

基于 GC-IMS 技术的百香果果啤风味分析

Flavor analysis of passion beer based on GC-IMS technology

龚 霄^{1,2}陈廷慧²胡小军¹GONG Xiao^{1,2} CHEN Ting-hui² HU Xiao-jun¹范威威^{2,3}李亚军⁴赵新强⁴FAN Wei-wei^{2,3} LI Ya-jun⁴ ZHAO Xin-qiang⁴

(1. 岭南师范学院食品科学与工程学院, 广东 湛江 524048; 2. 中国热带农业科学院农产品加工研究所
农业农村部热带作物产品加工重点实验室, 广东 湛江 524001; 3. 华中农业大学食品科技学院,
湖北 武汉 430070; 4. 宁夏西班酒庄, 宁夏 银川 751605)

(1. College of Food Science and Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong 524048, China; 2. Key Laboratory of Tropical Crop Products Processing of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Agricultural Products Processing Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524001, China; 3. School of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China; 4. Ningxia Xiban Estate, Yinchuan, Ningxia 751605, China)

摘要:目的: 充分开发利用百香果资源。方法: 在传统淡色啤酒生产工艺的基础上, 添加百香果果汁酿造百香果果啤, 采用 GC-IMS 技术对酿造过程中不同阶段的挥发性风味物质进行分析。结果: 百香果果啤中共鉴定出 63 种风味物质, 包括酯 26 种、醇 10 种、醛 9 种、酮 7 种、烷烃 6 种、酸 2 种、呋喃 2 种和醚 1 种。采用主成分分析 (PCA) 发现, 前两种主成分 PC1 和 PC2 累计差异贡献率为 81.2%, 说明百香果果啤酿造过程中挥发性风味物质发生了显著变化。采用正交偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA) 筛选出 VIP 值 > 1 的差异代谢物、结合相对气味活度值 (ROAV 值 ≥ 1), 初步确定对百香果果啤香气具有主要贡献作用的风味物质有乙酸己酯 (苹果、樱桃味)、乙酸异戊酯 (香蕉香味)、丁酸乙酯 (香蕉、菠萝香味)、1-戊烯-3-酮、乙酸异丁酯 (花香)、3-甲基丁醛 (杏仁香味)、3-甲基丁酸乙酯 (苹果香味) 和二甲基硫醚 (海鲜风味)。结论: 百香果果啤营养丰富、香气独特, 具有广阔的市场前景。

关键词: 百香果; 果啤; 风味物质; 主成分分析; 正交偏最小二乘判别

Abstract: Objective: This study aimed to fully develop and utilize the resources of passion fruits. **Methods:** The volatile flavor compounds at different brewing stages were analyzed by GC-IMS technology. **Results:** A total of 63 kinds of flavor compounds were identified, including 26 kinds of esters, 10 kinds of alcohols, 9 kinds of aldehydes, 7 kinds of ketones, 6 kinds of alkanes, 2 kinds of acids, 2 kinds of furans and 1 kinds of ether. Principal components analysis (PCA) showed that the cumulative difference contribution rate of the first two principal components (PC1 and PC2) was 81.2%, indicating that the volatile flavor substances changed significantly during the brewing process. The differential metabolites with VIP > 1 obtained by orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) combined with the relative odor activity value (ROAV ≥ 1) suggested that the critical flavor substances contributing to the aroma of passion beer included hexyl acetate (apple, cherry flavor), isoamyl acetate (banana flavor), ethyl butyrate (banana, pineapple flavor), 1-penten-3-one, acetic acid isobutyl ester (floral), 3-methylbutyraldehyde (almond), ethyl 3-methylbutyrate (apple flavor) and dimethyl sulfide (seafood flavor). **Conclusion:** Passion beer is rich in nutrition and with unique flavor, and has broad prospects for future market.

Keywords: passion; fruit beer; flavor substances; principal component analysis (PCA); orthogonal partial least square discriminant analysis (OPLS-DA)

基金项目: 海南省自然科学基金项目 (编号: 321MS079); (广东省) 珍稀水果产业技术体系创新团队项目 (编号: 2021KJ116)

作者简介: 龚霄, 男, 中国热带农业科学院农产品加工研究所研究员, 博士。

通信作者: 胡小军 (1977—), 男, 岭南师范学院副教授, 硕士。

E-mail: yan2001j@126.com

收稿日期: 2022-06-23 **改回日期:** 2022-09-26

果酿啤酒, 又称为果啤, 为精酿啤酒的一个重要品

类,是在淡色啤酒酿造过程中添加果汁或可食性部分酿造而成的一种特殊啤酒^[1]。果酿型啤酒既保留了啤酒自身的营养物质,如碳水化合物、氨基酸、维生素等,又融合了果汁中丰富的维生素、矿物质及生物活性物质等,无论是在风味上还是在口感上都较传统啤酒优越^[2]。挥发性化合物是影响果啤风味的关键物质,主要包括酯类、醇类、酸类、醛类、酮类和烷烃等^[3],具有含量低、易挥发和不易萃取的特点^[4-5]。气相色谱—离子迁移谱(GC-IMS)是近年来兴起的一项用于分析食品风味的新技术,将 GC 的高效分离优势与 IMS 的快速响应等特点相结合,能够有效提高检测的准确度^[6],具有操作简单、检测时间短、挥发性化合物损失少等优点,近几年被广泛应用于酒类分析中^[7]。Yang 等^[8]利用该技术对不同果啤中的挥发性风味物质进行分析,筛选出不同果啤产品中的特征性风味化合物。但 GC-IMS 技术在百香果果啤风味分析中的应用还未见报道。

研究拟采用 GC-IMS 技术对百香果果啤酿造过程中的风味物质进行测定,结合多元统计分析初步确定百香果果啤中的关键风味物质,为百香果果啤的标准化生产和产品质量标准制定提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

皮尔森麦芽:威海德科生物科技有限公司;

青岛大花啤酒花:甘肃天马酒花股份有限公司;

西楚啤酒花:山东博朗生物科技有限公司;

艾尔啤酒酵母 S-04、US-05、S-33:济南鲁丰啤酒有限公司;

啤酒酵母 CS31 和 CN36:安琪酵母股份有限公司;

百香果原汁:糖度 14.3 °Brix, pH 2.93, 生产日期 20210721,广西果朝食品有限公司;

C₄~C₉ 正构酮:98%,国药集团化学试剂有限公司;

4-甲基-2-戊醇:98.5%,德国 Dr. Ehrenstorfer 公司。

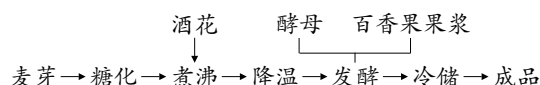
1.1.2 主要仪器设备

气相色谱—离子迁移谱:FlavourSpec® 型,德国 GAS 公司;

MXT-WAX 色谱柱:30 m×0.53 mm, 1.0 μm, 北京瑞斯特科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 工艺流程



1.2.2 GC-IMS 分析 将百香果果啤样品轻轻打开,在酒体中部快速吸取 2 mL 并转移至 20 mL 顶空进样瓶中,半密封状态,4 °C 超声水浴(28 kHz)脱气 30 s,1 g 样品中加入内标 4-甲基-2-戊醇 10 μL。顶空进样体积 100 μL;孵

育时间 10 min;孵育温度 60 °C;进样针温度 65 °C;孵化转速 500 r/min;载气为高纯度氮气(≥99.999%);清洗时间 0.5 min。GC 条件:柱温 60 °C;高纯度氮气(≥99.999%);载气流速程序:初始 2.0 mL/min,保持 2 min,8 min 内线性增至 100 mL/min,10 min 内线性增至 150 mL/min,运行时间 20 min;IMS 条件:漂移管长度 98 mm;管内线性电压 500 V/cm;漂移管温度 45 °C;漂移气为高纯度氮气(≥99.999%);漂移气流速 150 mL/min;放射源为 β 射线(氚, ³H);正离子模式。

1.2.3 定性定量 通过比较 GC-IMS 图书馆搜索软件中标准的 RI 和漂移时间(DT)进行挥发性化合物的定性分析;采用 4-甲基-2-戊醇为内标^[9],根据挥发性化合物的出峰面积与内标峰面积的比值,按式(1)计算其含量。

$$C_i = \frac{A_i \times C_{\text{std}} \times V_{\text{std}} \times \rho}{A_{\text{std}} \times m} \quad (1)$$

式中:

C_i ——挥发性成分含量,μg/kg;

A_i ——各物质峰面积;

A_{std} ——内标物峰面积;

C_{std} ——内标物质量浓度,mg/mL;

V_{std} ——内标物体积,mL;

ρ ——内标物密度,g/mL;

m ——加入样品质量,g。

1.2.4 数据处理 采用 Excel 2010 和 SPSS 16.0 软件进行数据分析,每组样品重复 3 次,结果以平均数±标准偏差表示($P < 0.05$)。通过 Simca 14.1 对香气物质进行主成分分析(PCA)和正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)。

2 结果与分析

2.1 百香果果啤酿造阶段挥发性物质分析

由图 1 和表 1 可知,不同酿造阶段的百香果果啤中共鉴定出 63 种挥发性有机物(同一化合物单体与二聚体视为一种),其中酯类 26 种,醇类 10 种,醛类 9 种,酸类 2 种,酮类 7 种,烷烃类 6 种,呋喃类 2 种和醚类 1 种。挥发性酯对啤酒风味的影响最为显著,其组成、气味阈值和相互作用对酒体整体的风味感知具有重要影响^[10]。除(Z)-3-己烯基己酸酯和癸酸乙酯外,麦汁中其他酯类含量均低于其他酿造阶段。酯类物质大都在发酵过程中产生,且百香果果汁的添加可以促进酯的积累。己酸乙酯(甜香、香蕉、青苹果香味)、乙酸异戊酯(香蕉、梨、苹果香味)、丁酸乙酯(香蕉、菠萝、草莓香味)、乙酸异丁酯(花香)、丙酸乙酯(苹果香味)、乙酸乙酯(菠萝香味)和乙酸丙酯(梨香味)等在百香果果啤中含量较为丰富。

挥发性酸是造成 pH 值变化的主要因素,并呈现出典型的醋味和过熟水果味^[11]。百香果果啤中测定出两种主要挥发酸(乙酸和丙酸),发酵过程中乙酸质量分数显著增加,在初始麦汁中含量为(404.14±21.03) μg/kg,发酵前期含量增加至(1 218.14±62.81) μg/kg,约是麦汁中的 3 倍。

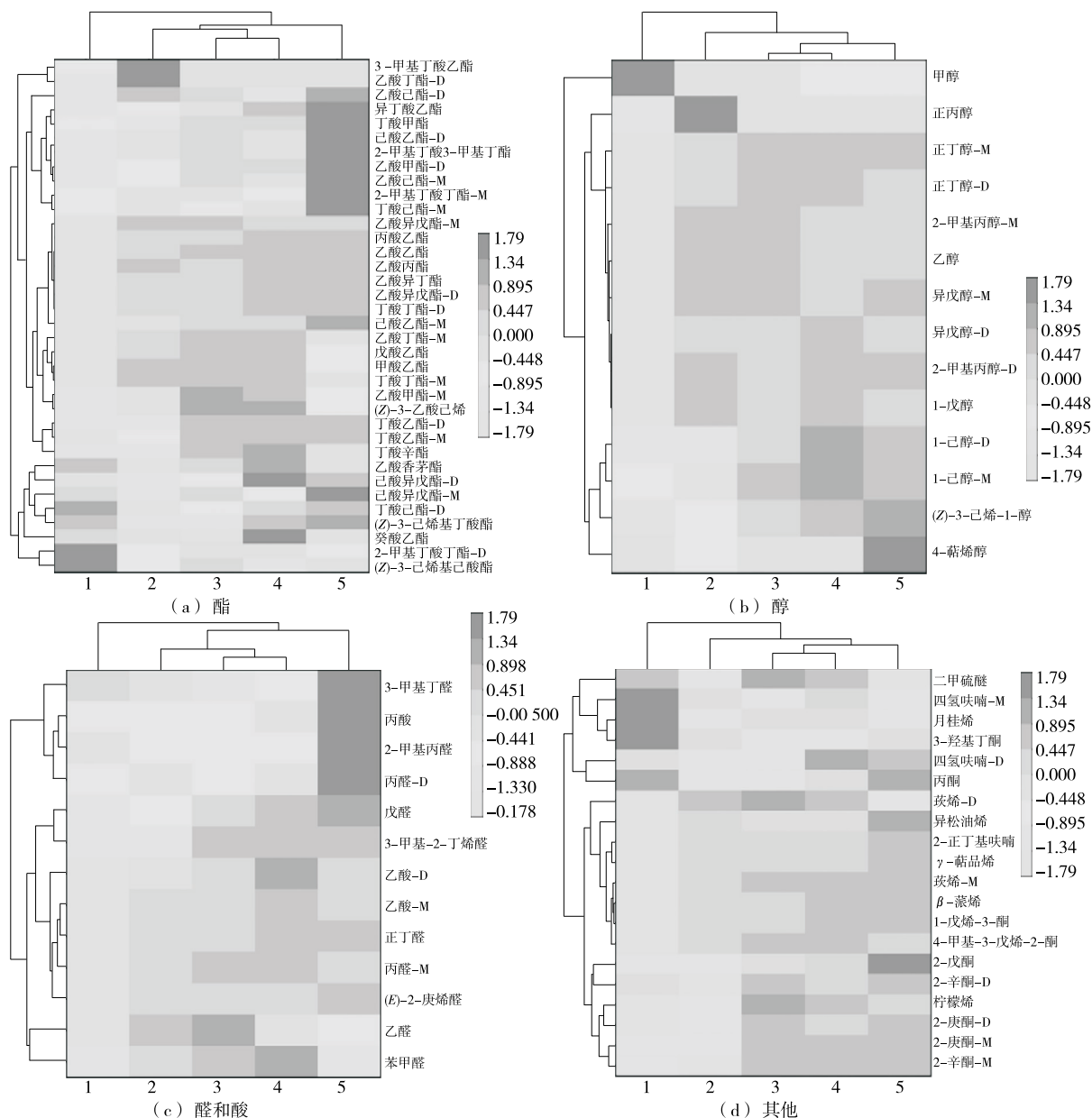


图 1 百香果啤酒酿造过程中香气物质热图

Figure 1 Heat map of flavor substances in passion beer during the brewing process

成品酒贮藏 1 个月后乙酸质量分数 $[(1\ 186.96 \pm 75.60)\ \mu\text{g}/\text{kg}]$ 较成品酒的 $[(1\ 354.57 \pm 16.82)\ \mu\text{g}/\text{kg}]$ 显著下降。丙酸是麦汁中糖降解的产物,在啤酒发酵过程中间接影响乙醇的生成,同时也为酯的合成提供前体,在贮藏过程中快速上升,约是贮藏前 $[(241.00 \pm 14.98)\ \mu\text{g}/\text{kg}]$ 的 13 倍。

乙醇是酒精发酵过程中的代谢产物,果汁的添加会提高可发酵糖含量,随之产生的乙醇量就会增加。乙醇对最终果啤中的风味有较大影响,当乙醇未很好地平衡时,会产生强烈的刺激性气味和杂醇味^[12]。麦汁中甲醇 $[(1\ 288.19 \pm 28.68)\ \mu\text{g}/\text{kg}]$ 质量分数最高,可能和糖化酶的使用有关。但在酵母发酵过程中,甲醇质量分数逐渐

下降到 $(231.99 \pm 15.67)\ \mu\text{g}/\text{kg}$, 低于啤酒中限量标准 $(50\ \text{mg}/\text{kg})$ 。1-己醇 $[(506.39 \pm 8.71)\ \mu\text{g}/\text{kg}]$ 、1-戊醇 $[(147.88 \pm 2.37)\ \mu\text{g}/\text{kg}]$ 、正丁醇 $[(203.07 \pm 2.30)\ \mu\text{g}/\text{kg}]$ 、异戊醇 $[(1\ 380.51 \pm 14.48)\ \mu\text{g}/\text{kg}]$ 和 2-甲基丙醇 $[(528.19 \pm 9.67)\ \mu\text{g}/\text{kg}]$ 在成品酒中的质量分数显著增加 $(P < 0.05)$ 。整个酿造过程中, (Z) -3-己烯-1-醇和 1-戊醇质量分数较低,与酵母代谢相关性较弱有关。异戊醇和 2-甲基-1-丙醇与啤酒的可饮性密切相关,除乙醇外,异戊醇在啤酒中质量分数最高,其次是 2-甲基-1-丙醇。

醛类物质是酒精发酵过程中的中间代谢物,主要来源于 Strecker 降解或酵母代谢副产物,与啤酒老化有

关^[13]。当啤酒中某些醛类化合物含量超过气味阈值时,通常会呈现出强烈的未成熟、硬纸板和腐烂的香气。百香果果啤发酵中期丙醛(氧化苹果味)、正丁醛(香瓜、绿麦芽味)、3-甲基-2-丁烯醛(杏仁香味)和戊醛(青草、苹果、奶酪味)显著增加。

2.2 主成分分析

由图 2 可知,同一平行样品聚类良好,但与其他样品组被很好地区分,说明百香果果啤中挥发性物质的组成在酿造过程中发生了显著变化。PC1 和 PC2 贡献率分别为 62.1% 和 19.1%,累计贡献率为 81.2%,表明其可以代表百香果果啤中整体的风味组成。在 PC1 方向上,麦汁与其他发酵阶段能够很好地区分开来,说明 PC1 与麦汁

发酵前后引起的挥发性代谢产物的变化密切相关,主要的化合物有 2-甲基丁酸丁酯(果香)、丁酸乙酯(香蕉、菠萝、草莓香味)、丙酸乙酯(苹果香味)、1-戊醇(柑橘、柠檬香味)和 γ -萜品烯(柠檬香味)等,其多是在酵母参与发酵后产生的;在 PC2 方向上,发酵前期、中期、成品酒与后贮果啤产品有效区分开,表明 PC2 与果啤发酵过程引起的挥发性代谢变化密切相关,主要的化合物有乙酸甲酯(溶剂、果香味)、异丁酸乙酯(苹果、柑橘、菠萝香味)、2-甲基丙醛(果香、香蕉、甜瓜香味)、戊醛(坚果气味)、丙酸(酸腐、酱油味)和 2-戊酮(茉莉、天竺葵香味)等。2-甲基丙醛、丙酸和 2-戊酮含量在后贮过程中显著增加,其中,2-甲基丙醛被认为是啤酒老化的标志物^[14]。

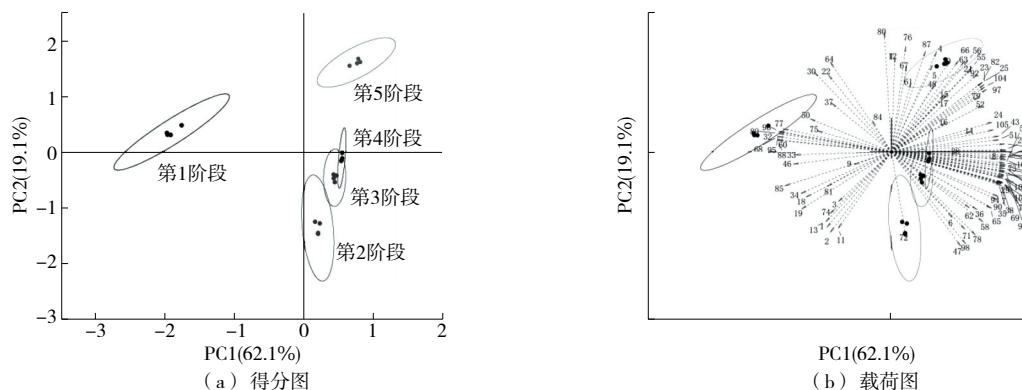


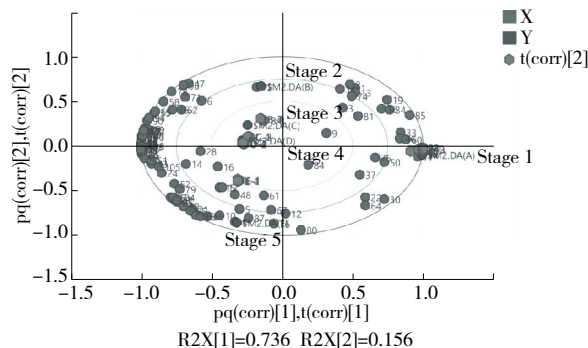
图 2 百香果果啤酿造过程中风味物质主成分分析

Figure 2 Principal component analysis of flavor substances during the brewing of passion beer

2.3 正交偏最小二乘法判别分析

由图 3 可知,麦汁风味与 2-甲基丁酸丁酯-D、甲醇、3-羟基丁酮的相关性较强;发酵前期风味与乙酸丁酯-M、3-甲基丁酸乙酯、甲酸乙酯、正丙醇、苯甲醛、乙醇、柠檬烯和乙酸甲酯-M 具有较强的相关性;发酵中期风味与丁酸丁酯-M、乙酸异戊酯-M、正丁醇-M、3-甲基-1-丁醇-D、2-甲基丙醇-D、乙酸-M 和 1-戊烯-3-酮具有较强的相关性;成品酒风味与乙酸异戊酯-D、乙酸异丁酯、丙酸乙酯、乙酸丙酯、1-戊醇、4-甲基-3-戊烯-2-酮和茨烯-M 具有较强的相关性;后贮酒风味与丁酸己酯-M、乙酸丁酯-D、4-萜烯醇、1-己醇-M、丙酸和 2-辛酮-M 的相关性较强。

为了避免小样本量带来的误差,对 200 个样本进行随机排列测试,以验证模型的稳定性。 Q^2 和 R^2 的截距分别为 -0.716 和 0.321,表明该模型未出现过拟合现象,具有统计学意义^[15]。在代谢组学中,VIP 值通常被用来评估 X 变量对 OPLS-DA 模型的贡献率,VIP 值 > 1 通常被认为是关键变量。在 OPLS-DA 模型中共有 30 种化合物的 VIP 值 > 1,依次为四氢呋喃-D、3-甲基丁酸乙酯、3-甲基-2-丁烯醛、乙醛、丙酸、二甲硫醚、2-甲基丙醛、3-甲基丁醛、四氢呋喃-M、丁酸乙酯-D、丙醛-D、正丙醇、戊醛、甲酸乙酯、乙醇、乙酸乙酯、乙酸异丁酯、乙酸丙酯、乙酸异戊酯-M、乙酸异戊酯-D、2-甲基丙醇-D、丙酸乙酯、1-戊



六边形代表不同的样品,3 个相近六边形为同一酒样的平行处理,圆点代表挥发性化合物

图 3 百香果果啤酿造过程中风味物质的 OPLS-DA 图

Figure 3 OPLS-DA of flavor compounds in passion beer during the brewing process

烯-3-酮、1-戊醇、乙酸-M、甲醇、2-丁基呋喃、乙酸甲酯-D、乙酸甲酯-M、丁酸乙酯-M、丁酸己酯-M 和异戊醇-D。

2.4 相对气味活度值计算

为进一步探究各化合物对果啤香气成分的贡献,对检测到的化合物 ROAV 值进行计算。由表 1 可知,麦汁的关键香气物质为 4-萜烯醇、苯甲醛、乙酸己酯、戊酸乙酯、丁酸乙酯、1-戊烯-3-酮、丙酮、3-甲基丁醛、3-甲基丁

表 1 基于 GC-IMS 的百香果果啤酿造过程中的风味物质及其含量[†]

Table 1 Content of flavor compounds in brewing process of passion beer by GC-IMS

名称	阈值 ^A / ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	Stage 1		Stage 2		Stage 3		Stage 4		Stage 5		香气 描述 ^C
		含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	
(Z)-3-己烯基己酸酯	/	224.43±16.52 ^a	—	213.73±24.71 ^{ab}	—	217.02±33.40 ^{ab}	—	209.91±12.17 ^b	—	216.25±9.82 ^{ab}	—	梨
癸酸乙酯	505	244.07±24.84 ^a	3.53 [*]	242.39±27.57 ^{ab}	0.47	230.92±19.35 ^b	2.38	253.58±40.96 ^a	2.54	242.61±19.65 ^{ab}	2.27	糖果、果香
丁酸辛酯	1 200	152.37±8.93 ^b	0.93	151.21±6.87 ^b	0.12	163.84±17.31 ^{ab}	0.71	166.35±21.28 ^a	0.70	158.44±8.44 ^{ab}	0.62	椰子
(Z)-3-己烯基丁酸酯	5 000	99.98±6.87 ^{ab}	0.15	88.78±7.38 ^b	0.02	90.60±5.74 ^{ab}	0.09	100.04±6.32 ^{ab}	0.10	102.53±9.36 ^a	0.10	奶油香
丁酸己酯-M	1 000	229.54±71.61 ^e	1.68	386.49±34.28 ^b	0.38	287.10±6.06 ^d	1.50	332.34±15.13 ^c	1.68	1 153.89±33.41 ^a	5.45	杏仁、菠萝
丁酸己酯-D	1 000	161.02±15.79 ^a	1.18	146.81±19.24 ^b	0.14	151.18±8.14 ^{ab}	0.79	155.97±18.31 ^{ab}	0.79	157.77±14.37 ^{ab}	0.74	杏仁、菠萝
己酸异戊酯-M	4 070	20.27±1.55 ^a	0.04	20.63±1.81 ^a	—	21.25±0.78 ^a	0.03	21.24±1.92 ^a	0.03	20.49±2.45 ^a	0.02	果香
乙酸己酯-M	9	83.86±17.19 ^d	68.08	102.02±17.10 ^c	11.02	137.06±6.54 ^b	79.41	127.24±4.30 ^b	71.45	188.67±8.68 ^a	98.98	苹果、樱桃
乙酸己酯-D	9	12.87±1.38 ^a	10.45	15.29±0.81 ^a	1.65	14.94±2.45 ^a	8.66	12.83±2.13 ^a	7.20	16.08±2.11 ^a	8.44	苹果、樱桃
甲基丁酸 3-甲基丁酯	/	22.67±2.36 ^c	/	31.95±2.28 ^{bc}	/	35.95±4.31 ^b	/	33.49±2.05 ^{bc}	/	54.33±4.35 ^a	/	果香、柑橘
己酸乙酯-M	750	193.32±163.36 ^e	1.88	702.62±8.50 ^d	0.91	843.10±17.61 ^b	5.86	778.86±12.18 ^c	5.25	1 012.45±19.86 ^a	6.37	甜香、香蕉
己酸乙酯-D	750	110.89±10.66 ^e	1.08	339.95±17.86 ^d	0.44	484.96±14.97 ^b	3.37	429.61±12.18 ^c	2.89	942.44±9.44 ^a	5.93	甜香、香蕉
丁酸丁酯-M	10 000	14.08±1.46 ^c	0.01	61.28±1.32 ^a	0.01	60.97±3.49 ^a	0.03	60.32±4.30 ^a	0.03	39.75±2.31 ^b	0.02	熟香蕉
丁酸丁酯-D	10 000	10.97±1.27 ^b	0.01	22.81±2.41 ^{ab}	—	22.22±0.89 ^{ab}	0.01	23.66±2.27 ^{ab}	0.01	25.60±0.46 ^a	0.01	熟香蕉
甲基丁酸丁酯-M	500	27.80±4.36 ^b	0.41	32.55±2.81 ^b	0.06	32.19±1.91 ^b	0.34	28.46±1.86 ^b	0.29	47.57±3.87 ^a	0.45	果香
甲基丁酸丁酯-D	500	24.69±2.36	0.36	17.00±1.59 ^a	0.03	18.17±0.89 ^a	0.19	18.15±1.38 ^a	0.18	16.55±2.40 ^a	0.16	果香
乙酸异戊酯-M	4 200	42.08±3.36 ^d	0.07	1 005.71±26.73 ^a	0.23	982.09±20.96 ^b	1.22	929.80±9.64 ^b	1.12	917.99±16.93 ^c	1.03	香蕉、梨、苹果
乙酸异戊酯-D	4 200	102.22±9.94 ^e	0.18	7 473.60±79.87 ^d	1.73	7 648.52±73.06 ^c	9.50	7 887.65±64.09 ^b	9.49	8 476.58±44.87 ^a	9.53	香蕉、梨、苹果
戊酸乙酯	6	8.84±0.64 ^a	10.76	16.73±0.61 ^a	2.71	18.34±2.30 ^a	15.94	18.53±0.98 ^a	15.61	13.07±0.44 ^a	10.28	木瓜、苹果
乙酸丁酯-M	7 840	25.68±3.77 ^d	0.02	57.85±5.65 ^{bc}	0.01	70.00±3.20 ^{ab}	0.05	71.12±3.62 ^a	0.05	55.13±1.99 ^c	0.03	菠萝
乙酸丁酯-D	/	25.00±0.22 ^c	—	60.52±3.46 ^a	—	37.76±2.42 ^b	—	36.74±1.32 ^{bc}	—	36.52±2.55 ^{bc}	—	菠萝
丁酸乙酯-M	200	120.36±88.65 ^c	4.40	423.76±11.66 ^b	2.06	977.34±14.54 ^a	25.48	983.13±7.26 ^a	24.84	984.08±22.11 ^a	23.23	香蕉、菠萝、草莓
丁酸乙酯-D	200	162.75±76.64 ^e	5.95	592.57±9.90 ^d	2.88	3 835.69±32.15 ^c	100	3 957.57±32.74 ^b	100	4 235.98±16.40 ^a		香蕉、菠萝、草莓
乙酸异丁酯	400	21.53±4.32 ^c	0.39	758.47±11.18 ^d	1.84	733.17±10.76 ^c	9.56	785.43±15.73 ^b	9.92	818.75±5.43 ^a		花香
丁酸甲酯	1500	23.12±4.72 ^c	0.11	11.65±1.65 ^c	0.01	74.26±1.89 ^b	0.26	86.49±1.90 ^b	0.29	137.50±3.17 ^a	0.43	梅花
丙酸乙酯、	5 000	38.58±0.95 ^c	0.06	741.91±12.88 ^d	0.14	778.20±10.96 ^c	0.81	849.02±12.56 ^b	0.86	885.41±3.31 ^a	0.84	苹果
乙酸乙酯	28 000	66.35±11.87 ^e	0.02	4 954.84±18.3 ^d	0.17	5 203.36±9.90 ^c	0.97	5 323.30±12.59 ^a	0.96	5 273.83±7.77 ^b	0.89	菠萝、果香
乙酸甲酯-M	550 000	34.62±2.66 ^c	—	95.51±33.06 ^c	—	156.58±6.07 ^a	—	143.46±3.96 ^b	—	75.75±3.82 ^d	—	溶剂、果香
乙酸甲酯-D	550 000	33.15±5.31 ^c	—	43.45±1.39 ^c	—	80.57±0.77 ^b	—	89.70±2.70 ^b	—	153.07±14.00 ^a	—	溶剂、果香
3-甲基丁酸乙酯	4	8.40±1.05 ^c	15.34	411.29±17.89 ^a	100.00	17.85±0.93 ^{bc}	23.27	16.48±1.53 ^{bc}	20.82	21.04±2.86 ^b	24.83	苹果、柑桔、草莓、紫罗兰
乙酸丙酯	100	45.11±4.39 ^c	3.30	272.33±7.45 ^a	2.65	253.23±4.99 ^b	13.20	280.21±7.11 ^a	14.16	278.96±2.98 ^a	13.17	果香、梨
甲酸乙酯	150 000	41.63±2.56 ^d	—	201.79±11.74 ^a	—	207.33±2.43 ^a	0.01	186.00±2.86 ^b	0.01	102.92±5.07 ^c	—	辛辣、菠萝、朗姆酒
异丁酸乙酯	7	17.81±2.55 ^a	18.59	18.28±0.87 ^a	2.54	21.14±1.51 ^a	15.75	25.03±0.53 ^a	18.07	27.97±2.53 ^a	18.87	苹果、柑橘、菠萝
乙酸香茅酯	10	136.87±25.43 ^a	100.00	121.78±7.45 ^b	11.84	135.41±9.55 ^a	70.61	140.99±20.88 ^a	71.25	131.28±13.89 ^{ab}	61.98	玫瑰花、果香
萜烯醇	11	112.88±11.94 ^b	74.97	106.06±9.33 ^b	9.38	111.90±12.08 ^b	53.04	115.32±8.56 ^b	52.98	137.92±10.45 ^a	59.20	腐木、辛辣
(Z)-3-己烯-1-醇	100	28.46±12.94 ^c	2.08	37.21±0.85 ^{bc}	0.36	49.11±2.20 ^{ab}	2.56	51.89±2.17 ^a	2.62	56.85±3.51 ^a	2.68	生青、香蕉
己醇-M	2 300	245.94±144.99 ^c	0.78	148.28±6.90 ^d	0.06	441.20±31.11 ^b	1.00	506.39±8.71 ^a	1.11	448.47±19.44 ^b	0.92	辛辣、酒、杂醇油

续表 1

名称	阈值 ^A / ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	Stage 1		Stage 2		Stage 3		Stage 4		Stage 5		香气 描述 ^C
		含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	
1-己醇-D	2 300	57.17±7.06 ^b	0.18	56.39±9.38 ^b	0.02	67.68±3.78 ^{ab}	0.15	71.96±5.09 ^a	0.16	70.93±1.18 ^a	0.15	辛辣、酒、杂醇油
戊醇	15 000	25.26±0.61 ^b	0.01	149.24±2.29 ^a	0.01	145.22±4.53 ^a	0.05	147.88±2.37 ^a	0.05	145.93±2.82 ^a		柑橘、柠檬
异戊醇-M	19 330	822.86±129.02 ^d	0.31	1 408.95±32.7 ^a	0.31	1 383.51±17.44 ^b	0.37	1 340.56±10.05 ^c	0.35	1 380.51±14.48 ^b	0.34	香蕉、梨
正丁醇-M	5 550	77.80±15.59 ^c	0.10	179.76±4.08 ^b	0.03	207.40±2.93 ^a	0.19	203.07±2.30 ^a	0.18	203.37±4.87 ^a	0.17	杂醇油
正丁醇-D	5 550	19.84±1.91 ^d	0.03	146.05±5.58 ^b	0.03	167.49±7.03 ^a	0.16	166.27±3.22 ^a	0.15	131.56±4.11 ^c	0.11	杂醇油
甲基丙醇-M	10 000	364.68±69.73 ^d	0.27	545.74±10.03 ^a	0.05	550.50±9.16 ^a	0.29	528.19±9.67 ^b	0.27	512.85±8.04 ^c	0.24	葡萄酒
乙醇	50 000 000	5 564.82±388.97 ^c		20 973.12±67.08 ^a	/	20 047.15±121.54 ^b	/	19 752.20±66.20 ^c	/	19 177.81±55.87 ^d	/	酒精
甲醇	10 000 000	1 288.19±28.68 ^a	—	311.88±35.26 ^b	—	283.95±12.31 ^c	—	231.99±15.67 ^d	—	205.93±11.26 ^c	—	酒精、溶剂
异戊醇-D	19 330	384.06±54.65 ^d	0.15	7 562.51±61.78 ^b	0.38	7 571.12±31.37 ^b	2.04	7 726.73±52.16 ^a	2.02	7 442.10±75.42 ^c	1.82	溶剂、酒精、指甲油
甲基丙醇-D	1 000	258.12±32.38 ^d	0.19	5 000.93±30.01 ^b	0.49	/	/	5 018.15±25.1 ^a	2.54	5 009.98±26.58 ^{ab}	2.37	酒精、溶剂、生青味
正丙醇	13	92.54±6.83 ^c	0.68	2 071.01±16.22 ^a	2.01	881.94±9.47 ^b	4.60	855.92±14.13 ^c	4.33	784.46±5.91 ^d	3.70	酒精
苯甲醛	35	43.45±2.14 ^b	24.42	49.99±6.63 ^{ab}	3.74	53.74±10.82 ^{ab}	21.55	57.86±1.23 ^a	22.49	44.24±5.94 ^b	16.07	杏仁、焦糖
(E)-2-庚烯醛	18 000	27.68±1.07 ^d	5.78	147.27±8.03 ^c	4.09	161.04±5.66 ^b	23.99	164.21±2.36 ^b	23.71	196.62±2.18 ^a	26.52	脂肪、植物
丙醛-M	18 000	59.90±1.96 ^c	0.02	160.04±16.6 ^b	0.01	183.29±1.81 ^a	0.05	181.24±1.17 ^a	0.05	156.23±5.51 ^b	0.04	氧化的苹果
丙醛-D	150	13.15±0.88 ^d	0.01	72.58±7.45 ^c	—	71.04±2.06 ^c	0.02	133.37±1.15 ^b	0.04	473.57±45.60 ^a	0.12	氧化的苹果
3-甲基丁醛	150	250.49±62.62 ^b	12.20	178.84±20.72 ^c	1.16	81.55±0.62 ^c	2.83	114.35±1.79 ^d	3.85	396.05±10.48 ^a	12.47	杏仁、生香
乙醛	19 000	367.96±18.09 ^c	0.14	424.02±18.25 ^a	0.02	429.65±21.52 ^a	0.12	400.31±10.64 ^b	0.11	389.60±25.79 ^b	0.10	甜香、苹果
甲基丙醛	12 000	82.64±16.32 ^b	0.05	43.06±2.55 ^c	—	22.27±1.53 ^d	0.01	28.88±1.76 ^d	0.01	312.97±36.28 ^a	0.12	果香、香蕉、甜瓜
3-甲基-2-丁烯醛	500	9.43±0.44 ^b	0.14	15.36±0.50 ^b	0.03	107.89±1.44 ^a	1.13	112.50±1.34 ^a	1.14	117.73±1.31 ^a	1.11	杏仁
戊醛	50	9.75±1.38 ^c	1.42	26.68±1.33 ^d	0.52	85.40±1.86 ^c	8.91	104.33±1.86 ^b	10.54	138.78±1.05 ^a	13.10	坚果
正丁醛	120	11.53±1.13 ^c	0.70	106.12±1.51 ^b	0.86	115.77±1.87 ^{ab}	5.03	119.83±1.91 ^a	5.05	120.03±2.65 ^a	4.72	香瓜、绿麦芽
丙酸	2 500	168.29±14.34 ^d	0.49	199.60±6.04 ^c	0.08	209.50±6.70 ^c	0.44	241.00±14.98 ^b	0.49	3 283.64±439.72 ^a	6.20	酸腐、酱油
乙酸-M	140 000	373.25±19.21 ^d		1 170.77±60.17 ^b	0.01	1 175.15±32.49 ^b	0.04	1 293.00±14.87 ^a	0.05	1 132.54±67.41 ^c	0.04	酸醋、辛酸
乙酸-D	140 000	30.89±1.81 ^c	—	47.37±2.64 ^b	—	53.12±5.28 ^{ab}	—	61.57±1.95 ^a	—	54.42±8.19 ^{ab}	—	酸醋
2-辛酮-M	250	87.45±52.36 ^b	2.56	63.51±5.27 ^c	0.25	133.70±14.61 ^a	2.79	141.35±7.78 ^a	2.86	135.08±9.82 ^a	2.55	未成熟苹果
2-辛酮-D	250	34.11±2.07 ^a	1.00	31.09±3.91 ^a	0.12	35.53±5.60 ^a	0.74	34.51±5.82 ^a	0.70	35.86±3.94 ^a	0.68	未成熟苹果
2-庚酮-M	2 000	223.04±36.76 ^b	0.81	219.20±17.38 ^b	0.11	263.16±6.47 ^a	0.69	261.94±8.20 ^a	0.66	261.06±17.18 ^a	0.62	辛辣、椰子
2-庚酮-D	2 000	52.76±4.46 ^b	0.19	61.64±2.91 ^b	0.03	85.18±6.54 ^a	0.22	78.48±5.99 ^a	0.20	83.90±4.69 ^a	0.20	辛辣、椰子
4-甲 基-3-戊 烯-2-酮	400	22.49±2.91 ^b	0.41	55.55±1.13 ^a	0.14	57.73±2.27 ^a	0.75	56.00±2.24 ^a	0.71	54.21±2.67 ^a	0.64	蜂蜜
戊烯-3-酮	10	8.95±0.93 ^b	6.54	39.39±2.34 ^a	3.83	38.65±1.91 ^a	20.15	40.25±1.92 ^a	20.34	40.71±1.43 ^a	19.22	芥末
戊酮	30 000	40.64±2.93 ^d	0.01	21.02±0.47 ^c		147.16±2.70 ^c	0.03	178.77±4.82 ^b	0.03	353.51±5.07 ^a	0.06	茉莉、天竺葵
丙酮	370	1 003.44±23.77 ^b	19.81	826.98±5.13 ^c	2.17	846.51±4.56 ^d	11.93	911.71±6.72 ^c	12.45	1 024.61±11.86 ^a	13.07	辛辣、甜味
羟基丁酮	50 000	848.26±252.25 ^a	0.12	148.19±57.77 ^b	—	93.70±8.62 ^c	0.01	99.15±2.88 ^c	0.01	143.53±19.39 ^b	0.01	奶油香味
γ-萜品烯	3 000	36.36±2.60 ^c	0.09	83.38±4.44 ^{ab}	0.03	80.60±3.74 ^{ab}	0.14	76.94±2.60 ^b	0.13	91.76±5.51 ^a	0.14	柠檬
异松油烯	/	27.82±4.75 ^c	—	58.06±7.11 ^b	—	51.06±2.85 ^b	—	50.56±2.13 ^b	—	71.91±5.63 ^a	—	松木、柑桔
柠檬烯	430	22.94±3.00 ^b	0.39	29.02±4.27 ^{ab}	0.07	40.48±3.17 ^a	0.49	36.87±2.15 ^a	0.43	33.75±1.08 ^{ab}	0.37	柠檬、柑橘
月桂烯	500	46.61±3.12 ^a	0.68	25.56±2.15 ^b	0.05	30.12±2.12 ^b	0.31	28.73±2.36 ^b	0.29	28.02±1.94 ^b	0.26	树脂、辣味
B-蒎烯	30 000	32.49±13.49 ^b	0.01	53.25±3.76 ^a	—	52.99±2.68 ^a	0.01	54.61±4.10 ^a	0.01	53.92±3.70 ^a	0.01	松脂
蒎烯-M	17 930	26.33±2.94 ^b	0.01	119.85±7.76 ^a	0.01	125.59±4.54 ^a	0.04	127.52±2.80 ^a	0.04	124.60±5.77 ^a	0.03	樟脑
蒎烯-D	17 930	40.16±2.21 ^c	0.02	81.18±4.46 ^a	—	91.18±8.39 ^a	0.03	82.94±8.88 ^a	0.02	55.97±8.28 ^b	0.01	樟脑

续表 1

名称	阈值 ^A / ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	Stage 1		Stage 2		Stage 3		Stage 4		Stage 5		香气 描述 ^C
		含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	
2-正丁基呋喃	3 000	6.18±0.75 ^b	0.02	36.12±2.82 ^a	0.01	35.94±3.78 ^a	0.06	36.39±0.89 ^a	0.06	45.20±5.01 ^a	0.07	辛辣
四氢呋喃-M	/	126.87±1.61 ^a	—	85.20±11.51 ^{bc}	—	75.00±2.26 ^c	—	96.02±2.43 ^b	—	61.28±6.47 ^d	—	—
四氢呋喃-D	/	23.80±1.12 ^{bc}	—	16.69±0.24 ^c	—	16.77±1.37 ^c	—	37.76±1.35 ^a	—	32.04±5.38 ^{ab}	—	—
二甲硫醚	53	243.08±8.61 ^b	33.51	194.15±4.37 ^c	3.56	272.33±6.64 ^a	26.79	245.41±4.37 ^b	23.40	155.29±5.61 ^d	13.83	海鲜味

† 小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$); A. 阈值来源于 Flavor Ingredients; * 表示 ROAV 值, 根据阈值与实际浓度计算; C. 查阅网址 <http://www.thegoodscentscompany.com/search2.html>, <http://www.flavornet.org/flavornet.html>; “/”表示未查到, “—”表示未计算出; Stage 1. 煮沸冷却麦汁; Stage 2. 果啤酿造前期; Stage 3. 果啤发酵中期; Stage 4. 成品酒; Stage 5. 4 ℃下贮藏 1 个月。

乙酯、二甲硫醚、异丁酸乙酯和乙酸香茅酯等; 发酵前期关键香气物质为 4-萜烯醇、苯甲醛、(E)-2-庚烯醛、乙酸己酯、乙酸异戊酯、戊酸乙酯、丁酸乙酯、乙酸异丁酯、丙酮、正丙醇、3-甲基丁酸乙酯、乙酸丙酯、二甲硫醚和异丁酸乙酯等; 发酵中期关键香气物质 4-萜烯醇、苯甲醛、(E)-2-庚烯醛、己酸乙酯、乙酸异戊酯、丁酸乙酯、乙酸异丁酯、乙酸己酯、丙酮、3-甲基丁酸乙酯、戊酸乙酯、乙酸丙酯、二甲硫醚、1-戊烯-3-酮、异丁酸乙酯和乙酸香茅酯等; 成品酒中关键香气物质为 4-萜烯醇、苯甲醛、(E)-2-庚烯醛、乙酸己酯、己酸乙酯、乙酸异戊酯、戊酸乙酯、丁酸乙酯、1-戊烯-3-酮、乙酸异丁酯、丙酮、3-甲基丁酸乙酯、乙酸丙酯、二甲硫醚、异丁酸乙酯、乙酸香茅酯、戊醛和正丁醛等; 后贮酒关键风味物质为丙酸、4-萜烯醇、苯甲醛、丁酸己酯、(E)-2-庚烯醛、乙酸己酯、己酸乙酯、乙酸异戊酯、戊酸乙酯、丁酸乙酯、1-戊烯-3-酮、乙酸异丁酯、丙酮、3-甲基丁醛、3-甲基丁酸乙酯、乙酸丙酯、二甲硫醚、异丁酸乙酯、乙酸香茅酯和戊醛等。

将 ROAV 与 VIP 值结合, 两者均 ≥ 1 的物质有丁酸己酯、乙酸异戊酯、丁酸乙酯、1-戊烯-3-酮、乙酸异丁酯、3-甲基丁醛、3-甲基丁酸乙酯、乙酸丙酯和二甲硫醚, 共 9 种。以酯类化合物居多, 是果啤香气的主要贡献者, 如乙酸己酯(苹果、樱桃)、乙酸异戊酯(香蕉香味)、丁酸乙酯(香蕉、菠萝香味)、乙酸异丁酯(花香)、3-甲基丁酸乙酯(苹果香味)和乙酸丙酯(特殊的水果香气)。

3 结论

采用 GC-IMS 技术分析了百香果果啤酿造过程中的风味物质变化, 共鉴定出 63 种风味化合物, 其中酯类 26 种, 醇类 10 种, 醛 9 种, 有机酸类 2 种, 酮类 7 种, 烷烃类 6 种, 呋喃类 2 种, 醚类 1 种。百香果果啤发酵过程中, 酯类物质主要是通过酰基化、缩合和酯化等生化反应生成; 醇类物质主要是酵母代谢的副产物; 醛酮类物质主要与 Strecker 降解、美拉德反应和氧化有关, 此外, 还与醇的氧化、酮酸脱羧、氨基酸脱氨及脱羧反应有关。主成分分析结果表明, PC1 和 PC2 累计差异贡献率为 81.2%, 说明百香果果啤酿造过程中风味物质发生显著变化。采用

正交偏最小二乘判别分析(VIP 值 > 1)、结合相对气味活度值(ROAV 值 ≥ 1), 初步确定百香果果啤酿造过程中的 15 种潜在的关键风味物质, 包括丙酸、丁酸己酯、乙酸异戊酯、丁酸乙酯、1-戊烯-3-酮、乙酸异丁酯、3-甲基丁醛、异戊醇、2-甲基丙醇、正丙醇、3-甲基丁酸乙酯、乙酸丙酯、二甲硫醚、3-甲基-2-丁烯醛和戊醛。鉴于试验条件的限制, 尚未进行百香果果啤的中试生产放大试验。因此, 生产工艺的稳定性和产品质量的一致性还有待深入研究。

参考文献

[1] 董德武, 卢存龙, 曹圆圆, 等. 我国果汁啤酒生产现状及发展战略[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(7): 2 626-2 632.
DONG D W, LU C L, CAO Y Y, et al. Present situation and development strategy of fruit beer in China[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2015, 6(7): 2 626-2 632.

[2] MIRELLA N, IVANA G. Characterization of bioactive compounds and antioxidant activity of fruit beers[J]. Food Chemistry, 2020, 305: 335-343.

[3] GONG X, YANG Q, CHEN M, et al. Characterisation of antioxidant activities and volatile profiles of pineapple beer during the brewing process[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2022, 61(2): 116-128.

[4] 樊艳. SPME-GC-MS 结合 ROAV 分析腐乳中的主体风味物质[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 227-234.
FAN Y. Analysis of main flavor substances in fermented soybean curd by SPME-GC-MS and ROAV[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 227-234.

[5] 郭志君, 杨磊, 骆红霞, 等. 苹果酸-乳酸发酵对刺梨酒香气的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 197-204, 233.
GUO Z J, YANG L, LUO H X, et al. Effect of malolactic fermentation on volatile compounds of Rosa roxburghii Tartt wine[J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 197-204, 233.

[6] 吴永康, 林亲录, 蒋志荣, 等. 基于 GC-IMS 分析碾减率对籼米米饭挥发性物质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(12): 26-31.
WU Y K, LIN Q L, JIANG Z R, et al. Effect of degree of milling on volatile compounds of rice after cooking[J]. Food & Machinery, 2021, 37(12): 26-31.

(下转第 75 页)

- 谱法测定蔬菜中 34 种抗生素[J]. 食品工业, 2019, 40(6): 282-286.
- ZHANG J N, LIU B J, WANG A Q. Determination of antibiotics residues in vegetables by QuEChERS-ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. The Food Industry, 2019, 40(6): 282-286.
- [14] 龚霄, 韩智, 曹琦, 等. 超高效液相色谱串联质谱法测定蔬菜中 31 种抗生素[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(1): 43-49.
- GONG L, HAN Z, CAO Q, et al. Simultaneous determination of 31 kinds of antibiotics in vegetables by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(1): 43-49.
- [15] 刘畅. 改良 QuEChERS/超高效液相色谱—串联质谱法同时检测蔬菜中 14 种喹诺酮类抗生素残留[J]. 分析科学学报, 2019, 35(1): 124-128.
- LIU C. Determination of quinolones in vegetables by improved QuEChERS/Ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Analytical Science, 2019, 35(1): 124-128.
- [16] 孙雷, 王亦琳, 叶妮, 等. 猪肉中 92 种兽药残留的 UPLC-Qtrap 高通量筛查和定量方法的研究[J]. 中国兽药杂志, 2017, 51(9): 36-42.
- SUN L, WANG Y L, YE N, et al. The study on high-throughput screening and quantitative method for 92 veterinary drugs residues in pig muscle by UPLC-Qtrap[J]. Chinese Journal of Veterinary Drug, 2017, 51(9): 36-42.
- [17] 方灵, 韦航, 黄彪, 等. 超高效液相色谱—串联质谱法同时测定牛奶中 38 种抗生素残留[J]. 分析测试学报, 2019, 38(6): 681-686.
- FANG L, WEI H, HUANG B, et al. Simultaneous determination of 33 antidiabetic residues in milk by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2019, 38(6): 681-686.
- [18] 罗辉泰, 黄晓兰, 吴惠勤, 等. 分散固相萃取/高效液相色谱—串联质谱法快速测定饲料中 87 种药物残留[J]. 分析测试学报, 2015, 34(9): 979-985.
- LUO H T, HUANG X L, WU H Q, et al. Dispersive solid-phase extraction followed by liquid chromatography-tandem mass spectrometry for rapid determination of 87 kinds of drug residues in feedingstuffs[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2015, 34(9): 979-985.
- [19] 王浩, 赵丽, 杨红梅, 等. 液相色谱—串联质谱法测定牛奶中 35 种四环素类, 磺胺类, 青霉素类, 大环内酯类, 氯霉素类抗生素残留[J]. 色谱, 2015, 33(9): 995-1 001.
- WANG H, ZHAO L, YANG H M, et al. Determination of 35 antibiotic residues of tetracyclines, sulfonamides, penicillins, macrolides and amphenicols in milk by liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2015, 33(9): 995-1 001.
- [20] 陈兴连, 林涛, 刘兴勇, 等. 分散固相萃取净化—超高效液相色谱—串联质谱法同时测定鱼和虾中抗生素及三苯甲烷类兽药残留[J]. 色谱, 2019, 37(9): 946-954.
- CHEN X L, LIN T, LIU X Y, et al. Simultaneous determination of antibiotics and triphenylmethanes veterinary drug residues in fish and shrimp by dispersive solid phase extraction purification-ultra high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2019, 37(9): 946-954.
-
- (上接第 52 页)
- [7] 龚霄, 周伟, 李积华, 等. 基于静态顶空气相离子迁移谱技术的果啤种类判别[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 296-301.
- GONG X, ZHOU W, LI J H, et al. Identification of fruit beers based on static headspace-gas chromatography-ion mobility spectroscopy (SH-GC-IMS)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 296-301.
- [8] YANG Q, TU J X, CHEN M, et al. Discrimination of fruit beer based on fingerprints by static headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2022, 80(3): 298-304.
- [9] 范威威, 林熙, 龚霄, 等. 基于顶空气相—离子迁移谱技术对不同酵母发酵的百香果果啤香气比较[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 325-332.
- FAN W W, LIN X, GONG X, et al. Aroma comparison of passion beer fermented by different yeasts based on headspace phase-ion mobility spectroscopy technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 325-332.
- [10] VIEIRA A C, PEREIRA A C, MARQUES J C, et al. Multi-target optimization of solid phase microextraction to analyse key flavour compounds in wort and beer[J]. Food Chemistry, 2020, 317: 126466.
- [11] ADADI P, KOVALEVA E G, GLUKHAREVA T V, et al. Production and analysis of non-traditional beer supplemented with sea buckthorn[J]. Agronomy Research, 2017, 15(5): 1 831-1 845.
- [12] ALVES V, GONALVES J, FIGUEIRA J A, et al. Beer volatile fingerprinting at different brewing steps[J]. Food Chemistry, 2020, 326: 126856.
- [13] KISHIMOTO T, NOBA S, YAKO N, et al. Simulation of Pilsner-type beer aroma using 76 odor-active compounds[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2018, 126(3): 330-338.
- [14] VANDERHAESEN B, NEVEN H, VERACHTERT H, et al. The chemistry of beer aging: A critical review[J]. Food Chemistry, 2006, 95(3): 357-381.
- [15] DOS SANTOS F A, SOUSA I P, FURTADO N A J C, et al. Combined OPLS-DA and decision tree as a strategy to identify antimicrobial biomarkers of volatile oils analyzed by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Revista Brasileira de Farmacognosia, 2018, 28(6): 647-653.