

# 月季满庭芳华及其亲本花香成分的遗传分析

孟昭阳<sup>1</sup>, 寇亚平<sup>2</sup>, 葛红<sup>2</sup>, 刘冉<sup>2</sup>, 牛鹏飞<sup>2</sup>, 贾瑞冬<sup>2</sup>, 赵鑫<sup>2</sup>, 吕英民<sup>1</sup>, 杨树华<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>北京林业大学园林学院, 北京 100083; <sup>2</sup>中国农业科学院蔬菜花卉研究所/农业农村部花卉生物学与种质创制重点实验室(北方)/蔬菜生物育种全国重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 通过杂交育种进行花香特征改良是花香育种重要方式。本研究采用顶空固相微萃取和气相色谱-质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)对满庭芳华及其父母本盛开期花瓣挥发性物质进行了测定和比较分析。结果表明:满庭芳华及其父本弯刺蔷薇、母本伊丽莎白女王盛开期花瓣中分别检测到25种、36种及22种挥发性有机物,包括醇类、萜烯类、酯类、烃类、醚类、醛类、酮类和酸类8类,共计59种组分。满庭芳华与弯刺蔷薇存在10种共有成分,与伊丽莎白女王存在13种共有成分,8种特有成分,其香气成分种类与母本更为相似。满庭芳华花香成分总释放量为579.70 ng/g,低于父本(13939.42 ng/g)、母本(1157.10 ng/g),其中,萜类和苯类/苯丙素类化合物含量低于父母本,但其倍半萜类物质的种类和含量高于父母本,脂肪酸及其衍生物类总含量介于父母本之间;主成分分析及相对含量表明, $\beta$ -萜烯类油烯、 $\beta$ -杜松烯、 $\beta$ -石竹烯等为主要影响满庭芳华香气的挥发性组分。本研究可以为蔷薇属植物花香代谢遗传改良提供参考,具有重要的理论价值和实践意义。

**关键词:** 蔷薇属植物;花香;挥发性有机化合物;HS-SPME-GC-MS

## Genetic Analysis of the Fragrant Components in the Rose Variety Mantingfanghua and Its Parents

MENG Zhaoyang<sup>1</sup>, KOU Yaping<sup>2</sup>, GE Hong<sup>2</sup>, LIU Ran<sup>2</sup>, NIU Pengfei<sup>2</sup>, JIA Ruidong<sup>2</sup>, ZHAO Xin<sup>2</sup>, LYU Yingmin<sup>1</sup>, YANG Shuhua<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083; <sup>2</sup>Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Flower Crops (North China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs/State Key Laboratory of Vegetable Biobreeding, Beijing 100081)

**Abstract:** Improving the fragrance characteristics through hybridization is an important way of fragrant flower breeding. In this study, Headspace-Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry (HS-SPME-GC-MS) was employed to determine the volatile organic compounds (VOCs) in blooming petals of the rose variety Mantingfanghua and its parents. Comparison analysis of VOCs showed that 25, 36 and 22 VOCs were identified in the blooming petals of Mantingfanghua, its paternal species *Rosa beggeriana* Schrenk and maternal variety Queen Elizabeth, respectively. The totally identified 59 components can be sorted to 8 major compounds based on their chemical structures, including alcohols, terpenes, esters, hydrocarbons, ethers, aldehydes, ketones and acids. Mantingfanghua has 10 components in common with *Rosa beggeriana* Schrenk, while 13 in common with Queen Elizabeth; Mantingfanghua has the VOCs composition in higher similarity to its maternal variety. The total VOCs content in Mantingfanghua was 579.70 ng/g, which was lower than that in its paternal species (13939.42 ng/g) and its maternal variety (1157.10 ng/g). The contents of terpenoids and

收稿日期: 2023-05-17 修回日期: 2023-06-01 网络出版日期: 2023-06-20

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230517002>

第一作者研究方向为花香分子育种, E-mail: meng1084267279@163.com

通信作者: 吕英民, 研究方向为园林植物资源与育种、园林植物繁殖与栽培, E-mail: luyingmin@bjfu.edu.cn

杨树华, 研究方向为月季种质资源与遗传育种, E-mail: yangshuhua@caas.cn

基金项目: “十四五”国家重点研发计划课题(2021YFD1200205); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(IVF-BRF2021016)

Foundation projects: 14th Five-Year National Key R&D Program (2021YFD1200205); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (IVF-BRF2021016)

benzenoids/phenylpropanoids were lower in Mantingfanghua than those in its parents; in opposite, the contents of sesquiterpenoids in Mantingfanghua were higher than those in its parents. Meanwhile, the content of fatty acid derivatives in Mantingfanghua fell in between those in their parents. Principal component analysis showed that the  $\beta$ -Cubebene,  $\beta$ -Cadinene,  $\beta$ -Caryophyllene were the main VOCs that may affect the fragrance from Mantingfanghua. This study provides insights for the genetic improvement of rose floral fragrance metabolism, which has important value for both theoretical and practical purpose.

**Key words:** *Rosa* L.; fragrance; volatile organic compounds; HS-SPME-GC-MS

月季一直是花卉产业中最重要的作物之一,作为观赏植物和切花在世界各地都很受欢迎。花香作为一种重要的商品特征,不仅提高了月季的观赏价值,而且为相关行业的香料、香水和化妆品提供了必不可少的调味剂。如杂交茶香月季花瓣挥发性成分中的3,5-二甲氧基甲苯和1,3,5-三甲氧基苯形成了其特有的茶香,这两种挥发性成分对人们有着镇静和放松心情的作用,可被用作香水成分中的镇定剂<sup>[1]</sup>。杂交育种可以将双亲不同的优良性状传递给后代,花香代谢的遗传也是其中的关注点之一,已在紫薇<sup>[2-3]</sup>、香雪兰<sup>[4]</sup>、红掌<sup>[5]</sup>、滇丁香<sup>[6]</sup>、金盏花<sup>[7]</sup>、仙客来<sup>[8]</sup>、姜花<sup>[9]</sup>、水仙<sup>[10]</sup>及香石竹<sup>[11]</sup>等植物中有所报道。李钰莹等<sup>[6]</sup>对杂交滇丁香及其亲本的花香成分进行了分析,发现杂交滇丁香与母本滇丁香的花香成分更为接近。在月季中,Cherri-Martin等<sup>[12]</sup>首次对四倍体月季杂交群体花香成分分离进行了分析,发现由花香差异极大的亲本获得的杂交茶香月季后代,其花香成分的数量和质量整体上都较亲本降低,且质量的变化主要与存在的单萜的数量有关。石少川<sup>[13]</sup>对花香超亲的现代月季新品种甜蜜的梦及其父母本花香成分进行测定,发现与亲本相比,萜类物质、尤其是单萜醇及其衍生物等的合成水平显著提高,促成了甜蜜的梦优势花香的形成。目前,有关月季花香代谢的遗传规律研究较少,还有待进一步解析。

蔷薇属(*Rosa* L.)植物资源类型丰富,全属约有200个种,中国原产蔷薇属植物82种,约占全世界总数的41%,是野生蔷薇的主要分布中心之一。我国野生蔷薇适应性极强,既抗寒耐热,又抗旱耐淹,且几乎没有病虫害,是城市园林绿化和景观营造最佳植物资源<sup>[14]</sup>。现代月季品种繁多,连续开花性强,花香浓郁,观赏应用价值极高,但是其抗寒和抗病性还有待改良。因此,通过杂交育种可将我国野生资源的优良基因引入现代月季中,使育成的月季新品种既具有现代月季的观赏性,又兼备野生蔷薇的抗性。

弯刺蔷薇原产中国新疆、甘肃等地区,花径2~3 cm,白色,单瓣,淡香,综合抗逆性强,是现代月季抗性育种的优良亲本种质资源<sup>[14]</sup>。伊丽莎白女王,花大,花径8~10 cm,粉红色,重瓣卷边,淡香。中国农业科学院蔬菜花卉研究所杂交茶香月季伊丽莎白女王(*Rosa* 'Queen Elizabeth')为母本、野生蔷薇弯刺蔷薇(*Rosa beggeriana* Schrenk)为父本经远缘杂交培育出的灌丛月季新品种满庭芳华(*Rosa* 'Mantingfanghua'),是聚合了弯刺蔷薇抗寒、抗旱及抗病虫害较强能力,花粉色,重瓣,淡香等多种优良性状的庭院月季新品种,适宜用于庭院、道路、公共绿地的绿化和景观营造。但有关满庭芳华香气形成的挥发性有机化学组分分析,尚未见报道。本研究采用顶空-固相微萃取(HS-SPME)和气相色谱-质谱(GC-MS)联用技术,对同一栽培条件下的弯刺蔷薇、伊丽莎白女王和其后代满庭芳华盛花期花瓣挥发性成分进行检测,通过比较分析亲本与杂交后代之间的花香成分初步探索香气成分从亲本向后代的遗传规律,为开展蔷薇属植物的野生资源利用积累数据,为花香代谢的遗传改良提供参考,具有理论价值与实践意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

以弯刺蔷薇、伊丽莎白女王和满庭芳华为试验材料,于晴朗无风的上午7:00-9:00在中国农业科学院蔬菜花卉所南口基地采集健壮植株中部枝条盛花期花朵,每个样品3个生物学重复,用冰盒带回实验室。分别称取新鲜花瓣1.5 g置于20 mL样品瓶中,密封待测。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 HS-SPME 萃取与进样** 先将固相微萃取头置于气相色谱进样口于250 °C条件下老化2 h,向样品瓶中注射1  $\mu$ L 0.816  $\mu$ g/ $\mu$ L的2-甲基-3-庚酮(2-Methyl-3-heptanone)(标准品,购于SIGMA公司),于室温条件下静置、平衡1 h后,将萃取头插入

样品瓶上空约 1/3 处,室温条件下吸附 40 min。将固相微萃取头从样品瓶中抽出,插入气相色谱-质谱联用仪进样口中,于 250 °C 下解析 3 min。

**1.2.2 GC-MS 检测程序** 色谱条件:使用美国 Agilent 公司的 DB-WAX 毛细管色谱柱,长 30 m,内径 0.32 mm,膜厚 0.152  $\mu\text{m}$ ,载气为纯氦气(99.99%),流量 1.0 mL/min,不分流。

质谱条件:电离方式为 EI,电子能量 70 eV,电流 200  $\mu\text{A}$ ,离子源温度 230 °C,接口温度 250 °C,扫描质量范围 29 ~ 600 amu,重复 3 次。

升温条件:起始柱温 40 °C,保持 4 min,以 2 °C/min 升温至 160 °C,再以 15 °C/min 升温至 250 °C,保持 5 min。

**1.2.3 挥发性成分定性定量分析** 各挥发性物质经计算机谱库(NIST 2014 / WILEY)检索及相关文献查阅分析,结合科瓦茨保留指数(RI, retention index)对其进行定性分析。

依据总电子流各色谱峰平均峰面积,各物质的含量根据内标物质出峰的面积进行挥发有机物的定量计算:组分含量(ng/g)= 组分峰面积/内标峰面积  $\times$  内标的密度( $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ ) $\times$  内标的体积  $\times$  1000/样品重量(g)。

表 1 满庭芳华及其亲本挥发性成分及含量

Table 1 Volatile components and contents of Mantingfanghua and its parents

化合物 Compounds	官能团分类 Functional group classification	保留 指数 RI	CAS 号 CAS number	分子式 Formula	含量(ng/g)Content		
					弯刺蔷薇 <i>Rosa beggeriana</i> Schrenk	伊丽莎白女王 <i>Rosa 'Queen Elizabeth'</i>	满庭芳华 <i>Rosa 'Mantingfanghua'</i>
萜类化合物 Terpenoids							
$\beta$ -蒎烯 $\beta$ -Pinene	萜烯	1112	127-91-3	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	17.85 $\pm$ 6.74 <sup>a</sup>	—	—
trans- $\beta$ -罗勒烯 trans- $\beta$ -Ocimene	萜烯	1250	3779-61-1	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	9.96 $\pm$ 2.32 <sup>a</sup>	—	—
$\beta$ -罗勒烯 $\beta$ -Ocimene	萜烯	1250	13877-91-3	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	71.18 $\pm$ 22.77 <sup>a</sup>	—	—
玫瑰呋喃 3-Methyl-2-(2-methyl-2-butenyl)-furan	醚类	1413	15186-51-3	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}$	12.69 $\pm$ 3.63 <sup>a</sup>	—	—
紫苏烯 Perillen	萜烯	1429	539-52-6	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}$	10.14 $\pm$ 2.52 <sup>a</sup>	—	—
芳樟醇 Linalool	醇类	1547	78-70-6	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	8.72 $\pm$ 2.54 <sup>a</sup>	—	—
橙花醛 Neral	醛类	1680	106-26-3	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}$	59.49 $\pm$ 23.41 <sup>a</sup>	—	—
香茅醛 Citronellal	醛类	1478	106-23-0	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	38.47 $\pm$ 11.67 <sup>a</sup>	—	—
香叶醛 Geranial	醛类	1732	141-27-5	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}$	137.96 $\pm$ 43.80 <sup>a</sup>	—	—
香茅醇 Citronellol	醇类	1765	106-22-9	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}$	1159.32 $\pm$ 194.89 <sup>a</sup>	—	—
香叶醇 Geraniol	醇类	1847	106-24-1	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	898.80 $\pm$ 280.30 <sup>a</sup>	—	—
乙酸橙花酯 Neryl acetate	酯类	1724	141-12-8	$\text{C}_{12}\text{H}_{20}\text{O}_2$	65.16 $\pm$ 41.41 <sup>a</sup>	—	—
乙酸香茅酯 Citronellyl acetate	酯类	1660	150-84-5	$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_2$	399.12 $\pm$ 99.19 <sup>a</sup>	—	—
乙酸香叶酯 Geranyl acetate	酯类	1752	105-87-3	$\text{C}_{12}\text{H}_{20}\text{O}_2$	1814.17 $\pm$ 377.80 <sup>a</sup>	—	—

采用峰面积归一化法对各物质的含量占比进行换算,从而求得各组分的相对含量,具体算法公式如下:组分占比(%)= 组分峰面积/所有组分峰面积。

本研究的 SPME 手动进样器和 DVB/CAR/PDMS 萃取头(50/30  $\mu\text{m}$ )为美国 Supelco 公司产品;气相色谱-质谱联用仪为美国 Agilent 公司产品,为 7890B GC 系统及 5977A MSD。

### 1.3 数据处理及分析

采用 IBM SPSS Statistics 26 软件对数据进行标准误差计算和显著性差异分析,采用 Graphpad prism 9 进行主成分分析与作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 满庭芳华及其亲本挥发性成分定性分析

**2.1.1 满庭芳华及其亲本挥发性成分定性比较分析** 通过 HS-SPME-GC-MS 法从 3 种材料盛开期花瓣中共检测并鉴定 59 种花香代谢物,父本弯刺蔷薇检测到 36 种挥发性成分,母本伊丽莎白女王检测到 22 种挥发性成分,满庭芳华检测到的挥发性成分数量介于父母本之间,共 25 种,具体数据见表 1。

表1(续)

化合物 Compounds	官能团分类 Functional group classification	保留 指数 RI	CAS号 CAS number	分子式 Formula	含量(ng/g)Content		
					弯刺蔷薇 <i>Rosa beggeriana</i> Schrenk	伊丽莎白女王 <i>Rosa 'Queen Elizabeth'</i>	满庭芳华 <i>Rosa 'Mantingfanghua'</i>
$\alpha$ -萜澄茄油烯 $\alpha$ -Cubebene	萜烯	1463	17699-14-8	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	—	—	16.91 ± 6.83 <sup>a</sup>
$\alpha$ -古巴烯 $\alpha$ -Copaene	萜烯	1492	3856-25-5	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	—	—	26.46 ± 10.60 <sup>a</sup>
$\beta$ -衣兰烯 $\beta$ -Ylangene	萜烯	1589	20479-06-5	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	—	—	7.62 ± 3.77 <sup>a</sup>
$\beta$ -石竹烯 $\beta$ -Caryophyllene	萜烯	1595	87-44-5	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	—	21.61 ± 3.93 <sup>ab</sup>	37.03 ± 12.44 <sup>a</sup>
表双环倍半水芹烯 epi-Bicyclosquiphellandrene	萜烯	—	54274-73-6	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	—	—	17.03 ± 9.00 <sup>a</sup>
$\gamma$ -衣兰油烯 $\gamma$ -Muuroleone	萜烯	1692	30021-74-0	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	—	—	14.89 ± 8.50 <sup>a</sup>
$\beta$ -萜澄茄油烯 $\beta$ -Cubebene	萜烯	1545	13744-15-5	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	—	—	121.22 ± 40.48 <sup>a</sup>
$\alpha$ -衣兰油烯 $\alpha$ -Muuroleone	萜烯	—	31983-22-9	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	—	4.96 ± 2.39 <sup>a</sup>	7.79 ± 3.72 <sup>a</sup>
$\alpha$ -法呢烯 $\alpha$ -Farnesene	萜烯	1746	502-61-4	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	—	20.41 ± 3.81 <sup>a</sup>	—
$\beta$ -杜松烯 $\beta$ -Cadinenene	萜烯	1720	523-47-7	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	14.93 ± 5.44 <sup>ab</sup>	—	55.11 ± 18.49 <sup>a</sup>
茶香螺烷 Theaspirane	醚类	1526	36431-72-8	C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	—	82.96 ± 4.50 <sup>a</sup>	16.36 ± 4.36 <sup>b</sup>
二氢- $\beta$ -紫罗兰酮 Dihydro- $\beta$ -ionone	酮类	1842	17283-81-7	C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	—	214.68 ± 45.08 <sup>a</sup>	32.50 ± 17.24 <sup>b</sup>
香叶基丙酮 Geranylacetone	酮类	1841	689-67-8	C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	—	5.82 ± 2.59 <sup>a</sup>	—
脱氢二氢- $\beta$ -紫罗兰酮 Dihydrodehydro- $\beta$ -ionone	酮类	1865	20483-36-7	C <sub>13</sub> H <sub>20</sub> O	—	5.15 ± 2.21 <sup>a</sup>	—
二氢- $\beta$ -紫罗兰醇 Dihydro- $\beta$ -ionol	醇类	1951	3293-47-8	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub> O	—	36.93 ± 10.81 <sup>a</sup>	—
苯类/苯丙素类化合物 Benzenoids/phenylpropanoids							
苯乙烯 Styrene	烃类	1261	100-42-5	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	—	3.50 ± 1.49 <sup>a</sup>	—
苯甲醛 Benzaldehyde	醛类	1520	100-52-7	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	443.50 ± 100.96 <sup>a</sup>	27.15 ± 4.59 <sup>b</sup>	11.23 ± 2.73 <sup>b</sup>
4-甲氧基苯乙烯 4-Methoxystyrene	醚类	1684	637-69-4	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O	—	44.62 ± 6.28 <sup>a</sup>	32.35 ± 10.92 <sup>a</sup>
乙酸苄酯 Benzyl acetate	酯类	1720	140-11-4	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	667.77 ± 139.76 <sup>a</sup>	14.71 ± 3.96 <sup>b</sup>	5.07 ± 1.33 <sup>b</sup>
乙酸苯乙酯 Acetic acid, 2-phenylethyl ester	酯类	1813	103-45-7	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	1049.63 ± 289.30 <sup>a</sup>	24.47 ± 6.06 <sup>b</sup>	42.93 ± 17.39 <sup>b</sup>
3,5-二甲氧基甲苯 3,5-Dimethoxytoluene	醚类	1851	4179-19-5	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	—	564.78 ± 73.80 <sup>a</sup>	31.27 ± 7.88 <sup>b</sup>
苯甲醇 Benzyl alcohol	醇类	1870	100-51-6	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	3707.21 ± 754.38 <sup>a</sup>	—	15.71 ± 1.19 <sup>b</sup>
苯乙醇 Phenylethyl alcohol	醇类	1906	60-12-8	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	2261.45 ± 560.06 <sup>a</sup>	40.56 ± 16.41 <sup>b</sup>	36.47 ± 0.45 <sup>b</sup>
甲基丁香酚 Methyl eugenol	酚类	2013	93-15-2	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	9.02 ± 2.47 <sup>a</sup>	—	—
丁香酚 Eugenol	酚类	2169	97-53-0	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	16.69 ± 5.95 <sup>a</sup>	—	—
脂肪酸衍生物 Fatty acid derivatives							
乙酸 Acetic acid	酸类	1449	64-19-7	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	13.43 ± 1.65 <sup>a</sup>	7.00 ± 0.94 <sup>b</sup>	2.94 ± 0.57 <sup>b</sup>
3-甲基-2-丁烯-1-醇 Prenol	醇类	1320	556-82-1	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	181.12 ± 19.31 <sup>a</sup>	—	—
3-甲基-3-丁烯-1-醇 Isoprenol	醇类	1248	763-32-6	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	81.14 ± 16.78 <sup>a</sup>	—	—
2-己醇 2-Hexanol	醇类	1220	626-93-7	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	—	—	1.59 ± 0.24 <sup>a</sup>
叶醇(Z)-3-Hexen-1-ol	醇类	1382	928-96-1	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	5.85 ± 2.87 <sup>a</sup>	—	—
正己醇 1-Hexanol	醇类	1355	111-27-3	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	10.31 ± 1.94 <sup>a</sup>	—	—
乙酸戊酯 Pentyl acetate	酯类	1176	628-63-7	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	49.64 ± 11.55 <sup>a</sup>	—	—
梨醇酯 Prenyl acetate	酯类	1249	1191-16-8	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	324.64 ± 52.96 <sup>a</sup>	—	—



表 1 (续)

化合物 Compounds	官能团分类 Functional group classification	保留 指数 RI	CAS号 CAS number	分子式 Formula	含量(ng/g)Content		
					弯刺蔷薇 <i>Rosa beggeriana</i> Schrenk	伊丽莎白女王 <i>Rosa 'Queen Elizabeth'</i>	满庭芳华 <i>Rosa 'Mantingfanghua'</i>
乙酸己酯 Hexyl acetate	酯类	1272	142-92-7	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	99.91 ± 21.75 <sup>a</sup>	—	5.70 ± 1.29 <sup>b</sup>
4-己烯-1-醇乙酸酯 4-Hexenyl acetate	酯类	1326	72237-36-6	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	202.41 ± 15.69 <sup>a</sup>	—	6.69 ± 0.98 <sup>b</sup>
乙酸顺式-2-己烯酯(Z)-2-Hexenyl acetate	酯类	1319	56922-75-9	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	69.35 ± 9.80 <sup>a</sup>	—	—
甲基庚烯酮 Methylheptenone	酮类	1338	110-93-0	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	—	8.19 ± 1.99 <sup>a</sup>	7.94 ± 0.29 <sup>a</sup>
异丁偶姻 Isobutyroin	酮类	—	815-77-0	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	—	4.32 ± 1.37 <sup>a</sup>	—
乙酸庚酯 Acetic acid, heptyl ester	酯类	1377	112-06-1	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	6.07 ± 2.81 <sup>a</sup>	—	—
十一烷 Undecane	烃类	1100	1120-21-4	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	3.50 ± 1.25 <sup>a</sup>	1.26 ± 0.38 <sup>a</sup>	1.50 ± 0.20 <sup>a</sup>
十五烷 Pentadecane	烃类	1500	629-62-9	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	10.35 ± 0.78 <sup>a</sup>	3.43 ± 2.00 <sup>b</sup>	—
(2E)-2-十六碳烯-1-醇(2E)-2-Hexadecen-1-ol	醇类	2574	26993-32-8	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O	—	4.43 ± 1.44 <sup>a</sup>	—
十七烷 Heptadecane	烃类	1700	629-78-7	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	8.47 ± 0.72 <sup>a</sup>	—	—
十九烷 Nonadecane	烃类	1900	629-92-5	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	—	—	25.38 ± 15.66 <sup>a</sup>
9-十九碳烯 9-Nonadecene	烃类	1880	31035-07-1	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>	—	16.15 ± 2.21 <sup>a</sup>	—

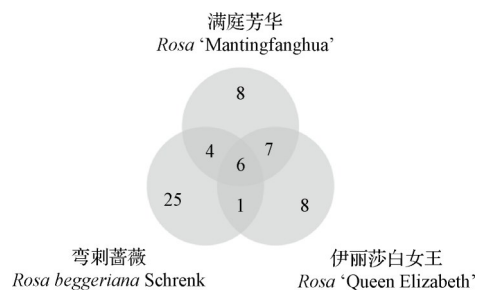
—代表该成分未检测到或谱库未查询到;小写字母表示显著性差异水平( $P < 0.05$ );CAS:化学文摘社,下同

— means that the component has not been detected or the library has not been queried; Lowercase letters represent the level of significant difference ( $P < 0.05$ ); CAS: Chemical Abstracts Service, the same as below

检测到的 59 种挥发性有机化合物 (VOCs, volatile organic compounds) 根据官能团主要分为 9 大类,包括醇类、萜烯类、酯类、烃类、醚类、酚类、醛类、酮类和酸类。父本弯刺蔷薇挥发性物质主要为酯类和醇类,共 20 种,其次是萜烯类、酮类、烃类和酚类,醚类和酸类物质仅 1 种,不含醛类物质。母本伊丽莎白女王挥发性物质中酮类物质数量最多,共 5 种,其次是烃类、醇类、萜烯类、醚类和酯类,醛类和酸类物质仅 1 种,不含酚类物质。满庭芳华挥发性物质中萜烯类物质最多,共 9 种,其次是酯类、醇类、醚类、烃类和酮类,醛类和酸类物质仅 1 种,不含酚类物质。与父本弯刺蔷薇相比,满庭芳华挥发性物质增加了 7 种,含萜烯类 4 种、醛类 1 种以及醚类 2 种;减少了 18 种,含醇类 6 种、烃类 1 种、酯类 7 种、酮类 2 种以及酚类 2 种。与母本伊丽莎白女王相比,满庭芳华挥发性物质增加了 8 种,含萜烯类 6 种和酯类 2 种;减少了 5 种,含烃类 2 种和酮类 3 种。

将父本弯刺蔷薇、母本伊丽莎白女王及满庭芳华中检测到的所有 VOCs 组分进行比较(图 1)。发现满庭芳华检测到的 25 种 VOCs 中,同父本弯刺蔷薇存在 10 种共有成分,包括  $\beta$ -杜松烯、苯甲醛、乙酸苜酯、乙酸苯乙酯、苯甲醇、苯乙醇、十一烷、乙酸己酯、4-己烯-1-醇乙酸酯和乙酸,占父本检测到所有

成分的 27.78%;同母本伊丽莎白女王存在 13 种共有成分,包括茶香螺烷、 $\beta$ -石竹烯、 $\alpha$ -衣兰油烯、二氢- $\beta$ -紫罗兰酮、苯甲醛、4-甲氧基苯乙烯、乙酸苜酯、乙酸苯乙酯、3,5-二甲氧基甲苯、苯乙醇、十一烷、甲基庚烯酮和乙酸,占母本检测到所有成分的 59.09%;此外自身含有 8 种特有成分,包括  $\alpha$ -萜澄茄油烯、 $\alpha$ -古巴烯、 $\beta$ -衣兰烯、表双环倍半水芹烯、 $\gamma$ -衣兰油烯、 $\beta$ -萜澄茄油烯、2-己醇和十九烷,占比 32%。



重叠区域的数字表示 3 份材料共有 VOCs 的数量,其他数字表示每种材料特有 VOCs 的数量,下同  
The number in the overlapping area represents the number of VOCs shared by various three materials, and the other numbers in each circle represents the number of VOCs unique to each material, the same as below

图 1 满庭芳华及其亲本 VOCs 韦恩图分析

Fig.1 Ven analysis of VOCs of Mantingfanghua and its parents

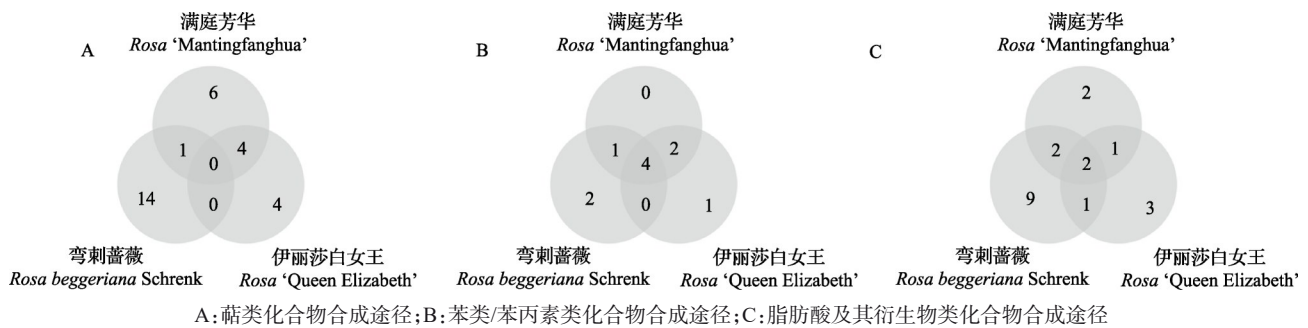
**2.1.2 满庭芳华及其亲本挥发性成分合成途径比较分析** 根据植物挥发性有机化合物生物合成途径,可将检测到的所有VOCs分为萜类化合物、苯类/苯丙素类化合物、脂肪酸及其衍生物3大类<sup>[15]</sup>。

在萜类化合物合成途径上,3种材料的VOCs种类均最多,满庭芳华的VOCs种类介于父母本之间。父母本共释放了23种挥发性成分,同满庭芳华仅存在5种共有成分,占比仅21.74%。其中,满庭芳华与父本弯刺蔷薇存在1种共有成分,为倍半萜 $\beta$ -杜松烯;与母本伊丽莎白女王存在4种共有成分,包括2种倍半萜类物质, $\beta$ -石竹烯和 $\alpha$ -衣兰油烯,以及2种不规则萜类物质,茶香螺烷和二氢- $\beta$ -紫罗兰酮;此外满庭芳华还存在6种特有成分,为 $\alpha$ -葑澄茄油烯、 $\alpha$ -古巴烯、 $\beta$ -衣兰烯、表双环倍半水芹烯、 $\gamma$ -衣兰油烯以及 $\beta$ -葑澄茄油烯,均属于倍半萜类(图2A)。

在苯类/苯丙素类合成途径上,3种材料VOCs种

类相同。父母本共释放了10种挥发性成分,同满庭芳华存在7种共有成分,占比高达70%。其中,满庭芳华与父本弯刺蔷薇存在5种共有成分,为苯甲醛、乙酸苄酯、乙酸苯乙酯、苯甲醇以及苯乙醇;与母本伊丽莎白女王存在6种共有成分,为苯甲醛、4-甲氧基苯乙烯、乙酸苄酯、乙酸苯乙酯、3,5-二甲氧基甲苯以及苯乙醇;此外满庭芳华未检测到特有成分(图2B)。

在脂肪酸衍生物合成途径上,满庭芳华的挥发性物质数量与母本相同,为父本数量的一半。父母本共释放了18种挥发性成分,与满庭芳华仅存在5种共有成分,占比仅27.78%。其中,满庭芳华与父本弯刺蔷薇存在4种共有成分,为十一烷、乙酸己酯、4-己烯-1-醇乙酸酯以及乙酸;与母本伊丽莎白女王存在3种共有成分,为十一烷、甲基庚烯酮以及乙酸;此外满庭芳华存在2-己醇和十九烷两种特有成分(图2C)。



A: Terpenoids synthesis pathway; B: Benzenoids/phenylpropanoids synthesis pathway; C: Fatty acid derivatives synthesis pathway

图2 3种合成途径上满庭芳华及其亲本VOCs韦恩图分析

Fig.2 Ven analysis of VOCs of Mantingfanghua and its parents in three synthesis pathways

## 2.2 满庭芳华及其亲本挥发性成分定量分析

**2.2.1 满庭芳华及其亲本挥发性成分定量比较分析** 父本弯刺蔷薇花香挥发性成分总释放量为13939.42 ng/g,母本伊丽莎白女王花香挥发性成分总释放量为1157.10 ng/g,满庭芳华花香挥发性成分总释放量为579.70 ng/g(图3)。

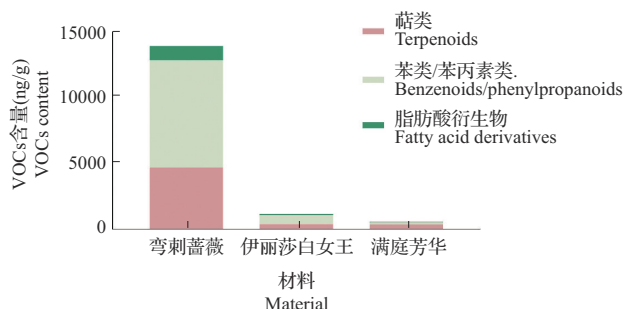


图3 满庭芳华及其亲本在3种合成途径上VOCs含量  
Fig.3 VOCs content of Mantingfanghua and its parents in three synthesis pathways

弯刺蔷薇在苯类/苯丙素类化合物合成途径上的花香成分释放量最高,合计为8155.27 ng/g,其次是萜类化合物合成途径,为4717.95 ng/g,在脂肪酸及其衍生物类合成途径上的花香成分释放量最低,仅1066.20 ng/g。其在萜类化合物合成途径上的主要物质均为单萜类,乙酸香叶酯是含量最多的物质,占比13.01%,此外还包括香茅醇、香叶醇及乙酸香茅酯,占比都达到2.8%以上;苯类/苯丙素类化合物合成途径上的苯甲醇是含量最多的物质,占比26.60%,主要物质还包括苯乙醇、乙酸苯乙酯、乙酸苄酯及苯甲醛,占比都达到3%以上;脂肪酸及其衍生物类合成途径上的梨醇酯是含量最多的物质,占比仅2.33%,该途径其他物质各占比不到1.5%(图4、表1)。

伊丽莎白女王在3种合成途径上的挥发性成分含量显著低于弯刺蔷薇。在苯类/苯丙素类化合物合成途径上的花香成分释放量最高,为719.78 ng/g,

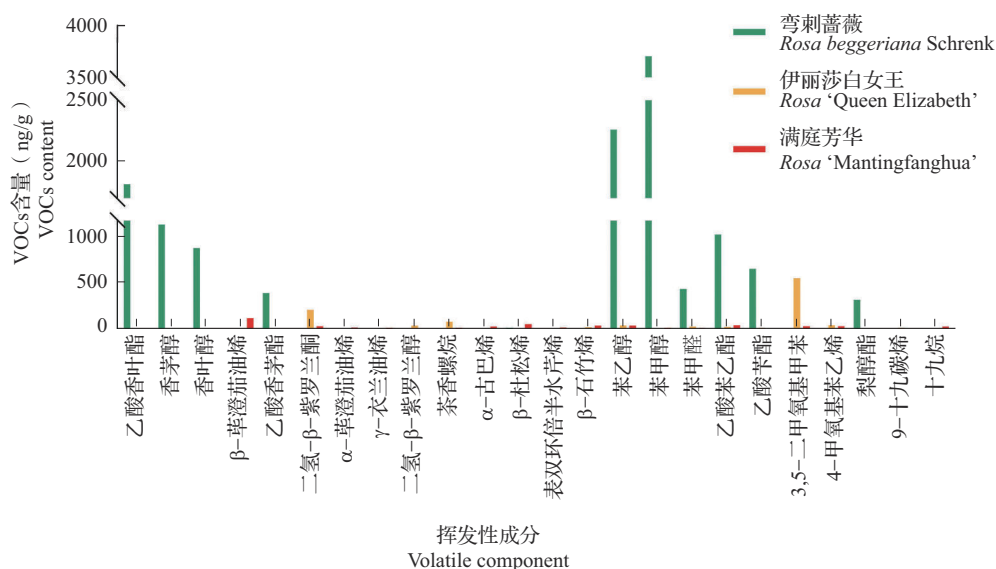


图4 满庭芳华及其亲本主要VOCs含量

Fig.4 Main VOCs content of Mantingfanghua and its parents

其次是萜类化合物合成途径,为392.52 ng/g,在脂肪酸及其衍生物类合成途径上的花香成分释放量最低,仅44.80 ng/g。此外,其在3类化合物合成途径上的主要物质与弯刺蔷薇明显不同;萜类化合物合成途径上的主要物质均为不规则萜类,二氢-β-紫罗兰酮是含量最多的物质,占比18.55%,此外还包括茶香螺烷及二氢-β-紫罗兰醇,占比都达到3.1%以上;苯类/苯丙素类化合物合成途径上的3,5-二甲氧基甲苯是含量最多的物质,占比高达48.81%,主要物质还包括4-甲氧基苯乙烯、苯乙醇、苯甲醛及乙酸苯乙酯,占比都达到2.1%以上;脂肪酸及其衍生物类合成途径上的9-十九碳烯是含量最多的物质,占比仅1.40%,该途径其他物质各占比不到0.8%(图4、表1)。

与父母本不同,满庭芳华在萜类化合物合成途径上的花香成分释放量最高,为352.93 ng/g,之后依次是苯类/苯丙素类化合物合成途径和脂肪酸及其衍生物类合成途径,分别为175.02 ng/g和51.75 ng/g。满庭芳华检测到的VOCs各组分含量不高,单一成分占比不超过21%;萜类化合物合成途径上的主要物质包括倍半萜类和不规则萜类,倍半萜β-萜澄茄油烯是含量最多的物质,占比20.91%,还包括β-杜松烯、β-石竹烯、二氢-β-紫罗兰酮、α-古巴烯、表双环倍半水芹烯、α-萜澄茄油烯、茶香螺烷及γ-衣兰油烯,占比都达到2.5%以上;苯类/苯丙素类化合物合成途径上的乙酸苯乙酯是含量最多的物质,占比7.41%,主要物质还包括苯乙醇、4-甲氧基苯乙烯、3,5-二甲氧基甲苯及苯甲醇,占比都达到2.7%以

上;脂肪酸及其衍生物类合成途径上的十九烷是含量最多的物质,占比4.38%,该途径其他物质各占比不到1.4%(图4、表1)。

**2.2.2 满庭芳华及其亲本挥发性成分合成途径比较分析** 在萜类化合物合成途径上,满庭芳华同父母本5种共有成分中,作为母本主要挥发性物质的二氢-β-紫罗兰酮及茶香螺烷两种不规则萜含量均低于母本,此外共有成分中β-石竹烯、α-衣兰油烯及β-杜松烯3种倍半萜含量高于父母本(图4、表1)。

在苯类/苯丙素类合成途径上,满庭芳华同父母本7种共有成分均包含在父母本主要挥发性物质之中,共有乙酸苯乙酯含量介于父母本之间,苯甲醛、乙酸苜酯及苯乙醇含量低于父母本,苯甲醇含量低于父本,4-甲氧基苯乙烯及3,5-二甲氧基甲苯含量低于母本(图4、表1)。

在脂肪酸衍生物合成途径上,满庭芳华同父母本5种共有成分中不包括父母本的主要挥发性物质,其中十一烷含量介于父母本之间,乙酸含量低于父母本,乙酸己酯及4-己烯-1-醇乙酸酯含量低于父本,甲基庚烯酮含量低于母本(图4、表1)。

综上所述,满庭芳华花香成分总释放量低于父母本,其中萜类化合物和苯类/苯丙素类化合物总释放量低于父母本,脂肪酸衍生物总释放量介于父母本之间(图3)。

### 2.3 满庭芳华及其亲本挥发性成分主成分分析

本研究对满庭芳华及其亲本中检测到的所有VOCs进行了主成分(PCA)分析,结果显示:PC1和PC2两个主成分,累计贡献率达到100%(PC1=



73.78%, PC2=26.22%), 可准确描述 59 种 VOCs 对满庭芳华及其亲本香气的影响(图 5)。位于不同象限的满庭芳华、弯刺蔷薇、伊丽莎白女王彼此相距较远, 表明三者的花香成分存在显著差异。此外, 弯刺蔷薇香气主要影响物质为苯甲醇、乙酸香叶酯等, 伊丽莎白女王香气主要影响物质为二氢- $\beta$ -紫罗兰酮、茶香螺烷、3,5-二甲氧基甲苯等, 满庭芳华香气主要影响物质为 $\beta$ -萜澄茄油烯、 $\beta$ -杜松烯、 $\beta$ -石竹烯等, 与表 1 中相对含量呈现结果一致。

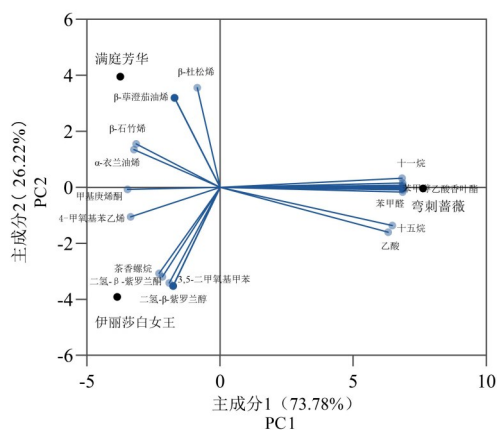


图 5 满庭芳华及其亲本 VOCs 主成分分析 (PCA) 双标图  
Fig.5 PCA biplot of VOCs in Mantingfanghua and its parents

## 2.4 满庭芳华及其亲本主要挥发性成分香型特征分析

花瓣中主要挥发性成分决定花朵香气特征和类型, 苯甲醇具有甜香、花香和果香气味, 是野生资源的主要香气成分<sup>[16]</sup>; 香叶醇、香茅醇、乙酸香叶酯、苯乙醇和乙酸苯乙酯具有典型的玫瑰香以及花香和甜香气味, 3,5-二甲氧基甲苯是茶香月季中构成茶香味的关键性成分; 二氢- $\beta$ -紫罗兰酮和茶香螺烷具有木香和茶香气味;  $\beta$ -萜澄茄油烯具有果香气味;  $\beta$ -杜松烯具有木香气味;  $\beta$ -石竹烯具有木香和甜香气味(表 2)。本研究分析表明, 父本弯刺蔷薇作为野生蔷薇, 主要香气成分中相对含量最高的物质为苯甲醇, 其次为苯乙醇、乙酸香叶酯、香茅醇、乙酸苯乙酯、香叶醇等物质, 共同形成略带甜香的玫瑰香和果香。母本伊丽莎白女王作为杂交茶香月季, 主要香气成分中 3,5-二甲氧基甲苯相对含量最高, 还包括二氢- $\beta$ -紫罗兰酮、茶香螺烷、4-甲氧基苯乙烯等, 具有典型的茶香、果香和木香。后代满庭芳华的主要特征香气成分为 $\beta$ -萜澄茄油烯、 $\beta$ -杜松烯、乙酸苯乙酯、 $\beta$ -石竹烯、苯乙醇、二氢- $\beta$ -紫罗兰酮、4-甲氧基苯乙烯等, 形成淡淡的果香和木香气味。本研究结果显示, 满庭芳华的香型物质主要由苯类/苯丙素类和萜类挥发性有机物组成, 来源比较复杂; 其中, 苯类/苯丙素类合成途径

表 2 满庭芳华及其亲本主要挥发性成分香型特征

Table 2 Aroma type characteristics of the main volatile components of Mantingfanghua and its parents

化合物 Compounds	CAS 号 CAS number	分子式 Formula	香味描述 Aroma description
单萜类化合物 Monoterpenoids			
香茅醇 Citronellol	106-22-9	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	花香、玫瑰香、甜香
香叶醇 Geraniol	106-24-1	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	花香、玫瑰香、甜香
乙酸香叶酯 Geranyl acetate	105-87-3	C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	花香、玫瑰香、甜香
倍半萜类化合物 Sesquiterpenoids			
$\beta$ -石竹烯 $\beta$ -Caryophyllene	87-44-5	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	木香、甜香
$\beta$ -萜澄茄油烯 $\beta$ -Cubebene	13744-15-5	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	果香
$\beta$ -杜松烯 $\beta$ -Cadinene	523-47-7	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	木香
不规则萜类化合物 Irregular terpenoids			
茶香螺烷 Theaspirane	36431-72-8	C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	木香、茶香
二氢- $\beta$ -紫罗兰酮 Dihydro- $\beta$ -ionone	17283-81-7	C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	木香、茶香
苯类/苯丙素类化合物 Benzenoids/phenylpropanoids			
4-甲氧基苯乙烯 4-Methoxystyrene	637-69-4	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O	甜香
乙酸苯乙酯 Acetic acid, 2-phenylethyl ester	103-45-7	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	花香、玫瑰香、甜香
3,5-二甲氧基甲苯 3,5-Dimethoxytoluene	4179-19-5	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	茶香
苯甲醇 Benzyl alcohol	100-51-6	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	花香、甜香、果香
苯乙醇 Phenylethyl Alcohol	60-12-8	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	花香、玫瑰香、甜香

香味描述来自 Pherobase: <http://www.thegoodscentscompany.com/> 以及 Zhou 等<sup>[17]</sup> 和罗婧<sup>[18]</sup> 研究

Aroma description from Pherobase: <http://www.thegoodscentscompany.com/>, and the study by Zhou, et al.<sup>[17]</sup> and Luo<sup>[18]</sup>



相关的挥发性有机物4-甲氧基苯乙烯、乙酸苯乙酯、苯乙醇等,是由双亲共同遗传而来;萜类挥发性有机物中,单萜类挥发性有机物未从父本弯刺蔷薇中获得遗传,但倍半萜类挥发性有机物则是由双亲共同遗传而来。这一结果,暗示了蔷薇属植物中,单萜类挥发性有机物合成的特殊性和复杂性,相关规律还有待进一步研究。

综上所述,月季满庭芳华与父母本主要的特征香气成分差异较大,其中,萜类挥发性有机物在含量和种类方面差异均较大,可能是造成其与亲本之间香型差异的主要原因。

### 3 讨论

花香是由低熔点低分子量的植物挥发性物质组成的混合物<sup>[19]</sup>。花香中已有超过1700种挥发性有机化合物在90科植物中被鉴定出<sup>[20]</sup>。蔷薇属植物花香组分十分复杂,挥发性化合物组成成分达数百种。本研究中,满庭芳华与其父母本花香成分存在显著差异。父本弯刺蔷薇检测到36种挥发性成分,总释放量为13939.42 ng/g,母本伊丽莎白女王检测到22种挥发性成分,总释放量为1157.10 ng/g,后代满庭芳华检测到25种挥发性成分,总释放量仅579.70 ng/g,满庭芳华花香成分种类较父本明显减少,较母本略有增加,挥发性成分总含量较父母本均降低。对亲本和杂交后代VOCs组分的比较分析发现,满庭芳华同父本存在10种共有成分,共有成分含量占父本所有VOCs的27.78%;同母本存在13种共有成分,共有成分含量占母本所有VOCs的59.09%。与父本弯刺蔷薇相比,满庭芳华与母本伊丽莎白女王VOCs组分更为相似。

萜类化合物是植物第一大类挥发性有机物,是许多花卉和芳香植物的气味来源<sup>[21-22]</sup>。满庭芳华在萜类化合物合成途径上的物质含量显著低于父本弯刺蔷薇,略低于母本伊丽莎白女王。在萜类化合物合成途径上,父本释放了14种单萜类物质(4703.03 ng/g)和1种倍半萜类物质(14.93 ng/g);母本释放了5种不规则萜类物质(345.54 ng/g)和3种倍半萜类物质(374.24 ng/g);满庭芳华释放的花香成分中,不含有父本释放的单萜类物质,只含有母本释放的2种不规则萜类主要物质(48.86 ng/g)和父母本中的倍半萜类物质(99.93 ng/g)及6种倍半萜类特有成分(204.13 ng/g)。满庭芳华萜类物质含量的降低与单萜类成分种类较少有关,这与Cherri-Martin等<sup>[12]</sup>的研究结果一致。此外,本研究

发现,在萜类化合物合成途径上满庭芳华较父母本合成了更多种类及含量的倍半萜类挥发性物质,父本弯刺蔷薇中单萜类挥发性有机物成分,并未通过杂交手段遗传,这一结果可能是由于蔷薇属中单萜类挥发性有机物香叶醇及其衍生物的生物合成通过MVA途径在细胞质中进行,主要通过磷酸水解酶NUDX家族基因催化产生<sup>[23-24]</sup>。单萜类物质与倍半萜类物质合成的多样性分子机制及其代谢的遗传规律还有待进一步研究。

苯类/苯丙素类化合物是植物第二大类挥发性有机物<sup>[25]</sup>。本研究发现苯类/苯丙素类化合物代谢在亲本与后代之间的遗传较为稳定,父母本中70%的苯类/苯丙素类化合物成分在其子代满庭芳华花香成分中被检测到,且其后代满庭芳华中未形成苯类/苯丙素类化合物的特有成分;但在苯类/苯丙素类化合物合成途径上,满庭芳华同父母本共有成分中各物质含量较父母本普遍降低,可能是造成其苯类/苯丙素类化合物总含量显著低于父母本的主要原因。

脂肪酸及其衍生物类化合物是植物挥发物的第三大类,提供蔷薇属植物花香中存在的草香<sup>[26]</sup>。父母本在脂肪酸及其衍生物类化合物合成途径上的主要挥发性物质均未在后代花香成分中检测到,此外满庭芳华还存在特有成分。与苯类/苯丙素类化合物合成途径上共有成分含量变化相同,满庭芳华在脂肪酸及其衍生物类化合物合成途径上同父母本共有成分含量较父母本普遍降低,此外2种特有成分的存在使其脂肪酸及其衍生物类化合物总含量介于父母本之间,显著低于父本,略高于母本。脂肪酸及其衍生物类化合物代谢较为复杂,还有待进一步探讨。

综上所述,蔷薇属植物花香代谢遗传较为复杂,仍需通过建立遗传群体进行多组学联合分析等方式研究亲本和子代群体中花香挥发性有机物的遗传规律。本研究在一定程度上揭示了亲本与优良子代之间香气成分遗传的可能性与复杂性,为蔷薇属植物花香代谢的遗传改良提供重要参考。

### 参考文献

- [1] Scalliet G, Piola F, Douady C J, Rety S, Raymond O, Baudino S, Bordji K, Bendahmane M, Dumas C, Cock J M, Huguency P. Scent evolution in chinese roses. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(15): 5927-5932
- [2] Zhou T, Ning K, Han W, Zhou Y W, Li Y L, Wang C Y, Zhang F, Chong X R, Zhang D L, Chen H. Floral scent components of the hybrids between *Lagerstroemia fauriei* and *Lagerstroemia* 'Tuscarora'. Scientia Horticulturae, 2023,

- 309: 111670
- [3] 徐婉, 石俊, 蔡明, 潘会堂, 张启翔. 尾叶紫薇与紫薇杂交后代花香成分分析. 西北植物学报, 2014, 34(2): 387-394  
Xu W, Shi J, Cai M, Pan H T, Zhang Q X. Flower fragrance components of the hybrids between *Lagerstroemia caudata* and *L. indica*. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(2): 387-394
- [4] Wei S D, Fu X Q, Gao Y, Liu T L, Sun Y, Tang D Q. Identification and evaluation of aromatic volatile compounds in 26 cultivars and 8 hybrids of *Freesia hybrida*. Molecules, 2021, 26(15): 4482
- [5] Wei Q, Xia Q, Wang Y, Chen w, Liu C L, Zeng R Z, Xie L, Yi M S, Guo H R. Profiling of volatile compounds and associated gene expression in two *Anthurium* cultivars and their F<sub>1</sub> hybrid progenies. Molecules, 2021, 26(10): 2902
- [6] 李钰莹, 徐洪雨, 马宏, 李正红. 杂交滇丁香花香释放规律研究. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2020, 40(2): 8-18  
Li Y Y, Xu H Y, Ma H, Li Z H. Temporal variation of floral scent emission of a hybrid variety of *Luculia*. Journal of Shanxi Agricultural University: Nature Science Edition, 2020, 40(2): 8-18
- [7] Shibusawa N, Nohara I, Ohsawa R. Interspecific variation of scent characteristics in the *Cyclamen* genus and the utility of the variation. Horticultural Science, 2018, 45(4): 193-204
- [8] Zito P, Tavella F, Sajeva M, Carimi F, Dötterl S. Inflorescence scents of *Calendula maritima*, *Calendula suffruticosa* subsp *fulgida*, and their hybrid. International Journal of Plant Sciences, 2018, 179(5): 415-421
- [9] 王志东. 姜花回交群体主要观赏性状及花香的遗传效应分析. 广州: 华南农业大学, 2017  
Wang Z D. Studies on genetic characteristics of main agronomic characters and aroma of the back cross group of *Hedychium*. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017
- [10] Marques I, Jürgens A, Aguilar J F, Feliner G N. Convergent recruitment of new pollinators is triggered by independent hybridization events in *Narcissus*. New Phytologist, 2016, 210(2): 731-742
- [11] Kishimoto K, Yagi M, Onozaki T, Yamaguchi H, Nakayama M, Oyama-Okubo N. Analysis of scents emitted from flowers of interspecific hybrids between carnation and fragrant wild *Dianthus* species. Journal-Japanese Society for Horticultural Science, 2013, 82(2): 145-153
- [12] Cherri-Martin M, Jullien F, Heizmann P, Baudino S. Fragrance heritability in hybrid tea roses. Scientia Horticulturae, 2007, 113(2): 177-181
- [13] 石少川. 基于转录组和代谢组的月季花香合成调控机制解析. 北京: 中国农业大学, 2018  
Shi S C. Metabolomic and transcriptomic approach to understanding the regulation of biosynthesis of flower scent in rose. Beijing: China Agricultural University, 2018
- [14] 马燕, 陈俊愉. 我国西北的蔷薇属种质资源. 中国园林, 1990, 5(1): 52-53  
Ma Y, Chen J Y. Germplasm resources of rosa in northwest china. Chinese Landscape Architecture, 1990, 5(1): 52-53
- [15] Dudareva N, Klempien A, Muhlemann J K, Kaplan I. Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds. New Phytologist, 2013, 198(1): 16-32
- [16] 王珍珍. 蔷薇属资源的花香成分分析及花香合成酶 *RhNUDXI* 基因的表达研究. 昆明: 云南大学, 2019  
Wang Z Z. Analysis of volatile components and expression of flower scent synthase gene *RhNUDXI* in *Rosa* L. Kunming: Yunnan University, 2019
- [17] Zhou L J, Yu C, Cheng B X, Wan H H, Luo L, Pan H T, Zhang Q X. Volatile compound analysis and aroma evaluation of tea-scented roses in China. Industrial Crops and Products, 2020, 155(1): 112735
- [18] 罗婧. 玫瑰精油特征香气组成与香韵结构的相互协同作用机制研究. 上海: 上海应用技术大学, 2018  
Luo J. Study of perceptive interaction between characteristic aroma compounds and sensory attributes in rose essential oil. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2018
- [19] Dudareva N, Pichersky E. Metabolic engineering of plant volatiles. Current Opinion in Biotechnology, 2008, 19(2): 181-189
- [20] Knudsen J T, Eriksson R, Gershenzon J, Stahl B. Diversity and distribution of floral scent. Botanical Review, 2006, 72(1): 1-120
- [21] Mcgarvey D, Croteau R. Terpenoid metabolism. The Plant Cell, 1995, 7(7): 1015-1026
- [22] Tholl D. Biosynthesis and biological functions of terpenoids in plants. Advances in Biochemical Engineering/biotechnology, 2015, 148: 63-106
- [23] Magnard J L, Rocca A, Caissard J C, Huguency P, Bendahmane M, Baudino S. Biosynthesis of monoterpene scent compounds in roses. Science, 2015, 349(6243): 81-83
- [24] Conart C, Bomzan D P, Huang X Q, Bassard J E, Paramita S N, Saint-Marcoux D, Rius-Bony A, Hivert G, Anchisi A, Schaller H, Hamama L, Magnard J L, Lipko A, Swiezewska E, Jame P, Riveill G, Oyant L H S, Rohmer M, Lewinsohn E, Dudareva N, Baudino S, Caissard J C, Boachon B. A cytosolic bifunctional geranyl/farnesyl diphosphate synthase provides MVA-derived GPP for geraniol biosynthesis in rose flowers. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2023, 120(19): e2221440120
- [25] Dudareva N, Klempien A, Muhlemann J K, Kaplan I. Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds. New Phytologist, 2013, 198(1): 16-32
- [26] Baudino S, Sun P, Caissard J C, Nairaud B, Moja S, Magnard J L, Bony A, Jullien F, Schuurink R C, Vergne P, Dubois A, Raymond O, Bendahmane M, Hibrand-Saint O L, Jeuffre J, Clotault J, Thouroude T, Foucher F, Blerot B. Rose floral scent. Acta Horticulturae, 2019, 1232(1232): 69-80