

基于顶空-气相色谱-离子迁移谱法分析 不同类型精酿啤酒的挥发性香气成分

李凤林^{1,2,3,4*}, 向思敏^{1,2}, 李 静³, 卢忠魁^{1,4}, 王英臣^{1,4}, 刘静雪^{1,4},
钟 宝^{1,4}, 吕艳荣⁵, 霍羽佳⁶, 张春艳⁶

(1. 吉林农业科技学院食品工程学院, 吉林 132101; 2. 长春大学食品科学与工程学院, 长春 130022; 3. 攀西特色作物研究与利用四川省重点实验室, 西昌 615000; 4. 吉林省科技厅酿造技术科技创新中心, 吉林 132101; 5. 吉林省扶余市生态环境监测站, 扶余 131200; 6. 山东海能科学仪器有限公司, 德州 251500)

摘 要: **目的** 基于顶空-气相色谱-离子迁移谱法(headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry, HS-GC-IMS)建立一种快速、准确的精酿啤酒挥发性香气检测方法。**方法** 采用 HS-GC-IMS 对不同来源及类型的精酿啤酒中挥发性组分进行分析, 通过指纹图谱比较挥发性组分差异, 结合主成分分析(principal component analysis, PCA)实现不同类型精酿啤酒区分。**结果** 所检样品中共定性出 54 种挥发性香气成分; 指纹图谱显示, 不同来源及类型的精酿啤酒中挥发性香气成分含量差异显著, 其中自制的 4 种啤酒中风味物质具有各自的特征风味物质成分, 如自制白啤中的香茅醛、2-庚酮、癸酸乙酯, 自制黄啤中的己醛, 自制印度淡色艾尔啤酒中的异丁酸异丁酯、异丁酸-2-甲基丁酯、壬醛、 α -水芹烯, 自制玫瑰啤酒中的乙酸己酯、壬酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯、3-甲基丁酸乙酯等; 采用 PCA 可以实现对不同来源、不同类型啤酒的准确区分。**结论** HS-GC-IMS 可快速检测啤酒中的挥发性香气成分, 其结果直观、准确, 为啤酒类型分析及质量控制提供方法和技术支持。

关键词: 顶空-气相色谱-离子迁移谱法; 精酿啤酒; 挥发性组分; 主成分分析

DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2023.07.046

Analysis of volatile aroma components in different types of craft beer based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry

LI Feng-Lin^{1,2,3,4*}, XIANG Si-Min^{1,2}, LI Jing³, LU Zhong-Kui^{1,4}, WANG Ying-Chen^{1,4},
LIU Jing-Xue^{1,4}, ZHONG Bao^{1,4}, LV Yan-Rong⁵, HUO Yu-Jia⁶, ZHANG Chun-Yan⁶

(1. College of Food Engineering, Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin 132101, China; 2. School of Food Science and Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China; 3. Sichuan Provincial Key Laboratory of Special Crops Research and Utilization in Panxi, Xichang 615000, China; 4. Jilin Province Brewing Technology Innovation Center, Jilin 132101, China; 5. Ecological Environment Monitoring Station in Fuyu City, Fuyu 131200, China; 6. Shandong Haineng Scientific Instrument Co., Ltd., Dezhou 251500, China)

ABSTRACT: Objective To establish a fast and accurate method for the detection of the flavor of craft beer based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS). **Methods** HS-GC-IMS was used to

基金项目: 吉林市科技局重点产业科技平台支撑项目(20190206238)、吉林农业科技学院营养与健康食品科技团队项目(2019)、攀西特色作物研究与利用四川省重点实验室开放基金项目(SZKF2108)

Fund: Supported by the Key Industry Science and Technology Platform Support Project of Jilin Science and Technology Bureau (20190206238), the Nutrition and Health Food Science and Technology Team of Jilin University of Agricultural Science and Technology (2019), and the Panxi Specialty Crops Research and Utilization Key Laboratory of Sichuan Province Open Fund Project (SZKF2108)

***通信作者:** 李凤林, 博士, 教授, 主要研究方向为粮油植物蛋白及酿造功能性食品。E-mail: 568169115@qq.com

***Corresponding author:** LI Feng-Lin, Ph.D, Professor, College of Food Engineering, Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin 132101, China. E-mail: 568169115@qq.com

analyze the volatile components in different sources and types of craft beers. Fingerprint was constructed to characterize the differences of volatile components for the beer samples. Combined with principal component analysis (PCA), the craft beer types were differentiated. **Results** A total of 54 volatile aroma components were identified in the samples. The fingerprint showed that there were significant differences in the content of volatile components in craft beers from different sources and types, and the flavor substances in the 4 homemade beers had their own characteristic flavor substances, such as citronellal, 2-heptanone, ethyl decanoate in homemade white beer, hexanal in homemade yellow beer, isobutyl isobutyrate, 2-methylbutyl isobutyrate, nonanal, α -phellandrene in homemade IPA beer, hexyl acetate, ethyl nonanoate, ethyl 2-methylbutyrate, and ethyl 3-methylbutyrate in homemade rose beer. The PCA results indicated that the beers from different sources and types could be differentiated correctly.

Conclusion HS-GC-IMS method can be used to quickly detect the volatile aroma components in beer, and the results are intuitive and accurate, which provides method and technical support for beer type analysis and quality control.

KEY WORDS: headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry; craft beer; volatile components; principal component analysis

0 引言

精酿啤酒是以麦芽、啤酒花、酵母、某些天然添加物及水为原料,在酿造过程中,不添加与调整风味无关的物质,按传统工艺在小型啤酒生产线内经低温发酵生产的具有各种风味与浓郁口感的一类啤酒^[1]。2019年,中国酒业协会在其颁布的行业标准 T/CBJ3201—2019《工坊啤酒及其生产规范》中也称精酿啤酒为工坊啤酒^[2-4]。与麦汁浓度低、酒花香味不足、口味偏淡的工业啤酒相比,精酿啤酒味道多变、色泽丰富、口感醇厚、酒花和酵母香气浓郁,营养价值更高,深受消费者的喜爱^[5]。自2007年精酿啤酒进入我国上海市场后,目前已有数百款世界知名品牌的精酿啤酒进入我国市场,如拉格(Lager)、艾尔(Ale)、皮尔森(Pilsner)、印度淡色艾尔(IPA)、波特(Porter)、帝国世涛(Imperial Stout)、博克(Bock)等品牌,同时也诞生了大批我国本土精酿啤酒企业,如熊猫精酿、高大师、千岛湖啤酒、莱宝啤酒、蓝堡精酿等,所出产品基本以仿制国外为主^[6]。预计2025年,我国精酿啤酒消费量可达到25亿升,同比增长近30%^[7]。

风味是衡量啤酒品质的重要因素,其对啤酒的风格、口感起决定性作用。精酿啤酒经过低温发酵后会产生醇类、酯类、羰基类、有机酸类、硫化物等上千种风味物质^[8],其中,麦芽是酿造精酿啤酒的主原料之一,其种类与比例的构成对啤酒口感、风味及颜色的变化起重要的决定作用^[9-10]。酒花给予啤酒爽口的苦味和特有香味,其添加方式与添加时间会导致成品啤酒呈现不同的香气,形成新的风味来源^[11-12]。酵母在低温发酵过程中体系会产生醇类、酯类及低级挥发性脂肪酸,产生浓郁的醇、酯香味^[13-15]。近年来,顶空-气相色谱-离子迁移谱法(headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry, HS-GC-IMS)在食品风味分析、质量检测等诸多领域得到了广泛应用^[16-18]。IMS在大气压下根

据离子迁移速度有效分离离子,尤其适用于分离同分异构体和等压化合物,HS-GC-IMS技术将GC的高分离能力与IMS的快速响应特点相结合,样品直接进样,无需前处理,具有高灵敏度、高分辨率和可视化等优势,已成为挥发性风味物质分析检测的新兴技术之一^[19-20]。HS-GC-IMS对酯类、醇类等酒中关键香气物质具有很高的灵敏度,可有效解决GC-MS分析速度较慢和因HS-SPME前处理造成香气物质流失变化等问题,是一种快速、无损、准确的啤酒风味检测方法^[21-23]。

本研究团队于2018年开始研究产香酵母的筛选、啤酒花的添加方式及产品配方优化,开发出10余种精酿啤酒,并在中新吉林食品区相关企业进行的转化,深受消费者的欢迎。但目前并未对啤酒中挥发性香气成分中进行定性、定量分析。德国是精酿啤酒的发源地,其原料选择严格,制作工艺严谨,生产的产品口感醇厚、香气浓郁,是世界精酿啤酒的代表^[24]。为进一步改善本研究团队开发产品的风味和口感,本研究利用HS-GC-IMS将自酿精酿啤酒与德国进口精酿啤酒的风味物质进行分析,找出其中各自的特征风味物质成分,为精酿啤酒品质优化及产业化发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

德国产白啤酒 Y (GERMANY-WHITE-Y)、德国产白啤酒 (GERMANY-WHITE)、德国产黄啤酒 (GERMANY-YELLOW)、德国产黑啤酒 (GERMANY-BLACK) 购于本地商超;自制白啤酒 (WHITE BEER)、自制黄啤酒 (YELLOW BEER)、自制 IPA 啤酒 (IPA BEER)、自制玫瑰啤酒 (ROSE BEER) 由吉林省酿造技术科技创新中心 300 L 小试生产线制备。

2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮、2-壬酮(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

Flavour Spec®气相离子迁移谱(德国 G.A.S.公司); CTC-PAL 3 自动进样器(瑞士 CTC Analytics AG 公司); WAX 石英毛细管色谱柱(15 m×0.53 mm, 1 μm, 美国 RESTEK 公司); MQ425, 300 L 小试生产线(哈尔滨顺成创新科技发展有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

用移液枪量取 1 mL 啤酒样品, 装入 20 mL 顶空瓶中, 拧紧瓶盖。每个样品设置 3 个平行。

1.3.2 HS-GC-IMS 分析条件

顶空进样条件: 孵育温度 40℃, 孵育时间 15 min, 振荡转速 500 r/min, 进样针温度 85℃, 进样体积 500 μL, 每次进样后用高纯氮气(纯度≥99.999%)吹扫进样针 5 min。

GC 分析条件: 色谱柱为 WAX 石英毛细管色谱柱(15 m×0.53 mm, 1 μm), 柱温 60℃(恒温模式), 载气为高纯氮气(纯度≥99.999%), 载气流速梯度: 初始流速为 2 mL/min, 保持 5 min, 5~20 min 时, 由 2 mL/min 线性上升至 100 mL/min, 保持 5 min, 总运行时间 25 min。

IMS 分析条件: 迁移管长 98 mm, 迁移电压 500 V/cm, 迁移管温度 45℃, 迁移气为高纯氮气(纯度≥99.999%), 流

速 150 mL/min, 电离源为氚源(³H), 正离子模式。

1.4 数据处理

GC-IMS 检测结果由仪器配套的 VOCal 分析软件进行分析。软件内置 NIST 气相保留指数数据库和 G.A.S.公司的 IMS 迁移时间数据库, 对所检测物质进行定性分析。首先使用 C₄~C₉ 的正构酮来将保留时间校准为保留指数, 然后通过 NIST 保留指数数据库及 IMS 迁移时间数据进行匹配, 二维正交定性, 得到定性结果。采用 Reporter、Gallery Plot 插件作差异对比分析。采用主成分分析(principal component analysis, PCA)插件对所测样品的特征峰进行相似度分析。

2 结果与分析

2.1 啤酒样品的 GC-IMS 谱图分析

图 1 为 8 个精酿啤酒样品的 GC-IMS 伪色图。相对迁移时间 1.0 处的红色垂直竖线为反应离子峰(reactant ion peak, RIP), 实际迁移时间为 8 ms, 经归一化处理。图 1 中的每一个点即代表所检测到的一种物质, 颜色的深浅代表信号的强弱, 颜色越红表示浓度越高, 颜色越浅表示浓度越低, 整个谱图上的点即构成了样品中所检测到的所有挥发性组分。从图 1 中可以明显看出, 4 种自制精酿啤酒中的挥发性物质浓度要高于 4 种德国精酿啤酒。

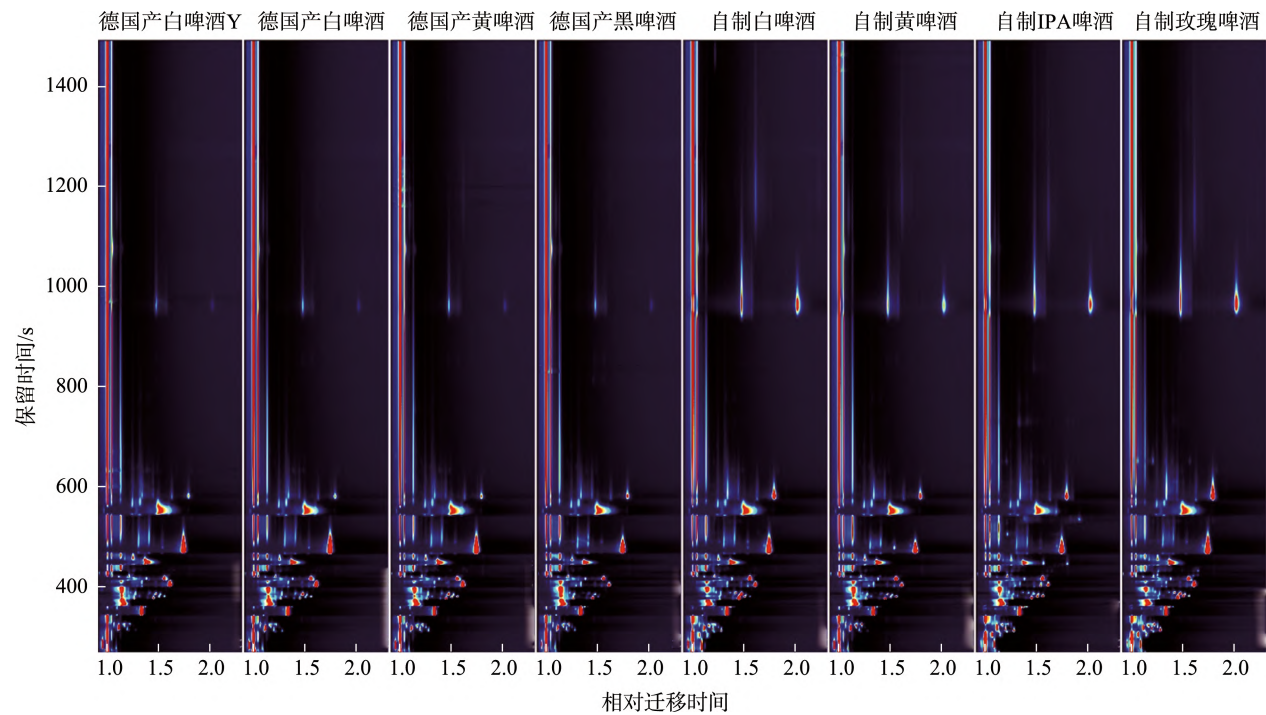


图 1 8 个精酿啤酒样品的 GC-IMS 伪色图
Fig.1 GC-IMS pseudo-chromatic graph of 8 craft beer samples

2.2 精酿啤酒样品挥发性组分定性分析

为了更好地了解各精酿啤酒的风味差异,需对谱图中的特征物质进行定性分析,结果见表 1。谱图中共计鉴定出 63 个峰,去除单体、二聚体重复,共有 54 种挥发性香气成分,包含酯类 24 种、醇类 9 种、醛类 9 种、酮类 6 种、萜类 3 种、

酸类 2 种、醚类 1 种等。其中,酯类香气成分最为丰富,为啤酒提供香甜水果及花香的呈味轮廓。而酒体中含有的多种高级醇赋予了啤酒独特的果香和辛辣味,如 4-松油醇、3-甲基-1-丁醇等^[24]。酯类和醇类是公认的构成啤酒香气风格的最重要组分,它们之间的浓度平衡会影响啤酒总体香气分布^[25-26]。

表 1 GC-IMS 鉴别精酿啤酒中的挥发性组分
Table 1 Identification results of volatile compounds of craft beer samples by GC-IMS

序号	化合物	分子式	CAS 号	保留时间/s	保留指数	相对迁移时间	气味描述
1	癸酸乙酯(M)	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	110-38-3	1480.2	1632	1.6184	果香、酒香
2	癸酸乙酯(D)	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	110-38-3	1480.2	1632	2.2413	
3	4-松油醇	C ₁₀ H ₁₈ O	562-74-3	1444.4	1620	1.2226	樟脑气味、辛辣味
4	壬酸乙酯	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	123-29-5	1324.7	1541	1.5507	果香、玫瑰样香气的酒香
5	丙酸	C ₃ H ₆ O ₂	79-09-4	1150.8	1535	1.0950	N/A
6	香茅醛	C ₁₀ H ₁₈ O	106-23-0	1101.3	1496	1.3478	柠檬、香茅和玫瑰香气
7	乙酸	C ₂ H ₄ O ₂	64-19-7	1074.6	1457	1.1512	N/A
8	辛酸乙酯(M)	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	106-32-1	963.1	1440	1.4834	菠萝、苹果香气
9	辛酸乙酯(D)	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	106-32-1	963.1	1440	2.0274	
10	(Z)-3-己烯醇	C ₆ H ₁₂ O	928-96-1	851.1	1402	1.5738	浓草香味
11	壬醛	C ₉ H ₁₈ O	124-19-6	842.1	1397	1.4795	玫瑰、柑橘香气
12	乙酸庚酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	112-06-1	812.5	1380	1.4652	玫瑰香梨香气
13	庚酸乙酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	106-30-9	779.7	1362	1.4034	菠萝香气
14	1-己醇	C ₆ H ₁₄ O	111-27-3	779.0	1361	1.3279	青草、柑橘香气
15	6-甲基-5-庚烯-2-酮	C ₈ H ₁₄ O	110-93-0	737.7	1338	1.1789	水果、柠檬草香气
16	丁酸戊酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	540-18-1	730.5	1334	1.4130	苦杏仁味
17	(E)-2-己烯酸乙酯	C ₈ H ₁₄ O ₂	27829-72-7	729.4	1333	1.3351	青草、朗姆酒香气
18	1-羟基-2-丙酮	C ₃ H ₆ O ₂	116-09-6	685.8	1309	1.2365	N/A
19	3-羟基-2-丁酮	C ₄ H ₈ O ₂	513-86-0	653.3	1289	1.0659	特殊奶油香气
20	异松油烯	C ₁₀ H ₁₆	586-62-9	651.0	1288	1.2117	松木、柑橘香气
21	1-戊醇	C ₅ H ₁₂ O	71-41-0	636.5	1276	1.4917	杂醇油气味
22	乙酸己酯(M)	C ₈ H ₁₆ O ₂	142-92-7	634.2	1275	1.3868	苹果、梨等水果香气
23	乙酸己酯(D)	C ₈ H ₁₆ O ₂	142-92-7	634.2	1275	1.8393	
24	己酸乙酯(M)	C ₈ H ₁₆ O ₂	123-66-0	585.2	1236	1.3442	水果、朗姆酒香气
25	己酸乙酯(D)	C ₈ H ₁₆ O ₂	123-66-0	585.2	1236	1.8016	
26	3-甲基-1-丁醇(M)	C ₅ H ₁₂ O	123-51-3	551.4	1209	1.2475	苹果酒香气、辛辣味
27	3-甲基-1-丁醇(D)	C ₅ H ₁₂ O	123-51-3	551.4	1209	1.4901	
28	异丁酸-2-甲基丁酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	2445-69-4	536.9	1197	1.9227	N/A
29	丁酸异丁酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	539-90-2	532.5	1194	1.8016	苹果、菠萝、朗姆酒香气
30	柠檬烯	C ₁₀ H ₁₆	138-86-3	530.7	1192	1.2130	柠檬香气
31	2-庚酮	C ₇ H ₁₄ O	110-43-0	508.0	1166	1.6475	梨香气
32	α -水芹烯	C ₁₀ H ₁₆	99-83-2	507.7	1165	1.2185	黑胡椒、薄荷似香气
33	1-丁醇	C ₄ H ₁₀ O	71-36-3	491.8	1147	1.1830	杂醇油气味
34	戊酸乙酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	539-82-2	482.8	1136	1.7010	苹果香气
35	己醛	C ₆ H ₁₂ O	66-25-1	479.4	1132	1.5453	青草、苹果香气
36	乙酸异戊酯(M)	C ₇ H ₁₄ O ₂	123-92-2	476.4	1128	1.3049	水果香气

表 1(续)

序号	化合物	分子式	CAS 号	保留时间/s	保留指数	相对迁移时间	气味描述
37	乙酸异戊酯(D)	C ₇ H ₁₄ O ₂	123-92-2	476.4	1128	1.7491	
38	2-甲基-1-丙醇(M)	C ₄ H ₁₀ O	78-83-1	450.7	1098	1.1737	生油脂、苹果香气
39	2-甲基-1-丙醇(D)	C ₄ H ₁₀ O	78-83-1	450.7	1098	1.3704	
40	异丁酸异丁酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	97-85-8	448.2	1094	1.8050	
41	3-甲基丁酸乙酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	108-64-5	433.3	1069	1.6515	苹果、香蕉香气
42	2-甲基丁酸乙酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	7452-79-1	425.2	1056	1.6549	水果香气
43	2,3-戊二酮	C ₅ H ₈ O ₂	600-14-6	424.3	1055	1.2180	奶油、焦糖香气
44	1-丙醇	C ₃ H ₈ O	71-23-8	422.3	1051	1.1163	乙醇气味
45	丁酸乙酯	C ₆ H ₁₂ O ₂	105-54-4	417.8	1044	1.5606	菠萝、花香
46	乙酸异丁酯	C ₆ H ₁₂ O ₂	110-19-0	405.6	1024	1.6180	柔和水果香
47	戊醛	C ₅ H ₁₀ O	110-62-3	390.2	999	1.4229	N/A
48	乙酸丙酯	C ₅ H ₁₀ O ₂	109-60-4	388.2	993	1.4819	柔和水果香
49	异丁酸乙酯	C ₆ H ₁₂ O ₂	97-62-1	383.7	980	1.5655	水果、奶油香气
50	丙酸乙酯	C ₅ H ₁₀ O ₂	105-37-3	379.9	968	1.4524	菠萝香气
51	乙醇	C ₂ H ₆ O	64-17-5	368.3	934	1.1426	N/A
52	3-甲基丁醛	C ₅ H ₁₀ O	590-86-3	361.2	913	1.4081	苹果香气
53	丁醛	C ₄ H ₈ O	123-72-8	358.1	904	1.2901	香蕉、焦糖气味
54	乙酸乙酯	C ₄ H ₈ O ₂	141-78-6	351.5	885	1.3393	水果香气
55	乙酸甲酯	C ₃ H ₆ O ₂	79-20-9	327.2	812	1.1887	果香
56	甲酸乙酯(M)	C ₃ H ₆ O ₂	109-94-4	326.1	810	1.0704	菠萝果香、朗姆酒、辛辣味
57	甲酸乙酯(D)	C ₃ H ₆ O ₂	109-94-4	326.1	810	1.2259	
58	丙酮	C ₃ H ₆ O	67-64-1	319.4	790	1.1159	N/A
59	2-甲基丙醛	C ₄ H ₈ O	78-84-2	313.7	773	1.2826	香蕉、焦糖气味
60	丙醛(M)	C ₃ H ₆ O	123-38-6	304.3	745	1.0688	苹果、樱桃香气
61	丙醛(D)	C ₃ H ₆ O	123-38-6	304.3	745	1.1459	
62	二甲基硫醚	C ₂ H ₆ S	75-18-3	284.5	686	0.9602	N/A
63	乙醛	C ₂ H ₄ O	75-07-0	262.7	621	0.9859	N/A
64	未知物 1	-	-	324.4	804	1.1704	
65	未知物 2	-	-	492.6	1147	1.2645	

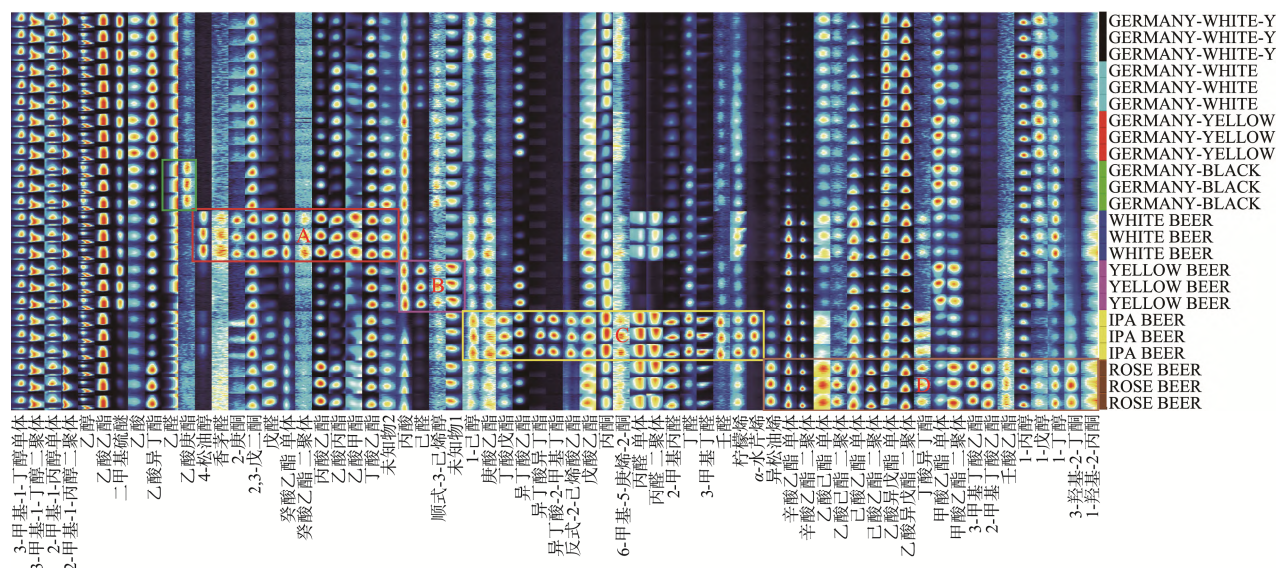
注: 同一化合物后缀 M、D 分表代表了该物质的单体、二聚体; N/A 代表未查询到香气描述词; -表示无此项。

2.3 精酿啤酒样品中挥发性组分指纹图谱比较

为了更直观地对比 8 个啤酒样品中挥发性组分的差异, 选取谱图中的特征化合物, 由仪器配套的 VOCal 软件中的 Gallery Plot 插件制作 8 个样品的指纹图谱, 见图 2。各个样品中每个物质的具体峰强度见表 2。指纹图谱清晰地展示了各个啤酒样品中挥发性香气成分的差异。整体来看, 4 种德国啤酒中的挥发性组分差异不大, 且含量偏低, 而自制的 4 种啤酒中的风味物质差异显著, 具有各自的特征风味物质成分。

结合表 2 可知, 3-甲基-1-丁醇、2-甲基-1-丙醇、乙醇、乙酸乙酯等物质在所有样品中的含量都很高, 只有 IPA 啤酒稍低一些。德国黄啤酒中乙酸、乙酸异丁酯等物质的含量较高; 德国黑啤酒中乙酸庚酯等物质的含量较高; 自制

白啤酒中的 4-松油醇、香茅醛、2-庚酮、2,3-戊二酮、戊醛、癸酸乙酯、乙酸甲酯、乙酸丙酯、丙酸乙酯、丁酸乙酯、辛酸乙酯等物质的含量较高(A 区域), 这些物质可为精酿啤酒提供多重复合水果及奶油、焦糖、花香、酒香、香草等风味; 自制黄啤酒中的丙酸、己醛、顺式-3-己烯醇等物质的含量较高(B 区域), 可为该产品提供多青草、浓草及苹果香等风味; 自制 IPA 啤酒中的丙酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮、丙醛、1-己醇、2-甲基丙醛、3-甲基丁醛、壬醛、柠檬烯、 α -水芹烯、丁酸戊酯、异丁酸乙酯、庚酸乙酯、异丁酸异丁酯、异丁酸-2-甲基丁酯、反式-2-己烯酸乙酯、戊酸乙酯等物质的含量较高(C 区域), 为该产品提供柑橘香、奶油、玫瑰、黑胡椒、薄荷等风味; 自制玫瑰啤酒中的 1-丙醇、1-戊醇、1-丁醇、3-羟基-2-丁酮、1-羟基-2-



注：每一行代表一个样品中所选择的所有信号峰，每一列是同一物质在不同样品中的对比，颜色越深，代表浓度越大。

图 2 精酿啤酒样品中挥发性组分的指纹图谱

Fig.2 Fingerprint of volatile compounds of craft beer samples

丙酮、3-甲基丁醛、异松油烯、辛酸乙酯、乙酸己酯、己酸乙酯、乙酸异戊酯、丁酸乙酯、丁酸异丁酯、甲酸乙酯、3-甲基丁酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯、壬酸乙酯等物质的含量较高(D 区域), 可为该产品提供苹果、梨、香蕉等水果香气及酒香、玫瑰等风味。但需注意的是, 同一物质在不同浓度下散发出的香气会有所不同, 各个风味物质协调作用才能共同构成了该啤酒样品的香气类型。

2.4 主成分分析

PCA 可以简化实验数据, 并通过确定几个主成分因子来代表原始样本中许多复杂且难以找到的变量, 然后根据不同样本中主成分因子的贡献率来评估样本之间的规律性和差异^[27-28]。利用所检测的所有挥发性组分的峰强度进行 PCA, 以考察不同类型啤酒样品的聚类效果, 分析结果见图 3。

由图 3 可以看出, PC_1 和 PC_2 的方差贡献率分别为 50%和 20%, 累积方差贡献率为 70%, 表明 PCA 结果能解释总变异的 70%, 具有很好的代表性。德国白啤酒 Y、德国白啤酒、德国黄啤酒 3 个样品分布较近, 说明 3 者组分差异较小; 在 PC_1 方向上, 德国黑啤酒、自产黄啤酒、自产白啤酒、自产玫瑰啤酒之间可以很好地区分; 在 PC_2 方向上可将自产 IPA 啤酒区和自产玫瑰啤酒区分开来。

3 讨论与结论

精酿啤酒以风味浓郁、口感醇厚、香气突出渐渐被更多消费者接受, 风味物质是衡量其品质的重要因素之一。

本研究利用 HS-GC-IMS 鉴定了不同类型啤酒中的挥发性香气组分, 检测出 54 种挥发性香气成分, 采用指纹图谱直观展示出各个样品中挥发性组分的差异, 结果显示不同类型的啤酒中挥发性香气成分含量存在很大差异。自制的 4 种啤酒中风味物质具有各自的特征风味物质成分, 如自制白啤中的香茅醛、2-庚酮、癸酸乙酯, 自制黄啤中的己醛, 自制印度淡色艾尔啤酒中的异丁酸异丁酯、异丁酸-2-甲基丁酯、壬醛、 α -水芹烯, 自制玫瑰啤酒中的乙酸己酯、壬酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯、3-甲基丁酸乙酯等。

酒精发酵过程中, 酵母菌会产生一系列酒精发酵副产物, 其中酯类物质是影响啤酒风味的主要成分之一, 它们具有近似水果的香气, 如苹果香、香蕉香、菠萝香、花香等。相关研究已经证实, 具有较高 β -葡萄糖苷酶活性的酵母菌经过发酵后会使精酿啤酒中葡萄糖苷结合萜类及酯类物质明显增加, 产生独特的花香和果味特征^[29]。本研究中发现自制精酿啤酒中癸酸乙酯、辛酸乙酯、己酸乙酯、戊酸乙酯、丁酸乙酯等风味物质含量均显著超过德国产啤酒, 表明自制精酿啤酒的果香与酒香更浓郁, 这可能与生产中使用了自制产香酵母(较高 β -葡萄糖苷酶活性)与酿酒酵母共同作用, 参与部分代谢环节或是和啤酒原有的某些物质发生化学反应如酯化反应、羟基化反应等有关^[30]。

综上, HS-GC-IMS 结合多元统计学方法可有效实现不同风味啤酒的有效区分。未来可结合感官品评、理化指标、电子舌等进一步全面考察啤酒的品质特征, 建立一套精酿啤酒风味评价标准, 以其为精酿啤酒的品质优化提供科学借鉴和数据支持。

表 2 精酿啤酒样品中的挥发性组分的峰强度
Table 2 Peak intensity of volatile compounds of craft beer samples

序号	化合物	德国白啤酒 Y	德国白啤酒	德国黄啤酒	德国黑啤酒	自制黄啤酒	自制 IPA 啤酒	自制玫瑰啤酒	自制白啤酒
1	癸酸乙酯(M)	1448.63±38.82	1315.22±35.01	2196.64±80.27	1621.27±20.31	3995.02±38.46	4288.38±69.64	4102.48±66.87	7881.44±55.81
2	癸酸乙酯(D)	780.68±14.27	808.16±36.62	850.38±7.42	799.45±31.64	956.98±42.50	904.74±51.99	825.36±67.16	1345.54±61.20
3	4-松油醇	241.76±5.04	246.21±1.36	228.19±22.99	223.40±5.54	304.40±32.10	526.29±34.07	262.72±14.97	1400.77±62.89
4	壬酸乙酯	314.40±20.95	310.07±16.29	325.66±32.22	312.60±20.95	335.06±6.96	447.75±44.30	492.32±28.42	381.19±6.33
5	丙酸	2099.89±52.48	2404.97±37.24	2571.26±44.68	2565.05±51.58	2650.47±52.94	1734.61±34.19	2085.56±27.52	2448.41±21.49
6	香茅醛	173.38±1.07	157.78±13.17	163.75±9.20	181.86±22.84	162.05±12.63	183.80±12.84	175.42±12.57	212.04±24.96
7	乙酸	456.95±11.36	418.29±17.37	534.87±45.92	483.66±33.69	342.30±6.45	302.23±14.19	289.34±6.97	359.55±18.38
8	辛酸乙酯(M)	6413.16±60.47	6900.82±159.95	7083.16±33.16	6759.50±91.63	17188.70±65.29	21458.51±171.63	23705.43±167.51	22586.40±141.02
9	辛酸乙酯(D)	2422.30±17.34	2612.34±130.84	2599.78±82.71	2682.23±85.62	12033.45±163.46	16940.72±89.52	23656.77±64.62	20391.76±173.20
10	(Z)-3-己烯醇	213.89±19.24	232.49±11.89	237.11±10.04	250.69±32.05	261.62±14.00	217.95±23.64	166.89±8.86	203.20±8.12
11	壬醛	188.91±6.64	208.54±11.98	208.00±13.72	220.23±20.08	258.34±25.93	409.18±17.83	190.18±8.88	191.71±4.30
12	乙酸庚酯	129.18±5.28	124.03±7.18	132.21±17.36	219.45±4.25	117.14±5.28	91.68±8.80	110.87±8.45	103.52±1.11
13	庚酸乙酯	166.31±7.43	135.61±11.94	141.51±21.43	129.67±11.39	172.90±13.85	186.56±16.43	162.11±7.68	178.66±10.34
14	1-己醇	227.19±7.08	170.38±6.54	199.86±16.93	179.65±5.68	205.61±5.06	258.70±24.05	183.62±17.64	219.05±23.31
15	6-甲基-5-庚烯-2-酮	122.22±4.92	97.82±7.79	121.63±1.35	96.20±7.68	120.00±11.83	114.84±21.60	110.62±3.51	116.25±9.81
16	丁酸戊酯	148.40±4.05	168.50±6.33	156.81±12.56	151.61±22.36	149.64±9.56	388.16±7.91	283.14±8.13	187.63±21.00
17	(E)-2-己烯酸乙酯	378.94±14.66	331.03±12.57	336.07±9.21	281.66±10.02	291.40±5.57	836.03±12.07	353.20±22.59	396.51±25.81
18	1-羟基-2-丙酮	42.04±4.91	46.14±3.42	46.48±4.16	41.11±4.31	47.25±1.53	50.01±5.72	52.50±0.67	60.03±6.27
19	3-羟基-2-丁酮	129.73±6.81	133.76±12.01	138.81±11.37	133.30±9.77	151.52±9.99	271.22±6.16	438.50±4.62	149.40±8.38
20	异松油烯	128.95±11.63	140.35±15.24	157.24±8.51	144.41±6.90	149.19±12.36	391.34±8.59	712.09±47.46	164.36±8.60
21	1-戊醇	160.26±13.21	133.01±10.35	163.92±8.72	127.66±13.31	106.85±8.22	83.70±1.98	126.88±7.71	116.94±5.84
22	乙酸己酯(M)	159.88±3.45	142.12±4.00	159.10±20.20	122.85±4.05	126.39±14.69	116.04±11.02	175.16±16.19	166.34±6.53
23	乙酸己酯(D)	123.31±8.47	123.13±6.90	114.31±19.73	108.02±11.70	82.30±13.14	108.66±2.30	222.20±17.11	148.73±5.60
24	己酸乙酯(M)	2522.07±58.71	2755.79±20.36	2658.49±21.44	3247.06±38.94	3603.73±66.60	4021.80±84.28	4725.45±31.56	4340.20±36.94
25	己酸乙酯(D)	3674.55±95.38	4039.14±151.08	4111.51±45.81	5635.64±47.15	7000.36±102.27	10625.81±75.69	20672.65±63.86	13552.54±123.93
26	3-甲基-1-丁醇(M)	3449.14±25.24	3525.52±57.03	3335.35±9.08	3461.16±7.71	3145.76±40.01	2915.66±12.32	2895.88±37.96	3011.46±67.10
27	3-甲基-1-丁醇(D)	23579.02±92.19	22099.94±101.00	22640.29±65.51	21410.88±90.55	20838.60±62.44	19383.29±109.13	22903.24±115.64	23701.44±52.76
28	异丁酸-2-甲基丁酯	96.18±6.02	129.94±4.06	157.44±26.71	119.64±8.13	160.33±5.66	979.06±40.41	178.11±6.45	146.78±11.65
29	丁酸异丁酯	71.18±2.69	71.04±2.16	71.63±3.84	64.86±9.92	61.76±7.76	152.25±18.87	130.59±1.73	103.98±9.12
30	柠檬烯	94.88±5.59	131.74±13.98	139.20±6.17	131.74±7.71	117.44±7.19	156.99±2.39	133.85±4.03	193.58±19.11
31	2-庚酮	90.17±9.31	101.80±8.14	97.45±9.01	61.67±2.38	59.12±4.67	107.87±14.98	85.03±2.01	128.80±17.17
32	α -水芹烯	84.17±3.71	86.90±6.33	95.80±4.71	98.56±5.67	103.31±4.19	680.14±3.49	86.41±1.95	112.40±2.11
33	1-丁醇	83.69±4.27	73.01±1.21	105.08±7.92	144.12±8.78	114.35±7.65	105.52±8.80	115.82±8.52	117.85±11.81
34	戊酸乙酯	293.04±2.82	311.25±9.02	379.63±17.43	391.42±1.16	401.33±8.21	420.00±13.19	433.10±11.33	451.81±25.04

表 2(续)

序号	化合物	德国白啤酒 Y	德国白啤酒	德国黄啤酒	德国黑啤酒	自制黄啤酒	自制 IPA 啤酒	自制玫瑰啤酒	自制白啤酒
35	己醛	355.58±9.85	412.10±3.80	109.21±5.82	141.11±12.78	1171.04±17.43	260.51±5.16	145.26±6.52	361.51±26.77
36	乙酸异戊酯(M)	4985.01±31.39	5592.63±33.72	4965.07±101.03	5178.01±74.70	4328.27±54.25	4810.32±26.64	4473.67±38.89	4690.37±80.59
37	乙酸异戊酯(D)	34012.29±150.28	38173.04±140.89	36369.92±87.55	27509.80±72.01	21026.15±82.63	22915.15±98.45	36530.08±72.41	33356.27±78.93
38	2-甲基-1-丙醇(M)	1068.05±41.04	1114.07±54.77	1017.41±12.52	1077.44±13.42	1029.11±6.84	792.03±3.46	922.91±13.22	876.61±22.88
39	2-甲基-1-丙醇(D)	13357.67±113.92	11543.86±40.49	12404.01±55.65	9502.78±58.15	10744.54±31.52	8955.49±38.23	12105.61±58.68	11511.64±92.23
40	异丁酸异丁酯	134.64±1.86	138.25±6.31	137.74±5.70	146.23±10.15	147.86±9.12	886.13±19.41	112.47±1.68	139.25±3.50
41	3-甲基丁酸乙酯	87.38±3.57	67.12±4.17	92.84±4.94	59.56±5.18	57.54±2.29	114.20±3.42	388.78±16.87	47.76±3.66
42	2-甲基丁酸乙酯	37.27±2.39	28.67±3.86	29.54±2.43	23.79±2.38	30.63±2.15	37.65±4.97	186.00±6.35	47.95±4.18
43	2,3-戊二酮	1211.50±27.64	1247.53±24.17	1170.75±16.10	1256.51±7.07	1150.35±19.18	1369.52±28.69	1084.17±15.20	1303.56±59.95
44	1-丙醇	610.64±5.21	590.12±15.47	605.21±11.68	549.26±7.47	534.67±8.64	497.36±11.14	602.28±16.42	571.79±34.32
45	丁酸乙酯	4659.38±30.95	5431.46±63.63	5086.65±72.72	4982.18±41.81	6862.45±35.91	6911.17±7.01	6032.19±6.25	7990.65±55.78
46	乙酸异丁酯	9790.11±150.15	10652.74±77.72	11631.74±111.49	3811.26±45.10	4643.79±52.43	3258.65±39.18	9976.31±11.02	6719.68±93.75
47	戊醛	357.15±4.71	452.99±10.47	408.37±19.38	334.91±4.88	305.45±10.09	531.08±7.50	971.131±9.95	1157.57±28.28
48	乙酸丙酯	1520.02±18.87	2793.24±33.03	2674.76±37.79	811.18±4.60	1214.23±12.02	1140.48±21.28	2917.83±19.72	4239.67±24.28
49	异丁酸乙酯	664.84±4.42	741.93±21.26	1051.32±58.84	155.24±14.78	1394.06±21.43	1696.15±7.49	737.21±13.20	314.39±9.87
50	丙酸乙酯	1745.57±24.99	1082.95±24.42	1950.10±86.76	2582.68±35.82	1909.81±9.53	2565.24±7.15	5584.38±6.12	6047.98±18.91
51	乙醇	34517.69±90.85	32789.58±105.76	32152.64±99.44	38852.56±215.81	37380.25±115.42	32530.77±94.52	27978.93±91.90	30219.97±45.34
52	3-甲基丁醛	69.44±3.51	41.30±2.55	36.84±2.62	74.01±3.85	74.72±1.78	366.54±18.96	205.36±4.52	129.34±2.37
53	丁醛	296.20±4.90	280.63±4.28	239.91±3.96	355.06±1.70	381.12±7.82	568.01±3.30	348.27±3.87	312.78±5.69
54	乙酸乙酯	21562.87±92.82	22775.62±49.77	22894.03±55.30	20737.61±82.23	20861.12±78.12	21052.54±25.87	23064.46±29.99	22601.96±96.03
55	乙酸甲酯	162.22±10.01	241.82±5.28	289.93±4.25	258.85±15.41	241.52±23.00	293.83±7.60	356.20±5.59	492.17±7.36
56	甲酸乙酯(M)	962.64±66.00	972.88±27.23	1185.62±48.65	1174.46±28.02	1077.23±24.42	514.94±13.99	705.09±30.90	636.78±39.84
57	甲酸乙酯(D)	311.74±21.33	513.84±10.40	736.33±22.95	828.77±19.84	1042.44±22.78	646.46±12.72	1146.56±7.68	452.29±8.09
58	丙酮	4623.77±102.00	4871.00±69.02	2833.86±81.79	3310.70±88.17	5137.06±21.55	6709.35±14.89	4418.30±8.79	3639.40±88.20
59	2-甲基丙醛	198.20±8.88	445.87±16.06	806.07±41.38	557.25±12.48	200.26±2.77	2042.91±18.45	2225.72±7.19	1290.24±24.30
60	丙醛(M)	332.67±6.50	358.49±9.46	367.41±13.64	300.25±3.62	412.66±36.67	3436.21±88.36	3132.19±16.80	2343.53±66.67
61	丙醛(D)	101.43±2.64	125.76±5.10	115.01±13.71	123.03±15.31	148.38±16.07	1685.06±41.26	1495.73±28.75	1155.90±61.77
62	二甲基硫醚	9151.05±66.91	7067.18±118.45	7241.97±195.68	3474.89±49.67	7602.45±79.80	1973.87±15.16	2199.37±15.55	5785.42±91.33
63	乙醛	5564.14±121.53	5571.41±161.52	5315.05±109.70	5901.54±47.29	4513.40±67.00	4554.34±37.70	4601.06±58.39	5218.80±97.56
64	未知物 1	847.55±22.89	1012.99±24.36	950.94±26.25	1175.91±33.42	1582.15±31.50	973.11±4.72	1067.99±3.92	731.61±41.25
65	未知物 2	94.42±8.64	75.10±4.63	125.96±17.19	201.71±10.22	171.78±7.24	121.84±1.22	149.97±4.72	185.84±15.47

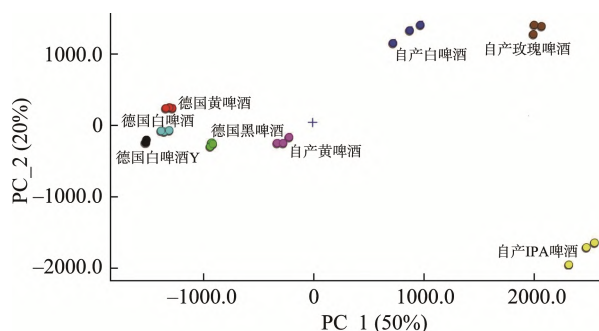


图3 不同类型精酿啤酒样品的PCA图

Fig.3 PCA chart of craft beer samples of different types

参考文献

- [1] MARONGIU A, ZARA G, LEGRAS JL, *et al.* Novel starters for old processes: Use of *Saccharomyces cerevisiae* strains isolated from artisanal sourdough for craft beer production at a brewery scale [J]. *J Ind Microbiol Biotechnol*, 2015, 42(1): 85–92.
- [2] 卓义敏, 蒋敬全, 赖开平. 精酿啤酒的发展概述[J]. *酿酒科技*, 2022, 333(3): 97–100.
ZHUO YM, JIANG JQ, LAI KP. Overview of the development of craft beer [J]. *Liquor-Making Sci Technol*, 2022, 333(3): 97–100.
- [3] BAIANO A. Craft beer: An overview [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2021, 20(2): 1829–1856.
- [4] SANTOS MADS, RIBEIRO PVL, ANDRADE CP, *et al.* Physicochemical and sensory analysis of craft beer made with soursop (*Annona muricata* L.) [J]. *ACTA Scientiarum-Technol*, 2021, 20(1): 103–112.
- [5] 黄琳, 葛秀琪, 张元夫, 等. 精酿啤酒专用麦芽的研究进展[J]. *中国酿造*, 2020, 39(2): 7–12.
HUANG L, GE XQ, ZHANG YF, *et al.* Research progress of special malts for craft beers [J]. *China Brew*, 2020, 39(2): 7–12.
- [6] 崔进梅. 啤酒工坊印度淡色艾尔啤酒生产工艺的探讨[J]. *酿酒*, 2021, 48(4): 122–124.
CUI JM. Discussion on the production technology of India Pale beer in beer workshop [J]. *Liquor Mak*, 2021, 48(4): 122–124.
- [7] 张薇. 浑浊 IPA 啤酒酿造工艺研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2020.
ZHANG W. Study on brewing process of cloudy IPA beer [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2020.
- [8] 王伟, 俞志敏, 侯英敏, 等. 产香酵母 *Pichia myanmarensis* LX15 的分离纯化及对精酿啤酒风味物质形成的影响[J]. *微生物学杂志*, 2018, 38(4): 34–40.
WANG W, YU ZM, HOU YM, *et al.* Solation and properties of aroma-producing *Pichia myanmarensis* and the effects of the formation of aromatic substances in craft-brewed beer [J]. *J Microbiol*, 2018, 38(4): 34–40.
- [9] CRAINE EB, BRAMWELL S, ROSS CF, *et al.* Strategic malting barley improvement for craft brewers through consumer sensory evaluation of malt and beer [J]. *J Food Sci*, 2021, 86(8): 3628–3644.
- [10] SU X, YU M, WU S, *et al.* Sensory lexicon and aroma volatiles analysis of brewing malt [J]. *NPJ Sci Food*, 2022, 6(1): 20.
- [11] GRIECO F, SPANO G. Autochthonous biological resources for the production of regional craft beers: Exploring possible contributions of cereals, hops, microbes, and other ingredients [J]. *Foods*, 2021, 10(8): 1831.
- [12] KOIE K, TAKAZUMI K, HAMAGUCHI T, *et al.* Development of a flavor hop (*Humulus lupulus* L.) cultivar, 'Furano Magical', with cones rich in 4-methyl-4-sulfonylpentan-2-one [J]. *J Sci Food Agric*, 2022, 102(11): 4677–4684.
- [13] KAWA-RYGIELSKA J, ADAMENKO K, PIETRZAK W, *et al.* The potential of traditional norwegian KVEIK yeast for brewing novel beer on the example of foreign extra stout [J]. *Biomolecules*, 2021, 11(12): 1778.
- [14] 陈悦. 啤酒花对啤酒特征风味的影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.
CHEN Y. Influence of hops on characteristic flavor of beer [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2020.
- [15] GIANNAKOU K, VISINONI F, ZHANG P, *et al.* Biotechnological exploitation of *Saccharomyces jurei* and its hybrids in craft beer fermentation uncovers new aroma combinations [J]. *Food Microbiol*, 2021, 100: 103838.
- [16] YANG Y, WANG B, FU Y, *et al.* HS-GC-IMS with PCA to analyze volatile flavor compounds across different production stages of fermented soybean whey tofu [J]. *Food Chem*, 2021, 346(1): 128880.
- [17] 陈鑫郁, 贺金娜, 陈通, 等. 气相色谱离子迁移谱联用技术在食用植物油品质检测中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(2): 396–401.
CHEN XY, HE JN, CHEN T, *et al.* Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry in quality determination of edible vegetable oil [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(2): 396–401.
- [18] FAN X, JIAO X, LIU J, *et al.* Characterizing the volatile compounds of different sorghum cultivars by both GC-MS and HS-GC-IMS [J]. *Food Res Int*, 2021, 140: 109975.
- [19] HU X, WANG R, GUO J, *et al.* Changes in the volatile components of candied kumquats in different processing methodologies with headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Molecules*, 2019, 24(17): 3053.
- [20] 邓静, 罗晶晶, 朱开宪, 等. 基于电子鼻和气相色谱-离子迁移谱法分析不同等级俄色绿茶香气物质差异[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(1): 236–243.
DENG J, LUO JJ, ZHU KX, *et al.* Analysis of the difference of volatile

- compounds in different grades of E'se green tea based on electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(1): 236–243.
- [21] YANG YQ, CHEN JY, JIANG YW, *et al.* Aroma dynamic characteristics during the drying process of green tea by gas phase electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *LWT*, 2022, 154: 112691.
- [22] 孟祥春, 耿星, 黄泽鹏, 等. 基于 HS-GC-IMS 的无核黄皮果实挥发性风味物质分析[J]. *热带作物学报*, 2022, 43(8): 1686–1695.
- MENG XC, GENG X, HUANG ZP, *et al.* Analysis of volatile flavor components in seedless wampee fruit at different maturity by headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Chin J Trop Crops*, 2022, 43(8): 1686–1695.
- [23] GE S, CHEN Y, DING S, *et al.* Changes in volatile flavor compounds of peppers during hot air drying process based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100(7): 3087–3098.
- [24] LIN CL, PETERSEN MA, MAUCH A, *et al.* Towards lager beer aroma improvement via selective amino acid release by proteases during mashing [J]. *J Inst Brew*, 2022, 128(1): 15–21.
- [25] LETTISHA H, LETTISHA H, MDUDUZI PM, *et al.* Flavour-active volatile compounds in beer: Production, regulation and control [J]. *J Inst Brew*, 2017, 123(1): 13–23.
- [26] YANG HE, DONG JJ, YIN H, *et al.* Wort composition and its impact on the flavour-active higher alcohol and ester formation of beer-A review [J]. *J Inst Brew*, 2014, 120(3): 157–163.
- [27] 王燕华, 王晓婷, 龚加顺, 等. 基于 HS-GC-IMS 对 8 种咖啡豆烘焙前后挥发性有机物成分分析[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(23): 124–130.
- WANG YH, WANG XT, GONG JS, *et al.* Analysis of volatile organic compounds in 8 kinds of coffee beans before and after roasting based on HS-GC-IMS [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(23): 124–130.
- [28] LIU B, YANG Y, REN L, *et al.* HS-GC-IMS and PCA to characterize the volatile flavor compounds in three sweet cherry cultivars and their wines in China [J]. *Molecules*, 2022, 27(24): 9056.
- [29] HAN X, QIN Q, LI C, *et al.* Application of non-saccharomyces yeasts with high β -glucosidase activity to enhance terpene-related floral flavor in craft beer [J]. *Food Chem*, 2023, 04(Pt B): 134726.
- [30] 王松廷, 杨生玉, 张彭湃. GC-MS 法分析西瓜精酿啤酒中的风味物质[J]. *中国酿造*, 2016, 35(10): 171–174.
- WANG ST, YANG SY, ZHANG PP. Analysis of the flavor compounds in watermelon craft beer by GC-MS [J]. *China Brew*, 2016, 35(10): 171–174.

(责任编辑: 郑 丽 张晓寒)

作者简介



李凤林, 博士, 教授, 主要研究方向为
粮油植物蛋白及酿造功能性食品。
E-mail: 568169115@qq.com