

桃及其主要近缘种花挥发性物质成分的鉴定 与香气特征分析

李桂芝^{1,2}, 吴金龙^{1,2}, 王力荣^{1,3}

(¹中国农业科学院郑州果树研究所/国家园艺种质资源库/河南省果树瓜类生物学重点实验室, 郑州 450000; ²中国农业科学院中原研究中心, 河南新乡 453000; ³中国农业科学院西部农业研究中心, 新疆昌吉 831100)

摘要: 以‘光核桃 029-1’‘红根甘肃桃 1 号’‘帚形山桃’‘新疆黄肉’‘桃形扁桃’‘中碧早香菊’‘早上海水蜜’和‘探春’为试材, 利用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术 (HS-SPEM-GC-MS) 检测桃花挥发性物质成分, 并通过气味活性值 (OAV, Odor activity value)、主成分分析 (PCA, principal component analysis) 和正交偏最小二乘-判别分析 (OPLS-DA, orthogonal partial least squares-discriminant analysis) 鉴定不同样本的特征香气和主要香气物质。结果表明, 8 份桃花中共鉴定出 14 类 471 种挥发性物质, 其中物质种类最为丰富的是杂环化合物、萜类和酯类, 分别为 78 种、77 种和 66 种, 而物质含量最高是杂环化合物、酮类和醇类物质, 总含量分别为 4473460.22 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、539998.06 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、480975.72 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 基于 OAV 值, 以变量投影重要性 (VIP, Variable importance in projection) > 1 , $P < 0.05$ 为标准, 筛选到 15 种关键差异挥发性物质, 其中丁基苯的 VIP 值最高 (2.72), 其次是大马士酮 (2.50); 通过香气特征分析, 发现青草香、脂肪香和蜡味是桃花中主要的香气特征, 其中‘光核桃 029-1’的香气类型以青草香、脂肪香、蜡味、甜瓜香、黄瓜香为主, 坚果香为辅, ‘红根甘肃桃 1 号’‘中碧早香菊’的香气类型以青草香、脂肪香、蜡味、甜瓜香、黄瓜香、果香为主, 清新、药草香、坚果香为辅, ‘帚形山桃’的香气类型以青草香、脂肪香、蜡味、甜瓜香、黄瓜香、果香、坚果香为主, 清新、药草香为辅。

关键词: 桃花; 挥发性成分; 顶空固相微萃取-气相质谱联用技术

Identification of Volatile Compounds and Analysis of Aroma Characteristics in Flowers of Peach and Its Related Species

LI Guizhi^{1,2}, WU Jinlong^{1,2}, WANG Lirong^{1,3}

(¹Zhengzhou Fruit Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Horticulture Germplasm Resources Center/Henan Provincial Key Laboratory of Fruit and Cucurbit Biology, Zhengzhou 450000; ²Zhongyuan Research Center, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453000, Henan; ³Institute of Western Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji 831100, Xinjiang)

Abstract: ‘Guanghetao029-1’ ‘Honggengansutao1’ ‘Zhouxingshantao’ ‘Xinjianghuangrou’ ‘Taoxingbiantao’ ‘Zhongbizaoxiangju’ ‘Zaoshanghaishuimi’ and ‘Tanchun’ were used as experimental materials. Headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry was used to detect volatile compounds. The main aroma substances of different samples were identified by the odor activity value (OAV), principal component analysis (PCA) and orthogonal

收稿日期: 2024-11-12

网络出版日期:

URL:

第一作者研究方向为桃种质资源香气评价与利用, E-mail: lgz_05@163.com

通信作者: 吴金龙, 研究方向为桃种质资源与品质调控, E-mail: wujinlong@caas.cn

王力荣, 研究方向为桃种质资源与遗传育种, E-mail: wanglirong@caas.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFE0105400); 中国农业科学院科技创新工程 (CAAS-ASTIP-ZFRI-01); 河南省顶尖人才培养计划 (244500510019)

Foundation projects: National Key Research and Development Program of China (2023YFE0105400); Agricultural Science and Technology Innovation Program of Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ASTIP-ZFRI-01); Top Talent Training Program in Henan Province (244500510019)

partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA). The results showed that a total of 471 volatile substances in 14 categories were identified in eight peach blossom samples. Among them, heterocyclic compounds, terpenoids and esters were the most abundant, with 78, 77 and 66 species, respectively. The highest content of heterocyclic compounds, ketones and alcohols were 4473460.22 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 539998.06 $\mu\text{g}/\text{kg}$ and 480975.72 $\mu\text{g}/\text{kg}$, respectively. Based on the odor activity value (OAV), 15 key aroma components were screened with variable importance in projection (VIP)>1 and $P<0.05$, among which the VIP value of Butylbenzene was the highest (2.72), followed by β -damascenone (2.50). Through analysis of aroma characteristics, it was found that the aroma of green, fatty and waxy is the main characteristic of peach blossom. The aroma types of 'Guanghetao029-1' were mainly green, fatty, waxy, melon and cucumber, supplemented by nutty aroma. The aroma types of 'Honggengansutao1' and 'Zhongbizaoxiangju' were mainly green, fatty, waxy, melon, cucumber and fruit, supplemented by fresh, herbal and nutty aromas. The aroma types of 'Zhouxingshantao' are mainly green, fatty, waxy, melon, cucumber, fruit and nutty, supplemented by fresh and herbal aromas.

Key words: peach blossom; volatile components; headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography and mass spectrometry

花香是由多种挥发性有机小分子 (VOC, volatile organic compounds) 组成的动态混合物, 这些化合物根据其化学结构, 主要可分为萜烯类、脂肪酸衍生物、苯环/苯丙素类、C5-支链化合物、含氮和含硫化合物等^[1], 它们共同构成了花朵独特的香气。其中萜烯类和苯环/苯丙素类化合物是花香的主要成分^[2-3]。花香不仅能够吸引昆虫, 帮助植物完成授粉, 而且其含有的某些成分还具备驱虫和抗菌的功能, 为植物提供了额外的保护, 使其免遭病虫害的侵扰^[4]。除此之外, 花的香气成分还在医学、香料、调味品等领域具有重要价值^[5]。因此, 对花香的研究获得越来越多的关注。

桃 (*Prunus persica* (L.) Batsch) 在中国的栽培历史悠久, 且桃花在中国传统文化中占有重要地位^[6-7], 逐渐成为现代园艺和景观设计中的热门选择^[8]。目前对桃花的研究集中于花型^[9-11]、花色^[12], 也有一些学者对桃花中含有的营养物质进行深入分析^[13], 对桃花挥发性物质研究相对较少。已有研究揭示了桃花花型的遗传模式, 其中桃花型的铃型 (Non-showy) 和蔷薇型 (Showy) 受一对等位基因控制, 铃型 (Sh) 对蔷薇型 (sh) 为显性^[14-15], 菊花型的形成则由两对隐性基因 (chchch2ch2) 控制^[16]。桃花的颜色以粉红色为主, 另外还包括白色、红色和镶嵌杂色等, 花瓣的颜色深浅与花青素的含量紧密相关^[17-18]。此外, 桃花中还富含多种化学成分, 包括多糖、氨基酸、酚类、类胡萝卜素和挥发油等^[13,19]。王春玲等^[20]采用顶空动态采集法与自动热脱附-气相色谱/质谱法分析技术相结合的方法在山桃花盛开期释放的花香中共鉴定出 43 种挥发性物质, 根据化学结构可分为苯形烃类、醇类、醛类、萜烯类、酮类、脂肪烃类、酯类和其它共 8 大类。其中, 山桃香气的主要成分为 1,3-二甲基苯、2-乙基-1-己醇、乙苯、对二甲苯、甲基辛醚, 而其它苯形烃类和醇类物质也是山桃重要的组成成分; 杜秀娟等^[21]对不同坡向和海拔高度的桃花挥发性物质进行分析, 发现优势挥发性物质如十二烷、十四烷、十五烷、甲苯、己醛等在所有样本中都产生; Zhao 等^[22]利用电子鼻将 '甘肃桃 2 号' '帚形山桃' 和 '新疆黄肉' 的花香特征分别归类为第一、第二和第三类, 前三类与

第四类中的‘探春’‘迎春’‘满天红’等品种相比显示出明显不同，主要体现在 W1S（甲烷）、W1W（硫化氢）和 W5S（氮氧化物）的响应值存在显著性差异。虽然前人对桃花香气的研究已经取得了一定的成果，鉴定出多种挥发性物质，但品种间挥发性物质香气特征仍需进一步的深入研究。

因此，本研究选用 3 份野生近缘种‘光核桃 029-1’‘红根甘肃桃 1 号’‘帚形山桃’，1 份桃与扁桃的种间杂种‘桃形扁桃’，3 份栽培品种‘新疆黄肉’‘早上海水蜜’和 2 份观赏品种‘中碧早香菊’‘探春’的桃花作为研究对象，通过使用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术（HS-SPME-GC-MS，headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry），对这 8 种不同桃花种质的香气成分进行测定。进一步结合多元统计分析方法，对这些桃花的香气成分进行了深入的比较研究，筛选不同桃花品种间关键香气差异成分，有助于了解不同桃花品种的香气特性，并为优良桃花品种的选育及其多元化开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究选用的试验材料为种植于中国农业科学院郑州果树研究所国家桃种质资源圃的 8 份桃及其近缘种，分别是光核桃 029-1、红根甘肃桃 1 号、帚形山桃、新疆黄肉、桃形扁桃、中碧早香菊、早上海水蜜、探春。2023 年 2-3 月，取盛花期整花，带回实验室，置于液氮中速冻，于-80℃冰箱中保存备用。

1.2 表型数据的调查

2023 年 2-3 月对 8 份桃种质花形态进行调查，参考《桃种质资源描述规范和数据标准》^[23]方法。

1.3 挥发性成分的提取

SPME 萃取头选用 120 μm DVB/CWR/PDMS，每次采样前在 250℃下老化 5 min。若为新的萃取头，在萃取前老化 2 h。从-80℃冰箱中取出样品进行液氮研磨，涡旋混合均匀，每个样本称取约 500 mg 于顶空瓶中，分别加入饱和 NaCl 溶液，10 μL（50 μg/mL）内标（3-己酮）溶液。在 60℃恒温条件下，震荡 5 min，萃取头插入样品顶空瓶，顶空萃取 15 min，于 250℃下解析附 5 min，然后进行 GC-MS 分离鉴定。

1.4 气相色谱-质谱联用分析

气质联用仪型号为 GC-MS/MS 8890-7000D（Agilent 公司，美国）。色谱柱为 DB-5MS 毛细管柱（30 m × 0.25 mm × 0.25 μm，Agilent 公司，美国）。程序升温：40℃保持 3.5 min，以 10℃/min 升至 100℃，再以 7℃/min 升至 180℃，最后以 25℃/min 升至 280℃，保持 5 min；载气为高纯氦气，恒流流速 1.2 mL/min，进样口温度 250℃，不分流进样。质谱条件：电子轰击离子源（EI），离子源温度 230℃，四级杆温度 150℃，质谱接口温度 280℃，电子能量 70 eV，扫描方式为选择离子检测模式（SIM），定性定量离子精准扫描^[24]。

1.5 挥发性物质成分定量分析

使用内标法进行挥发性物质成分定量分析，计算公式为：

$$\text{挥发性化合物的含量 } (\mu\text{g/kg}) = \frac{\text{挥发性化合物的峰面积} \times \text{内标溶剂质量 } (\mu\text{g})}{\text{内标溶液峰面积} \times \text{样品的质量 } (\text{kg})}$$

1.6 气味活性值

气味活性值 (OAV, Odor activity value) 是指测定的化合物浓度或含量与该化合物的阈值之比, 以此来表示该化合物对样本整体香气的贡献度。根据不同物质在水中的阈值^[25], 以及定量物质含量计算各物质的 OAV, 计算公式为:

$$\text{气味活性值 (OAV)} = \frac{\text{挥发性化合物的含量 } (\mu\text{g/kg})}{\text{挥发性化合物在水中的阈值 } (\mu\text{g/kg})}$$

1.7 数据处理与分析

使用 Excel 2021 和 IBM SPSS Statistics 27 对数据进行整理和统计分析。使用 Origin 2022 软件制作扇形图、柱状图和雷达图。使用迈维云平台 (Metware Cloud, <https://cloud.metware.cn>) 进行 UpSet 分析、主成分分析 (PCA, principal component analysis)、正交偏最小二乘-判别分析 (OPLS-DA, orthogonal partial least squares-discriminant analysis)、火山图绘制以及聚类热图制作。

2 结果与分析

2.1 桃花表型性状分析

对 8 份桃及其近缘种花的形态特征进行分析 (表 1), 共有两种花型, 除 ‘中碧早香菊’ 是菊花形外, 其余 7 份桃花为蔷薇形。花色共分为 3 种, 从浅到深依次为: 浅粉色的 ‘光核桃 029-1’ ‘红根甘肃桃 1 号’ ‘帚形山桃’ ‘中碧早香菊’ 和 ‘早上海水蜜’, 粉色的新疆黄肉, 粉红色的 ‘桃形扁桃’ 和 ‘探春’。在嗅闻时, ‘光核桃 029-1’ ‘红根甘肃桃 1 号’ ‘帚形山桃’ 和 ‘中碧早香菊’ 有较强的香气, 而 ‘新疆黄肉’ ‘桃形扁桃’ ‘早上海水蜜’ 和 ‘探春’ 香气则较淡。

‘光核桃 029-1’ ‘红根甘肃桃 1 号’ ‘帚形山桃’ 是生长在自然环境下的桃的野生近缘种, 与栽培品种相比, 它们的花色较浅, 花冠直径较小, 但具有较强的香气。另外在桃花的整体对比中, 一般表现为大花瓣的蔷薇形居多。如人工培育的观赏品种探春具有重瓣、花朵较大的特点。

表 1 桃及其近缘种花的表型性状

Table 1 Phenotypic traits of flowers in peach and its related species

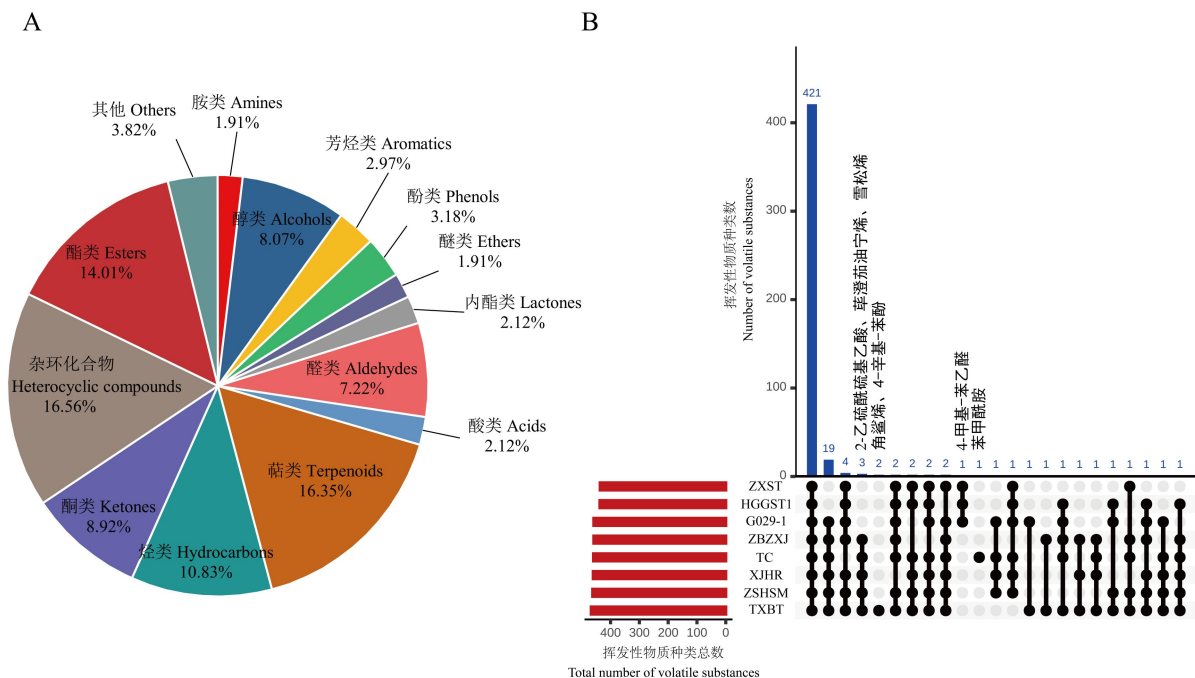
品种名称	缩写	花型	花色	花冠直径 (cm)	花香	物种来源	产地来源
Variety name	Abbreviation	Flower type	Flower color	Corolla diamete	Flower smell	Species	Origin
光核桃 029-1	G029-1	蔷薇形	浅粉	2.2	浓	<i>P.mira</i>	西藏
Guanghetao029-1							
红根甘肃桃 1 号	HGGST1	蔷薇形	浅粉	2.5	浓	<i>P. kansuensis</i>	甘肃宁县
Honggensantao1							
帚形山桃	ZXST	蔷薇形	浅粉	2.6	浓	<i>P. davidiana</i>	河南济源
Zhouxingshantao							
新疆黄肉	XJHR	蔷薇形	粉	2.3	淡	<i>P. ferganensis</i>	新疆喀什

Xinjianghuangrou							
桃形扁桃	TXBT	蔷薇形	粉红	3.2	淡	<i>P. amygdalus</i> × <i>P. persica</i>	不详
Taoxingbiantao							
中碧早香菊	ZBZXJ	菊花形	浅粉	2.9	浓	<i>P. persica</i> × <i>P. kansuensis</i>	河南郑州
Zhongbizaoxiangju							
早上海水蜜	ZSHSM	蔷薇形	浅粉	3.1	淡	<i>P. persica</i>	不详
Zaoshanghaishuimi							
探春 Tanchun	TC	蔷薇形	粉红	4.5	淡	<i>P. persica</i> × <i>P. davidiana</i>	河南郑州

2.2 桃花挥发性成分定性分析

利用 HP-SPME-GC-MS 对 8 份桃花进行挥发性物质测定，共鉴定 471 种挥发性物质，包括 14 类，分别是 9 种胺类、38 种醇类、14 种芳烃类、15 种酚类、9 种醚类、10 种内酯类、34 种醛类、10 种酸类、77 种萜类、51 种烃类、42 种酮类、78 种杂环化合物、66 种酯类和 18 种其他类化合物，杂环化合物和萜类占比较大（图 1A）。‘桃形扁桃’所含的物质种类最多，有 467 种；‘红根甘肃桃 1 号’所含物质种类最少，为 437 种。

有 50 种挥发性物质在 8 份桃花中存在差异（图 1B）。其中，萜类物质最多，为 11 种。其次是酯类物质，为 8 种。胺类、酚类和酸类物质种类最少，均为 3 种物质。另外，2 种挥发性成分仅在‘桃形扁桃’花中检测到，分别为角鲨烯和 4-辛基-苯酚；苯甲酰胺仅在‘探春’花中检测到。与‘帚形山桃’‘红根甘肃桃 1 号’和‘光核桃 029-1’相比，2-乙硫酰硫基乙酸、萜澄茄油宁烯、雪松烯 3 种物质为其他 5 份样品中共有的物质，而 4-甲基-苯乙醛为‘帚形山桃’‘红根甘肃桃 1 号’和‘光核桃 029-1’共有的物质。



B: 黑点表示品种特有挥发性物质，连接线表示品种和品种共有挥发性物质

B: The black dots represent volatile substances unique to the variety, while connecting lines represent volatile substances shared by the variety

图 1 不同桃花的挥发性成分种类

Fig. 1 Volatile components of different peach blossoms

2.3 桃花挥发性成分定量分析

在 8 份桃花的总挥发性物质中, ‘中碧早香菊’ 的挥发性物质含量最高, 总含量为 1312014 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 其次为 ‘光核桃 029-1’, 总含量为 1209243.04 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 然后依次是 ‘桃形扁桃’ ‘帚形山桃’ ‘早上海水蜜’ ‘新疆黄肉’ 和 ‘探春’, ‘红根甘肃桃 1 号’ 香气成分总含量最少, 为 803440.79 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (图 2A)。在所有供试样品中含量均为最高挥发性物质为 4-吡啶甲醛。其次, 在 ‘光核桃 029-1’ 中含量排第二的挥发性物质为 2-甲基-7-外乙烯基双环[4.2.0] 辛-1 (2) -烯, 在 ‘红根甘肃桃 1 号’ ‘探春’ ‘中碧早香菊’ 和 ‘帚形山桃’ 中含量位于第二的挥发性物质为 2-甲基-1-庚-6-酮, 在 ‘桃形扁桃’ ‘新疆黄肉’ 和 ‘早上海水蜜’ 中含量排第二挥发性物质为 苜丁醚。另外, 2-甲基-1-庚-6-酮、苜丁醚含量分别在 ‘光核桃 029-1’ ‘探春’ 和 ‘中碧早香菊’ 中位于第三。

通过对比 8 种桃花的香气成分后发现, 杂环化合物的含量最高, 总含量为 4473460.22 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 是这 8 种桃花的主要挥发性成分。其次是酮类和醇类物质, 总含量分别为 539998.06 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、480975.72 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。在 ‘光核桃 029-1’ ‘红根甘肃桃 1 号’ 和 ‘帚形山桃’ 中, 烃类、酮类和醇类物质的含量也相对较高 (图 2B)。其中, ‘光核桃 029-1’ 中的烃类物质占总挥发性物质的 11.99%, 仅次于杂环化合物。在 ‘红根甘肃桃 1 号’ 和 ‘帚形山桃’ 中, 酮类物质的含量较高, 分别占各自挥发性物质总含量的 7.51% 和 6.85%。在 ‘探春’ 桃花中, 酮类、萜类和醇类物质的挥发性物质含量较高, 分别占各自总挥发性物质含量的 7.14%、6.98% 和 6.41%。而在 ‘中碧早香菊’ 中, 酮类、醚类和醇类物质的含量仅次于杂环化合物, 分别占总挥发性物质含量的 5.9%、5.43% 和 4.97%。对于 ‘桃形扁桃’, 醚类、萜类和酯类物质的挥发性物质含量较高, 分别占总挥发性物质含量的 9.58%、8.01% 和 7.58%。在 ‘新疆黄肉’ 和 ‘早上海水蜜’ 这两种桃花中, 酮类、萜类和酯类物质的含量较高。其中, ‘新疆黄肉’ 中的酮类物质占总挥发性物质含量的 7.55%, 而 ‘早上海水蜜’ 中的萜类物质含量占挥发性物质总含量的 6.97%, 位居第二。内酯类、醚类、酚类、芳烃类、胺类、酸类在桃及其近缘种花中含量较低, 但醚类、酚类在 ‘探春’ ‘桃形扁桃’ ‘新疆黄肉’ ‘中碧早香菊’ ‘早上海水蜜’ 中的含量相对较高。与栽培种相比, 野生近缘种中杂环化合物、烃类和醇类含量较高。而通过栽培种与野生种进行杂交得到的 ‘中碧早香菊’ 中也具有较高含量的杂环化合物和醇类。

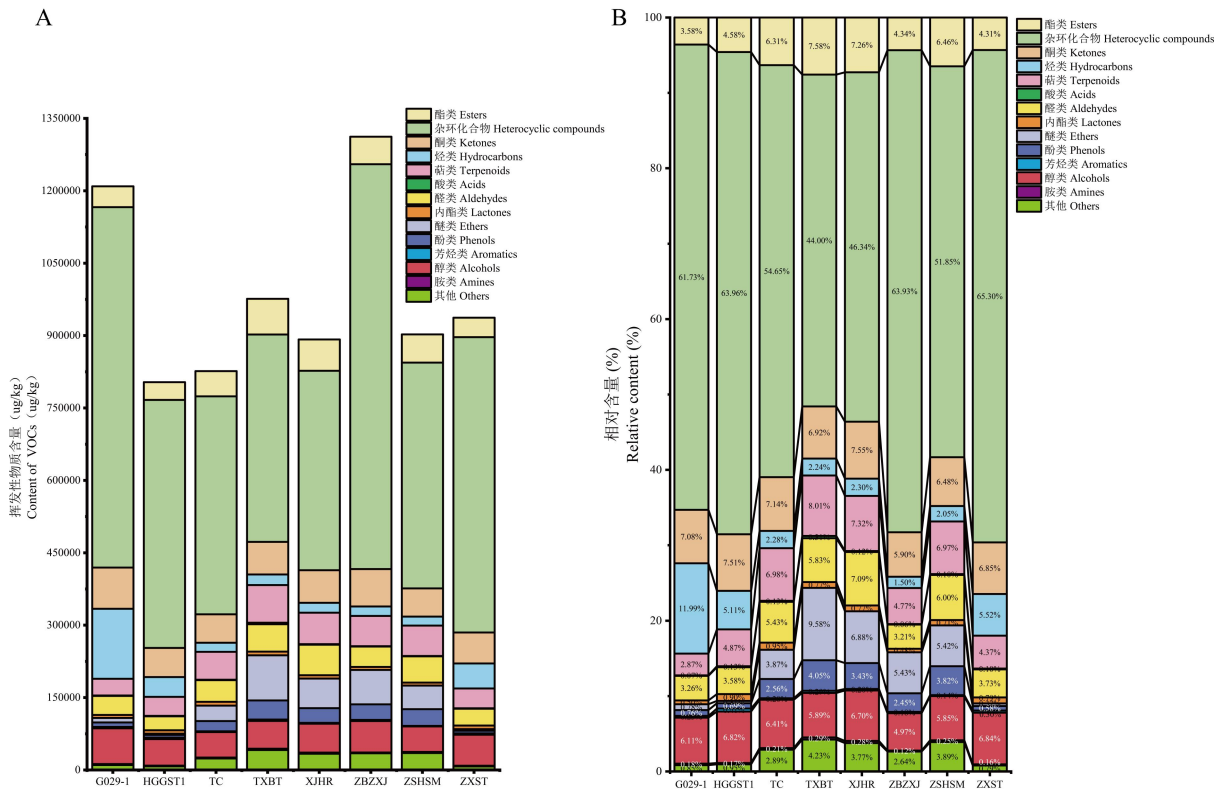


图 2 不同桃花资源的挥发性成分含量

Fig. 2 Volatile components content of different peach blossom resources

2.4 桃花挥发性成分主成分分析和聚类分析

对 8 份桃花共测到的 471 种挥发性物质进行 PCA 分析，主成分 1 (PC1) 的方差贡献率为 27.85%，主成分 2 (PC2) 的方差贡献率为 24.59%，累计方差贡献率为 52.44% (图 3A)。8 份桃花根据主成分被划分到 4 个象限，表明它们之间的挥发性物质存在差异。

进一步通过 VIP 值大于 1 并且 $P < 0.05$ 筛选出对不同桃花有重要贡献的关键差异物 175 种。由图 3B 可知，‘帚形山桃’‘光核桃 029-1’‘红根甘肃桃 1 号’和‘桃形扁桃’中含有较多的差异挥发性物质。虹蚁素、乙酸二氢香芹酯、肉豆蔻油酸等 42 种挥发性物质在‘桃形扁桃’中的含量较高；2-溴十二烷、5,6-二氢-6-戊基-2H-吡喃-2-酮、(E)-4-己烯-1-醇等 58 种挥发性物质在‘红根甘肃桃 1 号’中的含量较高；大马士酮、(R*, R*)-4-甲基- α -(1-甲基-2-丙烯基)-苯甲醇、水杨酸甲酯等 31 种挥发性物质在‘探春’中的含量较高；4-羟基-2-甲基苯乙酮、4-羟基苯甲醛、4-甲基-苯乙醛等 49 种挥发性物质在‘光核桃 029-1’中的含量较高；甲酰苯胺、 β -丁内酯、2-乙酰基噻吩等 40 种挥发性物质在‘帚形山桃’中的含量较高；乙酸苜蓿酯、3-氯-8-甲基-8-氮杂双环[3.2.1]辛烷、异丁酸香叶酯等 20 种挥发性物质在‘新疆黄肉’中的含量较高；十六烷、(E)-2-甲基-2-丁醛、 δ -十一内酯、(E)-3,7-二甲基辛基-2,6-二烯基 2-甲基丁酸酯、1, 2-二甲基-6-丙基-7-基三环[2.6.3.2, 5]癸-2-烯在‘中碧早香菊’中的含量较高；己酸环戊酯、4,8-二甲基-十三烷在早上海水蜜中的含量较高。其中，(E)-2-甲基-2-丁醛、十六烷、 δ -十一内酯、(E)-3,7-二甲基辛基-2,6-二烯基 2-甲基丁酸酯为‘红根甘肃桃 1 号’和‘中碧早香菊’共有的特征挥发性物质。 δ -壬内酯、十四烷、鲸蜡醇、法尼基丙酮、1-壬烯、2-十二烷基-噻吩、环己基二硫、5-环十六烷-1-酮、(E)-十六烷基-2-烯醛为‘红根甘肃桃 1 号’和‘光核桃 029-1’共有的特征挥发性物质。

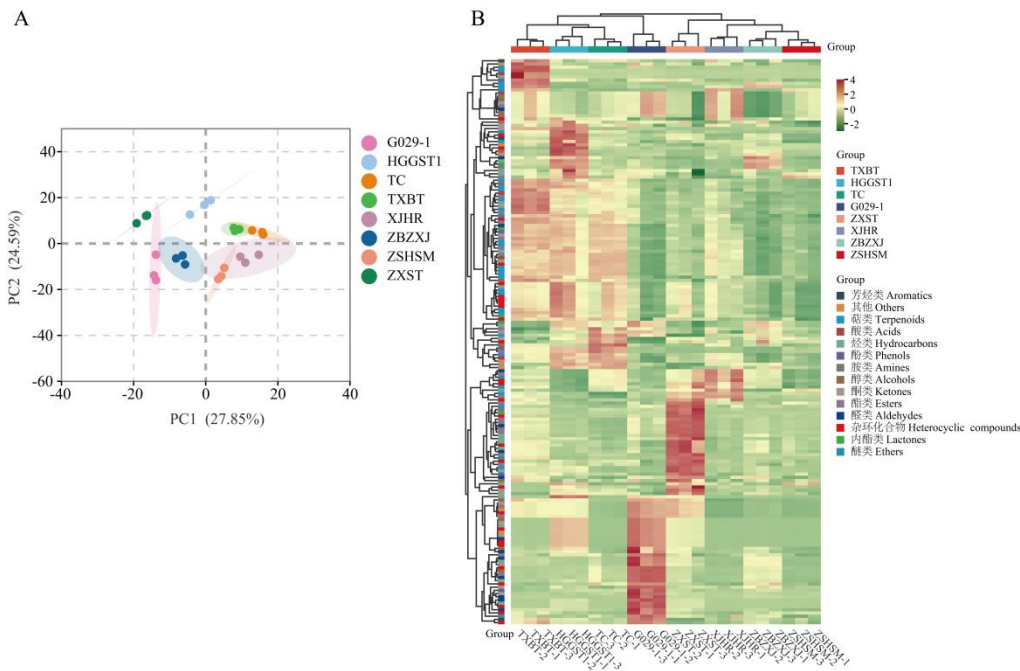


图3 桃花挥发性物质的主成分分析与差异物质聚类

Fig. 3 Principal component and differential substance cluster analysis of volatile substances in peach blossoms

2.5 桃花香气成分构成特点分析

通过计算 OAV 值来评价单个香气对样品整体香气的贡献度, $OAV \geq 1$ 的挥发性组分通常对整体风味具有贡献, 且数值越大其香气的贡献越大^[26]。根据文献报道的香气阈值和呈香类型, 计算不同桃花香气物质的 OAV 值, 以 $OAV \geq 10$ 的挥发性成分为关键香气成分, 结果如表 2 所示, 在检测出的 471 种挥发性物质中, 共有 62 种挥发性物质的 OAV 值大于 10。‘桃形扁桃’中物质最多, 为 54 种; ‘中碧早香菊’中共有 52 种; ‘早上海水蜜’和‘帚形山桃’共有 51 种; ‘探春’和‘新疆黄肉’共有 50 种; ‘光核桃 029-1’共有 49 种; ‘红根甘肃桃 1 号’最少, 共有 47 种。

进一步对 8 份桃花样品中的各 OAV 值进行 OPLS-DA 分析, 由 VIP 值大于 1 并且 $P < 0.05$ 得到 15 种香气物质。如图 4 所示, 丁基苯的 VIP 值最高 (2.72), 其次是大马士酮 (2.50)。在‘光核桃 029-1’中, 主要是大马士酮、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(2E,4Z)-2,4-癸二烯醛、叶醇、2-乙酰基噻吩、(E)-2-己烯醛、E-2-辛烯醛、顺式-6-壬烯-1-醇乙酸酯、(E)-2-己烯醇、愈创木酚、3-丁基异苯并呋喃-1 (3H)-酮、丁基苯; 在‘红根甘肃桃 1 号’‘探春’‘桃形扁桃’中, 主要是大马士酮、(2E,4Z)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、叶醇、2-乙酰基噻吩、(E)-2-己烯醛、水杨酸甲酯、愈创木酚、(E)-2-己烯醇、顺式-6-壬烯-1-醇乙酸酯、3-丁基异苯并呋喃-1 (3H)-酮、E-2-辛烯醛; 在‘新疆黄肉’中, 主要是大马士酮、(2E,4Z)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、叶醇、2-乙酰基噻吩、(E)-2-己烯醛、(E)-2-己烯醇、顺式-6-壬烯-1-醇乙酸酯、愈创木酚、3-丁基异苯并呋喃-1 (3H)-酮; 在‘中碧早香菊’中, 主要是大马士酮、(2E,4Z)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、2-乙酰基噻吩、叶醇、(E)-2-己烯醛、顺式-6-壬烯-1-醇乙酸酯、愈创木酚、E-2-辛烯醛、(E)-2-己烯醇、3-丁基异苯并呋喃-1 (3H)-酮; 在‘早上海水蜜’中, 主要是大马士酮、(2E,4Z)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、叶醇、2-乙酰基噻吩、(E)-2-己烯醛、(E)-2-己烯醇、顺式-6-壬烯-1-醇乙酸酯、愈创木酚、水杨酸甲酯、3-丁基异苯并呋喃-1 (3H)-酮; 在‘帚形山桃’中, 主要是大马士酮、(2E,4Z)-2,4-

癸二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、2-乙酰基噻吩、叶醇、顺式-6-壬烯-1-醇乙酸酯、(E)-2-己烯醛、愈创木酚、(E)-2-己烯醇、十一醛、E-2-辛烯醛、3-丁基异苯并呋喃-1(3H)-酮、甲基丙烯酸甲酯、。

根据上述 15 种挥发性物质的香气特征，将这些呈香物质主要分为 9 个香气类型，即青草香、脂肪香、蜡味、清新、药草香、坚果香、甜瓜香、黄瓜香和果香，相似的香气化合物的香气特征 OAV 值累加，得出 8 份桃花各特征风味的强弱描述，并绘制 8 份桃花的香气雷达图（图 5）。「光核桃 029-1」中主要的香气类型为青草香、脂肪香、蜡味、坚果香、甜瓜香、黄瓜香；「红根甘肃桃 1 号」「探春」「桃形扁桃」「新疆黄肉」「中碧早香菊」「早上海水蜜」和「帚形山桃」主要的香气类型为青草香、脂肪香、蜡味、清新、药草香、坚果香、甜瓜香、黄瓜香气和果香。8 份桃花都具有青草香、脂肪香、蜡味、坚果香、甜瓜香和黄瓜香气，而青草香、脂肪香和蜡味是桃花中最突出的香气特征，在「光核桃 029-1」中的香气物质 OAV 累加值显著高于另外 7 份桃品种，其次是「红根甘肃桃 1 号」和「帚形山桃」；甜瓜香、黄瓜香气为桃花中第二大类香气特征，在「光核桃 029-1」中的香气物质 OAV 累加值最高，其次是「帚形山桃」「桃形扁桃」和「红根甘肃桃 1 号」；「帚形山桃」中的坚果香显著高于其他 7 份品种。此外，除「光核桃 029-1」外的其他 7 份样品还具有清新、药草香和果香。

表 2 不同桃花香气成分的 OAV 分析

Table 2 OAV analysis of aroma compounds from different peach blossom

挥发性物质 Compounds	CAS 编号 CAS	水中的阈值 (ug/kg) Threshold(water)	OAV								香气描述 Odor
			光核桃 029-1 G029-1	红根甘肃桃 1 号 HGGST1	探春 TC	桃形扁桃 TXBT	新疆黄肉 XJHR	中碧早香菊 ZBZXJ	早上海水蜜 ZSHSM	帚形山桃 ZXST	
			1-对孟烯-8-硫醇 p-Menthene-8-thiol	71159-90-5	0.00002	174616876	2053157.4	843357010.5	1697645958	1368108163	
2-甲氧基-3-仲丁基吡嗪 Pyrazine, 2-methoxy-3-(1-methylpropyl)-	24168-70-5	0.001	0	0	0	1777068.05	0	5115.54	0	0	霉味, 青草香, 豌豆, 胡椒
大马士酮β-damascenone	23726-93-4	0.002	15738.28	12613.48	19651.76	11082.48	11572.08	12878.64	10375.5	5345.27	苹果, 玫瑰, 蜜香, 甜味
1-辛烯-3-酮 1-Octen-3-one	4312-99-6	0.003	177711.03	116946.41	127545.12	108733.24	114349.11	197943.54	122630.6	146836.37	蘑菇
顺-4-庚烯醛 4-Heptenal, (Z)-	6728-31-0	0.0087	9937.22	13880.81	4585.65	8913.45	4769.46	7667.19	3285.43	29932.48	油脂味, 脂肪香, 青草香, 奶香, 奶油味
异己酸乙酯 Pentanoic acid, 4-methyl-, ethyl ester	25415-67-2	0.01	182827.43	120419.19	103052.09	94977.61	92661.55	211498.41	106785.72	147456.69	果香
3-巯基己基乙酸酯 3-Mercaptohexyl acetate	136954-20-6	0.02	918.94	1195.69	1336.04	1209.82	1227.68	1136.03	1156.86	995.78	硫磺味, 葡萄柚, 果香
2-噻吩甲基硫醇 2-Thiophenemethanethiol	6258-63-5	0.04	3896.93	5558.01	2876.34	4282.12	2566.72	3874.89	2404.15	11958.04	烘烤味, 咖啡味, 鱼腥味
(2E,4Z)-2,4-癸二烯醛 (2E,4Z)-2,4-Decadienal	25152-83-4	0.07	5142.08	3131.47	1239.99	2051.57	1573.73	1976.26	1125.62	2568.69	脂肪香, 天竺葵, 青草香, 蜡味
2-乙酰基噻吩 Ethanone, 1-(2-thienyl)-	88-15-3	0.08	376.98	288.82	292.42	348.56	327.94	297.72	306.98	1026	硫磺味, 坚果香, 榛子, 核 桃
二甲基三硫 Dimethyl trisulfide	3658-80-8	0.1	3408.87	1999.52	1590.15	1435.03	1413.2	3952.72	1705.17	2498.07	硫磺味, 熟洋葱, 肉香

(E,E)-2,4-壬二烯醛 2,4-Nonadienal, (E,E)-	5910-87-2	0.1	5451.93	2124.7	1592.68	2211.56	1519.82	1764.42	1041.75	2207.31	脂肪香, 甜瓜香, 蜡味, 青草香, 紫罗兰, 黄瓜香, 果香
乙基葫芦巴内酯 2(5H)-Furanone, 5-ethyl-3-hydroxy-4-methyl-	698-10-2	0.1	28334.89	33215.23	36213.98	34419.01	33597.42	30686.14	30938.3	31440.7	甜味, 果香, 焦糖味, 葫芦巴, 坚果香, 菊苣
(Z)-3-己烯醛 3-Hexenal, (Z)-	6789-80-6	0.12	11634.78	17153.17	15983.14	14673.61	17855.54	17256.23	13078.65	11033.8	青草香, 脂肪香, 果香, 苹果
芳樟醇 Linalool	78-70-6	0.22	5419.9	6589.74	6390.7	6170.56	5901.97	5875.08	5415.33	6316.53	花香, 青草香
1,4-二氯苯 1,4-Dichlorobenzene	106-46-7	0.3	54.99	62.96	75.6	66.06	64.18	60.85	53.22	66.09	--
联苯 Biphenyl	92-52-4	0.5	224.15	191.35	123.48	171.11	89.98	154.41	114.39	354.46	刺鼻的, 玫瑰, 青草香, 天竺葵
异硫氰酸苯甲酯 Benzene, (isothiocyanatomethyl)-	622-78-6	0.7	42.1	57.4	68.35	34.9	49.87	61.59	51.07	53.94	淡的, 尘土味, 辣根, 油脂味
丁香酚 Eugenol	97-53-0	0.71	2767.4	134.09	157.74	297.37	186.7	404.49	239.11	407.4	花香, 丁香
2-乙氧基-3-甲基吡嗪 2-Ethoxy-3-methylpyrazine	32737-14-7	0.8	381.6	485.3	481.7	470.01	487.99	420	481.66	435.86	榛子, 杏仁, 菠萝, 泥土味
愈创木酚 Guaiacol	90-05-1	0.84	26.67	36.94	33.4	38.07	27.55	33.62	32.22	62.31	坚果香
3-乙基苯酚 3-Ethylphenol	620-17-7	0.85	159.97	583.64	332.86	493.24	215.81	321.34	118.64	1518.42	霉味
4-(2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-基)-2-丁酮 2-Butanone, 4-(2,6,6-trimethyl-1-cyclohexen-1-yl)-	17283-81-7	1	251.93	175.17	234.77	257.59	163.69	129.91	177.59	321.24	泥土味, 木质香, 琥珀香, 干燥的
桉叶油醇 Eucalyptol	470-82-6	1.1	2.38	5.05	8.58	46.74	88.76	2.46	3.01	5.9	桉树, 药草香, 樟脑
月桂烯 Myrcene	123-35-3	1.2	180.11	200.29	237.69	167.87	198.64	182.06	203.55	181.84	霉味, 香料味
庚酸乙酯 Heptanoic acid, ethyl ester	106-30-9	1.9	15.39	18.57	18.37	18.18	16.64	15.7	15.54	17.65	果香, 菠萝, 葡萄酒
顺式-6-壬烯-1-醇乙酸酯 6-Nonen-1-ol, acetate, (Z)-	76238-22-7	2	57.94	33.24	18.19	67.76	27.96	41.29	32.86	186.4	甜瓜香, 哈密瓜, 青草香, 梨, 猕猴桃, 金属味
庚醛 Heptanal	111-71-7	2.8	80.02	114.74	34.72	77.23	41.32	67.6	26.04	262.63	清新, 醛香, 脂肪香, 青草

2-甲基萘 2-Methylnaphthalene	91-57-6	3	44.29	67.05	35.16	52.48	29.67	50.04	23.06	68.74	香, 药草香
E-2-辛烯醛(E)-2-Octenal	2548-87-0	3	58.05	12.94	18.78	12.18	9.74	23.61	7.24	15.01	甜味, 花香, 木质香
癸醛 Decanal	112-31-2	3	34.38	20.8	14.45	22.76	13.83	20.47	11.75	54.08	清新, 黄瓜香, 脂肪香, 青草香, 药草香, 香蕉, 蜡味
顺式-4-癸烯酸甲酯 4-Decenoic acid, methyl ester, Z-	7367-83-1	3	19.63	10.33	11.49	14.98	16.47	22.43	14.33	10.28	甜味, 醛香, 蜡味, 橙子, 柑橘, 花香
叶醇 3-Hexen-1-ol, (Z)-	928-96-1	3.9	600.53	484.87	483.09	559.79	636.34	284.51	447.96	372.41	果香, 梨, 芒果, 鱼腥味, 桃, 青草香
己醛 Hexanal	66-25-1	5	1961.41	1384.39	2418.21	1778.6	3712.71	1075.81	2981.08	1928.49	清新, 青草香, 蔬菜, 药草香, 油脂味
己醇 1-Hexanol	111-27-3	5.6	53.34	66.04	22.94	11.16	27.6	13.48	34.64	81.89	醛香, 青草香
2-戊基呋喃 Furan, 2-pentyl-	3777-69-3	5.8	238.78	113.43	84.41	105.99	107.75	102.01	164.31	141.34	油脂味, 果香, 含酒精的, 甜味, 青草香
萘 Naphthalene	91-20-3	6	229.49	319.99	124.07	185.45	153.63	211.06	88.82	309.35	果香, 青草香, 泥土味, 蔬菜, 豆香味, 金属味
香茅醛 Citronellal	106-23-0	6	15.41	2.38	1.31	5.53	4.87	1.17	17.62	5.64	刺鼻的, 干燥的, 焦油味
3-丁基异苯并呋喃-1(3H)-酮 3-Butylisobenzofuran-1(3H)-one	6066-49-5	10	11.94	15.14	15.74	17.67	12.44	10.27	10.8	12.03	甜味, 干燥的, 花香, 药草香, 蜡味, 醛香, 柑橘
十一醛 Undecanal	112-44-7	12.5	7.08	4.24	2.33	9.31	4.13	5.34	4.79	22.33	药草香, 酚香, 芹菜
呋喃酮 Furanol	3658-77-3	22.3	227.98	267.65	276.74	269.24	263.01	240.27	250.8	254.57	蜡味, 肥皂味, 花香, 醛香, 柑橘, 青草香, 脂肪香, 清新
乙酸异丁酯 Isobutyl acetate	110-19-0	25	83	84.44	84.88	84	83.13	86.91	83.6	84.64	甜味, 焦糖味, 草莓
δ-己内酯 d-Hexanolactone	823-22-3	26.83	8.43	10.01	9.52	9.84	9.11	8.66	8.29	8.99	甜味, 果香, 香蕉
柠檬醛 Citral	5392-40-5	28	14	0	65.21	119.75	101.02	105.46	107.46	0	奶油味, 果香, 椰子味
紫苏醛 perillyl aldehyde	2111-75-3	30	1.4	0	6.59	12.25	10.16	10.81	10.96	0	浓烈的, 柠檬, 甜味

2-甲基丁基己酸酯	2601-13-0	32	10.4	12.51	13.83	14.45	11.97	11.99	11.68	11.33	味, 薄荷 醚香
Hexanoic acid, 2-methylbutyl ester											
(E)-B-罗勒烯 Trans-β-Ocimene	3779-61-1	34	10.13	5.96	9.33	18.28	4.67	12.31	4.61	11.77	甜味, 药草香
反式-2-辛烯-1-醇	18409-17-1	40	4.98	2.69	1.47	1.78	0.98	2.85	1.19	11.47	青草香, 柑橘, 蔬菜, 脂肪 香
2-Octen-1-ol, (E)-											
水杨酸甲酯 Methyl salicylate	119-36-8	40	8.27	43.79	53.76	28.7	8.6	2.64	12.64	5.04	焦糖味, 薄荷
邻叔丁基苯酚 2-tert-Butylphenol	88-18-6	50	5.85	0.13	29	59.44	47.92	50.39	51.85	0.22	--
顺式-柠檬醛(Z)-citral	106-26-3	53	9.79	12.6	13.12	12.64	12.01	10.92	10.89	10.98	甜味, 柑橘, 柠檬
水杨酸乙酯 Ethyl salicylate	118-61-6	84	2.07	0	10.46	21.4	17.09	18.1	18.72	0	焦糖味, 薄荷
(E)-2-己烯醛 2-Hexenal, (E)-	6728-26-3	88.7	203.39	138.32	152.73	180.58	205.91	90.99	147.29	125.76	青草香
4-乙基愈创木酚	2785-89-9	89.25	15.45	0.1	76.24	155.52	125.44	131.91	136.1	0.19	丁香
4-Ethyl-2-methoxyphenol											
丁基苯 Butylbenzene	104-51-8	100	10.34	5.19	3.82	7.02	3.55	4.28	3.28	1.55	--
(E)-2-己烯醇 2-Hexen-1-ol, (E)-	928-95-0	231.9	52.74	35.35	39.98	46.91	54.15	22.62	38.08	32.9	清新, 青草香, 果香, 未成 熟的香蕉
乙酸庚酯 Acetic acid, heptyl ester	112-06-1	420	4.17	5.7	2.88	4.64	2.44	4.65	2.24	13.05	果香, 青草香, 甜味
二甲萜烷醇 Geosmin	19700-21-1	0.0008-0.0011	17520.65-240	19187.81-26383	20978.01-28	22811.35-31	17213.99-2	15027-2066	17102.87-23	19032.38-2	清新, 霉味, 泥土味
			90.89	.24	844.77	365.6	3669.24	2.12	516.45	6169.52	
2-甲基异冰片 2-Methylisoborneol	2371-42-8	0.0012-0.0018	642700.62-96	721390.89-1082	791034.68-1	741532.08-1	735940.04-	680280.6-10	674633.49-1	736901.85-	泥土味, 霉味
			4050.93	086.33	186552.03	112298.11	1103910.07	20420.9	011950.23	1105352.78	
甲基丙烯酸甲酯	80-62-6	50-500	0	0	0.14-1.41	0.39-3.92	0	0.09-0.91	0.16-1.64	1.32-13.16	芳香的, 果香
Methyl methacrylate											
2-壬醇 2-Nonanol	628-99-9	58-82	4.4-6.22	6.19-8.75	3.06-4.32	5.07-7.16	2.59-3.66	5.06-7.16	2.33-3.29	14-19.8	玫瑰
十二腈 Dodecanenitrile	2437-25-4	0.09-0.32	948.37-3372	1342.66-4773.9	1393.46-495	1185.47-421	1198.24-42	962.04-3420	1012.02-359	1085.13-38	干燥的, 柑橘, 橙子, 金属 味, 辣味
					4.54	4.99	60.4	.59	8.3	58.24	

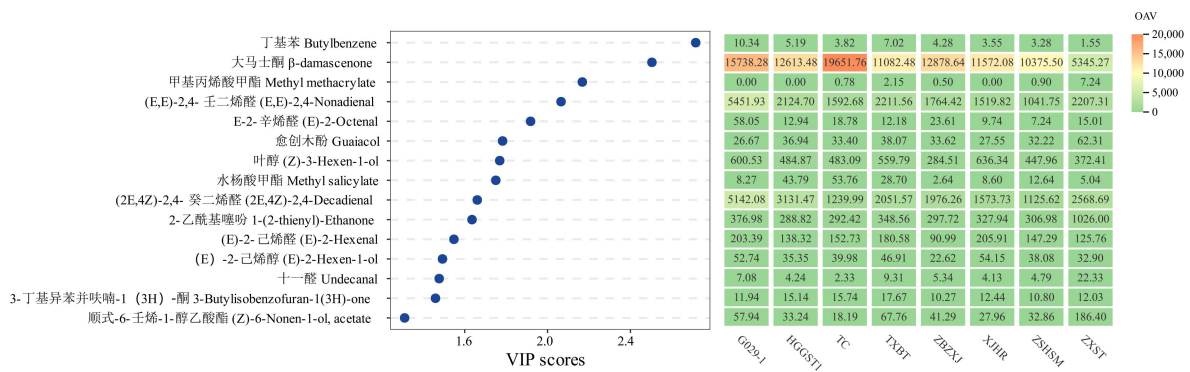


图 4 不同桃花香气成分正交偏最小二乘判别分析

Fig. 4 OPLS-DA analysis of aroma compounds from different peach blossoms

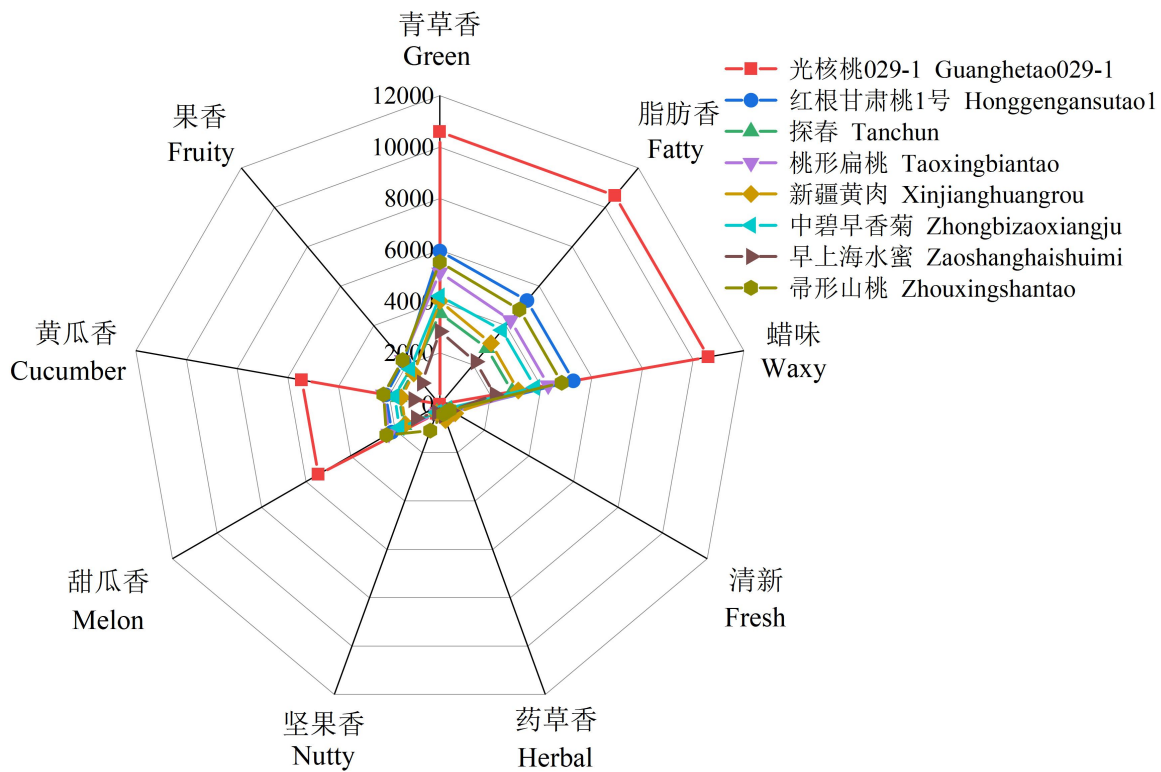


图 5 香气雷达图

Fig. 5 Aroma radar chart analysis of aroma compounds

2.6 栽培品种与野生近缘种差异挥发性物质

栽培品种（‘早上海水蜜’‘新疆黄肉’）与野生近缘种（‘光核桃 029-1’‘红根甘肃桃 1 号’‘帚形山桃’）相比，1-壬烯、法尼基丙酮（花香）、二十烷（蜡味）、 α -侧柏酮（柏木）等 86 种挥发性物质含量减少，减少的物质类别中醛类、醇类和烃类居多；苯丙酸甲酯（蜂蜜、花香、果香）、邻叔丁基苯酚、

丁酸芳樟酯（果香、香蕉味）、水杨酸乙酯（焦糖味、薄荷）、柠檬醛（浓烈的、柠檬味、甜味）等 45 种挥发性物质含量有所上升（图 6A）。在栽培桃培育过程中，桃花大部分香气物质含量减少，但也引入了新的挥发性物质成分，如栽培品种中含有的 3 种挥发性物质萜澄茄油宁烯（浓烈的、果香）、雪松烯（木质香）和 2-乙硫酰硫基乙酸在三份野生近缘种中均未测出（图 6B）。

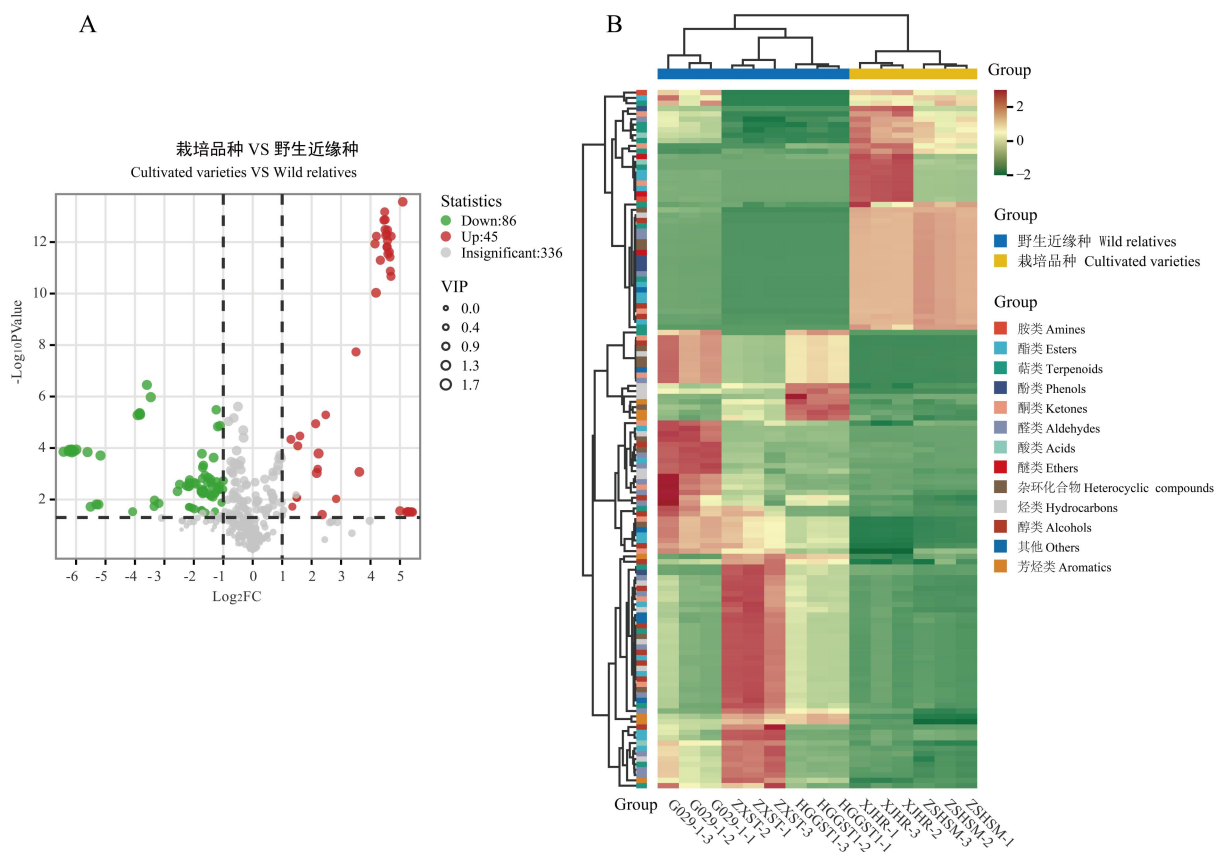


图 6 栽培品种与野生近缘种差异物质分析及聚类

Fig. 6 Analysis and clustering of differential substances between cultivated varieties and wild relatives

2.7 亲本与后代差异挥发性物质

‘中碧早香菊’是亲本‘红根甘肃桃 1 号’的杂交后代。与‘红根甘肃桃 1 号’相比，‘中碧早香菊’中二十烷（蜡味）、己醇（酒精、青草味）、十八烷等 46 种挥发性物质含量显著下降，紫苏醛（清新、青草香、药草香、甜味、薄荷）、2-十一烯醛（清新、果香、橙子味）、丁香酚（花香、丁香）等 60 种挥发性物质含量显著上升（图 7A）。另外，‘红根甘肃桃 1 号’中的 5-戊基间苯二酚、4,5-二氢-5,5-二甲基-1H-吡唑、4-甲基-1-(1-甲基乙基)-二环[3.1.0]己-2-烯、2,6-二甲基-2,6-辛二烯、4-甲基-苯乙醛（清新、青草味、甜味）、缬草-4,7(11)-二烯、2-丁基-2-辛烯醛（青草味、果香、脂肪香）挥发性物质在‘中碧早香菊’中未检出；2-羟乙基苯甲酸酯、柠檬醛（浓烈的、柠檬味、甜味）、水杨酸乙酯（焦糖味、薄荷）、癸醇（脂肪香、蜡味、花香、甜味）、 α -柏木烯（清新、甜味、木质香）等 29 种挥发性物质在‘红根甘肃桃 1

号’中未检出，但在‘中碧早香菊’中有较高含量（图 7B）。

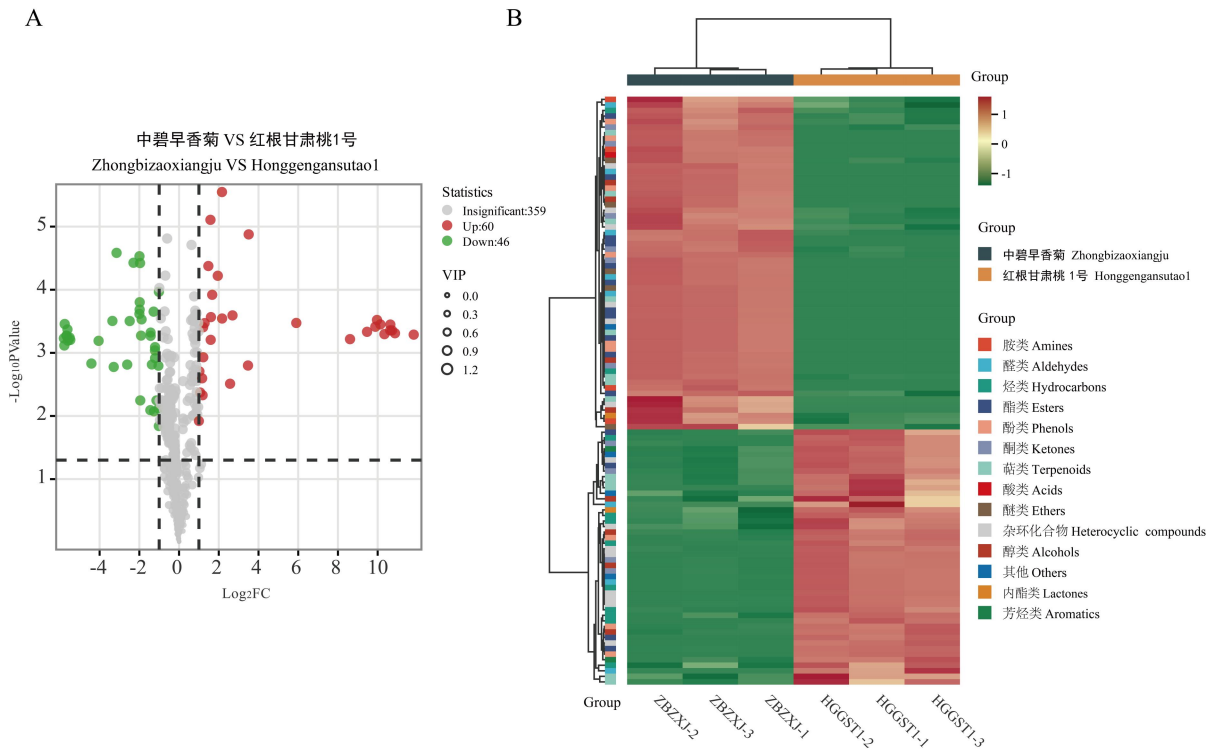


图 7 ‘中碧早香菊’与‘红根甘肃桃1号’的差异物质分析及聚类

Fig. 7 Analysis and clustering of differential substances between ‘Zhongbizaixiangju’ and ‘Honggengansutao1’

3 讨论

花的香气是由多种挥发性化合物组成的，各芳香物质对花香的贡献依据其气味活性值（OAV）来划分，具有较高香气活性值的成分为花香的特征香气^[27]。吴秋霞等^[28]在睡莲中筛选到 19 种气味活性物质，其中可被嗅觉感知的（OAV>1）的特征气味物质均为萜类化合物，包括 α -紫罗兰酮、 β -紫罗兰酮、反式- β -紫罗兰酮、金合欢烯等，其中紫罗兰酮赋予睡莲木质香、甜香，金合欢烯赋予睡莲苹果香及典型花香；蒋依辉等^[29]在研究荔枝的香气成分时，以 OAV \geq 10 为标准，发现了香叶醇、月桂烯、1-辛烯 3-醇、乙酸乙酯、正己醛、正己醇、壬醛、邻伞花烃、乙醛、苯乙醇、芳樟醇等 18 种关键香气成分，但不同种质间存在较大差异。本研究基于 8 份桃花种质的 OAV 值进行 OPLS-DA 和 VIP 值分析，得到（2E,4Z）-2,4-癸二烯醛、大马士酮、丁基苯等共 15 种对桃花的香气特征有重要影响的香气物质（OAV>10）。根据这 15 种香气物质对样品的香味特征进行分类，发现 8 份桃花都具有青草香、脂肪香、蜡味、坚果香、甜瓜香和黄瓜香气，而青草香、脂肪香和蜡味是桃花中最主要的香气特征，在野生近缘种‘光核桃 029-1’‘红根甘肃桃 1 号’和‘帚形山桃’最为突出，然后依次是‘桃形扁桃’‘中碧早香菊’。但‘桃形扁桃’在嗅闻时并未表现出浓郁的香气，推测与其呈现硫磺味的 1-对孟烯-8-硫醇和霉味、青草香的 2-甲氧基-3-仲丁基吡嗪等物质含

量较高有关, 这些物质的气味特征可能会掩盖或中和其他挥发性物质的香气, 导致桃形扁桃整体气味不佳。另外帚形山桃中表现为烘烤味的 2-噻吩甲基硫醇和硫磺味、坚果香的 2-乙酰基噻吩的物质含量较高, 可能是导致帚形山桃闻起来有苦味的原因。

栽培桃花香气变淡可能与人工驯化过程中的选择有关。在植物的驯化和育种过程中, 人们通常会根据特定的农艺性状进行选择, 这些性状包括果实的大小、形状、颜色、口感、产量、抗病性等^[30]。尽管香气也是人们喜爱的特性之一, 但在长期人工选择过程中发生了定向选择, 导致现代栽培桃果实的挥发性化合物含量低于野生品种^[31-32]。同时, Cao 等^[33]鉴定到与果实香气物质关联的基因组位点 214 个, 其中 25 个位点受到人工选择, 导致控制香气的部分基因组位点丢失。野生桃种质资源是优异基因源, 保留了许多在人工选择过程中丢失的优异性状, 包括特殊果香、花香、抗蚜性^[34]、抗根结线虫^[35-36]以及对极端环境(如旱涝)的耐受性^[37]等, 因此发掘具有浓郁花香的桃种质资源, 在栽培桃和观赏桃的种质创新中具有重要价值。

‘红根甘肃桃 1 号’是一份具有花香的优异种质资源。通过分析 8 份桃种质资源花香的挥发性代谢物特征, 发现‘红根甘肃桃 1 号’中大多数差异挥发性物质含量较高, 可能与其基因组特征有关。‘红根甘肃桃 1 号’与其后代‘中碧早香菊’的花共有的特征挥发性物质是呈现浓郁清新和果香的(E)-2-甲基-2-丁醛、呈现脂肪香、果香、桃香、蜡味的 δ -十一内酯、呈现果香、玫瑰味的(E)-3,7-二甲基辛基-2,6-二烯基-2-甲基丁酸酯、十六烷。对‘红根甘肃桃 1 号’和‘中碧早香菊’呈香物质特征进行分析, 发现两者都具有青草香、脂肪香、蜡味、清新、药草香、坚果香、甜瓜香、黄瓜香、果香香气, 而‘红根甘肃桃 1 号’中除坚果香气稍低于‘中碧早香菊’外, 其余香气特征均显著高于‘中碧早香菊’。因此, ‘红根甘肃桃 1 号’花香特征可以通过遗传改良传递给后代, 进一步发掘其控制花香特征的关键遗传位点和优异基因, 对提高优异野生种质育种利用效率、提升桃的经济和社会价值有重要意义。

综上所述, 本研究在 8 份桃花中共检测出 471 种挥发性物质, 桃花的香气成分非常复杂, 且不同品种的桃花具有不同的主要香气类型。通过 OAV 值结合 OPLS-DA 筛选出 15 种香气物质, 分析这些物质的香气特征进一步发现青草香、脂肪香和蜡味是桃花中最突出的香气特征。本研究结果不仅揭示了桃花香气复杂的化学组成, 也为未来的桃花育种和香气遗传改良提供一定的理论依据。

参考文献

- [1] Dudareva N, Pichersky E, Gershenzon J. Biochemistry of plant volatiles. *Plant Physiol*, 2004, 135(4): 1893-1902
- [2] 王文静, 吕思佳, 汪庆昊, 何凡, 吴月燕. 植物花香物质代谢与调控研究进展. *分子植物育种*, 2021, 19(22): 7612-7617
Wang W J, Lv S J, Wang Q H, He F, Wu Y Y. Research advance on the metabolism and regulation of plant floral fragrance. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(22): 7612-7617
- [3] 杜文文, 段青, 贾文杰, 马璐琳, 王祥宁, 王继华. 4 种秋海棠花香挥发性物质测定与特征香气成分分析. *云南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(5):

1043-1053

Du W W, Duan Q, Jia W J, Ma L L, Wang X N, Wang J H. Determination of volatile compounds and analysis of characteristic aroma components of four kind of Begonia species flowers. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 44(5): 1043-1053

- [4] 孙仲享, 宋圆圆, 曾任森. 植物挥发物介导的种内与种间关系研究进展. *华南农业大学学报*, 2019, 40(5): 166-174
- Sun Z X, Song Y Y, Zeng R S. Advances in studies on intraspecific and interspecific relationships mediated by plant volatiles. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40(5): 166-174
- [5] Zhang C Q, Chen X X, Lee R T C, T R, Maurer-Stroh S, Rühl M. Bioinformatics-aided identification, characterization and applications of mushroom linalool synthases. *Communications Biology*, 2021, 4(1): 223
- [6] 张春英, 林同香, 戴思兰, 张秀英. 桃花种质资源亲缘演化关系的研究--RAPD 分析. *北京林业大学学报*, 1999, 21(5): 26-31
- Zhang C Y, Lin T X, Dai S L, Zhang X Y. RAPD analysis on the genetic relationship of peach-blossom germplasm resources. *Journal of Beijing Forestry University*, 1999, 21(5): 26-31
- [7] 郝洪波, 刘端明, 李明哲. 桃花品种育性及结果习性研究. *华北农学报*, 2007, 22(z2): 118-121
- Hao H B, Liu D M, Li M Z. Studies on the fertility and fruit habit of the cultivars of peach-blossom. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(z2): 118-121
- [8] 王燕, 柳小年, 顾振华, 朱发仁, 陈昌元. 我国观赏桃花研究进展. *河北农业科学*, 2008, 12(6): 24-26
- Wang Y, Liu X N, Gu Z H, Zhu F R, Chen C Y. Research progress of ornamental peach-blossom in China. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2008, 12(6): 24-26
- [9] 吉爽秋, 王力荣, 李勇, 朱更瑞, 曹珂, 方伟超, 陈昌文, 王新卫, 张琦, 吴金龙. 桃花花型(铃形/蔷薇形)基因型鉴定、分子标记开发与利用. *果树学报*, 2023, 40 (3): 422-431
- Ji S Q, Wang L R, Li Y, Zhu G R, Cao K, Fang W C, Chen C W, Wang X W, Zhang Q, Wu J L. Identification of peach flower genotype (Non-showy/Showy), development of flower-type related molecular markers. *Journal of Fruit Science*, 2023, 40 (3): 422-431
- [10] 孟歌, 朱更瑞, 方伟超, 陈昌文, 王新卫, 王力荣, 曹珂. 桃的花型性状相关 SNP 位点挖掘与候选基因分析. *植物遗传资源学报*, 2022, 23(2): 505-517
- Meng G, Zhu G R, Fang W C, Chen C W, Wang X W, Wang L R, Cao K. Genome-wide association study identified SNP alleles and candidate genes for flower shape trait in peach (*Prunus persica*). *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(2): 505-517
- [11] 马瑞娟, 宋宏峰, 沈志军, 杜平, 许建兰, 俞明亮. 桃花器和开花特性研究. *植物遗传资源学报*, 2004, 5(4): 382-385
- Ma R J, Song H F, Shen Z J, Du P, Xu J L, Yu M L. Studies on the characters of bloom of peach. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2004, 5(4): 382-385
- [12] Irshad A K. 桃花色性状的全基因组关联分析及候选基因鉴定. 北京: 中国农业科学院, 2022
- Irshad A K. Genome-wide association study and identification of candidate genes associated with flower color in peach. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022
- [13] 刘杰超, 杨文博, 张春岭, 刘慧, 吕真真, 焦中高. 桃花中营养及功能性成分分析. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(9): 3745-3751
- Liu J C, Yang W B, Zhang C L, Liu H, Lu Z Z, Jiao Z G. Analysis of nutritional and functional constituents in the petals of peach blossom. *Journal of Food Safety & Quality*, 2016, 7(9): 3745-3751
- [14] 赵彩平, 韩明玉, 田玉命, 王安柱. 桃花器 4 个性状的遗传倾向. *果树学报*, 2010, 27(3): 328-332

- Zhao C P, Han M Y, Tian Y M, Wang A Z. Study on the inherited tendency of four traits in peach flower. *Journal of Fruit Science*, 2010, 27(3): 328-332
- [15] Chen C X, Okie W R. Novel peach flower types in a segregating population from 'Helen Borchers'. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2015, 140(2): 172-177
- [16] 王力荣, 王蛟, 朱更瑞, 方伟超, 王新卫, 陈昌文, 曹珂. 桃若干重要特异性状的遗传趋向分析. *园艺学报*, 2017, 44(2): 223-232
- Wang L R, Wang J, Zhu G R, Fang W C, Wang X W, Chen C W, Cao K. Genetic analysis of some special traits in peach. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44(2): 223-232
- [17] 文习成. 桃不同品种花瓣和叶片呈色变化过程中花色苷合成的相关基因表达差异性研究. 南京: 南京农业大学, 2012
- Wen X W. Study on the expression differences of the genes involved in anthocyanin biosynthetic pathway during the coloration process in peach flowers and leaves of different cultivars. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012
- [18] Hassani D, Liu H L, Chen Y N, Wan Z B, Zhuge Q, Li S X. Analysis of biochemical compounds and differentially expressed genes of the anthocyanin biosynthetic pathway in variegated peach flowers. *Genetics and molecular research*, 2015, 14(4): 13425-13436
- [19] Liu J C, Jiao Z G, Yang W B, Zhang C L, Liu H, Lv Z Z. Variation in phenolics, flavanoids, antioxidant and tyrosinase inhibitory activity of peach blossoms at different developmental stages. *Molecules*, 2015, 20(11): 20460-20472
- [20] 王春玲, 李小龙, 胡增辉, 冷平生, 段树生. 山桃花香气的日变化规律. *黑龙江农业科学*, 2015, (3): 55-60
- Wang C L, Li X L, Hu Z H, Leng P S, Duan S S. Daytime variation of floral scent of *Prunus davidiana* Carr. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2015, (3): 55-60
- [21] 杜秀娟, 付丽娇, 郑华, 徐芳. 桃花挥发性物质及对访花昆虫的化学响应. *东北林业大学学报*, 2018, 46(11): 75-79
- Du X J, Fu L J, Zheng H, Xu F. Volatiles from *Prunus persica* flowers and its chemical response to flower-visiting insects, *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(11): 75-79
- [22] Zhao B T, Sun M, Cai Z X, Su Z W, Li J Y, Shen Z J, Ma R J, Yan J, Yu M L. Aroma profiling analysis of peach flowers based on electronic nose detection. *Horticulturae*, 2022, 8(10): 875
- [23] 王力荣, 朱更瑞. 桃种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2005
- Wang L R, Zhu G R. Descriptors and data standard for peach (*Prunus persica* L.). Beijing: Chinese Agriculture Press, 2005
- [24] GB 23200.8-2016. 食品安全国家标准水果和蔬菜中 500 种农药及相关化学品残留量的测定气相色谱-质谱法. 北京: 中国标准出版社, 2017
- GB 23200.8-2016. National food safety standards-determination of 500 pesticides and related chemicals residues in fruits and vegetables Gas chromatography-mass spectrometry. Beijing: Standards Press of China, 2017
- [25] Gemert L JV. Odour thresholds: compilations of odour threshold values in air, water and other media. 2th ed. Utrecht: Oliemans Punter & Partners BV, 2011
- [26] 陈芝飞, 蔡莉莉, 郝辉, 赵志伟, 孙志涛, 马宇平, 刘前进, 杨靖, 董艳娟, 侯佩. 香气活力值在食品关键香气成分表征中的应用研究进展. *食品科学*, 2018, 39(19): 329-335
- Chen Z F, Cai L L, Hao H, Zhao Z W, Sun Z T, Ma Y P, Liu Q J, Yang J, Dong Y J, Hou P. Progress in the application of odor activity values in the characterization of key aroma components in foods, *Food Science*, 2018, 39(19): 329-335
- [27] 洪雅萍. 茉莉花开放过程香气物质形成的多组学分析. 福州: 福建农林大学, 2023

Hong Y P. Multi-omics analysis of aroma formation in jasmine (*Jasminum sambac*) during flowering. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2023

- [28] 吴秋霞, 易齐贤, 陈曦, 樊熙蓓, 唐昕妍, 王景云, 殷铭轩, 郑日如, 陈胜洪, 袁慧红. 广热带睡莲的挥发态气味物质检测及优良芳香品种筛选. 华中农业大学学报, 2024, 43(3): 230-239
- Wu Q X, Yi Q X, Chen X, Fan X B, Tang X Y, Wang J Y, Yin M X, Zheng R R, Chen S H, Yuan H H. Detecting volatile aroma substances and screening elite aromatic varieties in pantropical water lilies. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(3): 230-239
- [29] 蒋依辉, 向旭, 钟云, 朱慧莉, 刘伟, 肖志丹. 6个特早熟与早熟荔枝种质果实挥发性化合物的鉴定及香气特征分析. 果树学报, 2023, 40(9): 1915-1931
- Jiang N H, Xiang X, Zhong Y, Zhu H L, Liu W, Xiao Z D. Identification of volatile compounds and analysis of aroma characteristics in litchi fruits of 6 special-early maturing and early maturing germ-plasms. Journal of Fruit Science, 2023, 40(9): 1915-1931
- [30] 俞明亮. 中国桃新品种选育研究进展. 落叶果树, 2024, 56(3): 1-5
- Yu M L. Progress of peach breeding in China. Deciduous Fruits, 2024, 56(3): 1-5
- [31] Ulrich D, Komes D, Olbricht K, Hoberg E. Diversity of aroma patterns in wild and cultivated *Fragaria* accessions. Genet Resour Crop Evol, 2007, 54(6): 1185
- [32] 张芳, 陈海芬, 陈彪, 石燕金, 韩世玉. 5种种质桑葚香气成分的比较. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, (12): 1-13
- Zhang F, Chen H F, Chen B, Shi Y J, Han S Y. Comparison of aroma components in 5 kinds of mulberry with different germplasm. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2024, (12): 1-13
- [33] Cao K, Yang X W, Li Y, Zhu G R, Fang W C, Chen C W, Wang X W, Wu J L, Wang L R. New high-quality peach (*Prunus persica* L. Batsch) genome assembly to analyze the molecular evolutionary mechanism of volatile compounds in peach fruits. The Plant journal, 2021, 108(1): 281-295
- [34] Wang J X, Li Y, Wang X W, Cao K, Chen C W, Wu J L, Fang W C, Zhu G R, Chen X J, Guo D D, Wang J, Zhao Y L, Fan J Q, Liu S N, Li W Q, Bie H L, Xu Q, Wang L R. Haplotype-resolved genome of a heterozygous wild peach reveals the PdaWRKY4-PdaCYP716A1 module mediates resistance to aphids by regulating betulin biosynthesis. Journal of integrative plant biology, 2024, 00:1-20
- [35] Cao K, Wang L R, Zhao P, Zhu G R, Fang W C, Chen C W, Wang X W. Identification of a candidate gene for resistance to root-knot nematode in a wild peach and screening of its polymorphisms. Plant Breeding, 2014, 133(4): 530-535
- [36] 刘伟, 曹珂, 王力荣, 张绍铃, 朱更瑞, 方伟超, 陈昌文. 甘肃桃抗南方根结线虫性状的 SRAP 标记. 园艺学报, 2010, 37(7): 1057-1064
- Liu W, Cao K, Wang L R, Zhang S L, Zhu G R, Fang W C, Chen C W. SRAP Markers for Resistance to Nematode (*Meloidogyne incognita*) of *Prunus kansuensis*. Acta Horticulturae Sinica, 2010, 37(7): 1057-1064
- [37] Li Y, Cao K, Li N, Zhu G R, Fang W C, Chen C W, Wang X W, Guo J, Wang Q, Ding T Y, Wang J, Guan L P, Wang J X, Liu K Z, Guo W W, Arús P, Huang S W, Fei Z J, Wang L R. Genomic analyses provide insights into peach local adaptation and responses to climate change. Genome research, 2021, 31(4): 592-606