

16个羊躑躅品种花香气挥发性成分分析

李新茹^{1,2}, 齐香玉², 李 畅², 刘晓青², 郭臻昊², 孙晓波², 杜晓华^{1,①}, 邓衍明^{1,2,①}

(1. 河南科技学院园艺园林学院, 河南 新乡 453003; 2. 江苏省农业科学院休闲农业研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 为了探究不同羊躑躅(*Rhododendron molle* (Blume) G. Don)品种间花香气挥发性成分的差异,采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(HS-SPME-GC-MS)技术对16个羊躑躅品种的花香气挥发性成分进行了检测分析,并进行了主成分分析、聚类分析和相关性分析。结果表明:在供试羊躑躅品种花香气中共鉴定出109个挥发性成分,其中20个成分的含量高于 $1.0 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,大牛儿烯D、石竹烯、 α -蒎烯、葑烯、 α -法尼烯、水杨酸甲酯、 β -蒎烯和芳樟醇是羊躑躅花香气的关键成分。不同品种间花香气的挥发性成分组成和含量存在差异,‘纸鸢’(‘Zhiyuan’)花香气的挥发性成分数量(43)和总含量($115.19 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)均最高,且其醇类、醛类、萜烯类、酯类、苯类含量基本上显著($P < 0.05$)高于其余品种。主成分分析结果显示:前3个主成分的累计方差贡献率为82.947%,第1主成分中反式芳樟醇氧化物(呋喃型)、橙花叔醇和 α -蒎烯油烯等9个成分含量的载荷绝对值较高,第2主成分中石竹烯和葑烯含量的载荷绝对值较高,第3主成分中大牛儿烯D和 α -法尼烯含量的载荷绝对值较高;‘纸鸢’的综合得分最高(7.32)。聚类结果显示:在欧氏距离13.85处,‘纸鸢’单独为一组,‘芬纳’(‘Fenna’)、‘白手鞠’(‘Baishouju’)和‘橙光’(‘Chengguang’)为一组,其余12个品种为一组。相关性分析结果显示:浓香型与白色花、中等香型与粉色花、弱香型与黄色花、无香型与橙色花均呈极显著($P < 0.01$)正相关。基于上述研究结果,羊躑躅的花色越艳丽则花香气越淡,并且,‘纸鸢’可作为羊躑躅花香气形成机制研究的优质材料。

关键词: 羊躑躅; 挥发性成分; 花香气; 花色; 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术

中图分类号: Q946.8; S685.99 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)04-0056-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.04.07

Analysis of volatile components in flower aroma of sixteen *Rhododendron molle* cultivars LI Xinru^{1,2}, QI Xiangyu², LI Chang², LIU Xiaoqing², GUO Zhenhao², SUN Xiaobo², DU Xiaohua^{1,①}, DENG Yanming^{1,2,①} (1. School of Horticulture and Landscape Architecture, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China; 2. Institute of Leisure Agriculture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(4): 56-64

Abstract: To investigate the differences in volatile components of floral aroma among different *Rhododendron molle* (Blume) G. Don cultivars, the volatile components in flower aroma of sixteen *R. molle* cultivars were analyzed by using headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) technology, followed by principal component analysis, cluster analysis, and correlation analysis. The results show that a total of 109 volatile components are identified in floral aroma of test *R. molle* cultivars, among which, the contents of 20 components are higher than $1.0 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, and germacrene D, caryophyllene, α -pinene, humulene, α -farnesene, methyl salicylate, β -pinene, and linalool are the key components in floral aroma of *R. molle*. There are differences in composition and contents of volatile components among the floral aroma of different cultivars, the number (43) and total content ($115.19 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) of volatile components in floral aroma of ‘Zhiyuan’ are both

收稿日期: 2024-12-14

基金项目: 江苏省种业振兴揭榜挂帅项目(JBGS[2021]095); 江苏省农业科学院杜鹃花林木种质资源库项目(苏财资环[2024]37号); 江苏省杜鹃花育种与产品培育长期科研基地项目(LYKJ[2021]06)

作者简介: 李新茹(1999—),女,河南周口人,硕士研究生,主要从事观赏植物遗传育种与分子生物学研究。

①通信作者 E-mail: duxiaohua0124@sina.com; nkydym@163.com

引用格式: 李新茹, 齐香玉, 李 畅, 等. 16个羊躑躅品种花香气挥发性成分分析[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(4): 56-64.

the highest, and its contents of alcohols, aldehydes, terpenoids, esters, and benzenes are basically significantly ($P < 0.05$) higher than those of the other cultivars. The principal component analysis result shows that the cumulative variance contribution rate of the first three principal components is 82.947%, the absolute loading values of contents of 9 components including *trans*-linalool oxide (furanoid), nerolidol, and α -cubebene in the first principal component are relatively high, those of contents of caryophyllene and humulene in the second principal component are relatively high, and those of contents of germacrene D and α -farnesene in the third principal component are relatively high; the composite score of 'Zhiyuan' is the highest (7.32). The cluster result shows that at the Euclidean distance of 13.85, 'Zhiyuan' forms a group alone, 'Fenna', 'Baishouju', and 'Chengguang' form a group, and the remaining 12 cultivars are a group. The correlation analysis result shows that there are extremely significant ($P < 0.01$) positive correlations between strong aroma type and white flower, medium aroma type and pink flower, weak aroma type and yellow flower, and no aroma type and orange flower. Based on the above results, the more colorful the flowers of *R. molle*, the weaker their flower aroma, and 'Zhiyuan' could serve as an excellent material for studying the mechanism of flower aroma formation of *R. molle*.

Key words: *Rhododendron molle* (Blume) G. Don; volatile component; flower aroma; flower color; headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry technology

羊躑躅 [*Rhododendron molle* (Blume) G. Don] 为杜鹃花科 (Ericaceae) 杜鹃花属 (*Rhododendron* Linn.) 落叶灌木, 因其花色金黄, 又被称为黄杜鹃^[1-2]。羊躑躅主要分布在浙江、江苏、安徽、福建等地, 具有分布广、种子和枝条萌发力强、适应性好等优点, 其树形优美、花色艳丽, 具有较高的观赏和经济价值^[3]。此外, 羊躑躅还具有祛风除湿、散瘀定痛等功效^[4]。

花香是观赏植物的重要性状之一, 也是花卉性状改良的一个主要育种目标。研究发现, 花香气由众多分子量小、沸点低且易挥发的成分组成, 能够从植物花器官中挥发出来并在空气中扩散, 令人心情愉悦, 还在吸引昆虫授粉、防御病虫害及吸引天敌昆虫等方面发挥重要作用^[5-6]。植物花香气成分复杂, 含有的挥发性成分主要为萜类、苯丙素类和脂肪酸类^[7-8]。一方面, 不同种类和品种的花挥发性成分组成及含量存在明显差异: 桂花 [*Osmanthus fragrans* (Thunb.) Lour.] 不同品种间的花瓣挥发性成分不同, 其中, '橘叶四季桂' ('Juye Sijigui') 的芳樟醇氧化物含量较高, 而 '日香桂' ('Rixiangui') 的 β -紫罗酮、 γ -癸内酯和芳樟醇含量较高^[9]; 梅花 (*Prunus mume* Siebold et Zucc.) 不同品种群间的花香气成分组成及相对含量也明显不同, 朱砂和宫粉品种群花香气中的化合物数量分别有 35 和 30 种, 高于其他品种群^[10]; 六道木 [*Zabelia biflora* (Turcz.) Makino] 品种 'Francis Mason' 的花挥发性成分多于 'Edward Goucher'^[11]; 大花黄牡丹 [*Paeonia ludlowii* (Stern et G. Taylor) J. J. Li et D. Z. Chen]、黄牡丹 (*P. lutea* Delavay ex

Franch.)、杨山牡丹 (*P. ostii* T. Hong et J. X. Zhang) 之间以及同种牡丹不同花器官部位之间的挥发性成分种类和相对含量均存在较大差异^[12]。另一方面, 花挥发性成分差异会造成花香气类型不同, 例如, 花香气成分差异可使有香基因型蜡梅 [*Chimonanthus praecox* (Linn.) Link] 具有独特的香味^[13-14]; 单萜类成分差异是浓香型牡丹 (*P. × suffruticosa* Andrews) 花香气的主要成因^[15]; *Lagerstroemia fauriei* 和 *Lagerstroemia* 'Tuscarora' 杂交种的花均具有独特香气, 这与不同杂交种花的挥发性成分差异有关^[16]。因此, 探究观赏植物的花香气成分差异对于改良其花香气类型和资源利用具有重要意义。

气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 技术被广泛应用于植物花挥发性成分分析^[17-19]。Wang 等^[20] 对马银花 [*R. ovatum* (Lindl.) Planch. ex Maxim.] 的花挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 进行了检测分析, 发现其花 VOCs 主要为萜烯类和脂肪酸类化合物。实际上, 杜鹃花属植物虽然具有鲜艳的花朵, 但仅少数种类的花具有香气, 羊躑躅就是其中一种。虽然目前已有一些关于羊躑躅代谢物的研究报告^[21-23], 但并未对羊躑躅不同品种花香气的挥发性成分进行详细分析。为了明确不同品种羊躑躅花挥发性成分差异, 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用 (HS-SPME-GC-MS) 技术对 16 个羊躑躅品种的花香气挥发性成分进行了检测分析, 并进行了主成分分析、聚类分析和相关性分析, 以期了解羊躑躅花香气的主要组成成分, 为羊躑躅乃至杜鹃花科植

物的花香气研究提供理论依据,并为羊躑躅的开发利用提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

供试的16个羊躑躅品种均来自江苏省农业科学院国家杜鹃花种质资源库(北纬32°05′、东经110°08′,海拔68 m),且均为株龄10 a的盆栽植株。供试羊躑躅品种的花均为单瓣型,各品种的花色和花香气类型及其赋值见表1。

表1 供试羊躑躅品种花的主要性状¹⁾

Table 1 Main traits of flowers of test *Rhododendron molle* (Blume) G. Don cultivars¹⁾

品种 Cultivar	花色 Flower color	花香气类型 Flower aroma type
纸鸢 Zhiyuan	白色 White (1)	浓香型 Strong aroma type (4)
烈香 Liexiang	白色 White (1)	浓香型 Strong aroma type (4)
白手鞠 Baishouju	白色 White (1)	中等香型 Medium aroma type (3)
小可爱 Xiaoke'ai	粉色 Pink (2)	中等香型 Medium aroma type (3)
彩光 Caiguang	粉色 Pink (2)	中等香型 Medium aroma type (3)
夏日玫瑰 Xiarmeigui	粉色 Pink (2)	中等香型 Medium aroma type (3)
凡尔赛 Fan'ersai	粉色 Pink (2)	中等香型 Medium aroma type (3)
粉手鞠 Fenshouju	粉色 Pink (2)	中等香型 Medium aroma type (3)
美少年 Meishaonian	黄色 Yellow (3)	弱香型 Weak aroma type (2)
满地金币 Mandijinbi	黄色 Yellow (3)	弱香型 Weak aroma type (2)
暖洋洋 Nuanyangyang	黄色 Yellow (3)	弱香型 Weak aroma type (2)
橙光 Chengguang	黄色 Yellow (3)	无香型 No aroma type (1)
芬纳 Fenna	橙红色 Orange-red (4)	无香型 No aroma type (1)
中国亮 Zhongguoliang	橙红色 Orange-red (4)	无香型 No aroma type (1)
艾玛 Aima	橙红色 Orange-red (4)	无香型 No aroma type (1)
火球 Huoqiu	橙红色 Orange-red (4)	无香型 No aroma type (1)

¹⁾ 括号中数值为赋值 The values in the parentheses are assignments.

1.2 方法

1.2.1 样品采集 在2023年3月15日至4月13日期间,于晴朗日9:00—10:00在植株由下向上的第3和第4枝条上采集枝条顶端3~4朵盛开的花。每个品种随机选取2~3株,将同一品种的花混匀。

1.2.2 挥发性成分萃取 采用顶空固相微萃取(HS-SPME)技术提取羊躑躅花香气中的挥发性成分。具体操作如下:每个品种称取2.0 g花,立即置于40 mL棕色顶空瓶中,并加入10 μ L癸酸乙酯标准品溶液[以纯度99.99%的癸酸乙酯(上海麦克林生化科技股份有限公司)为标准品,用正己烷(上海麦克林生化科技股份有限公司)配制成质量浓度0.863 mg \cdot mL⁻¹的标准品溶液^[24]];用聚四氟乙烯隔垫迅速密封瓶

口,并置于60 $^{\circ}$ C恒温水浴中保温3 min;将60 μ m DVB/CAR/PDMS萃取头(美国Supelco公司)插入顶空瓶中,置于60 $^{\circ}$ C恒温水浴中萃取1 h;拔出萃取头,插入进样口中,解吸附5 min后进行气相色谱-质谱(GC-MS)分析。每个品种设置3个生物学重复。

1.2.3 GC-MS条件 采用TSQ 8000 Evo气相色谱-质谱联用仪(美国Thermo Fisher Scientific公司)进行GC-MS分析。参照Gao等^[25]的方法设定色谱条件:色谱柱为TG-5MS弹性石英毛细管柱(30 m \times 0.25 mm, 0.25 μ m);载气为高纯氦气(纯度99.999%);载气流速为1.2 mL \cdot min⁻¹;采用不分流进样方式,进样口温度250 $^{\circ}$ C。程序升温,初始柱温35 $^{\circ}$ C,保持2 min;先以4 $^{\circ}$ C \cdot min⁻¹速率升温至180 $^{\circ}$ C,保持2 min;再以15 $^{\circ}$ C \cdot min⁻¹速率升温至280 $^{\circ}$ C,保持1 min。质谱条件:离子源为EI源,传输线温度280 $^{\circ}$ C,离子源温度300 $^{\circ}$ C,电子能量70 eV;采用全扫描采集模式,质量扫描范围45~500 amu。

1.2.4 挥发性成分鉴定和含量计算 利用仪器配套的Xcalibur软件,根据总离子流色谱图中各成分的保留时间,通过检索、比对NIST数据库对分离出的挥发性成分进行鉴定。采用内标法^[26]进行定量分析,并计算各挥发性成分的含量。

1.3 数据统计分析

参考陈慧杰等^[27]的方法,利用SPSS Statistics 25软件进行主成分分析(principal component analysis, PCA)和差异显著性分析;利用Origin 2018软件进行聚类分析和Pearson相关性分析。采用组平均法中的聚类方法,以欧氏距离为度量标准,羊躑躅花香气的主要挥发性成分含量为变量,对16个羊躑躅品种进行聚类。

2 结果和分析

2.1 不同羊躑躅品种花香气挥发性成分比较

2.1.1 不同类型挥发性成分比较 在16个羊躑躅品种花香气中共检测出109个挥发性成分。统计结果(表2)显示:这些成分包括萜类、脂肪酸类、苯丙素类和其他化合物,含量分别为1.60~78.56、0.01~4.80和0.05~31.29 μ g \cdot g⁻¹,其中,萜类包括醇类、醛类、酮类和萜烯类,脂肪酸类仅有烷烃类,苯丙素类包括酯类、苯类和酚类。醇类、萜烯类、酯类在16个品种花中均被检出;醛类在‘芬纳’(‘Fenna’)的花中未被检出,

在其余 15 个品种花中均被检出; 烷烃类在‘纸鸢’ (‘Zhiyuan’)、‘凡尔赛’ (‘Fan’ersai’) 和‘火球’ (‘Huoqiu’) 中未被检出, 在其余 13 个品种花香气中均被检出; 酮类、苯类和酚类则分别在 9、8 和 8 个品种花香气中被检出。值得注意的是, 在‘纸鸢’花香气中检测到的挥发性成分数量(43)和总含量(115.19 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)均最高, 并且, 其花香气中的醇类、醛类、萜烯类、酯类和苯类含量显著 ($P < 0.05$) 高于其他品种; 在‘凡尔赛’花香气中检测到的挥发性成分数量最少

(13)、总含量较低 ($8.93 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 在‘暖洋洋’ (‘Nuanyangyang’) 花香气中检测到的挥发性成分数量较少(26)、总含量最低 ($4.16 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。

2.1.2 主要挥发性成分比较 在 16 个羊蹄躑品种花香气的挥发性成分中, 含量高于 $1.0 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的挥发性成分有 20 个, 且不同挥发性成分含量的品种间差异较大(表 3)。水杨酸甲酯含量在‘纸鸢’中最高 ($9.04 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 在‘烈香’ (‘Liexiang’) 中次之 ($4.01 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); 大牛儿烯 D 含量在‘粉手鞠’ (‘Fenshouju’),

表 2 16 个羊蹄躑品种花香气的挥发性成分组成及含量 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Composition and contents of volatile components in flower aroma of sixteen *Rhododendron molle* (Blume) G. Don cultivars ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

品种 Cultivar	n	萜类含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) Terpenes content					合计 Total	脂肪酸类含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) Fatty acids content
		醇类 Alcohols	醛类 Aldehydes	酮类 Ketones	萜烯类 Terpenoids			
纸鸢 Zhiyuan	43	15.21±2.84a	1.79±0.36a	—	61.56±7.30a	78.56±9.37a	—	
烈香 Liexiang	41	1.40±0.20cde	0.24±0.03cdef	0.62±0.04a	29.66±2.29cd	31.92±2.51bcd	4.80±0.31a	
白手鞠 Baishouju	30	0.15±0.05e	0.50±0.03c	—	39.79±5.46b	40.44±5.48b	0.03±0.02f	
小可爱 Xiaoke'ai	27	1.09±0.10cde	0.09±0.02ef	0.01±0.00e	1.88±0.14gh	3.07±0.24f	2.18±0.19d	
彩光 Caiguang	43	2.15±0.19bcd	0.12±0.00ef	—	24.75±1.80de	27.01±1.87bcd	4.06±0.37b	
夏日玫瑰 Xiarimeigui	37	0.59±0.12cde	0.04±0.01f	—	5.85±0.96gh	6.48±1.08f	0.49±0.05f	
凡尔赛 Fan'ersai	13	0.41±0.07de	0.16±0.02ef	—	8.27±1.77gh	8.84±1.84ef	—	
粉手鞠 Fenshouju	33	0.60±0.25cde	0.37±0.12cde	0.12±0.03c	21.93±7.24de	23.02±7.45cd	1.30±0.57e	
美少年 Meishaonian	27	0.27±0.29e	0.35±0.22cde	—	11.03±7.98fg	11.65±7.52ef	0.01±0.00f	
满地金币 Mandijinbi	36	2.27±0.52bc	0.82±0.12b	—	8.05±1.92gh	11.15±2.49ef	4.48±0.34ab	
暖洋洋 Nuanyangyang	26	0.04±0.01e	0.27±0.03cdef	0.26±0.10b	1.03±0.13h	1.60±0.08f	0.10±0.02f	
橙光 Chengguang	41	1.21±0.38cde	0.16±0.03ef	0.07±0.01cde	24.75±4.46de	26.20±4.85cd	0.08±0.02f	
芬纳 Fenna	42	3.67±0.33b	—	0.12±0.00c	36.30±5.19bc	40.08±5.49b	2.96±0.44c	
中国亮 Zhongguoliang	32	0.61±0.02cde	0.22±0.00def	0.05±0.00de	2.76±0.03gh	3.64±0.01f	0.01±0.00f	
艾玛 Aima	26	0.15±0.01e	0.47±0.17cd	0.11±0.03cd	1.52±0.10h	2.25±0.23f	0.31±0.03f	
火球 Huoqiu	29	0.13±0.06e	0.03±0.02f	0.30±0.06b	17.70±2.23ef	18.16±2.29de	—	

品种 Cultivar	苯丙素类含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) Phenylpropanoids content				其他成分含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) Content of other components	总含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) Total content
	酯类 Esters	苯类 Benzenes	酚类 Phenols	合计 Total		
纸鸢 Zhiyuan	28.63±4.09a	2.67±1.01a	—	31.29±4.99a	5.33±0.98a	115.19±15.16a
烈香 Liexiang	19.27±1.32b	1.36±0.28b	0.40±0.06b	21.02±1.44c	2.59±0.23b	60.33±4.41b
白手鞠 Baishouju	7.77±0.86d	0.86±0.14b	—	8.64±1.00ef	0.11±0.08d	49.21±6.42bc
小可爱 Xiaoke'ai	9.82±0.70d	—	—	9.82±0.70ef	0.03±0.01d	15.10±1.12def
彩光 Caiguang	10.35±0.79d	0.03±0.03c	0.31±0.06bc	10.70±0.75e	0.09±0.03d	41.87±2.96c
夏日玫瑰 Xiarimeigui	7.77±0.63d	—	—	7.77±0.63ef	0.05±0.01d	14.79±1.75def
凡尔赛 Fan'ersai	0.05±0.01g	—	—	0.05±0.01j	0.04±0.01d	8.93±1.85def
粉手鞠 Fenshouju	26.78±2.91a	—	0.21±0.05cd	26.98±2.95b	0.07±0.03d	51.38±9.80bc
美少年 Meishaonian	3.25±0.33f	0.23±0.13c	0.40±0.11b	3.89±0.30ghi	—	15.55±7.77de
满地金币 Mandijinbi	4.26±0.72ef	1.25±0.25b	0.89±0.21a	6.40±1.04fgh	0.24±0.13d	22.27±3.80d
暖洋洋 Nuanyangyang	2.31±0.25fg	—	0.09±0.05de	2.40±0.28ij	0.05±0.01d	4.16±0.57f
橙光 Chengguang	15.23±2.77c	—	—	15.23±2.77d	0.08±0.03d	41.59±7.62c
芬纳 Fenna	5.01±0.04ef	1.15±0.34b	—	6.16±0.32fghi	—	49.20±6.21bc
中国亮 Zhongguoliang	3.46±0.14f	—	—	3.46±0.14hij	0.19±0.00d	7.30±0.15ef
艾玛 Aima	8.39±0.29d	—	0.17±0.04d	8.56±0.25ef	1.01±0.32c	12.12±0.42def
火球 Huoqiu	7.22±1.52d	0.08±0.06c	0.13±0.07de	7.42±1.58efg	0.33±0.13d	25.91±2.78d

¹⁾ n: 成分数量 Component number. 同列中的不同小写字母表示在品种间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between cultivars. —: 未检出 Undetected.

表3 16个羊蹄躑品种花香气的主要挥发性成分分析($\bar{x}\pm SD$)¹⁾Table 3 Analysis of main volatile components in flower aroma of sixteen *Rhododendron molle* (Blume) G. Don cultivars ($\bar{x}\pm SD$)¹⁾

挥发性成分 Volatile component	在不同品种中的含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) Content in different cultivars							
	纸鸢 Zhiyuan	烈香 Liexiang	白手鞠 Baishouju	小可爱 Xiaoke'ai	彩光 Caiguang	夏日玫瑰 Xiarimeigui	凡尔赛 Fan'ersai	粉手鞠 Fenshouju
苯甲酸乙酯 Ethyl benzoate	*	*	2.11±0.13	*	1.77±0.21	*	—	*
水杨酸甲酯 Methyl salicylate	9.04±1.89	4.01±0.29	*	—	2.93±0.27	—	—	3.13±1.01
2-羟基苯甲酸乙酯 Ethyl 2-hydroxybenzoate	*	2.56±0.06	2.32±0.10	—	*	—	—	1.81±0.85
大牛儿烯 D Germacrene D	15.77±1.87	10.25±1.08	—	8.96±0.64	3.86±0.42	7.53±0.59	—	19.14±0.83
苯甲酸己酯 Hexyl benzoate	*	*	*	*	*	—	—	—
β -蒎烯 β -pinene	8.03±0.22	—	*	—	—	—	7.80±1.73	—
α -蒎烯 α -pinene	34.10±4.51	19.74±1.21	—	*	10.95±0.32	—	*	*
石竹烯 Caryophyllene	5.36±0.77	2.74±0.37	10.44±1.64	—	2.76±0.34	—	*	—
α -萜澄茄油烯 α -cubebene	4.22±0.61	2.47±0.17	—	—	1.28±0.05	*	—	*
葎草烯 Humulene	2.57±0.42	1.55±0.22	25.97±3.45	—	4.51±0.52	—	—	3.43±1.40
α -衣兰油烯 α -muurolene	1.63±0.51	*	—	—	—	—	—	—
α -法尼烯 α -farnesene	3.30±0.37	1.51±0.19	2.49±0.28	*	1.90±0.17	3.45±0.49	*	1.52±0.38
反式- β -罗勒烯 <i>trans</i> - β -ocimene	—	—	*	—	*	*	—	1.07±0.50
芳樟醇 Linalool	11.89±2.61	—	—	*	—	—	—	—
苯甲酸异戊酯 Isoamyl benzoate	*	*	—	—	1.53±0.15	*	—	—
橙花叔醇 Nerolidol	1.56±0.19	*	—	—	—	*	—	—
(<i>Z</i>)-1,2-二甲氧基-4-丙烯基苯 (<i>Z</i>)-1,2-dimethoxy-4-propenylbenzene	2.67±1.01	1.36±0.28	—	—	—	—	—	—
丁香香酚 Eugenol	1.78±0.25	*	*	—	—	*	—	—
(1 <i>S</i>)-6,6-二甲基-2-亚甲基双环[3.1.1]庚烷 (1 <i>S</i>)-6,6-dimethyl-2-methylidenebicyclo [3.1.1] heptane	—	4.72±0.28	—	2.15±0.19	4.06±0.37	*	—	1.09±0.54
反式芳樟醇氧化物(呋喃型) <i>trans</i> -linalool oxide (furanoid)	3.78±0.74	1.79±0.15	—	—	—	—	—	—

挥发性成分 Volatile component	在不同品种中的含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) Content in different cultivars							
	美少年 Meishaonian	满地金币 Mandijinbi	暖洋洋 Nuanyangyang	橙光 Chengguang	芬纳 Fenna	中国亮 Zhongguoliang	艾玛 Aima	火球 Huoqiu
苯甲酸乙酯 Ethyl benzoate	1.46±0.25	*	—	*	—	*	*	*
水杨酸甲酯 Methyl salicylate	*	1.13±0.21	*	*	*	2.28±0.19	1.86±0.27	2.51±0.44
2-羟基苯甲酸乙酯 Ethyl 2-hydroxybenzoate	*	*	*	*	*	—	*	*
大牛儿烯 D Germacrene D	—	—	—	12.22±2.61	*	*	—	—
苯甲酸己酯 Hexyl benzoate	*	*	*	*	—	—	1.28±0.13	1.45±0.37
β -蒎烯 β -pinene	—	—	—	—	*	—	—	7.03±0.77
α -蒎烯 α -pinene	—	—	—	*	*	*	—	*
石竹烯 Caryophyllene	3.15±2.13	3.22±0.69	*	13.30±2.97	16.56±3.25	*	—	8.18±1.30
α -萜澄茄油烯 α -cubebene	—	—	—	—	—	—	—	—
葎草烯 Humulene	7.04±5.68	*	*	—	12.00±1.26	*	*	—
α -衣兰油烯 α -muurolene	—	—	—	—	*	*	—	—
α -法尼烯 α -farnesene	*	1.34±0.29	*	7.89±0.64	2.02±0.53	1.44±0.01	1.31±0.13	1.26±0.16
反式- β -罗勒烯 <i>trans</i> - β -ocimene	*	*	—	1.04±0.37	*	*	—	—
芳樟醇 Linalool	—	*	—	—	*	*	—	—
苯甲酸异戊酯 Isoamyl benzoate	—	1.61±0.36	—	—	—	—	—	—
橙花叔醇 Nerolidol	*	—	—	*	—	—	—	—
(<i>Z</i>)-1,2-二甲氧基-4-丙烯基苯 (<i>Z</i>)-1,2-dimethoxy-4-propenylbenzene	*	1.25±0.25	—	—	1.15±0.34	—	—	—
丁香香酚 Eugenol	*	—	*	—	—	—	—	—
(1 <i>S</i>)-6,6-二甲基-2-亚甲基双环[3.1.1]庚烷 (1 <i>S</i>)-6,6-dimethyl-2-methylidenebicyclo [3.1.1] heptane	*	4.30±0.36	—	—	2.57±0.43	—	—	—
反式芳樟醇氧化物(呋喃型) <i>trans</i> -linalool oxide (furanoid)	—	—	—	—	—	—	—	—

1) * : 含量低于 $0.10 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ The content is less than $0.10 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; —: 未检出 Undetected.

‘纸鸢’、‘橙光’(‘Chengguang’)、‘烈香’、‘小可爱’(‘Xiaoke'ai’)和‘夏日玫瑰’(‘Xiarimeigui’)中均较高,分别为 19.14、15.77、12.22、10.25、8.96 和 7.53 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; β -蒎烯含量在‘纸鸢’、‘凡尔赛’和‘火球’中均较高,分别为 8.03、7.80 和 7.03 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; α -蒎烯含量在‘纸鸢’、‘烈香’和‘彩光’(‘Caiguang’)中较高,分别为 34.10、19.74 和 10.95 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; 石竹烯含量在‘芬纳’、‘橙光’、‘白手鞠’(‘Baishouju’)、‘火球’和‘纸鸢’中较高,分别为 16.56、13.30、10.44、8.18 和 5.36 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; 葎草烯含量在‘白手鞠’、‘芬纳’和‘美少年’(‘Meishaonian’)中较高,分别为 25.97、12.00 和 7.04 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; 芳樟醇含量仅在‘纸鸢’中较高,为 11.89 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; 其余挥发性成分含量在各品种中均较低。此外,苯甲酸乙酯、水杨酸甲酯、2-羟基苯甲酸乙酯、苯甲酸己酯、 α -蒎烯、石竹烯、葎草烯和 α -法尼烯在 10 个及以上羊躑躅品种花挥发性成分中被检出,尤其是 α -法尼烯在供试所有品种中均被检出,并且多数挥发性成分在‘纸鸢’中含量

较高。综合分析认为,大牛儿烯 D、石竹烯、 α -蒎烯、葎草烯、 α -法尼烯、水杨酸甲酯、 β -蒎烯和芳樟醇为羊躑躅花香气的关键挥发性成分。

2.2 羊躑躅花香气挥发性成分含量的主成分分析

鉴于‘纸鸢’的花挥发性成分总含量显著 ($P < 0.05$) 高于其余品种,故以‘纸鸢’花挥发性成分中含量高于 1 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 14 个成分进行主成分分析,结果见表 4。

从表 4 可见,3 个主成分的特征值均在 1.3 以上,累计方差贡献率为 82.947%,基本可以反映羊躑躅花挥发性成分的主要信息。第 1 主成分的方差贡献率为 59.954%,其中,反式芳樟醇氧化物(呋喃型)、橙花叔醇、 α -葎烯茄油烯、 α -衣兰油烯、 α -蒎烯、芳樟醇、水杨酸甲酯、丁子香酚和(*Z*)-1,2-二甲氧基-4-丙烯基苯的载荷绝对值较高;第 2 主成分的方差贡献率为 13.249%,其中,石竹烯和葎草烯的载荷绝对值较高;第 3 主成分的方差贡献率为 9.744%,其中,大牛儿烯 D 和 α -法尼烯的载荷绝对值较高。

表 4 16 个羊躑躅品种花香气主要挥发性成分含量的主成分分析

Table 4 Principal component analysis of contents of main volatile components in flower aroma of sixteen *Rhododendron molle* (Blume) G. Don cultivars

主成分 Principal component	挥发性成分含量的载荷 Load of contents of volatile components								
	水杨酸甲酯 Methyl salicylate	大牛儿烯 D Germacrene D	β -蒎烯 β -pinene	α -蒎烯 α -pinene	石竹烯 Caryophyllene	α -葎烯茄油烯 α -cubebene	葎草烯 Humulene	α -衣兰油烯 α -muurolene	α -法尼烯 α -farnesene
1	0.906	0.545	0.487	0.946	0.106	0.949	-0.026	0.949	0.213
2	-0.114	0.005	-0.241	-0.093	0.898	-0.113	0.720	0.060	0.628
3	-0.013	0.696	-0.350	0.024	-0.096	0.080	-0.480	-0.105	0.645

主成分 Principal component	挥发性成分含量的载荷 Load of contents of volatile components					特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate	累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate
	芳樟醇 Linalool	橙花叔醇 Nerolidol	(<i>Z</i>)-1,2-二甲氧基-4-丙烯基苯 (<i>Z</i>)-1,2-dimethoxy-4-propenylbenzene	丁子香酚 Eugenol	反式芳樟醇氧化物(呋喃型) <i>trans</i> -linalool oxide (furanoid)			
1	0.923	0.972	0.844	0.897	0.985	8.394	59.954	59.954
2	-0.009	0.002	0.092	0.161	-0.070	1.855	13.249	73.203
3	-0.094	0.088	-0.156	-0.206	-0.018	1.364	9.744	82.947

根据主成分分析结果计算各羊躑躅品种的主成分得分及综合得分,结果见表 5。结果显示:16 个羊躑躅品种的综合得分以‘纸鸢’最高(7.32),‘烈香’次之(2.06),‘橙光’排第 3 位(0.30),其余品种的综合得分均为负值,以‘凡尔赛’最低(-1.25)。

2.3 羊躑躅品种的聚类分析

基于羊躑躅花香气的主要挥发性成分含量,对 16 个羊躑躅品种进行聚类分析,结果见图 1。由图 1 可见,在欧氏距离 13.85 处,供试品种被分为 3 组,其

中,‘纸鸢’单独为一组(A 组),‘白手鞠’、‘橙光’和‘芬纳’为一组(C 组),其余 12 个品种为一组(B 组)。结合花挥发性成分含量数据,A 组羊躑躅品种的花香气挥发性成分以 α -蒎烯、大牛儿烯 D、芳樟醇、水杨酸甲酯和 β -蒎烯为主;B 组多数羊躑躅品种的花香气挥发性成分以石竹烯和水杨酸甲酯为主;C 组羊躑躅品种的花香气挥发性成分以石竹烯和 α -法尼烯为主,且‘橙光’中的大牛儿烯 D 含量与‘白手鞠’和‘芬纳’中葎草烯含量也较高。

表5 基于花香气主要挥发性成分含量主成分分析结果的16个羊躑躅品种的主成分得分及综合得分

Table 5 Principal component score and composite score of sixteen *Rhododendron molle* (Blume) G. Don cultivars based on the results of principal component analysis of contents of main volatile components in flower aroma

品种 Cultivar	在各主成分(PC)中的得分 Score in each principal component (PC)			综合得分 Composite score	排名 Ranking
	PC1	PC2	PC3		
纸鸢 Zhiyuan	10.22	-0.17	-0.31	7.32	1
烈香 Liexiang	2.89	-0.58	0.54	2.06	2
白手鞠 Baishouju	-0.81	2.91	-1.76	-0.33	7
小可爱 Xiaoke'ai	-1.23	-0.93	0.58	-0.97	11
彩光 Caignang	-0.29	-0.27	0.21	-0.23	6
夏日玫瑰 Xiarimeigui	-1.07	-0.29	1.27	-0.67	8
凡尔赛 Fan'ersai	-1.18	-1.58	-1.24	-1.25	16
粉手鞠 Fenshouju	-0.40	-0.67	1.55	-0.21	5
美少年 Meishaonian	-1.37	0.00	-0.81	-1.09	13
满地金币 Mandijinbi	-0.90	-0.34	-0.39	-0.75	10
暖洋洋 Nuanyangyang	-1.47	-0.91	-0.26	-1.24	15
橙光 Chengguang	-0.60	2.50	2.90	0.30	3
芬纳 Fenna	-0.51	2.40	-1.11	-0.12	4
中国亮 Zhongguoliang	-1.19	-0.84	-0.09	-1.00	12
艾玛 Aima	-1.32	-0.89	-0.12	-1.11	14
火球 Huoqiu	-0.78	-0.34	-0.95	-0.73	9

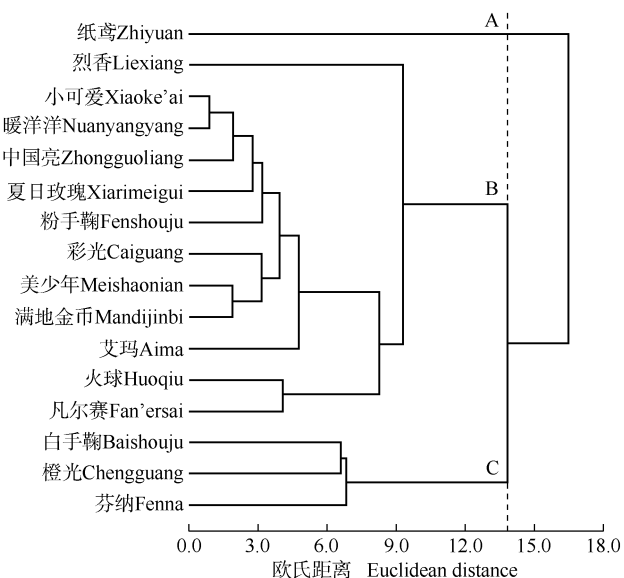


图1 基于花香气挥发性成分含量的16个羊躑躅品种的聚类结果
Fig. 1 Cluster result of sixteen *Rhododendron molle* (Blume) G. Don cultivars based on contents of volatile components in flower aroma

2.4 羊躑躅花香气中主要挥发性成分含量及花香气类型和花色的相关性分析

综合 GC-MS 鉴定结果和主成分分析结果,选择大牛儿烯 D、石竹烯、 α -蒎烯、葎草烯、 α -法尼烯、水

杨酸甲酯和芳樟醇 7 个挥发性成分,将这些挥发性成分含量及花香和花色进行相关性分析,结果见图 2。结果显示:大牛儿烯 D 与 α -蒎烯和水杨酸甲酯含量呈显著($P < 0.05$)正相关,相关系数分别为 0.50 和 0.51;石竹烯含量与葎草烯和 α -法尼烯含量呈显著正相关,相关系数均为 0.53; α -蒎烯含量与水杨酸甲酯和芳樟醇含量呈极显著($P < 0.01$)正相关,相关系数分别为 0.90 和 0.81,并与浓香型和白色花呈极显著正相关,相关系数分别为 0.92 和 0.71;水杨酸甲酯含量与芳樟醇含量和浓香型呈极显著正相关,相关系数分别为 0.81 和 0.79,并与白色花呈显著正相关,相关系数为 0.61;芳樟醇含量与浓香型和白色花分别呈极显著和显著正相关,相关系数分别为 0.67 和 0.52;葎草烯和 α -法尼烯含量之间及这 2 个挥发性成分含量与大牛儿烯 D、 α -蒎烯、水杨酸甲酯、芳樟醇含量及其与花香和花色的相关性均不显著。此外,浓香型与白色花、中等香型与粉色花、弱香型与黄色花、无香型与橙色花均呈极显著正相关,相关系数分

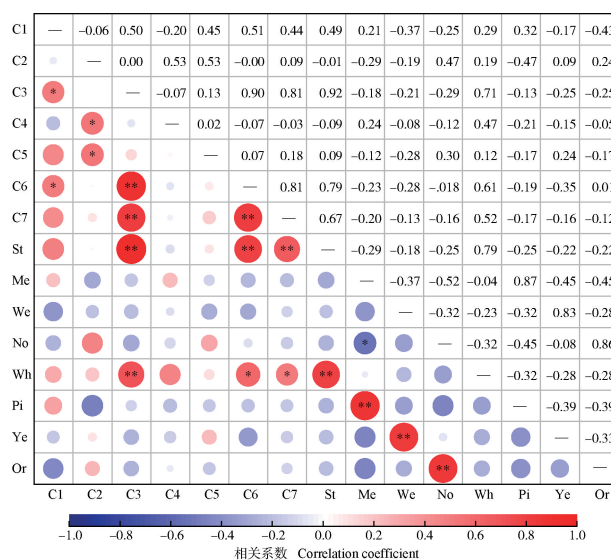


图2 16个羊躑躅品种花香气中主要挥发性成分含量及花香气类型和花色的相关性分析
Fig. 2 Correlation analysis of main volatile component contents in flower aroma, flower aroma type and flower color of sixteen *Rhododendron molle* (Blume) G. Don cultivars

C1: 大牛儿烯 D 含量 Germacrene D content; C2: 石竹烯含量 Caryophyllene content; C3: α -蒎烯含量 α -pinene content; C4: 葎草烯含量 Humulene content; C5: α -法尼烯含量 α -farnesene content; C6: 水杨酸甲酯含量 Methyl salicylate content; C7: 芳樟醇含量 Linalool content. St: 浓香型 Strong aroma type; Me: 中等香型 Medium aroma type; We: 弱香型 Weak aroma type; No: 无香型 No aroma type. Wh: 白色花 White flower; Pi: 粉色花 Pink flower; Ye: 黄色花 Yellow flower; Or: 橙红色花 Orange-red flower. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

图2 16个羊躑躅品种花香气中主要挥发性成分含量及花香气类型和花色的相关性分析
Fig. 2 Correlation analysis of main volatile component contents in flower aroma, flower aroma type and flower color of sixteen *Rhododendron molle* (Blume) G. Don cultivars

别为0.79、0.87、0.83和0.86,中等香型还与无香型呈显著负相关,相关系数为-0.52。

3 讨论和结论

花香气是多种挥发性成分共同作用的结果,挥发性成分的种类及含量决定了花香气^[28]。相关研究表明:不同亚属或种的杜鹃花属植物花的主要挥发性成分种类存在较大差异,如马银花〔*R. ovatum* (Lindl.) Planch. ex Maxim.〕开花过程中的主要挥发性成分为 α -蒎烯和 α -金合欢烯等萜烯类化合物^[29],鹿角杜鹃(*R. latoucheae* Franch.)花挥发性成分含量最高的是罗勒烯和芳樟醇^[30],而毛白杜鹃〔*R. mucronatum* (Blume) G. Don〕花的主要挥发性成分为水杨酸甲酯和苯甲酸苄酯等酯类化合物^[31]。16个羊蹄躅品种花香气挥发性成分中,萜烯类和酯类化合物数量较多,含量也较高,由此推测萜烯类和酯类化合物是羊蹄躅花香气的主要成分。不同羊蹄躅品种花香气挥发性成分的种类及含量存在较大差异,如‘纸鸢’、‘烈香’和‘彩光’的花香气挥发性成分中 α -蒎烯含量均较高,‘芬纳’、‘橙光’、‘白手鞠’、‘火球’、‘纸鸢’、‘满地金币’和‘美少年’花香气挥发性成分中石竹烯含量较高,‘粉手鞠’、‘纸鸢’、‘橙光’、‘烈香’、‘小可爱’和‘夏日玫瑰’花香气挥发性成分中大牛儿烯D含量较高。比较发现,在供试的16个羊蹄躅品种中,‘纸鸢’的花香气挥发性成分数量最多且挥发性成分的总含量最高,主要成分为水杨酸甲酯等酯类成分, α -蒎烯、大牛儿烯D、 β -蒎烯和石竹烯等萜烯类成分,以及芳樟醇等醇类成分,这些成分可能是‘纸鸢’花香气浓郁的主要原因。

某个主成分中检测指标载荷的绝对值越大,表明该指标与此主成分的关系越紧密,即该指标在此主成分中的影响越大^[32]。已有研究表明: α -蒎烯是大多数杜鹃花属植物共有的挥发性成分^[33]。主成分分析结果显示:除 α -蒎烯外,芳樟醇、水杨酸甲酯、 α -萜荜油烯、 α -衣兰油烯、橙花叔醇、反式芳樟醇氧化物(呋喃型)、葎草烯、石竹烯、 α -法尼烯等挥发性成分在前3个主成分中的载荷绝对值较高,由此推测这些挥发性成分与羊蹄躅的花香气关系密切,为羊蹄躅花香气研究中值得关注的重要成分。从各羊蹄躅品种的综合得分看,‘纸鸢’的综合得分最高,并且该品种在聚类分析中被单独分为一组,其花香气挥发性成

分以 α -蒎烯、大牛儿烯D、芳樟醇、水杨酸甲酯和 β -蒎烯为主,因此,可将该品种作为羊蹄躅花香气合成机制研究的优质品种,并推测这5种挥发性成分对‘纸鸢’花香气有重要影响。

研究表明:映山红(*R. simsii* Planch.)和马缨杜鹃(*R. delavayi* Franch.)的花虽然具有鲜艳的颜色,但却无香气^[20];马银花的花呈淡粉色且具有令人愉悦的香气^[20];而不丹杜鹃(*R. griffithianum* Wight)和喇叭杜鹃(*R. discolor* Franch.)等种类的花为白色,但一般香气较为浓郁^[34]。可见,杜鹃花属植物的花色和花香气之间可能存在一定的相关性。供试16个羊蹄躅品种花香气挥发性成分也得到了类似的观测结果,表现为具有浓郁花香气的‘纸鸢’的花为白色,且挥发性成分数量较多;而花色呈鲜艳橙红色的‘芬纳’、‘中国亮’、‘艾玛’和‘火球’等品种均无香气,且挥发性成分含量较少。相关性分析结果显示:白色花与浓香型呈极显著($P < 0.01$)正相关,粉色花与中等香型呈极显著正相关,黄色花与弱香型呈极显著正相关,橙红色花与无香型呈极显著正相关,进一步证实羊蹄躅花香气与花色之间存在相关性,即花色越艳丽,花香气越淡。综合考虑花香、花色等观赏性状,认为中等香型且花香气挥发性成分含量较高的粉色系品种‘彩光’和‘粉手鞠’以及弱香型的黄色系品种‘美少年’、‘满地金币’和‘暖洋洋’为观赏价值较高的羊蹄躅品种,具有较好的产业化开发前景。相关性分析结果还显示:中等香型与无香型呈显著($P < 0.05$)负相关,由此推测芳香性挥发成分与无香气的挥发性成分之间可能存在底物竞争关系,具体情况有待后续深入研究。

参考文献:

- [1] 程淑媛. 中国杜鹃花栽培品种资源与分类研究[D]. 赣州: 赣南师范大学, 2017: 32.
- [2] YANG G X, QIN Y, JIA Y H, et al. Transcriptomic and metabolomic data reveal key genes that are involved in the phenylpropanoid pathway and regulate the floral fragrance of *Rhododendron fortunei*[J]. BMC Plant Biology, 2023, 23: 8.
- [3] 孙晓波, 苏家乐, 刘晓青, 等. 羊蹄躅离体叶片再生体系的建立[J]. 中国农学通报, 2018, 34(10): 75-81.
- [4] 郭小红, 冯靖雯, 尤强, 等. 有毒中药闹羊花的现代研究进展[J]. 中国药业, 2020, 29(23): 96-104.
- [5] 李海燕, 李火根, 杨秀莲, 等. 植物花香物质合成与调控研究进展[J]. 分子植物育种, 2018, 16(1): 123-129.
- [6] QI X Y, WANG H D, LIU S Y, et al. The chromosome-level

- genome of double-petal phenotype jasmine provides insights into the biosynthesis of floral scent [J]. *Horticultural Plant Journal*, 2024, 10(1): 259-272.
- [7] DUDAREVA N, KLEMPIEN A, MUHLEMANN J K, et al. Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds [J]. *New Phytologist*, 2013, 198: 16-32.
- [8] 邓衍明, 齐香玉, 苏家乐. 茉莉生殖发育与分子生物学特性研究分析 [J]. *核农学报*, 2019, 33(2): 270-277.
- [9] 朱琳琳, 周婉飞, 宁璇, 等. 不同桂花品种游离态香气物质分析 [J]. *园艺学报*, 2022, 49(11): 2395-2406.
- [10] 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.
- [11] 吴垠, 胡文利, 李水根, 等. 4个六道木品种花挥发性成分分析 [J]. *植物资源与环境学报*, 2024, 33(4): 116-118.
- [12] 徐慧, 姚霞珍, 佟珂珂, 等. 3种牡丹花器官不同部位挥发性成分分析 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(3): 63-69.
- [13] 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: 9-10.
- [14] 田敬璞. 蜡梅花香生物合成途径及单萜合成酶基因功能的解析 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2019: 4-20.
- [15] ZHAO Q, GU L, LI Y Q, et al. Volatile composition and classification of *Paeonia lactiflora* flower aroma types and identification of the fragrance-related genes [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(11): 9410.
- [16] ZHOU T, NING K, HAN W, et al. Floral scent components of the hybrids between *Lagerstroemia fauriei* and *Lagerstroemia 'Tuscarora'* [J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 309: 111670.
- [17] 牛叶青, 张芳, 李柳燕, 等. 荷花不同品种花瓣中挥发性成分的研究 [J]. *植物资源与环境学报*, 2019, 28(1): 52-61.
- [18] 郭向阳. 香樟花挥发性成分分析 [J]. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(6): 69-71.
- [19] 黄蓓, 何水莲, 李田园, 等. 虾脊兰属3种植物花蕾和花朵中挥发性成分的比较 [J]. *植物资源与环境学报*, 2023, 32(5): 92-94.
- [20] WANG X Y, GAO Y, WU X P, et al. High-quality evergreen azalea genome reveals tandem duplication-facilitated low-altitude adaptability and floral scent evolution [J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2021, 19: 2544-2560.
- [21] 张午寅, 王广义. 羊蹄躅研究进展 [J]. *广东化工*, 2021, 48(11): 80-81.
- [22] 陈晓英, 胡营, 韦筱媚, 等. 羊蹄躅的代谢组学研究 [J]. *中国现代中药*, 2023, 25(7): 1535-1546.
- [23] WANG X, HU Y W, YUAN D, et al. Chemical constituents from the flower of *Rhododendron molle* G. Don [J]. *Journal of Chinese Pharmaceutical Sciences*, 2014, 23(2): 94-98.
- [24] YANG X L, YUE Y Z, LI H Y, 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.
- [25] GAO T, HOU B H, SHAO S X, et al. Differential metabolites and their transcriptional regulation in seven major tea cultivars (*Camellia sinensis*) in China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(11): 3346-3363.
- [26] 许春平, 黄家乐, 刘远上, 等. 贮存方式对烟叶常规化学成分及香味物质影响研究 [J]. *云南民族大学学报(自然科学版)*, 2024, 33(1): 41-49.
- [27] 陈慧杰, 严子楨, 齐香玉, 等. 不同绣球品种耐寒性评价及主要指标筛选 [J]. *植物资源与环境学报*, 2024, 33(2): 41-49.
- [28] 卢路路, 樊怡灵, 邓珂, 等. 不同品种和花期栀子花挥发性物质的主成分和聚类分析 [J]. *核农学报*, 2021, 35(7): 1601-1608.
- [29] 杨华, 韩素芳, 宋绪忠. 马银花开花过程挥发性成分的变化 [J]. *森林与环境学报*, 2016, 36(3): 355-359.
- [30] 杨华, 宋绪忠, 王秀云. 鹿角杜鹃开花过程中挥发性成分的变化 [J]. *浙江林业科技*, 2022, 42(1): 56-61.
- [31] 刘童斌, 潘明月, 凌雪峰, 等. 毛白杜鹃花挥发油化学成分 GC-MS 分析 [J]. *中药材*, 2013, 36(10): 1617-1619.
- [32] 褚能明, 柯剑鸿, 袁亮. 不同鲜食甜糯玉米挥发性风味物质主成分分析 [J]. *核农学报*, 2017, 31(11): 2175-2185.
- [33] 滕新蕾, 胡国伟, 邹荣娟, 等. 杜鹃花属植物花香代谢研究进展 [J]. *植物遗传资源学报*, 2024, 25(5): 727-736.
- [34] CAMERON P. Fragrance in *Rhododendron* species [J]. *Journal American Rhododendron Society*, 1993, 47(3): 128-130.

(责任编辑: 佟金凤)