—	—	1.26 ± 0.39	—
42	22.58	长叶烯 longifolene	C ₁₅ H ₂₄	—	3.94 ± 0.72	13.26 ± 2.06	—
43	22.75	雪松烯 cedrene	C ₁₅ H ₂₄	—	—	1.23 ± 0.31	—
44	22.96	石竹烯 caryophyllene	C ₁₅ H ₂₄	—	—	2.48 ± 0.58	—
45	23.17	α-紫罗兰酮 α-ionone	C ₁₃ H ₂₀ O	—	—	6.57 ± 0.52	—
46	23.45	二氢紫罗兰酮 dihydro-ionone	C ₁₃ H ₂₂ O	—	—	9.32 ± 0.39	—

表 3 (续)

Table 3 Comtinued

序号	t/min	挥发性有机化合物	分子式	峰面积 A/(×10 ⁵ ·g ⁻¹)			
				花蕾期	初花期	盛花期	衰败期
47	24.20	癸内酯 decalactone	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	0.41 ± 0.07	44.31 ± 5.01	12.71 ± 2.17	8.13 ± 0.36
48	24.42	衣兰油烯 muurolene	C ₁₅ H ₂₄	—	3.63 ± 0.55	4.69 ± 0.70	—
49	24.64	β-紫罗兰酮 β-ionone	C ₁₅ H ₂₀ O	—	9.56 ± 0.60	4.21 ± 0.32	—
50	25.31	杜松烯 cadinene	C ₁₅ H ₂₄	—	—	1.25 ± 0.26	—
51	25.52	去氢白菖烯 calamenene	C ₁₅ H ₂₂	—	—	1.47 ± 0.50	—
52	27.22	甲基紫罗兰烯 methyl-ionene	C ₁₄ H ₂₀ O	—	—	6.20 ± 0.51	—
总峰面积				76.61	284.52	478.18	223.40

说明: “—”代表未检测到 VOCs。

成分也不断发生变化, 依次为柠檬烯、薄荷酮^[18]; 观香烯和罗勒烯作为金鱼草花香的主要成分, 在花期的第 2~6 天快速上升直至最大值, 随后逐步减少^[19]。与上述类似, 伴随着桂花鲜花的不断发育, 菲类物质迅速增加, 盛开期含量最高且种类最多, 衰败期又有所减少, 同时醛类、酯类、醇类、烃类及芳香类物质也基本呈现出相同的变化规律。这可能是受相关生物合成酶的影响所致。菲类化合物是菲类合酶以异戊烯二磷酸为底物, 合成了半菲、单菲、倍半菲、二菲及多菲, 其中菲类合酶催化机制复杂^[3], 但菲类合酶的数量和活性决定了植物菲类化合物结构的多样性^[20]。这可能导致了桂花在开花过程中 VOCs 成分和释放量的多样化。另外, 这也有可能是受开花季节外源环境的影响所致, 如光、温度、湿度和营养平衡等都可以很大程度地影响 VOCs 的合成和释放^[21]。如在提高相对温度、湿度及光照条件下, 薄荷会释放出更多的 VOCs^[18]。5-磷酸脱氧木酮糖还原异构酶(DXR)只在光照条件下参与磷酸脱氧木酮糖(DXP)途径, 从而影响 DXP 途径的活性, 影响单菲的生物合成^[22]。随着气温的升高和紫外线的增强, 雌性欧洲杨树 *Populus tremula* 的 VOCs 释放量要高于雄性^[23]; KARBAN 等^[24]发现蒿属 *Artemisia* 植物 VOCs 作为植物彼此间沟通的一种语言, 在受到损伤后释放的 VOCs 可以通过空气传播方式增强邻近植物的诱导性防御应答。因此一个随意的机械损伤, 会长期影响菊科 *Compositae* 植物 VOCs 的释放^[25]。

3.2 4 个桂花品种在开花过程中各主要物质成分分析

植物释放的 VOCs 种类和含量决定其自身的气味, 在不同植物中 VOCs 的种类、数量、含量存在一定的比例, 因而构成了其特征香气。如侯丹等^[26]通过对桂花香气成分及释放节律的研究, 发现 3 个桂花品种中含量最高的物质成分均为芳樟醇, 其中 ‘堰虹桂’ ‘Yanhong Gui’ ‘杭州黄’ ‘Hangzhou Huang’ 中的芳樟醇相对含量从蕾期至盛开末期先增大后减小, 并在盛开期达到最大值; 而 ‘玉玲珑’ ‘Yu Linglong’ 中的芳樟醇相对含量最高峰则出现在半开期。本研究结果显示: 金桂在开花进程中 β-紫罗兰酮和菲品醇相对含量较高, 银桂开花进程中 β-紫罗兰酮和芳樟醇相对含量较高, 丹桂开花进程中是 β-蒎烯和乙酸-3-己烯酯相对含量较高, 四季桂开花进程中是菲品醇和 β-紫罗兰酮相对含量较高, 这些物质均在盛花期达到顶峰。这与前者的研究存在差异, 究其原因可能实验方法不同、苗木的生长状态及其环境因素中的温度光强差异所致, 也有可能是本研究是以自然条件下的 15~20 年生桂花为实验对象, 有别于扦插繁殖的 5~7 年生植株。林富平等^[27]通过对 4 个桂花品种盛花期 VOCs 成分分析发现, 银桂中的 α-紫罗兰酮、β-紫罗兰酮相对含量最高; 而(z)-β-罗勒烯在金桂中的相对含量最高; 四季桂中 β-紫罗兰酮含量最高, 丹桂中 β-蒎烯含量最高, 与本研究结果十分相似。金荷仙等^[28]通过实验证明了 4 个桂花品种的 VOCs 中, 普遍存在着芳樟醇、氧化芳樟醇、α-紫罗兰酮、β-紫罗兰酮、罗勒烯等成分, 但不同品种间的气体组分存在差异; LI 等^[29]对湖北咸宁 3 个桂花品种鲜花的精油进行分析, 发现其中紫罗兰酮和芳樟醇的含量较高, 这均与本实验部分研究结果类似。另外, CAI 等^[9]通过对桂花品种的香气活性物质分析, 发现香气活性物质并非都是含量较高的挥发性物质, 有些含量较低的挥发性物质也对桂花香气形成有贡献。这也都将值得我们进一步去研究探讨。

3.3 VOCs 的保健作用

VOCs 中尤其是一些具有香味的成分对人体身心健康可产生一定影响, 芳香植物的挥发物对舒缓情绪、缓解压力、消炎镇痛、提高免疫力等方面起到了积极作用, 对人体有着很好的保健作用^[30]。例如

表4 四季桂不同开花阶段鲜花 VOCs 组分测定

Table 4 The VOCs from the fresh flowers of Asiaticus cultivar in blooming process

序号	t/min	挥发性有机化合物	分子式	峰面积 A/(×10 ⁵ ·g ⁻¹)			
				花蕾期	初花期	盛花期	衰败期
1	3.50	2-甲基环己醇 2-methyl cyclohexanol	C ₇ H ₁₄ O	—	6.42 ± 0.09	5.47 ± 0.65	—
2	4.26	5-辛烯-1-醇 5-octen-1-ol	C ₈ H ₁₆ O	—	—	1.37 ± 0.51	—
3	4.72	芳庚 tropilidene	C ₇ H ₈	6.47 ± 0.16	12.21 ± 0.84	3.48 ± 0.64	4.53 ± 0.31
4	5.36	己醛 hexanal	C ₆ H ₁₂ O	3.80 ± 0.67	7.75 ± 0.78	6.69 ± 0.71	4.51 ± 0.45
5	6.35	糠醛 furfural	C ₅ H ₈ O ₂	2.49 ± 0.02	1.54 ± 0.46	5.56 ± 0.15	—
6	6.98	乙苯 ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	5.29 ± 0.28	3.64 ± 0.43	3.51 ± 0.55	—
7	7.20	二甲苯 xylylene	C ₈ H ₁₀	5.28 ± 0.20	4.73 ± 0.31	1.34 ± 0.01	—
8	7.77	环辛四烯 cyclooctatetraene	C ₈ H ₈	4.60 ± 0.38	4.82 ± 0.52	1.71 ± 0.20	—
9	8.07	庚醛 heptanal	C ₇ H ₁₄ O	1.64 ± 0.35	1.47 ± 0.34	1.33 ± 0.39	—
10	8.38	山梨醛 sorbaldehyde	C ₆ H ₈ O	—	—	2.57 ± 0.45	—
11	8.92	α-蒎烯 α-pinene	C ₁₀ H ₁₆	2.01 ± 0.01	4.58 ± 0.49	0.83 ± 0.04	—
12	9.72	间乙基甲苯 m-ethyltoluene	C ₉ H ₁₂	2.35 ± 0.05	2.53 ± 0.54	1.22 ± 0.08	—
13	10.19	月桂烯 myrcene	C ₁₀ H ₁₆	—	—	1.51 ± 0.01	—
14	10.28	苯丙烯 phenyl propylene	C ₉ H ₁₀	—	1.48 ± 0.02	1.37 ± 0.06	—
15	10.46	7-辛烯-2-酮 7-octen-2-one	C ₈ H ₁₄ O	—	2.59 ± 0.55	2.21 ± 0.27	—
16	10.53	β-蒎烯 β-pinene	C ₁₀ H ₁₆	7.22 ± 0.55	12.55 ± 2.02	147.06 ± 26.79	2.68 ± 0.29
17	10.80	辛醛 octanal	C ₈ H ₁₆ O	1.67 ± 0.25	2.32 ± 0.38	1.44 ± 0.37	—
18	10.86	水芹烯 phellandrene	C ₁₀ H ₁₆	—	2.77 ± 0.42	1.49 ± 0.19	8.12 ± 0.29
19	10.99	乙酸-3-己烯酯 3-hexenyl acetate	C ₈ H ₁₄ O ₂	5.60 ± 0.21	4.63 ± 0.51	15.05 ± 2.77	6.57 ± 0.34
20	11.20	α-萜品烯 α-terpinene	C ₁₀ H ₁₆	—	1.76 ± 0.31	18.33 ± 2.24	14.34 ± 3.30
21	11.53	柠檬烯 limonene	C ₁₀ H ₁₆	4.48 ± 0.35	4.52 ± 0.68	65.51 ± 1.76	0.91 ± 0.02
22	11.60	辛醇 ethyl hexanol	C ₈ H ₁₈ O	2.74 ± 0.65	5.64 ± 0.48	3.45 ± 0.50	6.89 ± 0.34
23	11.80	反式-罗勒烯 trans-ocimene	C ₁₀ H ₁₆	2.43 ± 0.60	7.65 ± 0.34	41.03 ± 1.43	1.48 ± 0.29
24	12.07	顺式-罗勒烯 cis-ocimene	C ₁₀ H ₁₆	3.24 ± 0.26	3.45 ± 0.32	68.08 ± 1.52	2.38 ± 0.38
25	12.33	γ-萜品烯 γ-terpinene	C ₁₀ H ₁₆	—	1.38 ± 0.34	1.29 ± 0.34	6.10 ± 0.34
26	12.74	顺式氧化芳樟醇 cis-linalool oxide	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	1.67 ± 0.23	1.39 ± 0.37	52.14 ± 2.06	1.25 ± 0.27
27	13.43	芳樟醇 linalool	C ₁₀ H ₁₈ O	1.51 ± 0.39	1.87 ± 0.42	57.10 ± 0.29	3.46 ± 0.46
28	13.48	萜品醇 terpineol	C ₁₀ H ₁₈ O	34.88 ± 5.52	35.08 ± 3.43	487.21 ± 63.73	2.69 ± 0.32
29	13.52	壬醛 nonanal	C ₉ H ₁₈ O	3.51 ± 0.69	4.93 ± 0.52	3.82 ± 0.66	—
30	13.88	紫苏烯 perillene	C ₁₀ H ₁₄ O	—	—	1.32 ± 0.31	2.53 ± 0.19
31	14.18	香芹醇 carveol	C ₁₀ H ₁₆ O	1.28 ± 0.30	—	0.41 ± 0.03	4.49 ± 0.39
32	15.32	环氧芳樟醇 epoxylinalol	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	1.14 ± 0.14	—	0.44 ± 0.05	7.18 ± 0.25
33	15.88	二氢香茅醇 dihydrocitronellol	C ₁₀ H ₂₀ O	—	—	2.50 ± 0.50	—
34	16.14	癸醛 decanal	C ₁₀ H ₂₀ O	2.33 ± 0.44	1.66 ± 0.37	2.40 ± 0.46	—
35	17.77	正丙烯酸己酯 hexyl acrylate	C ₉ H ₁₆ O ₂	—	—	3.52 ± 0.62	—
36	19.35	二氢甲基紫罗兰酮 dihydro-methylionone	C ₁₄ H ₂₄ O	1.52 ± 0.48	2.09 ± 0.06	—	—
37	21.16	紫罗烯 ionene	C ₁₃ H ₁₈	—	2.41 ± 0.45	—	—
38	22.08	绿叶烯 patchoulene	C ₁₅ H ₂₄	1.30 ± 0.00	1.72 ± 0.35	1.67 ± 0.28	—
39	22.58	长叶烯 longifolene	C ₁₅ H ₂₄	—	6.38 ± 0.41	12.06 ± 1.75	—
40	22.96	石竹烯 caryophyllene	C ₁₅ H ₂₄	—	—	1.31 ± 0.33	—
41	23.17	α-紫罗兰酮 α-ionone	C ₁₃ H ₂₀ O	8.92 ± 0.25	19.09 ± 2.00	7.30 ± 0.37	17.19 ± 1.69
42	23.45	二氢紫罗兰酮 dihydro-ionone	C ₁₃ H ₂₂ O	3.68 ± 0.34	5.61 ± 0.39	0.76 ± 0.05	13.60 ± 3.10
43	24.48	兔耳草醛 cyclamen aldehyde	C ₁₃ H ₁₈ O	1.45 ± 0.29	5.57 ± 0.19	—	9.14 ± 0.16
44	24.64	β-紫罗兰酮 β-ionone	C ₁₃ H ₂₀ O	26.22 ± 4.05	33.61 ± 3.37	163.80 ± 18.93	0.60 ± 0.02
45	25.27	甲基紫罗兰酮 methylionone	C ₁₄ H ₂₀ O	—	—	1.48 ± 0.33	—
	总峰面积			150.72	227.37	1 202.14	124.33

说明：“—”代表未检测到 VOCs。

GAO 等^[31]对油松 *Pinus tabulaeformis*, 白皮松 *P. bungeana*, 桤柏 *Sabina chinensis*, 红皮云杉 *Picea koraiensis*, 雪松 *Cedrus deodara* 所释放的柠檬烯、β-蒎烯、壬醛等物质进行分析, 发现柠檬烯、β-蒎烯等物质, 能明显抑制细菌生长。林富平等^[32]通过实验证明了桂花可以有效地降低林地空气中微生物的数量, 对改善空气质量具有显著的作用。张风娟等^[33]也发现了乙酸-3-己烯酯同样具有显著的抑菌效果。YAMADA 等^[34]研究也表明了薰衣草 *Lavandula burnatii* 释放的芳樟醇可以缓解人们紧张的情绪。另外, 霍丽妮等^[35]发现芳樟醇还能清除自由基和脂质过氧化物, 减少自由基对组织细胞的损伤, 有利于老年退行性疾病预防和治疗。而本实验显示芳樟醇、β-蒎烯、乙酸-3-己烯酯在 4 个桂花品种整个开花进程中的相对含量较高。同理可推, 金桂、银桂、丹桂及四季桂的鲜花 VOCs 在抑制微生物生长、加大空气清新感、增强人体健康方面具有重要意义。

4 参考文献

- [1] DUDAREVA N, PICHERSKY E, GERSHENZON J. Biochemistry of plant volatiles [J]. *Plant Physiol*, 2004, **135**(4): 1893 – 1902.
- [2] 王凌健, 方欣, 杨长青, 等. 植物萜类次生代谢及其调控[J]. 中国科学: 生命科学, 2013, **43**(12): 1030 – 1046.
WANG Lingjian, FANG Xin, YANG Changqing, et al. Biosynthesis and regulation of secondary terpenoid metabolism in plants [J]. *Sci Sin Vitae*, 2013, **43**(12): 1030 – 1046.
- [3] SCHILMILLER A L, SCHAUVINHOLD I, LARSON M, et al. Monoterpenes in the glandular trichomes of tomato are synthesized from a neryl diphosphate precursor rather than geranyl diphosphate [J]. *Proc Nat Acad Sci USA*, 2009, **106**(26): 10865 – 10870.
- [4] OLSSON M E, OLOFSSON L M, LINDAHL A L, et al. Localization of enzymes of artemisinin biosynthesis to the apical cells of glandular secretory trichomes of *Artemisia annua* L. [J]. *Phytochemistry*, 2009, **70**(9): 1123 – 1128.
- [5] 冯立国, 生利霞, 赵兰勇, 等. 玫瑰花发育过程中芳香成分及含量的变化[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(12): 4341 – 4351.
FENG Liguo, SHENG Lixia, ZHAO Lanyong, et al. Changes of the aroma constituents and contents in the course of *Rosa rugosa* Thunb. flower development [J]. *Sci Agric Sin*, 2008, **41**(12): 4341 – 4351.
- [6] 丁倩倩, 吴兴波, 刘芳, 等. 木兰科 4 种植物鲜花挥发物成分分析[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(4): 477 – 483.
DING Qianqian, WU Xingbo, LIU Fang, et al. Volatile organic compounds in flowers of four Magnoliaceae species [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2013, **30**(4): 477 – 483.
- [7] 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 Hortic Sin*, 2010, **37**(10): 1621 – 1628.
- [8] 李祖光, 曹慧, 朱国华, 等. 3 种桂花在不同开花期头香成分的研究[J]. 林产化学与工业, 2008, **28**(3): 75 – 80.
LI Zuguang, CAO Hui, ZHU Guohua, et al. Study on chemical constituents of fragrance released from fresh flowers of three different *Osmanthus fragrans* Lour. during different florescences [J]. *Chem Ind For Prod*, 2008, **28**(3): 75 – 80.
- [9] CAI Xuan, MAI Rongzhang, ZOU Jingjing, et al. Analysis of aroma-active compounds in three sweet osmanthus (*Osmanthus fragrans*) cultivars by GC-olfactometry and GC-MS [J]. *J Zhejiang Univ Sci B*, 2014, **15**(7): 638 – 648.
- [10] 曹慧, 李祖光, 沈德隆. 桂花品种香气成分的 GC/MS 指纹图谱研究[J]. 园艺学报, 2009, **36**(3): 391 – 398.
CAO Hui, LI Zuguang, SHEN Delong. GC/MS finger print analysis of *Osmanthus fragrans* Lour. in different varieties [J]. *Acta Hortic Sin*, 2009, **36**(3): 391 – 398.
- [11] 陈霞, 郭立春, 刘海燕, 等. 金桂释放挥发性有机物的日动态分析[J]. 江苏林业科技, 2015, **42**(3): 6 – 11.
CHEN Xia, GUO Lichun, LIU Haiyan, et al. Daily dynamic analysis of volatile organic compounds released of *Osmanthus fragrans* var. *thunbergii* [J]. *J Jiangsu For Sci Technol*, 2015, **42**(3): 6 – 11.
- [12] 王琦, 王丹, 张汝民, 等. 日本紫藤开花进程中挥发性有机化合物组分与含量的变化[J]. 浙江农林大学学报, 2014, **31**(4): 647 – 653.
WANG Qi, WANG Dan, ZHANG Rumin, et al. Changes in constituents and contents of volatile organic compounds in

- Wisteria floribunda* at three flowering stages [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2014, **31**(4): 647 – 653.
- [13] 赵印泉, 潘会堂, 张启翔, 等. 梅花花朵香气成分时空动态变化的研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, **32**(4): 201 – 206.
- ZHAO Yinquan, PAN Huitang, ZHANG Qixiang, et al. Dynamics of fragrant compounds from *Prunus mume* flowers [J]. *J Beijing For Univ*, 2010, **32**(4): 201 – 206.
- [14] 陈华君, 洪蓉, 金幼菊, 等. 近自然状态下植株挥发物的采集和热脱附-GC-MS 分析[J]. 分析测试学报, 2003, **22**(增刊): 226 – 228.
- CHEN Huajun, HONG Rong, JIN Youju, et al. Sampling and analysis of plant volatiles in natural status by TCT-GC-MS [J]. *J Instrum Anal*, 2003, **22**(supp): 226 – 228.
- [15] 高群英, 高岩, 张汝民, 等. 3 种菊科植物香气成分的热脱附气质联用分析[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(2): 326 – 332.
- GAO Qunying, GAO Yan, ZHANG Rumin, et al. Aromatic composition in three plant species using TDS-GC/MS [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2011, **28**(2): 326 – 332.
- [16] 张辉秀, 冷平生, 胡增辉, 等. ‘西伯利亚’百合花香随开花进程变化及日变化规律[J]. 园艺学报, 2013, **40**(4): 693 – 702.
- ZHANG Huixiu, LENG Pingsheng, HU Zenghui, et al. The floral scent emitted from *Lilium ‘Siberia’* at different flowering stages and diurnal variation [J]. *Acta Hortic Sin*, 2013, **40**(4): 693 – 702.
- [17] POTT M B, HIPPAUF F, SASCHENBRECHER S, et al. Biochemical and structural characterization of benzenoid carboxyl methyltransferases involved in floral scent production in *Stephanotis floribunda* and *Nicotiana suaveolens* [J]. *Plant Physiol*, 2004, **135**(4): 1946 – 1955.
- [18] GERSHENZON J, McCONKEY M E, CROTEAU R B. Regulation of monoterpene accumulation in leaves of peppermint [J]. *Plant Physiol*, 2000, **122**(1): 205 – 214.
- [19] DUDAREVA N, MARTIN D, KISH C M, et al. (E)-beta-ocimene and myrcene synthase genes of floral scent biosynthesis in snapdragon:function and expression of three terpene synthase genes of a new terpene synthase subfamily [J]. *Plant Cell*, 2003, **15**(5): 1227 – 1241.
- [20] DEGENHARDT J, KÖLLNER T G, GERSHENZON J. Monoterpene and sesquiterpene synthases and the origin of terpene skeletal diversity in plants [J]. *Phytochemistry*, 2009, **70**(15/16): 1621 – 1637.
- [21] GOUNGUENE S P, TURLINGS T C J. The effects of abiotic factors on induced volatile emissions in corn plants [J]. *Plant Physiol*, 2002, **129**(3): 1296 – 1307.
- [22] LICHTENTHALER H K. The 1-deoxy-D-xylulose-5-phosphate pathway of isoprenoid biosynthesis in plants [J]. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1999, **50**: 47 – 65.
- [23] MAJA M M , KASURINEN A, HOLOPAINEN T, et al. The effect of warming and enhanced ultraviolet radiation on gender-specific emissions of volatile organic compounds from European aspen [J]. *Sci Total Environ*, 2016, **547**: 39 – 47.
- [24] KARBAN R, WETZEL W C, SHIOJIRI K, et al. Deciphering the language of plant communication: volatile chemotypes of sagebrush [J]. *New Phytol*, 2014, **204**(2): 380 – 385.
- [25] SMITH L, BECK J J. Duration of emission of volatile organic compounds from mechanically damaged plant leaves [J]. *J Plant Physiol*, 2015, **188**: 19 – 28.
- [26] 侯丹, 付建新, 张超, 等. 桂花品种‘堰虹桂’‘玉玲珑’和‘杭州黄’的香气成分及释放节律[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(2): 208 – 220.
- HOU Dan, FU Jianxin, ZHANG Chao, et al. Flower scent composition of *Osmanthus fragrans* ‘Yanhong Gui’ ‘YuLinglong’ and ‘Hangzhou Huang’, and their emission patterns [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2015, **32**(2): 208 – 220.
- [27] 林富平, 马楠, 周帅, 等. 4 个桂花品种鲜花挥发物成分 TDS-GC-MS 分析[J]. 内蒙古农业大学学报, 2012, **33**(2): 48 – 51.
- LIN Fuping, MA Nan, ZHOU Shuai, et al. TDS-GC-MS analysis of volatile organic compounds from the fresh flowers of four *Osmanthus fragrans* varieties [J]. *J Inner Mongolia Agric Univ*, 2012, **33**(2): 48 – 51.
- [28] 金荷仙, 郑华, 金幼菊, 等. 杭州满陇桂雨公园 4 个桂花品种香气组分的研究[J]. 林业科学, 2006, **19**

- (5): 612 – 615.
- JIN Hexian, ZHENG Hua, JIN Youju, et al. Research on major volatile components of 4 *Osmanthus fragrance* cultivars in Hangzhou Manlongguiyu Park [J]. *For Res*, 2006, **19**(5): 612 – 615.
- [29] LI Fafang , HUANG Qizhi. Analysis of fragrance composition in three cultivars of *Osmanthus fragrans* Albus Group flower by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *J Wuhan Univ Nat Sci*, 2011, **16**(4): 342 – 348.
- [30] 高翔, 姚雷. 特定芳香植物组合对降压保健功能的初步研究[J]. 中国园林, 2011, **27**(4): 37 – 38.
- GAO Xiang, YAO Lei. Preliminary study on the combinations of specific aromatic plants for hypotensive healthcare [J]. *Chin Landsc Archit*, 2011, **27**(4) : 37 – 38.
- [31] GAO Yan, JIN Youju, LI Haodong, et al. Volatile organic compounds and their roles in bacteriostasis in five conifer species [J]. *J Integr Plant Biol*, 2005, **47**(4): 499 – 507.
- [32] 林富平, 周帅, 马楠, 等. 4 个桂花品种叶片挥发物成分及其对空气微生物的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(1): 15 – 21.
- LIN Fuping, ZHOU Shuai, MA Nan, et al. Volatile organic compounds in leaves of *Osmanthus fragrans* and their effect on airborne microorganisms [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2013, **30**(1): 15 – 21.
- [33] 张风娟, 李继泉, 徐兴友, 等. 皂莢和五角枫挥发性物质组成及其对空气微生物的抑制作用[J]. 园艺学报, 2007, **34**(4): 973 – 978.
- ZHANG Fengjuan, LI Jiquan, XU Xingyou, et al. The volatiles of two greening tree species and the antimicrobial activity [J]. *Acta Hortic Sin*, 2007, **34**(4): 973 – 978.
- [34] YAMADA K, MIMAKI Y, SASHIDA Y. Effects of inhaling the vapor of *Lavandula burnatii* super-derived essential oil and linalool on plasma adrenocorticotropic hormone (ACTH), catecholamine and gonadotropin levels in experimental menopausal female rats [J]. *Biol Pharm Bull*, 2005, **28**(2): 378 – 379.
- [35] 霍丽妮, 李培源, 陈睿, 等. 广西小叶红叶藤挥发油化学成分及抗氧化性研究[J]. 广西植物, 2011, **31**(5): 706 – 710.
- HUO Lini, LI Peiyuan, CHEN Rui, et al. Chemical constituents and antioxidant activity of essential oils from *Rourea microphylla* in Guangxi [J]. *Guighiaia*, 2011, **31**(5): 706 – 710.