

GC-MS 和 GC-IMS 分析藜麦酒的特征挥发性风味成分

陈虎¹, 锁然¹, 刘亚琼¹, 张煜行², 吕玮³, 王颀^{1*}

¹ 河北农业大学食品科技学院 河北省农产品加工技术创新中心 河北保定 071000

² 河北衡水老白干酒业股份有限公司 河北省白酒酿造技术创新中心 河北衡水 053000

³ 国家半干旱农业工程技术研究中心 石家庄 050000

摘要 以藜麦和高粱为原料,采用固态发酵法酿造藜麦酒和高粱酒,采用气相色谱-质谱联用(GC-MS)和气相-离子迁移谱(GC-IMS)方法检测藜麦酒和高粱酒的挥发性风味成分。结果表明,GC-MS 检测的藜麦酒中总挥发性风味成分为 49 种,高粱酒为 29 种。GC-MS 和 GC-IMS 检测到藜麦酒中独有的物质分别为 23 种和 12 种,其中 *D*-柠檬烯、 α -古木烯、石竹烯、异丁酸乙酯、丙酸异丁酯、丁酸异戊酯、2-甲基丁酸甲酯和 (*E*)-2-己烯醛是藜麦酒中的特征挥发性成分,在白酒中少见报道;异戊醇、(s)-(-)-乳酸乙酯、1-丙醇、辛酸乙酯、乙酸乙酯、丁酸乙酯和 2,6-二甲基吡嗪是藜麦酒和高粱酒中共同存在的高含量挥发性风味成分;与高粱酒相比,藜麦酒中异丁醇和异戊醇等具有不良气味物质的相对含量较低。感官评价表明,藜麦酒的粮香和果香更为突出,酒体丰满、口感圆润。

关键词 藜麦酒; 气相色谱-质谱联用; 气相-离子迁移谱; 香气成分; 感官评价

文章编号 1009-7848(2023)12-0268-13 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.12.028

传统白酒酿造行业普遍认为不同酿酒原料的香气特征有明显的不同,对其风格形成起着至关重要的作用^[1-2]。藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd)原产于南美洲,是粮食作物中少有的未进行人工遗传改良的古老物种,已在我国高寒地区引种成功,富含丰富的膳食纤维、多酚、维生素等功能性物质,同时藜麦制品具有无麸质过敏、抗氧化等生物活性^[3],具有多种保健功效,在欧美地区备受欢迎。联合国粮农组织(FAO)推荐藜麦为适宜人类食用的全营养食品^[4],其作为一种全营养食品原料正在迅速获得消费者认可^[5]。目前国内外对藜麦的研究主要集中品种改良^[6]、种植技术^[7]和营养开发及功能成分提取等方面^[8],而把藜麦作为一种发酵原料制成藜麦酒的研究还未见报道。有研究表明不同的酿酒原料对白酒品质具有极为重要的影响,如以小米为主要原料来代替高粱生产浓香型白酒,酯香突出,酒体醇甜^[9]。研究以藜麦为主要原料的新型白酒的特征挥发性风味成分,对延长藜

麦产业链具有重要意义。

研究表明,中国白酒中存在近千种物质,目前已确认的香味成分只有 350 余种,可见白酒中微量成分复杂^[10-11]。顶空固相微萃取(HS-SPME)集样品的吸附浓缩、解析、进样于一体^[12],方法简单、高效,在白酒香气研究中应用广泛^[13]。目前,气相色谱-质谱联用技术(gas chromatography-mass spectrometry,GC-MS)是分析挥发性化合物常用的技术手段,而气相色谱-离子迁移谱技术(gas chromatography-ion mobility spectrometry,GC-IMS)是近年来热门的气相分离检测技术,特别适用于一些挥发性化合物的痕量检测^[14],具有分析迅速、灵敏度高的优点^[15],目前在食品检测、溯源、分级等各领域已有广泛应用^[16-17]。如今,一些研究者们通过 GC-IMS 和 GC-MS 联用的方法对乌龙茶^[18]、豆豉^[19]和罗非鱼^[20]等产品进行分析。

本研究以藜麦和高粱为原料,采用固态发酵法酿造藜麦酒和高粱酒,联合 GC-MS 和 GC-IMS 方法检测藜麦酒和高粱酒挥发性风味成分,同时利用指纹图谱进行可视化分析,比较藜麦酒和高粱酒挥发性风味成分的差异,找出特征香气,为藜麦酒的工业化生产提供数据支持。

收稿日期: 2022-12-05

基金项目: 河北省重点研发计划项目(19227527D);河北省创新能力提升计划项目(22567698H)

第一作者: 陈虎,男,硕士

通信作者: 王颀 E-mail:wj591010@163.com

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

藜麦原料(坝藜一号)由国家半干旱农业工程技术研究中心提供;高粱、小麦、玉米、大米、酒曲、糖化酶、白砂糖和麸皮等均由河北衡水老白干酿酒(集团)有限公司提供。

C5~C25 正构烷烃(色谱纯),北京化学试剂有限公司;2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮、2-壬酮(均为分析纯),国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

FlavourSpec® GC-IMS 联用仪(配 CTC、PAL、RSI 自动顶空进样装置),德国 G.A.S mbH 公司;7890B-5977A 气相色谱-质谱联用仪,美国 Agilent 公司;HP-INNOWax 毛细管柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm),美国 Agilent 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 藜麦酒和高粱酒酿造方法 挑选优质的藜麦,采用传统浓香型白酒的“续糟配料、混蒸混烧、泥窖发酵”工艺进行酿造,由于藜麦果实颗粒较小,所以需要提前 24 h 进行润粮,馏酒温度控制在 26~33 ℃左右;挑选优质的高粱,采用同样的酿造工艺和处理条件得到高粱酒。藜麦酒和高粱酒发酵试验在河北衡水老白干酒业股份有限公司完成。

藜麦酒和高粱酒的样品分别表示为 LM-n 和 GL-n,n 为样品标号。将所得到的藜麦酒和高粱酒样品用于 GC-MS 和 GC-IMS 分析,试验重复 3 次。

1.3.2 挥发性风味成分测定方法

1.3.2.1 GC-MS 测定条件 样品前处理:取待测样品 1 mL,置于 20 mL 顶空进样瓶中,待进样分析。

顶空进样条件:60 ℃水浴条件下预热 10 min,再将 DVB/CAR/PDMS 萃取头插入到顶空瓶口的液体上方,萃取吸附 45 min,取出萃取头后立即插入到 GC-MS 进样口中,解析温度 240 ℃,解析时间 8 min,随后进行 GC-MS 分析。

GC 条件:进样口温度 240 ℃;载气(高纯 He,纯度≥99.999%)流速 1.0 mL/min;升温程序:初始

温度 50 ℃,保持 2 min,以 5 ℃/min 升至 180 ℃保持 1 min,以 7 ℃/min 升至 230 ℃,保持 5 min,运行分析时间为 43 min;不分流进样。

MS 条件:采用全扫描(Scan)模式采集信号;电子能量 70 eV;离子源温度 230 ℃;四极杆温度 150 ℃;质量扫描范围 33~450 u,溶剂延迟时间 3.6 min。

定量方法:相对百分含量按峰面积归一化法计算。

1.3.2.2 GC-IMS 测定条件 样品前处理方法同 GC-MS 测定方法。

顶空进样条件:60 ℃孵育 15 min 后进样,进样针温度为 85 ℃,进样量 200 μL。

GC-IMS 条件:孵化转速 500 r/min,柱温 60 ℃;β 射线,3H 为放射源;所用漂移气为高纯 N₂(纯度≥99.999%),漂移气流速:150 mL/min,IMS 温度 45 ℃,运行分析时间为 30 min。载气流速梯度设置为:初始流速 2 mL/min,保持 2 min;2~20 min 内线性升至 100 mL/min;保持 10 min 后停止。

1.3.3 感官评价方法 感官评价小组由专业品酒员 3 人和经过培训的消费者 9 人组成,参照 Langos 等^[21]方法进行感官评价。评价的感官指标包括果香、花香、粮香、糟香、口感和酒体,采用 5 点强度等级(0=不存在,1=非常低,2=弱,3=中等,4=强,5=很强)评价。品评小组成员均在 22 ℃恒温专业品酒室中对挥发性风味成分(见表 2)标准品进行鼻前嗅闻,随后嗅闻样品酒样,在专用评酒杯中评价恒定 20 mL 体积的样品,酒杯随机编码,每次嗅闻 60 s 后进行打分,每轮次间隔 15 min,重复 3 次,根据 12 名品酒员的评价结果绘制风味雷达图,据此分析藜麦酒和高粱酒在感官上的异同。

1.4 试验数据统计分析方法

试验结果使用 SPSS 26.0 软件统计分析,用 Origin 2020 绘图,使用 FlavourSpec®风味分析仪内置的 IMS 数据库和 NIST 数据库对挥发性风味成分进行定性分析,利用 Reporter 插件对比样品之间的谱图差异,使用 Gallery Plot 插件进行指纹图谱绘制,采用 R(Pheatmap 包)语言进行热图可视化分析。

2 结果与分析

2.1 藜麦酒和高粱酒挥发性风味成分 GC-MS 分析

藜麦酒和高粱酒挥发性风味成分的 GC-MS 总离子流图如图 1 所示。通过将其离子碎片和 NIST 2014 数据库的标准物进行比较, 检测出藜

麦酒中含有 49 种挥发性风味成分, 包括 12 种醇、18 种酯、6 种醛、5 种萜烯、2 种酸、1 种杂环和 2 种烷烃; 高粱酒中含有 29 种挥发性风味成分, 包括 6 种醇、12 种酯、2 种醛、2 种萜烯、2 种酸、1 种杂环和 5 种烷烃(如表 1 所示)。

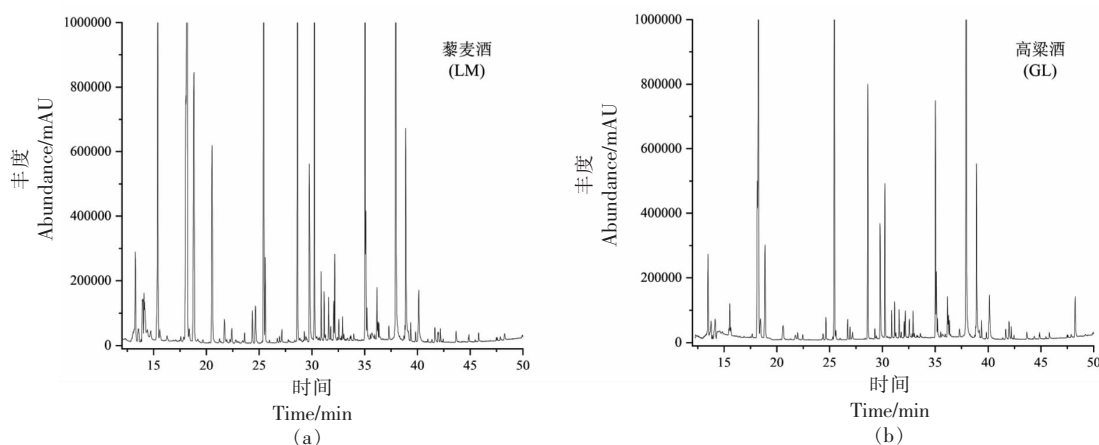


图 1 藜麦酒和高粱酒挥发性风味成分 GC-MS 总离子流图

Fig.1 GC-MS total ion current chromatogram of volatile flavor components in quinoa wine and sorghum wine

表 1 通过 GC-MS 和 GC-IMS 检测出藜麦酒和高粱酒中总挥发性风味成分的数量与比例

Table 1 The quantity and proportion of total volatile flavor components in quinoa wine and sorghum wine were identified by GC-MS and GC-IMS

挥发性 风味成分	GC-MS				GC-IMS			
	藜麦酒 (LM)		高粱酒 (GL)		藜麦酒 (LM)		高粱酒 (GL)	
	种类/个	相对含量/%	种类/个	相对含量/%	种类/个	相对含量/%	种类/个	相对含量/%
醇类	12	35.71	6	34.47	11	25.37	8	29.61
酯类	18	37.58	12	46.17	23	47.66	19	44.48
醛类	6	14.42	2	5.67	8	5.15	5	3.3
萜烯类	5	4.88	2	2.55	2	0.58	2	0.79
酸类	2	2.42	2	3.98	1	3.03	1	3.52
酮类	0	0	0	0	3	9.87	3	6.81
杂环类	1	0.25	1	1.41	1	12.2	1	11.4
烷烃类	5	4.75	4	5.55	0	0	0	0
合计	49	100	29	100	49	100	39	100

藜麦酒和高粱酒挥发性风味成分的 GC-MS 热图如图 2 所示。为了进一步了解藜麦酒和高粱酒的差异, 以确定的全部 52 种成分的相对含量为变量, 对每个变量进行归一化处理, 得到成品酒的挥发性风味成分变化热图。颜色越红代表相对含量越高, 越偏向蓝色代表相对含量越低。如图 2 所示, 藜麦酒中存在着 23 个独有的挥发性风味成

分, 包括仲丁醇、正己醇、1-戊醇、乙酸乙酯、己酸丙酯、乙酸苯乙酯、戊酸乙酯、月桂酸乙酯、乙醛、异戊醛、苯乙醛、*D*-柠檬烯、 α -古朱烯、石竹烯、糠醇、3-辛醇、(*R*)-(-)-2-丁醇、6-甲基-3-庚醇、2-羟基癸酸乙酯、4-乙基苯甲酸庚酯、2-羟基-3-甲基苯甲醛、2-氨基-6-甲基苯甲酸、十三烷, 其中 *D*-柠檬烯、 α -古朱烯和石竹烯是在蒸馏白酒中很

少被报道过的 3 种萜烯类化合物。而有报道表明, *D*-柠檬烯、 α -古朱烯和石竹烯在药材中被检测出,其主要来源分别是添加的陈皮、砂仁和丁香^[22],而萜烯又是明显的一类具有芳香性的特征

香气物质^[23],从而增加了藜麦酒的特征香型。高粱酒中仅有 3 个独有的挥发性风味成分,包括乙酸异戊酯、2-氨基-5-甲基苯甲酸和 2-戊基呋喃。

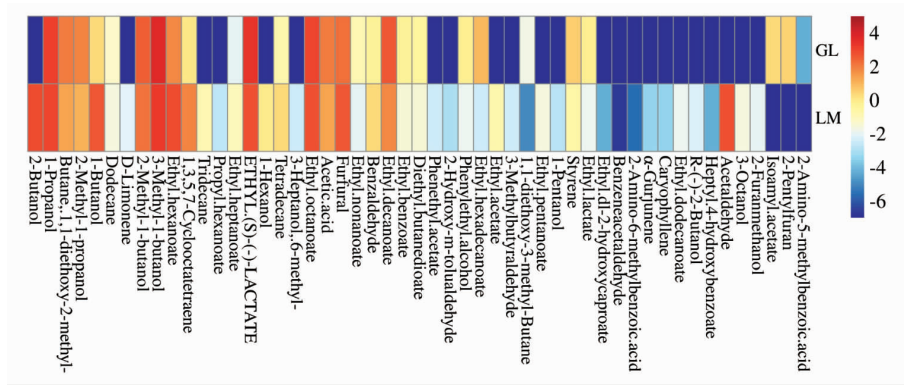


图 2 藜麦酒和高粱酒挥发性风味成分 GC-MS 热图

Fig.2 GC-MS heat map of volatile flavor components in quinoa wine and sorghum wine

2.2 藜麦酒和高粱酒挥发性风味成分 GC-IMS 分析

利用 GC-IMS 方法检测出藜麦酒和高粱酒挥发性风味成分种类和相对含量如表 1 所示。由表 1 可见,藜麦酒中检测出 49 种挥发性风味成分,

包括 11 种醇、23 种酯、8 种醛、2 种萜烯、1 种酸、3 种酮、1 种杂环,其中某些物质包括单体、二聚体和三聚体;高粱酒中检测出 39 种挥发性风味成分,包括 8 种醇、19 种酯、5 种醛、2 种萜烯、1 种酸、3 种酮、1 种杂环。

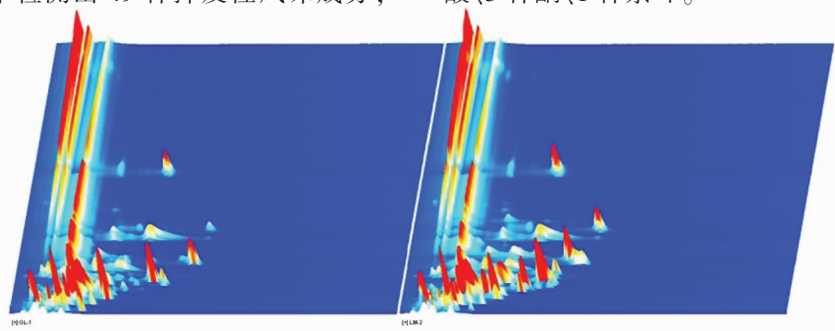


图 3 藜麦酒和高粱酒的三维 GC-IMS 谱图

Fig.3 Three-dimensional GC-IMS spectra of quinoa wine and sorghum wine

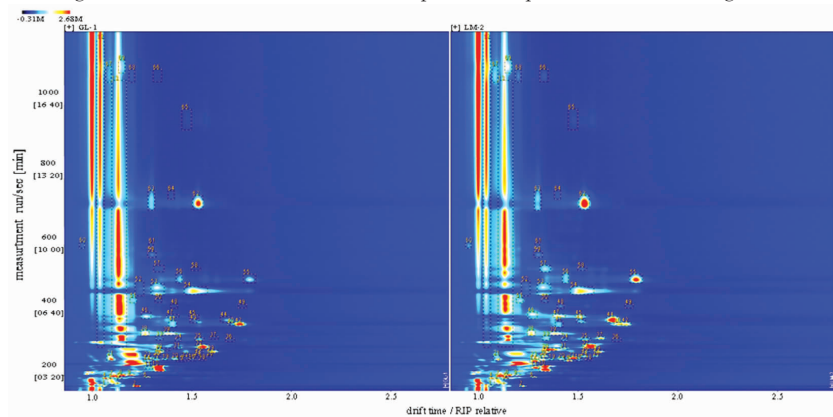


图 4 藜麦酒和高粱酒的二维 GC-IMS 谱图

Fig.4 Two-dimensional GC-IMS spectra of quinoa wine and sorghum wine

利用 Reporter 插件将三维 GC-IMS 谱图 (图 3) 投影到二维的平面上, 得到 GC-IMS 二维俯视图 (图 4)。由图 3、图 4 可知, 大多数挥发性风味成

分信号出现在 110~580 s 的保留时间和 1.0~1.6 ms 的漂移时间。

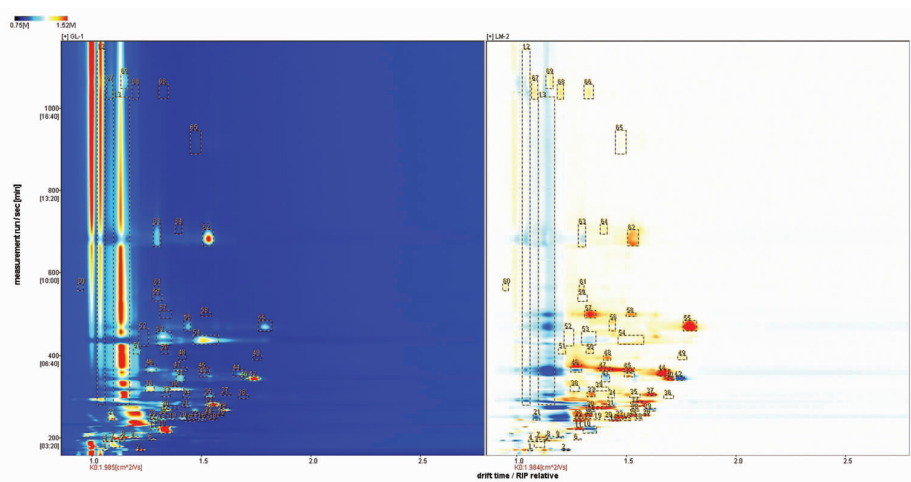


图 5 藜麦酒和高粱酒的二维 GC-IMS 差异谱图

Fig.5 Two-dimensional GC-IMS difference of quinoa wine and sorghum wine

为了呈现藜麦酒与高粱酒的可视化差异, 以高粱酒的谱图为空白扣除, 藜麦酒和高粱酒挥发性风味成分的 GC-IMS 差异谱图如图 5 所示, 红色区域代表丰度高于空白对照, 蓝色区域代表丰度低于空白对照。结果表明, 藜麦酒相比于高粱酒中, 红色区域明显增多, 代表其挥发性风味成分的相对含量高于高粱酒, 并且存在着较多的独有物质, 而蓝色区域少, 说明仅有少部分物质相对含量低于高粱酒。

为了全面直观的分析藜麦酒和高粱酒之间的差异, 利用 LAV 软件的 GalleryPlot 插件选取了藜麦酒和高粱酒样本谱图中物质信号峰形成指纹图谱如图 6 所示。在图 6 中, 右侧 Y 轴为样品的编号, X 轴为样品中鉴定出的全部挥发性成分信号峰, 图中数字代表迁移谱库中未定性的物质。由图 6 可见, 藜麦酒有 12 个独有的挥发性风味成分,

包括仲丁醇、异丁酸乙酯、丙酸异丁酯、丁酸异戊酯、2-甲基丁酸甲酯、戊醛、(E)-2-己烯醛和 5 个未定性的物质, 其中异丁酸乙酯、丙酸异丁酯、丁酸异戊酯、2-甲基丁酸甲酯、(E)-2-己烯醛在白酒中几乎很少被报道。异丁酸乙酯、丙酸异丁酯在哈密瓜的香气中被检测出, 呈现柔和水果酯香味^[24]; 丁酸异戊酯有类似梨的水果香气, 广泛应用于日用香精和食用香精中^[25]; 2-甲基丁酸甲酯被认为是波利尼西亚菠萝果实的特征香气成分^[26]; (E)-2-己烯醛是葡萄浆果常见的香气成分^[27]。以上特有的挥发性成分促进了藜麦酒中特征香气的形成。与此同时, 存在着大量挥发性成分如乙酸丁酯、丁酸乙酯、戊酸乙酯、丙酸乙酯、丁酸异丁酯、丙烯酸甲酯、乙酸丙酯、丁醛、糠醛、正丁醇、异戊烯酮、2,6-二甲基吡嗪等为藜麦酒和高粱酒所共有, 但在藜麦酒中的含量显著高于高粱酒 ($P < 0.05$),

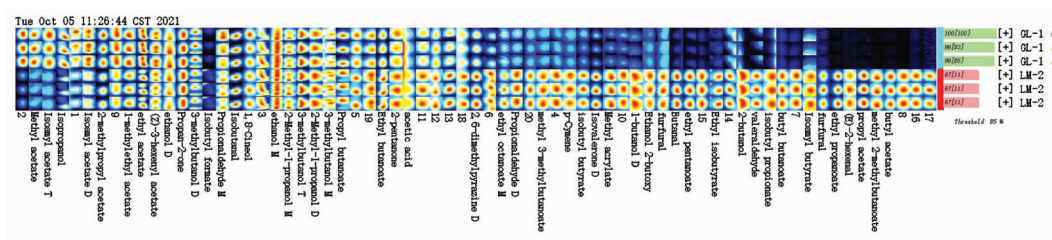


图 6 藜麦酒和高粱酒的挥发性风味成分指纹图谱

Fig.6 Fingerprint map of volatile components in quinoa wine and sorghum wine

说明这些物质也是藜麦酒特征挥发性风味成分之一。上述研究结果表明,同高粱酒相比,藜麦酒存在众多独有的特征挥发性风味成分。

2.3 GC-MS 和 GC-IMS 检测藜麦酒和高粱酒中挥发性风味成分的综合比较分析

GC-MS 和 GC-IMS 检测出藜麦酒和高粱酒中总挥发性风味成分的数量与比例如表 1 所示。由表 1 可见,酯类是种类最多、占比最高的一类挥发性风味成分,构成了藜麦酒和高粱酒中的主要挥发性风味物质。世界上其它蒸馏酒是以醇香为主,然而中国白酒的整体香气则是以酯香为主^[28],说明藜麦酒与中国白酒的整体风格一致。采用 GC-MS 方法检测到藜麦酒挥发性风味成分种类(49 种)多于高粱酒(29 种)。GC-MS 和 GC-IMS 鉴定出挥发性风味成分的比较分析如表 2 所示,从表 2 可见,GC-MS 检测到藜麦酒中相对含量大于 6% 的挥发性风味成分由高到低依次为异戊醇(9.21%)、1-丙醇(8.15%)、正己酸乙酯(7.22%)、仲丁醇(7.45%)、(s)-(-)-乳酸乙酯(6.86%)、辛酸乙酯(6.57%)、乙醛(6.53%)、糠醛(6.30%)和正丁醇(6.27%),其中,仲丁醇(麦芽香、烤坚果香)和乙醛(果香、青草香)是藜麦酒中独有的挥发性风味成分;而高粱酒中相对含量大于 6% 的挥发性风味成分由高到低依次为异戊醇(13.79%)、甲酸乙烯酯(11.74%)、(s)-(-)-乳酸乙酯(10.73%)、1-丙醇(9.06%)、辛酸乙酯(7.80%)、癸酸乙酯(6.12%),这些物质在藜麦酒中全部存在,但是其相对含量均低于高粱酒。对比藜麦酒和高粱酒中高丰度的挥发性风味成分,异戊醇(指甲油、臭味)、(s)-(-)-乳酸乙酯(水果香、青草香)、1-丙醇(青草香)和辛酸乙酯(白兰地似的甜香、水果香)是二者共同存在的重要核心挥发性风味成分,整体表现出果香和青草香。GC-MS 测定结果得出,藜麦酒的挥发性风味成分更具有复杂性。

如表 1 所示,采用 GC-IMS 方法检测到藜麦酒挥发性风味成分种类(69 种)也高于高粱酒(57 种),这与 GC-MS 结果相同。藜麦酒总挥发性成分比高粱酒更丰富且复杂的原因可能是由于不同的发酵原料制成的白酒会产生不同的风味物质,这与孙细珍等^[29]研究结果一致。由表 2 可见,藜麦酒相对含量大于 6% 的挥发性风味成分由高到低

依次为乙酸乙酯(19.14%)、2,6-二甲基吡嗪(12.20%)、异戊醇(9.83%)、丁酸乙酯(7.70%)、戊酸乙酯(6.73%)和异戊烯酮(6.64%),其中戊酸乙酯(水果香、花香、甜香)和异戊烯酮(新鲜的青草味)是藜麦酒中显著高于高粱酒的挥发性风味成分;而高粱酒中相对含量大于 6% 的挥发性风味成分由高到低依次为乙酸乙酯(16.50%)、异戊醇(12.10%)、2,6-二甲基吡嗪(11.40%)和丁酸乙酯(6.82%)。对比藜麦酒和高粱酒中高丰度的挥发性风味成分,异戊醇(指甲油、臭味)、乙酸乙酯(菠萝香、水果香)、2,6-二甲基吡嗪(坚果味)和丁酸乙酯(菠萝香、花香、苹果香)是二者共同存在的重要核心挥发性风味成分,整体表现出果香和花香。通过 GC-IMS 测得的藜麦酒挥发性风味成分同样更具复杂性,这与 GC-MS 结果相同。

GC-MS 和 GC-IMS 方法检测到相同的物质为仲丁醇、正丁醇、异丁醇、异戊醇、乙酸乙酯、辛酸乙酯、戊酸乙酯、乙酸异戊酯、糠醛和乙酸。其中仲丁醇为 GC-MS 和 GC-IMS 共同检测出藜麦酒中独有的挥发性风味成分,然而有报道表明,仲丁醇是白酒中的重要风味物质,同时也是呈现果香、酒香的关键成分^[29];异丁醇、异戊醇、乙酸和乙酸异戊酯为 GC-MS 和 GC-IMS 共同检测出高粱酒中的相对含量明显高于藜麦酒的挥发性风味成分,然而异丁醇、异戊醇等高级醇和乙酸具有指甲油与溶剂气味,含量过高是引起饮用后头痛口干的原因之一^[29],这说明藜麦酒降低了这些不愉快气味物质的相对含量;正丁醇、乙酸乙酯、戊酸乙酯和糠醛为 GC-MS 和 GC-IMS 共同检测出为藜麦酒中的相对含量均高于高粱酒的挥发性风味成分。烷烃类化合物在 GC-IMS 中并没有检测出来,这可能是由于 GC-MS 和 GC-IMS 的测定原理不相同,GC-IMS 的测定依靠化合物的质子亲和力,由于烷烃的质子亲和力比水弱,因此 GC-IMS 无法检测出烷烃类物质^[30],此外 GC-IMS 测定采取直接进样法,样品不需要进行任何前处理,但 GC-MS 测定采取固相微萃取法,样品需要经过萃取头富集后再进行测定,从而这一过程可能对挥发性风味成分的种类和含量产生了影响。虽然二者测定的挥发性风味成分和含量不同,但藜麦酒的整体化合物数量均比高粱酒高,这个结果是相

表 2 通过 GC-MS 和 GC-IMS 检测出挥发性风味成分的比较分析
Table 2 Comparative analysis of volatile flavor compounds identified by GC-MS and GC-IMS

编号	化合物中文名	化合物英文名(缩写)	香气描述	GC-MS 相对含量/%		GC-IMS 相对含量/%	
				LM	GL	LM	GL
	醇类	Alcohols					
V1	1-丙醇	1-propanol	青草香 ^[29]	8.15 ± 0.53	9.06 ± 1.24	ND	ND
V2	仲丁醇	2-butanol	麦芽香、烤坚果香 ^[29]	7.45 ± 0.26	ND	2.86 ± 0.04	ND
V3	异丁醇	Isobutanol	溶剂、苦 ^[29]	2.14 ± 0.39	3.87 ± 0.11	ND	ND
V4	异丁醇 M	Isobutanol M	溶剂、苦 ^[29]	ND	ND	1.64 ± 0.01	2.59 ± 0.04
V5	异丁醇 D	Isobutanol D	溶剂、苦 ^[29]	ND	ND	1.82 ± 0.04	2.38 ± 0.02
V6	正丁醇	n-butanol	醇香 ^[29]	5.27 ± 0.46	1.24 ± 1.25	ND	ND
V7	正丁醇 D	n-butanol D	醇香 ^[29]	ND	ND	1.76 ± 0.03	0.70 ± 0.04
V8	2-甲基-1-丁醇	2-methyl-1-butanol	葡萄酒香、醇香 ^[31]	4.35 ± 0.16	5.73 ± 0.21	ND	ND
V9	异戊醇	Isoamyl alcohol	指甲油、臭味 ^[29]	6.21 ± 0.47	13.79 ± 1.49	ND	ND
V10	异戊醇 D	Isopentanol D	指甲油、臭味 ^[29]	ND	ND	4.69 ± 0.07	7.07 ± 0.17
V11	异戊醇 T	Isopentanol T	指甲油、臭味 ^[29]	ND	ND	9.83 ± 0.07	12.1 ± 0.09
V12	异戊醇 M	Isopentanol M	指甲油、臭味 ^[29]	ND	ND	0.89 ± 0.02	1.78 ± 0.04
V13	正己醇	n-hexanol	青草香、花香 ^[29,32]	1.00 ± 0.07	ND	ND	ND
V14	3-辛醇	3-octanol	花香 ^[18]	0.32 ± 0.02	ND	ND	ND
V15	(R)-(-)-2-丁醇	(R)-(-)-2-butanol	果香、洋葱味、橡胶味 ^[29]	0.22 ± 0.01	ND	ND	ND
V16	2-丁氧基乙醇	2-butoxyethanol	-	ND	ND	0.82 ± 0.02	0.52 ± 0.03
V17	1-戊醇	1-pentanol	水果香 ^[29]	0.14 ± 0.00	ND	ND	ND
V18	苯乙醇	Phenylethanol	玫瑰香、蜂蜜香 ^[31]	0.27 ± 0.08	0.87 ± 0.05	ND	ND
V19	异丙醇	Isopropanol	花香 ^[18]	ND	ND	1.06 ± 0.01	2.47 ± 0.01
V20	6-甲基-3-庚醇	6-methyl-3-heptanol	花香 ^[18]	0.19 ± 0.01	ND	ND	ND
	酯类	Esters					
V21	乙酸乙酯	Ethyl acetate	菠萝香、水果香 ^[29]	0.57 ± 0.01	ND	18.14 ± 0.07	16.5 ± 0.34
V22	正己酸乙酯	Ethyl caproate	果香、酒香、粮香 ^[31]	9.22 ± 0.12	3.49 ± 2.31	ND	ND
V23	己酸丙酯	Propyl hexanoate	水果香、酯香、粮食香 ^[33]	0.16 ± 0.02	ND	ND	ND
V24	庚酸乙酯	Ethyl heptanoate	水果香、花香 ^[29,31]	0.52 ± 0.03	0.25 ± 0.03	ND	ND
V25	(s)-(-)-乳酸乙酯	(s)-(-)-Ethyl lactate	水果香、青草香 ^[29,32]	8.86 ± 0.34	10.73 ± 0.22	ND	ND
V26	甲酸乙烯酯	Vinyl formate	-	5.97 ± 0.15	11.74 ± 0.34	ND	ND
V27	辛酸乙酯	Ethyl octanoate	白兰地甜香 ^[31] 、水果香 ^[29]	6.57 ± 0.28	7.80 ± 2.01	ND	ND
V28	辛酸乙酯 M	Ethyl octanoate M	白兰地甜香 ^[31] 、水果香 ^[29]	ND	ND	0.44 ± 0.01	0.44 ± 0.02
V29	壬酸乙酯	Ethyl nonanoate	酯香、蜜香、水果香 ^[29,31]	0.25 ± 0.01	0.53 ± 0.05	ND	ND
V30	癸酸乙酯	Ethyl decanoate	菠萝香、水果香、花香 ^[29,31]	3.40 ± 0.18	6.12 ± 2.57	ND	ND

(续表 2)

编号	化合物中文名	化合物英文名(缩写)	香气描述	GC-MS 相对含量/%		GC-IMS 相对含量/%	
				LM	GL	LM	GL
V31	苯甲酸乙酯	Ethyl benzoate	花香、药香 ^[29]	0.36 ± 0.03	0.84 ± 0.06	ND	ND
V32	丁二酸二乙酯	Diethyl succinate	水果香、甜香 ^[29,32]	0.37 ± 0.05	0.75 ± 0.02	ND	ND
V33	乙酸苯乙酯	Phenylethyl acetate	玫瑰花香 ^[29]	0.18 ± 0.01	ND	ND	ND
V34	棕榈酸乙酯	Ethyl palmitate	坚果香 ^[32]	0.18 ± 0.01	1.85 ± 0.08	ND	ND
V35	戊酸乙酯	Ethyl valerate	水果香、花香、甜香 ^[31]	0.32 ± 0.02	ND	3.73 ± 0.05	1.43 ± 0.11
V36	乳酸乙酯	Ethyl lactate	水果香、青草香 ^[29,32]	0.28 ± 0.02	0.93 ± 0.03	ND	ND
V37	2-羟基癸酸乙酯	Ethyl 2-hydroxydecanoate	菠萝香、水果香、花香 ^[33]	0.05 ± 0.00	ND	ND	ND
V38	月桂酸乙酯	Ethyl laurate	甜香、水果香 ^[31]	0.27 ± 0.01	ND	ND	ND
V39	4-羟基苯甲酸庚酯	4-Hydroxybenzoate heptyl ester	-	0.05 ± 0.00	ND	ND	ND
V40	乙酸异戊酯	Isoamyl acetate	香蕉香、甜香、苹果香 ^[29,31]	ND	1.21 ± 0.05	ND	ND
V41	乙酸异戊酯 T	Isoamyl acetate T	香蕉香、甜香、苹果香 ^[29,31]	ND	ND	1.86 ± 0.02	4.23 ± 0.08
V42	乙酸异戊酯 D	Isoamyl acetate D	香蕉香、甜香、苹果香 ^[29,31]	ND	ND	1.12 ± 0.00	2.18 ± 0.03
V43	乙酸甲酯	Methyl acetate	-	ND	ND	0.40 ± 0.00	0.90 ± 0.03
V44	乙酸异丁酯	Isobutyl acetate	-	ND	ND	0.90 ± 0.01	1.72 ± 0.07
V45	乙酸异丙酯	Isopropyl acetate	-	ND	ND	1.20 ± 0.00	1.83 ± 0.04
V46	乙酸叶醇酯	Leaf acetate	香蕉香 ^[34]	ND	ND	2.97 ± 0.08	4.41 ± 0.18
V47	甲酸异丁酯	Isobutyl formate	-	ND	ND	0.32 ± 0.00	0.20 ± 0.01
V48	丁酸丙酯	Propyl butyrate	-	ND	ND	2.03 ± 0.01	2.15 ± 0.02
V49	丁酸乙酯	Ethyl butyrate	菠萝香、花香 ^[31] 、苹果香 ^[32]	ND	ND	7.70 ± 0.05	6.82 ± 0.11
V50	异戊酸甲酯	Methyl isovalerate	-	ND	ND	0.23 ± 0.01	0.16 ± 0.01
V51	丁酸异丁酯	Isobutyl butyrate	-	ND	ND	0.19 ± 0.00	0.13 ± 0.01
V52	丙烯酸甲酯	Methyl acrylate	水果香 ^[34]	ND	ND	1.34 ± 0.02	0.60 ± 0.02
V53	异丁酸乙酯	Ethyl isobutyrate	水果香、花香 ^[18]	ND	ND	0.03 ± 0.00	ND
V54	丙酸异丁酯	Isobutyl propionate	甜香 ^[34]	ND	ND	0.77 ± 0.01	ND
V55	丁酸丁酯	Butyl butyrate	-	ND	ND	1.54 ± 0.01	0.50 ± 0.01
V56	丁酸异戊酯	Isoamyl butyrate	水果香、花香 ^[31]	ND	ND	0.30 ± 0.01	ND
V57	丙酸乙酯	Ethyl propionate	香蕉 ^[31]	ND	ND	0.87 ± 0.02	0.06 ± 0.00
V58	乙酸丙酯	Propyl acetate	奶酪味 ^[18]	ND	ND	1.13 ± 0.01	0.16 ± 0.00
V59	2-甲基丁酸甲酯	Methyl 2-methylbutyrate	水果香 ^[31]	ND	ND	0.39 ± 0.01	ND
V60	乙酸丁酯	Butyl acetate	苦味、果香 ^[29]	ND	ND	0.10 ± 0.01	0.06 ± 0.00
V61	醛类	aldehyde	-	-	-	-	-
V61	糠醛	furfural	焦糖味、坚果香 ^[29,32]	6.30 ± 0.26	4.81 ± 0.59	ND	ND
V62	糠醛 D	Furfural D	焦糖味、坚果香 ^[29,32]	ND	ND	0.41 ± 0.02	ND
V63	糠醛 M	Furfural M	焦糖味、坚果香 ^[29,32]	ND	ND	1.02 ± 0.03	0.99 ± 0.06
V64	苯甲醛	Benzaldehyde	坚果香、杏仁香 ^[29,32]	1.27 ± 0.10	0.86 ± 0.09	ND	ND
V65	2-羟基-3-甲基苯甲醛	2-hydroxy-3-methylbenzaldehyde	-	0.12 ± 0.00	ND	ND	ND

(续表 2)

编号	化合物中文名	化合物英文名(缩写)	香气描述	GC-MS 相对含量/%		GC-IMS 相对含量/%	
				LM	GL	LM	GL
V66	异戊醛	Isovaleraldehyde	花香、水果香 ^[29]	0.19 ± 0.02	ND	ND	ND
V67	苯乙醛	Phenylacetaldehyde	玫瑰花香 ^[29]	0.01 ± 0.00	ND	ND	ND
V68	乙醛	acetaldehyde	果香、青草香 ^[29]	6.53 ± 0.14	ND	ND	ND
V69	异丁醛	Isobutyraldehyde	麦芽味 ^[18]	ND	ND	0.43 ± 0.00	0.60 ± 0.01
V70	丙醛 D	Propional D	水果香 ^[31]	ND	ND	0.52 ± 0.02	0.37 ± 0.03
V71	丙醛 M	Propional M	水果香 ^[31]	ND	ND	0.63 ± 0.00	0.89 ± 0.03
V72	丁醛	Butyraldehyde	水果香、花香 ^[33]	ND	ND	1.57 ± 0.01	0.45 ± 0.00
V73	戊醛	Glutaraldehyde	油脂味、木香味 ^[5]	ND	ND	0.34 ± 0.00	ND
V74	(E)-2-己烯醛	(E) 2-hexenal	绿草味、花香、水果香 ^[18]	ND	ND	0.23 ± 0.01	ND
	萜烯类	Terpenes					
V75	D-柠檬烯	D-limonene	柑橘香 ^[5]	0.23 ± 0.03	ND	ND	ND
V76	α-古木烯	α-Ancient vermiculene	木质味、脂香味 ^[21]	0.09 ± 0.01	ND	ND	ND
V77	石竹烯	Caryophyllene	丁香香气、松香香气 ^[21]	0.09 ± 0.00	ND	ND	ND
V78	环辛四烯	Cyclooctetraene	花香 ^[21]	3.84 ± 0.46	1.03 ± 0.04	ND	ND
V79	苯乙烯	Styrene	香膏味、汽油味 ^[21]	0.63 ± 0.07	1.52 ± 0.07	ND	ND
V80	p-伞花烃	p-umbrella hydrocarbon	柑橘香、木香 ^[21]	ND	ND	0.12 ± 0.02	0.10 ± 0.01
V81	桉叶油醇	Eucalyptus oleanol	松油香、草药味、樟脑味 ^[35]	0	ND	0.46 ± 0.00	0.69 ± 0.00
	酸类	Acids					
V82	乙酸	Acetic acid	醋酸、酸臭 ^[21]	2.40 ± 0.14	3.93 ± 0.84	3.03 ± 0.01	3.52 ± 0.20
V83	2-氨基-6-甲基苯甲酸	2-amino-6-methylbenzoic acid	-	0.02 ± 0.00	ND	ND	ND
V84	2-氨基-5-甲基苯甲酸	2-amino-5-methylbenzoic acid	-	ND	0.05 ± 0.01	ND	ND
	酮类	Ketones					
V85	丙酮	acetone	-	ND	ND	3.15 ± 0.01	3.90 ± 0.05
V86	2-戊酮	2-pentanone	水果香、蔬菜味 ^[21]	ND	ND	0.08 ± 0.00	0.15 ± 0.01
V87	异戊烯酮 D	Isopentenone D	新鲜的青草味 ^[21]	ND	ND	6.64 ± 0.14	2.76 ± 0.24
	杂环类	Heterocycles					
V88	糠醇	Furfuryl alcohol	甜的、类似面包的焦糖香 ^[5]	0.25 ± 0.00	ND	ND	ND
V89	2-戊基咪喃	2-pentylfuran	焦糖味、麦芽味 ^[18]	ND	1.41 ± 0.05	ND	ND
V90	2,6-二甲基吡嗪 D	2,6-dimethylpyrazine D	坚果味 ^[18]	ND	ND	12.2 ± 0.21	11.4 ± 0.47
	烷烃类	Alkanes					
V91	十二烷	Dodecane	烷烃 ^[18]	0.25	1.41	12.2	11.4
V92	十三烷	Tridecane	烷烃 ^[18]	0.34 ± 0.04	0.44 ± 0.02	ND	ND
V93	十四烷	Tetradecane	烷烃 ^[18]	0.56 ± 0.01	ND	ND	ND
V94	1,1-二乙氧基-2-甲基丁烷	1,1-diethoxy-2-methylbutane	烷烃 ^[18]	1.31 ± 0.04	0.61 ± 0.10	ND	ND
V95	1,1-二乙氧基-3-甲基丁烷	1,1-diethoxy-3-methylbutane	水果香 ^[29]	2.51 ± 0.12	4.20 ± 0.30	ND	ND
			水果香 ^[29]	0.03 ± 0.00	0.30 ± 0.03	ND	ND

注:LM, GL 分别代表藜麦酒和高粱酒,每个数值均以平均值±标准差(n=3)表示,并以每个化合物的峰面积除以总峰面积进行相对定量;M:单倍体;D:二倍体;T:三倍体;ND:未检测到;-:文献中未发现气味描述信息。

同的。

2.4 藜麦酒和高粱酒的感官评价比较

感官评价结果如图 7 所示。由图 7 可见,藜麦酒的粮香和果香显著高于高粱酒($P<0.05$);高粱酒的糟香显著高于藜麦酒($P<0.05$);同高粱酒相比,藜麦酒酒体更为丰满,二者在花香上差异不显著。藜麦酒的粮香和果香更为突出,可能与其己酸丙酯(水果香、酯香、粮食香)、月桂酸乙酯(水果香、甜香)、仲丁醇(麦芽香、烤坚果香)、异戊醛(花香、水果香)、乙醛(果香、青草香)等独特物质的存在以及正己酸乙酯(果香、酒香、粮香)和糠醛(焦糖味、坚果香)等物质的相对含量高于高粱酒有关;高粱酒的糟香更为突出,可能与其独有的 2-戊基呋喃(焦糖味、麦芽味)和高比例的异戊醇(指甲油、臭味)有关。感官评价结果还表明,藜麦酒醇甜以及醇厚感等口感明显优于高粱酒,这可能和挥发性风味成分含量和种类的不同有关^[33]。藜麦酒中较多的醇类、酯类和醛类物质赋予起丰满的酒体和醇厚感。

3 结论

本研究利用 GC-MS 方法,结合可视化风味分析方法 GC-IMS,通过与高粱酒对比,分析了藜麦酒的挥发性特征风味成分。GC-MS 检测到藜麦酒和高粱酒中分别含有 49 种和 29 种挥发性风味成分,其中藜麦酒中含有 23 种独有的物质,高粱酒含有 3 种。GC-IMS 检测到藜麦酒和高粱酒中分别含有 49 和 39 种挥发性风味成分,其中藜麦酒中含有 12 种独有的物质,而高粱酒中的所有物质均在藜麦酒中被检测到。

热图和指纹图谱分析可知,仲丁醇、正己醇、1-戊醇、乙酸乙酯、己酸丙酯、乙酸苯乙酯、戊酸乙酯、月桂酸乙酯、乙醛、异戊醛、苯乙醛、*D*-柠檬烯、 α -古朱烯、石竹烯、糠醇等是 GC-MS 检测出藜麦酒中独有的重要挥发性风味成分,其中 *D*-柠檬烯、 α -古朱烯、石竹烯在白酒中少见报道;异戊醇、(s)-(-)-乳酸乙酯、1-丙醇和辛酸乙酯是 GC-MS 检测出藜麦酒和高粱酒中共同存在的高含量挥发性风味成分;仲丁醇、异丁酸乙酯、丙酸异丁酯、丁酸异戊酯、2-甲基丁酸甲酯、戊醛、(*E*)-2-己烯醛是 GC-IMS 检测出藜麦酒中独有的挥发性

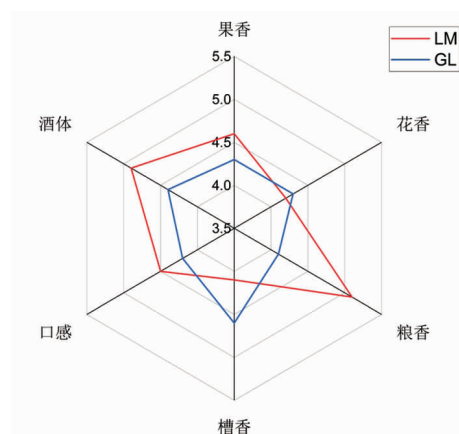


图 7 藜麦酒和高粱酒的风味特征图谱

Fig.7 Flavor characteristics profile of quinoa wine and sorghum wine

风味成分,其中异丁酸乙酯、丙酸异丁酯、丁酸异戊酯、2-甲基丁酸甲酯、(*E*)-2-己烯醛在白酒中少见报道。异戊醇、乙酸乙酯、2,6-二甲基吡嗪、丁酸乙酯是 GC-IMS 检测出藜麦酒和高粱酒中共同存在的高含量挥发性风味成分。藜麦酒中异丁醇、异戊醇和乙酸的相对含量显著低于高粱酒。

感官评价结果表明,藜麦酒的粮香和果香得分高于高粱酒,二者在花香上无明显的差异。整体而言,藜麦酒的酒体和口感均高于高粱酒。因此,GC-MS 与 GC-IMS 相结合可以更全面地识别白酒中的挥发性风味成分,从而辨识出藜麦酒中的特征香气,对延长藜麦产业链,开发藜麦酒提供了思路。

参 考 文 献

- [1] 朱伟岸, 吴群, 李记明, 等. 白酒酿造谷物类原料中结合态香气物质的分离及检测分析[J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(5): 456-462.
ZHU W A, WU Q, LI J M, et al. Isolation and analysis of bound aroma compounds in different raw brewing materials[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2015, 34(5): 456-462.
- [2] 吴幼茹, 刘诗宇, 樊晓璐, 等. GC-O-MS 分析 5 种酿酒原料中蒸煮香气成分[J]. 食品科学, 2016, 37(24): 94-98.
WU Y R, LIU S Y, FAN X L, et al. Analysis of

- aroma components of five different cooked grains used for chinese liquor production by GC-O-MS[J]. Food Science, 2016, 37(24): 94-98.
- [3] 刘鹤祥. 藜麦醋酿造工艺研究[D]. 太古: 山西农业大学, 2020.
LIU H X. Study on brewing technology of quinoa vinegar [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2020.
- [4] 孔晓妍, 姚高毅, 王书琪, 等. 不同澄清剂对藜麦酒澄清作用的研究[J]. 食品工程, 2021(3): 46-49.
KONG X Y, YAO G Y, WANG S Q, et al. Study on the clarifying effect of different clarifying agents on quinoa wine[J]. Food Engineering, 2021(3): 46-49.
- [5] VILCACUNDO R, HERNANDEZ-LEDESMA B. Nutritional and biological value of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)[J]. Current Opinion in Food Science, 2017, 14: 1-6.
- [6] RAZZAGHI F, JACOBSEN S E, JENSEN C R, et al. Ionic and photosynthetic homeostasis in quinoa challenged by salinity and drought - Mechanisms of tolerance[J]. Functional Plant Biology, 2014, 42(2): 136-148.
- [7] RAZZAGHI F, AHMADI S H, JACOBSEN S E, et al. Effects of salinity and soil-drying on radiation use efficiency, water productivity and yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)[J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2012, 198(3): 173-184.
- [8] ZHU N Q, SHENG S Q, LI D J, et al. Antioxidative flavonoid glycosides from quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd) [J]. Journal of Food Lipids, 2001, 8(1): 37-44.
- [9] 方颂平, 刘露, 吴文睿, 等. 小米对浓香型白酒酿造及风格特征的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(8): 122-127.
FANG S P, LIU L, WU W R, et al. Influence of millet in the brewing and flavor characteristics of strong flavor Baijiu[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(8): 122-127.
- [10] 汤道文, 谢玉球, 朱法余, 等. 白酒中的微量成分及与白酒风味技术发展的关系[J]. 酿酒科技, 2010(5): 78-81.
TANG D W, XIE Y Q, ZHU F Y, et al. Relations between microconstituents in liquor and the development of liquor flavor techniques[J]. Making Science & Technology, 2010(5): 78-81.
- [11] CHEN X A, CHEN H Q, XIAO J, et al. Variations of volatile flavour compounds in finger citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis*) pickling process revealed by E-nose, HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. Food Research International, 2020, 138(Part A): 109717.
- [12] REALE S, DI CECCO V, DI DONATO F, et al. Characterization of the volatile profile of cultivated and wild-type italian celery (*Apium graveolens* L.) varieties by HS-SPME/GC-MS[J]. Applied Sciences-Basel, 2021, 11(13): 5855.
- [13] 郭云霞, 李娜, 程伟, 等. 液液萃取与顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱法分析种子藜合香白酒香气成分的比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(23): 9056-9061.
GUO Y X, LI N, CHENG W, et al. Comparison of volatile aroma components of Jinzhongzi Fuhe-xiang Baijiu by liquid-liquid extraction and headspace solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(23): 9056-9061.
- [14] ARMENTA S, ALCALA M, BLANCO M. A review of recent, unconventional applications of ion mobility spectrometry(IMS)[J]. Analytica Chimica Acta, 2011, 703(2): 114-123.
- [15] WANG S Q, CHEN H T, SUN B G. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)[J]. Food Chemistry, 2020(315): 126158.
- [16] 李娟, 任芳, 甄大卫, 等. 气相色谱-离子迁移谱分析乳制品挥发性风味化合物[J]. 食品科学, 2021, 42(10): 235-240.
LI J, REN F, ZHEN D W, et al. Analysis of volatile flavor compounds dairy products by gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science, 2021, 42(10): 235-240.
- [17] 顾双, 任芳, 韦真博, 等. 基于气相-离子迁移谱技术快速鉴定黄酒酒龄及品牌[J]. 中国食品学报, 2020, 20(9): 248-255.
GU S, REN F, WEI Z B, et al. Rapid age and brand identification of yellow wine based on gas-ion mobility spectrometry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(9): 248-255.
- [18] GUO X Y, SCHWAB W, HO C T, et al. Characterization of the aroma profiles of oolong tea made

- from three tea cultivars by both GC-MS and GC-IMS[J]. *Food Chemistry*, 2022(376): 131933.
- [19] CHEN Y, LI P, LIAO L Y, et al. Characteristic fingerprints and volatile flavor compound variations in Liuyang Douchi during fermentation via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. *Food Chemistry*, 2021(361): 130055.
- [20] CHEN J H, TAO L N, ZHANG T, et al. Effect of four types of thermal processing methods on the aroma profiles of acidity regulator-treated tilapia muscles using E-nose, HS-SPME-GC-MS & nbsp; and HS-GC-IMS[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2021(147): 111585.
- [21] LANGOS D, GRANVOGL M, SCHIEBERLE P. Characterization of the key aroma compounds in two bavarian wheat beers by means of the sensomics approach[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(47): 11303-11311.
- [22] 王志娟, 张生万, 赵景龙, 等. 竹叶青酒易挥发成分顶空固相微萃取-气相色谱-质谱分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(8): 253-258.
- WANG Z J, ZHANG S W, ZHAO J L, et al. Analysis of volatile compounds in Zhuyeqing liquor by headspace solid phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Food Science*, 2014, 35(8): 253-258.
- [23] LI T, ZHAO M, YANG J J, et al. Characterization of key aroma-active compounds in Bobaizhi (*Angelica dahurica*) before and after boiling by sensomics approach[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022(105): 104247.
- [24] 庄楷杏, 陈泽娜. 用热脱附方法分析哈密瓜香气成分[J]. *饮料工业*, 2022, 25(1): 4.
- ZHUANG K X, CHEN Z N. Analysis of aroma components of cantaloupe by thermal desorption method[J]. *Beverage Industry*, 2022, 25(1): 4.
- [25] 文瑞明, 俞善信, 罗新湘, 等. 硫酸氢钠催化合成丁酸异戊酯[J]. *分子科学学报*, 2001, 17(3): 186-188.
- WEN R M, YU S X, LUO X X, et al. Synthesis of isoamyl butyrate catalyzed by sodium bisulfate[J]. *Journal of Molecular Science*, 2001, 17(3): 186-188.
- [26] 魏长宾, 刘胜辉, 陆新华, 等. 6 个菠萝品种香气成分及特征香气分析[J]. *广东农业科学*, 2015, 42(24): 7.
- WEI C B, LIU S H, LU X H, et al. Analysis of aroma compounds and characteristic aroma in 6 pineapple varieties[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2015, 42(24): 7.
- [27] JI X H, WANG B L, WANG X D, et al. Effects of different color paper bags on aroma development of Kyoho grape berries[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(1): 70-82.
- [28] 沈怡方. 白酒生产技术全书[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998: 11-15.
- SHEN Y F. The complete book of white wine production technology[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1998: 11-15.
- [29] 孙细珍, 熊亚青, 杜佳炜, 等. 不同品种高粱小曲白酒感官表征及重要风味物质对比分析[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(9): 34-40.
- SUN X Z, XIONG Y Q, DU J W, et al. Comparative analysis of aroma compounds in Xiaoqu Baijiu fermented by different varieties of sorghum[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(9): 34-40.
- [30] 夏兰欣, 周贵华, 王广, 等. GC-MS 和 GC-IMS 分析食用油对熟炕马铃薯挥发性成分的影响[J]. *中国粮油学报*, 2022, 12: 236-245.
- XIA L X, ZHOU G H, WANG G, et al. Conjoint analysis of the effect of edible oil on the volatile components of cooked kang potatoes by GM-MS and GC-IMS[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 12: 236-245.
- [31] 马宇, 黄永光. 清酱香型白酒挥发性风味组分及香气特征[J]. *食品科学*, 2019, 40(20): 241-248.
- MA Y, HUANG Y G. Volatile components and aroma characteristics of Fen-Maotai-flavored liquor[J]. *Food Science*, 2019, 40(20): 241-248.
- [32] 郝飞龙, 范莹, 延莎, 等. HS-SPME/LLME-GC-MS 结合感官品评分析山西清香型恒酒香气成分[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(3): 203-211.
- HAO F L, FAN Y, YAN S, et al. Analysis of aroma components in fen-flavor Hengjiu from Shanxi by HS-SPME/LLME-GC-MS and sensory evaluation [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(3): 203-211.
- [33] 胡晓龙, 田瑞杰, 樊建辉, 等. 浓香型白酒挥发性化合物香气贡献及其地域特征研究进展[J]. *轻工学报*, 2022, 37(2): 1-14.
- HU X L, TIAN R J, FAN J H, et al. Research progress on the aroma contribution and their regional characteristics of volatile compounds in Chinese

- strong-flavor Baijiu [J]. *Journal of Light Industry*, 2022, 37(2): 1–14.
- [34] 安会敏, 欧行畅, 熊一帆, 等. 茉莉花茶特征香气成分研究[J]. *茶叶科学*, 2020, 40(2): 225–237.
- AN H M, OU X C, XIONG Y F, et al. Study on the characteristic aroma components of jasmine tea [J]. *Journal of Tea Science*, 2020, 40(2): 225–237.
- [35] 高夏洁, 高海燕, 赵镭, 等. SPME-GC-MS 结合 OAV 分析不同产区花椒炸花椒油的关键香气物质[J]. *食品科学*, 2022, 43(4): 208–214.
- GAO X J, GAO H Y, ZHAO L, et al. Analysis of key aroma components in fried zanthoxylum bungeanum oil from different production areas by solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with odor activity value [J]. *Food Science*, 2022, 43(4): 208–214.

Analysis of the Characteristic Volatile Flavor Components of Quinoa Wine by GC-MS and GC-IMS

Chen Hu¹, Suo Ran¹, Liu Yaqiong¹, Zhang Yuhang², Lü Wei³, Wang Jie^{*}

¹College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Hebei Agricultural Products Processing Technology Innovation Center, Baoding 071000, Hebei

²Hebei Hengshui Laobaigan Liquor Co., Ltd., Hebei Baijiu Brewing Technology Innovation Center, Hengshui 053000, Hebei

³National Semi Arid Agricultural Engineering Technology Research Center, Shijiazhuang 050000

Abstract The brewing of quinoa wine using traditional solid-state fermentation method is of great significance to extend the quinoa industry chain. In this study, quinoa and sorghum were used as the main raw materials to brew quinoa wine and sorghum wine by solid-state fermentation, and the volatile flavor components of quinoa wine and sorghum wine were detected by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and gas-ion mobility spectrometry (GC-IMS). The results showed that the total volatile flavor components detected by GC-MS in quinoa wine were 49 and sorghum wine was 29. 23 and 12 unique substances were detected in quinoa wine by GC-MS and GC-IMS, respectively, among which *D*-limonene, α -Gurjunene, caryophyllene, ethyl isobutyrate, isobutyl propionate, isoamyl butyrate, methyl 2-methylbutanoate and (*E*)-2-hexenal were the characteristic volatile components in quinoa wine; Isoamyl alcohol, (s)-(-)-ethyl lactate, 1-propanol, ethyl octanoate, ethyl acetate, ethyl butyrate and 2-dimethylpyrazine were high volatile flavor components common to both quinoa wine and sorghum wine; the relative levels of isobutyl alcohol and isoamyl alcohol with undesirable odor were lower in quinoa wine compared to sorghum wine. The sensory evaluation showed that the quinoa wine had more prominent grain and fruit aromas and a fuller, rounder body, which may be attributed to the unique volatile components at play. This study provides analytical ideas for quinoa wine development.

Keywords quinoa wine; gas chromatography-mass spectrometry; gas chromatography-ion mobility spectrometry; aroma components; sensory evaluation