

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2024.04.029

# 果品挥发性风味物质的研究进展

王前菊, 王宇, 方晓彤, 张绿萍, 周俊良\*  
(贵州省果树科学研究所, 贵州 贵阳 550005)

**摘要:** 水果是居民膳食的重要组成部分, 挥发性风味物质是评价果实品质的重要指标之一, 对果实的整体风味和消费者的接受程度都有很大的影响。研究水果中挥发性风味物质的组成和含量, 对于鲜果贮藏及其加工市场都具有重要意义。该文介绍水果中挥发性风味物质的常用提取方法与分析技术, 总结水果在贮藏和加工过程中挥发性风味物质的变化, 并对未来水果挥发性风味物质的研究方向进行展望。

**关键词:** 水果; 挥发性风味物质; 提取; 分析; 贮藏; 加工

## Research Progress on Volatile Flavor Compounds in Fruits

WANG Qianju, WANG Yu, FANG Xiaotong, ZHANG Lvping, ZHOU Junliang\*  
(Guizhou Institute of Fruit Tree Science, Guiyang 550005, Guizhou, China)

**Abstract:** Fruit is an essential component of residents' diet, and volatile flavor compounds are one of the important indicators for evaluating fruit quality, exerting significant impact on the overall flavor of fruits and consumer acceptance. Investigating the composition and contents of volatile flavor compounds in fruits is of great significance for fresh fruit storage and processing markets. This paper introduced common extraction methods and analytical techniques for volatile flavor compounds, summarized the changes of volatile flavor compounds during fruit storage and processing, and provides a perspective on future research directions in the field of volatile flavor compounds in fruits.

**Key words:** fruit; volatile flavor compounds; extract; analyze; storage; processing

引文格式:

王前菊, 王宇, 方晓彤, 等. 果品挥发性风味物质的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(4): 217-224.

WANG Qianju, WANG Yu, FANG Xiaotong, et al. Research Progress on Volatile Flavor Compounds in Fruits[J]. Food Research and Development, 2024, 45(4): 217-224.

水果含有丰富的维生素、矿物质、微量元素、膳食纤维及大量的植物化学物质, 具有抗氧化、调节机体免疫功能等功能, 深受消费者青睐<sup>[1]</sup>。随着生活水平的不断提高, 人们对果实的要求也越来越高, 不仅要求鲜果及其产品具有高营养价值, 而且还要具有浓郁的芳香气味。香气是决定水果风味特征的关键因素之一, 影响着消费者对水果的接受程度, 而挥发性风味物质是香气的重要组成部分<sup>[2]</sup>。不同水果之间的挥发性风味物质含量和种类差异较大, 果实产生的香气类型也不同, 其挥发性风味物质含量越高、种类越多, 果实的整体香气就越浓<sup>[3]</sup>。水果中的香气物质大约 2 000 种,

主要为 C6~C9 的醛类和醇类、酯类、萜类、酮类、羧基化合物、挥发酸和一些含硫化合物等<sup>[4]</sup>。

果实采后贮藏保鲜与加工技术是实现水果周年供应的重要技术手段。但在采后贮藏过程中, 贮藏的方式、温湿度、时间及使用的保鲜剂等都会影响果实的风味品质, 如维生素降解、酚氧化降解等<sup>[5]</sup>; 在加工过程中容易出现香气散失、营养成分流失等严重的问题, 如发生蛋白质水解、脂质降解、氧化和美拉德反应等<sup>[6]</sup>。因此, 通过监测果实贮藏过程及加工过程中挥发性风味物质的变化可以判断果实品质的变化情况, 可以为果实品质控制提供科学依据。而挥发性风味物质较为

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2022]一般 150、[2023]一般 484); 黔农科院科技创新项目([2022]04 号); 贵州省创新能力建设项目(黔科合服企[2021]8 号)

作者简介: 王前菊(1997—), 女(汉), 研究实习员, 硕士, 研究方向: 果品贮藏与加工。

\*通信作者: 周俊良(1980—), 男(汉), 研究员, 硕士, 研究方向: 果品贮藏与加工。

复杂,不同的提取、分析方法所得到的挥发性风味物质不同,甚至有较大差异<sup>[7]</sup>。该文介绍水果中常见的挥发性风味物质的提取、分析方法,对贮藏保鲜及加工过程中挥发性化合物变化进行总结,以期为增强水果风味、监测鲜果贮藏期及生产出更高质量、风味优质的水果产品提供新思路与参考。

## 1 水果挥发性风味物质的提取方法

水果基质较为复杂,一些对风味起关键作用的成分

不稳定,只有选择合适的提取方法,才能准确高效地分析出水果中的挥发性成分。目前用于水果挥发性风味物质的提取方法主要有同时蒸馏萃取法(simultaneous distillation extraction, SDE)、顶空固相微萃取法(headspace solid phase micro-extraction, HS-SPME)、溶剂辅助风味蒸发法(solvent-assisted flavor evaporation, SAFE)、搅拌棒吸附萃取法(stir bar sorptive extraction, SBSE)和超临界流体萃取法(supercritical fluid extraction, SFE)等。样品挥发性风味物质提取方法的原理及特点如表1所示。

表1 样品挥发性风味物质提取方法的原理及特点

Table 1 Principles and characteristics of the extraction methods of volatile flavor substances in samples

提取方法	原理	优点	缺点	参考文献
SDE	在气体状态下进行萃取	具有良好的重复性、较高的萃取量,有效减少非挥发性化合物的影响	高温使热敏性物质氧化分解,产生异味	[8-9]
HS-SPME	将有涂层的纤维萃取头置于顶空,通过搅拌将分析物吸附平衡	便于携带,有可能实现自动化,提高灵敏度,不需要有机溶剂,操作简单,提取时间短,可用于固体、液体和气体样品,有利于醛、酮、醇提取	萃取纤维价格高,容易损伤,萃取时需要高温	[10-11]
SAFE	在高真空条件下使挥发性成分蒸发,不需要升温	减少样品热敏性挥发性成分的损失,香气更逼真,有利于醇类、硫化物和脂肪酸类化合物的提取	操作复杂,对操作者要求严格	[12]
SBSE	与固相微萃取原理相似,采用搅拌棒替代萃取纤维	不富集非挥发性溶质,不需要有机溶剂,灵敏度更高	可用的吸收材料较少,回收利用率低	[13]
SFE	采用超临界流体代替常规有机溶剂从溶液中提取目标分析物	在低压和接近室温的条件下进行,保持原始的香味	萃取物的输送过程中容易堵塞通路	[14-15]

### 1.1 同时蒸馏萃取法(SDE)

SDE是将样品水蒸气蒸馏与有机溶剂萃取结合起来,即先从样品中蒸馏出挥发性化合物,再使用低沸点溶剂萃取,该方法有利于低含量的挥发性风味物质萃取,具有重复性好、萃取量高、操作简单等优点<sup>[8]</sup>。但该方法在高温下易发生氧化、水解等热降解反应,引入干扰物质,产生异味,且对强极性或亲水性成分如酸醇溶液萃取效率低<sup>[9]</sup>。Barreiros等<sup>[16]</sup>采用SDE提取沙棘果实的挥发性成分,共鉴定出51种化合物,萜烯类化合物占总化合物的66.72%,其中 $\alpha$ -萜品烯(19.10%)和(Z)-石竹烯(22.68%)是主要挥发性化合物。李彬等<sup>[17]</sup>采用SDE提取刺玫果中的挥发性成分,共鉴定出90种挥发性成分,其中有香味的挥发性化合物52种,主要包括有机酸、醛类、醇类、酮类和酯类。邱婷等<sup>[18]</sup>采用SDE提取葡萄干挥发油,共鉴定出80种挥发性风味成分,主要有苯乙醛、苯甲醇、 $\beta$ -大马酮、香叶基丙酮、 $\beta$ -紫罗兰酮等。

### 1.2 顶空固相微萃取法(HS-SPME)

HS-SPME是利用微纤维表面少量的吸附剂从样品中分离和浓缩分析物,集采样、萃取、浓缩、进样于一体,复合并聚集样品中挥发性和半挥发性化合物<sup>[10]</sup>,其操作简单、快速高效,不需要使用有机溶剂,安全又环保,适用于各类复杂基质中风味物质的提取,有利于酯

类、醛类、醇类物质的提取<sup>[11]</sup>。但该方法的回收率低,萃取头和纤维头易损坏,难以对挥发性成分选择性吸附<sup>[19]</sup>。Qin等<sup>[20]</sup>采用HS-SPME提取了33个中国乌苏里梨品种的挥发性物质,共鉴定出108种挥发性化合物,不同品种之间挥发物成分的种类和含量存在显著差异。Yang等<sup>[21]</sup>采用HS-SPME提取了85种苹果果肉的挥发性成分,共鉴定出70种挥发性化合物,包括酯类43种、醇类7种、醛类11种、酸类2种、酮类2种和其他5种,其中乙酸己酯、(E)-2-己烯醛、伊斯兰醇、2-乙酸甲酯、1-己醇和乙酸丁酯为最丰富的挥发性化合物。王炳宇等<sup>[22]</sup>采用HS-SPME提取4种不同发酵基质的柑橘果醋的挥发性成分,共鉴定出138种挥发性风味物质,包括酯类34种、醇类37种、酸类20种、醛类8种、酚酮类13种、烃类10种和其它物质。朱珠芸茜等<sup>[23]</sup>采用HS-SPME提取了5种鲜食葡萄的挥发性香气成分,共鉴定出66种挥发性香气物质,其中有16种化合物对葡萄的风味有重要贡献,正己醛、2-己烯醛、正辛醛和壬醛在5种葡萄中均具有较高香气活性值,是5种葡萄共有香气物质。

### 1.3 溶剂辅助风味蒸发法(SAFE)

SAFE是一种温和而全面地从复杂食品基质中提取挥发性物质的方法,在高真空条件下使挥发性成分蒸发,不需要升温,减少样品热敏性、挥发性成分的损

失,因此提取物的风味和样品一致,香气自然逼真,适用于进行一些复杂的天然食品风味测定,有利于醇类、硫化物和脂肪酸类化合物的提取<sup>[12]</sup>。但该方法使用的仪器昂贵,对操作者要求严格。Liu等<sup>[24]</sup>采用SAFE提取木瓜4个不同成熟阶段的挥发性风味物质,共鉴定出38种化合物,包括酯类、酮类、醇类、醛类、萜烯类、酚类等,其中萜烯类、酯类、酮类、挥发酸类和挥发酚类化合物含量总体依次增高,而大部分醇类、醛类、含S和N化合物含量随果实成熟呈下降趋势。Amanpour等<sup>[25]</sup>采用SAFE技术提取新鲜和烘烤枇杷果实香气化合物,共鉴定出64种不同的香气化合物(新鲜样品57种,烘烤样品62种),包括萜烯(34种)、酸(8种)、醛(4种)、酮(4种)、吡嗪(5种)、醇(5种)、吡咯(1种)、呋喃(1种)、内酯(1种)和酯(1种),其中萜烯是主要的挥发性香气成分。

#### 1.4 搅拌棒吸附萃取法(SBSE)

SBSE是一种新型的固相微萃取样品前处理技术,将商用吸附涂层二甲基硅氧烷与样品直接接触以提取香气成分,萃取机理和固相微萃取相似,但吸收材料体积增大,灵敏度更高,且具有有机溶剂用量少、萃取容量高、萃取效率高、自动搅拌等优点<sup>[13]</sup>。但该方法可用的吸收材料少,比较难清洗且回收利用率低。Giuseppe等<sup>[26]</sup>采用SBSE提取测定不同葡萄品种的挥发性风味物质,分析了24个葡萄品种(芳香型和非芳香型),发现差异主要来源于萜类化合物含量,通过主成分分析得出萜类化合物在分离非芳香型物质中更有效。Rodríguez等<sup>[27]</sup>采用SBSE提取苹果渣中挥发性物质,共鉴定出124种挥发性化合物,精度在2%(芳樟醇)到11%(己酸乙酯)之间,其中白兰地品种的醛类和酯类含量较高,拉丁美洲品种的酸类含量较高,科罗拉多品种的萜类含量较高。Lucht等<sup>[28]</sup>采用SBSE提取3个苹果品种的挥发性香气成分,共鉴定出23种挥发

性风味成分,其中主要香气成分是己醛、反式-2-己烯醛、2-甲基乙酸丁酯和乙酸己酯。

#### 1.5 超临界流体萃取法(SFE)

SFE是一种以超临界流体代替常规有机溶剂对食品中风味物质进行提取分离的新技术,在超临界状态下,将超临界流体与待分离的物质接触,使其有选择地把极性大小、沸点高低和分子量大小的成分依次萃取出来,二氧化碳是最常用的超临界流体<sup>[14]</sup>。该方法的优点在于可以在低温、高压、厌氧条件提取物质,在萃取时不会腐蚀设备,保证提取物质的纯天然性,是一种可循环使用的新型绿色技术,但该方法的萃取物在输送过程中容易堵塞通路<sup>[15]</sup>。麻少莹等<sup>[29]</sup>利用SFE萃取天然香蕉香精成分,得出挥发性香气成分主要为酯类、酸类、醛类、醇类化合物,其中酯类含量约60%,酸类含量约为16%,醛类含量为15%,醇类含量约为4.5%。Arturo-Perdomo等<sup>[30]</sup>利用SFE萃取黑莓和百香果种子油极性脂组分,结果表明,2个样品中的主要化合物为油酸衍生的油酰胺,其中9-十八碳烯酰胺是鉴定出的主要油酰胺。

## 2 水果中挥发性风味物质的分析技术

食品风味物质分离提取后,需要利用一些检测技术对其进行定性或定量鉴定分析。目前水果中常用的挥发性风味物质分析技术有气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)、气相色谱-嗅觉-质谱(gas chromatography olfactometry-mass spectrometry, GC-O-MS)、全二维气相色谱-飞行时间质谱(comprehensive two-dimensional gas chromatography/time-of-flight mass spectrometry, GC×GC-TOFMS)、电子鼻(electronic-nose, E-Nose)等。样品挥发性风味物质分析技术的原理及特点如表2所示。

表2 样品挥发性风味物质分析技术的原理及特点

Table 2 Principles and characteristics of analytical techniques for volatile flavor compounds in samples

分析技术	原理	特点	参考文献
GC-MS	结合气相色谱和质谱的特性,鉴别不同物质	结合色谱分离与质谱鉴定,能同时鉴定上百种物质	[31]
GC-IMS	结合气相色谱的高分离度与离子迁移谱高灵敏度进行检测分析	可对样品中所有挥发性有机物进行非靶向分析	[32]
GC-O-MS	结合气相色谱的分离能力与人的嗅觉对香味成分进行鉴定	从多种挥发性成分中鉴定或提取香气活性化合物特别有效	[33]
GC×GC-TOFMS	通过两根色谱柱串联的分离方式,联合飞行时间质谱进行测定分析	全二维正交分离机制,可同时鉴定上万种物质	[34]
E-Nose	利用气体传感器阵列的响应图案来识别气味的电子系统	响应时间短、检测速度快;仅能做粗略的物质间鉴别,不适合复杂样本检测	[35]

### 2.1 气相色谱-质谱(GC-MS)

GC-MS联用技术是结合气相色谱高分离能力和

质谱高鉴别能力的特性,实现对复杂样品具体风味物质的一次性定性、定量分析,具有灵敏度高、操作简单、

真实可靠的特点<sup>[31]</sup>。Song等<sup>[36]</sup>采用GC-MS技术对热泵干燥(heat pump drying, HPD)大枣香气进行分析,鉴定出的香气成分包括醇类、酸类、烯类、酯类和呋喃类,其中酸类是HPD红枣的主要挥发性化合物,醋酸、乙酸、丁酸、2-甲基丁酸是HPD红枣中常见的香气化合物,HPD显著增强了红枣的香气。Li等<sup>[37]</sup>为制备抗氧化活性较高的非酒精发酵苹果汁产品,利用顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用(headspace solid phase microextraction - gas chromatography - mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)技术分析了不同品种苹果汁在发酵前后的香气成分,共鉴定出挥发性化合物51种,包括酯类16种、醇类11种、醛类8种、酮类6种、酸类4种、其他6种,通过植物乳杆菌脱醇后发酵,产生新的挥发物(丙醇、香茅醇、乳酸乙酯和丁酸己酯),富集酮类和酸类。

### 2.2 气相色谱-离子迁移色谱(GC-IMS)

GC-IMS联用技术是结合气相色谱的高分离度与离子迁移谱高灵敏度进行风味检测分析的一项技术,与GC-MS相比样品无需浓缩富集,有利于风味物质的保持,具有预处理简单、可实现快速检测、灵敏度和分辨率高的特点,在果蔬风味及产品加工中受到广泛关注<sup>[32]</sup>。Zhao等<sup>[38]</sup>采用GC-IMS分离鉴定了3个代表性猕猴桃品种的挥发性成分,结果表明:GC-IMS对3个猕猴桃品种的己酸甲酯、己酸乙酯、己醇、(E)-2-己烯醛、己醛、丁酸乙酯和乙酸乙酯的鉴定水平较高,其中己酸甲酯、丁酸乙酯呈果香,(E)-2-己烯醛、己醛呈草香,丁酸乙酯和乙酸乙酯是甜味贡献者,此外还有呈黄瓜味的(E,Z)-2,6-壬二烯醛和呈辛辣味的1-戊烯-3-酮。Sun等<sup>[39]</sup>采用GC-IMS技术分析了在高温高湿下进行黑化处理的黑枣与未处理的红枣挥发性风味物质,共鉴定出43种挥发性化合物,黑枣果实中的挥发性成分发生了很大的变化,苯甲醛、 $\gamma$ -丁内酯、己酸乙酯、1-辛烯-3-醇、己酸甲酯、戊酸乙酯、庚醛、2-庚酮、3-甲基丁酸乙酯、2-己烯-1-醇、丁酸乙酯戊醛、戊酮等物质含量依次减少,而在高温高湿下固态发酵长达96h后产生新的化合物如丙酮、2-乙酰呋喃,其为开发黑枣营养产品提供参考。

### 2.3 气相色谱-嗅闻-质谱(GC-O-MS)

GC-O-MS联用技术是将气相色谱的分离能力与人的嗅觉结合起来对香味成分进行鉴定,即将挥发性的混合物通过气相色谱分离,然后分别通过嗅觉仪引入人的鼻子来检测分析物的气味,对于从多种挥发性成分中鉴定或提取香气活性化合物特别有效,能快速准确的进行分析<sup>[33]</sup>。Xia等<sup>[40]</sup>利用GC-O-MS评价鲜枣白兰地关键香气成分,共鉴定出55种挥发性香气成分,通过气味活性值的计算确定了16种关键风味化合物,包括辛酸乙酯、己酸乙酯、异戊酸乙酯、月桂酸乙酯、2-十一酮、戊酸乙酯等,在发酵过程中,形成了2-甲

基丁酸乙酯、异戊酸乙酯等新化合物。李美萍等<sup>[41]</sup>采用GC-O-MS联用技术对红香酥梨中香气成分进行分析,共检出127种化合物,确定结构76种,其中酯类18种、醛类9种、醇类13种、萜烯类12种、酮类4种、炔类11种、其他化合物9种,红香酥梨的特征性香气成分包括乙酸乙酯、己醛、己酸乙酯、乙酸己酯、(E,Z)-2,4-癸二烯酸乙酯、壬醛、反-2-己烯醛、辛酸乙酯、癸酸乙酯、 $\alpha$ -法尼烯、邻苯二甲酸二异丁酯。

### 2.4 全二维气相色谱-飞行时间质谱(GC $\times$ GC-TOFMS)

GC $\times$ GC-TOFMS联用技术是通过两根色谱柱串联的全二维正交分离机制,联合飞行时间质谱进行挥发性风味测定的方法,峰容量、色谱分辨率和灵敏度大幅度提升,高采集速度的飞行时间质谱,定性定量能力超越同类飞行质谱,可同时鉴定上万种物质<sup>[34]</sup>。张梁明慧等<sup>[42]</sup>首次采用GC $\times$ GC-TOFMS技术分析山楂核干馏油的成分组成,鉴定出山楂核干馏油的挥发性成分共182种,包括酮类(16.622%)、酚类(8.572%)、酯类(5.459%)、呋喃类(4.925%)、酸类(3.962%)、醛类(3.772%)等物质。田欣等<sup>[43]</sup>利用GC $\times$ GC-TOFMS技术对黄土高原产区赤霞珠葡萄酒中挥发性成分进行测定分析,从中共检测出600种香气化合物,以酯类(128种)、芳香族(113种)、萜烯类(85种)和醇类(83种)为主,同时醛酮类、含硫类、呋喃类、挥发性酸等共同作用形成了葡萄酒风味特征。

### 2.5 电子鼻(E-Nose)

E-Nose区别于气相色谱、气质联用等仪器,是利用气体传感器阵列的响应面图案来识别气体的电子系统,其给出的不是被测样品中某种或某几种成分的定性定量结果,而是样品气味的整体信息,具有响应时间短、检测速度快、重复性好的优点<sup>[35]</sup>。严娟等<sup>[44]</sup>利用电子鼻对桃品种资源果实的香气进行测定和区分,通过电子鼻系统得出硫化氢(W1W)、氮氧化物类(W5S)、甲烷类(W1S)、芳香成分与有机硫化物(W2W)传感器对桃果实香气的评价起主要作用,通过电子鼻主成分分析(principal component analysis, PCA)能够有效地区分花水蜜、脆保、春冠、奉罐1号、菊黄和红肉桃1号与其他供试品种资源的香气。张敬文等<sup>[45]</sup>采用电子鼻技术检测3种草莓鲜榨汁的香气,结果表明:电子鼻10个传感器对每种草莓鲜榨汁的响应值不同,其中S2(对氧化物敏感)、S7(对硫化物敏感)和S9(对芳香成分、有机硫化物敏感)3个传感器的响应值较高;通过电子鼻PCA、线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)和负荷加载分析(loadings)得出妙香3号和黔莓2号草莓鲜榨汁的整体风味具有一定的相似性,而红颜草莓鲜榨汁风味特征显著区别于其他两种鲜榨汁,说明利用E-Nose可以根据其整体风味差异区别3种草莓鲜榨汁。

### 3 水果挥发性风味物质的变化

挥发性风味物质是评价果实品质的第一感官指标,通过监测水果贮藏和加工过程中挥发性风味物质的变化可以判断产品品质的变化情况,为果实品质控制提供科学依据。

#### 3.1 果实挥发性风味物质在贮藏过程中的变化

果实在贮藏过程中,由于自身的呼吸作用、生理衰老、微生物作用、贮藏环境因素等,会产生一些令人厌恶的气味,果实的风味和感官接受程度不断下降,挥发性风味物质可作为检测果实新鲜度的第一指标,可预测果实的贮存条件和贮藏期<sup>[46]</sup>。例如,Cheng等<sup>[47]</sup>采用HS-SPME-GC-MS分析杨梅在不同贮藏条件下挥发性风味物质的变化,结果表明:新鲜杨梅鉴定出82种挥发性化合物(包括醛类、醇类、酸类、酯类、萜类等),贮藏一段时间后,一些成分如壬醛、乙醇、3-甲基-1-丁醇、苯乙醇、(Z)-3-壬烯-1-醇、(E,Z)-3,6-壬二烯-1-醇等发生变化,使得杨梅产生了强烈的异味;通过电子鼻PCA可以有效区分杨梅在不同储存条件下的挥发性化合物,挥发性风味特征可对贮藏期间杨梅新鲜度进行评价。Feng等<sup>[48]</sup>采用HS-SPME-GC-MS联合技术检测分析“瑞雪”和“富士”2个品种的苹果果实在发育过程中挥发性风味物质的变化趋势,结果表明:在发育过程中两个品种的果实挥发性化合物表现出相似的趋势,在果实发育早期,挥发性成分较少,以醛类为主(87.0%);在果实成熟期,挥发性成分种类和含量均增加,以酯类(37.6%)和烯炔类为主(23.2%),酯类物质含量增加促使苹果果实香气物质增加。赵迎丽等<sup>[49]</sup>采用GC-IMS联用技术对山西不同产地玉露香梨在冰温贮藏前后的挥发性物质进行分析,结果表明:冰温贮藏前后玉露香梨的挥发性物质具有差异,冰温贮藏前玉露香梨的挥发性物质主要是酯类、醇类、酮类、酸类、呋喃类等;冰温贮藏后,3个产区玉露香梨果实的酯类物质含量都有不同程度的下降,醛类、醇类和酮类物质含量增加,风味物质总量的释放少于冰温贮藏前初始的释放总量。孟祥春等<sup>[50]</sup>采用GC-IMS技术分析黄金百香果采后贮藏过程中挥发性风味物质额变化,共鉴定出39种挥发性物质,包括酯类(18种)、烯炔类(8种)、醇类(6种)、酮类(4种)、硫醚(2种)、呋喃类(1种);其中33种挥发性物质是贮藏4d后检测出来的,且在常温贮藏4d后的黄金百香果挥发性化合物种类增多,相对含量增高,表明贮藏时间对黄金百香果挥发性风味物质的成分及相对含量有显著影响,采后贮藏不同时间的黄金百香果有不同的特征性挥发性风味化合物。

#### 3.2 果实挥发性风味物质在加工过程中的变化

水果在加工过程中,由于会受到加工工艺、加工条件、微生物、酶等因素的影响,其挥发性风味物质会发

生不同程度的损失或可能产生异味,通过对加工过程中挥发性风味物质的检测,有助于加工工艺的优化及开发优质的新产品<sup>[51]</sup>。例如,韦璐等<sup>[52]</sup>采用HS-SPME-GC-MS联用技术分析香蕉果酒低温发酵过程中挥发性香气成分的变化,结果表明:香蕉果酒香气成分主要包括辛酸乙酯、癸酸乙酯、2-甲基丁基乙酸酯、己酸乙酯、乙酸苯乙酯等,香气成分种类由发酵前期的57种降至发酵末期的51种,香气成分的含量呈先上升后下降再趋于平稳的趋势,其中醇类、酸类和酚类物质含量逐渐增加,而酯类、羰基类和烷烃类总体呈现下降的趋势。Hu等<sup>[53]</sup>采用HS-SPME-GC-MS联用技术分析真空渗糖联合热风干燥(vacuum sugaring osmosis-hot-air drying kumquats, VS-ADKs)和常压渗糖联合热风干燥(atmospheric pressure sugaring osmosis-hot-air drying kumquats, AS-ADKs)2种加工方法对金橘蜜饯挥发性成分的影响,结果表明:2种干燥金橘蜜饯中共鉴定出22种挥发性物质,包括萜烯类、酯类、醛类、酮类和醇类,其中鲜金橘的主要挥发性化合物是戊酮、1-己醇;VS-ADKs金橘蜜饯的主要挥发性化合物为己醛二聚体、2-己烯-1-醇和乙酸乙酯二聚体;AS-ADKs金橘蜜饯的主要挥发性化合物为苯甲醛和糠醇,与鲜金橘相比,VS-ADKs和AS-ADKs金橘蜜饯的戊醛和二甲基酮含量显著增加,乙醇二聚体的含量降低。蒋冰等<sup>[54]</sup>探究冷冻干燥(freeze dry, FD)、热风干燥(hot air drying, HAD)、红外干燥(infrared drying, IRD)和真空干燥(vacuum drying, VD)对柠檬片挥发性风味物质的影响,结果表明:4种干燥柠檬片中共鉴定出72种挥发性物质,与鲜柠檬相比,干燥柠檬片的醇类和酯类物质含量均下降,醛类物质含量上升,其中IRD和AD干燥更好地保留了丁酸乙酯、乙酸甲酯等酯类物质(果香味挥发性物质),FD干燥柠檬片中E-2-己烯醛、己醛、香叶醇等物质含量上升(玫瑰香味),VD干燥柠檬片中柠檬醛、 $\beta$ -大马士酮、癸醛、壬醛等物质含量上升,柠檬醛是柠檬香气的主要成分,说明VD可保留部分鲜柠檬香气成分。水果干燥是最常见的水果加工方式,在干燥过程中样品会发生美拉德反应、热降解等一系列变化,使得果实挥发性风味物质发生变化,或可提高醇、酮及含硫类化合物的生成,或可导致醇、醛、酮、环状化合物的损失等<sup>[55]</sup>,在芒果<sup>[56]</sup>、桑葚干<sup>[57]</sup>、猕猴桃果干<sup>[58]</sup>、苹果片<sup>[59]</sup>等水果中也有相关报道。

### 4 总结与展望

挥发性风味物质是影响鲜果及其加工产品商品性的重要因素。SDE、HS-SPME、SAFE、SBSE和SFE等方法已应用于水果挥发性风味物质的提取,其中SDE在高温下进行提取易造成果实变味;SBSE与HS-SPME具有相同的优势,但SBSE采用了搅拌棒代替萃

取纤维,其灵敏度更高,具有更好的萃取能力;HS-SPME能有效萃取醛、酮和醇,而SAFE限制了热效应,提取率更高,包括一些较小的风味成分;SFE是在低压和接近室温条件下进行提取,能把高沸点、低挥发性、易热解的物质在低于其沸点温度下萃取出来,保证了100%的天然性。新的分析技术如GC-IMS、GC-O-MS、GC×GC-TOFMS均结合了GC-MS的特性,技术的发展使得挥发性风味研究方法更为便捷、结果更可靠、可鉴定出更多的挥发性风味物质。

目前水果挥发性风味物质的研究已经取得一定的成就,而水果在贮藏加工过程中易受贮藏方式、加工技术等各种因素影响,其挥发性风味物质会发生很大程度的变化,甚至产生异味,但目前研究更多在定点阶段的分析,对于贮藏和加工中挥发性风味物质动态变化的检测还存在一定的限制。因此,挥发性风味物质的提取技术应不断进行优化或采用多种提取方法联合使用,更加全面地萃取挥发性风味物质,同时,如何通过水果贮藏及加工中的香气动态分析,把控增香的强度,调控风味,帮助产品改良及新产品的开发也是研究的重点。

#### 参考文献:

- [1] 孙嘉卿,冯涛,宋诗清,等.果蔬风味物质形成的生物化学基础[J].中国果菜,2020,40(6):10-17.  
SUN Jiaqing, FENG Tao, SONG Shiqing, et al. Biochemical basis for the formation of flavor substances in fruits and vegetables[J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(6): 10-17.
- [2] LIU Y, XIANG S M, ZHANG H P, et al. Sensory quality evaluation of Korla pear from different orchards and analysis of their primary and volatile metabolites[J]. Molecules, 2020, 25(23): 5567.
- [3] YANG S B, HAO N N, MENG Z P, et al. Identification, comparison and classification of volatile compounds in peels of 40 apple cultivars by HS-SPME with GC-MS[J]. Foods, 2021, 10(5): 1051.
- [4] MIGICOVSKY Z. Tasting improvement in fruit flavor using genomics[J]. New Phytologist, 2020, 226(6): 1539-1540.
- [5] LIU S J, LIU Y, WANG T Y, et al. The effects of different light storage conditions on volatile flavor compounds and sensory properties of melon fruit[J]. Food Bioscience, 2022, 48: 101826.
- [6] TERIBIA N, BUVÉ C, BONERZ D, et al. Effect of cultivar, pasteurization and storage on the volatile and taste compounds of strawberry puree[J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 150: 112007.
- [7] 罗俏俏,马江,曹磊,等.干酪中主要风味物质的研究进展[J].食品与发酵科技,2018,54(1):96-100.  
LUO Qiaoqiao, MA Jiang, CAO Lei, et al. Research progress of flavor substances from cheese[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2018, 54(1): 96-100.
- [8] 安红梅,尹建军,张晓磊,等.同时蒸馏萃取技术在食品分析中的应用[J].食品研究与开发,2011,32(12):216-220.  
AN Hongmei, YIN Jianjun, ZHANG Xiaolei, et al. Application of simultaneous distillation extraction in food analysis[J]. Food Research and Development, 2011, 32(12): 216-220.
- [9] 郭荣灿,王成华,江虹锐,等.广西发酵酸笋气味物质提取方法优化及比较分析[J].食品工业科技,2019,40(13):202-210,220.  
GUO Rongcan, WANG Chenghua, JIANG Hongrui, et al. Optimization and comparison analysis of extraction methods of odorant from Guangxi fermented bamboo shoots[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(13): 202-210, 220.
- [10] 高风泽,王治同.食品挥发性化合物的提取与分析技术[J].中国果菜,2022,42(5):45-53.  
GAO Fengze, WANG Zhitong. Extraction and analysis technologies of food flavor substances[J]. China Fruit & Vegetable, 2022, 42(5): 45-53.
- [11] LIMMER M A, BURKEN J G. Phytoscreening with SPME: Variability analysis[J]. International Journal of Phytoremediation, 2015, 17(11): 1115-1122.
- [12] WANG B, MENG Q, XIAO L, et al. Characterization of aroma compounds of Pu-erh ripen tea using solvent assisted flavor evaporation coupled with gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography - olfactometry[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(3): 618-626.
- [13] 刘育坚,刘智敏,许志刚,等.搅拌棒吸附萃取技术[J].化学进展,2020,32(9):1334-1343.  
LIU Yujian, LIU Zhimin, XU Zhigang, et al. Stir bar sorptive extraction technology[J]. Progress in Chemistry, 2020, 32(9): 1334-1343.
- [14] DURANTE M, FERRAMOSCA A, TREPPICIONE L, et al. Application of response surface methodology (RSM) for the optimization of supercritical CO<sub>2</sub> extraction of oil from patè olive cake: Yield, content of bioactive molecules and biological effects *in vivo*[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127405.
- [15] SINGH S, VERMA D K, THAKUR M, et al. Supercritical fluid extraction (SCFE) as green extraction technology for high-value metabolites of algae, its potential trends in food and human health[J]. Food Research International, 2021, 150: 110746.
- [16] BARREIROS M L, BARREIROS A L B S, RIBEIRO A R C, et al. Volatile constituents of cajá-umbu (*Spondiasp.*) fruit obtained by simultaneous distillation and extraction and solid phase microextraction[J]. Acta Horticulturae, 2018(1198): 265-272.
- [17] 李彬,王龙.同时蒸馏萃取刺玫果挥发性香味成分分析[J].河北农业科学,2018,22(3):78-82.  
LI Bin, WANG Long. Analysis of volatile flavor components in fruits of *Rosa acicularis* by simultaneous distillation extraction[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2018, 22(3): 78-82.
- [18] 邱婷,黄正虹.同时蒸馏萃取法提取葡萄干挥发油及其在卷烟中的应用研究[J].安徽农业科学,2015,43(34):97-98,127.  
QIU Ting, HUANG Zhenghong. Study on simultaneous distillation extraction of essential oil in raisins and its application in cigarettes [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(34): 97-98, 127.
- [19] FIORI J, TURRONI S, CANDELA M, et al. Simultaneous HS-SPME GC-MS determination of short chain fatty acids, trimethylamine and trimethylamine *N*-oxide for gut microbiota metabolic profile[J]. Talanta, 2018, 189: 573-578.
- [20] QIN G H, TAO S T, CAO Y F, et al. Evaluation of the volatile profile of 33 *Pyrus ussuriensis* cultivars by HS-SPME with GC-MS[J]. Food Chemistry, 2012, 134(4): 2367-2382.
- [21] YANG S B, MENG Z P, FAN J, et al. Evaluation of the volatile profiles in pulp of 85 apple cultivars (*Malus domestica*) by HS-SPME combined with GC-MS[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(5): 4215-4225.
- [22] 王炳宇,杨宇驰,许立伟,等.四种不同发酵基质柑橘果醋挥发性成分分析[J].中国酿造,2021,40(10):144-151.  
WANG Bingyu, YANG Yuchi, XU Liwei, et al. Analysis of volatile

- components of citrus fruit vinegar with four different fermentation substrates[J]. *China Brewing*, 2021, 40(10): 144-151.
- [23] 朱珠芸茜, 王斌, 邓乾坤, 等. 新疆5种鲜食葡萄挥发性香气成分比较分析[J]. *农产品加工*, 2020(20): 68-74.  
ZHU Zhuyunqian, WANG Bin, DENG Qiankun, et al. Comparing analysis of aroma components among five table grapes from Xinjiang region[J]. *Farm Products Processing*, 2020(20): 68-74.
- [24] LIU R M, DU Z H, ZHANG Y, et al. Volatile component quantification in combination with putative gene expression analysis reveal key players in aroma formation during fruit ripening in *Carica papaya* cv 'Hong Fei'[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 158: 110987.
- [25] AMANPOUR A, GUCLU G, KELEBEK H, et al. Characterization of key aroma compounds in fresh and roasted terebinth fruits using aroma extract dilution analysis and GC-MS-olfactometry[J]. *Microchemical Journal*, 2019, 145: 96-104.
- [26] GIUSEPPE V S, REMEDIOS C, RAMÓN N, et al. Application of a stir bar sorptive extraction method for the determination of volatile compounds in different grape varieties[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(3): 939-948.
- [27] RODRÍGUEZ M R, SUÁREZ V B. Determination of volatile compounds in apple pomace by stir bar sorptive extraction and gas chromatography-mass spectrometry (SBSE-GC-MS)[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(9): C1326-C1334.
- [28] LUCHT F, RINKEN M, HABERLANDT S. Differentiation of volatile aroma components in organically and conventionally produced apples by stir bar sorptive extraction combined with gas chromatography and EI/CI TOF mass spectrometry[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, 56(2): 909-918.
- [29] 麻少莹, 杨昌鹏, 韦璐, 等. 利用超临界流体萃取法提取天然香蕉香精[J]. *食品工业*, 2021, 42(6): 179-183.  
MA Shaoying, YANG Changpeng, WEI Lu, et al. Extraction of natural banana flavour by supercritical fluid extraction[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(6): 179-183.
- [30] ARTURO-PERDOMO D, MORA J P J, IBÁÑEZ E, et al. Extraction and characterization of the polar lipid fraction of blackberry and passion fruit seeds oils using supercritical fluid extraction[J]. *Food Analytical Methods*, 2021, 14(10): 2026-2037.
- [31] ZHANG J K, LIU H L, SUN R X, et al. Volatolomics approach for authentication of not-from-concentrate (NFC) orange juice based on characteristic volatile markers using headspace solid phase micro-extraction (HS-SPME) combined with GC-MS[J]. *Food Control*, 2022, 136: 108856.
- [32] RODRÍGUEZ-MAECKER R, VYHMEISTER E, MEISEN S, et al. Identification of terpenes and essential oils by means of static headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2017, 409(28): 6595-6603.
- [33] SONG H L, LIU J B. GC-O-MS technique and its applications in food flavor analysis[J]. *Food Research International*, 2018, 114: 187-198.
- [34] WANG X L, ZHU L, SONG X B, et al. Characterization of terpenoids and norisoprenoids from base and retail Qingke Baijiu by GC×GC-TOFMS and multivariate statistical analysis[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2023, 12(1): 192-199.
- [35] WEN J H, ZHAO Y L, RONG Q, et al. Rapid odor recognition based on relief algorithm using electronic nose and its application in fruit identification and classification[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(3): 2422-2433.
- [36] SONG J X, HAN J, FU L, et al. Assessment of characteristics aroma of heat pump drying (HPD) jujube based on HS-SPME/GC-MS and e-nose[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 110: 104402.
- [37] LI H C, HUANG J T, WANG Y Q, et al. Study on the nutritional characteristics and antioxidant activity of dealcoholized sequentially fermented apple juice with *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus plantarum* fermentation[J]. *Food Chemistry*, 2021, 363: 130351.
- [38] ZHAO Y, ZHAN P, TIAN H L, et al. Insights into the aroma profile in three kiwifruit varieties by HS-SPME-GC-MS and GC-IMS coupled with DSA[J]. *Food Analytical Methods*, 2021, 14(5): 1033-1042.
- [39] SUN X, GU D Y, FU Q B, et al. Content variations in compositions and volatile component in jujube fruits during the blacking process [J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7(4): 1387-1395.
- [40] XIA Y N, LIU Y Q, WANG J E, et al. Assessment of key aroma compounds in fresh jujube brandy by GC-O-MS and odor activity value[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(7): e14494.
- [41] 李美萍, 李彩林, 王华瑞, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-嗅闻-质谱联用分析红香酥梨的香气成分[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(6): 130-139.  
LI Meiping, LI Cailin, WANG Huarui, et al. Analysis of aroma compounds in red fragrant pear by headspace solid phase micro-extraction and gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(6): 130-139.
- [42] 张梁明慧, 高哲. 山楂核干馏油的全二维气相色谱-飞行时间质谱分析[J]. *农产品加工*, 2022(7): 65-71, 74.  
ZHANG Liangminghui, GAO Zhe. Analysis of dry distilled oil made from hawthorn seeds by comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry[J]. *Farm Products Processing*, 2022(7): 65-71, 74.
- [43] 田欣, 祁新春, 张泽, 等. 全二维气相色谱-飞行时间质谱解析黄土高原产区赤霞珠葡萄酒挥发性组分特征挥发性化合物[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(23): 239-246.  
TIAN Xin, QI Xinchun, ZHANG Ze, et al. Analysis of volatile compounds of Cabernet Sauvignon wine from Loess Plateau by comprehensive two dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(23): 239-246.
- [44] 严娟, 蔡志翔, 张明昊, 等. 利用电子鼻评价桃果实香气[J]. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(1): 274-282.  
YAN Juan, CAI Zhixiang, ZHANG Minghao, et al. Evaluation of aroma in peach fruit by electronic nose[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(1): 274-282.
- [45] 张敬文, 潘磊庆, 屠康. 基于 E-nose、HS-SPME-GC-MS 和 GC-IMS 检测三种草莓鲜榨汁的香气[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(3): 286-296.  
ZHANG Jingwen, PAN Leiqing, TU Kang. Aroma determination of three freshly squeezed strawberry juice based on E-nose, HS-SPME-GC-MS and GC-IMS[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(3): 286-296.
- [46] YANG P, YOU M C, SONG H L, et al. Determination of the key aroma compounds in Sachima and using solid phase micro extraction (SPME) and solvent-assisted flavour evaporation (SAFE)-gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry (GC-O-MS)[J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 1233-1245.
- [47] CHENG H, CHEN J L, LI X, et al. Differentiation of the volatile profiles of Chinese bayberry cultivars during storage by HS-SPME-GC/MS combined with principal component analysis[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, 100: 59-72.

- [48] FENG S S, YAN C T, ZHANG T H, et al. Comparative study of volatile compounds and expression of related genes in fruit from two apple cultivars during different developmental stages[J]. *Molecules*, 2021, 26(6): 1553.
- [49] 赵迎丽, 张微, 王亮, 等. 冰温贮藏对山西不同产地玉露香梨挥发性有机物的影响[J]. *保鲜与加工*, 2022, 22(2): 1-7.  
ZHAO Yingli, ZHANG Wei, WANG Liang, et al. Effects of ice-temperature storage on volatile organic compounds of 'yuluxiang' pears from different areas in Shanxi Province[J]. *Storage and Process*, 2022, 22(2): 1-7.
- [50] 孟祥春, 黄泽鹏, 凡超, 等. 黄金百香果采后贮藏过程品质分析及挥发性风味物质特征鉴定[J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(6): 175-183.  
MENG Xiangchun, HUANG Zepeng, FAN Chao, et al. Quality analysis and characteristic identification of volatile flavor substance of golden passion fruit during postharvest storage[J]. *Storage and Process*, 2020, 20(6): 175-183.
- [51] LIU Y J, QIAN Y Y, SHU B, et al. Effects of four drying methods on *Ganoderma lucidum* volatile organic compounds analyzed via headspace solid-phase microextraction and comprehensive two-dimensional chromatography-time-of-flight mass spectrometry[J]. *Microchemical Journal*, 2021, 166: 106258.
- [52] 韦璐, 杨昌鹏, 孙钦菊, 等. 香蕉果酒低温发酵过程中挥发性香气成分的变化[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(18): 231-238.  
WEI Lu, YANG Changpeng, SUN Qinju, et al. Changes of volatile flavor substances in fermentation process of banana wine produced by low temperature fermentation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(18): 231-238.
- [53] HU X A, WANG R R, GUO J J, et al. Changes in the volatile components of candied kumquats in different processing methodologies with headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Molecules*, 2019, 24(17): 3053.
- [54] 蒋冰, 丁胜华, 张达莉, 等. 气相色谱-离子迁移谱技术分析干燥方式对柠檬片挥发性物质的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(6): 58-66, 130.  
JIANG Bing, DING Shenghua, ZHANG Dali, et al. Effects of dehydration methods on the volatile components of lemon slices with GC-IMS[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(6): 58-66, 130.
- [55] 莫一凡, 姚凌云, 冯涛, 等. 水果干风味物质及干燥方式的影响研究[J]. *中国果菜*, 2020, 40(6): 23-28, 40.  
MO Yifan, YAO Lingyun, FENG Tao, et al. Study on flavor substances of dried fruits and the effects of drying methods[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2020, 40(6): 23-28, 40.
- [56] FRATIANNI A, ADILETTA G, DI MATTEO M, et al. Evolution of carotenoid content, antioxidant activity and volatiles compounds in dried mango fruits (*Mangifera indica* L.)[J]. *Foods*, 2020, 9(10): 1424.
- [57] 李玉杰, 肖天宇, 马云青, 等. 桑葚干挥发性成分萃取条件优化及 GC-MS 分析[J]. *河北工业科技*, 2021, 38(5): 438-444.  
LI Yujie, XIAO Tianyu, MA Yunqing, et al. Optimization of extraction condition and analysis of volatile components of dried mulberry by GC/MS[J]. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 2021, 38(5): 438-444.
- [58] 靳政时, 牛彝, 刘瑞玲, 等. 干燥方式对猕猴桃果干品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(24): 62-71.  
JIN Zhengshi, NIU Ben, LIU Ruiling, et al. Effects of drying methods on the quality of dried kiwifruit[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(24): 62-71.
- [59] KLAUDIA M, JACEK Ł, KRZYSZTOF L, et al. The effect of filtrated osmotic solutions based on chokeberry juice enriched with mint extract on volatile compounds in dried apples[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(7): 13728.

加工编辑:张岩蔚  
收稿日期:2022-11-07