

食品工业科技

Science and Technology of Food Industry

ISSN 1002-0306, CN 11-1759/TS



《食品工业科技》网络首发论文

题目： 基于 E-nose、HS-SPME-GC-MS 和 GC-IMS 检测三种草莓鲜榨汁的香气
作者： 张敬文，潘磊庆，屠康
DOI： 10.13386/j.issn1002-0306.2022040207
网络首发日期： 2022-08-09
引用格式： 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/OL]. 食品工业科技.
<https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022040207>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

作者简介: 张敬文(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与检测, E-mail: 2020108041@stu.njau.edu.cn。

*通讯作者: 屠康(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: kangtu@njau.edu.cn。

基金项目: 新疆特色农产品深加工兵团重点实验室开放课题 AP1901, 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

基于 E-nose、HS-SPME-GC-MS 和 GC-IMS 检测三种草莓鲜榨汁的香气

张敬文, 潘磊庆, 屠康*

(南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095)

摘要: 不同草莓品种鲜榨汁风味存在较大区别, 风味特征会直接影响草莓鲜榨汁消费者接受度和经济价值。本研究以妙香 3 号草莓、红颜草莓和黔莓 2 号草莓为研究对象, 利用电子鼻 (Electronic nose, E-nose)、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用 (Headspace Solid Phase Micro Extraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 和气相色谱-离子迁移谱 (Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS) 对三种草莓鲜榨汁的挥发性风味物质进行定性和定量分析。结果表明, 三种草莓鲜榨汁中挥发性风味物质含量和种类有明显差别。电子鼻可以有效区分三种草莓鲜榨汁; HS-SPME-GC-MS 检测出 89 种挥发性风味物质, 包括 55 种酯类、9 种醛类、7 种醇类、13 种酮类和 5 种酸类。其中 22 种挥发性风味物质是三种草莓鲜榨汁共有的, 包括 11 种酯类、4 种醛类、芳樟醇、5 种酮类及壬酸。妙香 3 号鲜榨汁中 5-己基二氢-2(3H)-呋喃酮含量较高, 红颜草莓鲜榨汁中乙酸己酯和 (Z)-乙酸-2-己烯-1-醇酯含量较高, 黔莓 2 号草莓鲜榨汁中乙酸甲酯、丁酸甲酯、己酸甲酯、己醛、(E)-2 己烯醛、芳樟醇和 4-甲氧基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮含量较高。GC-IMS 检测出 60 种挥发性风味物质, 包括 24 种酯类、12 种醛类、7 种醇类、10 种酮类、2 种呋喃和 5 种其他物质。丁酸乙酯、乙酸异丙酯、2-己烯醛、1-戊烯-3-醇含量在三种草莓鲜榨汁中含量均较高, 是形成草莓风味特性的关键物质。

关键词: 草莓鲜榨汁; 香气; 电子鼻; 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用; 气相色谱-离子迁移谱

Aroma Determination of Three Freshly Squeezed Strawberry Juice Based on E-nose, HS-SPME-GC-MS and GC-IMS

Abstract: Flavor of different freshly squeezed strawberry juice is quite different, and its characteristics will directly affect the economic value of freshly squeezed juice. In order to explore the differences of volatile organic compounds (VOCs) in Miaoxiang No. 3 (MX3), Hongyan (HY) and Qianmei No. 2 (QM2) strawberry freshly squeezed juice, VOCs were detected by electronic nose (E-nose), headspace solid phase micro extraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) qualitatively and quantitatively. The results showed that contents and species of VOCs in three freshly squeezed strawberry juice were significantly different. E-nose could distinguish these three freshly squeezed strawberry juice in terms of aroma characteristics. 89 kinds of VOCs were detected by HS-SPME-GC-MS, including 55 esters, 9 aldehydes, 7 alcohols, 13 ketones and 5 acids. Among them, 22 kinds of VOCs were common to MX3, HY and QM2 strawberry freshly squeezed juice, including 11 kinds of esters (methyl acetate, methyl butyrate, methyl hexanoate, etc.), 4 kinds of aldehydes (hexanal, (E)-2-hexenal, (Z)-2-heptenal, etc.), linalool, 5 kinds of ketones (acetone, 2,3-butanedione, etc.) and nonanoic acid. Content of 5-hexyldihydro-2(3H)-furanone in MX3 strawberry freshly squeezed juice was higher, while contents of hexyl acetate and (Z)-2-hexen-1-ol acetate in HY strawberry freshly squeezed juice were higher. Methyl acetate, methyl butyrate, methyl hexanoate, hexanal, (E)-2-hexenal, linalool and 4-methoxy-2,5-dimethyl-3(2H)-furanone in QM2 strawberry freshly squeezed juice were higher. 60 kinds of VOCs were identified by GC-IMS, including 24 esters, 12 aldehydes, 7 alcohols, 10 ketones, 2 furans and 5 others. Contents of ethyl butyrate, isopropyl acetate, 2-hexenal and 1-penten-3-ol were higher in the three freshly squeezed strawberry juice, which were regarded as the key VOCs for the formation of flavor characteristics in freshly squeezed strawberry juice.

Key words: Freshly squeezed strawberry juice; aroma; electronic nose (E-nose); headspace solid phase micro extraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS); gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)

中图分类号: TS201.2; TS255.1 文献标志码: A

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040207

草莓 (*Fragaria×ananassa* Duch.)属于浆果类^[1], 富含维生素 C、氨基酸、膳食纤维^[2]及酚类、黄酮和花青素等生物活性物质^[3]。为提升草莓经济价值, 草莓粉、草莓脆片、草莓酱、草莓醋和草莓汁等深加工产品日益增加^[4]。随着人们对健康和绿色食品的追求, 草莓鲜榨汁将有较大的市场前景。

香气作为评价草莓鲜榨汁的重要指标, 直接影响消费者的选择。目前评价果汁风味的技术主要有电子鼻 (Electronic nose, E-nose)^[5]、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用 (Headspace Solid Phase Micro Extraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry,

HS-SPME-GC-MS)^[7]和气相色谱-离子迁移谱 (Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS)^[10]等, 已经应用于评价猕猴桃汁、桃汁、蓝莓汁^[11]、沙棘汁^[12]、番茄汁^[13]和西瓜汁^[14]的风味特征中。HS-SPME-GC-MS 借助微萃取作用对挥发性风味物质富集, 利用色谱柱分离出风味物质; GC-IMS 通过分离和迁移风味物质, 使得分子量较小的物质以单体和二聚体的形式被检出; 电子鼻可以快速表征草莓鲜榨汁的整体风味特征, 有研究依据风味特征区分鲜榨和经过灭菌处理的草莓汁^[5]。目前许多研究集中在榨汁工艺^[17]和加工处理对果汁营养品质^[18]、贮藏稳定性^[21]及微生物^[22]的影响等方面。有研究基于气味信息利用电子鼻区分草莓鲜榨汁和不同加工处理的草莓汁^[23], 但没有表征草莓汁具体香气物质的含量和组成。草莓汁风味特性是多种挥发性风味物质相互作用的结果, 明确每种挥发性风味物质变化极为重要, 目前缺乏具体表征不同品种草莓鲜榨汁挥发性风味物质的研究。

妙香 3 号草莓、红颜草莓和黔莓 2 号草莓分别为山东省、江苏省和四川省主要种植品种。本研究对三种典型草莓品种的鲜榨汁进行研究, 利用 E-nose、HS-SPME-GC-MS 和 GC-IMS 对风味进行评价, 通过定性和定量分析明确三种草莓鲜榨汁的挥发性风味物质差异, 为鲜榨果汁风味品质评价和包装保鲜提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与amp;仪器

妙香 3 号草莓约花期 40 天采摘于江苏省南京市栖霞区; 红颜草莓约花期 40 天采摘于江苏省南京市江宁区; 黔莓 2 号草莓约花期 50 天采摘于四川省大凉山; 壬酸乙酯、丙二醇 国产分析纯。

CTHI-250B 恒温恒湿箱 施都凯仪器设备公司 (中国); SJYZ23D 立式挤压原汁机 苏泊尔公司 (中国); PEN3 电子鼻 Airsense 公司 (德国); TSQ9000 三重四极杆 GC-MS/MS 赛默飞公司 (中国); GC-IMS FlavourSpec® G.A.S 公司 (德国)。

1.2 实验方法

1.2.1 样品准备 挑选无病害, 色泽鲜亮且成熟度基本一致 (八成熟) 的妙香 3 号 (MX3) 和红颜草莓 (HY), 采摘后 2 h 内运往实验室; 黔莓 2 号 (QM2) 草莓 (八成熟) 采摘后当天运输至实验室, 去除机械损伤的草莓, 散除田间热。脱去萼片并用蒸馏水清洗三遍, 然后进行榨汁处理。将草莓鲜榨汁放置于提前灭菌处理的 200 mL 玻璃瓶中, 于温度为 (4 ± 1) °C, 相对湿度为 95% 的恒温恒湿箱中保存以进行实验相关指标测定。

1.2.2 E-nose 测定 参考高丽萍^[24]的方法并进行修改。吸取 10 mL 草莓鲜榨汁于 250 mL 玻璃烧杯中, 用锡箔纸密封 15 min 使得挥发性风味化合物在烧杯顶部达到平衡。实验条件: 样品间隔时间为 1 s, 传感器清洗时间为 60 s, 自动调零时间为 5 s, 样品准备时间为 5 s, 传感器和内部流量分别为 400 mL/min 和 150 mL/min, 检测时间为 90 s。每种草莓鲜榨汁样本

重复 20 次。利用 WINmuster 对电子鼻检测结果进行主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)、线性判别分析 (Linear Discriminant Analysis, LDA)和载荷分析 (Loadings, LA)。电子鼻传感器响应值在 80 s 后达到稳定, 故 80 s 处的传感器响应值用来做数据分析。

表 1 电子鼻传感器性能描述
Table 1 The description of E-nose sensor performance

阵列序号	传感器名称	传感器敏感性描述
S1	W1C	对苯等芳香类成分敏感
S2	W5S	灵敏度大, 对氮氧化合物很灵敏
S3	W3C	氨水, 对芳香成分灵敏
S4	W6S	主要对氢气有选择性
S5	W5C	对烷烃类芳香成分敏感
S6	W1S	对甲烷等短链烷烃灵敏
S7	W1W	对无机硫化物灵敏
S8	W2S	对醇醚醛酮类灵敏
S9	W2W	芳香成分, 对有机硫化物灵敏
S10	W3S	对长链烷烃类成分灵敏

1.2.3 HS-SPME-GC-MS 测定 参考张琴等^[25]的方法并进行修改。吸取 10 g 草莓鲜榨汁于 20 mL 顶空瓶中, 加入 10 μ L 稀释 1000 倍的内标物壬酸乙酯 (5 mg/mL), 立即密封顶空瓶, 每种草莓鲜榨汁重复 3 次测定。

1.2.3.1 GC 条件 HP-5 石英毛细柱 (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m); 载气流量是 1.2 mL/min (氮气), 不分流进样。程序升温设定: 初始温度为 45 $^{\circ}$ C, 以 15 $^{\circ}$ C/min 升至 60 $^{\circ}$ C, 维持 2 min, 以 8 $^{\circ}$ C/min 升至 220 $^{\circ}$ C, 维持 1 min, 最后以 40 $^{\circ}$ C/min 升至 260 $^{\circ}$ C。

1.2.3.2 MS 条件 电子能量为 70 eV; 离子源和四极杆温度分别为 280 $^{\circ}$ C和 250 $^{\circ}$ C; 扫描区间为 35-450 m/z。

1.2.3.3 香气物质的定性定量分析 利用 Xcalibur V4.2 对 HS-SPME-GC-MS 检测结果进行分析。定性: 通过与 NIST 数据库比对。定量: 采用内标法^[25]。以壬酸乙酯作为内标:

$$\text{挥发性风味物质的含量}(\mu\text{g}/\text{kg}) = \frac{\text{各组分峰面积} \times \text{内标物质量}/\mu\text{g}}{\text{内标峰面积} \times \text{样品质量}/\text{kg}}$$

1.2.4 GC-IMS 测定 吸取 2 g 草莓鲜榨汁于 20 mL 顶空瓶中, 加入 10 μ L 稀释 1000 倍的内标物壬酸乙酯 (5 mg/mL), 立即密封顶空瓶, 每种草莓鲜榨汁样本重复 3 次。GC-IMS 测定顶草莓汁挥发性风味物质的条件参考付勋等人^[26]稍作修改。

1.2.4.1 进样条件 样品孵化条件为 60 $^{\circ}$ C, 15 min, 500 r/min; 进样针温度为 65 $^{\circ}$ C; 进样量为 500 μ L。

1.2.4.2 GC-IMS 条件 色谱柱和探测器温度分别为 60 $^{\circ}$ C和 45 $^{\circ}$ C; 载气流速为 150 mL/min (N_2); 分析时间为 30 min。

1.2.4.3 香气物质的定性和定量分析 利用 LAV (Laboratory Analytical Viewer)对 GC-IMS 检测结果进行分析。Gallery Plot 插件绘制指纹图谱; Reporter 插件绘制差异谱图; Dynamic PCA 插件绘制动态 PCA 图。定性: 通过与 NIST 及 IMS 数据库比对。定量: 采用内标法, 以壬酸乙酯作为内标, 计算如 1.2.3.3 中公式。

1.3 数据处理

利用 OriginPro2021b、TB tools 绘制图表；使用 SPSS18.0 对挥发性风味物质的相对含量进行统计分析，采用 Duncan 多重比较检验进行差异显著性分析 ($P<0.05$)，定量结果表示成平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 E-nose 分析三种草莓鲜榨汁挥发性风味物质

E-nose 可以快速表征样品的整体挥发性气味信息，每个传感器对特定的挥发性风味物质较为敏感 (表 1)，传感器电阻比值代表对挥发性成分物质响应值的高低。

由图 1 所示，电子鼻 10 个传感器对每种草莓鲜榨汁的响应值不同，说明三种草莓鲜榨汁挥发性成分存在差异。S2 (对氮氧化物敏感)、S7 (对硫化物敏感) 和 S9 (对芳香成分、有机硫化物敏感) 对草莓鲜榨汁的挥发性风味物质响应较高，其余传感器响应不高且区别不大。电子鼻 PCA、LDA 和 Loadings 分析结果如图 2 所示。图 2a 中，PC1 和 PC2 的贡献率分别为 94.02%和 5.20%，总贡献率达 99.22%，这两个主成分可以很好地代表草莓鲜榨汁挥发性风味成分的整体信息。妙香 3 号和黔莓 2 号鲜榨汁整体信息出现交叠，说明二者的整体风味信息具有一定的相似性；红颜草莓鲜榨汁与妙香 3 号和黔莓 2 号草莓鲜榨汁相距较远，说明红颜草莓鲜榨汁风味特征与其他两种鲜榨汁相比区别较为明显。

图 2b 为 LDA 分析结果，PC1 和 PC2 的贡献率分别为 80.23%和 12.53%，总贡献率达到 92.76%，可以有效代表三种草莓鲜榨汁的风味信息。LDA 分析结果与 PCA 有所不同，因为前者是有监督降维算法，而后者是无监督降维算法。LDA 对三种草莓鲜榨汁区分效果比 PCA 好，其中妙香 3 号与其他两种草莓鲜榨汁有明显区别。传感器载荷 (Loadings) 分析结果如图 2c 所示，传感器 S2、S7 和 S9 离坐标原点均较远，即传感器 S2 在第一主成分上贡献率最大，传感器 S7 和 S9 在第二主成份上贡献率较大，这一结果表明 S2、S7 和 S9 是特征传感器，与 Liu 等人^[27]的研究一致，说明氮氧化物、硫化物和芳香成分对草莓鲜榨汁香气特征有较大的贡献，总贡献率达 99.22%。三种草莓鲜榨汁挥发性风味成分存在明显差异，因此可以使用 E-nose 依据挥发性风味特征区分不同品种草莓鲜榨汁。

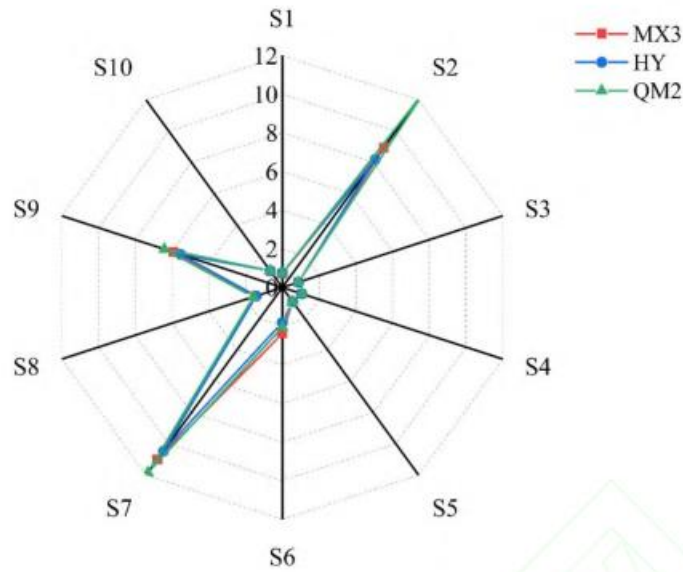


图1 妙香3号、红颜及黔莓2号草莓鲜榨汁挥发性成分的电子鼻传感器响应强度雷达图
Fig.1 Radar map of sensor respond values of VOCs in Miaoxiang No.3 (MX3), Hongyan (HY) and Qianmei No.2 (QM2) strawberry freshly squeezed juice measured by E-nose.

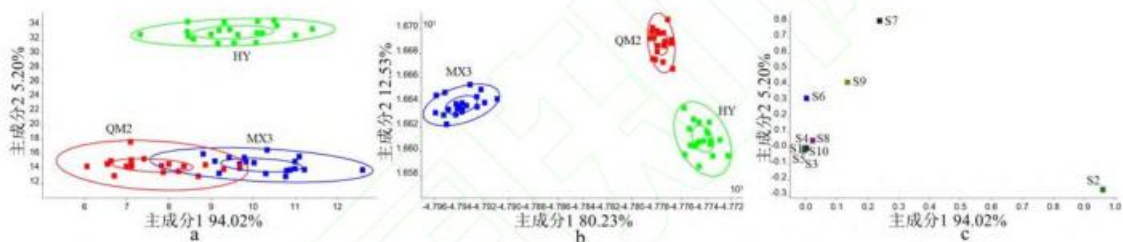


图2 妙香3号、红颜及黔莓2号草莓鲜榨汁挥发性风味物质的电子鼻 PCA、LDA 和 Loadings 分析图
Fig.2 PCA (a), LDA (b) and Loadings (c) plots of VOCs in Miaoxiang No.3 (MX3), Hongyan (HY) and Qianmei No.2 (QM2) strawberry freshly squeezed juice measured by E-nose.

2.2 HS-SPME-GC-MS 分析三种草莓鲜榨汁挥发性风味物质

HS-SPME-GC-MS 共检测出 89 种物质 (如表 2 所示), 包含酯类 (55 种), 醛类 (9 种), 醇类 (7 种), 酮类 (13 种)和酸类 (5 种)。图 3 表示每种草莓鲜榨汁挥发性风味物质分布。图 3a 可见三种草莓鲜榨汁含有的挥发性风味物质总含量不同, 妙香 3 号、红颜及黔莓 2 号鲜榨汁风味组成分别以酮类、酯类和醛类物质风味特性为主。图 3b 表示三种草莓鲜榨汁含有的挥发性风味物质种类。所含酯类 (“果香”型物质) 种类最多, 醛类、醇类物质次之, 这与 Azodanlou R 等人^[28]的研究一致。红颜草莓鲜榨汁的挥发性风味物质中酯类物质的种类低于妙香 3 号和黔莓 2 号鲜榨汁。

定量分析结果如表 2 所示, 三种草莓鲜榨汁种挥发性风味物质种类和含量存在较为明显的差异。整体而言, 妙香 3 号和黔莓 2 号草莓鲜榨汁挥发性风味物质种类比红颜草莓鲜榨汁高。三种草莓鲜榨汁中, 妙香 3 号草莓鲜榨汁中挥发性风味物质含量较低, 黔莓 2 号草莓鲜榨汁中挥发性风味物质含量较高, 其中己醛和 (E)-2-己烯醛含量远高于其他两种草莓鲜榨汁, 分别高达 58.22 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、110.99 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。乙酸辛酯 (柑橘、苹果和桃子香气)、3-甲基-丁酸

等是妙香 3 号草莓鲜榨汁特有的, 1-辛烯-3-酮 (奶油香气) 等是红颜草莓鲜榨汁特有的, 丙酸甲酯、异戊酸甲酯等是黔莓 2 号草莓鲜榨汁特有的, 这可能与草莓品种和环境条件尤其是金属类物质^[29]、采收时间等^[30]有关。三种草莓鲜榨汁共有的挥发性风味物质有 22 种, 包括 11 种酯类 (乙酸甲酯、丁酸甲酯、己酸甲酯等)、4 种醛类 (己醛、(E)-2 己烯醛、(Z)-2 庚烯醛等)、芳樟醇、5 种酮类 (乙酮、2, 3-丁二酮等) 及壬酸。通过分析可以得出 (Z)-己酸-3-己烯酯 (果香, 苹果-梨样香气) 在红颜草莓鲜榨汁中含量最高; 己酸辛酯、己酸己酯 (嫩茭青刀豆香气和生水果香味) 在妙香 3 号鲜榨汁含量最丰富; 乙酸甲酯、丁酸甲酯、己酸甲酯、己醛、(E)-2 己烯醛、芳樟醇和 4-甲氧基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮在黔莓 2 号草莓鲜榨汁中含量较高, 其中芳樟醇和 4-甲氧基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮 (焦糖味)^[31] 在黔莓 2 号中含量远高于其他两种草莓。5-己基二氢-2(3H)-呋喃酮又称为 γ -癸内酯 (桃香味^[32]) 在妙香 3 号草莓汁中含量远高于其他两种草莓鲜榨汁。通过与已有研究^[33,34]比较, 草莓鲜榨汁与整果果实风味特征存在差异性和相似性, 可能是由于原料加工及产品贮藏的过程中, 化学组分的改变赋予了草莓鲜榨汁与原果实不同的风味^[35]。

表 2 HS-SPME-GC-MS 检测妙香 3 号、红颜及黔莓 2 号草莓鲜榨汁的挥发性风味物质
Table 2 VOCs in Miaoxiang No.3 (MX3), Hongyan (HY) and Qianmei No.2 (QM2) strawberry freshly squeezed juice detected by HS-SPME-GC-MS

类别	序号	化合物种类	含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)		
			妙香 3 号	红颜	黔莓 2 号
	1	乙酸甲酯	0.305±0.047 ^c	1.25±0.091 ^b	10.066±0.2 ^a
	2	乙酸异丙酯	ND	0.065±0.01 ^b	1.894±0 ^a
	3	乙酸乙酯	0.063±0.001 ^b	ND	0.771±0 ^a
	4	丙酸甲酯	ND	ND	0.330±0.001
	5	丁酸甲酯	1.021±0.095 ^c	2.776±0.244 ^b	14.185±0.3 ^a
	6	异戊酸甲酯	ND	ND	3.238±0.1
	7	2-丁醇-3-甲基乙酸酯	ND	ND	3.590±0
	8	丁酸异丙酯	ND	ND	1.079±0.001
	9	1-乙基丙基乙酸酯	ND	ND	5.639±0.1
	10	1-丁醇 3-甲基乙酸酯	ND	ND	2.269±0
	11	1-丁醇 2-甲基乙酸酯	ND	ND	1.960±0
	12	乙酸戊酯	ND	ND	0.749±0
	13	2-甲基丁-2-烯-1-乙酸酯	ND	ND	0.374±0
	14	己酸甲酯	5.294±0.445 ^b	9.934±1.388 ^a	13.238±0.5 ^b
	15	己酸乙酯	1.6±0.156 ^b	1.555±0.202 ^a	0.363±0 ^b
	16	乙酸己酯	3.189±0.193 ^b	14.382±2.130 ^a	11.388±0.2 ^b
	17	己酸-1-甲基乙基酯	0.095±0.01	ND	ND
	18	4-辛烯酸甲酯	0.053±0.006	ND	ND
酯类	19	辛酸甲酯	0.768±0.031 ^a	0.451±0.099 ^a	ND
	20	乙酸苯甲酯	0.232±0.015 ^b	0.022±0.001 ^c	3.678±0.01 ^a
	21	丁酸己酯	0.979±0.044 ^b	1.853±0.01 ^a	ND
	22	(E)-丁酸-2-己烯酯	0.863±0.025 ^b	1.926±0.068 ^a	ND
	23	3,4-二甲基-苯甲醛	ND	0.836±0.269	ND
	24	1-甲基丁酸丁酯	ND	0.262±0.05	ND
	25	辛酸乙酯	0.116±0.012	ND	ND
	26	水杨酸甲酯	ND	ND	0.132±0.01
	27	2-甲基-丙酸己酯	ND	ND	0.892±0
	28	(Z)-丁酸-2-己烯酯	ND	ND	0.793±0
	29	2-甲基己酸丁酯	ND	ND	1.674±0.1
	30	己酸-3-戊酯	ND	ND	1.696±0.1
	31	乙酸-2-苯乙酯	ND	ND	5.176±0
	32	乙酸对甲基苯酯	ND	ND	11.674±0
	33	乙酸辛酯	0.811±0.025	ND	ND
	34	3-甲基-丁酸己酯	0.221±0	ND	ND
	35	反-2-己烯基异戊酸酯	0.126±0.01 ^a	0.102±0.012 ^a	ND
	36	己酸异戊酯	0.505±0.01	ND	ND
	37	癸酸甲酯	0.074±0.005	ND	ND

	38	(Z)-己酸-3-己烯酯	0.111±0.021 ^b	0.667±0.186 ^a	0.13±0 ^b
	39	邻氨基苯甲酸甲酯	ND	0.196±0.01	ND
	40	己酸己酯	2.989±0.192 ^a	1.744±0.2 ^a	1.013±0 ^b
	41	丁酸辛酯	4.2±0.239	ND	ND
	42	3-己酸庚酯	0.063±0	ND	ND
	43	丁酸-1-甲基辛酯	0.147±0.006	ND	ND
	44	乙酸癸酯	0.189±0	ND	ND
	45	3-甲基-丁酸辛酯	1.621±0.061 ^a	ND	0.154±0 ^b
	46	2-甲基丁酸 3-辛酯	ND	0.501±0.08	ND
	47	丁酸十一烷酯	0.142±0.007	ND	ND
	48	十一烷基己酸-2-烯酯	0.126±0.028	ND	ND
	49	己酸辛酯	2.453±0.336 ^a	0.443±0.097 ^b	0.595±0 ^b
	50	γ-十二内酯	4.379±0.582 ^a	2.071±0.284 ^a	ND
	51	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯	0.411±0.01	ND	ND
	52	己酸癸酯	0.063±0.01	ND	ND
	53	邻苯二甲酸二丁酯	0.326±0.045 ^b	0.385±0.042 ^a	0.991±0 ^b
	54	(Z)-2-丙烯酸盐	ND	ND	0.330±0
	55	(E)-乙酸-2-己烯-1-醇酯	5.158±0.245 ^a	24.004±3.262 ^a	15.374±0.3 ^a
	56	己醛	8.032±0.904 ^c	17.689±2.046 ^b	58.216±0.4 ^a
	57	(E)-2-己烯醛	6.063±0.822 ^b	14.818±0.826 ^{ab}	110.991±0.6 ^a
	58	庚醛	0.079±0.007 ^a	ND	0.264±0 ^a
	59	(Z)-2-庚醛	0.116±0.006 ^c	0.182±0.025 ^b	0.595±0 ^a
醛类	60	苯甲醛	0.253±0 ^b	0.291±0.012 ^a	0.363±0 ^c
	61	辛醛	ND	ND	0.727±0
	62	壬醛	1.405±0.120	ND	5.782±0.2
	63	癸醛	0.147±0.006 ^a	ND	0.441±0 ^a
	64	(Z)-2-癸烯醛	0.095±0 ^a	0.087±0.01 ^a	ND
	65	3-甲基-2-庚醇	ND	ND	1.035±0
	66	(E)-2-戊烯醇	0.079±0.007 ^a	ND	0.727±0 ^a
	67	1-己醇	0.674±0.085 ^b	3.445±0.219 ^a	ND
醇类	68	2-癸醇	0.268±0.035	ND	ND
	69	顺-α,α-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇	0.042±0.006	ND	ND
	70	芳樟醇	21.326±2.491 ^a	10.531±0.427 ^a	51.652±0.7 ^a
	71	2-甲基-4-烯丙氧基戊二醇	ND	0.509±0.118	ND
	72	丙酮	0.379±0.072 ^a	0.211±0.021 ^a	0.815±0 ^a
	73	2,3-丁二酮	0.253±0.044 ^a	0.138±0.005 ^a	0.815±0 ^a
	74	4-羟基-3-丙基-2-己酮	0.032±0	ND	ND
	75	2-庚酮	0.4±0.031 ^b	0.436±0.026 ^a	ND
	76	1-辛烯-3-酮	ND	0.044±0.01	ND
	77	4-甲氧基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮	0.916±0.036 ^a	1.337±0.146 ^a	10.859±0.2 ^a
酮类	78	2,5-二甲基呋喃-3,4(2H,5H)-二酮	0.095±0.01 ^a	0.073±0.012 ^a	ND
	79	2-壬酮	0.032±0	ND	ND
	80	3-壬烯-2-酮	0.137±0.005	0.087±0 ^a	0.176±0 ^a
	81	紫罗兰酮	0.032±0	ND	ND
	82	3-乙基-4-庚酮	ND	0.647±0.323	ND
	83	4,5-辛二酮	ND	0.843±0.234	ND
	84	5-己基二氢-2(3H)-呋喃酮	24.126±1.748 ^a	2.965±0.827 ^b	4.295±0.1 ^a
	85	己酸	ND	1.577±0.501 ^a	0.727±0 ^a
	86	2-乙基-己酸	ND	ND	1.233±0
酸类	87	辛酸	0.453±0.023 ^a	0.262±0.03 ^a	ND
	88	新癸酸	ND	0.138±0.025	ND
	89	壬酸	0.079±0.007 ^b	0.131±0.044 ^{ab}	0.815±0 ^a

注：ND 代表未检测出；不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

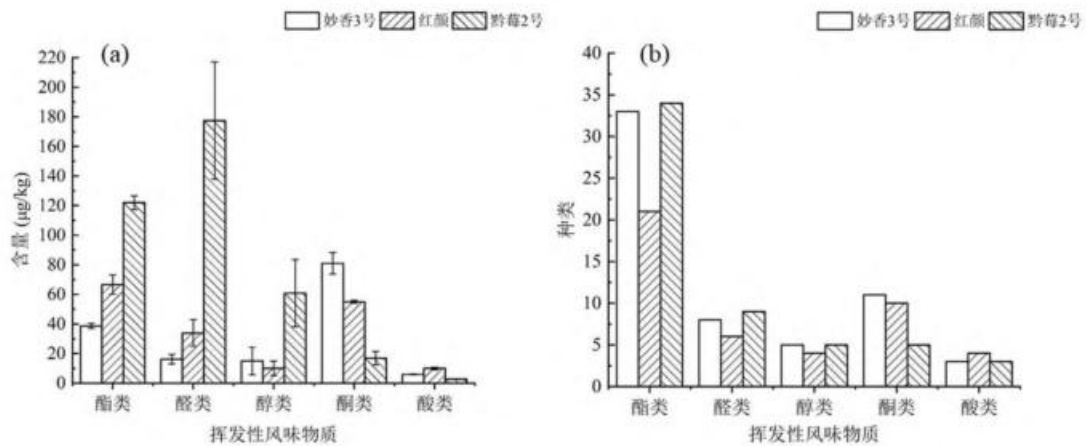


图3 HS-SPME-GC-MS 检测妙香3号、红颜及黔莓2号草莓鲜榨汁挥发性风味物质的含量和种类
Fig.3 Content and species of VOCs in Miaoxiang No.3 (MX3), Hongyan (HY) and Qianmei No.2 (QM2) strawberry freshly squeezed juice detected by HS-SPME-GC-MS

2.3 GC-IMS 分析三种草莓鲜榨汁挥发性风味物质

GC-IMS 共检测出 60 种挥发性风味物质 (如表 3), 包括酯类 (24 种)、醛类 (12 种)、醇类 (7 种)、酮类 (10 种)、呋喃 (2 种) 和其他物质 (5 种)。挥发性风味物质在 GC 的分离和 IMS 的迁移作用下被检测出来, 不同区域表示特定的物质^[36], 横纵坐标分别表示离子迁移时间和保留时间。

为了更加直观地反映出三种草莓鲜榨汁挥发性物质的差别, 以黔莓 2 号鲜榨汁为对照, 扣除蓝色背景, 红色区域代表挥发性物质含量较黔莓 2 号鲜榨汁高, 白色区域代表物质浓度较低。利用 Reporter 插件绘制出差异谱图, 如图 4 所示。保留时间为 200-1000 s, 迁移时间为 1.0-2.0 ms 区域内的草莓鲜榨汁挥发性风味物质信号较强; 红框代表的物质在不同草莓鲜榨汁中颜色深浅不同, 说明妙香 3 号鲜榨汁中挥发性风味物质种类和含量均较高。利用 Gallery Plot 插件绘制指纹图谱, 如图 5 所示。指纹图谱可以直观地反映出草莓鲜榨汁中检测出的挥发性成分之间的差异, 颜色的深浅代表峰强度的大小, 峰强度对应挥发性风味物质含量。红框区域代表在红颜草莓鲜榨汁中含量极少, 这与图 4 所示结果一致, 包括 14 种酯类 (2-羟基丙酸乙酯、丁酸己酯、丁酸异戊酯、乙酸己酯、丙酸异丁酯、乙酸庚酯、2-甲基丁酸丁酯、2-甲基丁酸丁酯、乙酸戊酯、乙酸戊酯、2-甲基丁醇乙酸酯、乙酸丁酯、庚酸甲酯、乙酸乙酯)、3 种醇类 (3-甲基-1-戊醇、芳樟醇-M、芳樟醇-D)、10 种酮类 (2,3-丁二酮、苯乙酮、1-辛烯-3-酮、2-丁酮、2-庚酮-D、2-庚酮-M、3-羟基-4-5-二甲基-2-5H-呋喃酮、2-壬酮、3-甲基-2-戊酮、苯乙酮) 和 2-戊基呋喃。

挥发性风味物质的不同芳香特征如花香、果香、青草香和焦糖味等共同组成草莓鲜榨汁的风味轮廓^[28,37,38]。结合表 3 和图 5, 乙酸甲酯、丁酸乙酯、(E)-2-壬烯醛 (黄瓜清香味)、2-己烯醛、庚醛 (柑橘香味)、 α -蒎烯-M (松木、针叶及树脂样气息) 和 2-甲基丙酸等 36 种物质在三种草莓鲜榨汁中含量相近。乙酸异丙酯、丙酸异丁酯、乙酸庚酯、2-甲基丁酸丁酯-M、2-甲基丁醇乙酸酯、乙酸丁酯、庚酸甲酯、乙酸乙酯-D、乙酸乙酯-M、1-戊烯-3-醇、芳樟

醇-D、2-庚酮-D 和 3-甲基-2-戊酮等这 13 种物质含量在三种草莓鲜榨汁中差别较大，可能与草莓品种和化学成分如糖酸比等有关。

利用动态 PCA 分析筛选三种草莓鲜榨汁的关键性风味物质，两个主成分贡献率达到 98% (PC1: 50%; PC2: 48%)，结果如图 6 所示。妙香 3 号、红颜和黔莓 2 号鲜榨汁之间距离较远，说明三种草莓鲜榨汁可以依据这 11 种物质有效区分开，这些物质包括 3-甲基丁醛、2-己烯醛、丙酸乙酯-M (菠萝香，微涩似芝麻)、丁酸乙酯 (菠萝、苹果、香蕉气息)、乙酸异丙酯、3-甲基-1-戊醇、苯乙酮-M、2-甲基丁酸甲酯、1-戊烯-3-醇、芳樟醇-D (风信子香)、乙酸庚酯，说明这 11 种物质为三种草莓鲜榨汁的特征性挥发风味物质。其中丁酸乙酯、乙酸异丙酯、2-己烯醛、1-戊烯-3-醇含量在三种草莓鲜榨汁中含量均较高，是草莓风味的重要组成成分。

由于 IMS 数据库还不够完善，利用 GC-IMS 检测出的草莓鲜榨汁风味物质种类比 HS-SPME-GC-MS 少，但 GC-IMS 可以检测出以单体和二聚体形式存在的挥发性风味物质 (丙酸乙酯、乙酸戊酯等) 及 HS-SPME-GC-MS 未能检出的物质 (庚酸甲酯、1-辛烯-3-醇等)。综合分析 HS-SPME-GC-MS 和 GC-IMS 结果，可以全面表征三种草莓鲜榨汁挥发性风味物质的差异。

表 3 GC-IMS 检测妙香 3 号、红颜及黔莓 2 号草莓鲜榨汁的挥发性风味物质
Table 3 VOCs in Miaoxiang No.3 (MX3), Hongyan (HY) and Qianmei No.2 (QM2) strawberry freshly squeezed juice detected by GC-IMS

序号	化合物名称	CAS 编号	分子式	保留时间/s	迁移时间 /ms	备注	含量 (µg/kg)	
							妙香 3 号	黔莓 2 号
1	乙酸甲酯	C79209	C ₃ H ₆ O ₂	136.004	1.1948		109.552±0.686 ^b	119.203±1.23 ^a
2	丙酸乙酯	C105373	C ₅ H ₁₀ O ₂	235.313	1.4333	D	109.672±0.088 ^a	106.058±0.025 ^c
3	丙酸乙酯	C105373	C ₅ H ₁₀ O ₂	240.013	1.148	M	22.736±0.595 ^c	23.731±0.299 ^b
4	丁酸乙酯	C105544	C ₆ H ₁₂ O ₂	310.411	1.564		98.693±0.268 ^a	88.197±1.488 ^c
5	乙酸异戊酯	C123922	C ₇ H ₁₄ O ₂	409.944	1.3161		14.277±0.195 ^a	15.183±1.096 ^a
6	2-甲基丁酸甲酯	C868575	C ₆ H ₁₂ O ₂	283.813	1.1998	M	17.474±1.679 ^a	14.911±1.827 ^a
7	(E)-2-辛烯醛	C2548870	C ₈ H ₁₄ O	797.948	1.829	D	4.836±0.213 ^a	3.445±0.385 ^b
8	(E)-2-辛烯醛	C2548870	C ₈ H ₁₄ O	800.951	1.3309	M	12.168±0.871 ^a	10.773±1.226 ^a
9	2-甲基丁酸甲酯	C868575	C ₆ H ₁₂ O ₂	281.111	1.5385	D	85.465±1.306 ^b	89.367±0.95 ^a
10	异丁酸乙酯	C97621	C ₆ H ₁₂ O ₂	246.67	1.1871		17.721±0.794 ^a	7.13±0.307 ^c
11	乙酸异丙酯	C108214	C ₅ H ₁₀ O ₂	189.19	1.4819		47.836±2.305 ^c	99.563±0.318 ^a
12	2-羟基丙酸乙酯	C97643	C ₅ H ₁₀ O ₃	338.659	1.5563		21.831±1.391 ^a	18.039±2.186 ^b
13	丁酸己酯	C2639636	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	1227.723	1.4906		5.17±0.324 ^a	2.473±0.386 ^c
14	丁酸异戊酯	C106274	C ₉ H ₁₈ O ₂	764.424	1.3861		6.639±0.189 ^a	8.193±1.423 ^a
15	乙酸己酯	C142927	C ₈ H ₁₆ O ₂	626.436	1.3828		2.486±0.004 ^b	4.22±0.684 ^a
16	丙酸异丁酯	C540421	C ₇ H ₁₄ O ₂	369.612	1.6993		38.728±2.655 ^b	62.9±2.47 ^a
17	乙酸庚酯	C112061	C ₉ H ₁₈ O ₂	988.937	1.4352		8.237±0.318 ^a	1.665±0.038 ^c
18	2-甲基丁酸丁酯	C15706737	C ₉ H ₁₈ O ₂	736.159	1.8809	D	11.075±2.689 ^b	6.858±0.972 ^c
19	2-甲基丁酸丁酯	C15706737	C ₉ H ₁₈ O ₂	734.726	1.3677	M	4.007±0.306 ^b	11.251±1.805 ^a
20	乙酸戊酯	C628637	C ₇ H ₁₄ O ₂	481.46	1.3229	M	8.663±0.501 ^b	11.684±0.577 ^a
21	乙酸戊酯	C628637	C ₇ H ₁₄ O ₂	482.146	1.7651	D	5.468±0.453 ^b	7.484±1.295 ^a
22	2-甲基丁醇乙酸酯	C624419	C ₇ H ₁₄ O ₂	419.543	1.7398		38.609±2.235 ^b	54.773±1.619 ^a
23	乙酸丁酯	C123864	C ₆ H ₁₂ O ₂	325.584	1.619		27.895±1.444 ^a	24.769±2.553 ^a
24	庚酸甲酯	C106730	C ₈ H ₁₆ O ₂	674.792	1.8045		58.594±1.556 ^a	14.944±2.301 ^c
25	乙酸乙酯	C141786	C ₄ H ₈ O ₂	167.177	1.3341	D	108.398±0.739 ^a	106.19±0.678 ^a
26	乙酸乙酯	C141786	C ₄ H ₈ O ₂	167.402	1.0901	M	25.675±0.408 ^b	14.375±0.248 ^c
27	2-甲基丙醛	C78842	C ₄ H ₈ O	119.653	1.1113		126.743±0.556 ^a	103.33±5.152 ^b

28	癸醛	C112312	C ₁₀ H ₂₀ O	1300.024	1.5353	2.717±0.204 ^a	2.276±0.281 ^a	2.555±0.328 ^a
29	(E)-2-壬烯醛	C18829566	C ₉ H ₁₆ O	1092.561	1.4121	2.785±0.125 ^a	2.771±0.037 ^a	2.662±0.305 ^a
30	(E)-2-庚醛	C18829555	C ₇ H ₁₂ O	567.876	1.2636	17.593±0.924 ^a	17.262±0.835 ^a	17.779±1.143 ^a
31	2-己烯醛	C505577	C ₈ H ₁₄ O	384.984	1.5138	101.009±0.597 ^a	101.157±0.312 ^a	97.016±0.174 ^b
32	3-甲基丁醛	C590863	C ₅ H ₁₀ O	189.644	1.1682	23.557±0.77 ^b	26.875±0.76 ^a	19.148±0.457 ^c
33	5-甲基糠醛	C620020	C ₆ H ₈ O ₂	566.294	1.4759	6.364±0.949 ^a	4.18±0.969 ^b	3.956±0.979 ^b
34	庚醛	C110430	C ₇ H ₁₄ O	437.495	1.2664	6.81±0.471 ^a	6.565±0.198 ^a	6.982±0.433 ^a
35	壬醛	C124196	C ₉ H ₁₈ O	922.892	1.9482	1.658±0.042 ^b	2.356±0.973 ^b	3.932±0.321 ^a
36	壬醛	C124196	C ₉ H ₁₈ O	922.692	1.4778	6.579±0.241 ^c	10.256±2.383 ^b	13.625±0.309 ^a
37	1-戊烯-3-醇	C616251	C ₅ H ₁₀ O	207.808	1.3497	86.559±1.432 ^a	46.127±1.211 ^c	70.104±1.426 ^b
38	2-呋喃甲硫醇	C98022	C ₅ H ₆ OS	457.262	1.335	11.253±0.505 ^b	13.908±1.221 ^a	14.07±0.704 ^a
39	1-庚醇	C111706	C ₇ H ₁₆ O	571.162	1.3782	4.784±0.52 ^a	3.133±0.447 ^b	2.201±0.173 ^c
40	1-辛烯-3-醇	C3391864	C ₈ H ₁₆ O	572.909	1.154	10.082±0.361 ^a	8.28±0.701 ^a	10.015±2.763 ^a
41	3-甲基-1-戊醇	C589355	C ₈ H ₁₆ O	369.495	1.6125	30.288±0.611 ^b	28.983±0.969 ^b	54.575±0.214 ^a
42	芳樟醇	C78706	C ₁₀ H ₁₈ O	923.99	1.2201	51.034±0.564 ^a	27.215±4.982 ^b	31.545±1.745 ^b
43	芳樟醇	C78706	C ₁₀ H ₁₈ O	910.784	1.7147	5.853±0.197 ^a	1.751±0.253 ^b	1.986±0.094 ^b
44	2,3-丁二酮	C431038	C ₄ H ₆ O ₂	127.531	1.1559	73.565±0.578 ^a	73.514±1.38 ^a	65.892±0.087 ^b
45	苯乙醇	C98862	C ₈ H ₈ O	798.353	1.5492	3.486±0.356 ^a	3.005±0.481 ^a	3.924±0.861 ^a
46	1-辛烯-3-醇	C4312996	C ₈ H ₁₄ O	567.728	1.6771	14.466±0.539 ^a	9.073±0.701 ^c	11.449±0.64 ^b
47	2-丁酮	C78933	C ₄ H ₈ O	153.324	1.2505	57.51±0.46 ^a	21.875±2.4 ^c	29.171±1.106 ^b
48	2-庚酮	C110430	C ₇ H ₁₄ O	437.06	1.625	63.534±0.64 ^a	28.725±0.565 ^b	13.872±0.664 ^c
49	2-庚酮	C111717	C ₇ H ₁₄ O	452.665	1.7028	9.287±0.392 ^a	3.935±0.289 ^b	4.377±0.707 ^b
50	3-羟基-4-5-二甲基-2-5H-呋喃 酮	C28664359	C ₆ H ₈ O ₃	986.279	1.6235	2.264±0.432 ^a	0.929±0.047 ^b	0.948±0.062 ^b
51	2-壬酮	C821556	C ₉ H ₁₈ O	889.493	1.4146	2.307±0.022 ^a	1.323±0.115 ^b	1.385±0.089 ^b
52	3-甲基-2-戊酮	C565617	C ₆ H ₁₂ O	262.319	1.4889	5.144±0.225 ^b	4.245±0.256 ^b	24.374±1.25 ^a
53	苯乙醇	C98862	C ₈ H ₈ O	813.227	1.1938	7.34±0.335 ^b	6.178±0.356 ^c	9.866±0.62 ^a
54	2-戊基呋喃	C3777693	C ₉ H ₁₄ O	655.668	1.2546	20.36±0.598 ^a	16.8±0.935 ^b	15.562±0.411 ^b
55	2-乙酰呋喃	C1192627	C ₆ H ₆ O ₂	454.964	1.4246	4.041±0.657 ^a	4.046±0.565 ^a	4.698±0.804 ^a
56	2-乙酰吡嗪	C22047252	C ₆ H ₆ N ₂ O	680.819	1.5442	5.595±1.046 ^a	4.272±0.974 ^a	4.191±0.857 ^a

57	2-乙基-3-甲基吡嗪	C15707230	C ₇ H ₁₀ N ₂	642.085	1.1823	14.953±0.675 ^a	6.823±0.149 ^b	5.589±0.196 ^c
58	α-蒎烯	C805568	C ₁₀ H ₁₆	505.817	1.2891	21.293±1.099 ^a	22.547±0.768 ^a	21.027±1.651 ^a
59	α-蒎烯	C805568	C ₁₀ H ₁₆	504.295	1.6844	92.045±0.231 ^a	83.766±0.102 ^b	82.559±1.126 ^b
60	2-甲基丙酸	C79312	C ₄ H ₈ O ₂	260.804	1.3624	24.787±0.223 ^b	23.499±2.372 ^b	29.698±0.622 ^a

注: M 代表单体, D 代表二聚体; 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

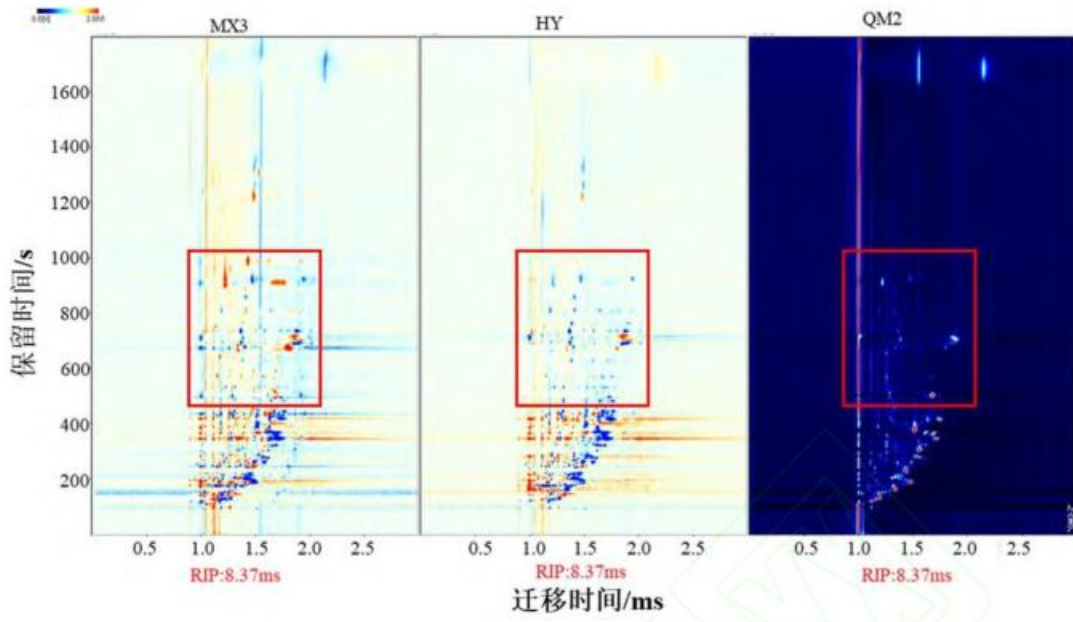


图4 妙香3号、红颜及黔莓2号草莓鲜榨汁挥发性组分 GC-IMS 二维差异图谱
 Fig.4 Two-dimensional difference spectra of VOCs in Miaoxiang No.3 (MX3) , Hongyan (HY) and Qianmei No.2 (QM2) strawberry freshly squeezed juice detected by GC-IMS

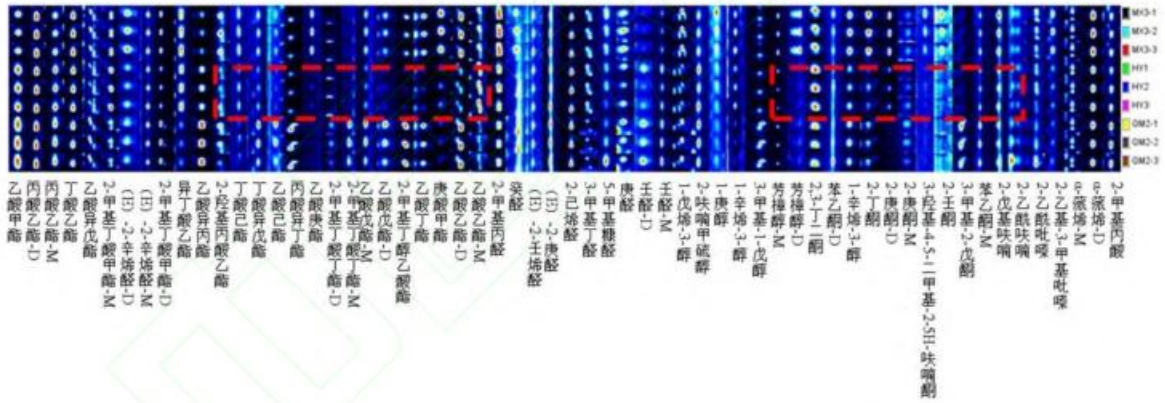


图5 妙香3号、红颜及黔莓2号草莓鲜榨汁60种挥发性组分 GC-IMS 指纹图谱
 Fig.5 Fingerprint of 60 species VOCs in Miaoxiang No.3 (MX3) , Hongyan (HY) and Qianmei No.2 (QM2) strawberry freshly squeezed juice detected by GC-IMS

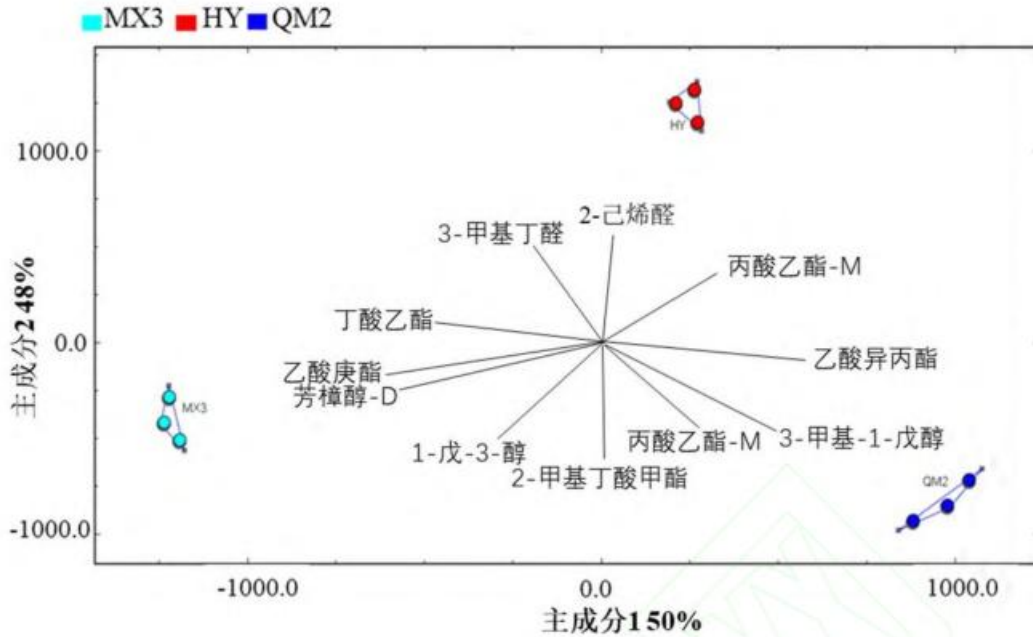


图6 妙香3号、红颜及黔莓2号草莓鲜榨汁挥发性组分 GC-IMS 动态 PCA 分析
 Fig.6 Dynamic PCA plot of VOCs in Miaoxiang No.3 (MX3), Hongyan (HY) and Qianmei No.2 (QM2) strawberry freshly squeezed juice detected by GC-IMS
 注: M 和 D 分别表示单体和二聚体

3 结论

利用 E-nose、HS-SPME-GC-MS 和 GC-IMS 定性和定量分析妙香 3 号、红颜和黔莓 2 号草莓鲜榨汁的挥发性风味化合物, E-nose 可以根据其气味特征差异区分三种草莓鲜榨汁。HS-SPME-GC-MS 共检测出挥发性风味化合物 89 种, 其中妙香 3 号、红颜和黔莓 2 号草莓鲜榨汁挥发性物质分别为 60 种、45 种和 65 种, 包括酯类、醛类、醇类、酮类和酸类 5 大类。妙香 3 号、红颜及黔莓 2 号草莓鲜榨汁风味组成分别以酮类、酯类和醛类物质风味特性为主, 其中含 22 种共有的挥发性风味物质, 包括乙酸甲酯、丁酸甲酯、己酸甲酯等 11 种酯类; 己醛、(E)-2 己烯醛、(Z)-2 庚烯醛等 4 种醛类、芳樟醇、乙酮、2, 3-丁二酮等 5 种酮类及壬酸。GC-IMS 共检测出 60 种物质, 乙酸异丙酯、丙酸异丁酯、乙酸庚酯、2-甲基丁酸丁酯-M、2-甲基丁醇乙酸酯、乙酸丁酯、庚酸甲酯、乙酸乙酯-D、乙酸乙酯-M、1-戊烯-3-醇、芳樟醇-D、2-庚酮-D 和 3-甲基-2-戊酮等 13 种物质的含量在三种草莓鲜榨汁中差别较大; 通过动态 PCA 分析筛选出三种草莓鲜榨汁的 11 种特征风味物质, 包括 3-甲基丁醛、2-己烯醛、丙酸乙酯-M、丁酸乙酯、乙酸异丙酯、3-甲基-1-戊醇、苯乙酮-M、2-甲基丁酸甲酯、1-戊-3-醇、芳樟醇-D 和乙酸庚酯。

本研究能够为不同品种草莓鲜榨汁的香气分析提供依据, 利用 E-nose 可以根据其整体风味差异区分三种草莓鲜榨汁; 利用 HS-SPME-GC-MS 可以对三种草莓鲜榨汁挥发性风味物质进行定性和定量表征, 但该方法一般检测出分子量较大的物质; GC-IMS 能够检测出以单体和二聚体形式存在的挥发性风味物质如丙酸乙酯、乙酸戊酯等及庚酸甲酯、1-辛烯-3-

醇等 HS-SPME-GC-MS 未能检出的物质。因此为实现对三种草莓鲜榨汁具体差异性风味物质的表征, 应考虑结合 HS-SPME-GC-MS 和 GC-IMS 技术。

参考文献:

- [1] 周丽萍, 余红, 王淑珍. 10 个粉(白)果草莓品种(系)果实品质比较试验[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(12): 2559-2561.
ZHOU Liping, YU Hong, WANG Shuzhen. Comparative study on fruit quality of 10 strawberry varieties (lines) with pink (white) fruit[J]. Zhejiang Agricultural Science, 2020, 61(12): 2559-2661.
- [2] 白胜, 朱润华, 阳圣莹, 等. 不同草莓品种营养成分比较与品种筛选[J]. 山西农业科学, 2020, 48(1): 64-67.
BAI Sheng, ZHU Runhua, YANG Shengying, et al. Nutrients comparison and screening of different strawberry varieties[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(1): 64-67.
- [3] 王苑馨, 宋娇娇, 任寅印, 等. 不同品种草莓果实生物活性物质和抗氧化能力比较[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(1): 69-76.
WANG Yuanxin, SONG Jiaojiao, REN Yinyin, et al. Comparison of bioactive substances and antioxidant activity of different strawberry cultivars[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 42(1): 69-76.
- [4] 桂远方. 真空冷冻干燥草莓粉品质评价研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2016.
GUI Yuanfang. Research on quality evaluation of vacuum freeze-dried strawberry powder[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2016.
- [5] QIU S S, GAO L P, WANG J. Classification and regression of ELM, LVQ and SVM for E-nose data of strawberry juice[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 144: 77-85.
- [6] 蓬桂华, 李文馨, 殷勇, 等. 电子鼻和电子舌在分析桑果汁风味上的应用[J]. 食品工业科技, 2020, 41(12): 5.
PENG Guihua, LI Wenxin, YIN Yong, et al. Analysis of flavor difference of mulberry juice by E-nose and E-tongue[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(12): 5.
- [7] 付勋, 聂青玉, 李翔, 等. HS-SPME/GC-MS 测定玫瑰香橙果汁挥发性成分[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(4): 70-75.
FU Xun, NIE Qingyu, LI Xiang, et al. Analysis of volatiles and aroma in rose-flavor orange juice by HS-SPME/GC-MS[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2021, 39(4): 70-75.
- [8] 王鹏, 田洪磊, 詹萍, 等. 采用 GC-MS 技术分析新疆蟠桃鲜果及其果汁制品中的挥发性物质[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(11): 199-205.
WANG Peng, TIAN Honglei, ZHAN Ping, et al. Analysis and identification of volatile compounds in Xinjiang flat peach fruits and its juice products by GC-MS. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(11): 199-205.
- [9] WANG L, WANG P, DENG W L, et al. Evaluation of aroma characteristics of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) juice using gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose[J]. LWT, 2019, 108: 400-406.
- [10] 武东昕, 孟新涛, 马燕, 等. 基于 GC-IMS 技术分析加工关键单元对 NFC 比谢克幸甜瓜汁风味的影响[J]. 现代食品科技, 2021, 37(10): 220-229.
WU Dongxin, MENG Xintao, MA Yan, et al. Effects of key processing units on the flavor of NFC bisekxing melon juice based on GC-IMS analysis[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(10): 220-229.

- [11] 关小莺, 温靖, 徐玉娟, 等. HS-SPME-GC-MS 联用技术分析南高丛蓝莓浊汁酶解前后挥发性成分[J]. 热带作物学报, 2017, 38(9): 1752-1758.
- GUAN Xiaoying, WEN Jing, XU Yujuan, et al. Analysis of aroma components of southern high-bush blueberry juice before and after enzymatic hydrolysis using HS-SPME-GC-MS[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(9): 1752-1758.
- [12] 刘原野, 蔡文超, 张琴, 等. 乳酸菌对沙棘汁中酚酸及挥发性化合物的变化研究[J]. 食品与发酵工业, 2021: 1-9.
- LIU Yuanye, CAI Wenchao, ZHANG Qin, et al. Changes of phenolic acids and volatile compounds in sea buckthorn juice by lactic acid bacteria[J]. Food and Fermentation Industries, 2021: 1-9.
- [13] 洪雪珍. 基于电子鼻和电子舌的樱桃番茄汁品质检测方法研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2014.
- HONG Xuezheng. Study of quality detection approaches for cherry tomato juices based on electronic nose and electronic tongue[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2014.
- [14] ABOSHI T, MUSYA S, SATO H, et al. Changes of volatile flavor compounds of watermelon juice by heat treatment[J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2020, 84(10): 2157-2159.
- [15] YANG F, LIU Y, WANG B, et al. Screening of the volatile compounds in fresh and thermally treated watermelon juice via headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry and comprehensive two-dimensional gas chromatography-olfactory-mass spectrometry analysis[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 137, 110478.
- [16] QIU S S, WANG J, GAO L P. Discrimination and characterization of strawberry juice based on electronic nose and tongue: comparison of different juice processing approaches by LDA, PLSR, RF, and SVM[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(27): 6426-6434.
- [17] CHENG H, CHEN Y, CHEN Y X, et al. Comparison and evaluation of aroma-active compounds for different squeezed Chinese bayberry (*Myrica rubra*) juices[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(11), e15924.
- [18] WANG K W, XU Z Z. Comparison of freshly squeezed, non-thermally and thermally processed orange juice based on traditional quality characters, untargeted metabolomics, and volatile overview[J]. Food Chemistry, 2022, 373, 131430.
- [19] GOMES A, COSTA A L R, RODRIGUES P D, et al. Sonoprocessing of freshly squeezed orange juice: Ascorbic acid content, pectin methylesterase activity, rheological properties and cloud stability[J]. Food Control, 2022, 131, 108391.
- [20] OLMEDILLA-ALONSO B, GRANADO-LORENCIO F, de ANCOS B, et al. Greater bioavailability of xanthophylls compared to carotenes from orange juice (high-pressure processed, pulsed electric field treated, low-temperature pasteurised, and freshly squeezed) in a crossover study in healthy individuals[J]. Food Chemistry, 2022, 371, 130821.
- [21] HAFIZOV S G, QURBANOV I S, HAFIZOV G K. Ensuring transparency of pomegranate juice during its storage[J]. International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials, 2021, 640(2), 022055.
- [22] BARUT GOK S. UV-C treatment of apple and grape juices by modified uv-c reactor based on Dean Vortex Technology: microbial, physicochemical and sensorial parameters evaluation[J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(6): 1055-1066.
- [23] QIU S, WANG J, GAO L. Qualification and quantisation of processed strawberry juice based on electronic nose and tongue[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(1): 115-123.
- [24] 高利萍. 基于电子鼻和电子舌的草莓鲜榨汁的检测[D]. 浙江: 浙江大学, 2012.
- GAO Liping. Evaluation for fresh juice of strawberries by electronic nose and electronic tongue[D]. Zhejiang:

Zhejiang University, 2012.

- [25] 张琴, 周丹丹, 彭菁, 等. 油桃采后结合态香气变化规律及其与可溶性糖的关联性[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 206-214.
ZHANG Qin, ZHOU Dandan, PENG Jing, et al. Changes of bound aroma compounds and their relationship between soluble sugars in nectarines during postharvest storage[J]. Food Science, 2021, 42(6): 206-214.
- [26] 付勋, 张海彬, 聂青玉, 等. 猕猴桃品质指标差异分析及 GC-IMS 分析果汁中挥发性物质[J]. 食品科学, 2021, 1-13.
FU Xun, ZHANG Haibin, NIE Qingyu, et al. Difference analysis of quality indexes of different varieties of kiwifruit and analysis of volatile components in juice by GC-IMS[J]. Food Science, 2021, 1-13.
- [27] LIU Q, SUN K, ZHAO N, et al. Information fusion of hyperspectral imaging and electronic nose for evaluation of fungal contamination in strawberries during decay[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 153: 152-160.
- [28] AZODANLOU R, DARBELLAY C, LUISIER J, et al. Changes in flavour and texture during the ripening of strawberries[J]. European Food Research and Technology, 2004, 218(2): 167-172.
- [29] LOUTFI A, CORADESCHI S, MANI G K, et al. Electronic noses for food quality: A review[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 144: 103-111.
- [30] INFANTE R, FARCUH M, MENESES C. Monitoring the sensorial quality and aroma through an electronic nose in peaches during cold storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2008, 88(12): 2073-2078.
- [31] PELAYO C, EBELER S, KADER A. Postharvest life and flavor quality of three strawberry cultivars kept at 5 degrees C in air or air+20 kPa CO₂[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 27(2): 171-183.
- [32] 王娟, 孙瑞, 王桂霞, 等. 8 个草莓品种(系)果实特征香气成分比较分析[J]. 果树学报, 2018, 35(8): 967-976.
WANG Juan, SUN Rui, WANG Guixia, et al. A comparative analysis on fruit characteristic aroma compounds in eight strawberry varieties (strains) [J]. Journal of Fruit Science, 2018, 35(8): 967-976.
- [33] 赵娜, 郭小鹏, 王丽娟. 6 个草莓品种果实香气成分分析[J]. 河北农业大学学报, 2021, 44(1): 57-66.
ZHAO Na, GUO Xiaou, WANG Lijuan. Analysis of fruit aroma components of 6 strawberry varieties[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2021, 44(1): 57-66.
- [34] 付磊, 冒德寿, 洪彦, 等. 不同品种草莓的特征香气成分[J]. 食品工业, 2021, 42(1): 202-205.
FU Lei, MAO De Shou, HONG Liu, et al. Characteristic aroma compounds of different varieties of strawberry[J]. Food Industry, 2021, 42(1): 202-205.
- [35] MOHD ALI M, HASHIM N, ABD AZIZ S, et al. Principles and recent advances in electronic nose for quality inspection of agricultural and food products[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 99: 1-10.
- [36] 罗杨, 冯涛, 王凯, 等. 基于 GC-IMS 分析不同成熟度百香果挥发性有机物的差异[J/OL]. 食品工业科技, 2022:14. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021120148>
LUO Yang, FENG Tao, WANG Kai, et al. Analysis of difference volatile organic compounds in passion fruit with different maturity via GC-IMS[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 2022:14. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021120148>
- [37] SCHEIBERLE P, HOFMANN T. Evaluation of the character impact odorants in fresh strawberry juice by quantitative measurements and sensory studies on model mixtures[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(1): 227-232.
- [38] da SILVA M, das NEVES H. Complementary use of hyphenated purge-and-trap gas chromatography techniques and sensory analysis in the aroma profiling of strawberries (*Fragaria ananassa*)[J]. Journal of

Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(11): 4568-4573.

中国知网