

周晨晨, 范俊俊, 谭瑞楠, 等. ‘白兰地’海棠不同花期与不同花器官的香气成分分析 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (8): 1038–1047.
ZHOU C C, FAN J J, TAN R N, et al. Aromatics in Floral Organs of *Malus Brandywine* during Different Flowering Stages [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37 (8): 1038–1047.

‘白兰地’海棠不同花期与不同花器官的香气成分分析

周晨晨¹, 范俊俊², 谭瑞楠¹, 杨 峰³, 张往祥^{1*}

(1. 南京林业大学林学院, 江苏 南京 210037; 2. 金陵科技学院园艺与园林学院, 江苏 南京 210038;
3. 青岛市政监理咨询有限公司, 山东 青岛 266000)

摘 要:【目的】探索‘白兰地’海棠 (*M. 'Brandywine'*) 花香成分释放规律, 为海棠芳香花育种和花香调控奠定基础。【方法】以香气浓郁的‘白兰地’海棠花朵鲜样为试材, 采用固相微萃取与气质联用技术 (SPME-GC-MS) 分析不同花期和不同花器官的香气成分差异。【结果】(1) 从大蕾期到盛花期分别检测出 23、30、30、32 种挥发性成分, 其中叶醇、芳樟醇、己酸甲酯、乙酸叶醇酯、甲基庚烯酮和 α -法呢烯为‘白兰地’海棠主要挥发性成分。花香总释放量呈现先上升后下降的趋势, 在盛花期达到最高。香气成分种类构成主要以萜烯类 (14.47 %~37.30 %) 和醛酮类 (21.64 %~38.78 %) 为主, 相对含量分别在盛花期和大蕾期达到最高, 萜烯类相对含量在花朵开放过程中先上升后下降, 而烷烃类和酯类呈现先下降后上升的趋势。对不同时期与挥发性成分之间进行了主成分分析, 累计方差贡献率达 87.64 %, 芳樟醇和壬醛分别在 PC1 正、负方向上贡献最大, 分别与大蕾期和初花期呈高度正相关。(2) 盛花期花朵花瓣、雌蕊 (含花萼) 和雄蕊中分别检测出 28、32、25 种挥发性成分。雌蕊总释放量最高, 花瓣最低, 对不同花器官与挥发性成分之间进行了主成分分析, 累计方差贡献率达 98.65 %。己酸甲酯、芳樟醇和 α -法呢烯在 PC1 和 PC2 上的贡献较高, 分别是花瓣、雄蕊和雌蕊的主要香气成分。3 种花器官均位于不同象限, 不同花器官的花香成分存在明显差异。【结论】叶醇、芳樟醇、己酸甲酯、乙酸叶醇酯、甲基庚烯酮和 α -法呢烯为‘白兰地’海棠主要挥发性成分, 盛花期香气成分种类构成主要以萜烯类为主, 不同花器官的花香成分存在明显差异, 挥发性成分释放的主要花器官是雌蕊。

关键词: 海棠; 花期; 花器官; 挥发性成分; 花香释放规律

中图分类号: S 685.99 文献标志码: A 文章编号: 1008-0384 (2022) 08-1038-10

Aromatics in Floral Organs of *Malus Brandywine* during Different Flowering Stages

ZHOU Chenchen¹, FAN Junjun², TAN Ruinan¹, YANG Feng³, ZhANG Wangxiang^{1*}

(1. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2. College of Horticulture and Landscape Architecture, Jinling Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 210038, China; 3. Qingdao Municipal Supervision and Consulting Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000, China)

Abstract: 【Objective】Release of aromatics from floral organs of *Malus Brandywine* was studied for new variety breeding. 【Method】Freshly picked floral organ samples of the strongly fragrant *Malus Brandywine* in different flowering stages were analyzed for aromatic components by SPME-GC-MS. 【Result】(1) There were 23, 30, 30, and 32 volatiles detected in the floral organs from budding to full bloom stage. They included predominantly (Z)-3-hexen-1-ol, linalool, hexanoic acid-methyl ester, (Z)-3-hexen-1-ol, and 6-methyl-5-hepten-2-one, and α -farnesene. The total fragrance release was in an increasing trend initially to peak at the full bloom stage before decline toward the end. The released aromatics consisted largely of terpenes (14.47-37.30%) and aldehydes and ketones (21.64-38.78 %) with the highest relative contents of terpenes at full bloom, while aldehydes and ketones when large buds appeared. The terpenoids increased at opening of the flowers followed by a decline, while alkanes and esters decreased at first but rose later. A principal component analysis on the volatiles at different flowering stages showed a cumulative variance contribution of 87.64%. On PC1, linalool contributed the most and significantly correlated positively in the large bud stage, whereas nonanal the most and significantly correlated negatively in the initial

收稿日期: 2021-12-16 初稿; 2022-03-31 修改稿
作者简介: 周晨晨 (1995-), 男, 硕士, 主要从事林木种苗及海棠育种研究 (E-mail: nlzhoucc@njfu.edu.cn)
* 通信作者: 张往祥 (1965-), 男, 教授, 主要从事观赏植物应用研究 (E-mail: malus2011@163.com)
基金项目: 扬州现代农业科技项目 (YZ2019037); 江西省林业局科技创新专项 (202121)

flowering stage. (2) At full blooming, 28, 32, and 25 volatiles were detected in the petals, pistil (including calyx), and stamens, respectively. The greatest fragrance release in quantity came from the pistil and the least from the petals. A principal component analysis on the compounds in different organs yielded a cumulative variance contribution of 98.65 %. On PC1 and PC2, hexanoic acid-methyl ester, linalool, and α -farnesene contributed more and were the major aromatics in the petals, stamens, and pistils, respectively. The 3 floral organs were in different quadrants and significantly differed in the composition of the aromatics they released. 【Conclusion】 (Z)-3-hexen-1-ol, linalool, hexanoic acid-methyl ester, (Z)-3-hexen-1-ol, 6-methyl-5-hepten-2-one, and α -Farnesene were the major volatiles in floral organs of *Malus* Brandywine. Terpenes were the dominant aromatics released during the full bloom stage. Significant differences in the aromatic composition of the fragrance discharged from different floral organs. The releases of these volatiles took place mainly in the pistil.

Key words: *Malus*; flowering period; floral organs; volatile components; floral fragrance release pattern

0 引言

【研究意义】花香是园林植物重要的观赏形状,被誉为花卉的“灵魂”^[1],是植物诱引昆虫授粉的重要表达信号,也是评价观赏植物和鲜切花的重要品质指标。花香挥发物按照生物合成途径可将这些化合物分为萜烯类、苯丙酸类/苯环型化合物和脂肪族化合物等 3 大类^[2]。花香比花色和花型更能影响消费者的选择^[3]。常见的花卉育种工作大多集中于花型、花色、花期等方面,而忽视了香花的育种^[4]。更为多元化的花香研究可以了解植物开花过程中香气的差异变化,明确花香释放的关键部位,为不同植物花朵香气形成机理的研究、芳香新品种的培育和后续花香代谢研究奠定基础,同时也为鲜花加工产业提供科学的指导。【前人研究进展】学者们在对花朵挥发物的鉴定上进行了诸多试验,对园林植物的花香成分组成进行了研究,包括桂花^[5]、蜡梅^[6]、兰花^[7]、玫瑰^[8]、茉莉^[9]等。植物花朵香气的释放往往因为开花阶段的不同而呈现一定的变化,不同花器官所释放的香气也有差异,目前学者对于花香的研究也不局限于简单的定量定性分析,更多的是研究花朵香气释放的部位和规律,以及尝试寻找花香与花色、传粉者之间的联系。比如对水仙花花香的昼夜规律和不同花龄的花香研究发现夜间产生的气味明显少于白天,花被结构加倍的复花产生双倍的香味^[10]。从花的不同部位研究了大花蕙兰“阳光钟”的挥发性成分,鉴定出 23 种成分^[11]。红苹果“佩林戈”的成熟花挥发性气味分析发现芳樟醇含量最高,在花蕾中为 43.0%,在花柱和柱头顶部空间中为 17.6%^[12]。以及对桂花^[5]、杜鹃^[13]、茶梅^[14]、野茉莉^[15]等植物的花香释放规律研究,结果都显示随着花期的变化花香而呈现不同的变化规律。海棠(*Malus*)是蔷薇科(Rosaceae)苹果属(*Malus*)中果实直径较小(≤ 5 cm)的一类植物的总称,是优良的观花、

观叶和观果树种。目前国内外海棠良种选育工作主要是围绕观花、观叶和观果等目标性状展开,鲜见以香花为目标性状的改良育种研究。中国的传统观点是,盛开的海棠花美丽而不芳香^[16]。然而,长期的自然选择和人工育种已在全球范围内培育出 700 多个海棠品种^[17-19],其中大多数品种都是芳香的^[16]。李晓磊^[20]、Omata 等^[21]和 Zhao 等^[16]基于少数海棠种质花香成分检测发现海棠花香主要成分是异戊醇、苜醇、3-甲基-4-氧戊酸、罗勒烯、庚烷等物质。

【本研究切入点】但这些研究仅仅局限于少量品种的花香定性上,对于海棠花香的释放规律研究较少。在进行芳香花卉育种或花卉调控,甚至精油提取时,了解植物的花香特性和释放规律至关重要。

【拟解决的关键问题】因此,为了研究海棠的花香释放规律,针对花量较大、重瓣、花朵呈深粉红、气味浓郁的北美海棠品种‘白兰地’海棠(*M. 'Brandywine'*),本研究采用 SPME-GC-MS 技术对‘白兰地’海棠的花朵开放过程中(大蕾期、初花期、盛花期、末花期)花香的释放规律、不同花朵部位(花瓣、雄蕊、雌蕊及剩余部分)的香气成分进行分析,研究花香特征及释放规律,为后续海棠花香代谢研究及成分的鉴定奠定基础。

1 材料与方法

1.1 植物材料

于 2021 年 4 月选取来自国家海棠种质资源库(扬州市江都区,东经 119°55',北纬 32°42')的健康且长势相近的‘白兰地’海棠(*M. 'Brandywine'*)作为供试材料,于天气晴朗的上午 7:00~9:00 收集‘白兰地’海棠花朵处于大蕾期(蕾膨大,雌雄蕊即将显露)、初花期(花朵即将开放,雌雄蕊显露)、盛花期(花朵完全开放且柱头和花药新鲜,色彩明艳)、末花期(柱头和花药干萎,花瓣未干萎)的花枝,采摘后及时插入湿沙,带回实验室并对每个花期准确称取 4 g 花朵进行挥发性成分测定。并且对

盛花期的花朵解剖成花瓣、雄蕊、雌蕊及剩余部分（雌蕊、萼片、萼筒），每个部分准确称取 2 g 进样分析。以上试验均设置 3 个重复。

1.2 GC-MS 分析

选取配有 65 μm PDMS-DVB（二乙烯基苯）萃取头的固相微萃取仪（Supelco, USA）进行花香成分收集和吸附。萃取头首次使用时在气相色谱进样口中以 270 $^{\circ}\text{C}$ 的高温活化 0.5 h，以后每次进样前都活化 3 min，不同花期样品每次处理取 4 g 花朵置于 250 mL 顶空瓶中，不同花器官样品每次处理取 2 g 花朵置于 20 mL 顶空瓶中，萃取深度约 2.5~3.0 cm，于水浴加热 45 $^{\circ}\text{C}$ 条件下顶空萃取 35 min 后，立即插入气相色谱进样口进行解析，每个单元设置 3 个重复。

气质联用仪 Trace DSQ（Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA）。气相条件：DB-5MS（非极性柱，长 30 m，内径 0.25 mm，液膜厚 0.25 μm ），载气为高纯 He，柱流量 1.0 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 不分流进样；进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$ ，热解析 3 min，不分流进样；起始温度 50 $^{\circ}\text{C}$ ，保持 1 min，以 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 100 $^{\circ}\text{C}$ ，不停留，再以 5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 160 $^{\circ}\text{C}$ ，保持 4 min，再以 8 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 220 $^{\circ}\text{C}$ ，不停留。质谱条件：离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$ ，电离方式 EI⁺，电子能量 70 eV，检测器电压 1200 V，质量扫描范围：33-450 aMU，全扫描方式，扫描时间 0.5 s，传输线温度 230 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 数据分析

将得到的质谱数据与美国国家标准与技术研究所 NIST 谱库提供的标准物质的质谱图进行比对，通过（<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>）网站进行检索，同时根据在相同升温程序下用正构烷烃标准样品（C8~C20）计算得到科瓦茨保留指数（Kovats' Retention Indices, RI）和 NIST 网站上对应物质所列举的相关参考文献进行进一步定性确认，鉴定出主要挥发性成分。根据离子流峰面积归一化法计算出样品中各香气物质的相对含量。使用 Origin 2019b（OriginLab, MA, USA）和 Systat 13（Systat Software Inc., CA, USA）对挥发性成分进行主成分分析（PCA）。

2 结果与分析

2.1 ‘白兰地’海棠不同花期的挥发性成分分析

‘白兰地’海棠 4 个时期的挥发性成分的总释放量呈现先上升后下降的趋势，在盛花期达到最高（图 1）。在 4 个花期中共检测到 50 中挥发性化合物（表 1），其中大蕾期 23 种，初花期 30 种，盛花期 30 种，末花期 32 种。这些挥发性化合物主要包括 6 种萜烯

类、15 种酯类质、4 种醇类、13 种烷烃类、9 种醛酮类和 3 种酚类。

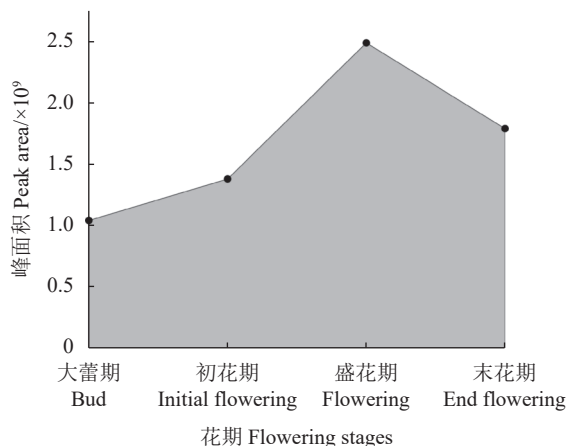


图 1 ‘白兰地’不同花期挥发性成分的峰面积图

Fig. 1 Peak areas of *Malus Brandywine* volatiles at different flowering stages

4 个花期检测出的挥发性成分主要以萜烯类、酯类、醛酮类、烷烃类、醇类和酚类为主，但不同时期的种类构成不完全相同（图 2）。酚类物质只在盛花期和末花期检测出，在‘白兰地’海棠花香释放总量中占的比重极少。萜烯类挥发性成分相对含量在花朵开放过程中先上升后下降，在盛花期达到最高（37.3%），而烷烃类和酯类呈现先下降后上升的趋势。大蕾期主要成分以醛酮类（38.78%）和烷烃类（22.81%）为主，在整个开花过程中的相对含量最高，萜烯类和酯类的相对含量相差较小。初花期以萜烯类和酯类为主，酯类（24.88%）在初花期达到最高。萜烯类和醛酮类是盛花期花香释放的主要种类，占盛花期总释放量的 70.88%，而这个时期的酯类和烷烃类成分所占比重在 4 个时期中最低，酚类物质（4.26%）也主要出现在盛花期。末花期和盛花期花香成分释放类别种类与相对含量相似，醇类成分在末花期达到最高（9.52%）。

‘白兰地’海棠不同花期的挥发性成分组成和释放量不同。大蕾期的主要成分是叶醇（9.00%）、甲基庚烯酮（14.98%）、乙酸叶醇酯（9.37%）、壬醛（18.48%）、 α -法呢烯（14.47%）和正十二烷（10.46%），在大蕾期的相对含量均高于初花期、盛花期和末花期，其中壬醛在其他 3 个花期中相对含量较低或极地而无法检测出。初花期的主要成分是叶醇（7.71%）、己酸甲酯（11.67%）、甲基庚烯酮（10.39%）、芳樟醇（25.19%），这些成分的相对含量高于盛花期和末花期，整体释放量呈现下降的趋势。盛花期的主要成分是己酸甲酯（7.12%）、芳樟

表 1 ‘白兰地’海棠不同花期的挥发性成分鉴定
Table 1 Identification of volatiles in different flowering stages of *Malus Brandywine*

化合物 Compound	保留时间 Retention time/s	相对含量 Relative content/%			
		大蕾期 Bud	初花期 Initial flowering	盛花期 Flowering	末花期 End flowering
萜烯类 Terpenes					
芳樟醇 Linalool	9.92	—	25.19±5.27 a	14.75±0.63 b	13.05±1.99 b
壬醛 Nonanal	9.96	18.48±0.25	—	—	—
(E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯 (E)-4,8-Dimethylnona-1,3,7-triene	10.17	—	—	9.74±2.54 a	5.71±0.59 b
β-紫罗兰酮 3-Buten-2-one,4-(2,6,6-trimethyl-1-cyclohexen-1-yl)-	15.54	—	—	0.71±0.25 b	2.42±0.63 a
香叶基丙酮 5,9-Undecadien-2-one, 6,10-dimethyl-	17.68	—	1.12±0.09 b	4.70±0.33 a	4.83±0.33 a
二氢-B-紫罗兰酮 2-Butanone,4-(2,6,6-trimethyl-1-cyclohexen-1-yl)-	17.92	—	0.05±0.01 b	0.36±0.16 b	2.46±0.85 a
α-法呢烯 à-Farnesene	19.55	14.47±4.67 a	6.94±2.44 b	7.04±3.26 b	7.28±1.39 b
酯类 Esters					
己酸甲酯 Hexanoic acid, methyl ester	6.57	1.26±1.51 c	11.67±1.24 a	7.12±2.85 b	7.31±0.82 b
乙酸叶醇酯 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)-	8.01	9.37±2.77 a	3.93±0.74 b	0.82±0.04 c	0.70±0.61 c
5-庚烯酸甲酯 5-Heptenoic acid, methyl ester	8.29	—	—	—	0.01±0.01
2-乙基己酸甲酯 Hexanoic acid, 2-ethyl-, methyl ester	8.62	—	—	0.42±0.20 a	0.34±0.12 b
丙酸芳樟酯 1,6-Octadien-3-ol, 3,7-dimethyl-, propanoate	8.82	1.30±0.12	—	—	—
4-辛烯酸甲酯 4-Octenoic acid, methyl ester	10.19	—	2.54±0.29	—	—
辛酸甲酯 Octanoic acid, methyl ester	10.37	0.32±0.12 b	2.98±0.46 a	2.00±0.73 a	2.49±0.35 a
异戊酸香叶酯 Geranyl isovalerate	10.85	0.34±0.14 a	0.06±0.01 b	—	—
顺-3-己烯基丁酸酯 Butanoic acid, 3-hexenyl ester, (Z)-	11.72	—	1.17±0.31 a	0.38±0.03 b	0.75±0.24 b
(10E)-10-十七烯-8-炔酸甲酯 10-Heptadecen-8-ynoic acid, methyl ester, (E)-	12.59	—	—	—	0.20±0.15
顺式-3-己烯醇 2-甲基丁酸酯 cis-3-Hexenyl-à-methylbutyrate	12.86	2.36±0.47 a	1.66±0.16 b	—	—
3-甲基-2-丁烯酸-2-苯乙酯 2-Butenoic acid, 3-methyl-, 2-phenylethyl ester	15.04	—	—	—	1.14±0.44
(Z,Z)-3-己烯基2-甲基-2-丁烯酸酯 (Z)-(Z)-Hex-3-en-1-yl 2-methylbut-2-enoate	15.09	—	0.87±0.14	—	—
顺式-3-己烯醇苯甲酸酯 3-Hexen-1-ol, benzoate, (Z)-	21.83	—	—	0.08±0.07	—
肉豆蔻酸甲酯 Methyl tetradecanoate	25.90	—	—	0.11±0.04 a	0.16±0.06 a
醇类 Alcohols					
叶醇 3-Hexen-1-ol, (Z)-	5.82	9.00±0.50 a	7.71±1.25 ab	5.57±1.18 ab	4.40±0.45 b
3-甲基-4-戊醇 4-Penten-1-ol, 3-methyl-	6.22	—	0.12±0.04 a	0.04±0.01 ab	0.11±0.05 a
苯乙醇 Phenylethyl Alcohol	10.51	—	—	2.35±0.73 b	4.82±0.61
4-甲氧基苯乙醇 2-(4-Methoxyphenyl)ethanol	17.07	—	—	0.25±0.10 a	0.19±0.06 a
醛酮类 Aldehydes and ketones					
4-羟基查耳酮 4-Hydroxychalcone	5.20	1.35±0.23 a	0.44±0.09 ab	0.56±0.19 ab	1.18±1.00 a
甲基庚烯酮 5-Hepten-2-one, 6-methyl-	7.67	14.98±1.29 a	10.39±2.10 b	6.49±0.49 c	7.56±0.12 c
4-氧代异佛尔酮 2,6,6-Trimethyl-2-cyclohexene-1,4-dione	10.95	—	1.76±0.16 a	2.01±1.10 a	—
2,2,6-三甲基-1,4-环己二酮 1,4-Cyclohexanedione,2,2,6-trimethyl-	11.51	—	0.57±0.22 ab	0.90±0.14 a	—
癸醛 Decanal	12.25	2.93±0.58 a	1.83±0.29 b	—	1.06±0.07 c
4-亚甲基异佛尔酮 4-Methyleneisophorone	12.78	1.04±0.18 d	3.28±0.95 c	6.51±0.83 b	8.56±0.30 a
2-十三烷酮 2-Tridecanone	19.24	—	2.15±0.89 bc	11.44±5.66 a	7.00±2.12 ab
2-十五烷酮 2-Pentadecanone	25.34	—	1.22±0.61 bc	5.67±2.24 a	3.17±1.10 a
烷烃类 Alkanes					
癸烷 Decane	7.87	0.14±0.01 a	0.11±0.00 a	—	—
正十一烷 Undecane	9.78	2.11±0.41 a	1.25±0.32 b	—	—
3-甲基十一烷 Undecane, 3-methyl-	11.33	1.97±0.24	—	—	—
正十二烷 Dodecane	11.99	10.46±1.50 a	6.60±0.64	2.31±0.39 c	3.76±0.53 c
正十三烷 Tridecane	14.35	1.11±0.30 a	0.87±0.14 a	1.18±0.03 a	1.20±0.12 a
7-甲基十七烷 Heptadecane, 7-methyl-	15.20	0.54±0.03 a	0.40±0.04 a	—	—
9-甲基十九烷 Nonadecane, 9-methyl-	15.30	—	0.15±0.05	—	—
10-甲基二十烷 Eicosane, 10-methyl-	15.49	0.35±0.06	—	—	—
3-甲基十三烷 Tridecane, 3-methyl-	16.05	2.19±0.31 a	1.29±0.24 b	0.52±0.03 c	—
3-亚甲基十三烷 Tridecane, 3-methylene-	16.43	1.15±0.05	—	—	—
正十四烷 Tetradecane	16.76	2.79±0.44 b	1.76±0.20 c	2.51±0.28 b	4.14±0.35 a
正十六烷 Hexadecane	22.40	—	—	—	0.36±0.03
正二十一烷 Heneicosane	28.45	—	—	—	0.82±0.49
酚类 Phenols					
对甲苯甲醚 Benzene, 1-methoxy-4-methyl-	8.43	—	—	3.36±1.78 a	1.69±0.68 b
甲基苯乙基醚 Benzene, (2-methoxyethyl)-	9.61	—	—	—	1.12±0.07
2,6-二叔丁基对甲酚 Butylated Hydroxytoluene	19.82	—	—	0.09±0.03	—

“—”表示该数据未被检索到或者未被检测出；同一行中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。表2同。

"—" indicates that the data have not been reported by other studies or the compound has not been detected. Different lowercases in the same line indicate the significant difference at 0.05 level. The same as table 2.

醇 (14.75%)、(E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯 (9.74%) 和 2-十三烷酮 (11.44%)，虽然盛花期和初花期检测出来的成分数量相同，但盛花期花香总释放量 (2.49×10^9) 远高于初花期 (1.38×10^9) (图 1)。末花期的主要成分是甲基庚烯酮 (7.56%)、己酸甲酯 (7.31%)、芳樟醇 (13.05%)、4-亚甲基异佛尔酮 (8.56%) 和 α -法呢烯 (7.28%)，除了 4-亚甲基异佛尔酮，其他主要成分相对含量在 4 个时期中基本呈现下降趋势。4 个时期中盛花期和末花期的主要挥发性成分组成结构较相似。(E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯、对甲苯甲醚和苯乙醇在盛花期和末花期的相对含量均较高，但在大蕾期和初花期均未检测出，相对含量较高的芳樟醇在除了大蕾期的 3 个时期均检测出，且呈现下降趋势。在各个花期中，共有成分有 10 种，叶醇、芳樟醇、己酸甲酯、甲基庚烯酮和 α -法呢烯等在大蕾期、初花期和盛花期的含量较高 (4.40%~25.19%)，为‘白兰地’海棠主要挥发性成分。

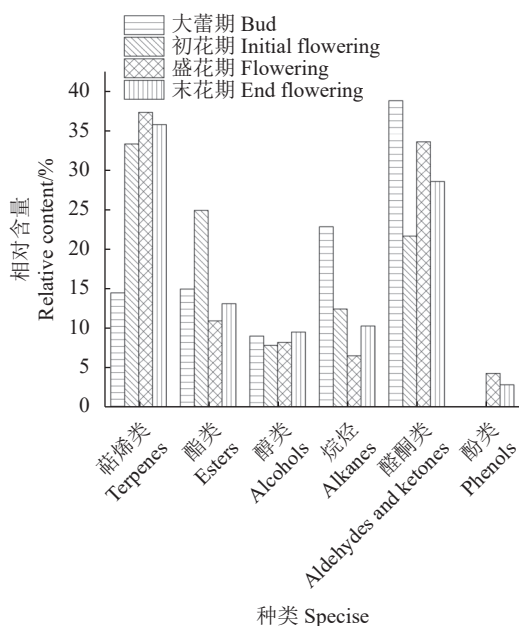


图 2 不同花期挥发性成分种类的相对含量比较

Fig. 2 Relative contents of volatiles in floral organs at different flowering stages

2.2 ‘白兰地’海棠不同花器官的挥发性成分分析

‘白兰地’海棠不同花器官中雌蕊的挥发性成分的总释放量最高，花瓣最低 (图 3)。在 4 个花期中共检测到 45 中挥发性化合物 (表 2)，其中花瓣 28 种，雌蕊 (含花萼) 32 种，雄蕊 25 种。这些挥发性化合物主要包括 6 种萜烯类、17 种酯类质、4 种醇类、7 种烷烃类、8 种醛酮类和 3 种酚类。

‘白兰地’海棠不同花器官的挥发性成分组成和释

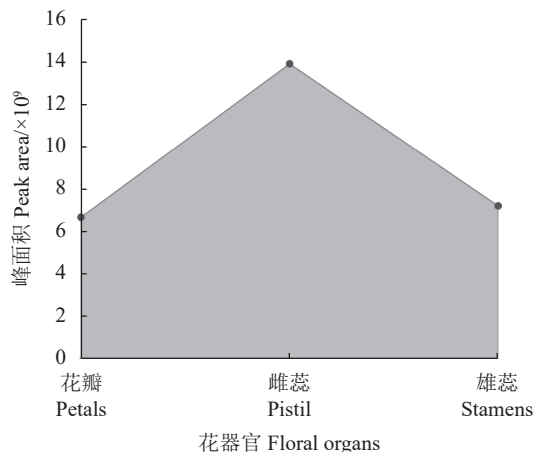


图 3 ‘白兰地’不同花器官挥发性成分的峰面积图

Fig. 3 Peak areas of *Malus Brandywine* volatiles in floral organs

放量不同。花瓣中主要成分是己酸甲酯 (35.41%)、芳樟醇 (10.01%) 和辛酸甲酯 (13.60%)，整朵花中己酸甲酯和辛酸甲酯的释放主要集中在花瓣。雌蕊中主要成分是叶醇 (5.84%)、乙酸叶醇酯 (20.47%)、 α -法呢烯 (34.12%) 和 (E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯 (6.03%)，其中 (E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯仅在雌蕊中检测出，整朵花中乙酸叶醇酯和 α -法呢烯的释放集中于雌蕊。雄蕊中主要成分是甲基庚烯酮 (7.75%)、芳樟醇 (23.59%)、4-辛烯酸甲酯 (12.33%)、苯乙醇 (11.04%) 和 4-亚甲基异佛尔酮 (12.06%)，其中苯乙醇为雄蕊中独有的挥发性成分，芳樟醇、4-辛烯酸甲酯和 4-亚甲基异佛尔酮的主要释放也在雄蕊。在不同的花器官中，检测出的共有挥发性成分共 12 种，这些成分大多都不是‘白兰地’海棠的主要挥发性成分，主要成分均集中于某一器官。此外，花器官检测出的挥发性成分种类与花期有差异，雌蕊中特异成分种类达 11 种，主要是酯类、醇类和醛酮类物质，这可能是由于花朵解剖造成解剖伤口导致有其他成分被检测出。

不同花器官的挥发性成分释放种类构成不同 (图 4)。在数量上，3 种器官中酯类的成分数量差别最大，最高的是雌蕊 (12 种)，最低的是雄蕊 (6 种)。在相对含量上，3 种花器官差别最大的是酯类物质，最小的是烷烃类。花瓣中检测出的挥发性成分种类以酯类 (57.86%)、醛酮类 (17.85%) 和萜烯类 (15.63%) 为主，占花瓣挥发性成分总释放量的 91.34%。雌蕊中以萜烯类 (47.64%) 和酯类 (41.26%) 为主，占雌蕊挥发性成分总释放量的 88.9%。雄蕊以萜烯类 (32.09%) 和醛酮类 (25.68%) 为主，占雄蕊挥发性成分总释放量的 57.77%。

表2 ‘白兰地’海棠不同花器官的挥发性成分鉴定
Table 2 Identification of *Malus* Brandywine volatiles in floral organs

化合物 Compound	保留时间 Retention time/s	相对含量 Relative content/%		
		花瓣 Petals	雌蕊 Pistil	雄蕊 Stamens
萜烯类 Terpenes				
芳樟醇 Linalool	9.92	10.01±2.00 b	—	23.59±4.01 a
(E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯 (E)-4,8-Dimethylnona-1,3,7-triene	10.15	—	6.03±0.60	—
β-紫罗兰酮 3-Buten-2-one, 4-(2,6,6-trimethyl-1-cyclohexen-1-yl)-	15.53	—	1.81±0.34	—
香叶基丙酮 5,9-Undecadien-2-one, 6,10-dimethyl-	17.66	2.29±0.59 b	2.63±0.01 ab	3.85±0.72 a
二氢-B-紫罗兰酮 2-Butanone, 4-(2,6,6-trimethyl-1-cyclohexen-1-yl)-	17.90	—	3.05±0.48 a	0.91±0.28 b
α-法呢烯 à-Farnesene	19.55	3.33±1.14 b	34.12±2.90 a	3.74±2.57 b
酯类 Esters				
己酸甲酯 Hexanoic acid, methyl ester	6.54	35.41±2.72 a	2.87±0.67 b	—
乙酸叶醇酯 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)-	7.98	0.59±0.18 b	20.47±0.39 a	—
5-庚烯酸甲酯 5-Heptenoic acid, methyl ester	8.25	—	0.03±0.01	—
庚酸甲酯 Heptanoic acid, methyl ester	8.29	1.11±0.38 a	—	0.40±0.37 b
2-乙基己酸甲酯 Hexanoic acid, 2-ethyl-, methyl ester	8.62	0.17±0.01	—	—
4-辛烯酸甲酯 4-Octenoic acid, methyl ester	10.17	5.91±1.06 b	—	12.33±1.70 a
辛酸甲酯 Octanoic acid, methyl ester	10.32	13.60±5.33 a	2.60±0.12 b	4.89±0.06 aab
3-丁酸己烯酯 Butanoic acid, 3-hexenyl ester, (E)-	10.71	—	0.91±0.09	—
顺-3-己烯基丁酸酯 Butanoic acid, 3-hexenyl ester, (Z)-	11.68	—	4.99±0.55	—
2-甲基丁酸己酯 Butanoic acid, 2-methyl-, hexyl ester	12.84	—	3.00±0.49 a	0.53±0.03 b
己酸异戊酯 Isopentyl hexanoate	13.16	—	—	0.20±0.05
3-壬酸甲酯 3-Nonenoic acid, methyl ester	14.60	—	0.26±0.01	—
(Z,Z)-3-己烯基2-甲基-2-丁烯酸酯 (Z)-(Z)-Hex-3-en-1-yl 2-methylbut-2-enoate	15.01	—	2.39±0.00	—
己酸叶醇酯 Hexanoic acid, 3-hexenyl ester, (Z)-	16.35	0.51±0.09 b	2.44±0.05 a	—
己酸己酯 Hexanoic acid, hexyl ester	16.44	0.25±0.02 b	0.85±0.04 a	—
顺式-3-己烯醇苯甲酸酯 3-Hexen-1-ol, benzoate, (Z)-	21.81	—	0.45±0.06 a	0.22±0.02 a
肉豆蔻酸甲酯 Methyl tetradecanoate	25.90	0.31±0.15	—	—
醇类 Alcohols				
叶醇 3-Hexen-1-ol, (Z)-	5.78	4.45±0.90 a	5.84±1.31 a	—
3-甲基-1,5-戊二醇 1,5-Pentanediol, 3-methyl-	5.93	—	0.04±0.00	—
6-甲基-5-庚烯-2-醇 5-Hepten-2-ol, 6-methyl-	7.78	—	0.84±0.16 a	1.15±1.62 a
苯乙醇 Phenylethyl Alcohol	10.48	—	—	11.04±1.59
醛酮类 Aldehydes and ketones				
4-羟基查耳酮 4-Hydroxychalcone	5.20	0.35±0.02 a	0.07±0.02 a	0.16±0.01 a
苯甲醛 Benzaldehyde	7.43	—	0.11±0.02	—
甲基庚烯酮 5-Hepten-2-one, 6-methyl-	7.66	5.64±0.65 a	0.57±0.17 b	7.75±1.86 a
癸醛 Decanal	12.20	0.55±0.09 b	0.73±0.04 b	2.28±0.29 a
4-亚甲基异佛尔酮 4-Methyleneisophorone	12.76	1.91±0.23 b	—	12.06±1.82 a
3,5-庚二烯醛 3,5-Heptadienal, 2-ethylidene-6-methyl-	13.22	—	0.02±0.00	—
2-十三烷酮 2-Tridecanone	19.24	6.62±3.78 a	—	2.58±0.17 b
2-十五烷酮 2-Pentadecanone	25.34	2.78±1.29 a	0.17±0.00 b	0.85±0.12 ab
烷烃类 Alkanes				
正十一烷 Undecane	9.77	1.19±0.10 b	0.59±0.03 c	1.73±0.10 a
3-甲基十一烷 Undecane, 3-methyl-	11.33	0.37±0.08	—	—
正十二烷 Dodecane	11.97	0.75±0.06 b	0.31±0.08 c	1.45±0.01 a
正十三烷 Tridecane	14.35	0.41±0.06 a	0.22±0.04 a	0.49±0.05 a
3-甲基十三烷 Tridecane, 3-methyl-	16.05	0.14±0.01	—	—
正十四烷 Tetradecane	16.75	0.38±0.02 b	0.31±0.06 b	0.91±0.29 a
正十六烷 Hexadecane	22.39	0.17±0.02 b	0.06±0.00 c	0.42±0.05 a
酚类 Phenols				
对甲苯甲醚 Benzene, 1-methoxy-4-methyl-	8.43	—	1.21±0.34 b	2.81±0.02 a
甲基苯乙基醚 Benzene, (2-methoxyethyl)-	9.61	0.73±0.16 b	—	3.64±0.14 a
2,6-二叔丁基对甲酚 Butylated Hydroxytoluene	19.80	0.05±0.04	—	—

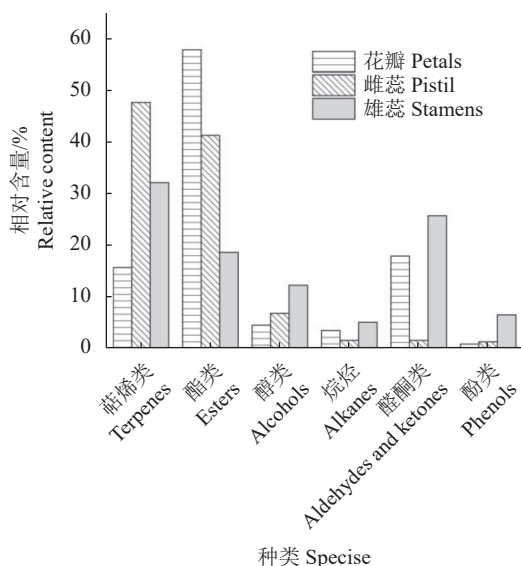


图 4 不同花器官挥发性成分种类的相对含量比较

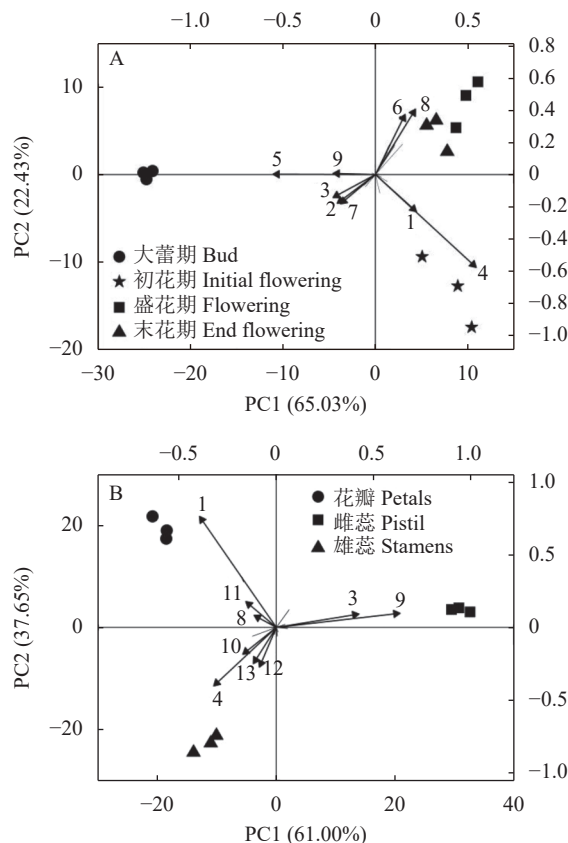
Fig. 4 Relative contents of volatiles in floral organs

2.3 基于 PCA 的不同花期与花器官挥发物的差异性分析

为了进一步分析不同时期、不同花器官与挥发性成分之间的差异关系,基于不同花期的 50 个挥发性成分和不同花器官的 45 个挥发性成分,对 4 个时期和 3 个花器官成分数据进行了主成分分析。

结果表明,对于不同花期与挥发性成分之间(图 5-A),第一主成分(PC1)贡献率达 65.03%,第二主成分(PC2)贡献率达 22.43%,前两个主成分占总方差的 87.46%,说明能很好地反映所测样品的整体信息特征。在 PC1 负方向上,甲基庚烯酮、乙酸叶醇酯、壬醛、正十二烷和 α -法呢烯的贡献较大,说明这些成分与大蕾期呈正相关关系。(E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯和 2-十三烷酮 PC1 和 PC2 正方向上的贡献较大,与盛花期和末花期呈正相关关系,是这两个时期的主要挥发性成分。己酸甲酯和芳樟醇在 PC1 正方向上和 PC2 负方向上的贡献较大,与初花期呈正相关关系,是初花期的主要成分。4 个时期除了盛花期和末花期位于同一坐标象限,其余 2 个时期分布较为分散,没有重叠,表明在整个花开放过程中,花香成分释放存在差异,且盛花期和末花期的挥发性成分组成结构较相似。

对于不同花器官与挥发性成分之间(图 5-B),第一主成分(PC1)贡献率达到 61%,第二主成分(PC2)贡献率达到 37.65%,前两个主成分占总方差的 98.65%,能很好地反映所测样品的整体信息特征。己酸甲酯、乙酸叶醇酯、芳樟醇和 α -法呢烯在 PC1 和 PC2 上的贡献较高,说明这些成分是花器官



①A: 花期; B: 花器官。②图中数字 1: 己酸甲酯; 2: 甲基庚烯酮; 3: 乙酸叶醇酯; 4: 芳樟醇; 5: 壬醛; 6: (E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯; 7: 正十二烷; 8: 2-十三烷酮; 9: α -法呢烯; 10: 4-辛烯酸甲酯; 11: 辛酸甲酯; 12: 苯乙醇; 13: 4-亚甲基异佛尔酮。

①A: flowering stages; B: floral organs. ②1: Hexanoic acid-methyl ester; 2: 6-methyl-5-hepten-2-one; 3: (Z)-3-hexen-1-ol, acetate; 4: linalool; 5: nonanal; 6: (E)-4,8-dimethylnona-1,3,7-triene; 7: dodecane; 8: 2-tridecanone; 9: α -farnesene; 10: 4-octenoic acid, methyl ester; 11: octanoic acid, methyl ester; 12: phenylethyl alcohol; 13: 4-methyleisophorone.

图 5 挥发性成分的主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis based on volatiles

香气释放的主要挥发性成分。其中乙酸叶醇酯和 α -法呢烯在 PC1 的正方向上贡献最大,与雌蕊呈正相关关系。己酸甲酯、辛酸甲酯和 2-十三烷酮在 PC2 的正方向上贡献较大,与花瓣呈正相关关系,是花瓣中检测出的主要挥发性成分。芳樟醇、4-辛烯酸甲酯、苯乙醇和 4-亚甲基异佛尔酮在 PC2 的负方向上贡献较高,与雄蕊呈正相关关系,是雄蕊中检测出的主要挥发性成分。3 种花器官均位于不同象限,分布较为分散且无重叠,表明不同花器官的花香成分存在差异。

3 讨论

相对于花型、花色等植物性状,花香的研究相对滞后^[22]。目前,已鉴定出近 100 个植物科的 2 000

多种花香化合物。在这些化合物中,萜烯类化合物是植物花香化合物中最大的一个类群,在许多植物的挥发性成分中占很大比例,它们不仅对植物的气味有影响,还会对植物花色产生一定的影响^[23]。Schiestl等^[24]研究发现,萜烯类和苯丙烷类化合物是散发吸引授粉者信号的主要物质。邹晶晶等^[25]发现萜烯类化合物是12个桂花品种中的主要香气活性物质。章辰飞等研究发现2种杜鹃花中萜烯类物质的组分最多,对花香的贡献最大^[26]。徐瑾等^[27]发现菊花进入盛花期后萜烯类物质达到最高,占总香气成分的37.40%。陈艺荃等^[28]对不同品种的杂交兰香气研究也发现花香主要成分是萜烯类化合物。程劼等^[29]研究发现,萜烯类化合物是蔷薇科植物玫瑰精油头香香气的重要组成成分,使其具有天然香气。周围等^[30]对苦水玫瑰油香气分析也发现单萜类化合物占极大比例。本研究对蔷薇科植物‘白兰地’海棠不同花期的花香检测中共发现了50种挥发化合物,其中萜烯类物质在初花期、盛花期和末花期均占主导地位,相对含量在盛花期达到最高,占总香气成分的37.3%。

诸多对植物开花过程中香气的研究表明,随着花瓣的展开,植物的花香释放会发生变化^[25-27]。孙亚如等^[8]研究发现盛花期是‘单县玫瑰’油用的最佳采收期。徐瑾等^[27]发现菊花在花朵开放过程中香气成分的种类和含量先增多后减少,均与本研究结果相似。本研究中4个时期分别检测出23、30、30、32种挥发性成分,4个时期的挥发性成分的总释放量呈现先上升后下降的趋势,在盛花期达到最高。其中主要成分芳樟醇在初花期相对含量达到最高(25.19%),随着花朵的开放与衰败,芳樟醇释放量逐渐下降。对不同花期与花香成分之间作PCA后也显示芳樟醇在PC1正方向上的贡献较高,虽然释放量下降,但依然是初花期、盛花期和末花期的主要挥发性成分之一。壬醛和 α -法呢烯的在PC1负方向上贡献较大,与大蕾期呈正相关关系; α -法呢烯在大蕾期之后释放量开始下降,但其余3个时期相对含量差别较小,而壬醛仅在大蕾期检测出。PCA结果显示在整个花开放过程中,花香成分释放存在差异,且盛花期和末花期的挥发性成分组成结构较相似。

植物香气的释放不仅于花期有关,也有花朵的器官组成有关,花香的物质基础是花朵不同器官产生的易挥发次生代谢产物,花朵各部分对花香释放的贡献不是等同的,这种空间差异是普遍存在的^[31]。一般认为花瓣是花香挥发物合成及释放的主要部位^[32],但雄蕊、雌蕊、花萼或者其他部分也可能是主要香气来源,或者释放某种具有独特贡献的化合物。本

研究在花瓣、雌蕊(含花萼)和雄蕊中分别检测出28、32、25种挥发性成分。雌蕊的挥发性成分的总释放量最高,花瓣最低,说明雌蕊可能是整朵花香气释放的主要器官。花瓣中主要成分是己酸甲酯、芳樟醇和辛酸甲酯,雌蕊中主要成分是叶醇、乙酸叶醇酯、 α -法呢烯和(E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯,雄蕊中主要成分是甲基庚烯酮、芳樟醇、4-辛酸甲酯、苯乙醇和4-亚甲基异佛尔酮,其中苯乙醇为雄蕊中独有的挥发性成分。主要成分芳樟醇仅在雄蕊和花瓣中检测出,其含量在雄蕊中达到最高,雌蕊中并未检测出芳樟醇。花器官中检测出的共有挥发性成分共12种,但这些成分大多都不是‘白兰地’海棠的主要挥发性成分,主要成分均集中于某一器官。PCA结果也显示,己酸甲酯、乙酸叶醇酯、芳樟醇和 α -法呢烯等主要成分分别与花朵的不同器官高度相关。

4 结论

叶醇、芳樟醇、己酸甲酯、乙酸叶醇酯、甲基庚烯酮和 α -法呢烯为‘白兰地’海棠主要挥发性成分。随着花朵开放,挥发性成分的总释放量呈现先上升后下降的趋势,在盛花期达到最高,不同时期的香气成分种类构成不完全相同,主要以萜烯类和醛酮类为主,分别在盛花期和大蕾期达到最高。盛花期花朵雌蕊是挥发性成分释放的主要花器官,不同花器官的花香成分存在明显差异。

参考文献:

- [1] 陈秀中,王琪.中华民族传统赏花理论探微[J].北京林业大学学报,2001,23(S1):16-21.
CHEN X Z, WANG Q. Studies on Chinese principles in appreciating traditional flowers [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2001, 23(S1):16-21. (in Chinese)
- [2] 王文静,吕思佳,汪庆昊,等.植物花香物质代谢与调控研究进展[J/OL].分子植物育种,2020:1-7.(2020-09-16).<https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20200915.1803.006.html>.
WANG W J, LÜ S J, WANG Q H, et al. Research advance on the metabolism and regulation of plant floral fragrance[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2020: 1-7. (2020-09-16). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20200915.1803.006.html>. (in Chinese)
- [3] SEXTON R, STOPFORD A P, MOODIE W T, et al. Aroma production from cut sweet pea flowers (*Lathyrus odoratus*): The role of ethylene [J]. *Physiologia Plantarum*, 2005, 124(3):381-389.
- [4] DUDAREVA N, PICHERSKY E. Biology of Floral Scent[M]. CRC Press, 2006.
- [5] 施婷婷,杨秀莲,王良桂.‘波叶金桂’花香成分的释放规律[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(2):97-104.

- SHI T T, YANG X L, WANG L G. Study on the aroma component emission pattern of *Osmanthus fragrans* 'Boye Jingui' [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2018, 42 (2) : 97-104. (in Chinese)
- [6] 钱正, 张四杰, 金有权, 等. 柳叶蜡梅叶和花转录组测序及香气合成差异基因的筛选和表达 [J]. *农业生物技术学报*, 2019, 27 (5) : 844-855.
- QIAN Z, ZHANG S J, JIN Y Q, et al. Transcriptome sequencing of leaves and flowers and screening and expression of differential genes in aroma synthesis in *Chimonanthus salicifolius* [J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2019, 27 (5) : 844-855. (in Chinese)
- [7] 张莹, 王雁, 田敏, 等. 不同种兰花香气成分分析 [J]. *分析科学学报*, 2012, 28 (4) : 502-506.
- ZHANG Y, WANG Y, TIAN M, et al. Analysis of aroma components in different orchid varieties [J]. *Journal of Analytical Science*, 2012, 28 (4) : 502-506. (in Chinese)
- [8] 孙亚如, 陈丹凌, 翟玉珍, 等. '单县玫瑰'不同开放阶段花香特性分析 [J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2018, 49 (6) : 958-964.
- SUN Y R, CHEN D L, ZHAI Y Z, et al. Analysis on aroma peculiarity of *Rosa rugosa* 'Shanxian Meigui' during different opening stages [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2018, 49 (6) : 958-964. (in Chinese)
- [9] 黎贵卿, 李区宁, 宋业昌, 等. 茉莉花香气、茉莉花精油及净油挥发性成分的HS-SPME-GC-MS和GC-MS比较分析 [J]. *广西林业科学*, 2020, 49 (1) : 139-144.
- LI G Q, LI Q N, SONG Y C, et al. Analysis on volatile components of jasmine aroma, jasmine essential oil and absolute oil by HS-SPME-GC-MS, GC-MS [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2020, 49 (1) : 139-144. (in Chinese)
- [10] RUÍZ-RAMÓN F, ÁGUILA D J, EGEA-CORTINES M, et al. Optimization of fragrance extraction: Daytime and flower age affect scent emission in simple and double narcissi [J]. *Industrial Crops and Products*, 2014, 52: 671-678.
- [11] BAEK Y S, RAMYA M, AN H R, et al. Volatiles profile of the floral organs of a new hybrid *Cymbidium*, 'sunny bell' using headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry analysis [J]. *Plants (Basel, Switzerland)*, 2019, 8 (8) : 251.
- [12] FRATERNALE D, FLAMINI G, RICCI D, et al. Flowers volatile profile of a rare red apple tree from Marche region (Italy) [J]. *Journal of Oleo Science*, 2014, 63 (11) : 1195-1201.
- [13] 章辰飞, 谢晓鸿, 汪庆昊, 等. 云锦杜鹃不同花期挥发性成分的HS-SPME-GC-MS检测与主成分分析 [J]. *广西植物*, 2020, 40 (7) : 1033-1045.
- ZHANG C F, XIE X H, WANG Q H, et al. Analysis of volatile components of *Rhododendron fortunei* at different flowering stages by HS-SPME-GC-MS and PCA [J]. *Guihaia*, 2020, 40 (7) : 1033-1045. (in Chinese)
- [14] 王洁, 李辛雷, 殷恒福, 等. 茶梅冬星不同花期及花器官挥发性成分 [J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2018, 33 (5) : 904-910.
- WANG J, LI X L, YIN H F, et al. Volatile components in different floral organs and flowering stages of *Camellia sasanqua* 'Dongxing' [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2018, 33 (5) : 904-910. (in Chinese)
- [15] 曹媛媛, 贾斐斐, 吴岐奎, 等. 野茉莉属6个树种不同时期花香成分分析 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43 (4) : 48-56.
- CAO Y Y, JIA F F, WU Q K, et al. Analysis of volatile components in different flowering stages in six species of *Styrax* spp [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 43 (4) : 48-56. (in Chinese)
- [16] ZHAO J, WANG R, HUANG C X, et al. Taxonomic analysis of volatiles emitted by ornamental crabapple flowers [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (4) : 213-218.
- [17] 楚爱香, 汤庚国. 河南垂丝海棠品种的调查与分类 [J]. *江西农业大学学报*, 2008, 30 (6) : 1090-1096.
- CHU A X, TANG G G. Cultivar investigation and classification of *Malus halliana* koehne in Henan Province [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2008, 30 (6) : 1090-1096. (in Chinese)
- [18] MUZHER B M, YOUNIS R A A, EL-HATABI O, et al. Genetic identification of some Syrian local apple (*Malus* sp.) cultivars using molecular markers [J]. *Res. J. Agric. Biol. Sci.*, 2007, 3: 704-713.
- [19] ULUKAN H. The evolution of cultivated plant species: Classical plant breeding versus genetic engineering [J]. *Plant Systematics and Evolution*, 2009, 280 (3) : 133-142.
- [20] 李晓磊. 观赏海棠(*Malus* sp.)花粉特性及花果香气研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- LI X L. Analysis of pollen characteristics of ornamental crabapple (*Malus* sp.) and its flower, fruit aroma[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [21] OMATA A, YOMOGIDA K, NAKAMURA S, et al. Volatile components of apple flowers [J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 1990, 5 (1) : 19-22.
- [22] 张红磊. 牡丹花期、花色及花香的变异研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- ZHANG H L. Study on variation of flowering period, flower color and fragrance of peony[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [23] PRIYA P, YADAV A, CHAND J, et al. Terzyme: A tool for identification and analysis of the plant terpenome [J]. *Plant Methods*, 2018, 14: 4.
- [24] SCHIESTL F P. The evolution of floral scent and insect chemical communication [J]. *Ecology Letters*, 2010, 13 (5) : 643-656.
- [25] 邹晶晶, 蔡璇, 曾祥玲, 等. 桂花不同品种开花过程中香气活性物质的变化 [J]. *园艺学报*, 2017, 44 (8) : 1517-1534.
- ZOU J J, CAI X, ZENG X L, et al. Changes of aroma-active compounds in different cultivars of *Osmanthus fragrans* during flowering [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44 (8) : 1517-1534. (in Chinese)
- [26] 章辰飞, 鲁昌鑫, 汪庆昊, 等. 两种杜鹃不同花期的挥发性成分分析 [J]. *分子植物育种*, 2020, 18 (11) : 3724-3735.
- ZHANG C F, LU C X, WANG Q H, et al. Analysis of volatile compounds in different flowering stages of two kinds of *Rhododendron* [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18 (11) :

- 3724–3735. (in Chinese)
- [27] 徐瑾, 李莹莹, 郑成淑, 等. 菊花不同花期及花序不同部位香气成分和挥发研究 [J]. *西北植物学报*, 2012, 32 (4): 722–730.
- XU J, LI Y Y, ZHENG C S, et al. Studies of aroma compounds in *Chrysanthemum* in different florescence and inflorescence parts and aroma releasing [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32 (4): 722–730. (in Chinese)
- [28] 陈艺荃, 林兵, 钟淮钦, 等. 不同杂交兰品种花朵挥发性成分分析 [J]. 中国细胞生物学学报, 2019, 41 (10): 1901–1908.
- CHEN Y Q, LIN B, ZHONG H Q, et al. Studies on the volatile constituents from different cultivars of *Cymbidium* hybrid [J]. *Chinese Journal of Cell Biology*, 2019, 41 (10): 1901–1908. (in Chinese)
- [29] 程劫, 谢建春, 孙宝国. 国产玫瑰精油的化学成分及香气特征 [J]. *中国食品添加剂*, 2007 (5): 66–70.
- CHENG J, XIE J C, SUN B G. Composition and aromatic characteristics of rose essential oil produced in China [J]. *China Food Additives*, 2007 (5): 66–70. (in Chinese)
- [30] 周围, 周小平, 赵国宏, 等. 中国苦水玫瑰油香气成分的研究 [J]. *色谱*, 2002, 20 (6): 560–564.
- ZHOU W, ZHOU X P, ZHAO G H, et al. Studies of aroma components on essential oil of Chinese kushui rose [J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2002, 20 (6): 560–564. (in Chinese)
- [31] DUDAREVA N, PICHERSKY E, GERSHENZON J. Biochemistry of plant volatiles [J]. *Plant Physiology*, 2004, 135 (4): 1893–1902.
- [32] 向林, 陈龙清. 花香的基因工程研究进展 [J]. *中国农业科学*, 2009, 42 (6): 2076–2084.
- XIANG L, CHEN L Q. Advances in genetic engineering of floral scent [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42 (6): 2076–2084. (in Chinese)

(责任编辑: 于洪杰)