

36份桃品种资源果实挥发性成分遗传多样性分析

李桂芝^{1,2}, 黄东慧², 王力荣¹, 吴金龙¹, 马兆成²

(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华中农业大学园艺林学学院/园艺植物生物学教育部重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 为探究桃资源果实挥发性成分遗传多样性, 以36份桃品种资源果实为试材, 采用顶空固相微萃取结合气相色谱质谱联用技术检测样品挥发性物质, 并进行方差分析、变异系数、相关性分析、主成分分析(PCA, principal component analysis)和偏最小二乘-判别分析(PLS-DA, partial least squares-discriminant analysis)。结果表明, 在36份桃品种资源中共检测到77种挥发性物质, 包括萜类、醛类、酯类、内酯类、醇类和酮类等。挥发性成分的变异系数范围为18%~390%, 说明资源具有丰富的香气表型多样性。相关性分析结果显示, 性状间呈显著相关和极显著相关性的分别有11对和10对, 其中果肉颜色、品种类型、粘离核、果实质地与香气物质含量相关。PCA分析可以明显区分白肉桃和黄肉桃。以变量投影重要性(VIP, variable importance in projection) > 1, $P < 0.05$ 为标准, 筛选到9种区分黄肉桃和白肉桃的特征挥发性物质, 其中茶螺烷的VIP值最高。

关键词: 桃; 品种资源; 挥发性成分; 顶空固相微萃取-气相质谱联用技术

Genetic Diversity of Fruit Volatile Compounds in 36 Peach Varieties

LI Guizhi^{1,2}, HUANG Donghui², WANG Lirong¹, WU Jinlong¹, MA Zhaocheng²

(¹Zhengzhou Fruit Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Horticulture Germplasm Resources Center/Henan Key Laboratory Fruit and Cucurbit Biology, Zhengzhou 450000; ²College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory for Biology of Horticultural Plants, Ministry of Education, Wuhan 430070)

Abstract: To investigate the genetic diversity of volatile compounds in peach fruits, 36 peach varieties were analyzed by headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry, followed by ANOVA, coefficient of variation, correlation analysis, principal component analysis and partial least squares-discriminant analysis. The results showed that 77 volatile compounds were detected in 36 peach varieties, including terpenoids, aldehydes, esters, lactones, alcohols and ketones. In addition, the coefficient of variation in volatile compounds of 36 peach varieties ranged from 18% to 390%, indicating that the enrichment of volatile organic compounds diversity in different peach varieties. Based on the correlation analysis, 11 and 10 pairwise-traits were found with correlation and significant correlation, respectively, among which several traits including flesh color, variety type, stone adherence to flesh and flesh texture were correlated with aroma substance content. PCA analysis could clarify white-fleshed and yellow-fleshed peaches. Using variable importance in projection (VIP) > 1 and $P < 0.05$ as criteria, nine characteristic volatile substances were identified

收稿日期: 2023-02-09 修回日期: 2023-04-02 网络出版日期: 2023-05-22

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230209002>

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新品种培育, E-mail: wujinlong@caas.cn

基金项目: 国家现代农业产业技术体系(CARS-30-1-04); 中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-ZFRI-01); 国家中医药管理局中医药创新团队及人才支持计划项目(ZYYCXTD-D-202005)

Foundation projects: China Modern Agricultural Industrial Technology System(CARS-30-1-04); Agricultural Science and Technology Innovation Program of the Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ASTIP-ZFRI-01); Innovation Team and Talents Cultivation Program of National Administration of Traditional Chinese Medicine(ZYYCXTD-D-202005)

and distinguishable in yellow-fleshed peaches from white-fleshed peaches, among which theaspirane was found with the highest VIP.

Key words: peach; variety resources; volatile compounds; headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry

桃(*Prunus persica* (L.) Batsch)作为高经济价值的果树之一,在温带和亚热带地区广泛种植^[1-2]。因其独特的风味、质地、多汁性和营养价值而广受消费者喜爱。果实品质主要分为外观品质和内在品质。果实颜色、大小以及果实形状等外观品质吸引消费者购买,而香气、口感和糖酸比等内在品质是决定顾客重复购买的关键因素。目前在桃果实中已鉴定出约 100 种挥发物,主要来源于脂肪酸、萜类和氨基酸等前体物质^[3-4],其中约 20 多种挥发物形成典型的桃香味,包括花香味的萜类物质芳樟醇^[5-6],果香味的内酯类物质 δ -癸内酯、 γ -癸内酯^[7-9]和酯类物质乙酸乙酯^[10],青草味的醛类物质反-2-己烯醛^[11]、正己醛^[12]等。

近年来,香味已逐渐成为桃育种的重要目标。一些学者已经在果形、果皮茸毛、果肉颜色、单果重等生物学性状及分子标记方面对桃种质资源进行遗传多样性研究^[13-15]。但桃果实香气的多样性与主要农艺性状间的相关性尚缺乏研究。因此研究桃种质资源挥发性成分的遗传多样性,对桃种质资源的评价、挖掘与利用及创新方面具有重要意义。为

分析桃果实挥发性物质特点,本研究选用来自不同国家的 36 份桃品种,采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)进行香气检测,分析桃果实香气的遗传多样性,研究果实品质与果实香气的相关性,以期为桃果实分类及品质改良提供理论基础,并为未来的育种工作提供信息。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以 36 份桃品种为研究材料进行挥发性物质测定(表 1)。果实分别于 2019 年 6 月初至 10 月初采自中国农业科学院郑州果树研究所国家桃种质资源圃。每个品种在树冠外围高 1~2 m 处挑选无机械伤、无病虫害、大小较为一致的 6 个果实,于果实成熟期采收当天运抵实验室,蒸馏水冲洗后去除果皮,取果实中部果肉,混合,经液氮处理,放置于 -80 ℃ 冰箱中,以备保存。

表 1 36 份桃品种资源性状信息及来源
Table 1 Trait information and origin of 36 peach varieties

| 编号 Code | 品种 Cultivar | 品种分类 Cultivar classification | 茸毛 有无 Hair | 果肉颜色 Flesh color | 肉质 Flesh texture | 核粘离性 Stone adherence to flesh | 品种类型 Variety type | 来源 Source |
|------------|----------------|---------------------------------|------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------|--------------|
| P1 | 红根甘肃桃 | 普通桃 | 有 | 白色 | 软溶质 | 离核 | 野生资源 | 中国甘肃 |
| P2 | 琯春桃 | 普通桃 | 有 | 白色 | 硬溶质 | 离核 | 地方品种 | 中国吉林 |
| P3 | 石窝水蜜 | 普通桃 | 有 | 白色 | 硬溶质 | 粘核 | 地方品种 | 中国北京石窝村 |
| P4 | 玫瑰红 | 油桃 | 无 | 白色 | 硬溶质 | 离核 | 选育品种 | 中国河南郑州 |
| P5 | 中华寿桃 | 普通桃 | 有 | 白色 | 硬溶质 | 粘核 | 选育品种 | 中国山东 |
| P6 | 砂子早生 | 普通桃 | 有 | 白色 | 硬溶质 | 粘核 | 选育品种 | 日本 |
| P7 | 阳桃 | 普通桃 | 有 | 白色 | 软溶质 | 粘核 | 地方品种 | 中国上海 |
| P8 | 温州水蜜 | 普通桃 | 有 | 白色 | 硬溶质 | 离核 | 地方品种 | 中国浙江温州 |
| P9 | 阳泉肉桃 | 普通桃 | 有 | 白色 | 硬溶质 | 粘核 | 地方品种 | 中国山西阳泉 |
| P10 | 云暑 2 号 | 普通桃 | 有 | 白色 | 硬溶质 | 粘核 | 选育品种 | 中国浙江杭州 |
| P11 | 京艳 | 普通桃 | 有 | 白色 | 硬溶质 | 粘核 | 选育品种 | 中国北京 |
| P12 | 莱山蜜 | 普通桃 | 有 | 白色 | 硬溶质 | 粘核 | 选育品种 | 中国山东烟台 |
| P13 | 21 世纪桃 | 普通桃 | 有 | 白色 | 硬溶质 | 粘核 | 选育品种 | 中国河北昌黎 |
| P14 | 早露蟠桃 | 蟠桃 | 有 | 白色 | 软溶质 | 粘核 | 选育品种 | 中国北京 |

表 1 (续)

| 编号 Code | 品种 Cultivar | 品种分类 Cultivar classification | 茸毛 有无 Hair | 果肉颜色 Flesh color | 肉质 Flesh texture | 核粘离性 Stone adherence to flesh | 品种类型 Variety type | 来源 Source |
|------------|----------------|---------------------------------|------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------|--------------|
| P15 | 大白酸 | 油桃 | 无 | 白色 | 硬溶质 | 粘核 | 品系 | 中国河南郑州 |
| P16 | 珍珠红 | 油桃 | 无 | 白色 | 硬溶质 | 粘核 | 品系 | 中国河南郑州 |
| P17 | 秦光2号 | 油桃 | 无 | 白色 | 硬溶质 | 离核 | 选育品种 | 中国陕西西安 |
| P18 | 瑞蟠4号 | 蟠桃 | 有 | 白色 | 硬溶质 | 粘核 | 选育品种 | 中国北京 |
| P19 | 秋香蜜 | 普通桃 | 有 | 白色 | 硬溶质 | 粘核 | 选育品种 | 中国江苏扬州 |
| P20 | 中州白桃 | 普通桃 | 有 | 白色 | 不溶质 | 粘核 | 地方品种 | 中国山东肥城 |
| P21 | 南方早红 | 油桃 | 无 | 白色 | 硬溶质 | 粘核 | 品系 | 中国河南郑州 |
| P22 | NJN76 | 油桃 | 无 | 黄色 | 不溶质 | 粘核 | 选育品种 | 美国 |
| P23 | 塞瑞纳 | 普通桃 | 有 | 黄色 | 不溶质 | 粘核 | 选育品种 | 意大利 |
| P24 | 红港 | 普通桃 | 有 | 黄色 | 硬溶质 | 离核 | 选育品种 | 美国 |
| P25 | 佛尔蒂尼·莫蒂尼 | 普通桃 | 有 | 黄色 | 硬溶质 | 离核 | 选育品种 | 意大利 |
| P26 | 佛罗里达金 | 普通桃 | 有 | 黄色 | 硬溶质 | 离核 | 选育品种 | 美国 |
| P27 | 迪克松 | 普通桃 | 有 | 黄色 | 不溶质 | 粘核 | 选育品种 | 美国 |
| P28 | 黄艳 | 普通桃 | 有 | 黄色 | 不溶质 | 粘核 | 地方品种 | 中国云南晋宁县 |
| P29 | 临黄1号 | 普通桃 | 有 | 黄色 | 不溶质 | 粘核 | 地方品种 | 中国甘肃临泽 |
| P30 | 天红 | 油桃 | 无 | 黄色 | 硬溶质 | 离核 | 选育品种 | 韩国 |
| P31 | NJN80 | 油桃 | 无 | 黄色 | 不溶质 | 粘核 | 选育品种 | 美国 |
| P32 | 南十字 | 油桃 | 无 | 黄色 | 硬溶质 | 离核 | 选育品种 | 意大利 |
| P33 | 格兰特4号 | 油桃 | 无 | 黄色 | 硬溶质 | 离核 | 选育品种 | 意大利 |
| P34 | 乐园 | 油桃 | 无 | 黄色 | 硬溶质 | 离核 | 品系 | 中国河南郑州 |
| P35 | 郑黄3号 | 普通桃 | 有 | 黄色 | 不溶质 | 粘核 | 选育品种 | 中国河南郑州 |
| P36 | 金童6号 | 普通桃 | 有 | 黄色 | 不溶质 | 粘核 | 选育品种 | 美国 |

1.2 挥发性成分的提取

使用 65 μm PDMS/DVB 固相微萃取头 (Supelco Co., Bellefonte, PA, 美国)。为减少萃取头涂层流失造成的误差,萃取头在使用前按说明书在 250 ℃ 的温度下老化 30 min。桃果实的挥发性物质测定参考柳洪入^[16]和曹香梅^[17]的方法。制备样品时,从-80 ℃ 冰箱取出样品,研磨至粉末,经真空干燥机进行 48 h 干燥后,在万分之一天平上称取 0.3 g 粉末,放于 25 mL 的顶空瓶中,同时加入 3 mL 20% CaCl₂ 溶液和 3 mL 0.2 mol/L EDTA 溶液以及 30 μL 内标 0.8 μg/mL 的 2-辛醇。密封后,将顶空瓶放在 45 ℃ 的磁力搅拌器上涡旋混匀 30 min,然后将老化好的萃取头插入瓶中萃取 30 min 后,将萃取头插入 GC-MS 进样口中,解吸附 5 min 后拔出。

1.3 GC-MS 分析

试验仪器为 ThermoFisher Trace 1310 型气相质

谱联用仪 (Thermo Fisher 公司, 美国), 色谱柱为 TG-1701MS (0.25 mm×30 m×0.25 μm)。柱温升温程序为 40 ℃, 保持 2 min 后, 以 3.0 ℃/min 升至 100 ℃, 保持 1 min 后, 再以 5.0 ℃/min 升至 150 ℃, 保持 2 min, 最后以 10.0 ℃/min 升至 220 ℃, 保持 2 min。氦气为载气, 流速为 1 mL/min, 进样口温度 250 ℃, 不分流。质谱条件: EI 电离源, 电子能量 70 eV, 四级杆温度为 150 ℃, 传感线温度为 250 ℃, 采用全扫描模式采集数据, 质谱扫描范围为 35 ~ 400 m/z。使用 Mainlib 谱库对物质进行检索鉴别, 物质含量计算以总离子图谱 (TIC) 面积为准, 以内标物的峰面积为参比, 对化合物进行相对定量。

1.4 数据处理

使用 Excel 2016 对数据进行整理和统计分析, 计算平均值、标准差和变异系数等数据, 其中变异系数 = (标准差/平均值) × 100%。使用 Origin 2022

软件制作柱状图、相关性分析和散点图。使用迈维云平台 (Metware cloud, <https://cloud.metware.cn>) 进行主成分分析 (PCA) 和偏最小二乘-判别分析 (PLS-DA) 并作图。果实挥发性物质含量差异显著性采用单因素方差分析, 由 SPSS 27.0 进行统计分析。以挥发性物质变量投影重要性分析值 (VIP) 大于 1 并且 $P<0.05$ 作为标准筛选特征性挥发性物质。

2 结果与分析

2.1 桃品种的总挥发性物质多样性分析

利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术对 36 份桃品种资源进行挥发性物质测定, 共检测到 77 种挥发性物质 (表 2), 其中萜类 17 种, 包括芳樟醇、 β -紫罗兰酮、D-柠檬烯等; 醛类 16 种, 包括 3-己烯醛、己醛和反-2-己烯醛等; 酯类 8 种, 包括邻苯二甲酸二丁酯、乙酸己酯、反-3-己烯乙酸酯等; 内酯类 5 种, 包括 6-戊基-2H-吡喃-2-酮、 γ -癸内酯和 δ -癸内酯等; 醇类 4 种, 包括正己醇、1-辛醇、1-壬醇和 2-乙基-1-己醇; 酮类 4 种以及其他挥发性物质 23 种。36 份桃品种的总挥发性物质含量范围为 246.36~1968.84 $\mu\text{g/kg}$, 平均为 576.77 $\mu\text{g/kg}$ 。总挥发性物质含量排名前 3 的品种分别为琯春桃、秋香蜜和红根甘肃桃, 分别为 1968.84 $\mu\text{g/kg}$ 、1415.89 $\mu\text{g/kg}$ 、1277.36 $\mu\text{g/kg}$; 挥发性物质含量靠后的 3 个品种为临黄 1 号、NJN76 和阳泉肉桃, 分别为 246.36 $\mu\text{g/kg}$ 、272.21 $\mu\text{g/kg}$ 、276.18 $\mu\text{g/kg}$ 。呈现果香味的内酯类和酯

类物质含量最高品种分别为中州白桃 (149.88 $\mu\text{g/kg}$) 和红根甘肃桃 (358.92 $\mu\text{g/kg}$); 秋香蜜中花香味的萜类物质含量最高, 为 701.43 $\mu\text{g/kg}$; 呈现草香味的醇类和醛类物质含量最高的品种均为琯春桃, 合计 1287.62 $\mu\text{g/kg}$ (图 1)。

6 大类挥发性物质相对含量占比最大的是醛类物质 (图 1), 占比为 18.57% (金童 6 号)~68.48% (中华寿桃), 主要物质为己醛、反-2-己烯醛、壬醛。其次是萜类, 占比为 3.48% (琯春桃)~49.54% (秋香蜜), 其中含量最多且变化最大的物质为芳樟醇, 平均为 68.54 $\mu\text{g/kg}$, 含量为 0.62~616.49 $\mu\text{g/kg}$ 。酯类占比 1.04% (中华寿桃)~29.88% (金童 6 号), 主要物质为反-3-己烯乙酸酯和乙酸己酯。内酯类占比为 0 (琯春桃、中华寿桃、秦光 2 号、南方早红、云暑 2 号、温州水蜜、莱山蜜)~26.59% (中州白桃), 其中具有“桃味”香气的 γ -癸内酯含量最多, 含量为 0~111.03 $\mu\text{g/kg}$, 在中州白桃中含量最高。醇类和酮类物质占比较小, 分别为 1.64% (格兰特 4 号)~11.10% (云暑 2 号), 1.06% (红根甘肃桃)~14.10% (佛尔蒂尼·莫蒂尼)。

36 份桃品种的挥发性成分变异分析结果表明, 不同香气物质的变异幅度较大, 变异系数为 18.40%~389.89%, 其中顺式-4-庚烯醛的变异系数最高, 其次是 γ -乙基- γ -甲基- γ -丁内酯、正己醇、 γ -十二内酯、 β -紫罗兰醇等。说明 36 份桃品种在挥发性物质成分上存在丰富的资源类型。

表 2 36 份桃品种资源挥发性物质的变异分析
Table 2 Variation of volatile compounds in 36 peach varieties

| 种类 Types | 挥发性物质 Volatile compounds | 编号 Code | 最小值 Min. | 最大值 Max. | 极差 R | 平均值 Mean | 标准差 SD | 变异系 数 (%) CV |
|--------------------------------------|---|------------|-------------|-------------|---------|-------------|-----------|--------------------|
| 醇类 ($\mu\text{g/kg}$) Alcohols | 正己醇 | A1 | 0 | 56.20 | 56.20 | 3.21 | 9.42 | 293.41 |
| | 1-辛醇 | A2 | 0 | 24.42 | 24.42 | 1.60 | 3.93 | 245.60 |
| | 1-壬醇 | A3 | 0 | 4.24 | 4.24 | 0.39 | 0.84 | 217.77 |
| | 2-乙基-1-己醇 | A4 | 7.38 | 47.34 | 39.95 | 14.88 | 7.20 | 48.34 |
| 内酯 ($\mu\text{g/kg}$) Lactones | 6-戊基-2H-吡喃-2-酮 | L1 | 0 | 11.03 | 11.03 | 0.77 | 2.17 | 280.99 |
| | γ -癸内酯 | L2 | 0 | 111.03 | 111.03 | 14.95 | 22.95 | 153.52 |
| | γ -十二内酯 | L3 | 0 | 17.23 | 17.23 | 1.17 | 3.33 | 285.57 |
| | γ -乙基- γ -甲基- γ -丁内酯 | L4 | 0 | 4.03 | 4.03 | 0.21 | 0.80 | 380.63 |
| | δ -癸内酯 | L5 | 0 | 10.58 | 10.58 | 1.81 | 2.81 | 155.79 |
| 醛类 ($\mu\text{g/kg}$) Aldehydes | 3-己烯醛 | B1 | 0 | 13.88 | 13.88 | 2.18 | 3.13 | 143.85 |
| | 顺-2-癸醛 | B2 | 0.27 | 3.48 | 3.21 | 1.92 | 0.87 | 45.09 |
| | 2,4-二甲基苯甲醛 | B3 | 0 | 21.98 | 21.98 | 9.27 | 4.76 | 51.37 |

表 2 (续)

| 种类 Types | 挥发性物质 Volatile compounds | 编号 Code | 最小值 Min. | 最大值 Max. | 极差 R | 平均值 Mean | 标准差 SD | 变异系 数(%) CV |
|-----------------------|--|------------|-------------|-------------|---------|-------------|-----------|-------------------|
| 萜类(μg/kg) Terpenes | 反-2-己烯醛 | B4 | 0.82 | 680.30 | 679.48 | 54.53 | 113.58 | 208.28 |
| | 反-2-辛烯醛 | B5 | 0 | 12.34 | 12.34 | 5.02 | 2.44 | 48.53 |
| | 庚醛 | B6 | 1.87 | 24.37 | 22.49 | 9.99 | 4.61 | 46.13 |
| | 癸醛 | B7 | 4.67 | 20.85 | 16.18 | 11.64 | 4.70 | 40.39 |
| | 己醛 | B8 | 9.34 | 408.91 | 399.57 | 88.86 | 76.15 | 85.69 |
| | 壬醛 | B9 | 18.99 | 381.16 | 362.17 | 40.96 | 58.65 | 143.21 |
| | 十八醛 | B10 | 0 | 4.07 | 4.07 | 0.95 | 0.95 | 100.49 |
| | 十二醛 | B11 | 0.51 | 7.22 | 6.71 | 2.34 | 1.60 | 68.49 |
| | 十一醛 | B12 | 0 | 1.79 | 1.79 | 0.71 | 0.37 | 51.73 |
| | 顺-2-庚烯醛 | B13 | 0 | 14.49 | 14.49 | 2.37 | 2.96 | 124.94 |
| | 顺-2-壬烯醛 | B14 | 0.20 | 8.05 | 7.85 | 2.87 | 1.54 | 53.58 |
| | 顺式-4-庚烯醛 | B15 | 0 | 5.16 | 5.16 | 0.22 | 0.87 | 389.89 |
| | 辛醛 | B16 | 4.16 | 25.26 | 21.10 | 7.26 | 3.46 | 47.64 |
| | A 氧化青蒿素 | T1 | 0 | 1.62 | 1.62 | 1.12 | 0.39 | 35.10 |
| | D-柠檬烯 | T2 | 0.80 | 5.86 | 5.05 | 2.44 | 1.37 | 56.13 |
| | para-menth-1-en-9-al | T3 | 0 | 10.22 | 10.22 | 1.07 | 2.04 | 191.05 |
| | α-松油醇 | T4 | 0 | 6.77 | 6.77 | 1.07 | 1.69 | 158.42 |
| | β-大马士酮 | T5 | 0 | 4.59 | 4.59 | 0.97 | 1.03 | 105.58 |
| | β-二氢紫罗兰酮 | T6 | 0 | 13.40 | 13.40 | 2.94 | 3.71 | 126.20 |
| | β-环柠檬醛 | T7 | 0 | 4.81 | 4.81 | 0.98 | 1.44 | 146.93 |
| | β-紫罗兰醇 | T8 | 0 | 2.30 | 2.30 | 0.19 | 0.55 | 283.07 |
| | β-紫罗兰酮 | T9 | 0 | 6.63 | 6.63 | 1.25 | 1.59 | 126.57 |
| | δ-萜品油烯 | T10 | 0 | 3.48 | 3.48 | 1.24 | 1.10 | 88.78 |
| | 桉叶油醇 | T11 | 0 | 1.17 | 1.17 | 0.23 | 0.33 | 145.92 |
| | 茶螺烷 | T12 | 0 | 36.98 | 36.98 | 5.98 | 8.95 | 149.70 |
| | 二氢-β-紫罗兰醇 | T13 | 0 | 6.47 | 6.47 | 0.62 | 1.48 | 240.42 |
| | 反-橙花叔醇 | T14 | 1.37 | 12.04 | 10.66 | 7.94 | 2.50 | 31.52 |
| | 芳樟醇 | T15 | 0.62 | 616.49 | 615.87 | 68.54 | 125.79 | 183.53 |
| | 脱氢里那醇 | T16 | 0 | 17.89 | 17.89 | 2.00 | 3.85 | 192.44 |
| | 香叶基丙酮 | T17 | 4.37 | 26.22 | 21.85 | 12.61 | 6.32 | 50.14 |
| 酮类(μg/kg) Ketones | 1-辛烯-3-酮 | K1 | 0 | 5.21 | 5.21 | 0.78 | 1.01 | 129.61 |
| | 6-甲基-5-庚烯-2-酮 | K2 | 0 | 35.32 | 35.32 | 11.87 | 10.59 | 89.24 |
| | 2,2,6,7-四甲基-10-氧杂双环[4.3.0.1(1,7)]癸-5-酮 | K3 | 10.49 | 28.46 | 17.97 | 23.12 | 4.25 | 18.40 |
| | 6-甲基-5-乙基-3-庚烯-2-酮 | K4 | 0 | 3.89 | 3.89 | 0.32 | 0.73 | 228.15 |
| 酯类(μg/kg) Esters | 反-3-己烯乙酸酯 | E1 | 0 | 165.43 | 165.43 | 42.63 | 41.34 | 96.96 |
| | 邻苯二甲酸二丁酯 | E2 | 0 | 7.29 | 7.29 | 1.29 | 1.66 | 128.68 |
| | 辛酸乙酯 | E3 | 0 | 11.47 | 11.47 | 0.98 | 2.61 | 265.43 |
| | 乙酸-2-己烯酯 | E4 | 0 | 33.15 | 33.15 | 6.11 | 8.25 | 134.96 |
| | 乙酸己酯 | E5 | 0 | 180.72 | 180.72 | 14.96 | 33.13 | 221.53 |
| | 乙酸异戊酯 | E6 | 0 | 4.25 | 4.25 | 0.31 | 0.83 | 268.74 |
| | 硬脂酸乙酯 | E7 | 0 | 5.79 | 5.79 | 1.13 | 1.55 | 136.63 |
| | 正己酸乙酯 | E8 | 0 | 8.43 | 8.43 | 1.51 | 1.91 | 126.50 |
| 其他(μg/kg) Others | 2,2-二甲基癸烷 | O1 | 0 | 54.68 | 54.68 | 9.46 | 10.59 | 111.98 |
| | 2,4,6-三甲基庚烷 | O2 | 0 | 5.23 | 5.23 | 1.30 | 1.15 | 88.41 |

表 2 (续)

| 种类 Types | 挥发性物质 Volatile compounds | 编号 Code | 最小值 Min. | 最大值 Max. | 极差 R | 平均值 Mean | 标准差 SD | 变异系 数(%) CV |
|-------------|-----------------------------|------------|-------------|-------------|---------|-------------|-----------|-------------------|
| | 2,4-二甲基-1-庚烯 | O3 | 0 | 2.37 | 2.37 | 0.75 | 0.69 | 92.24 |
| | 2,4-二叔丁基苯酚 | O4 | 0 | 22.75 | 22.75 | 9.13 | 6.37 | 69.70 |
| | 2,5-二甲基壬烷 | O5 | 0.21 | 4.60 | 4.38 | 1.66 | 1.02 | 61.30 |
| | 2,6,11-三甲基-十二烷 | O6 | 0 | 14.28 | 14.28 | 2.75 | 2.90 | 105.45 |
| | 2,6-二甲基壬烷 | O7 | 1.76 | 14.63 | 12.87 | 5.19 | 3.26 | 62.77 |
| | 2,6-二甲基十一烷 | O8 | 0 | 2.89 | 2.89 | 0.65 | 0.76 | 117.87 |
| | 2,6-二叔丁基苯醌 | O9 | 0 | 1.29 | 1.29 | 0.47 | 0.34 | 72.83 |
| | 4,6-二甲基-十二烷 | O10 | 0.29 | 18.97 | 18.68 | 3.28 | 3.42 | 104.31 |
| | 4,7-二甲基十一烷 | O11 | 5.00 | 52.32 | 47.32 | 13.81 | 9.07 | 65.73 |
| | 癸烷 | O12 | 0.46 | 7.64 | 7.18 | 2.57 | 1.77 | 68.86 |
| | 间二甲苯 | O13 | 0 | 5.40 | 5.40 | 2.35 | 1.38 | 58.71 |
| | 邻二甲苯 | O14 | 0 | 2.56 | 2.56 | 0.72 | 0.63 | 87.59 |
| | 萘 | O15 | 2.98 | 34.19 | 31.21 | 7.35 | 5.23 | 71.12 |
| | 壬酸 | O16 | 0 | 13.60 | 13.60 | 1.18 | 2.38 | 202.05 |
| | 十二烷 | O17 | 0.33 | 13.12 | 12.78 | 2.40 | 2.43 | 101.04 |
| | 十六烷 | O18 | 0.53 | 17.67 | 17.14 | 3.90 | 3.32 | 85.14 |
| | 十七烷 | O19 | 0 | 3.15 | 3.15 | 0.56 | 0.72 | 128.69 |
| | 十四烷 | O20 | 0 | 5.49 | 5.49 | 1.80 | 1.52 | 84.72 |
| | 十五烷 | O21 | 0 | 4.10 | 4.10 | 0.39 | 0.79 | 201.99 |
| | 十一烷 | O22 | 1.33 | 33.92 | 32.59 | 6.39 | 5.56 | 87.02 |
| | 正辛烷 | O23 | 0 | 6.24 | 6.24 | 2.47 | 1.54 | 62.25 |

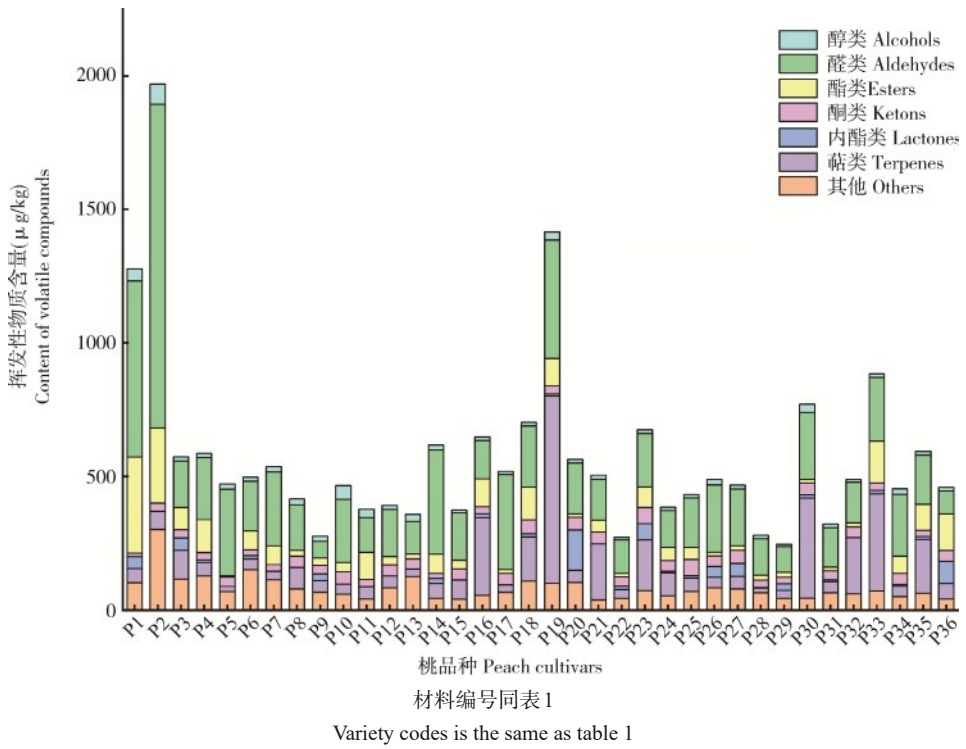
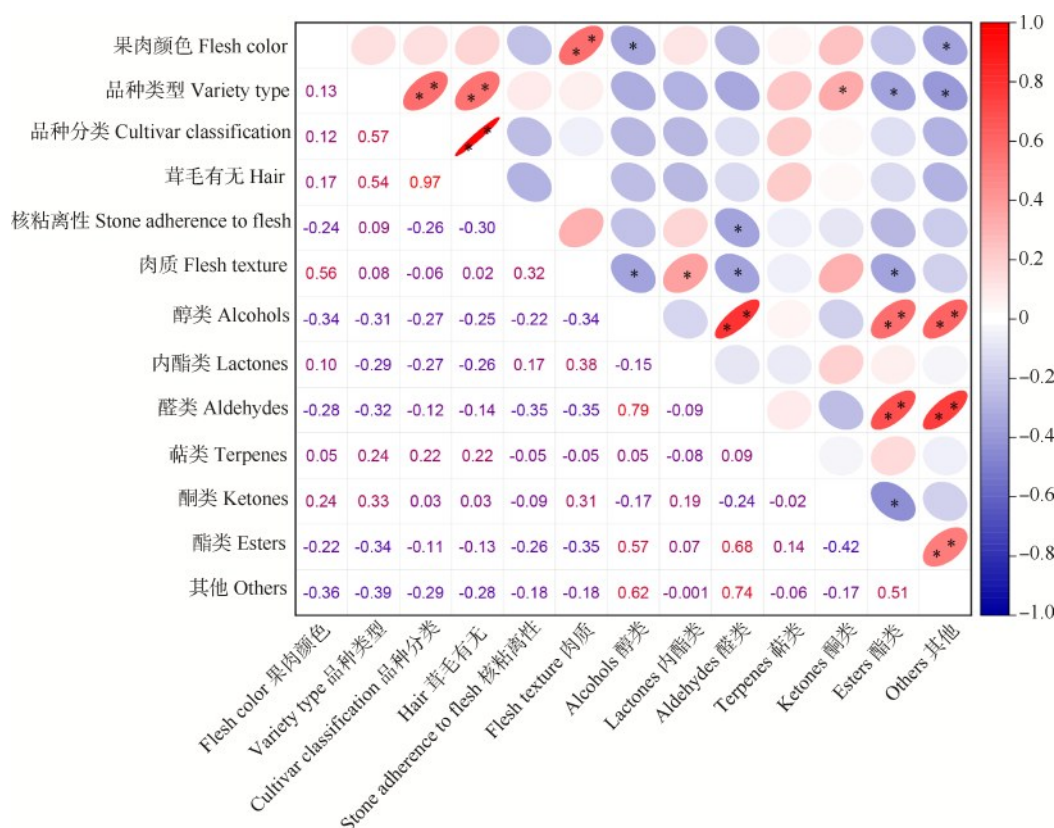


Fig.1 Different types of volatile compounds content of peach varieties

2.2 挥发性成分与果实性状的相关性分析

6个农艺性状(表1)和挥发性成分的相关性分析如图2所示。果肉颜色与肉质呈极显著正相关,与醇类、其他挥发性成分呈显著负相关;品种类型与品种分类和茸毛有无极显著正相关,与酮类显著正相关,而与酯类、其他挥发性成分显著负相关;品种分类与茸毛有无极显著正相关;核粘离性与醛类显著负相关;肉质与内酯类显著正相关,而与醇类、醛类和酯类显著负相关;醇类与醛类、酯类、其他挥发性成分极显著正相关;醛类与酯

类、其他挥发性成分呈现极显著正相关;酮类与酯类显著负相关;酯类与其他挥发性成分极显著正相关。相关性分析表明,果肉颜色、品种类型、核粘离性、肉质与果肉挥发性物质含量具有相关性。黄肉桃与白肉桃相比,醇类物质含量较低。品系和选育品种与野生资源和地方品种相比,酯类物质含量较低,酮类物质含量较高。离核桃的醛类物质含量高于粘核桃。不溶质桃内酯类物质含量高于软溶质和硬溶质桃,但醇类、醛类和酯类物质含量与二者相比较低。



左下角为相关性系数;*,**分别代表在0.05、0.01水平上显著相关

The bottom left corner shows the correlation coefficient; *, ** means significant correlation at 0.05, 0.01 level, respectively

图2 桃品种资源挥发性物质与果实性状相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between volatile substances and fruit traits of peach variety resources

2.3 不同桃品种的挥发性成分分析

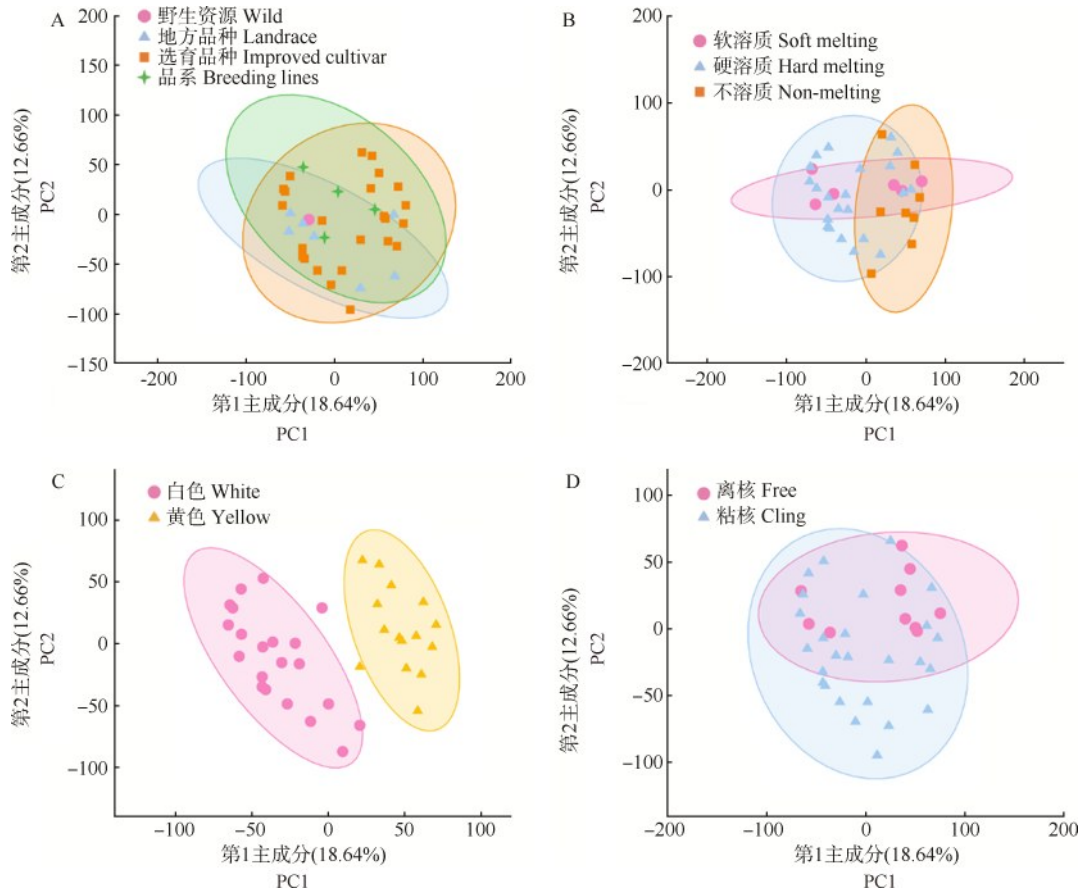
主成分分析(PCA)可以从总体上反应不同组间样本的总体代谢差异和组内样本之间的变异度大小^[18]。对36份桃品种的77种挥发性物质含量进行主成分分析,结果表明,第1主成分和第2主成分的贡献率分别为18.64%和12.66%,主成分分析图可以很好地将36份桃资源按照果肉颜色区分为两类,而不同品种类型、肉质和黏离核性的品种资源均有不同程度的混合,未见明显分类(图3)。表明白色果肉和黄色果肉的桃品种在整体香气上存在明显

差异。

为了鉴定白色果肉和黄色果肉挥发性物质之间的差异,采用偏最小二乘-判别分析(PLS-DA),选择VIP>1且P<0.05的差异挥发性物质作为特征性挥发性物质。共筛选到9个对上述分类模型贡献较大的特征性挥发性物质,即5种萜类、2种醛类、1种酮类和1种其他类化合物,这些物质可能是区分白肉桃和黄色肉桃的标志物(图4)。其中,VIP值最高的茶螺烷是区分白黄果肉桃的最重要的标志物之一。9种特征性挥发性物质中,白肉桃的茶螺烷、2,

4-二甲基-1-庚烯、二氢- β -紫罗兰醇、3-己烯醛、 β -二氢紫罗兰酮含量高于黄肉桃,而 β -紫罗兰酮、 β -环柠

檬醛、十八醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮物质含量低于黄肉桃。



A: 品种类型; B: 肉质; C: 果肉颜色; D: 核粘离性; 括号内数据为主成分贡献率

A: Variety type; B: Flesh texture; C: Flesh color; D: Stone adherence to flesh; The data in bracket is contribution rate of principal component

图 3 36 份桃品种资源挥发性成分在 4 种分类标准下的 PCA 分析

Fig. 3 PCA analysis of volatile compounds of 36 peach variety resources under 4 classification criteria

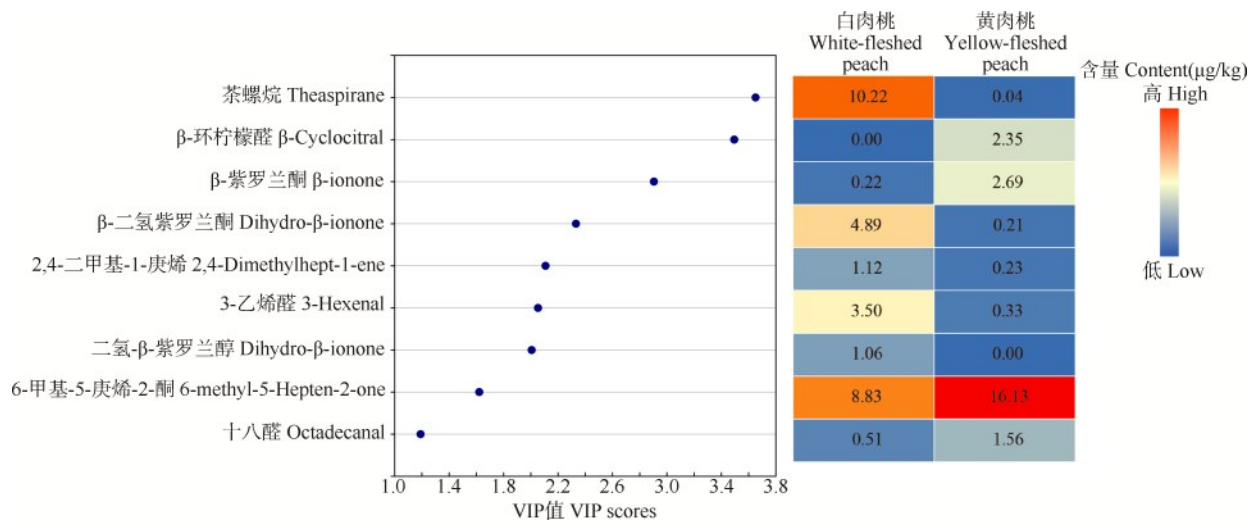


图 4 9 种特征挥发性物质的 VIP 值及含量

Fig. 4 VIP and content of 9 characteristic volatile compounds

3 讨论

种质资源是遗传育种和杂交组合选配的基础,品种资源多样性是育种工作的核心^[19]。变异系数是反映品种固有特征及品种之间的个体差异的重要指标,变异系数的大小可以反映性状遗传的多样性,用于评估种质育种潜力,变异系数越大,表明遗传背景的丰度越高^[20-21]。本研究遗传多样性分析结果表明,36份桃品种资源的香气物质含量变异范围较大,遗传多样性较丰富,为筛选优质育种材料或改进现有品种提供了可能性。中州白桃中内酯类物质含量最高且占比最大,可作为选育果香型桃品种的种质,秋香蜜中萜类物质含量最高且占比最大,可作为培育花香型果实桃品种的种质。

挥发性物质与果实品质密切相关,培育香甜可口、果个大、耐贮运和色泽鲜艳的桃品种一直是育种工作者所追求的目标^[22]。罗静等^[23]通过对比不同类型桃种质的挥发性物质种类及含量,结果表明果实中挥发性成分的数量和种类可能与果肉颜色性状相关。严娟等^[24]利用电子鼻系统对桃品种资源果实香气进行测定,发现硬肉类型与其他肉质类型桃的甲烷类传感器响应值差异显著,肉质可能也是影响果实挥发性成分的因素之一。通过对挥发性物质与果实性状的相关性分析显示,除上述研究报道与香气物质相关的性状外,本研究发现36份桃资源的香气物质与核粘离性也具有一定的相关性。有研究表明,桃果实粘离核性状的形成可能与乙烯释放速率有关^[25]。挥发性物质种类及含量随着果实的成熟软化呈现动态变化^[26],而乙烯的释放是诱导桃果实成熟软化的重要因素之一。据此推测不同的核粘离性可能会导致桃果实的挥发性物质差异。因此,在实际育种中要综合考虑性状之间的相关性。

偏最小二乘-判别分析已经广泛应用于鉴定影响苹果^[27]、葡萄^[28]、黄瓜^[29]等园艺作物香气特征的潜在关键挥发性物质。谢凯丽^[30]在分析不同果肉(白、黄、红肉桃)与香气的相关性时,发现 β -二氢紫罗兰酮的VIP值最高,与其结果较为相似的是,本研究筛选到9个潜在关键挥发性物质(VIP>1, $P<0.05$),其中VIP值最高的茶螺烷为 β -二氢紫罗兰酮的下游产物。此外,研究人员通过气味活度值分析表明茶螺烷为白肉桃玉露的关键芳香活性化合物^[12]。因此,可能是这些挥发性物质的含量差异,造成白肉桃和黄肉桃之间香气的不同。

降异戊二烯类化合物是类胡萝卜素的降解产物,对桃的香气有很大的贡献^[31-32],一般认为,类胡萝卜素积累会导致桃果肉颜色之间的差异^[33]。Bar等^[34]通过比较黄色果肉及其白色果肉桃突变体发现,调控类胡萝卜素降解的CCD4基因差异表达导致黄肉桃的降异戊二烯挥发物含量显著低于白肉桃突变体,但也有研究测得黄肉桃品种中类胡萝卜素的下游产物 β -紫罗兰酮含量高于白肉桃^[35]。上述研究表明白肉桃与黄肉桃香气存在差异与类胡萝卜素降解途径密切相关,并存在其他遗传变异的因素能够导致挥发性物质的差异积累。本研究检测到8种降异戊二烯挥发物,分别为茶螺烷、 β -紫罗兰酮、 β -二氢紫罗兰酮、 β -二氢紫罗兰醇、 β -大马士酮、 β -紫罗兰醇、 β -环柠檬醛、香叶基丙酮,白肉桃的降异戊二烯挥发物总含量高于黄肉桃,但 β -紫罗兰酮、 β -大马士酮、 β -环柠檬醛、香叶基丙酮含量均低于黄肉桃。推测类胡萝卜素降解之后的 β -紫罗兰酮在黄肉桃中主要的降解产物为 β -环柠檬醛,而在白肉桃中主要降解为 β -二氢紫罗兰酮,之后 β -二氢紫罗兰酮降解为茶螺烷。

本研究共测定到36份桃品种资源的挥发性成分77种,挥发性物质在品种间表现出较大差异,并且与品种类型、肉质、核粘离性和果肉颜色有一定关联。另外进一步确定了可区分白肉桃和黄肉桃的9种挥发性物质,旨在为改善果实香气、提高果实品质的育种工作提供理论基础。

参考文献

- [1] Akagi T, Hanada T, Yaegaki H, Gradziel T M, Tao R. Genome-wide view of genetic diversity reveals paths of selection and cultivar differentiation in peach domestication. *DNA Research*, 2016, 23(3): 271-282
- [2] 王力荣, 吴金龙. 中国果树种质资源研究与新品种选育70年. *园艺学报*, 2021, 48(4): 749-758
Wang L R, Wu J L. Review for the research of fruit tree germplasm and breeding of new varieties in the past seven decades in China. *Acta Horticulturae Sinica*, 2021, 48(4): 749-758
- [3] Schwab W, Davidovich-Rikanati R, Lewinsohn E. Biosynthesis of plant-derived flavor compounds. *The Plant Journal*, 2008, 54(4): 712-732
- [4] 席万鹏, 郁松林, 周志钦. 桃果实香气物质生物合成研究进展. *园艺学报*, 2013, 40(9): 1679-1690
Xi W P, Yu S L, Zhou Z Q. Advances in aroma compounds biosynthesis of peach fruit. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(9): 1679-1690
- [5] Wei C, Liu H, Cao X, Zhang M, Li X, Chen K, Zhang B.

- Synthesis of flavour-related linalool is regulated by PpbHLH1 and associated with changes in DNA methylation during peach fruit ripening. *Plant Biotechnology Journal*, 2021, 19 (10): 2082-2096
- [6] Mohammed J, Belisle C E, Wang S, Itle R A, Adhikari K, Chavez D J. Volatile profile characterization of commercial peach (*Prunus persica*) cultivars grown in Georgia, USA. *Horticulturae*, 2021, 7(12): 516
- [7] Wang Y, Yang C, Li S, Yang L, Wang Y, Zhao J, Jiang Q. Volatile characteristics of 50 peaches and nectarines evaluated by HP-SPME with GC-MS. *Food Chemistry*, 2009, 116(1): 356-364
- [8] Braga A, Belo I. Biotechnological production of γ -decalactone, a peach like aroma, by *Yarrowia lipolytica*. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2016, 32 (10): 169
- [9] Peng B, Yu M, Zhang B, Xu J, Ma R. Differences in PpAAT1 activity in high- and low-aroma peach varieties affect γ -decalactone production. *Plant Physiology*, 2020, 182 (4): 2065-2080
- [10] Bianchi T, Weesepeol Y, Koot A, Iglesias I, Eduardo I, Gratacós-Cubarsí M, Guerrero L, Hortós M, van Ruth S. Investigation of the aroma of commercial peach (*Prunus persica* L. Batsch) types by Proton Transfer Reaction-Mass Spectrometry (PTR-MS) and sensory analysis. *Food Research International*, 2017, 99(1): 133-146
- [11] Zhang B, Shen J Y, Wei W W, Xi W P, Xu C J, Ferguson I, Chen K. Expression of genes associated with aroma formation derived from the fatty acid pathway during peach fruit ripening. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58 (10): 6157-6165
- [12] Niu Y, Deng J, Xiao Z, Zhu J. Characterization of the major aroma-active compounds in peach (*Prunus persica* L. Batsch) by gas chromatography-olfactometry, flame photometric detection and molecular sensory science approaches. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 2021, 147: 110457
- [13] 陈巍,王力荣,朱更瑞,方伟超,陈昌文,曹珂,张绍铃. 基于 SSR 标记和生物学性状进行桃遗传多样性的比较分析. *植物遗传资源学报*, 2009, 10(1): 86-90, 96
- Chen W, Wang L R, Zhu G R, Fang W C, Chen C W, Cao K, Zhang S L. Comparison of genetic diversity among peach cultivars based on biological traits and SSR markers. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2009, 10(1): 86-90, 96
- [14] 舒楠,石广丽,张庆田,刘涛,路文鹏. 基于 SSR 分子标记的集安白桃等桃资源遗传多样性分析. *特产研究*, 2020, 42 (4): 24-27
- Shu N, Shi G L, Zhang Q T, Liu T, Lu W P. Genetic diversity analysis of peach in Ji'an based on SSR markers. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 2020, 42 (4): 24-27
- [15] 李森,董晓民,高晓兰,李桂芳,刘伟,张安宇. 基于 SCoT 分子标记的 19 份黄桃种质遗传多样性分析. *果树学报*, 2021, 38(5): 664-671
- Li M, Dong X M, Gao X L, Li G X, Liu W, Zhang A N. Genetic relationship analysis of 19 accessions of yellow peach germplasms based on SCoT markers. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38(5): 664-671
- [16] 柳洪入. UV-B 调控桃果实萜类途径香气物质的机制研究. 杭州:浙江大学, 2017
- Liu H R. Regulatory mechanism of UV-B irradiation on volatile compounds derived from terpene pathway in peach fruit. Hangzhou: Zhejiang University, 2017
- [17] 曹香梅. 桃果实酯类芳香物质的代谢与调控研究. 杭州:浙江大学, 2019
- Cao X M. Metabolism and regulation of volatile esters in peach fruit. Hangzhou: Zhejiang University, 2019
- [18] Lai C Q, Teoh S S. An efficient method of HOG feature extraction using selective histogram bin and PCA feature reduction. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2016, 16(4): 101-108
- [19] 蔡志翔,沈志军,严娟,宋娟,张好艳,马瑞娟,俞明亮. 中国武夷山脉地区野生毛桃资源收集与初步评价. *植物遗传资源学报*, 2017, 18(5): 874-885
- Cai Z X, Shen Z J, Yan J, Song J, Zhang Y Y, Ma R J, Yun M L. Collection and primary evaluation of wild peach (*Prunus persica* (L.) Batsch) resources in Wuyi mountains in China. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(5): 874-885
- [20] 吕正鑫,贺艳群,贾东峰,黄春辉,钟敏,廖光联,朱壹,袁开昌,刘传浩,徐小彪. 猕猴桃种质资源表型性状遗传多样性分析. *园艺学报*, 2022, 49(7): 1571-1581
- Lv Z X, He Y Q, Jia D F, Huang C H, Zhong M, Liao G L, Zhu Y, Yuan K C, Liu C H, Xu X B. Genetic diversity analysis of phenotypic traits for kiwifruit germplasm resources. *Acta Horticulturae Sinica*, 2022, 49(7): 1571-1581
- [21] 吴昊,苏万龙,石美娟,薛晓芳,任海燕,王永康,赵爱玲,李登科. 枣种质果实性状多样性分析与综合评价. *植物遗传资源学报*, 2022, 23(6): 1613-1625
- Wu H, Su W L, Shi M J, Xue X F, Ren H Y, Wang Y K, Zhao A L, Li D K. Diversity analysis and comprehensive evaluation of jujube fruit traits. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(6): 1613-1625
- [22] 王力荣. 中国桃品种改良历史回顾与展望. *果树学报*, 2021, 38(12): 2178-2195
- Wang L R. History and prospect of peach breeding in China. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38(12): 2178-2195
- [23] 罗静,黄玉南,王超,乔成奎,庞涛,方金豹,谢汉忠. 4 份桃种质挥发性成分的 GC-MS 分析. *经济林研究*, 2016, 34(3): 49-55
- Luo J, Huang Y N, Wang C, Qiao C K, Pang T, Fang J B, Xie H Z. GC-MS analysis on volatile compounds in four cultivars of peach fruits. *Nonwood Forest Research*, 2016, 34 (3): 49-55
- [24] 严娟,蔡志翔,张明昊,徐子媛,沈志军,马瑞娟,俞明亮. 利用电子鼻评价桃果实香气. *植物遗传资源学报*, 2021, 22

- (1): 274-282
Yan J, Cai Z X, Zhang M H, Xu Z Y, Shen Z J, Ma R J, Yu M L. Evaluation of aroma in peach fruit by electronic nose. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(1): 274-282
- [25] 韩晴, 曹珂, 朱更瑞, 方伟超, 陈昌文, 王新卫, 刘扩展, 游双红, 王力荣. 桃肉质及粘离核性状形成及其相关基因的表达分析. *华北农学报*, 2019, 34(3): 52-58
Han Q, Cao K, Zhu G R, Fang W C, Chen C W, Wang X W, Liu K Z, You S H, Wang L R. Formation of flesh texture and adhesion and expression analysis of related genes in peach fruit. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(3): 52-58
- [26] Zidi K, Kati D E, Bachir-Bey M, Genva M, Fauconnier M L. Comparative study of fig volatile compounds using headspace solid-phase microextraction-gas chromatography/mass spectrometry: Effects of cultivars and ripening stages. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 667809
- [27] 杨文渊, 谢红江, 陶炼, 宦云敏, 陈善波, 林立金, 廖明安. 金冠苹果及优系(SGP-1)果实品质与挥发性物质比较分析. *果树学报*, 2022, 39(12): 2277-2288
Yang W Y, Xie H J, Tao L, Huan Y M, Chen S B, Lin L J, Liao M A. Comparison of fruit quality and volatile compounds between Golden Delicious apple and the new strain originated from its occasional seedling (SGP-1). *Journal of Fruit Science*, 2022, 39(12): 2277-2288
- [28] Deng H, He R, Long M, Li Y, Zheng Y, Lin L, Liang D, Zhang X, Liao M, Lv X, Deng Q, Xia H. Comparison of the fruit volatile profiles of five muscadine grape cultivars (*Vitis rotundifolia* Michx.) using HS-SPME-GC/MS combined with multivariate statistical analysis. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 728891
- [29] Metrani R, Jayaprakasha G K, Patil B S. Optimization of experimental parameters and chemometrics approach to identify potential volatile markers in seven cucumis melo varieties using HS-SPME-GC-MS. *Food Analytical Methods*, 2022, 15(3): 607-624
- [30] 谢凯丽. 不同种质资源桃果实芳香物质研究. 杭州: 浙江大学, 2021
Xie K L. Study of fruit volatiles in peach germplasm resources. Hangzhou: Zhejiang University, 2021
- [31] Aubert C, Günata Z, Ambid C, Baumes R. Changes in physicochemical characteristics and volatile constituents of yellow- and white-fleshed nectarines during maturation and artificial ripening. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(10): 3083-3091
- [32] Cazzonelli C I, Pogson B J. Source to sink: Regulation of carotenoid biosynthesis in plants. *Trends in Plant Science*, 2010, 15(5): 266-274
- [33] Bliss F A, Arulsekhar S, Foolad M R, Becerra V, Gillen A M, Warburton M L, Dandekar A M, Kocsisne G M, Mydin K K. An expanded genetic linkage map of *Prunus* based on an interspecific cross between almond and peach. *Genome*, 2002, 45(3): 520-529
- [34] Bar E, Brandi F, Horváth G, Mourgues F. Study of 'Redhaven' peach and its white-fleshed mutant suggests a key role of CCD4 carotenoid dioxygenase in carotenoid and norisoprenoid volatile metabolism. *BMC Plant Biology*, 2011, 11(24): 1471-2229
- [35] Eduardo I, Chietera G, Bassi D, Rossini L, Vecchiotti A. Identification of key odor volatile compounds in the essential oil of nine peach accessions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(7): 1146-1154