

赵梦瑶, 张立攀, 王春杰, 等. HS-SPME-GC/MS 分析 3 种牡丹花瓣挥发性成分 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 294-302. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020153

ZHAO Mengyao, ZHANG Lipan, WANG Chunjie, et al. Analysis of Volatile Components in Three Peony Petals by HS-SPME-GC/MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(16): 294-302. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020153

· 分析检测 ·

HS-SPME-GC/MS 分析 3 种牡丹花瓣 挥发性成分

赵梦瑶, 张立攀*, 王春杰, 关炳峰, 李 冰, 王俊朋, 王 永
(河南省商业科学研究所有限责任公司, 河南郑州 450000)

摘 要:为解析不同品种牡丹花的香气物质组分及差异, 采用顶空-固相微萃取 (headspace-solid-phase microextraction, HS-SPME) 结合气相色谱-质谱联用 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 对‘丹凤’、‘香玉’、‘海黄’3 种品种牡丹花瓣挥发性成分进行了分析, 并使用 SPSS 22.0 进行方差分析 (analysis of variance, ANOVA), SIMCA14.1 进行主成分分析 (principal component analysis, PCA) 和正交偏最小二乘法-判别分析 (orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)。通过检索 NIST 17 谱库、与文献核对保留指数、查阅相关文献等多种方式, 从 3 种牡丹花瓣中共鉴定出 115 种化合物, 包括醛类 20 种、酮类 3 种、醇类 27 种、酸类 2 种、酯类 22 种、烷烃类 13 种、烯烃类 17 种和其他类 11 种, 3 种牡丹花挥发性成分在种类及含量上存在较大差异。通过 PCA、OPLS-DA 分析, 从 3 种品种牡丹花瓣香气组分中共筛选出 19 种差异成分, ‘丹凤’和‘香玉’之间有 12 种差异成分, ‘香玉’和‘海黄’之间有 10 种差异成分, ‘丹凤’和‘海黄’之间有 12 种差异成分。三种牡丹花中, ‘丹凤’青香味较重, ‘海黄’甜香香韵较为突出, ‘香玉’青香和甜香均比较适中。研究结果对研制不同香型可食用牡丹香精具有重要意义。

关键词:牡丹, 顶空固相微萃取, 气相色谱质谱联用, 主成分分析, 正交偏最小二乘法-判别分析, 差异成分
中图分类号:S685.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-0306(2021)16-0294-09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020153

Analysis of Volatile Components in Three Peony Petals by HS-SPME-GC/MS

ZHAO Mengyao, ZHANG Lipan*, WANG Chunjie, GUAN Bingfeng, LI Bing, WANG Junpeng, WANG Yong
(Henan Commerce Science Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to clarify the aroma components and differences of different varieties of peony flowers, HS-SPME-GC/MS were employed to analyze the volatile compounds in the petals of *Paeonia ostii* T.Hong et J.X.Zhang, *Paeonia suffruticosa* ‘Xiang yu’ and ‘P.High Noon’. Analysis of variance (ANOVA) made by SPSS 22.0, principal component analysis (PCA) and orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) made by SIMCA14.1 were all applied to find differential components of the volatile compounds. By searching of NIST 17 mass spectra library, comparing the retention index with those in the literatures and searching for relative literatures, a total of 115 compounds, including 20 aldehydes, 3 ketones, 27 alcohols, 2 acids, 22 esters, 13 saturated hydrocarbons, 17 olefins and 11 others were characterized, showing great differences among three kinds of Paeonia in species and contents of the aroma components. A total of 19 differential components of three Paeonia petals were found through PCA and OPLS-DA, of which 12 differential

收稿日期: 2021-02-23

基金项目: 河南省科学院重大科研项目聚焦项目 (200111002); 河南省科学院基本科研业务费 (210611061); 河南省科学院基本科研业务费 (200611119); 河南省科学院助推科技成果转化专项 (210211032)。

作者简介: 赵梦瑶 (1992-), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 天然产物提取、风味分析, E-mail: 1105975248@qq.com。

* 通信作者: 张立攀 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 食品化学、天然产物提取, E-mail: lipanzhang@163.com。

components were between *Paeonia ostii* T.Hong et J.X.Zhang and *Paeonia suffruticosa* 'Xiang yu', 10 between *Paeonia suffruticosa* 'Xiang yu' and 'P.High Noon', 12 between *Paeonia ostii* T.Hong et J.X.Zhang and 'P.High Noon'. *Paeonia ostii* T.Hong et J.X.Zhang had a characteristic of green aroma while 'P.High Noon' possessed a sweeter aroma. The aroma of *Paeonia suffruticosa* 'Xiang yu' was moderate compared with the other two species. The results of the study would have great significance to the development of different edible peony flavors.

Key words: peony; headspace solid-phase microextraction; gas chromatography-mass spectrometry; principal component analysis; orthogonal partial least squares-discriminant analysis; differential components

牡丹(*Paeonia suffruticosa* Andr.),又名富贵花、百两金等,是我国传统木本观赏植物,为毛茛科芍药属灌木。牡丹颜色艳丽,雍荣华贵,历来有“国色天香”、“花王”的美誉,被誉为“花中之王”^[1]。牡丹原产于我国,资源丰富,品种繁多,在洛阳、菏泽和兰州等多个地区都有大面积种植,有着极佳的观赏、研究价值。牡丹花中含有维生素、氨基酸、糖类、矿物质以及黄酮等多种对人体有益的营养元素和功能性成分,使其还具有很高的食用、药用保健价值^[2-4]。在牡丹产地,人们有食用牡丹花的历史,常将其制作为茶饮、粥品、牡丹花饼、牡丹花酱等。2013 年国家卫计委批准‘丹凤’牡丹花成为新食品原料,开启了牡丹花食品产业的崭新链条。

香味是衡量食品质量的重要指标,人们在选择食品的过程中,常常会将香味作为主要的参考依据,食品的香味诱人,能够在很大程度上提升其受欢迎程度。因此,现代食品工业中,科学使用香精是一项非常重要的手段^[5-6]。目前市场上牡丹相关食品多存在牡丹特征风味不足的问题,在很大程度上影响和限制了牡丹花食品产业的发展,急需进行牡丹花香精的开发。解析牡丹香味组分,确定香味组分构成是研制香精产品的重要环节。但目前对牡丹的研究,多集中于牡丹苗木育种、籽油、丹皮的生产和精油的提取工艺^[7-10],关于牡丹香气组分的研究相对较少。

固相微萃取是在固相萃取的基础上发展而来的一种新型样品前处理技术,兴起于上世纪 90 年代,集采样、萃取、浓缩、进样于一体^[11-13]。其分析过程简单、快速,分析结果与原始气味更加接近,近年来被广泛用于挥发性物质的分析^[14-15]。本研究采用 HS-SPME-GC/MS 分析手段,对‘丹凤’、‘香玉’和‘海黄’3 种品种的牡丹花瓣挥发性成分进行分析,从分子水平对牡丹花的香气物质进行解析,阐明不同品种牡丹花瓣香气组分,并结合主成分分析(PCA)、正交偏最小二乘法-判别分析(OPLS-DA)统计分析方法,寻找 3 种品种牡丹花瓣香气差异成分,为研制牡丹香精提供依据,更好地促进牡丹花食品产业的健康发展。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

牡丹(‘丹凤’、‘香玉’和‘海黄’) 采自河南省洛

阳祥和牡丹科技有限公司牡丹种植基地;正构烷烃 C₅~C₂₅ 美国 o2si 标准品公司;甲醇(HPLC 级)北京迪马科技有限公司。

电子天平(FA2004) 上海衡际科学仪器有限公司;水浴锅(DF101S) 江苏科析仪器有限公司;手动 SPME 进样器、萃取纤维(65 μmPDMS/DVB) 美国 Supelco 公司;7890A-7000GC/MS Triple Quad 美国 Agilent 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 牡丹花瓣挥发性成分的提取 准确称取 3 g 新鲜花瓣置于 40 mL 顶空瓶中密封,50 °C 水浴下平衡 20 min,将老化过的固相微萃取进样针插入密闭的顶空瓶中,推出萃取头在 50 °C 下吸附 30 min,取出后立即插进气质联用仪进样口中,解析 5 min。平行进行三次实验,结果求平均值。

1.2.2 GC-MS 分析条件 色谱柱为 HP-5MS(30 m×250 μm×0.25 μm),采用程序升温模式,起始温度为 40 °C,保持 1 min,以 3 °C/min 速率升至 100 °C,保持 2 min,再以 2 °C/min 速率升至 110 °C,保持 2 min,再以 10 °C/min 速率升至 270 °C。流速 1 mL/min。进样口温度 250 °C;以 He(99.999%)为载气,流速 1.0 mL/min;分流比为 5:1。

离子源温度 230 °C,电离方式 EI,电离能量 70 eV;四极杆温度 150 °C,传输线温度 250 °C,无溶剂延迟,质量扫描范围为 33~450 amu,采用全扫描模式。

C₅~C₂₅ 正构烷烃采取分流模式进样 1 μL,分流比为 20:1。其他进样条件与样品进样一致。计算保留指数(retention index, RI)如下:

$$RI = 100 \times \left(n + \frac{\lg t_i - \lg t_n}{\lg t_{n+1} - \lg t_n} \right) \quad \text{式 (1)}$$

式中: $\lg t_n$ 和 $\lg t_{n+1}$ 分别为碳数为 n, n+1 的正构烷烃的保留时间的对数; $\lg t_i$ 是出峰在 n 和 n+1 的正构烷之间的 i 化合物的保留时间的对数。

1.3 数据处理

通过 GC-MS 工作站自带的 NIST 17 谱库进行检索,再结合文献和人工解析,以及通过正构烷烃计算保留指数,与文献进行核对,进行定性分析,采用面积归一化法,求出化合物的相对含量。通过 SPSS22.0 进行 ANOVA 分析, SIMCA14.1 进行 PCA 和 OPLS-DA 分析。

2 结果与分析

2.1 牡丹花瓣香气成分 HS-SPME-GC/MS 分析

‘丹凤’、‘香玉’和‘海黄’花瓣中挥发性成分的 GC-MS 分析总离子流色谱图见图 1。

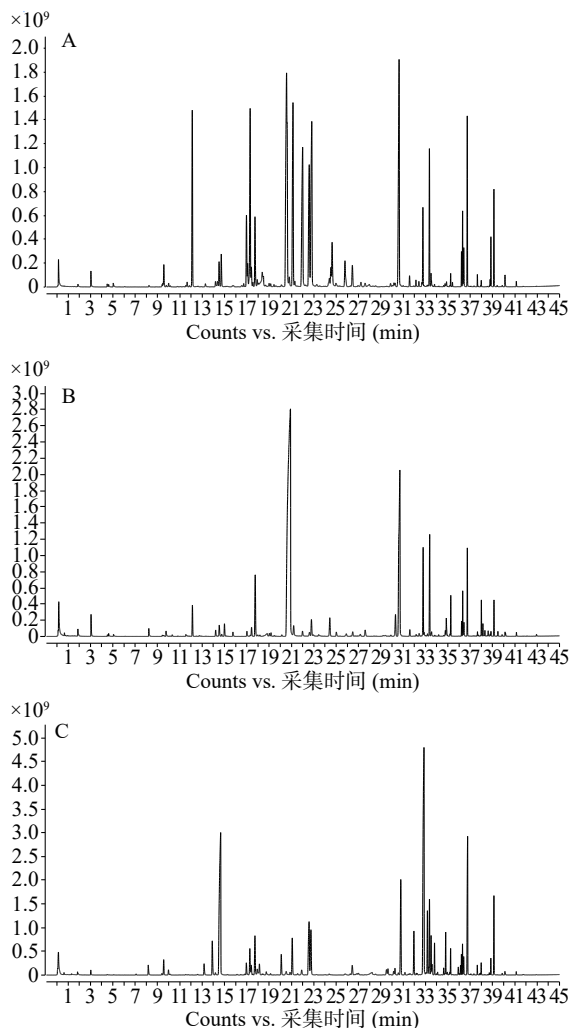


图 1 ‘丹凤’(A)‘香玉’(B)和‘海黄’(C)花瓣 GC/MS 分析总离子流色谱图

Fig.1 Total ion chromatograms of GC/MS for *Paeonia ostii* T.Hong et J.X.Zhang (A), *Paeonia suffruticosa* ‘Xiang yu’ (B) and ‘P.High Noon’ (C)

表 1 为‘丹凤’、‘香玉’和‘海黄’花瓣香气成分 GC-MS 分析的结果,通过 HP-5MS 色谱柱的分析,根据检索 NIST 17 谱库,与文献核对保留指数、查阅相关文献鉴定化合物。3 种品种牡丹花瓣中共检测鉴定出 115 种化合物,包括醛类 20 种、酮类 3 种、醇类 27 种、酸类 2 种、酯类 22 种、烷烃类 13 种、烯烃类 17 种和其他类 11 种。

绘制 3 种牡丹花瓣挥发性成分的维恩图如图 2 所示。

从图 2 可以更加直观地看出 3 种牡丹花瓣挥发性成分之间的相互关系。在检测鉴定出的 115 种化合物中,共有成分有 33 种,重合率仅为 28.7%,说明 3 种牡丹花瓣成分差异较大。‘丹凤’和‘香玉’的共有

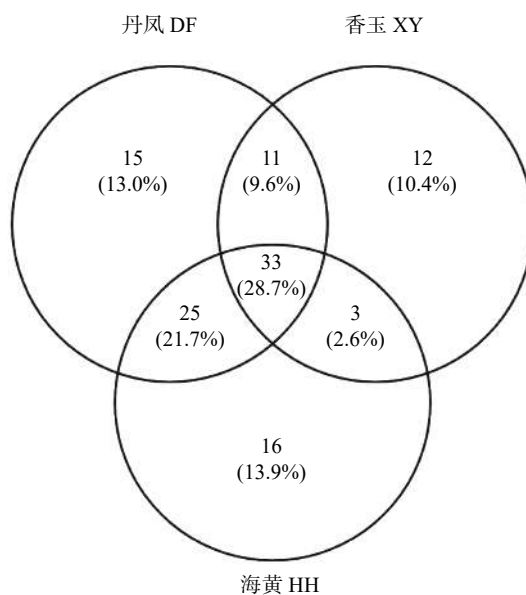


图 2 3 种花瓣挥发性成分维恩图

Fig.2 Venn diagram of the volatile components in three *Paeonia* petals

注: DF 代表‘丹凤’牡丹花, XY 代表‘香玉’牡丹花, HH 代表‘海黄’牡丹花。

成分有 44 种,‘丹凤’和‘海黄’的共有成分有 58 种,‘香玉’和‘海黄’中的共有成分有 36 种。‘丹凤’中有 15 种成分为其他两种牡丹花瓣中所不具有的,为其特征挥发成分。‘香玉’中有 12 种特征挥发成分。‘海黄’中有 16 种特征挥发成分。

从单独的牡丹花品种来看,‘丹凤’中共鉴定出 84 种,‘香玉’中 58 种,‘海黄’中 77 种。‘丹凤’中含量较高的主要化合物由高到低为醛类、醇类、其他类、烷烃类和烯烃类,含量前十的化合物为橙花醇、1,3,5-三甲氧基苯、柠檬醛、橙花醛、(E)-肉桂醛、香茅醇、 β -罗勒烯、(E)-2-壬烯醛、十五烷、十七烷。‘香玉’中含量较高的主要化合物由高到低为醇类、其他类、烷烃类、酯类和烯烃类,含量前十的化合物为香茅醇、1,3,5-三甲氧基苯、十五烷、苯甲酸乙酯、大牛儿烯、十七烷、十三烷、 β -罗勒烯、顺-9-十四碳烯、十四烷。‘海黄’中含量较高的主要化合物由高到低为烯烃类、醇类、醛类、烷烃类、酯类。芳樟醇、(1S,4aR,8aS)-1-异丙基-7-甲基-4-亚甲基-1,2,3,4,4a,5,6,8a-八氢萘、(E)-肉桂醛、十七烷、苯甲酸乙酯、二环大根香叶烯、橙花醛、柠檬醛、石竹烯、7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯-1-醇。

从不同品种间来看,‘丹凤’花瓣中醛类的含量为远远高于‘香玉’和‘海黄’。其中 3 种牡丹花瓣中均有的化合物为己醛、(E)-2-己烯醛、苯甲醛、(E)-2-壬烯醛、橙花醛和柠檬醛,含量之间均有显著性差异 ($P < 0.05$)。‘丹凤’中橙花醛和柠檬醛含量很高,分别为 8.67% 和 9.43%,显著 ($P < 0.05$) 高于‘香玉’和‘海黄’。柠檬醛具有柠檬的清香,存在于柠檬等多种芳

表 1 ‘丹凤’、‘香玉’和‘海黄’花瓣 HS-SPME-GC/MS 分析结果

Table 1 Analysis results of *Paeonia ostii* T.Hong et J.X.Zhang, *Paeonia suffruticosa* ‘Xiang yu’ and ‘P.High Noon’ by HS-SPME-GC/MS

分类	化合物	保留指数		含量			鉴定方式
		计算	文献	‘丹凤’	‘香玉’	‘海黄’	
醛类 Aldehydes	己醛 Hexanal	798	799	0.33±0.01 ^b	0.56±0.01 ^a	0.21±0.01 ^c	MS/RI
	(E)-2-己烯醛 (E)-2-Hexenal	849	854	0.08±0.00 ^a	0.07±0.00 ^b	0.03±0.0 ^c	MS/RI
	苯甲醛 Benzaldehyde	956	958	0.06±0.00 ^c	0.37±0.02 ^b	0.68±0.1 ^a	MS/RI
	2-乙基-2-己烯醛 2-Ethyl-2-hexenal	1007	987	—	0.08±0.00 ^a	—	MS/RI
	苯乙醛 Benzeneacetaldehyde	1041	1050	0.04±0.00 ^a	—	—	MS/RI
	(E)-2-辛烯醛 (E)-2-Octenal	1057	1057	0.03±0.00 ^a	—	0.04±0.02 ^a	MS/RI
	壬醛 Nonanal	1103	1095	0.95±0.01 ^a	0.08±0.01 ^b	—	MS/RI
	(E,Z)-2,6-壬二烯醛 (E,Z)-2,6-Nonadienal	1152	1156	1.83±0.08 ^a	—	0.50±0.01 ^b	MS/RI
	(R)-3,7-二甲基-6-辛烯醛 (R)-3,7-Dimethyl-6-octenal	1153	1152	—	0.20±0.00 ^a	—	MS/RI
	(E)-2-壬烯醛 (E)-2-Nonenal	1159	1161	4.65±0.04 ^a	0.07±0.00 ^c	0.87±0.05 ^b	MS/RI
	(3Z)-3,7-二甲基-3,6-辛二烯醛 (3Z)-3,7-Dimethyl-3,6-octadienal	1164	1170	0.13±0.01 ^a	—	0.05±0.00 ^b	MS/RI
	3,7-二甲基-3,6-辛二烯醛 3,7-Dimethyl-3,6-Octadienal	1182	1184	0.70±0.02 ^a	—	—	MS/RI
	癸醛 Decanal	1204	1214	0.07±0.00 ^a	—	0.02±0.00 ^b	MS/RI
	4-(1-甲基乙基)-苯甲醛 4-(1-Methylethyl)-benzaldehyde	1232	1235	—	—	0.25±0.02 ^a	MS/RI
	橙花醛 Neral	1237	1243	8.67±0.26 ^a	0.57±0.02 ^c	2.51±0.07 ^b	MS/RI
	(E)-肉桂醛 (E)-Cinnamaldehyde	1265	1266	6.94±0.09 ^b	—	9.71±0.61 ^a	MS/RI
	柠檬醛 Citral	1269	1276	9.43±0.80 ^a	0.92±0.01 ^c	2.40±0.30 ^b	MS/RI
	(E,E)-3,7,11-三甲基-2,6,10-十二碳烯醛 (E,E)-3,7,11-Trimethyl-2,6,10-dodecatrienal	1747	1738	0.03±0.00 ^b	—	0.05±0.00 ^a	MS/RI
	2-羟基苯甲醛 2-Hydroxy-benzaldehyde	1039	1041	—	—	0.04±0.01 ^a	MS/RI
	桃金娘醛 Myrtanal	1177	1197	—	—	1.42±0.14 ^a	MS/RI
小计Subtotal			33.94	2.92	18.78		
酮类Ketones	6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one	987	987	0.09±0.00 ^a	—	—	MS/RI
	6,10-二甲基-5,9-十一碳烯-2-酮 6,10-Dimethyl-5,9-undecadien-2-one	1460	1456	0.13±0.01 ^a	0.08±0.00 ^c	0.10±0.00 ^b	MS/RI
	(1R)-(+)-诺菈酮 (1R)-(+)-Nopinone	1135	1142	—	—	0.08±0.01 ^a	MS/RI
	小计Subtotal			0.22	0.08	0.18	
醇类Alcohols	3-甲基-1-丁醇 3-Methyl-1-butanol	729	734	0.07±0.00 ^b	0.19±0.01 ^a	0.20±0.02 ^a	MS/RI
	2-甲基-1-丁醇 2-Methyl-1-butanol	733	736	—	0.08±0.00 ^a	—	MS/RI
	(E)-3-己烯-1-醇 (E)-3-Hexen-1-ol	853	852	0.07±0.00 ^b	0.11±0.01 ^a	—	MS/RI
	1-己醇 1-Hexanol	867	867	0.12±0.00 ^b	0.09±0.00 ^a	—	MS/RI
	6-甲基-5-庚烯-2-醇 6-Methyl-5-hepten-2-ol	995	994	0.06±0.00 ^b	0.24±0.03 ^a	—	MS/RI
	苯甲醇 Benzyl alcohol	1034	1034	0.06±0.00 ^b	0.12±0.03 ^a	0.09±0.01 ^{ab}	MS/RI
	α -甲基苯甲醇 .Alpha.-methyl-benzenemethanol	1060	1057	—	0.05±0.00 ^a	—	MS
	1-辛醇 1-Octanol	1072	1061	0.12±0.00 ^a	—	—	MS/RI
	芳樟醇 Linalool	1099	1098	0.77±0.02 ^b	0.60±0.01 ^b	24.23±0.97 ^a	MS/RI
	苯乙醇 Phenylethyl alcohol	1112	1113	0.02±0.00 ^a	0.20±0.25 ^a	—	MS/RI
	(Z)-3-壬烯-1-醇 (Z)-3-Nonen-1-ol	1154	1153	0.73±0.02 ^a	—	—	MS/RI
	1-壬醇 1-Nonanol	1173	1169	0.17±0.01 ^b	0.10±0.00 ^c	0.37±0.06 ^a	MS/RI
	L- α -松油醇 L-.alpha.-Terpineol	1189	1187	0.03±0.00 ^a	—	—	MS/RI
	7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯-1-醇 7-Methyl-3-methylene-6-octen-1-ol	1217	1221	0.10±0.00 ^b	—	2.08±0.23 ^a	MS/RI
	橙花醇 (Z)-3,7-Dimethyl-2,6-octadien-1-ol	1226	1227	15.14±0.96 ^a	—	0.73±0.03 ^b	MS/RI
	香茅醇 Citronellol	1228	1231	5.96±0.17 ^b	51.19±0.63 ^a	—	MS/RI
	(Z)-3,7-二甲基-3,6-辛二烯-1-醇 (Z)-3,7-Dimethyl-3,6-Octadien-1-ol	1231	1232	0.38±0.01 ^a	—	—	MS/RI
	香叶醇 Geraniol	1253	1256	0.18±0.02 ^b	—	0.87±0.08 ^a	MS/RI
	3-苯基-2-丙烯-1-醇 3-Phenyl-2-propen-1-ol	1303	1306	1.98±0.07 ^a	—	—	MS/RI
	(E)-2-十六烯-1-醇 (E)-2-Hexadecacen-1-ol	1484		0.04±0.00 ^b	0.18±0.01 ^a	—	MS
	(E)-3,7,11-三甲基-1,6,10-十二碳三烯-3-醇 (E)-3,7,11-Trimethyl-1,6,10-dodecatrien-3-ol	1567	1565	0.03±0.00 ^b	—	0.43±0.06 ^a	MS/RI
	左薄荷脑 Levomenthol	1575		—	—	0.04±0.00 ^a	MS
	依兰油醇 tau-Muurolol	1646	1640	—	—	0.31±0.05 ^a	MS/RI
	α -萜澄茄醇 alpha-Cadinol	1659	1658	—	—	0.30±0.03 ^a	MS/RI
顺-9-十四碳烯-1-醇 cis-9-Tetradecen-1-ol	1671	1667	2.15±0.07 ^a	1.23±0.11 ^b	0.34±0.04 ^c	MS/RI	

续表 1

分类	化合物	保留指数		含量			鉴定方式
		计算	文献	‘丹凤’	‘香玉’	‘海黄’	
	3,7,11-三甲基-2,6,10-十二碳三烯-1-醇	1725	1713	0.02±0.00 ^b	—	0.04±0.01 ^a	MS/RI
	3,7,11-Trimethyl-2,6,10-dodecatrien-1-ol						
	(Z)-11-十六烯-1-醇 (Z)-11-Hexadecen-1-ol	1869	1867	0.14±0.02 ^a	0.07±0.00 ^b	—	MS/RI
小计Subtotal			28.34	54.45	30.03		
酸类Acids	苯甲酸 Benzoic acid	1185	1178	0.02±0.00 ^c	0.60±0.03 ^a	0.13±0.02 ^b	MS/RI
	橙花酸 Neric acid	1360	1374	0.15±0.01 ^a	—	—	MS/RI
	小计Subtotal			0.17	0.6	0.13	
酯Esters	苯甲酸甲酯 Benzoic acid, methyl ester	1092	1102	0.19±0.01 ^b	0.32±0.01 ^a	0.23±0.03 ^b	MS/RI
	苯甲酸乙酯 Benzoic acid, ethyl ester	1168	1171	2.37±0.09 ^b	3.54±0.1 ^a	3.90±0.38 ^a	MS/RI
	辛酸乙酯 Octanoic acid, ethyl ester	1199	1190	0.09±0.00 ^a	—	0.05±0.00 ^b	MS/RI
	水杨酸乙酯 Benzoic acid, 2-hydroxy-, ethyl ester	1265	1267	—	0.24±0.00 ^a	—	MS/RI
	3-壬烯酸乙酯 3-Nonenoic acid, ethyl ester	1292	1290	0.03±0.00 ^b	—	0.04±0.01 ^a	MS/RI
	反-草酸甲酯 trans-Geranic acid methyl ester	1323	1324	2.10±0.15 ^a	—	—	MS/RI
	苯甲酸-2-甲基丙酯 Benzoic acid, 2-methylpropyl ester	1325	1346	—	0.24±0.02 ^a	0.14±0.02 ^b	MS/RI
	3,7-二甲基-辛-6-烯酸乙酯 3,7-Dimethyl-oct-6-enoic acid, ethyl ester	1331	1302	0.04±0.00 ^b	—	0.08±0.02 ^a	MS/RI
	苯丙酸乙酯 Benzenepropanoic acid, ethyl ester	1346	1348	—	0.15±0.01 ^a	—	MS/RI
	乙酸香茅酯 6-Octen-1-ol, 3,7-dimethyl-, acetate	1354	1353	—	0.53±0.02 ^a	—	MS/RI
	乙酸橙花酯 2,6-Octadien-1-ol, 3,7-dimethyl-, acetate, (Z)-	1387	1364	0.04±0.00 ^b	—	0.45±0.02 ^a	MS/RI
	香叶酸乙酯 Ethyl geranate	1398	1399	0.24±0.02 ^a	—	0.12±0.01 ^b	MS/RI
	苯甲酸异戊酯 1-Butanol, 3-methyl-, benzoate	1441	1430	0.21±0.01 ^b	0.43±0.01 ^a	0.22±0.02 ^b	MS/RI
	肉桂酸乙酯 (E)-Ethyl cinnamate	1471		—	—	0.04±0.00 ^a	MS/RI
	2-甲基-丁酸3,7-二甲基-6-辛烯基酯	1579	1588	—	0.91±0.06 ^a	0.64±0.02 ^b	MS/RI
	Butanoic acid, 2-methyl-, 3,7-dimethyl-6-octenyl ester						
	十二酸乙酯 Dodecanoic acid, ethyl ester	1596	1597	0.03±0.00 ^c	0.07±0.00 ^b	0.10±0.01 ^a	MS/RI
	异戊酸橙花酯 Butanoic acid, 3-methyl-, 3,7-dimethyl-2,6-octadienyl ester, (Z)-	1610	1613	0.07±0.00 ^a	—	—	MS/RI
	十四烷酸乙酯 Tetradecanoic acid, ethyl ester	1795	1796	0.02±0.00 ^b	—	0.06±0.00 ^a	MS/RI
	十六烷酸甲酯 Hexadecanoic acid, methyl ester	1927	1926	0.02±0.00 ^a	—	—	MS/RI
	3,7-二甲基-6-辛烯-1-醇苯甲酸酯	1934	1930	—	0.18±0.01 ^a	—	MS/RI
	6-Octen-1-ol, 3,7-dimethyl-, benzoate						
邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	1971	1967	—	—	0.04±0.00 ^a	MS/RI	
十六酸乙酯 Hexadecanoic acid, ethyl ester	1994	1997	0.22±0.01 ^a	0.15±0.01 ^b	0.10±0.01 ^c	MS/RI	
小计Subtotal			5.67	6.76	6.21		
烷烃类Alkanes	2,2,4,6,6-五甲基庚烷 2,2,4,6,6-Pentamethyl-heptane	986	995	0.07±0.00 ^b	0.06±0.00 ^c	0.10±0.00 ^a	MS/RI
	十二烷 Dodecane	1199	1200	—	0.19±0.01 ^a	—	MS/RI
	十三烷 Tridecane	1299	1300	0.56±0.08 ^b	1.45±0.07 ^a	0.05±0.00 ^c	MS/RI
	十四烷 Tetradecane	1400	1400	0.14±0.02 ^c	1.21±0.09 ^a	0.46±0.02 ^b	MS/RI
	十五烷 Pentadecane	1500	1500	3.36±0.11 ^b	3.94±0.07 ^a	1.99±0.04 ^c	MS/RI
	十六烷 Hexadecane	1599	1600	0.23±0.01 ^c	1.14±0.06 ^a	0.45±0.07 ^b	MS/RI
	2-甲基-十六烷 2-Methyl-hexadecane	1664	1654	0.45±0.01 ^a	0.46±0.01 ^a	0.26±0.01 ^b	MS/RI
	十七烷 Heptadecane	1699	1700	3.25±0.14 ^b	2.49±0.09 ^c	4.05±0.44 ^a	MS/RI
	3-甲基-十七烷 3-Methyl-heptadecane	1771	1771	0.17±0.02 ^a	0.12±0.01 ^b	0.17±0.02 ^a	MS/RI
	十八烷 Octadecane	1799	1800	0.07±0.01 ^b	1.09±0.10 ^a	0.14±0.01 ^b	MS/RI
	十九烷 Nonadecane	1899	1900	1.50±0.11 ^a	0.93±0.05 ^b	1.69±0.11 ^a	MS/RI
	二十烷 Eicosane	2000	2000	—	0.12±0.01 ^a	—	MS/RI
	二十一烷 Heneicosane	2099	2100	0.09±0.0 ^a	—	0.07±0.01 ^b	MS/RI
	小计Subtotal			9.89	13.2	9.43	
烯烃类Olefins	3,6,6-三甲基-双环[3.1.1]庚-2-烯	928		—	—	0.06±0.00 ^a	MS/RI
	3,6,6-Trimethyl-bicyclo[3.1.1]hept-2-ene						
	反式-β-罗勒烯 trans-β-Ocimene	1036	1049	0.26±0.01 ^a	—	—	MS/RI
	β-罗勒烯 beta-Ocimene	1046	1050	5.32±0.03 ^a	1.35±0.04 ^b	—	MS/RI
	α-葑烯 alpha-Cubebene	1344	1351	—	—	0.16±0.01 ^a	MS/RI
	顺式-β-法尼烯 cis-beta-Farnesene	1387	1442	—	—	0.43±0.07 ^a	MS
(E)-5-十四碳烯 (E)-5-Tetradecene	1393	1387	0.11±0.02 ^a	0.08±0.00 ^b	0.06±0.01 ^b	MS/RI	

续表 1

分类	化合物	保留指数		含量			鉴定方式
		计算	文献	‘丹凤’	‘香玉’	‘海黄’	
	石竹烯 Caryophyllene	1415	1419	0.05±0.00 ^b	—	2.14±0.08 ^a	MS/RI
	葎草烯 Humulene	1454	1455	0.03±0.00 ^b	—	1.62±0.10 ^a	MS/RI
	大牛儿烯 Germacrene D	1480	1476	1.93±0.06 ^b	3.35±0.20 ^a	—	MS/RI
	(1S,4aR,8aS)-1-异丙基-7-甲基-4-亚甲基-1,2,3,4,4a,5,6,8a-八氢萘 (1S,4aR,8aS)-1-Isopropyl-7-methyl-4-methylene-1,2,3,4,4a,5,6,8a-octahydronaphthalene	1484		—	—	22.8±1.25 ^a	MS
	γ-榄香烯 γ-Elemene	1493	1435	0.05±0.00 ^a	—	—	MS
	二环大根香叶烯 Bicyclogermacrene	1494	1495	—	0.10±0.00 ^b	2.84±0.28 ^a	MS/RI
	α-依兰油烯 alpha-Murolene	1498	1440	—	—	0.28±0.06 ^a	MS
	α-法呢烯 α-Farnesene	1512	1508	0.03±0.00 ^b	—	0.49±0.05 ^a	MS/RI
	δ-杜松油烯 δ-Cadinene	1523	1518	0.03±0.00 ^b	—	1.07±0.16 ^a	MS/RI
	8-十七碳烯 8-Heptadecene	1678	1719	0.66±0.09 ^a	0.71±0.01 ^a	0.41±0.01 ^b	MS/RI
	9-十八碳烯 9-Nonadecene	1875	1880	0.64±0.07 ^a	0.15±0.01 ^b	0.18±0.02 ^b	MS/RI
	小计Subtotal			9.11	5.74	32.54	
其他类Others	2-戊基呋喃 2-Pentyl-furan	989	994	0.49±0.01 ^b	—	0.59±0.03 ^a	MS/RI
	反-2-(2-戊烯基)呋喃 trans-2-(2-Pentenyl)furan	1000	1004	0.10±0.00 ^b	—	0.19±0.02 ^a	MS/RI
	反式-芳樟醇氧化物(呋喃型) trans-Linalool oxide (furanoid)	1086	1091	—	—	1.98±0.12 ^a	MS/RI
	3-甲基-2-(2-甲基-2-丁烯基)呋喃 3-Methyl-2-(2-methyl-2-butenyl)-furan	1096	1095	0.24±0.00 ^a	—	—	MS/RI
	四氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃 Tetrahydro-4-methyl-2-(2-methyl-1-propenyl)-2H-pyran	1109	1112	—	0.57±0.02 ^a	—	MS/RI
	(2S,4R)-4-甲基-2-(2-甲基丙-1-烯-1-基)四氢-2H-吡喃 (2S,4R)-4-Methyl-2-(2-methylprop-1-en-1-yl)tetrahydro-2H-pyran	1126	1112	—	0.22±0.01 ^a	—	MS/RI
	草蒿脑 Estragole	1196	1201	0.20±0.01 ^a	0.17±0.01 ^b	—	MS/RI
	丁香酚 Eugenol	1354	1359	0.18±0.01 ^a	—	0.05±0.01 ^b	MS/RI
	1,3,5-三甲氧基苯 1,3,5-Trimethoxy-benzene	1411	1392	11.34±0.64 ^b	15.25±0.52 ^a	0.12±0.03 ^c	MS/RI
	3,5-二甲氧基苯酚 3,5-Dimethoxy-phenol	1477	1472	0.11±0.00 ^a	—	0.03±0.00 ^b	MS/RI
	2-呋喃甲醇, 5-乙烯基四氢-α, α, 5-三甲基-, 顺式 2-Furanmethanol, 5-ethenyltetrahydro-α,α,5-trimethyl-, cis-	1070		—	—	0.63±0.06 ^a	MS
	小计Subtotal			12.66	16.21	3.59	

注: “—”代表未检出; 同行不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$); MS: 气-质结果中检测到; RI: 文献保留指数比对鉴定。

香植物中^[16-17]。橙花醛是一种常见的香气物质, 是柠檬醛的同分异构体^[18]。(E)-肉桂醛也存在于肉桂精油中, 具有抗菌功效^[19]。(E,Z)-2,6-壬二烯醛具有典型的黄瓜清香。苯甲醛具有杏仁味的气味。

酮类共检测鉴定出 3 种, 在 3 种牡丹花瓣中含量都比较低。

醇类物质中 3 种牡丹花共同含有的化合物为 3-甲基-1-丁醇、苯甲醇、芳樟醇、1-壬醇、顺-9-十四碳烯-1-醇。‘海黄’中芳樟醇的含量很高, 为 24.23%, 显著高于另外两种牡丹花。芳樟醇具有青甜的花香气, 是薰衣草、兰花、茉莉花香气的的主要挥发性成分, 也是绿茶香气的主要成分, 是目前食物、日化香精香料的主要来源^[20-21]。橙花醇只在‘丹凤’和‘海黄’中鉴定出, 且在‘丹凤’中含量很高, 为 15.14%。橙花醇具有较强的玫瑰和橙花香气, 作为一类贵重香料广泛用于食品和化妆品等领域。香茅醇只在‘丹凤’和‘香玉’中鉴定出, 在‘香玉’中含量高达 51.19%。有研究表明香茅醇是芍药花挥发性物质中的特质成分。香茅醇具有淡甜的玫瑰味, 可抑制霉菌孢子萌发和菌丝生长, 在储粮保鲜和驱除害虫上具有很好的效果^[22]。醇

类物质在 3 种牡丹花中含量都比较高, 对牡丹花香气贡献较大。袁琴琴等^[23]在研究牡丹花茶汤的风味物质时, 结果显示, 醇类是含量最多的化合物, 对香气有着较大贡献。

酸类物质仅检测鉴定出了苯甲酸和橙花酸两种。橙花酸可由花瓣中的橙花醇经氧化产生。

酯类物质中 3 种牡丹共同鉴定出的化合物有 5 种, 分别为苯甲酸甲酯、苯甲酸乙酯、苯甲酸异戊酸、十二酸乙酯和十六酸乙酯。苯甲酸乙酯的含量相对较高, 在‘丹凤’、‘香玉’和‘海黄’中的含量分别为 2.37%、3.54% 和 3.90%。酯类多具有花香、水果香气, 由醇类和酸类通过酯化反应生成。苯甲酸乙酯具有似依兰油的花香气息^[24], 是调配花香香精的常用香料物质。酯类物质对牡丹的香气具有重要贡献。

鉴定出的烷烃类物质多为 3 种牡丹花共有物质。其中十五烷和十七烷的相对含量较高。烯烃类物质中, 在‘丹凤’和‘香玉’中含量较高的为 β-罗勒烯和大牛儿烯。β-罗勒烯在‘丹凤’和‘香玉’中分别为 5.32% 和 1.35%, 大牛儿烯分别为 1.93% 和 3.35%。这两种化合物在‘海黄’中均未检测到。在‘海黄’中含

量较高的烯烴类物质为(1S,4aR,8aS)-1-异丙基-7-甲基-4-亚甲基-1,2,3,4,4a,5,6,8a-八氢萘、二环大根香叶烯、石竹烯、葎草烯、 δ -杜松油烯,含量分别为22.8%、2.84%、2.14%、1.62%、1.07%。烯烴类化合物中鉴定出的化合物多为萜烯类物质,这是一类以异戊二烯为基本结构单位的天然化合物,多存在于植物中。萜类参与多种植物激素的合成,在植物生长发育和抗逆等生物学过程中起重要的调节作用^[25]。部分萜烯类化合物具有挥发性,对植物的香气起重要贡献作用,如石竹烯具有辛香、木香、柑橘气味、丁香香气^[17],这些香气物质多为植物精油的重要组分,^[26]。

其他类化合物中,仅1,3,5-三甲氧基苯在3种牡丹花中均鉴定出,其含量在‘丹凤’和‘香玉’中较高,分别为11.34%、15.25%,而在‘海黄’中仅为0.12%。1,3,5-三甲氧基苯具有发酵后熟茶的甘醇沉香气息。以间苯三酚为最初的底物,经过3个酶催化形成最终芳香产物1,3,5-三甲氧基苯^[27-28]。但反式-芳樟醇氧化物(呋喃型)仅在‘海黄’中检测出,含量为1.98%。草蒿脑具有大茴香样香气,常存在于芳香植物中。2-戊基呋喃具有青香、豆香,在茶叶香气中常被检测到^[29]。

2.2 主成分分析(PCA)

主成分分析能从总体上反映3种牡丹花瓣的成分差异及3种牡丹花之间的变异度大小。使用SIMCA 14.1对数据进行Par处理(即对数据中心化后除以列变量标准差的算术平方根)后进行自动建模分析见图3。

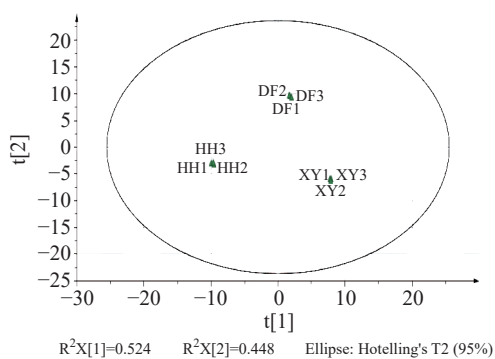


图3 3种牡丹花瓣香气成分PCA分析

Fig.3 PCA analysis of volatile compounds in three *Paeonia* petals

注:DF代表‘丹凤’牡丹花;XY代表‘香玉’牡丹花;HH代表‘海黄’牡丹花。

由图3所示, $R^2X=0.972$, $Q^2=0.940$, $Q^2 \geq 0.5$,说明模型拟合度较好。PCA模型能从总体上反映各样本之间的总体差异及变异度,可用做分析3种牡丹花的聚集、离散程度。从图3可以明显看出3组牡丹花的分布及区间距离差异,说明品种间区别较明显,3种牡丹花瓣所含有的挥发成分差异较大。

2.3 不同牡丹花瓣中的差异成分分析

OPLS-DA作为一种有监督的降维、判别分析方

法,通过正交化将数据信息中与类别信息无关(正交)的数据剔除,更容易排除与分类无关的自变量,筛选出各类样本的特征变量^[30]。变量投影重要性(VIP)是一种筛选信息变量的评价指标,反映了OPLS-DA模型对各个化合物的评分。一般认为,当 $VIP > 1$ 时,则表明该变量对于模型中类别的分类有着较为重要的意义^[31]。采用OPLS-DA模型的主成分1的变量投影重要度(variable importance in the projection, VIP)大于1来寻找差异成分,3种牡丹花的差异成分见表2。

如表2所示,‘丹凤’和‘香玉’之间的差异成分有12种,‘香玉’和‘海黄’之间差异成分有10种,‘丹凤’和‘海黄’之间有12种差异成分。‘丹凤’和‘香玉’差异成分中醛类物质较多,有5种,这些物质主要呈现青香、花香。这与‘丹凤’花瓣较‘香玉’花瓣青香味较重相一致。‘香玉’和‘海黄’之间的差异成分中含有2种醛、3种醇、2种烯烴。其中,(E)-肉桂醛具有肉桂的香气,使得‘海黄’的香气更加温润,柔和。醇类物质多具有甜香,差异成分中醇类物质较多,这与‘海黄’比‘香玉’在甜香香韵上较为突出有较大关系。‘丹凤’和‘海黄’之间差异成分中含有烯烴物质3种,醇类2种。差异成分中的两种醇为香茅醇和芳樟醇,分别具有淡玫瑰香气和青甜的花香气息,‘海黄’中芳樟醇含量远高于‘丹凤’,其香甜气也重于‘丹凤’。

3 结论

本研究采用HS-SPME-GC/MS手段对‘丹凤’、‘香玉’和‘海黄’3种不同品种牡丹花瓣中的香气物质进行了分析,共鉴定出115种化合物,发现牡丹花瓣主要挥发性组分为醛类、醇类、酯类和烯烴类物质。3种品种中‘丹凤’是化合物种类最为丰富的品种。PCA、OPLS-DA分析从3种品种牡丹花瓣香气组中共筛选出19种差异成分,分别为(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛、橙花醛、(E)-肉桂醛、反式-芳樟醇氧化物(呋喃型)、芳樟醇、7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯-1-醇、柠檬醛、橙花醇、香茅醇、十五烷、3-苯基-2-丙烯-1-醇、反-草酸甲酯、1,3,5-三甲氧基苯、石竹烯、 β -罗勒烯、大牛儿烯、(1S,4aR,8aS)-1-异丙基-7-甲基-4-亚甲基-1,2,3,4,4a,5,6,8a-八氢萘、二环大根香叶烯。三种牡丹花中,‘丹凤’青香味较重,‘海黄’甜香香韵较为突出,‘香玉’青香和甜香均比较适中。

通过分析可知,3种品种牡丹花瓣香气成分在化合物种类和含量上都存在很大差异,综合表现在香气上,形成了不同品种牡丹独特的香气特点。对不同牡丹花瓣香气成分进行解析,找到构成香气的关键组分并确定其含量比例,对香精研制至关重要,但由于香气物质组成复杂,含量较低。有些香气物质虽然含量极微,但气味阈值很低,对香气贡献很大。因此,有待进一步采用嗅闻分析等手段筛选关键香气物质,以期

表 2 3 种牡丹花香物质差异成分

Table 2 Differential components of three Paeonia petals

‘丹凤’×‘香玉’ DF×XY	‘香玉’×‘海黄’ XY×HH	‘丹凤’×‘海黄’ DF×HH
(E,Z)-2,6-壬二烯醛 (E,Z)-2,6-Nonadienal		
(E)-2-壬烯醛 (E)-2-Nonenal		
橙花醛 Neral	橙花醛 Neral	橙花醛 Neral
(E)-肉桂醛 (E)-Cinnamaldehyde	(E)-肉桂醛 (E)-Cinnamaldehyde	(E)-肉桂醛 (E)-Cinnamaldehyde
	芳樟醇 Linalool	反式-芳樟醇氧化物(呋喃型) trans-Linalool oxide (furanoid)
	7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯-1-醇 7-Methyl-3-methylene-6-octen-1-ol	芳樟醇 Linalool
		7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯-1-醇 7-Methyl-3-methylene-6-octen-1-ol
柠檬醛 Citral		
橙花醇 (Z)-3,7-Dimethyl-2,6-octadien-1-ol		
香茅醇 Citronellol	香茅醇 Citronellol	香茅醇 Citronellol
	十五烷 Pentadecane	十五烷 Pentadecane
3-苯基-2-丙烯-1-醇 3-Phenyl-2-propen-1-ol		
反-草酸甲酯 trans-Geranic acid methyl ester		
1,3,5-三甲氧基苯 1,3,5-Trimethoxy-benzene	1,3,5-三甲氧基苯 1,3,5-Trimethoxy-benzene	1,3,5-三甲氧基苯 1,3,5-Trimethoxy-benzene
	石竹烯 Caryophyllene	石竹烯 Caryophyllene
β -罗勒烯 beta-Ocimene		
大牛儿烯 Germacrene D	大牛儿烯 Germacrene D	大牛儿烯 Germacrene D
		(1S, 4aR, 8aS)-1-异丙基-7-甲基-4-亚甲基-1,2,3,4,4a, 5,6,8a-八氢萘 (1S,4aR,8aS)-1-Isopropyl-7-methyl-4-methylene-1,2,3,4,4a,5,6,8a-octahydronaphthalene
	二环大根香叶烯 Bicyclogermacrene	二环大根香叶烯 Bicyclogermacrene

注: ‘丹凤’×‘香玉’表示该化合物在‘丹凤’与‘香玉’相比时存在的差异物质; ‘香玉’×‘海黄’表示该化合物在‘香玉’与‘海黄’相比时存在的差异物质; ‘丹凤’×‘海黄’表示该化合物在‘丹凤’与‘海黄’相比时存在的差异物质。

开发出香气逼真的牡丹香精产品, 促进牡丹食品产业的发展。

参考文献

- [1] 狄飞达, 张勃龙, 刘一静, 等. 牡丹花食药成分及加工研究进展[J]. 农产品加工, 2020(12): 88-89, 92.
- [2] 高姗, 李妮妮, 佟长青, 等. 牡丹活性成分研究进展[J]. 农产品加工, 2019(6): 76-78.
- [3] Zhang C C, Geng C A, Huang X Y, et al. Antidiabetic stilbenes from peony seeds with PTP1B, α -glucosidase, and DPP-IV inhibitory activities[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(24): 6765-6772.
- [4] Zhang F, Qu J, Kiran T, et al. Purification and identification of an antioxidative peptide from peony (*Paeonia suffruticosa* Andr.) seed dreg[J]. *Food Chemistry*, 2019, 285: 266-274.
- [5] 赵印泉, 周斯建, 彭培好, 等. 植物花香代谢调节与基因工程研究进展[J]. *热带亚热带植物学报*, 2011, 19(4): 381-390.
- [6] 田红玉, 陈海涛, 孙宝国, 等. 食品香料香精发展趋势[J]. *食品科学技术学报*, 2018, 36(2): 1-11.
- [7] Chen J H, Qi W, Hong B Z, et al. Light shading improves the yield and quality of seed in oil-seed peony (*Paeonia ostii* Feng Dan)[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(7): 1631-1640.
- [8] Song C W, Wang Q, Teixeira D, et al. Identification of floral fragrances and analysis of fragrance patterns in herbaceous peony cultivars[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2018, 143(4): 248-258.

- [9] Luo X N, Yuan M, Li B J, et al. Variation of floral volatiles and fragrance reveals the phylogenetic relationship among nine wild tree peony species[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2020, 35(2): 1-15.
- [10] 张会, 郭磊, 王军民, 等. GC-MS 用于花果香气成分研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(5): 213-219.
- [11] 武艺, 胡建忠, 韩雪, 等. 不同海拔及品种的紫斑牡丹精油成分对比[J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(8): 150-160.
- [12] 王凤丽, 胡奇杰, 王东旭, 等. 新型固相萃取技术在食品安全检测中的应用进展[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(23): 214-218.
- [13] Kumar A, Gaurav, Malik A K, et al. A review on development of solid phase microextraction fibers by sol-gel methods and their applications[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, 610(1): 1-14.
- [14] Suklje K, Carlin S, Stanstrup J, et al. Unravelling wine volatile evolution during Shiraz grape ripening by untargeted HS-SPME-GC \times GC-TOFMS[J]. *Food Chemistry*, 2019, 277(MAR. 30): 753-765.
- [15] Xu L, Liu H, Ma Y, et al. Comparative study of volatile components from male and female flower buds of *Populus \times tomentosa* by HS-SPME-GC-MS[J]. *Natural Product Letters*, 2019, 33(14): 2105-2108.
- [16] 何朝飞, 冉玥, 曾林芳, 等. 柠檬果皮香气成分的 GC-MS 分析[J]. *食品科学*, 2013, 34(6): 175-179.
- [17] 郭向阳. 6 种食用芳香植物挥发性成分的 GC-MS/GC-O 分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(18): 299-307.
- [18] 涂勋良, 阳姝婷, 李亚波, 等. 8 个不同柠檬品种果皮香气成

- 分的 GC-MS 分析[J]. *植物科学学报*, 2016, 34(4): 630-636.
- [19] 王安可, 毕毓芳, 温星, 等. 4种芳香植物精油对竹林病原真菌的抗菌性[J]. *林业科学*, 2020, 56(6): 59-67.
- [20] Ho C T, Zheng X, Li S M. Tea aroma formation[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2015, 4(1): 9-27.
- [21] 吴克刚, 赵欣欣, 段雪娟, 等. 芳樟醇气相抗菌活性与作用机制[J]. *食品科学*, 2020, 41(1): 61-67.
- [22] 郑伟颖, 俞志刚, 陈延辉, 等. HS-SPME/GC-MS 法分析5个不同品种芍药花挥发性成分[J]. *化学研究与应用*, 2016, 28(3): 355-359.
- [23] 袁琴琴, 刘文营. 不同浸泡方式下牡丹花茶汤滋味和风味的特征差异[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(21): 273-280.
- [24] 马越, 谢国莉, 韩玛莉娜, 等. 皇冠梨香气成分气相色谱-质谱联用分析[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(14): 206-212.
- [25] 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.
- [26] 许明君, 傅力, 刘晓翠, 等. 凤凰单丛茶挥发性香气成分提取工艺研究[J]. *食品工业*, 2014, 35(3): 95-98.
- [27] 张静, 周小婷, 胡立盼, 等. SPME-GC-MS 测定不同品种牡丹花挥发性物质成分分析[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(4): 136-143.
- [28] Lei G M, Li J, Zheng T, et al. Comparative chemical profiles of essential oils and hydrolate extracts from fresh flowers of eight *Paeonia suffruticosa* Andr. cultivars from central China[J]. *Molecules*, 2018, 23(12): 1-16.
- [29] 曾亮, 傅丽亚, 罗理勇, 等. 不同品种和花期茶树花挥发性物质的主成分和聚类分析[J]. *食品科学*, 2015, 36(16): 88-93.
- [30] 王俊, 许多宽, 肖勇, 等. 基于化学指标的烟叶产区正交偏最小二乘判别分析[J]. *中国烟草科学*, 2017, 38(1): 91-96.
- [31] 李俭, 钟八莲, 姚锋先, 等. 顶空气相色谱-质谱法分析3种柚子果皮精油成分[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(24): 173-180.