

顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法 分析脐橙中挥发性成分

潘奕丞¹, 钱敏^{1*}, 赵培静², 白卫东¹, 姜浩¹, 潘思轶³, 赵文红^{1*}, 陈铎⁴

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广州 510225; 2. 广东省华微检测股份有限公司, 广州 510700;
3. 华中农业大学食品科技学院, 武汉 430070; 4. 梅州市飞龙果业有限公司, 梅州 514600)

摘要: **目的** 探究脐橙果皮和果肉中挥发性成分的种类、相对含量及其风味的差异。**方法** 将脐橙洗净后切分为果皮及果肉部分, 经粉碎后, 通过顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)技术分别富集果皮和果肉的挥发性成分, 再经气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)分析其挥发性成分的种类及相对含量, 同时计算各物质的相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)。

结果 脐橙中鉴定出烯炔类、醛类、醇类、酮类、酯类和酸类等挥发性成分共 82 种, 果皮中有 59 种, 果肉中有 51 种, 两者共有成分 28 种, 其中果皮特有挥发性成分 31 种, 果肉 23 种; 对果皮风味起关键作用和修饰作用的挥发性成分分别有 20 种和 7 种, 果肉分别有 9 种和 7 种。脐橙果皮和果肉中相对含量最高的成分均为 D-柠檬烯, 分别达到 43.97%和 41.25%, 果皮次主要成分为芳樟醇, 含量为 5.38%, 果肉次主要成分为巴伦烯亚橘烯, 含量为 18.50%; 对果皮风味贡献最高的物质为芳樟醇, 主要提供麻香、青香和花香, 对果肉贡献最高的物质为 β -紫罗酮, 主要提供花香; 此外果皮和果肉的木调香和清香差异不大, 但果皮的果香、花香、甜香和脂香更加丰富。

结论 脐橙果皮和果肉中挥发性成分的种类和含量差异较大, 且造成其关键香气的物质有明显区别。

关键词: 脐橙; 果皮; 果肉; 挥发性成分

Analysis of volatile components in *Citrus sinensis* Osbeck by headspace solid phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry

PAN Yi-Cheng¹, QIAN Min^{1*}, ZHAO Pei-Jing², BAI Wei-Dong¹, JIANG Hao¹,
PAN Si-Yi³, ZHAO Wen-Hong^{1*}, CHEN Duo⁴

(1. College of Light Industry and Food, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China;
2. Guangdong Huawei Testing Co., Ltd., Guangzhou 510700, China; 3. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 4. Meizhou City Dragon Fruit Industry Co., Ltd., Meizhou 514600, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the types, relative content and flavor differences of volatile components in pericarp and pulp of *Citrus sinensis* Osbeck. **Methods** *Citrus sinensis* Osbeck was washed and cut into pericarp and

基金项目: 广东省重点研发计划项目(2022B0202050003)

Fund: Supported by the Key Research and Development Program of Guangdong Province (2022B0202050003)

*通信作者: 钱敏, 硕士, 高级实验师, 主要研究方向为食品化学、食品加工与品质安全控制。E-mail: 358854770@qq.com

赵文红, 博士, 教授, 主要研究方向为食品微生物等。E-mail: 848060091@qq.com

*Corresponding author: QIAN Min, Master, Senior Engineer, College of Light Industry and Food, Zhongkai University of Agricultural and Engineering, Guangzhou 510225, China. E-mail: 358854770@qq.com

ZHAO Wen-Hong, Ph.D, Professor, College of Light Industry and Food, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China. E-mail: 848060091@qq.com

pulp. After grinding, the volatile components in pericarp and pulp were enriched by headspace solid phase microextraction (HS-SPME) technology. Then gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to analyze the types and relative content of volatile components, and the relative odor activity value (ROAV) of each substance were calculated. **Results** A total of 82 kinds of volatile components, including olefins, aldehydes, alcohols, ketones, esters, and acids, were identified in *Citrus sinensis* Osbeck, including 59 kinds of in the peel and 51 kinds of in the flesh. There were a total of 28 kinds of components in both, including 31 kinds of in the peel and 23 kinds of in the flesh; there were 20 kinds of and 7 kinds of volatile components that played a critical and modifying role in the flavor of the fruit peel, and 9 kinds of and 7 kinds of volatile components in the flesh, respectively. The component with the highest relative content in the peel and flesh of *Citrus sinensis* Osbeck was *D*-limonene, reaching 43.97% and 41.25%, respectively. The secondary main component in the peel was linalool, with a content of 5.38%. The secondary main component in the flesh was valenene, with a content of 18.50%; the substance with the highest contribution to the flavor of the fruit peel was linalool, which mainly provided the aroma of hemp, green, and flowers. The substance with the highest contribution to the flesh was β -violone, mainly providing floral fragrance; in addition, there was no significant difference in the woody and light aroma between the peel and flesh, but the fruit, floral, sweet, and fatty aromas of the peel were more abundant. **Conclusion** There are significant differences in the types and contents of volatile components in the pericarp and pulp of *Citrus sinensis* Osbeck, and there are significant differences in the substances that contribute to their key aroma.

KEY WORDS: *Citrus sinensis* Osbeck; pericarp; pulp; volatile components

0 引言

柑橘是全球种植、加工和消费都最大类的水果之一^[1],其营养丰富,口感优良,深受广大消费者喜欢^[2]。我国柑橘资源丰富,种植面积居世界首位,产量居世界第三位^[3],是柑橘类水果种植面积和产量第一的大国,主要种类包括柑、橘、橙、柠檬、柚、佛手柑、金橘等^[4]。

脐橙(*Citrus sinensis* Osbeck)属芸香科柑橘属植物,是柑橘品种中最受欢迎的水果之一^[5]。脐橙的风味是吸引消费者的一大原因,其中挥发性成分是影响脐橙风味的主要因素^[6],研究表明脐橙含有大量挥发性成分,包括单萜烯类、倍半萜烯类、醛类、醇类、酯类和酮类^[7]。NADUVILTHARA 等^[8]通过分析柑橘精油得出主要成分具体为 *D*-柠檬烯、 α -蒎烯、 α -月桂烯、3-蒎烯和柠檬醛等物质。柑橘的果皮、枝叶等组织均有精油的存在^[9],可用于酒类、食品的调味,也用于香水和化妆品行业^[10],还可作为天然抗氧化剂和天然抗菌剂^[11]。目前全世界柑橘年产量达到 1.58 亿 t,且其中约有三分之一会被加工并产生大量果渣^[12],这些废弃物由果肉、种子和果皮组成,约占柑橘总量 50%^[13],这种废弃物被丢弃时会造成大量浪费和引起环境问题。同时,我国柑橘约有 90%以鲜销为主,水果深加工工业的发展相对滞后^[14],因此,了解脐橙果皮和果肉中挥发性成分的组成以及含量,有助于探索和开发脐橙的额外应用及加工副产物的再利用,提高经济价值。

脐橙挥发性成分的相关研究主要是对加工后的产品、果皮或果肉单独进行研究^[15-18],而同一品种脐橙的果皮和

果肉所含挥发性成分有较大差异,且不同品种、产地及采摘时间的脐橙,所含挥发性成分也有所差异。因此,将单独研究的脐橙果皮或果肉的挥发性成分串联使用,所调配出的精油香气可能有所突兀。目前对同一品种的脐橙果皮和果肉同时进行研究的较少,研究同一品种新鲜脐橙的果皮及果肉所含的挥发性成分的异同及其影响其风味的关键性成分,有利于调配出更为自然的脐橙精油和相关风味产品,以及脐橙整果加工后残渣的再利用提供参考。顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)是一种操作简便快速、试剂消耗量少,且可以避免样品中大分子化合物干扰的抽提方法^[19-20]。本研究拟利用 HS-SPME 方法提取新鲜脐橙果皮和果肉中的挥发性成分,采用气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)分析其挥发性成分的成分及其相对含量,为脐橙精油开发以及加工副产物再利用等综合开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

原料(脐橙)均选用产自岭南地区的新鲜脐橙。

氯化钠(分析纯,天津市大茂化学试剂厂);超纯水由北京普析通用仪器有限公司超纯水器制得。

1.2 仪器与设备

6890-5973N 气相色谱质谱联用仪[安捷伦科技(中国)有限公司]; DXF-04C 粉碎机(广州市大祥电子机械设备有限公司); BSA224S-CW 电子分析天平[精度 0.0001 g, 赛多利

斯科学仪器(北京)有限公司]; DB-Wax 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)[安捷伦科技(中国)有限公司]。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

用超纯水将脐橙和手提式粉碎机洗净, 待脐橙和粉碎机自然晾干后, 采用小刀切分脐橙, 手动将脐橙果皮和果肉分离, 并用小刀将果皮和果肉切分为小块, 分别将其放入手提式粉碎机粉碎 2 min, 每 30 s 打开粉碎机, 用玻璃棒重新搅匀样品, 防止大颗粒样品粘壁; 收集固体置洁净烧杯中备用。称取 6.00 g 粉碎后果皮 5 份、果肉 6 份, 分别置于 10 mL 顶空瓶里, 加入 2.00 g 氯化钠, 密封后在常温下静置 15 min。

1.3.2 HS-SPME 条件

样品预热条件: 45°C, 预热 10 min; 顶空吸附: 将老化后的微萃取头(DVB/CAR/PDMS)插入顶空瓶中, 推出纤维头, 于顶空位置吸附 35 min 后, 收回纤维头, 抽提过程中保持 45°C 加热。GC-MS 样品分析: 顶空吸附后迅速送样至 GC 送样口, 于 250°C 温度下热解析 5 min。

1.3.3 GC-MS 条件

色谱条件: 使用 DB-Wax 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 采用不分流进样方式, 控制进样口温度为 250°C; 起始温度控制在 40°C 维持 5 min 后, 以 2°C/min 升温至 60°C, 再以 5°C/min 升温至 180°C, 维持 5 min 后, 接着以 10°C/min 升温至 230°C, 保留 10 min; 载气为高纯氮气。

质谱条件: 电子轰击(electron impact, EI)电离, 电子能量为 70 eV, 扫描范围为 35~500 amu, 离子源温度 230°C。

1.4 ROAV 分析

参考刘登勇等^[21]的方法, 采用 ROAV 法确定脐橙果皮及果肉中主要挥发性成分, 按公式(1)确定果皮或果肉中对风味贡献度最大的物质, 将样品风味贡献最大组分的 ROAV 值设置为 100, 其他挥发性成分的 ROAV 按照公式(2)计算:

$$\text{ROAV} = \frac{C_i}{T_i} \quad (1)$$

$$\text{ROAV} \approx \frac{C_i}{C_{\max}} \times \frac{T_{\max}}{T_i} \times 100 \quad (2)$$

式中:

C_i —目标化合物的相对含量(%);

T_i —目标化合物的感觉阈值(mg/kg);

C_{\max} —对脐橙果皮或果肉风味贡献最大组分的相对含量(%);

T_{\max} —对脐橙果皮或果肉风味贡献最大组分的感觉阈值(mg/kg)。

当挥发性成分的浓度一定时, 感觉阈值越低的化合物越容易被人体感知^[22]。研究认为 ROAV ≥ 1 时, 该挥发性物质被确定为该样品的关键挥发性成分, 0.1 ≤ ROAV < 1 时, 该挥发

性物质被确定为对样品的总体风味具有重要的修饰作用^[21]。

1.5 数据处理

实验所得的 GC-MS 数据采用 Excel 2016 软件绘制图, TTools 软件绘制热图和 Origin 2021 软件绘制柱状图、雷达图和比例弦图, 并对图表进行结果分析。

2 结果与分析

2.1 脐橙挥发性成分的成分分析

脐橙中的挥发性成分是影响感官品质的一个重要因素。采用 HS-SPME-GC-MS 分析脐橙果皮及果肉挥发性成分, 将橙皮样品标记为 Pericarp 1~5, 果肉样品标记为 Pulp 1~6, 其结果由图 1 可知, 在脐橙的果皮和果肉中分别检测出挥发性成分 59 种和 51 种, 检出数量高于文献^[6,23-25]检出量, 其原因可能是本研究采用 HS-SPME 方法, 排除了大分子物质干扰, 且原料粉碎彻底, 抽提时进行了加热, 使脐橙挥发性成分更容易析出, 导致检出物数量更加丰富。同时果皮与果肉之间同一种挥发性成分的含量差异显著, 说明果皮和果肉中各挥发性成分占比差异较大; 此外, 果皮或果肉各平行之间挥发性成分有所差异, 其原因可能为相同产地的同一品种脐橙, 在不同园区果实的挥发性成分会有所差异^[26]。

烯烴类物质是橙汁挥发性化合物的主要化学类别, 在橙的气味中起着重要作用^[27]。烯烴类物质广泛存在于各种植物中, 是植物花香成分中最大的一类物质, 其在植物中通过 2-甲基-D-赤藓糖醇-4-磷酸(2-methy-derythrito-4-phosphate, MEP)途径和甲羟戊酸(mevalonic acid, MVA)途径生成异戊烯焦磷酸(isopentenyl pyrophosphate, IPP)和二甲基烯丙基焦磷酸盐(dimethylallyl pyrophosphate, DMAPP), 随后 2 种产物在酶作用下完成各种烯烴类物质的合成及修饰(兰科植物花香成分研究进展)。在检测出的烯烴类物质中, 果皮和果肉中相对含量最高的均为 D-柠檬烯, 分别达到 43.97% 和 41.25%, 从检测结果可以看出 D-柠檬烯是脐橙释放出的最主要挥发性成分, 这与吴婷等^[24]、王强等^[25]和冯桂蓉等^[28]的研究结果相同。D-柠檬烯具有类似柠檬或甜橙的香味, 可添加到冰激凌、巧克力等食品中用于调整口感, 也可以在橙香、果香等香型的配方中作为修饰剂^[29], 是食品工业中常见的天然风味添加剂^[30], 也是大多数柑橘油的主要成分^[31]。另外可用于杀菌、抑制氧化、杀虫等领域^[32], 也可以用于合成左旋薄荷醇等手性香料^[33]。同时, 果皮和果肉中均检测出巴伦西亚橘烯, 分别达到 18.50% 和 2.48%。巴伦西亚橘烯是一种无色、呈现柑橘类香气的液体, 天然存在于柑橘类水果和可可等农产品中, 在 GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》中是一种暂时允许使用的食品用香料, 主要用于调配柑橘香型的食用香精, 在日化香精配方中也广泛应用, 可以用于提高柑橘类香精的香气和提升柑橘产品的品质, 同时巴伦西亚橘烯还可用于合成圆柚酮这类高价值香料^[34]。此外, 果皮中检

测出呈柠檬味的萜品烯相对含量为2.66%，其含量远高于果肉的0.01%。从分析结果看，脐橙果皮和果肉中主要的烯炔类挥发性成分差异不大，但果皮中存在的萜品烯含量远高于果肉中的含量，使得果皮风味较果肉更为刺激，该烯炔类物质可能是造成果皮和果肉风味及口感差异的主要物质之一。

醇类物质是常见的水果挥发性化合物^[27]，其来源可能是脐橙中的萜烯类化合物在酸性条件下(pH=3.8)发生一系列氧化水合脱水反应，生成醇类化合物^[35]。在检测出的醇类物质中，果皮的主要成分分别为呈花香、麻香和青香的芳樟醇(5.38%)，呈玫瑰、橙花香的橙花醇(3.11%)和呈甜香、杏仁香的香叶醇(2.17%)、果肉中主要成分为呈青草味的叶醇(2.13%)。其中芳樟醇含量最高，其存在于多种植物精油中，是一种无色或浅黄色的液体^[36]，在GB 1886.148—2015《食品安全国家标准 食品添加剂 芳樟醇》中是允许使用的一种食品添加剂，主要提供淡淡的铃兰花香以及浓郁的青香和麻香^[37]，是一些芳香植物精油的主要成分之一，常被作为芳香剂和调味剂添加到洗涤剂或食品中^[38]，在医药上有镇静和催眠作用^[39]。本研究在脐橙果皮中检出的芳樟醇平均相对含量高于马东等^[17](0.43%~2.17%)和周娟等^[40](0.61%~2.39%)的检出结果，可能是所用的挥发性成分富集方法、检测方法、脐橙产地和果实成熟度不同等各种因素导致。同时果皮中芳樟醇检出量远高于果肉检出的0.21%，其原因可能是芳樟醇糖苷存在于果皮中，可以释放游离芳樟醇，但没有方法证实芳樟醇糖苷在果肉中的存在^[41]。从分析结果看，脐橙果皮的醇类物质比果肉更加丰富，其原因可能为脐橙的脂类主要存在于果皮的精油中，而该类物质主要来源于脂肪的氧化降解、脂肪酸的分解以及羰基化合物的还原反应^[42]；此外，脐橙果皮和果肉的醇类物质差异明显，而芳樟醇在果皮中大量存在，可能是造成果皮拥有明显青香、麻香和花香的源头。

酯类化合物是脐橙中最重要的香气成分之一^[43]，通常由有机酸与醇类化合物进行酯化反应形成。酯类的果味经常被报道可以增强水果的甜味和抑制酸味^[44]。在检测出的酯类物质中，果肉主要检测出呈甜橙香的辛酸甲酯(2.33%)，其是一种具有强烈酒香和柑橘香的无色至淡黄色油状液体，可通过催化辛酸发生酯化反应生成，通常用作食品或化妆品的香料配料，主要用以配制菠萝等水果型的食用香料，也是化妆品以及药物的重要原料和中间体，同时也可作为植物生长调节剂及生物柴油的潜在替代品。此外，还可用作酸性蛋白质的沉淀及染料的合成^[45-46]。而其余酯类化合物及果皮中酯类化合物含量较少。从分析结果看，果肉中酯类化合物的存在，赋予了果肉甜橙味，让脐橙果肉气味更香，同时与果皮的风味呈现差异。

在检测出的醛类物质中，果皮的主要成分分别为呈霉味、黄瓜味的癸醛(3.00%)，呈柠檬味的香叶醛(2.01%)和柠檬醛(1.62%)，其余醛类化合物较少，而果肉中仅存在

癸醛(0.10%)一种醛类化合物，其原因可能是脐橙精油主要分布于脐橙果皮的油泡中，而植物油在氧化过程中会产生较多的醛类物质^[47]。CAO等^[48]认为温度会影响醛的生成，温度越高，醛的生成越多，由此XIAO等^[41]推测果皮中这些醛类物质含量高可能是由于果皮长期暴露在阳光和高温下造成的。从分析结果看，醛类化合物赋予了果皮区别于果肉的绿叶调气息。

在检测出的酮类物质中，果皮含量最高的是呈圆柚、柑桔、木香香韵的圆柚酮(0.04%)，其次为呈樟脑、薄荷味的胡椒酮(0.03%)和呈水果香、清香的甲基庚烯酮(0.02%)；果肉中含量最高的是呈木兰香的香叶基丙酮(0.10%)，其次为圆柚酮(0.05%)和呈花香的 β -紫罗酮(0.04%)，呈花香、留兰香的D-香芹酮(0.02%)最少。从分析结果看，果皮主要比果肉多出更加刺激的薄荷气味以及独有的清香味，而果肉的花香较果皮则更为丰富。

FAN等^[49]认为橙子在贮藏过程中发酵，变得柔软易食，会产生酸类物质。在检测出的酸类物质中，果皮含量最高的是呈奶油味的辛酸(0.03%)，其次为橙花酸(0.01%)；果肉仅含呈醋味的乙酸(0.04%)。脐橙果皮和果肉中，酸类化合物含量均最低，且酸类物质的阈值普遍较高，使得酸类物质对于脐橙整体香气的贡献度不大。

由图2-3可知，脐橙果皮中检出的59种挥发性成分包括20种烯炔类、12种醛类、13种醇类、3种酮类、9种酯类和2种酸类，这些挥发性气体成分主要以烯炔类(55.92%)为主，醇类(18.71%)和醛类(9.78%)次之，酯类(0.69%)和酸类(0.04%)再次之，酮类(0.09%)最少，说明烯炔类、醇类和醛类是果皮种主要的挥发物。脐橙果肉中共检出的51种挥发性成分包括12种烯炔类、1种醛类、15种醇类、4种酮类、17种酯类和2种酸类，这些挥发性气体成分主要以烯炔类(62.89%)为主，醇类(6.07%)和酯类(4.29%)次之，酮类(0.21%)和醛类(0.10%)再次之，酸类(0.07%)最少，说明烯炔类、酯类和醇类是果肉中主要的挥发物。

2.2 脐橙果皮及果肉关键挥发性成分的分析

将脐橙果皮和果肉的挥发性风味成分种类差异绘制成比例弦图，每个圆弧段对应一类物质的总量，根据果皮及果肉特有、共有成分的色块占据对应圆弧比例，判断果皮及果肉各类物质的特有、共有成分各有几种。结果如图4所示，烯炔类挥发性成分中果皮特有成分有10种，果肉特有成分有2种，共有成分有10种；醛类挥发性成分中果皮特有成分有11种、果肉特有成分有0种、共有成分有1种；醇类挥发性成分中果皮特有成分有4种、果肉特有成分有6种、共有成分有9种；酮类挥发性成分中果皮特有成分有2种、果肉特有成分有3种、共有成分有1种；酯类挥发性成分中果皮特有成分有2种、果肉特有成分有10种、共有成分有7种；酸类挥发性成分中果皮特有成分有2种、果肉特有成分有2种，共有成分有0种。

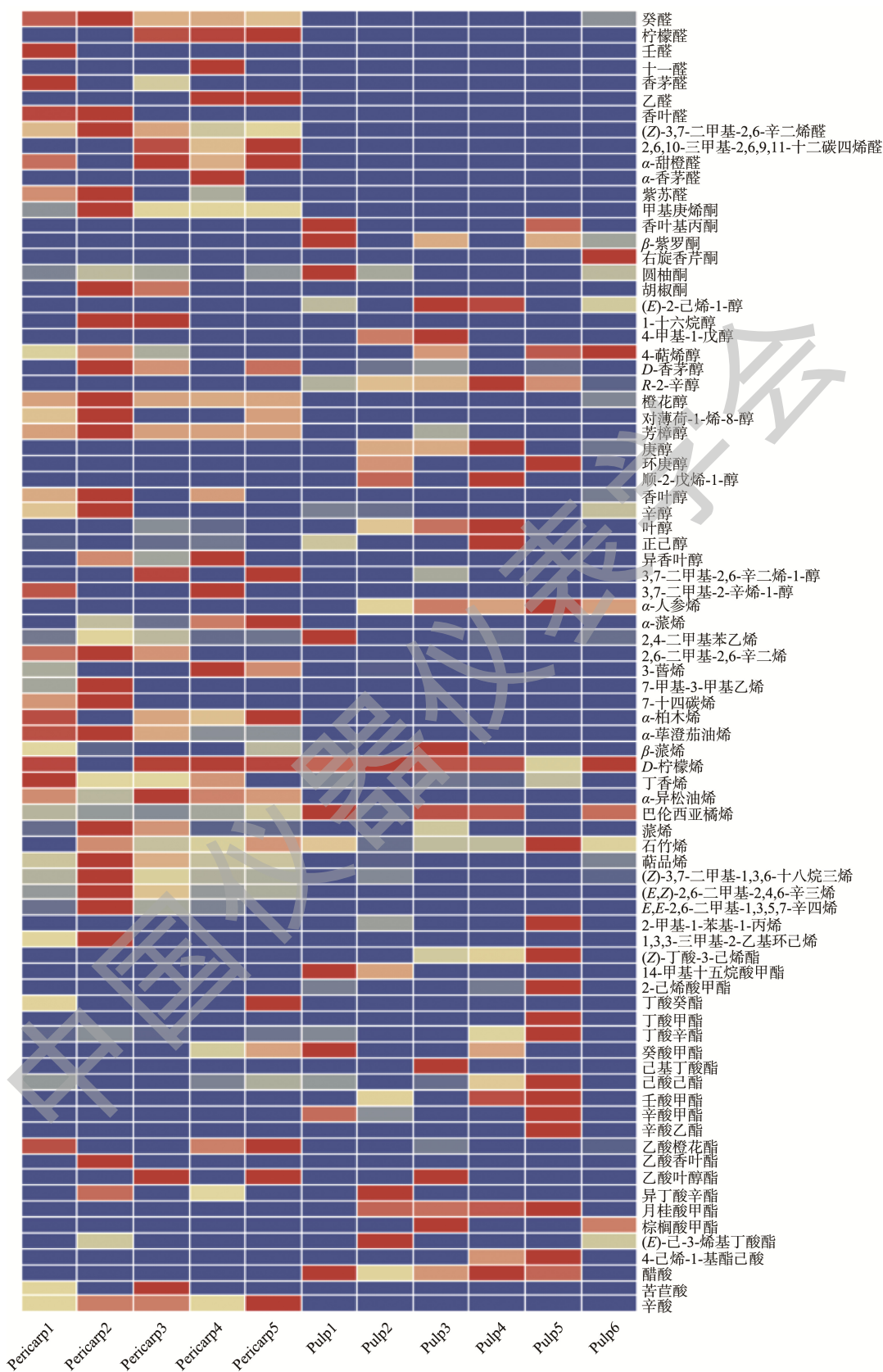


图 1 挥发性成分的成分热图

Fig.1 Heat map of volatile component

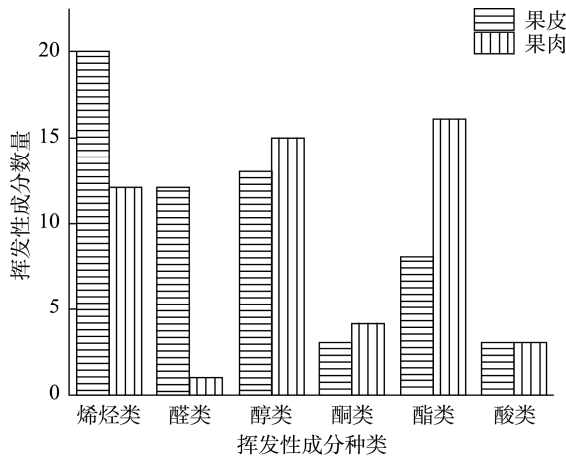


图 2 挥发性成分的种类数量
Fig.2 Number of types of volatile components

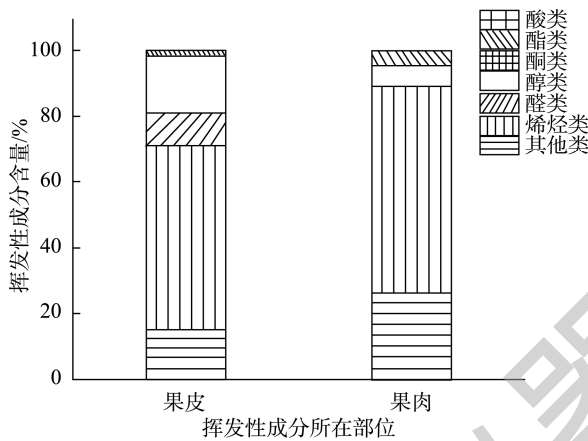


图 3 挥发性成分的种类含量
Fig.3 Types and content of volatile components

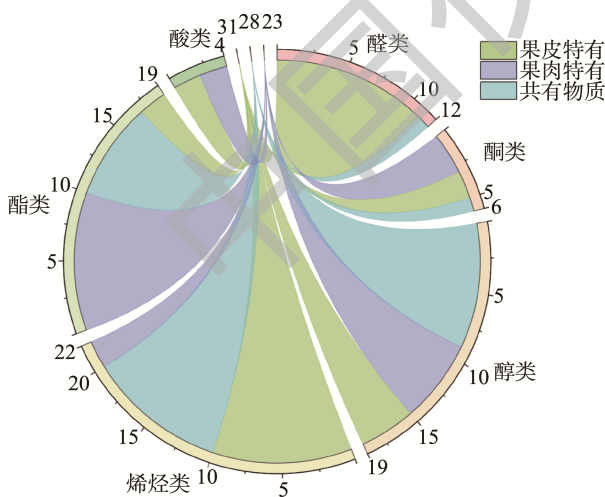


图 4 挥发性成分的种类差异
Fig.4 Differences of volatile components

并非所有的挥发性物质都对脐橙的风味作出贡献, 仅仅依靠物质的含量来判断其重要性的方法具有很大的局

限性^[50]。本研究利用 ROAV 表征了对脐橙果皮及果肉中起重要贡献的关键香气物质。通过相关文献报道^[51-52], 共确定 38 种挥发性化合物的气味阈值。结合脐橙果皮及果肉中检测到的挥发性成分的感觉阈值, 得出果皮和果肉中风味贡献程度最大的物质分别为香茅醛和 β -紫罗酮, 由此计算出各挥发性成分的 ROAV 值。

结果如图 5 和表 1 所示, 根据香气化合物的 ROAV 值, 果皮中共筛选出 20 种对脐橙果皮香气具有重要贡献的关键成分($ROAV > 1$), 其中芳樟醇(2721.66)对风味的贡献度最大, 其次为癸醛(1153.08)、柠檬醛(624.62)、香叶醇(556.41)、*D*-香茅醇(406.92)、*D*-柠檬烯(402.64)、香茅醛(100.00)、香叶醛(96.83)、橙花醇(74.81)、辛醇(70.51)、蒎烯(39.28)、紫苏醛(18.24)、壬醛(17.18)、 α -蒎烯(13.94)、十一醛(5.49)、蒎品烯(2.39)、叶醇(1.65)、乙酸叶醇酯(1.27)、乙酸香叶酯(1.19)和 4-蒎烯醇(1.19), 这些化合物赋予了果皮麻香、青香、花香、黄瓜香、柠檬香及木质香等; 同时有 7 种物质对果皮的风味起修饰作用($1 \geq ROAV > 0.1$)^[21], 分别为巴伦西亚橘烯(0.45)、甲基庚烯酮(0.42)、乙醛(0.35)、正己醇(0.35)、癸酸甲酯(0.22)、丁酸辛酯(0.17)和辛酸(0.11), 它们对果皮中的果香和柑橘香也具有一定的贡献。果肉中共筛选出 9 种对脐橙果皮香气具有重要贡献的关键成分($ROAV > 1$), 其中 β -紫罗酮(100.00)虽然含量最低, 但是对果肉风味影响最大; 其次为 *D*-柠檬烯(27.29)、芳樟醇(7.80)、癸醛(2.69)、*D*-香茅醇(2.59)、叶醇(1.48)、香叶基丙酮(1.44)、香叶醇(1.27)和丁酸甲酯(1.00), 这些化合物赋予了果肉花香、麻香、柠檬香、青草香和苹果香等; 此外, 有 7 种物质对果皮的风味起修饰作用($1 \geq ROAV > 0.1$)^[21], 分别为辛醇(0.97)、辛酸甲酯(0.65)、蒎烯(0.44)、巴伦西亚橘烯(0.24)、正己醇(0.18)、橙花醇(0.15)、4-蒎烯醇(0.13), 它们对果肉中的甜橙香、橙花香和木香等也具有一定的贡献。

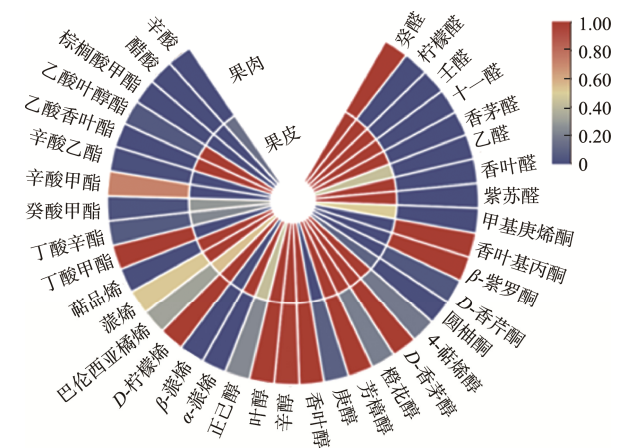


图 5 挥发性成分的 ROAV 图
Fig.5 ROAV diagram of volatile components

表 1 挥发性成分的 ROAV
Table 1 ROAV of volatile components

中文名称	气味描述 ^[35,51-53]	CAS 号	阈值 ^[54-55] /(mg/L)	相对含量/%		ROAV	
				果皮	果肉	果皮	果肉
癸醛	霉味、黄瓜味	000112-31-2	0.01	3.00	0.10	1153.08	2.69
柠檬醛	柠檬香	005392-40-5	0.01	1.62	0.00	624.62	0.00
壬醛	花香、柑橘味	000124-19-6	0.02	0.13	0.00	17.18	0.00
十一醛	甜味	000112-44-7	0.01	0.04	0.00	5.49	0.00
香茅醛	油脂味	000106-23-0	0.04	0.18	0.00	100.00	0.00
乙醛	甜味、果香	000075-07-0	0.02	0.00	0.00	0.35	0.00
香叶醛	柠檬气味	000141-27-5	0.04	2.01	0.00	96.83	0.00
紫苏醛	花香味	002111-75-3	0.03	0.24	0.00	18.24	0.00
甲基庚烯酮	水果香、清香	000110-93-0	0.10	0.02	0.00	0.42	0.00
香叶基丙酮	木兰花	003796-70-1	0.01	0.00	0.10	0.00	1.44
β -紫罗酮	花香	014901-07-6	0.00006	0.00	0.04	0.00	100.00
D-香芹酮	花香、留兰香	002244-16-8	0.09	0.00	0.02	0.00	0.03
圆柚酮	柑橘、甜果皮、木香	004674-50-4	1.00	0.04	0.05	0.07	0.01
4-萜烯醇	木质味、清新味	000562-74-3	0.35	0.22	0.34	1.19	0.13
D-香茅醇	玫瑰花香	001117-61-9	0.01	2.12	0.19	406.92	2.59
橙花醇	玫瑰、橙花、柠檬香	000106-25-2	0.08	3.11	0.09	74.81	0.15
芳樟醇	青香、麻香、花香	000078-70-6	0.004	5.38	0.21	2721.66	7.80
庚醇	特有芳香气味	053535-33-4	0.20	0.00	0.09	0.00	0.06
香叶醇	甜香、杏仁香	000106-24-1	0.008	2.17	0.07	556.41	1.27
辛醇	肥皂味	000111-87-5	0.05	1.98	0.38	70.51	0.97
叶醇	青草味	000928-96-1	0.20	0.17	2.13	1.65	1.48
正己醇	树脂, 花, 绿色	000111-27-3	0.70	0.13	0.89	0.35	0.18
α -蒎烯	清凉油、松脂味	007785-26-4	0.12	0.87	0.00	13.94	0.00
β -蒎烯	清凉油、树脂味	000127-91-3	36.10	0.16	0.18	0.01	0.00
D-柠檬烯	柠檬味	005989-27-5	0.21	43.97	41.25	402.64	27.29
巴伦西亚橘烯	柑橘味	004630-07-3	10.50	2.48	18.50	0.45	0.24
蒎烯	松木香	007785-70-8	0.03	0.67	0.10	39.28	0.44
萜品烯	柠檬味	000099-85-4	2.14	2.66	0.01	2.39	0.01
丁酸甲酯	苹果香	000623-42-7	0.06	0.00	0.43	0.00	1.00
丁酸辛酯	甜瓜	000110-39-4	1.20	0.11	0.37	0.17	0.04
癸酸甲酯	-	000110-42-9	1.00	0.11	0.15	0.22	0.02
辛酸甲酯	甜橙香	000111-11-5	0.50	0.00	2.33	0.00	0.65
辛酸乙酯	百合花、香蕉、梨香	000106-32-1	0.65	0.00	0.04	0.00	0.01
乙酸香叶酯	玫瑰、熏衣草	000483-76-1	0.10	0.06	0.00	1.19	0.00
乙酸叶醇酯	香蕉味	003681-71-8	0.012	0.01	0.00	1.27	0.04
棕榈酸甲酯	特殊气味	000112-39-0	4000.00	0.00	0.04	0.00	0.00
乙酸	醋香	000064-19-7	6.40	0.00	0.04	0.00	0.00
辛酸	奶油味	000124-07-2	0.50	0.03	0.00	0.11	0.00

注: -表示未找到该类物质的相关气味描述。

根据 ROAV 结果, 分析造成果皮及果肉风味差异的物质。果皮特有且对风味起关键作用(ROAV>1)的物质由强到弱分别为柠檬醛、香茅醛、香叶醛、紫苏醛、壬醛、 α -蒎烯、十一醛、乙酸香叶酯, 这些物质赋予了果皮柠檬味、油脂味、花香味、柑橘味、清凉油味、松脂味和甜味, 而甲基庚烯酮、乙醛和辛酸则是对果香味、清香、甜味以及奶油味起修饰作用。果肉特有且对风味起关键作用(ROAV>1)的物质由强到弱分别为 β -紫罗酮、香叶基丙酮

和丁酸甲酯, 这些物质赋予了果肉区别于果皮的花香、木兰花和苹果香, 而辛酸甲酯则是对果肉的甜橙香起修饰作用。从分析结果看, 果皮的香气较果肉更为丰富, 其中较于果肉多出的香气是由芳樟醇、香茅醛、壬醛、 α -蒎烯、乙酸叶醇酯、乙酸香叶酯、甲基庚烯酮、乙醛、丁酸辛酯和辛酸提供的麻香、油脂味、花香、柑橘味、清凉油、松脂味、香蕉味、熏衣草、水果香、清香、甜味、果香、甜瓜香和奶油味; 果肉较果皮多出的香气则是由香叶基丙

酮、丁酸甲酯和辛酸甲酯提供的木兰香、苹果香和甜橙香。

根据各挥发性成分的气味描述, 将之归纳为果香、花香、木香、清香、甜香和脂香。结合 ROAV 值, 估略脐橙各香气组分的贡献程度。结果如图 6 所示, 脐橙果皮和果肉的果香、花香、清香、甜香和脂香差异明显, 而木香区别不大。

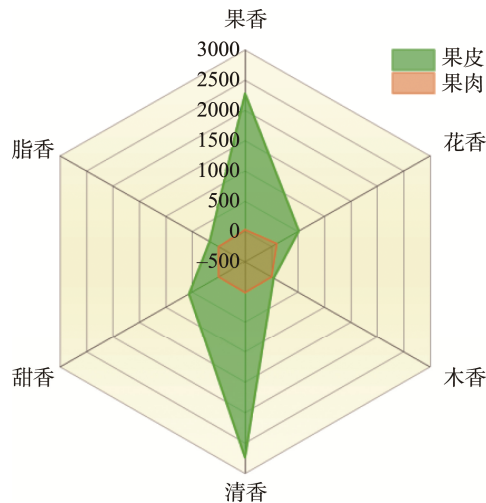


图 6 果皮及果肉香气种类分析

Fig.6 Aroma species analysis of pericarp and pulp

3 结论

本研究利用 HS-SPME-GC-MS 分别分析脐橙果皮和果肉两种部位挥发性成分种类及相对含量, 同时引入 ROAV 值算法, 分析影响脐橙风味的关键物质及香气差异。结果表明, 脐橙果皮检测出 59 种挥发性成分, 果肉检测出 51 种挥发性成分, 共有物质有 28 种。其中 *D*-柠檬烯、芳樟醇和橙花醇是果皮中含量最高的物质, *D*-柠檬烯、巴伦西亚橘烯和辛酸甲酯是果肉中含量最高的物质。利用 ROAV 表征了脐橙果皮和果肉的香气轮廓造, 果皮中对风味贡献明细的物质共 20 种, 其中芳樟醇、癸醛、香茅醛、*D*-柠檬烯、*D*-香茅醇、香叶醇和柠檬醛的 ROAV 均大于 100, 为果皮提供了大量的花香、黄瓜味、果香和脂香; 果肉中对风味贡献明细的物质共 9 种, 但仅 β -紫罗酮和 *D*-柠檬烯的 ROAV 值高于 10, 为果肉提供花香及柑橘香。另外, 根据香气描述的差异, 分析出为果皮提供独有香气成分的组分为芳樟醇、香茅醛、壬醛、 α -蒎烯、乙酸叶醇酯、乙酸香叶酯、甲基庚烯酮、乙醛、丁酸辛酯和辛酸; 为果肉提供独有香气成分的组分为香叶基丙酮、丁酸甲酯和辛酸甲酯。后续还需针对不同成熟程度的脐橙及榨汁后果渣中挥发性成分种类及含量的变化展开进一步深入研究, 以探知脐橙最佳风味时期及其加工副产物的利用价值, 为脐橙精油调配及加工副产物再利用等综合利用提供参考。

参考文献

- [1] 王夜梅, 李江南, 尹会平, 等. 柑橘中类柠檬苦素的提取、分离纯化及检测技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 470-479.
WANG YM, LI JN, YIN HP, et al. Research progress on extraction, separation, purification and detection technology of limonins in citrus [J]. Sci Technol Food Ind, 2023, 44(12): 470-479.
- [2] 郭丽英, 陈小乐, 吉前华, 等. 天然保鲜剂在柑橘保鲜上的应用研究进展[J]. 食品工程, 2022, (3): 22-25, 72.
GUO LY, CHEN XL, JI QH, et al. Recent progress in application of natural preservatives in citrus preservation [J]. Food Eng, 2022, (3): 22-25, 72.
- [3] 白俊英, 王晨, 李贵节, 等. 柑橘成分与肠道菌群相互作用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(24): 20-26.
BAI JY, WANG C, LI GJ, et al. Interaction between citrus components and intestinal flora [J]. Food Res Dev, 2022, 43(24): 20-26.
- [4] 苏光林, 蒋立文, 李跑, 等. 柑橘多农药残留高通量检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(9): 85-94.
SU GL, JIANG LW, LI P, et al. Research progress of high-throughput detection of multi-pesticide residues in *Citrus reticulata* Blanco [J]. J Food Saf Qual, 2022, 43(24): 20-26.
- [5] XIANG Z, CHEN X, QIAN C, et al. Determination of volatile flavors in fresh navel orange by multidimensional gas chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry [J]. Anal Lett, 2020, 53(4): 614-626.
- [6] 毛雪金, 张雪, 林月敏, 等. 固相微萃取-气相色谱质谱法分析赣南脐橙挥发性风味物质 [J]. 南昌大学学报(理科版), 2016, 40(4): 324-329.
MAO XJ, ZHANG X, LIN YM, et al. Determination of various volatile aroma compounds in Gannan navel orange by solid phase micro-extraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. J Nanchang Univ (Nat Sci), 2016, 40(4): 324-329.
- [7] HOU J, LIANG L, WANG Y. Volatile composition changes in navel orange at different growth stages by HS-SPME-GC-MS [J]. Food Res Int, 2020, 136: 109333.
- [8] NADUVILTHARA U, BERIN P, MANI C, et al. Chemical characterisation, insecticidal and antioxidant activities of essential oils from four *Citrus* spp. fruit peel waste [J]. Food Biosci, 2022, 50(PB): 102163.
- [9] 靳佳佳, 韦杰. 柑橘精油研究进展[J]. 南方园艺, 2019, 30(2): 53-57.
JIN JJ, WEI J. The review of the study of essential oil from citrus [J]. South Hortic, 2019, 30(2): 53-57.
- [10] FERRER V, PAYMAL N, QUINTON C, et al. Investigations of the chemical composition and aromatic properties of peel essential oils throughout the complete phase of fruit development for two cultivars of sweet orange (*Citrus sinensis* (L.) Osb.) [J]. Plants, 2022, 11(20): 2747.
- [11] 唐清苗, 王鲁峰. 柑橘皮渣的功能组分及加工应用现状[J]. 食品与机械, 2022, 38(6): 180-185, 218.
TANG QM, WAN LF. Functional components of citrus peel and its processing and application status [J]. Food Mach, 2022, 38(6): 180-185, 218.
- [12] 刘雪峰, 杨梅, 向莘莘, 等. 柑橘果皮重要成分及其应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033939
LIU XF, YANG M, XIANG PW, et al. Research progress on important components of citrus peel and their application [J]. Food Ferment Ind, 2022. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033939

- [13] FERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ AM, DELLACASSA E, NARDIN T, *et al.* *In vitro* bioaccessibility of bioactive compounds from citrus pomaces and orange pomace biscuits [J]. *Molecules*, 2021, 26(12): 3480.
- [14] 胡金梅, 许斯琪, 黄茜, 等. 乙醇/磷酸氢二钾双水相同步萃取脐橙果皮中黄酮和果胶[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(22): 8883–8890. HU JM, XU SQ, HUANG Q, *et al.* Simultaneous extraction of flavonoids and pectin from navel orange peel by ethanol/dipotassium hydrogen phosphate aqueous two-phase system [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(22): 8883–8890.
- [15] 孙达, 张红艳, 程运江, 等. 11 个产地纽荷尔脐橙果实风味物质含量差异[J]. *植物科学学报*, 2015, 33(4): 513–520. SUN D, ZHANG HY, CHENG YJ, *et al.* Content of flavor components in newhall navel oranges (*Citrus sinensis*) harvested from eleven production areas of China [J]. *Plant Sci J*, 2015, 33(4): 513–520.
- [16] 张涵, 鲁周民, 王锦涛, 等. 4 种主要柑橘类香气成分比较[J]. *食品科学*, 2017, 38(4): 192–196. ZHANG H, LU ZM, WANG JT, *et al.* Comparative aroma components of fruits of four main citrus varieties [J]. *Food Sci*, 2017, 38(4): 192–196.
- [17] 马冬, 米兰芳, 许赛冰, 等. 赣南地区六类柑橘品种果皮香气组分比较分析[J]. *分子植物育种*, 2022, 1: 1–19. MA D, MILAN F, XU SB, *et al.* Comparative analysis of aroma components in the peel of six types of citrus varieties in Gannan Region [J]. *Molecul Plant Breed*, 2022, 1: 1–19.
- [18] 黄帆, 林军, 袁洪燕, 等. 益生菌脐橙全果汁工艺优化及香气成分分析[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(1): 228–239. HUANG F, LIN J, YUAN HY, *et al.* Process optimization and aroma component analysis of probiotic navel orange whole juice [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2023, 23(1): 228–239.
- [19] 陈璐, 王松, 孙金沅, 等. 多次顶空固相微萃取方法的原理及应用[J]. *精细化工*, 2019, 36(10): 1989–1994. CHEN L, WANG S, SUN JY, *et al.* Principle and application of multiple headspace solid-phase microextraction [J]. *Fine Chem*, 2019, 36(10): 1989–1994.
- [20] 李田田, 花朋朋, 黄梓芮, 等. 顶空固相微萃取结合气质联用分析树舌灵芝的化学成分[J]. *农产品加工(上半月)*, 2017, (10): 37–40. LI TT, HUA PP, HUANG ZR, *et al.* Analysis of chemical constituents of *Ganoderma applanatum* by headspace solid phase micro-extraction/GC-MS [J]. *Farm Prod Process*, 2017, (19): 37–40.
- [21] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. *食品科学*, 2008, (7): 370–374. LIU DY, ZHOU GH, XU XL. “ROAV” method: A new method for determining key odor compounds of food [J]. *Food Sci*, 2008, (7): 370–374.
- [22] 严学芬, 许应芬, 李海燕, 等. 基于顶空固相微萃取法-气相色谱-质谱法和相对气味活度值分析 13 种凤凰单丛茶香气成分[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(17): 5459–5467. YAN XF, XU YF, LI HY, *et al.* Analysis of aroma components of 13 kinds of Fenghuang Dancong tea based on headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and relative odor activity value [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(17): 5459–5467.
- [23] 曹星若, 钟政昌, 辜雪冬, 等. 柑橘类物质果皮挥发性成分对比分析[J]. *食品工业*, 2023, 44(1): 304–309. CAO XR, ZHONG ZC, GU XD, *et al.* Comparative analysis of aroma components between fresh and dried citrus peels [J]. *Food Ind*, 2023, 44(1): 304–309.
- [24] 吴婷, 王新明. 纽荷尔脐橙挥发性风味成分分析[J]. *食品科学*, 2013, 34(6): 160–163. WU T, WANG XM. Chemical composition analysis of volatile components in newhall navel oranges [J]. *Food Sci*, 2013, 34(6): 160–163.
- [25] 王强, 陈金印, 沈勇根, 等. 四个品种赣南脐橙果皮精油提取及挥发性成分分析[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(15): 228–233. WANG Q, CHENG JY, SHEN YG, *et al.* Extraction and volatile components analysis of peel oil from four varieties of Gannan navel oranges [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(15): 228–233.
- [26] 刘渝辰, 王远兴. 联合 UPLC-QTOF-MS 与 HS-SPME-GC-MS 研究赣南脐橙果肉化学成分[J/OL]. *食品科学*: 1–29. [2023-07-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221207.1747.054.html> LIU YC, WANG YX. Identification of the chemical components in Gannan navel orange pulp by coupling UPLC-QTOF-MS with HS-SPME-GC-MS [J]. *Food Sci*: 1–29. [2023-07-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221207.1747.054.html>
- [27] SUN Y, XU Q, PENG W, *et al.* Synergistic effects of ultrasound and beta-D-glucosidase in aroma of orange juice [J]. *J Food Sci*, 2021, 86(6): 2374–2386.
- [28] 冯桂蓉, 王小容, 谢姣, 等. 塔罗科血橙采后花色苷合成规律、挥发性物质组分及含量变化分析[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(17): 234–239. FENG GR, WANG XR, XIE J, *et al.* Synthesis of anthocyanins and changes in volatile components and content in Tarocco orange during postharvest storage [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(17): 234–239.
- [29] 胡智慧, 谌柄旭, 于爱群, 等. 代谢工程改造酿酒酵母合成植物萜类 D-柠檬烯的策略[J]. *微生物学报*, 2018, 58(9): 1542–1550. HU ZH, CHEN BX, YU AIQ, *et al.* Strategies of metabolic engineering *Saccharomyces cerevisiae* to produce plant-derived D-limonene [J]. *Acta Microbiol Sin*, 2018, 58(9): 1542–1550.
- [30] XIONG H, ZHOU X, XIANG W, *et al.* Integrated transcriptome reveals that D-limonene inhibits *Candida tropicalis* by disrupting metabolism [J]. *LWT*, 2023, 176: 114535.
- [31] 周君, 环飞, 李世芬, 等. D-柠檬烯亚急性经皮毒性研究[J]. *毒理学杂志*, 2022, 36(4): 330–333. ZHOU J, HUAN F, LI SF, *et al.* Subacute percutaneous toxicity study of D-limonene [J]. *J Toxicol*, 2022, 36(4): 330–333.
- [32] 黄晨宇, 周雯雯, 卞传飞, 等. 气相色谱-质谱法分析 D-柠檬烯可溶液剂中的 D-柠檬烯含量[J]. *农药*, 2021, 60(12): 891–893. HUANG CY, ZHOU WW, BIAN CF, *et al.* Determination of the content of D-limonene in D-limonene soluble agent by GC-MS [J]. *Agrochemicals*, 2021, 60(12): 891–893.
- [33] SCHEMPF FM, STROBEL I, ETSCHMANN M, *et al.* Identification of fungal limonene-3-hydroxylase for biotechnological menthol production [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2021. DOI: 10.1101/2020.11.25.399378
- [34] 李晓, 范刚, 任婧楠, 等. 瓦伦西亚橘烯生物转化生成圆柚酮[J]. *食品科学*, 2019, 40(6): 77–84. LI X, FAN G, REN JN, *et al.* Biotransformation of valeneene into nootkatone [J]. *Food Sci*, 2019, 40(6): 77–84.
- [35] ROUSEFF R, NAIM M. Citrus flavor stability [Z].
- [36] 李远颂, 何荣荣, 蔡佳欣, 等. 芳樟醇对莓实假单胞菌的抑菌活性及机制[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(4): 55–63.

- LI YS, HE RR, CAI JX, *et al.* Antibacterial activity and mechanism of linalool against *Pseudomonas fragi* [J]. *J Food Sci Technol*, 2022, 40(4): 55–63.
- [37] 董天宇, 齐楠, 刘芮嘉, 等. 青花椒与红花椒关键风味物质的对比分析[J]. *精细化工*, 2023, 40(4): 869–877.
- DONG TY, QI N, LIU RJ, *et al.* Comparative analysis of key flavor substances of green and red pepper [J]. *Fine Chem*, 2023, 40(4): 869–877.
- [38] 梅佳林, 李婷婷, 张星晖, 等. 芳樟醇对三文鱼源莓实假单胞菌的抑菌机理[J]. *食品科学*, 2022, 43(9): 199–206.
- MEI JL, LI TT, ZHANG XH, *et al.* Antibacterial mechanism of linalool against *Pseudomonas fragi* from salmon [J]. *Food Sci*, 2022, 43(9): 199–206.
- [39] 曹瑞兰, 周增亮, 任志华, 等. 芳樟中芳樟醇合酶基因 *CcTPS14* 的克隆和表达分析[J]. *农业生物技术学报*, 2023, 31(4): 767–775.
- CAO RL, ZHOU ZL, REN ZH, *et al.* Cloning and expression analysis of linalool synthase *CcTPS14* from *Cinnamomum camphora* var. *linaloolifera* [J]. *J Agric Biotechnol*, 2023, 31(4): 767–775.
- [40] 周娟, 李丹阳, 陈健美, 等. 赣南早脐橙果实发育时期果皮挥发性成分分析[J]. *南方农业学报*, 2019, 50(2): 364–371.
- ZHOU J, LI DY, CHEN JM, *et al.* Volatile components in fruit development period of Gannan Zao navel orange [J]. *J South Agric*, 2019, 50(2): 364–371.
- [41] XIAO Z, HE J, NIU Y, *et al.* Characterization and comparison of aroma profiles of orange pulp and peel by GC-MS/O, OAV, aroma recombination and omission tests [J]. *Europ Food Res Technol*, 2023, 249(3): 619–630.
- [42] 师希雄, 田铸, 祁光增, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱分析静宁烧鸡中的挥发性风味成分[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(15): 4816–4823.
- SHI XX, TIAN Z, QI GZ, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds in Jingning braised chicken by gas chromatography-ion migration spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(15): 4816–4823.
- [43] PEREZ-CACHO PR, ROUSEFF RL. Fresh squeezed orange juice odor: A review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2008, 48(7): 681–695.
- [44] BALDWIN EA, GOODNER K, PLOTTO A. Interaction of volatiles, sugars, and acids on perception of tomato aroma and flavor descriptors [J]. *J Food Sci*, 2008, 73(6): S294–S307.
- [45] 刘承智, 杨高东, 周政, 等. 辛酸甲酯合成新工艺的研究[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(3): 612–621.
- LIU C, YANG G, ZHOU Z, *et al.* Study on the new synthesis method of *n*-caprylic acid esterification [J]. *J Nanjing Univ (Nat Sci Ed)*, 2018, 54(3): 612–621.
- [46] 欧阳凯, 张晓芳, 梁娟娟, 等. 离子液体基磷酸催化合成香料辛酸甲酯及动力学研究[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(9): 125–133.
- OUYANG K, ZHANG XF, LIANG JJ, *et al.* Catalytic synthesis of methyl caprylate by phosphotungstic acid-based ionic liquids and its kinetics [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2017, 17(9): 125–133.
- [47] 仲琴, 薛寒, 楼展展, 等. 压榨菜籽油加速氧化过程挥发性成分变化分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 91–99.
- ZHONG Q, XUE H, LOU ZZ, *et al.* Analysis on changes of volatile components during accelerated oxidation of pressed rapeseed oil [J]. *Food Ind Technol*, 2021, 42(21): 91–99.
- [48] CAO J, JIANG X, CHEN Q, *et al.* Oxidative stabilities of olive and camellia oils: Possible mechanism of aldehydes formation in oleic acid triglyceride at high temperature [J]. *LWT*, 2019, 118: 108858.
- [49] FAN G, XU X, QIAO Y, *et al.* Volatiles of orange juice and orange wines using spontaneous and inoculated fermentations [J]. *Eur Food Res Technol*, 2009, 228(6): 849–856.
- [50] 赵彩, 孙金奎, 李甜, 等. HS-SPME-GC-MS/MS 结合 ROAV 值鉴定新疆库车地区小白杏关键香气物质[J]. *现代食品科技*, 2023, 1: 1–9.
- ZHAO C, SUN JK, LI T, *et al.* Identification of key aroma compounds of Xiaobai apricot grows in Kuqa Region, Xinjiang by HS-SPME-GC-MS/MS coupled With ROAV [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2023, 1: 1–9.
- [51] 王晶. 锦橙贮藏期主要风味品质变化与调控研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- WANG J. Changes and regulation of main flavor quality in the fruit of *Citrus sinensis* Osbeck cv. Jincheng during postharvest storage time [D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [52] 程玉娇. 宽皮柑橘果汁中挥发性硫化物和风味活性组分研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- CHENG YJ. Study on volatile sulfur compounds and aroma active volatiles in mandarin juice [D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [53] 周琦. 甜橙和宽皮橘汁中关键香气比较、重组及交互作用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- ZHOU Q. Study on the comparison, recombination and interaction of key aromas in sweet orange juice and mandarin juice [D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [54] 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- LIAO FHMT. Compilations of flavour threshold values in water and other media [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [55] 周琦, 谈安群, 欧阳祝, 等. 橙汁与宽皮橘汁关键香气的比较及其在各自主体风味呈现中的作用[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(21): 259–267.
- ZHOU Q, TAN ANQ, OUYANG Z, *et al.* Comparison of key aromas between sweet orange and mandarin juices and their roles in the presentation of main flavors of the two juices [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(21): 259–267.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



潘奕丞, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 2657378337@qq.com



钱 敏, 硕士, 高级实验师, 主要研究方向为食品化学、食品加工与品质安全控制。

E-mail: 358854770@qq.com



赵文红, 博士, 教授, 主要研究方向为食品微生物等。

E-mail: 848060091@qq.com