

基于GC-MS、GC-O和电子鼻技术评价 百香果酒香气特征

程宏桢, 蔡志鹏, 王 静, 沈勇根*, 卢剑青, 李晓明, 刘馥源, 徐 弦, 安兆祥

(江西农业大学食品科学与工程学院, 江西省发展与改革委员会农产品加工与安全控制工程实验室, 江西 南昌 330045)

摘 要: 分别以紫皮百香果全果和果汁为原料发酵百香果酒, 通过感官评价, 利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱和气相色谱-嗅闻方法, 结合电子鼻技术, 评价百香果原果汁及其发酵后的果汁酒和全果酒中的香气特征。结果表明: 原果汁、果汁酒和全果酒共鉴定出78种香气成分, 包括21种醇类、21种酯类、10种萜烯类、7种酮类、4种醛类、3种醚酸类和12种其他类物质; 气相色谱-嗅闻结合香气强度法共鉴定出27种特征香气成分, 包括12种醇类、7种酯类、4种萜烯类、2种酮类、1种酸类和1种醛类物质, 原果汁、果汁酒和全果酒三者香气强度差异显著 ($P < 0.05$); 气味活性值大于1的特征香气成分分别有15、18种和19种, 芳樟醇、 β -紫罗酮和己酸乙酯是对三者贡献最大的特征香气成分; 主成分分析显示三者差异区分明显, 线性判别分析显示果汁酒和全果酒在风味上有重叠, 但两者与原果汁间区别较大。

关键词: 百香果; 原果汁; 果汁酒; 全果酒; 香气特征

Combined Use of GC-MS, GC-O and Electronic Nose Technology to Evaluate the Aroma Characteristics of Passion Fruit Wine

CHENG Hongzhen, CAI Zhipeng, WANG Jing, SHEN Yonggen*, LU Jianqing, LI Xiaoming, LIU Fuyuan, XU Xian, AN Zhaoxiang
(Laboratory for Agro-processing and Safety Control Engineering, Jiangxi Development and Reform Commission,
College of Food Science and Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: The aroma characteristics of wines made from whole passion fruits and its juice were evaluated by using headspace solid-phase microextraction coupled to gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), gas chromatography-olfactometry (GC-O) and electronic nose technology. The results showed that a total of 78 aroma components, including 21 alcohols, 21 esters, 10 terpenes, 7 ketones, 4 aldehydes, 3 ether acids and 12 other substances, were identified in passion fruit juice and the two wines; a total of 27 characteristic aroma components were identified by GC-O combined with aroma intensity method, including 12 alcohols, 7 esters, 4 terpenes, 2 ketones, 1 acid and 1 aldehyde. There were significant differences in aroma intensity among the three samples ($P < 0.05$). In total, 15, 18 and 19 aroma components with odor-activity value (OAV) greater than 1 were found in the juice and wines made from passion fruit juice and whole fruits, respectively. Linalool, β -violone and ethyl hexanoate were the most important aroma components. Principal component analysis (PCA) showed clear discrimination among the three samples. Linear discriminant analysis (LDA) showed that there were overlaps in flavor between the wines, but they were distinct from the juice.

Keyword: passion fruit; fruit juice; fruit wine; whole fruit wine; aroma characteristics

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200319-286

中图分类号: TS202.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2021) 06-0256-09

引文格式:

程宏桢, 蔡志鹏, 王静, 等. 基于GC-MS、GC-O和电子鼻技术评价百香果酒香气特征[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 256-264. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200319-286. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2020-03-19

基金项目: 江西省现代农业产业技术体系(柑橘)建设专项(JXARS-07)

第一作者简介: 程宏桢(1996—)(ORCID: 0000-0001-7439-109X), 男, 硕士研究生, 研究方向为果蔬贮藏与加工。

E-mail: chizzy0909@163.com

*通信作者简介: 沈勇根(1971—)(ORCID: 0000-0001-6979-2075), 男, 教授, 硕士, 研究方向为果蔬贮藏与加工。

E-mail: 137898404@qq.com

CHENG Hongzhen, CAI Zhipeng, WANG Jing, et al. Combined use of GC-MS, GC-O and electronic nose technology to evaluate the aroma characteristics of passion fruit wine[J]. Food Science, 2021, 42(6): 256-264. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx.1002-6630-20200319-286. <http://www.spkx.net.cn>

百香果 (*Passiflora caerulea* L.), 别名西番莲, 西番莲科西番莲属草质藤本植物, 原产于南美洲, 广植于我国广西、云南和福建等地^[1]。成熟的紫种百香果果皮中富含花色苷^[2], 果汁色泽金黄、香气馥郁、酸甜可口, 富含多酚、类胡萝卜素、VC等活性成分^[3], 有“果汁之王”的美称^[4], 具有抗氧化^[5]、抗炎^[6]、降血压^[7]、镇静止痛^[8]等功效。

香气是评价果酒品质的重要指标, 也决定了消费者的接受程度和偏好^[9]。百香果果汁酒发酵液为等量的原果汁和无菌水, 全果酒则将无菌水替代为果皮浆, 因发酵液的不同, 需对2种果酒的挥发性物质进行全面分析, 以明晰发酵前后及两者间香气组分的差异。顶空固相微萃取-气相色谱-质谱 (headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 联用技术、气相色谱-嗅闻 (gas chromatography-olfactometry, GC-O) 联用技术是研究食品中挥发性成分的主要方法^[10]。刘晓静等^[11]采用GC-MS技术从百香果酒中鉴定出10种香气成分, 判定醇类物质为主要成分。侯丽娟等^[12]采用HS-SPME-GC-MS及GC-O技术检测红白兰地酒中主体香气成分。Niu Yunwei等^[13]通过GC-O和GC-MS研究了5种中国樱桃酒的酯类香气特征, 鉴定出24种酯类物质。郑淑丹等^[14]采用HS-SPME-GC-MS技术在脐橙全果酒和果汁酒中分别检出25种和11种挥发性香气物质, 全果酒和果汁酒的香气成分主要分别为萜烯类和醇类。电子鼻技术因响应时间短、重复性好等优点, 目前已广泛用于水产品^[15]、禽畜肉^[16]和发酵食品^[17]等的快速检验, 尤其关于GC-MS、GC-O与电子鼻相结合评价食品香气特征的研究报道与日俱增^[18-20]。然而, 目前鲜见利用电子鼻技术分析百香果酒香气的报道。

目前国内外对百香果酒的研究局限于酿造工艺和抗氧化性能^[21-22], 鲜见有关果汁酒和全果酒香气特征的系统检测分析及其与原果汁间差异比较的相关报道。本实验使用感官评价描述原果汁、果汁酒和全果酒香气属性, 通过HS-SPME-GC-MS鉴定3种样品挥发性物质, 利用GC-O分析发酵前后特征香气成分和香气轮廓, 以气味活度值 (odor activity value, OAV) 评判香气贡献大小, 结合电子鼻技术, 通过主成分分析 (principal components analysis, PCA) 和线性判别分析 (linear discriminant analysis, LDA) 研究3种样品的风味差异, 以期为百香果的深加工和百香果酒的品质提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

“紫香一号”百香果: 采自广西崇左某农户果园, 于-80℃冰箱超低温保藏。

果胶酶 (酶活力4 000 U/g)、纤维素酶 (酶活力10 000 U/g)、焦亚硫酸钾、小苏打、白砂糖、壳聚糖 (均为食品级添加剂) 宁夏和氏璧生物技术有限公司; 葡萄酒活性干酵母RV171 安琪酵母股份有限公司; 环己酮 (色谱纯、纯度≥99.7%)、乙醇 (色谱纯、纯度≥99.8%)、C₆~C₃₀正构烷烃标准溶液 美国Sigma-Aldrich公司。

1.2 仪器与设备

BSA124S电子天平 赛多利斯科学仪器 (北京) 有限公司; JYL-C012料理机 九阳股份有限公司; pH-3E实验室pH计 上海佑科仪器仪表有限公司; SHP-250智能生化培养箱 上海鸿都电子科技有限公司; HH-4水浴锅 常州国华电器有限公司; 57330-U SPME手柄、57330-U三相DVB/CAR/PDMS萃取头 美国Supelco公司; 7890B-5977B GC-MS联用仪、DB-5MS毛细管色谱柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μm) 美国Agilent公司; OP275嗅觉端口 日本GL Sciences公司; PEN3型便携式电子鼻传感器 德国Airsense公司。

1.3 方法

1.3.1 百香果酒酿造工艺

工艺流程^[23]: 百香果→预处理→破碎打浆→调节pH值→酶解→加硫→接种酵母→主发酵→倒罐→陈酿→澄清→精滤→脱气→灭菌→灌装。

操作要点^[23]: 选取无病害、新鲜成熟、表皮完好的百香果; 全果打浆不易操作, 先取出百香果果肉, 用200目滤网过滤去籽, 收集百香果原果汁; 将百香果皮切成1~2 cm²的小块, 用料理机打浆; 用小苏打调节百香果汁pH值为3.5左右; 原果汁中添加0.08%果胶酶和0.08%纤维素酶, 果皮浆中添加0.15%果胶酶和0.15%纤维素酶, 于40℃水浴4 h进行酶解; 添加100 mg/L焦亚硫酸钾; 酵母于37℃水浴活化25 min; 考虑成本因素, 按料液比1:1填料, 全果酒发酵液为原汁加果皮浆, 果汁酒发酵液为原汁加无菌水, 接种0.04%活化后的酵母, 初始糖度调整为18.6%, 放入恒温培养箱中29℃主发酵6 d; 倒罐后于4℃冷库后发酵1个月; 添加0.08%壳聚糖澄清酒液, 先后过1、0.5 μm和0.22 μm滤膜精滤, 使酒液达到最佳的感官品质。

1.3.2 香气感官评价

参照张婷等^[24]方法, 感官评价小组由10位成员(4男6女)组成, 首先每个成员尽可能多的对百香果酒及果汁香气属性进行描述, 经整理后与文献报道的香气特征进行对比, 最终讨论确定花香、果香、甜香、酸香、青草香和柑橘香为百香果酒及果汁香气属性的评价指标。在此基础上, 对确定的6个香气特征建立准确的评价标准, 确保感官评定的准确性。感官评分采用10分制, 0分表示无香气强度, 5分表示香气强度中等, 9分表示香气强度极强。嗅闻品评3次, 前后嗅闻时间间隔10 min。

1.3.3 HS-SPME条件

参照Kang等^[25]的方法, 准确吸取6 mL百香果酒及果汁样品于15 mL顶空萃取瓶中, 加入5 μ L的10 μ g/mL环己酮溶液(配制方法: 10 μ L环己酮经无水乙醇稀释1 000倍后充分混匀)作为内标物, 将老化后的DVB/CAR/PDMS萃取头插入萃取瓶, 推出纤维头置于样液上方2 cm处, 于40 $^{\circ}$ C吸附30 min, 随后迅速将吸附后的萃取头取出并插入GC进样口, 250 $^{\circ}$ C解吸5 min, 同时启动仪器采集数据。

1.3.4 GC-MS条件

GC条件^[26]: 采用DB-5MS毛细管色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m)对百香果酒及果汁样品进行分析, 采用不分流模式, 进样口温度250 $^{\circ}$ C, 载气为氮气, 载气流速1.5 mL/min; 升温程序: 初始温度35 $^{\circ}$ C, 保持时间5 min后, 以4 $^{\circ}$ C/min速率升至最终温度250 $^{\circ}$ C。

MS条件^[26]: 采用全扫描模式; 电子电离源; 发射电流10 μ A; 电子能70 eV; 接口温度280 $^{\circ}$ C; 离子源温度200 $^{\circ}$ C; 四极杆温度150 $^{\circ}$ C; 质量扫描范围40~600 u。

定性: 通过质谱与标准信息库NIST16进行检索对比, 并对C₆~C₃₀正构烷烃混合标样进行色谱扫描, 计算香气成分的保留指数, 并与相应文献值进行对照。保留指数按式(1)计算:

$$\text{保留指数} = 100Z + \frac{100 \times (t_{Rn} - t_{RN})}{t_{R(N+1)} - t_{RN}} \quad (1)$$

式中: N 为目标香气物质左侧正构烷烃的C原子数; n 为目标香气物质右侧正构烷烃的C原子数的差值; t_{Rn} 、 t_{RN} 、 $t_{R(N+1)}$ 分别为待测香气物质、待测香气物质左侧和右侧正构烷烃的保留时间/min。

定量^[26]: 采用半定量法, 选取环己酮为内标物, 对百香果酒和果汁样品中各香气成分进行定量, 每组重复3次, 取平均值。质量浓度 C_i 按式(2)计算:

$$C_i = \frac{C_0}{A_0} \times A_i \quad (2)$$

式中: C_0 为内标溶液质量浓度/(μ g/mL); A_0 为内标物峰面积; A_i 为香气成分峰面积。

1.3.5 GC-O方法

GC条件: 样品经SPME和GC-MS分离后, 流出物以1:1的分流比分别进入质谱检测器和嗅闻装置进行检测。嗅闻仪传输线温度250 $^{\circ}$ C, 载气为加湿氮气, 恒定流速60 mL/min。色谱条件同1.3.3节。

OSME条件: 选取4位嗅觉较灵敏且有一定经验的研究人员组成感官评定小组, 嗅闻同一风味出峰点, 对香味进行感官描述并记录香气出峰时间和香气强度。实验采取5分制, 1分表示香气极弱, 2分表示香气较弱, 3分表示香气明显, 4分表示香气较强, 5分表示香气极强。同一出峰位置至少要有2位嗅闻员记录到相同的感官描述, 香气强度取4位嗅闻员记录的平均值。

OAV法: 查阅挥发性成分在水中的阈值, 根据每种香气成分的质量浓度与阈值的比值计算其OAV, 以此评价该香气成分对样品整体风味的贡献程度^[27]。其中, $OAV \geq 1$ 的物质为特征香气成分。OAV按式(3)计算:

$$OAV = \frac{C_i}{OT_i} \quad (3)$$

式中: C_i 为香气成分的质量浓度/(μ g/mL); OT_i 为香气成分在水中的阈值/(mg/L)。

1.3.6 电子鼻条件

PEN3型电子鼻由10种金属氧化物气体传感器阵列组成。准确吸取10 mL百香果酒和果汁样品于30 mL样品瓶, 室温密封静置15 min, 随后插入电子鼻探头吸取顶端气体, 测定香气物质。电子鼻参数: 采样间隔1 s, 冲洗时间60 s, 调零时间10 s, 预采样时间5 s, 检测时间100 s, 载气流速250 mL/min, 进样流速250 mL/min。检测时传感器于80 s后趋于稳定, 选取81 s为信号采集时间, 每种样品均重复测定6次。

1.4 数据处理

采用SPSS 25软件对实验数据进行显著性分析, 采用Origin 2018软件进行绘图, 运用Winmuster软件进行PCA和LDA。

2 结果与分析

2.1 百香果酒发酵前后感官评价分析

由图1可知, “花香”属性中果汁酒香气强度最大, 原果汁次之, 全果酒最小; “果香”属性中原果汁香气强度最大, 其次是全果酒, 最后是原果汁; “甜香”属性中三者较接近, 均在3.3左右, 香气强度大小分别为全果酒、果汁酒和原果汁; “酸香”属性中原果汁香气强度最大, 果汁酒和全果酒差距不大但均小于原果汁; “青草香”属性中全果酒香气强度最大, 其次是果汁酒, 原果汁最小; “柑橘香”属性中香气强度大小分别为原果汁、全果酒和果汁酒。综上所述, 原果汁中“果

香”、“酸香”和“柑橘香”属性强度最大,果汁酒中“花香”属性强度最大,全果酒中“青草香”和“甜香”属性强度最大。

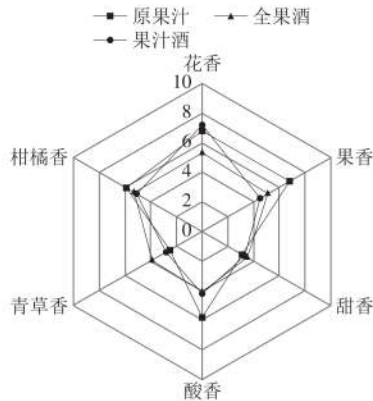


图1 百香果酒发酵前后香气剖面雷达图

Fig.1 Radar map of aroma profiles of passion fruit juice and wine

2.2 百香果酒发酵前后香气成分比较分析

香气成分是评价果酒品质特性必不可少的指标。果酒中大部分醇类、酯类和醛类等香气成分通过酵母厌氧代谢产生,这些香气成分通过富集,相互协调,赋予了果酒馥郁、独特的风味。对原果汁、果汁酒和全果酒样品的挥发性物质进行GC-MS分析,其中相对含量为色谱图中该物质峰面积占总峰面积的百分比,结果见表1。

表1 百香果酒发酵前后挥发性物质HS-SPME-GC-MS鉴定结果
Table 1 Identification of volatile substances in passion fruit wine and juice

编号	保留 指数	挥发性成分	相对含量/%			鉴定 方法
			原果汁	果汁酒	全果酒	
醇类						
1	442	乙醇	0.88±0.02 ^a	25.47±0.31 ^b	27.81±0.2 ^a	RI, MS
2	630	异丁醇	ND	4.35±0.22 ^a	2.68±0.13 ^a	RI, MS
3	727	异戊醇	ND	15.83±0.46 ^b	16.77±0.61 ^a	RI, MS
4	774	二甲硅烷二-醇	1.43±0.04 ^a	2.18±0.02 ^a	ND	RI, MS
5	851	正己醇	1.94±0.06 ^a	0.42±0.01 ^a	0.43±0.01 ^a	RI, MS
6	854	反式-3-己烯醇	0.5±0.02 ^a	ND	ND	RI, MS
7	863	顺-3-己烯-1-醇	ND	0.08±0.01 ^a	0.1±0 ^a	RI, MS
8	925	2-庚醇	3.29±0.02 ^a	0.55±0.01 ^a	0.54±0.02 ^a	RI, MS
9	954	乙酸-4-己烯醇	1.97±0.01 ^a	ND	ND	RI, MS
10	1039	苯甲醇	ND	0.12±0.01 ^a	1.36±0.03 ^a	RI, MS
11	1072	1-辛醇	ND	0.40±0.02 ^a	0.46±0.02 ^a	RI, MS
12	1100	芳樟醇	25.13±0.59 ^a	2.94±0.05 ^a	4.01±0.10 ^a	RI, MS
13	1119	β -苯乙醇	ND	7.20±0.29 ^a	5.92±0.30 ^a	RI, MS
14	1186	4-萜烯醇	0.6±0.02 ^a	0.14±0.02 ^a	0.16±0.02 ^a	RI, MS
15	1195	萜品醇	12.51±0.16 ^a	1.59±0.15 ^a	1.63±0.04 ^a	RI, MS
16	1234	香茅醇	ND	0.79±0.04 ^a	0.83±0.03 ^a	RI, MS
18	1235	2,3-丁二醇	ND	0.58±0.21 ^a	0.71±0.03 ^a	RI, MS
19	1251	橙花醇	0.93±0.04 ^a	ND	ND	RI, MS
20	1264	香叶醇	1.48±0.03 ^a	ND	ND	RI, MS
21	1329	二氢- β -紫罗兰醇	ND	0.66±0.07 ^a	0.53±0.01 ^a	RI, MS
萜烯类						
1	992	β -月桂烯	1.69±0.05 ^a	ND	0.33±0 ^b	RI, MS
2	1030	右旋萜二烯	1.60±0.07 ^a	0.45±0.01 ^a	0.43±0.01 ^a	RI, MS

续表1

编号	保留指数	挥发性成分	相对含量/%			鉴定方法
			原果汁	果汁酒	全果酒	
3	1034	(+)-3-萜烯	0.13±0.01 ^a	0.09±0.01 ^a	ND	RI, MS
4	1043	顺式- β -罗勒烯	0.72±0.07 ^a	ND	0.23±0.01 ^b	RI, MS
5	1060	反式- β -罗勒烯	0.36±0.01 ^b	0.49±0.01 ^a	ND	RI, MS
6	1073	γ -松油烯	0.31±0.01 ^a	ND	ND	RI, MS
7	1090	萜品油烯	2.36±0.05 ^a	ND	0.26±0.01 ^b	RI, MS
8	1141	3-甲基-6-(1-甲基亚乙基)环己烯	0.36±0.01 ^a	ND	ND	RI, MS
9	1155	(E,Z)-2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯	0.23±0.01 ^a	ND	ND	RI, MS
10	1182	(6Z)-6-((Z)-2-丁烯基)-1,5,5-三甲基-1-环己烯	0.05±0 ^a	0.11±0 ^a	ND	RI, MS
酯类						
1	604	乙酸乙酯	3.57±0.08 ^a	ND	ND	RI, MS
2	723	丁酸-1-甲酯	0.2±0.02 ^a	ND	ND	RI, MS
3	804	丁酸乙酯	12.01±0.20 ^a	0.61±0.01 ^c	1.12±0.07 ^a	RI, MS
4	817	醋酸异丁酯	ND	ND	0.24±0.02 ^a	RI, MS
5	848	顺式-2-丁烯酸乙酯	0.65±0.02 ^a	ND	ND	RI, MS
6	875	乙酸异戊酯	ND	1.94±0.33 ^a	1.54±0.04 ^a	RI, MS
7	935	3-羟基丁酸乙酯	0.2±0.01 ^a	ND	ND	RI, MS
8	1003	己酸乙酯	7.75±0.13 ^a	3.64±0.06 ^a	4.81±0.09 ^a	RI, MS
9	1006	乙酸己酯	1.16±0.04 ^a	ND	0.15±0.01 ^b	RI, MS
10	1006	反式-丁酸-3-己烯酯	0.22±0.01 ^a	ND	ND	RI, MS
11	1041	辛酸甲酯	0.09±0 ^a	ND	ND	RI, MS
12	1052	2-己烯酸乙酯	0.5±0.02 ^a	ND	ND	RI, MS
13	1080	戊酸-2,2,4-三甲基-3-羧基丙基丁酯	ND	0.53±0.01 ^a	ND	RI, MS
14	1169	3-羟基己酸乙酯	0.82±0.02 ^a	ND	ND	RI, MS
15	1187	乙酸苯甲酯	ND	ND	0.24±0.01 ^a	RI, MS
16	1200	辛酸乙酯	ND	0.92±0.12 ^b	2.36±0.14 ^a	RI, MS
18	1260	乙酸苯乙酯	ND	0.78±0.02 ^a	ND	RI, MS
19	1292	五氟丙酸辛酯	1.48±0.08 ^a	ND	ND	RI, MS
20	1399	癸酸乙酯	ND	0.04±0 ^a	0.08±0.01 ^a	RI, MS
21	1560	2,2,4-三甲基-1,3-戊二酮双异丁酯	0.02±0.01 ^a	0.81±0.08 ^b	1.54±0.02 ^a	RI, MS
酮类						
1	755	2-戊酮	0.04±0.01 ^a	ND	ND	RI, MS
2	1185	异胡薄荷酮	0.07±0.01 ^a	ND	ND	RI, MS
3	1399	大马士酮	0.19±0.03 ^a	ND	0.15±0.01 ^b	RI, MS
4	1438	二氢- β -紫罗兰酮	0.48±0.06 ^a	0.22±0.02 ^a	0.36±0.02 ^a	RI, MS
5	1493	β -紫罗兰酮	1.44±0.06 ^a	0.85±0.10 ^a	0.99±0.03 ^a	RI, MS
6	1143	左旋樟脑	0.07±0.01 ^a	ND	ND	RI, MS
7	1425	α -紫罗兰酮	ND	0.06±0 ^a	ND	RI, MS
醛类						
1	1118	苯乙醛	ND	0.06±0 ^a	ND	RI, MS
2	1154	正壬醛	ND	0.26±0.02 ^a	ND	RI, MS
3	1207	癸醛	0.1±0.01 ^a	0.14±0.04 ^a	0.06±0.01 ^a	RI, MS
4	1348	α ,4-二甲基-3-环己烯-1-乙醛	0.54±0.01 ^a	ND	ND	RI, MS
酸酯类						
1	675	乙酸	ND	0.98±0.06 ^a	0.56±0.01 ^b	RI, MS
2	1159	左旋玫瑰醚	0.23±0.01 ^a	ND	0.08±0 ^a	RI, MS
3	1276	2-乙基己酸	ND	1.07±0.02 ^a	ND	RI, MS
其他类						
1	828	2-甲基吡嗪	0.29±0.02 ^a	ND	ND	RI, MS
2	920	甲氧基苯基酚	0.80±0.01 ^a	1.87±0.13 ^b	1.9±0.12 ^a	RI, MS
3	1042	邻伞花烃	0.78±0.04 ^a	0.09±0 ^a	0.18±0.01 ^b	RI, MS
4	1121	(2R,5R)-2-甲基-5-(丙基-1-烯-2-基)-2-乙基四氢呋喃	ND	0.45±0.01 ^a	ND	RI, MS
5	1187	1,2,3,4-四甲基-4-(1-甲基乙基)苯	ND	0.04±0 ^a	ND	RI, MS
6	1196	反式-3,5,6,8a-四氢-2,5,5,8a-四甲基-2H-1-苯并吡喃	0.75±0.01 ^a	0.44±0.01 ^b	ND	RI, MS
7	1276	2,4-二特丁基苯酚	0.08±0.02 ^a	ND	0.27±0.01 ^a	RI, MS
8	1305	1,1,5-三甲基-1,2-二氢苯	ND	0.33±0.02 ^a	0.26±0.01 ^b	RI, MS
9	1318	1,2,3,4-四氢-1,1,6-三甲基苯	0.48±0.01 ^a	0.37±0.01 ^b	ND	RI, MS
10	1417	3,4-二氢-4,4,7-三甲基-氧杂萜萜酮	0.41±0.01 ^a	0.13±0.00 ^b	0.08±0.01 ^a	RI, MS
11	1469	(2 α ,4 α ,8 α)-3,4,4a,5,6,8a-六氢-2,5,5,8a-四甲基-2H-1-苯并吡喃	ND	0.37±0.01 ^a	ND	RI, MS
12	1564	2,3-二氢-1,1,5,6-四甲基-1H-苕	ND	0.02±0 ^a	0.17±0.01 ^a	RI, MS

注: 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$); ND, 未检出。表2、3同。

由表1可知, 3种样品共鉴定出78种香气成分, 包括21种醇类、21种酯类、10种萜烯类、7种酮类、4种醛类、3种醚类和其他类物质。其中醇类物质种类最多, 包括芳樟醇、萜品醇和乙醇等; 酯类物质次之, 主要有己酸乙酯、乙酸乙酯和丁酸乙酯等; 随后是萜烯类物质, 包括 β -月桂烯、右旋萜二烯和萜品油烯等; 此外, 酮类、醛类、醚类和其他类物质也可被检测到, 但种类和相对含量较少。在发酵过程中, 醇类物质一部分由葡萄糖通过糖酵解和脱羧、脱氢产生, 另一部分由蛋白质水解生成的氨基酸通过酵母的厌氧代谢发生脱氨反应降解生成^[28]; 酯类物质主要产生于乙醇发酵的第2阶段, 由醇类和酸类经酯化生成; 萜烯类物质是一种植物中广泛存在的具有特殊气味和生理活性的重要化合物; 百香果酒中鉴定出的醛酮类物质较少, 可能是由于醛酮类是性状较活泼的中间体, 在萃取过程中容易被还原成醇类等物质^[29]。

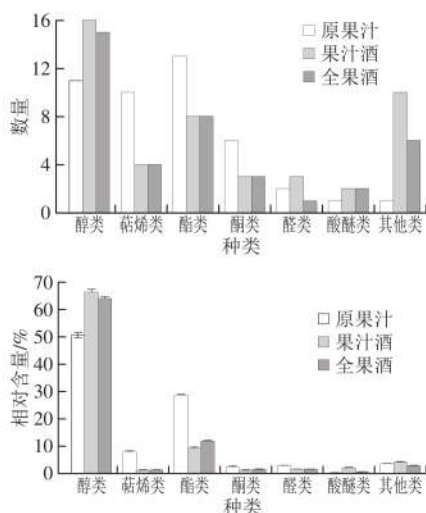


图2 百香果酒发酵前后挥发性物质的种类及相对含量

Fig. 2 Types and relative contents of volatile compounds in passion fruit wine and juice

由图2可知, 从种类数量上看, 在原果汁、果汁酒和全果酒中分别鉴定出44、46种和39种挥发性成分。3种样品中醇类和酯类物质的数量远高于其他种类, 是重要的挥发性物质。原果汁中萜烯类、酯类和酮类物质数量高于2种果酒, 2种果酒中萜烯类、酮类和醚类物质种类相同, 果汁酒中醇类、醛类和其他类物质高于全果酒。从相对含量看, 3种样品中醇类和酯类物质相对含量最大, 约占75%。果汁酒中醇类物质最多, 相对含量为66.30%, 全果酒次之, 相对含量为63.94%。原果汁中酯类、萜烯类、酮类和醛类均高于2种果酒, 相对含量分别为28.67%、7.81%、2.29%和2.93%。研究表明, GC-MS鉴定出的绝大部分挥发性物质并不会对香气的呈现起有效的贡献, 仅少部分物质能在呈现特征香气中

作出重要贡献, 赋予食品独特的香气属性^[30]。因此, 挥发性成分种类和相对含量的高低不能准确描述其对风味的贡献度大小, 还需要结合GC-O与OAV分析对3种样品的特征香气成分作进一步判断。

2.3 百香果酒发酵前后特征香气成分比较分析

表2 百香果酒发酵前后特征香气成分分析
Table 2 Identification of characteristic aroma components of passion fruit wine and juice

序号	香气成分	香气轮廓	香气强度			香气质量浓度/($\mu\text{g/mL}$)		
			原果汁	果汁酒	全果酒	原果汁	果汁酒	全果酒
1	乙酸	淡酸味	1.50 ^a	0.75 ^b	ND	32.44 $\pm$ 2.07 ^a	ND	10.99 $\pm$ 0.33 ^b
2	乙酸乙酯	酸甜味	3.50 ^a			33.89 $\pm$ 0.74 ^a	ND	ND
3	异戊醇	苹果香、辛味	2.50 ^a	1.75 ^b	ND	417.76 $\pm$ 14.60 ^a	440.63 $\pm$ 5.39 ^a	
4	丁酸乙酯	酸甜味、果香	4.50 ^a	2.00 ^b	1.25 ^c	138.38 $\pm$ 2.3 ^a	20.18 $\pm$ 0.12 ^c	23.52 $\pm$ 0.58 ^b
5	正己醇	嫩叶香、果香	2.75 ^a	1.50 ^b	1.50 ^b	18.98 $\pm$ 0.05 ^a	13.68 $\pm$ 0.10 ^b	11.01 $\pm$ 0.53 ^b
6	顺-3-己烯-1-醇	草香、茶香	1.00 ^b	2.00 ^a	ND	2.59 $\pm$ 0.13 ^b	2.35 $\pm$ 0.34 ^b	
7	2-庚醇	草药味	1.75 ^a	2.00 ^b	1.50 ^b	31.45 $\pm$ 0.04 ^a	17.96 $\pm$ 0.59 ^b	14.99 $\pm$ 0.6 ^b
8	β -月桂烯	淡香味、柑橘香	2.75 ^a		2.75 ^a	16.03 $\pm$ 0.50 ^a	ND	8.64 $\pm$ 0.30 ^b
9	己酸乙酯	果香、烘烤香	3.50 ^a	4.25 ^a	4.00 ^a	107.61 $\pm$ 1.82 ^a	121.24 $\pm$ 1.65 ^a	130.33 $\pm$ 0.7 ^a
10	乙酸己酯	果香、甜香	4.00 ^a		2.5 ^b	16.18 $\pm$ 0.55 ^a	ND	3.02 $\pm$ 0.06 ^b
11	右旋萜二烯	柠檬香、薄荷香	3.25 ^a	3.25 ^a	2.25 ^b	15.15 $\pm$ 0.62 ^a	14.57 $\pm$ 0.60 ^b	7.92 $\pm$ 0.44 ^c
12	苯甲醇	青草味	1.25 ^b	3.50 ^a	ND	3.85 $\pm$ 0.03 ^b	37.81 $\pm$ 0.87 ^a	
13	反式- β -罗勒烯	青草香	1.50 ^b	1.25 ^b		10.86 $\pm$ 0.74 ^a	7.15 $\pm$ 0.11 ^b	ND
14	正辛醇	果香、茶香		1.50 ^b	2.25 ^b	ND	12.78 $\pm$ 0.42 ^b	12.97 $\pm$ 0.4 ^b
15	萜品油烯	松木香	3.00 ^a		1.00 ^b	32.78 $\pm$ 0.68 ^a	ND	5.01 $\pm$ 0.26 ^b
16	芳樟醇	木香、果香	4.50 ^a	3.50 ^a	4.00 ^a	252.53 $\pm$ 5.95 ^a	95.27 $\pm$ 3.38 ^b	100.89 $\pm$ 2.18 ^b
17	β -苯乙醇	花香、果香	4.50 ^a	2.50 ^b	ND	227.37 $\pm$ 9.17 ^a	60.92 $\pm$ 1.75 ^b	
18	正壬醛	玫瑰花香	3.00 ^a		ND	8.51 $\pm$ 0.54 ^a	ND	
19	萜品醇	花香	4.50 ^a	4.25 ^a	4.00 ^a	6.10 $\pm$ 0.16 ^a	4.38 $\pm$ 0.55 ^b	4.96 $\pm$ 0.06 ^b
20	辛酸乙酯	果香、甜香	3.00 ^a	4.00 ^a	ND	29.77 $\pm$ 4.63 ^a	54.53 $\pm$ 5.33 ^a	
21	香茅醇	玫瑰香	1.50 ^b	1.25 ^b	ND	51.36 $\pm$ 3.82 ^a	44.69 $\pm$ 1.86 ^b	
22	橙花醇	清香、柑橘香	4.75 ^a			13.10 $\pm$ 0.34 ^a	ND	ND
23	乙酸苯乙酯	蜜香、玫瑰香		4.00 ^a		ND	25.67 $\pm$ 0.67 ^b	ND
24	香叶醇	甜酸味、果香	4.00 ^a			20.28 $\pm$ 0.59 ^a	ND	ND
25	大马士酮	茶香、果香	3.25 ^a		4.25 ^a	2.05 $\pm$ 0.86 ^b	ND	4.31 $\pm$ 0.14 ^b
26	癸酸乙酯	菠萝香、花香		4.00 ^a	4.25 ^a	ND	1.39 $\pm$ 0.01 ^b	2.39 $\pm$ 0.15 ^b
27	β -紫罗酮	果香味、茶香	3.00 ^a	3.50 ^a	4.00 ^a	19.00 $\pm$ 1.61 ^a	27.32 $\pm$ 2.61 ^b	27.73 $\pm$ 0.80 ^b

百香果汁本身香气浓郁, 经发酵后的百香果酒香气成分更为丰富多样, 这些香气成分富集于一体, 相互协调, 形成了馥郁、独特的风味。由表2可知, 原果汁、果汁酒和全果酒通过GC-O结合香气强度法共鉴定出27种特征香气成分, 包括12种醇类、7种酯类、4种萜烯类、2种酮类、1种酸类和1种醛类物质。香气强度法结果表明, 原果汁、果汁酒和全果酒三者香气强度差异显著 ($P<0.05$)。原果汁有16种特征香气成分, 香气强度大于4的成分为丁酸乙酯 (4.50)、乙酸己酯 (4.00)、芳樟醇 (4.50)、萜品醇 (4.50)、橙花醇 (4.75)、香叶醇 (4.00), 整体呈现出酸甜香、果香、花香和柑橘香, 该结果符合百香果汁特有的香气。果汁酒有20种特征香气成分, 香气强度大于4的成分为乙酸苯乙酯 (4.00)、癸酸乙酯 (4.00)、己酸乙酯 (4.25)、 β -苯乙醇 (4.5)

和萜品醇(4.25),整体具有果香、玫瑰香、蜜香和花香的香气轮廓。全果酒有21种特征香气成分,香气强度不小于4的成分为己酸乙酯(4.00)、芳樟醇(4.00)、萜品醇(4.00)、辛酸乙酯(4.00)、大马士酮(4.25)和癸酸乙酯(4.25),具有茶香、果香、菠萝香、木香和花香的香气轮廓。结合感官评价进一步分析,香气强度法鉴定得到的香气轮廓与其基本一致,说明香气强度法能准确有效地反映3种样品的具体香气轮廓。

定量分析结果表明,原果汁、果汁酒和全果酒之间含量存在显著差异($P<0.05$)。原果汁中特征香气成分总质量浓度(1 135.18 $\mu\text{g/mL}$)最高,其次是全果酒(1 009.61 $\mu\text{g/mL}$),最后是原果汁(734.37 $\mu\text{g/mL}$)。其中,原果汁、果汁酒和全果酒中均是醇类的质量浓度最高,分别为354.44 $\mu\text{g/mL}$ (占比48.26%)、843.03 $\mu\text{g/mL}$ (占比74.26%)和731.24 $\mu\text{g/mL}$ (占比72.42%);酯类物质次之,三者质量浓度分别为296.06 $\mu\text{g/mL}$ (占比40.31%)、198.25 $\mu\text{g/mL}$ (占比17.46%)、213.79 $\mu\text{g/mL}$ (占比21.18%);萜烯类物质在原果汁中最多,占比10.19%,在2种果酒中分别占比1.91%和2.14%;另外,酮类、酸类和醚类物质含量最低,在三者中占比均不超过3%。原果汁中芳樟醇(252.53 $\mu\text{g/mL}$)质量浓度最高,是最重要的呈香物质,丁酸乙酯(138.38 $\mu\text{g/mL}$)和己酸乙酯(107.61 $\mu\text{g/mL}$)次之。果汁酒中质量浓度最高的是异戊醇(417.76 $\mu\text{g/mL}$),其次是 β -苯乙醇(227.27 $\mu\text{g/mL}$)和己酸乙酯(121.24 $\mu\text{g/mL}$)。全果酒中质量浓度最高的也是异戊醇(440.63 $\mu\text{g/mL}$),其次是己酸乙酯(130.33 $\mu\text{g/mL}$)和芳樟醇(100.89 $\mu\text{g/mL}$)。

由图3可知,原果汁、果汁酒和全果酒特征香气成分差异明显,可分为原果汁以及果汁酒和全果酒两大类。根据纵向分析发现,可将特征香气成分分为I(反式- β -罗勒烯~右旋萜二烯)、II(萜品烯~乙酸乙酯)、III(大马士酮~苯甲醇)和IV(辛酸乙酯~乙酸)4个系列。I系列仅有反式- β -罗勒烯和右旋萜二烯,呈现青草香和柠檬香,原果汁最多,果汁酒次之,全果酒最少;II系列多以芳樟醇、橙花醇、香叶醇等具有酸香、果香和柑橘香的物质为主,与原果汁相比,经发酵的2种果酒这类物质损失较多;III系列为大马士酮和苯甲醇,具有茶香和草腥味,全果酒最多,可能是果皮中的此类物质溶入酒液所致;IV系列多以辛酸乙酯、己酸乙酯、乙酸苯乙酯和正壬醛等具有果香、甜香、花香和烘烤香的物质为主,辛酸乙酯、癸酸乙酯、己酸乙酯、正辛醇、 β -紫罗酮和异戊醇为全果酒最多,果汁酒次之,而乙酸苯乙酯、正壬醛、苯乙醇、乙酸、香茅醇则是果汁酒最多,全果酒次之,这体现了2种果酒因发酵不同产生了明显的香气差异,且此类物质原果汁最少,说明其均因发酵产生。

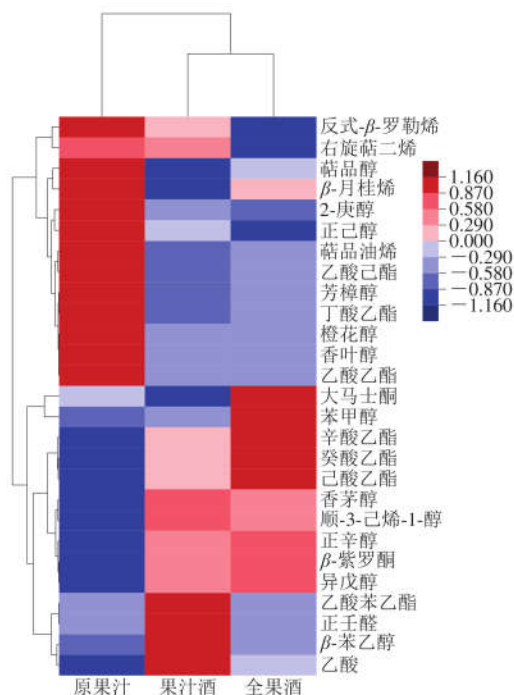


图3 百香果酒发酵前后聚类热图

Fig. 3 Cluster heat map of passion fruit wine and juice

2.4 百香果酒发酵前后特征香气成分OAV

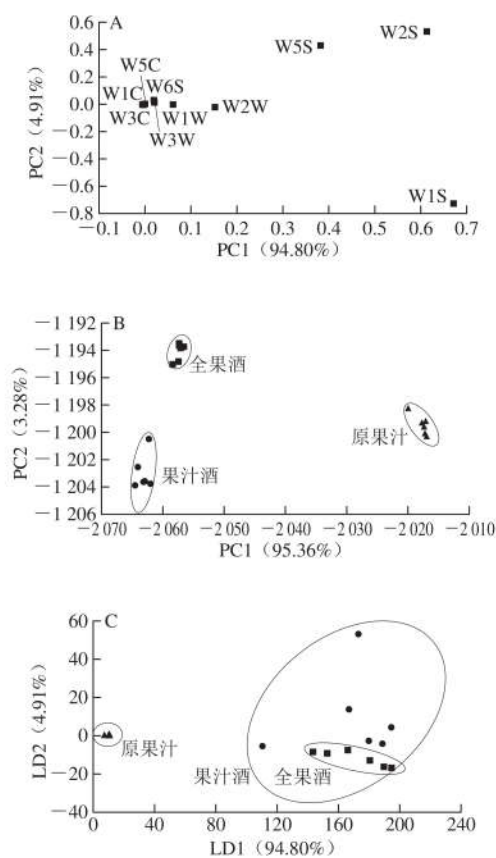
表3 百香果酒发酵前后特征香气成分的OAV分析

Table 3 OVA values of characteristic aroma components of passion fruit wine and juice

序号	香气成分	香气轮廓	阈值/ $\mu\text{g/L}$	OAV		
				原果汁	果汁酒	全果酒
1	乙酸	淡酸味	160 000 ^[31]		0.20 ^a	0.07 ^b
2	乙酸乙酯	酸甜味	32 600 ^[31]	0.99 ^a		
3	异戊醇	苹果香、辛味	179 000 ^[34]		2.33 ^b	2.46 ^c
4	丁酸乙酯	酸甜味、果香	81.5 ^[31]	1 697.91 ^c	247.61 ^b	288.59 ^a
5	正己醇	嫩叶香、果香	537 ^[31]	35.34 ^a	25.47 ^b	20.50 ^c
6	顺-3-己烯-1-醇	草香、茶香	70 ^[31]		37.00 ^c	33.57 ^b
7	2-庚醇	草药味	1 430 ^[31]	21.99 ^a	12.52 ^b	10.48 ^c
8	β -月桂烯	淡香味、柑橘香	100 ^[30]	160.30 ^c		86.40 ^b
9	己酸乙酯	果香、烘烤香	55.3 ^[31]	1 945.93 ^c	2 192.41 ^b	2 356.78 ^a
10	乙酸己酯	果香、甜香	115 ^[35]	140.70 ^c		26.26 ^b
11	右旋萜二烯	柠檬香、薄荷香	34 ^[37]	445.59 ^a	428.53 ^b	232.94 ^c
12	苯甲醇	青草腥味	320 ^[31]		12.03 ^b	118.16 ^a
13	反式- β -罗勒烯	青草香	34 ^[37]	319.41 ^a	210.29 ^b	
14	正辛醇	果香、茶香	1 100 ^[31]		11.62 ^b	11.79 ^a
15	萜品油烯	松木香	260 ^[37]	126.08 ^c		19.27 ^b
16	芳樟醇	木香、果香	16.32 ^[37]	15 473.65 ^a	5 837.62 ^c	6 181.99 ^b
17	β -苯乙醇	花香、果香	60 ^[36]		3 789.50 ^a	1 015.33 ^b
18	正壬醛	玫瑰花香	122 ^[31]		69.75 ^c	
19	萜品醇	花香	5 000 ^[36]	1.22 ^a	0.88 ^c	0.99 ^b
20	辛酸乙酯	果香、甜香	15 ^[31]		1 984.67 ^b	3 635.33 ^a
21	香茅醇	玫瑰香	100 ^[37]		513.60 ^b	446.90 ^a
22	橙花醇	清香、柑橘香	10 ^[36]	1 310.00 ^a		
23	乙酸苯乙酯	蜜香、玫瑰香	407 ^[31]		63.07 ^a	
24	香叶醇	甜酸味、果香	40 ^[37]	507.00 ^a		
25	大马士酮	茶香、果香	2 ^[37]	1 025.00 ^b		2 155.00 ^a
26	癸酸乙酯	菠萝香、花香	1 122 ^[34]		1.24 ^b	2.13 ^a
27	β -紫罗酮	果香味、茶香	7 ^[36]	2 714.29 ^c	3 902.86 ^b	3 961.43 ^a

OAV可作为评价挥发性香气成分在食品基质中贡献大小的更精准的标准^[31]。研究表明, OAV大于1的物质对该样品呈现出的整体香气有贡献^[32]。由表3可知, 原果汁、果汁酒和全果酒中OAV大于1的特征香气成分分别有15、18种和19种。原果汁中OAV最大的是芳樟醇(15 473.65), 其次是 β -紫罗酮(2 714.29)、己酸乙酯(1 945.93)、丁酸乙酯(1 697.19)和橙花醇(1 310.00), 对原果汁中酸甜香、果香、花香、柑橘香等香气轮廓的形成起到决定性作用。果汁酒中OAV最大的是芳樟醇(5 837.62), 其次是 β -紫罗酮(3 902.86)、 β -苯乙醇(3 789.50)、己酸乙酯(2 192.41)、辛酸乙酯(1 984.67), 是果汁酒中果香、甜香、花香等香气轮廓的重要组成部分。全果酒中OAV最大的是芳樟醇(6 181.99), 其次是 β -紫罗酮(3 961.43)、辛酸乙酯(3 635.33)、己酸乙酯(2 356.78)、大马士酮(2 155.00), 对全果酒中茶香、果香、花香等香气轮廓的形成起重要作用。由此可见, 芳樟醇、 β -紫罗酮和己酸乙酯是对三者贡献最大的关键香气成分。

2.5 电子鼻传感器、PCA、LDA结果



A. 荷载分析图; B. PCA图; C. LDA图。

图4 电子鼻传感器分析图

Fig. 4 PCA and LDA plots derived from electronic nose sensor data

PEN3电子鼻中的10个金属传感器能分别针对不同气体产生不同响应信号。在荷载分析图中, 各传感器的坐标可以精准地反映其对样品挥发性气味贡献率的大小, 离原点越远, 传感器对主成分的贡献越大, 反之则越小^[38]。由图4A可知, W1S、W2S、W5S和W2W贡献较大, 且与其他传感器间区别较大, 它们分别对甲烷、乙醇、氮氧化合物和芳香成分灵敏。

由图4B可知, PC1和PC2的贡献率分别为95.36%和3.28%, 总贡献率为98.64%, 大于95%, 说明原果汁、果汁酒和全果酒三者间风味相互独立, 整体区分度较好, PCA方法适用于百香果酒发酵前后挥发性成分分析。3种样品测定的数据均呈椭圆形, 说明电子鼻分析的重复性和稳定性较高。果汁酒和全果酒在PC1上较为接近, 但其与原果汁差异较大, 且三者PC2上均有较明显的差异, 说明总体上果汁酒和全果酒在风味上区分明显, 且两者与原果汁间差异较大。

由图4C可知, LD1和LD2的贡献率分别为94.80%和4.91%, 总贡献率为99.71%, 说明LDA能较好地地区别百香果酒发酵前后的挥发性风味物质。根据椭圆在图中的分布, 全果酒几乎包含于果汁酒, 说明果汁酒和全果酒挥发性成分相似性较大, 而原果汁与2种果酒不重叠, 区别明显, 说明原果汁与2种果酒的风味差异大, 相似性不高。综合LDA与PCA, 进一步验证了百香果原果汁、果汁酒和全果酒三者间香气特性的差异。因此, 可以采用电子鼻技术对原果汁、果汁酒和全果酒进行区分。

3 结论

通过GC-MS从原果汁、果汁酒和全果酒中共鉴定出78种香气成分, 包括21种醇类、21种酯类、10种萜烯类、7种酮类、4种醛类、3种醚酸类和12种其他类物质。3种样品中醇类和酯类物质的数量和相对含量均远高于其他种类, 原果汁中萜烯类、酯类和酮类物质数量高于2种果酒, 2种果酒中萜烯类、酮类和醚酸类物质种类相同, 果汁酒中醇类、醛类和其他类物质高于全果酒。3种样品中醇类和酯类物质相对含量最大的组, 果汁酒中醇类物质相对含量最多, 原果汁中酯类、萜烯类、酮类和醚酸类相对含量均高于2种果酒。

通过GC-O结合香气强度法共鉴定出27种特征香气成分, 包括12种醇类、7种酯类、4种萜烯类、2种酮类、1种酸类和1种醛类物质。香气强度法结果表明, 原果汁、果汁酒和全果酒三者香气强度差异显著($P<0.05$)。

原果汁、果汁酒和全果酒中OAV大于1的特征香气成分分别有15、18种和19种,其中芳樟醇、 β -紫罗酮和己酸乙酯是对三者贡献最大的关键香气成分。

PCA显示原果汁、果汁酒和全果酒间区分明显,LDA显示果汁酒和全果酒挥发性成分相似性较大,但原果汁与2种果酒风味差异较大。

参考文献:

- [1] 周红玲,郑云云,郑家祯,等.百香果优良品种及配套栽培技术[J].中国南方果树,2015,44(2):121-124. DOI:10.13938/j.issn.1007-1431.20140360.
- [2] SILVA L M R D, FIGUEIREDO E A T D, RICARDO N M P S, et al. Quantification of bioactive compounds in pulps and by-products of tropical fruits from Brazil[J]. Food Chemistry, 2014, 143: 398-404. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.08.001.
- [3] REIS L C R D, FACCO E M P, FLÓRES S H, et al. Stability of functional compounds and antioxidant activity of fresh and pasteurized orange passion fruit (*Passiflora caerulea*) during cold storage[J]. Food Research International, 2018, 106(4): 481-486. DOI:10.1016/j.foodres.2018.01.019.
- [4] 潘薇,刘文静,韦航,等.不同品种百香果果汁营养与香气成分的比较[J].食品科学,2019,40(22):277-286. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181218-201.
- [5] SILVA J K D, CAZARIN C B B, BATISTA N G, et al. Effects of passion fruit (*Passiflora edulis*) byproduct intake in antioxidant status of Wistar rats tissues[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(2): 1213-1219. DOI:10.1016/j.lwt.2014.06.060.
- [6] CHILAKAPATI S R, SERASANAMBATTI M, MANIKONDA P K, et al. Passion fruit peel extract attenuates bleomycin-induced pulmonary fibrosis in mice[J]. Canadian Journal of Physiology & Pharmacology, 2014, 92(8): 631-639. DOI:10.1139/cjpp-2014-0006.
- [7] LEWIS B J, HERRLINGER K A, CRAIG T A, et al. Antihypertensive effect of passion fruit peel extract and its major bioactive components following acute supplementation in spontaneously hypertensive rats[J]. Journal of Nutritional Biochemistry, 2013, 24(7): 1359-1366. DOI:10.1016/j.jnutbio.2012.11.003.
- [8] FARID R, REZAIEYAZDI Z, MIRFEIZI Z, et al. Oral intake of purple passion fruit peel extract reduces pain and stiffness and improves physical function in adult patients with knee osteoarthritis[J]. Nutrition Research, 2010, 30(9): 601-606. DOI:10.1016/j.nutres.2010.08.010.
- [9] 毛建利,李艳.黑果腺肋花楸酒与赤霞珠葡萄酒香气物质对比分析[J].食品科学,2019,40(22):270-276. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180813-128.
- [10] BARATA A, CAMPO E, MALFEITO-FERREIRA M, et al. Analytical and sensorial characterization of the aroma of wines produced with sour rotten grapes using GC-O and GC-MS: identification of key aroma compounds[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(6): 2543-2553. DOI:10.1021/jf104141f.
- [11] 刘晓静,于立梅,庄雪莹,等.百香果酒发酵工艺及香气成分分析[J].中国酿造,2017,36(12):153-157. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2017.12.032.
- [12] 侯丽娟,严超,赵欢,等.顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用-嗅闻技术分析红毛白兰地主体香气成分[J].中国食品学报,2018,18(8):232-238. DOI:10.16429/j.1009-7848.2018.08.030.
- [13] NIU Y W, WANG P P, XIAO Z B, et al. Evaluation of the perceptual interaction among ester aroma compounds in cherry wines by GC-MS, GC-O, odor threshold and sensory analysis: an insight at the molecular level[J]. Food Chemistry, 2019, 275: 143-153. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.09.102.
- [14] 郑淑丹,陈钢,阙发秀,等.脐橙全果酒发酵工艺优化及其与脐橙果汁酒风味物质的对比分析[J].食品科学,2019,40(10):171-177. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181011-090.
- [15] FAN Y, YIN L A, XUE Y, et al. Analyzing the flavor compounds in Chinese traditional fermented shrimp pastes by HS-SPME-GC/MS and electronic nose[J]. Journal of Ocean University of China, 2017, 16(2): 311-318. DOI:10.1007/s11802-017-3194-y.
- [16] MIRZAEI-GHALEH E, TAHERI-GARAVAND A, AYARI F, et al. Identification of fresh-chilled and frozen-thawed chicken meat and estimation of their shelf life using an E-nose machine coupled fuzzy KNN[J]. Food Analytical Methods, 2020, 13(3): 1-12. DOI:10.1007/s12161-019-01682-6.
- [17] YAO Y, PAN S, FAN G, et al. Evaluation of volatile profile of Sichuan dongcai, a traditional salted vegetable, by SPME-GC-MS and E-nose[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 528-535. DOI:10.1016/j.lwt.2015.06.063.
- [18] CHEN Q, SONG J, BI J, et al. Characterization of volatile profile from ten different varieties of Chinese jujubes by HS-SPME/GC-MS coupled with E-nose[J]. Food Research International, 2018, 105: 605-615. DOI:10.1016/j.foodres.2017.11.054.
- [19] HUANG X H, ZHENG X, CHEN Z H, et al. Fresh and grilled eel volatile fingerprinting by E-nose, GC-O, GC-MS and GC $\times$ GC-QTOF combined with purge and trap and solvent-assisted flavor evaporation[J]. Food Research International, 2018, 115(1): 32-43. DOI:10.1016/j.foodres.2018.07.056.
- [20] 程煥.杨梅风味特征组分鉴定及变化规律的研究[D].杭州:浙江大学,2017.
- [21] 杨玉霞,康超,段振华,等.响应面法优化百香果酒发酵工艺研究[J].食品工业科技,2018,39(8):167-72;89. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.08.030.
- [22] NZABUHERAHEZA F D, NYIRAMUGWERA A N. Golden wine produced from mixed juices of passion fruit (*Passiflora edulis*), mango (*Mangifera indica*) and pineapple (*Ananas comosus*)[J]. African Journal of Food Agriculture Nutrition & Development, 2014, 14(4): 9104-9116.
- [23] 饶炎炎,桑英,唐琳琳,等.红树莓果酒发酵过程中功效成分、香气物质及体外降血糖功效的动态变化[J].食品科学,2020,41(6):222-230. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190408-062.
- [24] 张婷,倪辉,伍菱,等.康砖茶叶风味特征及挥发性成分分析[J].食品科学,2020,41(6):215-221. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190115-179.
- [25] KANG S,朱茵,郑新强,等.不同季节绿茶香气成分的判别与聚类分析[J].食品科学,2018,39(14):268-275. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201814040.
- [26] 刘淑琴.红曲黄酒风味物质的研究[D].福州:福州大学,2011.
- [27] FENG Y Z, CAI Y, FU X, et al. Comparison of aroma-active compounds in broiler broth and native chicken broth by aroma extract dilution analysis (AEDA), odor activity value (OAV) and omission experiment[J]. Food Chemistry, 2018, 265: 274-280. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.05.043.

- [28] 王星辰, 胡凯, 陶永胜. 葡萄汁有孢汉逊酵母和酿酒酵母的混合酒精发酵动力学[J]. 食品科学, 2016, 37(3): 103-108. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201603020.
- [29] 周文杰, 张芳, 王鹏, 等. 基于GC-MS/GC-O结合化学计量学方法研究库尔勒香梨酒的特征香气成分[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 222-227. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201810034.
- [30] 董智哲. 香草兰挥发性成分鉴定及提取研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [31] LIU Y P, LI Q R, YANG W X, et al. Characterization of the potent odorants in *Zanthoxylum armatum* DC Prodr. pericarp oil by application of gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry and odor activity value[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 256-266. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.126564.
- [32] 王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. “清香”绿茶的挥发性成分及其关键香气成分分析[J]. 食品科学, 2019, 40(22): 219-228. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181229-349.
- [33] ZHAO D R, SHI D M, SUN J Y, et al. Characterization of key aroma compounds in Gujinggong Chinese Baijiu by gas chromatography-olfactometry, quantitative measurements, and sensory evaluation[J]. Food Research International, 2018, 105(3): 616-627. DOI:10.1016/j.foodres.2017.11.074.
- [34] 范文来, 徐岩. 白酒79个风味化合物嗅觉阈值测定[J]. 酿酒, 2011, 38(4): 80-84. DOI:10.3969/j.issn.1002-8110.2011.04.034.
- [35] ZHU J C, WANG L Y, XIAO Z B, et al. Characterization of the key aroma compounds in mulberry fruits by application of gas chromatography-olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and flame photometric detection (FPD)[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 775-784. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.11.112.
- [36] ZHU J C, XIAO Z B. Characterization of the key aroma compounds in peach by gas chromatography-olfactometry, quantitative measurements and sensory analysis[J]. European Food Research and Technology, 2019, 245(1): 233-243. DOI:10.1007/s00217-018-3145-x.
- [37] 刘昊澄. 不同品种荔枝特征香气组分鉴定及热加工对荔枝汁香气成分的影响研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2019.
- [38] 潘冰燕, 鲁晓翔, 张鹏, 等. GC-MS结合电子鼻分析1-MCP处理对线椒低温贮藏期挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 238-243. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201602042.