

基于HS-GC-IMS比较不同精酿茶啤酒的挥发性风味成分差异

尹 鹏^{1,2}, 李美勤¹, 孙子喻², 陈凌芝¹, 杨 洁³, 苏 丹^{1*}

(1.信阳农林学院 茶学院 河南豫南茶树资源综合开发重点实验室, 河南 信阳 464000;

2.信阳市文新茶叶有限责任公司, 河南 信阳 464000; 3.信阳市茶产业发展中心, 河南 信阳 464000)

摘要:为比较不同精酿茶啤酒挥发性风味成分的差异,以毛尖绿茶精酿啤酒(MJLC-Beer)、茉莉毛尖精酿啤酒(MLMJ-Beer)、信阳红茶精酿啤酒(XYHC-Beer)和红茶咖啡精酿啤酒(HCKF-Beer)为研究对象,采用顶空-气相色谱-离子迁移谱(HS-GC-IMS)技术测定其挥发性风味成分。基于检测结果进行主成分分析(PCA)、层次聚类分析(HCA)和正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA),并结合变量重要性投影(VIP)值筛选差异挥发性风味成分(VIP值>1)。结果表明,4种精酿茶啤酒中共鉴定得到42种挥发性风味成分,包括13种醇类、10种酯类、10种酮类、3种醛类、2种烯炔类、2种含硫化合物和2种其他化合物。指纹图谱和多元统计分析结果均表明4种精酿茶啤酒的挥发性风味成分存在差异,通过VIP值>1筛选得到21种差异挥发性风味成分,其中,MJLC-Beer的差异化合物为苯甲醛和顺-3-己烯醇等,XYHC-Beer的差异化合物包括芳樟醇、(E)-芳樟醇氧化物(呋喃型)等,MLMJ-Beer的差异化合物为4-甲基-2-戊酮、糠醛等,HCKF-Beer的差异化合物为2-甲基丙醇、3-甲基丁醇等。

关键词:精酿茶啤酒;气相色谱-离子迁移谱;挥发性风味成分;多元统计分析

中图分类号:TS262.5

文章编号:0254-5071(2026)03-0293-07

doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.03.040

引文格式:尹鹏,李美勤,孙子喻,等.基于HS-GC-IMS比较不同精酿茶啤酒的挥发性风味成分差异[J].中国酿造,2026,45(3):293-299.

Difference comparison of the volatile flavor components among different craft tea beers based on HS-GC-IMS

YIN Peng^{1,2}, LI Meiqin¹, SUN Ziyu², CHEN Lingzhi¹, YANG Jie³, SU Dan^{1*}

(1.Henan Key Laboratory of Tea Plant Comprehensive Utilization in South Henan, College of Tea Science, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China; 2.Xinyang Wenxin Tea Co., Ltd., Xinyang 464000, China;

3.Xinyang Tea Industry Development Center, Xinyang 464000, China)

Abstract: To compare the differences in volatile flavor components of different craft teas beers, using Maojian green tea craft beer (MJLC-Beer), jasmine Maojian craft beer (MLMJ-Beer), Xinyang black tea craft beer (XYHC-Beer), and black tea coffee craft beer (HCKF-Beer) as the research objects, the volatile flavor components of the beers were determined using the headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS). Based on the detection results, principal component analysis (PCA), hierarchical cluster analysis (HCA), and orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) were conducted, and the differential volatile flavor components (VIP values > 1) were selected combining the variable importance in projection (VIP). The results showed that a total of 42 volatile flavor components were identified in the 4 craft tea beers, including 13 alcohols, 10 esters, 10 ketones, 3 aldehydes, 2 alkenes, 2 sulfur-containing compounds and 2 other compounds. The fingerprint patterns and multivariate statistical analysis results both indicated that there were differences in the volatile flavor components of the 4 craft tea beers. 21 differential volatile flavor components were screened with VIP values > 1. Among them, the differential compounds of MJLC-Beer were benzaldehyde and cis-3-hexenol, etc., the differential compounds of XYHC-Beer included linalool, (E)-linalool oxide (furan type), etc., the differential compounds of MLMJ-Beer were 4-methyl-2-pentanone and furfural, etc., and the differential compounds of HCKF-Beer were 2-methylpropanol and 3-methylbutanol, etc.

Key words: craft tea beer; gas chromatography-ion mobility spectrometry; volatile flavor component; multivariate statistical analysis

茶叶中含有茶多酚、咖啡碱、茶氨酸、茶多糖等功能活性成分,具有抗氧化、抗炎、心血管保护、免疫调节、预防阿尔茨海默病等生理功能^[1-2]。茶饮是世界上颇受欢迎的非酒精饮料之一,啤酒是一种富含营养物质且酒精度低的饮料

酒,茶啤酒是在啤酒酿造过程中加入茶叶或茶叶提取物得到的兼具茶叶与啤酒双重风味的新型啤酒,不仅赋予了啤酒茶的风味,而且融入了茶叶的功能性成分,近年来颇受消费者青睐^[3]。茶叶中的茶多酚、咖啡碱、氨基酸等滋味成

收稿日期:2025-04-18

修回日期:2025-12-07

基金项目:河南省科技攻关项目(252102110082);信阳农林学院青年骨干教师培养项目(2025);河南省现代农业产业体系(HARS-22-11-Z4);信阳市科技攻关项目(20230031)

作者简介:尹 鹏(1988-),男,副教授,博士,研究方向为茶叶品质化学与质量安全。

*通讯作者:苏 丹(1991-),女,副教授,博士,研究方向为茶资源开发及利用。

分和醇类、酮类、酯类、醛类等香气成分可以赋予茶啤酒独特的风味。研究表明,11种市售的茶啤酒中茶多酚含量为51.5~281.8 mg/L、咖啡碱含量为0~26.18 mg/L和游离氨基酸含量为788~2 640 mg/L^[4]。在啤酒酿造中添加茶叶或者茶叶提取物,可以降低啤酒苦味^[5],增加抗氧化活性^[6-7],丰富整体风味,延长保质期^[8]。不同种类茶啤酒在酿造过程中其挥发性成分会发生显著变化^[9],WU J H等^[7]采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry,HS-SPME-GC-MS)对绿茶啤酒的挥发性成分进行了分析测定,结果表明辛酸乙酯、壬酸乙酯、癸酸乙酯、芳樟醇和苯乙醇对绿茶啤酒香气的形成有重要作用。王艺等^[10]研究发现,茉莉花茶啤酒中的特有挥发性成分为香叶醇、苯乙酸苯甲酯、茉莉酮等。因此,探究不同茶啤酒中的差异风味化合物具有重要意义。

气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry,GC-IMS)结合了GC的高分离度和IMS的高灵敏度优势,可检测样品中的痕量挥发性有机化合物,在啤酒^[11-13]、白酒^[14-15]的研发及工艺优化等方面已有诸多应用。研究表明,不同茶叶类型(如绿茶、红茶、茉莉花茶等)对

精酿茶啤酒的风味有重要影响^[5,16,17]。因此,本研究以毛尖绿茶精酿啤酒、茉莉毛尖精酿啤酒、信阳红茶精酿啤酒和红茶咖啡精酿啤酒为研究对象,采用顶空-气相色谱-离子迁移谱(headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry,HS-GC-IMS)技术对其挥发性风味成分进行比较分析,并基于检测结果进行主成分分析(principal component analysis,PCA)、层次聚类分析(hierarchical clustering analysis,HCA)和正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least-squares discrimination analysis,OPLS-DA),并结合变量重要性投影(variable importance in the projection,VIP)值筛选差异挥发性风味化合物(VIP值>1),以期为精酿茶啤酒的品质评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

选取2024年12月同一批次生产的中式精酿茶啤酒(毛尖绿茶啤酒、茉莉毛尖啤酒、信阳红茶啤酒和红茶咖啡黑啤),配料信息及编号见表1。毛尖绿茶啤酒和红茶咖啡黑啤:英博金龙泉啤酒(湖北)有限公司;茉莉毛尖啤酒和信阳红茶啤酒:山东阳春啤酒有限公司。

表1 不同精酿茶啤酒信息
Table 1 Information of the different craft tea beers

精酿茶啤酒名称和编号	原料	香气描述
毛尖绿茶啤酒/MJLC-Beer	信阳毛尖茶(4 g/L)	茶香、麦香、酒香
茉莉毛尖茶啤酒/MLMJ-Beer	茉莉毛尖茶(4 g/L)	茶香、花香、麦香、酒香
信阳红茶啤酒/XYHC-Beer	信阳红茶(3 g/L)	茶香、麦香、酒香
红茶咖啡黑啤/HCKF-Beer	信阳红茶(2 g/L)、咖啡粉、焦糖色	茶香、咖香、麦香、酒香

2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮和2-壬酮(均为分析纯):上海阿拉丁生化科技股份有限公司;4-甲基-2-戊醇(纯度>99%):德国Dr. Ehrenstorfer公司。

1.2 仪器与设备

H290100026型20 mL顶空瓶:山东海能科学仪器有限公司;SHIMADZU GC2030气相色谱仪、SH-WAX毛细管色谱柱(30 m×0.32 mm,0.25 μm):日本岛津公司;IMS-S检测器:德国G.A.S.公司。

1.3 方法

1.3.1 样品前处理

称取1.0 mL精酿茶啤酒置于20 mL顶空瓶中,60 ℃孵育10 min后进样,孵化转速500 r/min,加入16.5 mg/L的4-甲基-2-戊醇水溶液10 μL作为内标,每个样品测定3组平行。

1.3.2 GC条件

SH-WAX毛细管色谱柱(30 m×0.32 mm,0.25 μm),载气为高纯氮气(纯度≥99.999%),流速1.2 mL/min;升温程序:初始温度40 ℃保持3 min,以5 ℃/min的速率升至150 ℃后保持10 min,运行时间35 min。进样口温度250 ℃,分流

进样,分流比1:1。

1.3.3 IMS条件

电离源为氙源(³H),迁移管长度98 mm,电场强度500 V/cm,迁移管温度45 ℃,迁移气为高纯氮气(纯度≥99.999%),流速150.0 mL/min,正离子模式扫描。

1.3.4 定性定量分析

根据仪器配套VOCal 0.4.10软件内置的美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology,NIST)数据库和IMS数据库,结合保留指数对挥发性风味成分进行定性。根据目标物峰体积与内标化合物峰体积的比值定量,其计算公式^[11]如下:

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

式中: C_i 为挥发性风味成分的含量,μg/kg; A_i 为各挥发性风味成分的峰体积; A_{std} 为内标化合物的峰体积; C_{std} 为内标化合物的质量浓度,mg/kg; V_{std} 为内标化合物体积,mL; ρ 为内标化合物的密度,g/mL; m 为样品质量,g。

1.3.5 数据处理

利用VOCal 0.4.10数据处理软件中的Reporter、Gallery

Plot插件分别生成挥发性风味成分的三维谱图、二维谱图、差异谱图和指纹图谱,用于样品间挥发性风味成分的对比。主成分分析(principal component analysis, PCA)、层次聚类分析(hierarchical clustering analysis, HCA)和正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least-squares discrimination analysis, OPLS-DA)得分图利用迈维云工具(<https://cloud.metware.cn/#/tools/tool-list>)绘制。

2 结果与分析

2.1 不同精酿茶啤酒HS-GC-IMS图谱分析

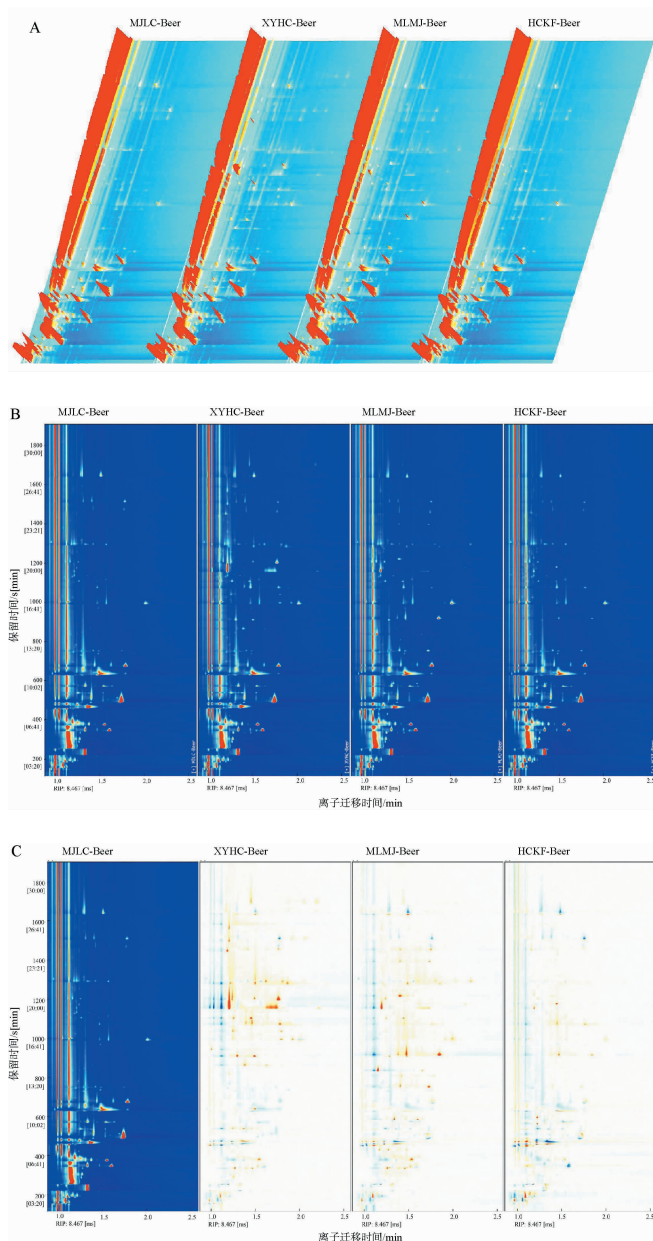


图1 不同精酿茶啤酒中挥发性风味成分的HS-GC-IMS三维谱图(A)、二维谱图(B)和差异谱图(C)

Fig. 1 HS-GC-IMS three-dimensional spectra (A), two-dimensional spectra (B) and differential spectrum (C) of volatile flavor components in different craft tea beers

4种精酿茶啤酒的HS-GC-IMS谱图见图1。如图1A三维谱图所示,从迁移时间、保留时间和信号峰强度可以直观地看出4种茶啤酒中的挥发性风味成分存在差异,表明HS-GC-IMS可以将4款茶啤酒样品中的挥发性成分较好地分离。为了便于观察,取俯视图进行对比,结果见图1B。二维谱图是通过将离子迁移时间和反应离子峰(reaction ion peak, RIP)的归一化而获得,颜色代表每个化合物的信号强度,从蓝色到红色,颜色越深表示峰信号强度越大。如图1B所示, MJLC-Beer、XYHC-Beer、MLMJ-Beer和HCKF-Beer的峰信号强度有明显区分,表明4种茶啤酒的挥发性成分均存在差异。为进一步对比,以MJLC-Beer样品作为参比,XYHC-Beer、MLMJ-Beer和HCKF-Beer的谱图扣减参比,得到4种茶啤酒的差异谱图(图1C)。如果目标样品和参比中的挥发性风味成分含量一样,则扣减后的背景为白色,而红色代表该化合物的浓度在目标样品中高于参比,蓝色代表该化合物的浓度在目标样品中低于参比^[14-15]。由图1C可知,XYHC-Beer、MLMJ-Beer、HCKF-Beer的差异谱图中有明显的红色、蓝色区域,表明其中一些挥发性风味成分或增加或降低,表现出一定的差异分辨特征。

2.2 不同精酿茶啤酒挥发性风味成分分析

对4种精酿茶啤酒样品的挥发性风味成分进行分析,结果见表2。由表2可知,共测定出42种挥发性风味成分(同一种化合物的单体和二聚体视为一种化合物),包括13种醇类、10种酯类、10种酮类、3种醛类、2种烯炔类、2种含硫化化合物和2种其他化合物。4种精酿茶啤酒样品中醇类、酯类和酮类化合物较丰富,这与ZHU C Q等^[18]研究结果一致。

醇类物质能够赋予酒体甜味,并能增强整个酒体的香气层次。在4种精酿茶啤酒中醇类化合物的种类和含量最为丰富,含量为5 363.98~6 706.07 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。其中乙醇、苯乙醇(玫瑰花香)、2-甲基丙醇(清新的酒味)、3-甲基丁醇(威士忌酒香、香蕉果香)和芳樟醇(柑橘、玫瑰、蓝莓味)^[19-20]含量较高,它们不仅赋予了酒体花果香,而且对啤酒的口味具有暖化作用^[21]。MJLC-Beer和XYHC-Beer中苯乙醇的含量无显著性差异,但均显著高于MLMJ-Beer和HCKF-Beer ($P<0.05$);XYHC-Beer中的顺-3-己烯醇(青香、草本香)和(E)-芳樟醇氧化物(呋喃型)显著高于其他3种茶啤酒($P<0.05$),研究表明在啤酒酿造过程中添加茶叶可以明显提高茶啤酒中芳樟醇的含量,且冷萃法可以进一步增加茶啤酒中芳樟醇含量^[22]。

4种精酿茶啤酒样品的酯类化合物含量为4 015.23~4 701.93 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。其中乙酸乙酯(果香、甜香)、乙酸异丁酯(果香、复盆子香)、乙酸异戊酯(甜味、香蕉果味)、己酸乙酯(菠萝果香、酒香)、丁酸乙酯(菠萝果香、脂香)和辛酸乙酯(菠萝、苹果味和白兰地的酒香味)的含量较高,乙酸酯和乙酯是啤酒发酵过程中最重要的酯类化合物。这些酯类化合物不仅可以赋予酒体浓郁的果香,而且己酸乙酯、辛

酸乙酯等与消费者的品饮欲望有一定的相关性,对促进消费者购买有积极作用^[23]。MJLC-Beer和XYHC-Beer中己酸乙酯的含量无显著性差异($P>0.05$),但均显著低于MLMJ-Beer和HCKF-Beer($P<0.05$);MLMJ-Beer中的辛酸乙酯和乙酸异丁酯含量显著高于其他3种茶啤酒($P<0.05$),说明其呈现出浓郁的菠萝及苹果香气。

表2 不同精酿茶啤酒中挥发性风味成分HS-GC-IMS检测结果
Table 2 Detection results of volatile flavor components in the different craft tea beers by HS-GC-IMS

序号	化合物	含量/(μg·kg ⁻¹)				香气描述
		MJLC-Beer	XYHC-Beer	MLMJ-Beer	HCKF-Beer	
酯类						
1	乙酸乙酯	1 559.58±106.35b	1 751.91±134.25ab	1 792.98±104.61a	1 721.70±97.67ab	果香、甜香
2	己酸乙酯-M	25.49±1.54b	26.37±0.30b	30.17±1.63a	29.73±1.20a	菠萝果香、酒香
3	己酸乙酯-D	249.55±7.32b	243.43±0.77b	302.83±12.39a	294.43±9.20a	
4	乙酸异戊酯-M	74.92±9.40b	82.49±4.82ab	83.89±4.06ab	92.24±3.52a	甜味、香蕉果味
5	乙酸异戊酯-D	1 115.43±54.96c	1 197.19±25.61b	1 282.18±36.39a	1 268.50±42.04ab	
6	丁酸乙酯-M	182.55±6.15d	264.34±4.89b	290.96±7.02a	221.18±1.22c	菠萝果香、脂香
7	丁酸乙酯-D	387.47±12.00a	394.26±2.68a	382.94±4.81a	379.55±13.97a	
8	丁酸己酯	15.70±0.80b	15.11±1.07b	17.95±1.24a	14.46±1.17b	甜香、苹果味
9	乙酸丁酯	8.37±0.47a	6.89±0.45b	4.99±0.67c	6.71±0.55b	果香
10	辛酸乙酯-M	37.06±4.25c	44.56±2.15bc	57.15±6.35a	48.82±3.89b	菠萝、苹果味和白兰地的酒香味
11	辛酸乙酯-D	77.46±0.84c	87.41±4.17c	135.33±10.21a	114.26±9.34b	
12	乙酸异丁酯	264.96±12.16b	275.51±12.66b	301.30±8.49a	186.52±9.27c	果香、复盆子香
13	3-甲基丁酸丁酯	6.19±0.33a	4.06±0.67b	7.07±1.28a	7.30±0.52a	香蕉、蓝干酪味
14	乙酸丙酯	10.49±2.61a	11.96±1.72a	12.19±1.44a	11.90±3.25a	果香、梨香
醇类						
15	乙醇	3 634.09±170.78b	3 902.8±163.83ab	3 866.71±118.53ab	3 941.47±125.52a	芳香味
16	丙醇	129.73±5.56a	119.16±4.53b	109.32±1.20c	109.17±3.99c	刺激性气味
17	苯乙醇-M	130.68±1.08a	137.84±2.34a	115.43±2.43b	99.81±9.13c	玫瑰花香
18	苯乙醇-D	100.83±1.46a	102.17±3.96a	76.45±4.04b	58.00±8.39c	
19	2-甲基丙醇-M	43.76±1.1c	54.32±4.78a	46.10±2.98bc	50.44±1.90ab	清香、酒味
20	2-甲基丙醇-D	466.90±19.77b	553.34±28.71a	482.93±2.64b	366.88±20.83c	
21	3-甲基丁醇-M	81.14±9.95a	88.07±4.79a	89.87±3.79a	90.12±3.86a	威士忌酒香、香蕉果香
22	3-甲基丁醇-D	635.04±16.55b	723.23±15.29a	659.48±13.83b	605.65±11.27c	
23	顺-3-己烯醇-M	8.42±1.63b	14.00±1.42a	10.26±1.7b	8.67±2.23b	青香、草本香
24	顺-3-己烯醇-D	0.87±0.54c	21.84±0.73a	7.39±0.51b	1.32±0.71c	
25	2-乙基己醇-M	10.06±7.05b	28.90±1.87a	15.88±4.91b	9.69±6.43b	柑橘味、新鲜花香
26	2-乙基己醇-D	13.62±12.45b	35.93±1.09a	22.28±8.77ab	11.26±11.15b	
27	丁醇	9.02±0.21b	20.82±1.05a	5.73±0.53c	5.07±1.06c	红酒味
28	芳樟醇-M	53.13±7.39d	587.92±5.15a	206.79±7.54b	78.15±18.46c	柑橘、玫瑰、蓝莓味
29	芳樟醇-D	29.07±11.09c	228.00±5.67a	66.58±11.01b	27.98±9.89c	
30	L-薄荷醇	3.36±1.64c	32.21±1.16a	13.90±0.6b	3.98±1.85c	薄荷香
31	(E)-芳樟醇氧化物(呋喃型)-M	4.23±1.15c	15.69±0.82a	6.68±0.92b	5.20±1.74bc	甜香、花香
32	(E)-芳樟醇氧化物(呋喃型)-D	1.44±0.84b	10.08±0.45a	1.95±0.61b	1.51±0.83b	
33	冰片	6.61±0.98c	27.87±0.55a	8.71±0.87b	6.76±1.28c	樟脑味、松木香
34	正辛醇	1.97±0.66b	1.89±0.53b	2.56±0.79b	18.51±2.32a	柑橘味、甜香
酮类						
35	香芹酮-M	16.27±1.33a	12.62±1.65b	11.09±1.08bc	8.88±1.94c	留兰香
36	香芹酮-D	36.43±4.53a	20.90±0.98b	21.28±1.72b	14.99±3.13c	
37	羟基丙酮	5.90±0.11a	5.66±0.50ab	4.76±0.51b	5.13±0.59ab	焦糖味、清新
38	2-癸酮	33.71±16.21b	63.05±0.80a	49.69±11.08ab	31.22±17.57b	花香、脂肪味
39	异佛尔酮	4.37±2.63b	109.58±4.70a	6.14±3.25b	4.73±3.14b	樟脑味

序号	化合物	含量/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)				香气描述
		MJLC-Beer	XYHC-Beer	MLMJ-Beer	HCKF-Beer	
40	4-甲基-2-戊酮	2.52±0.52d	13.85±0.22b	15.04±0.74a	4.01±0.54c	酮样香味
41	2-己酮-M	11.75±0.84c	13.44±0.97bc	25.91±2.31a	15.25±1.52b	
42	2-己酮-D	1.27±0.87b	1.32±0.87b	4.58±1.31a	1.59±1.11b	
43	2-壬酮-M	2.88±0.96b	4.05±0.84b	15.88±2.33a	6.02±2.02b	青香、草药香
44	2-壬酮-D	1.98±1.21b	2.79±1.32b	73.27±18.07a	8.97±6.16b	
45	6-甲基-5-庚烯-2-酮	24.78±1.78b	26.58±2.51b	163.87±2.81a	27.76±4.49b	果香、柑橘味
46	苯乙酮-M	31.33±5.34a	35.73±1.63a	36.25±1.81a	35.55±0.63a	甜味、杏仁味
47	苯乙酮-D	16.76±1.72a	9.97±0.93b	11.31±0.96b	18.87±1.00a	
48	丙酮	150.33±11.49d	226.79±4.12c	291.36±12.52b	334.71±4.37a	清新、苹果味
醛类						
49	苯甲醛-M	14.55±0.57d	26.87±0.70a	20.28±0.47b	15.70±0.50c	苦杏仁、坚果香
50	苯甲醛-D	7.93±2.61c	44.01±0.33a	22.40±1.42b	9.65±1.34c	
51	乙醛	16.52±2.63b	22.26±2.34a	22.26±1.89a	25.49±3.37a	青草味、水果味
52	糠醛	1.42±0.26b	1.17±0.4bc	0.75±0.30c	2.04±0.33a	甜味、杏仁香
烯烃类						
53	<i>p</i> -伞花烃	9.02±0.82ab	10.13±0.34a	7.24±1.18c	8.31±0.95bc	柑橘味、木香
54	(<i>E</i>)- β -石竹烯	6.26±2.56b	7.56±2.60b	52.89±2.9a	8.37±3.62b	甜香、木香
含硫化合物						
55	二甲硫	28.23±3.21b	34.03±1.84a	36.39±2.40a	31.71±3.18ab	卷心菜味
56	二氢-2-甲基-3(2 <i>H</i>)-噻吩酮	9.90±0.67a	10.78±1.44a	11.48±0.71a	9.49±1.04a	硫磺味
其他						
57	2-异丙基-5-甲基茴香醚	6.71±0.32a	3.17±0.29c	5.47±0.40b	4.85±0.42b	烟味
58	乙酸	58.43±1.72ab	64.46±2.89a	50.45±0.23b	65.06±8.52a	辛辣味

4-甲基-2-戊酮在4种茶啤酒中两两之间存在显著差异, HCKF-Beer中含量最高(15.04 $\mu\text{g/kg}$), 是MJLC-Beer(2.52 $\mu\text{g/kg}$)的5.97倍。具有留兰香的香芹酮在MJLC-Beer中的含量显著高于其他3种茶啤酒($P<0.05$), MLMJ-Beer中的6-甲基-5-庚烯-2-酮(柑橘味、果味)、(*E*)- β -石竹烯(甜香、木香)^[24]是其他3种茶啤酒平均含量的6~7倍。

为了更直观地对比分析4种精酿茶啤酒中挥发性风味成分的差异,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4种酒样的指纹图谱,结果见图2。图中每一行代表1个样品中选取的全部信号峰,每一列代表同一挥发性风味成分在不同样品中的信号峰强度。

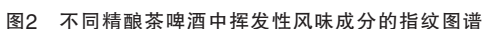


Fig. 2 Fingerprint of volatile flavor components in different craft tea beers

由图2可知,区域A、B、C、D的信号峰强度与其他样品有明显区别,说明4种精酿啤酒样品的挥发性风味成分在种类上较为相似,但在含量上呈现明显差异。如区域A所示,MJLC-Beer中丁酸乙酯、丙醇、香芹酮、乙酸丁酯、2-异丙基-5-甲基茴香醚和羟基丙酮等挥发性风味成分离子峰信号强度较高,这些成分的富集使其呈现出清甜果香。如区域B所示,XYHC-Beer样品中2-甲基丙醇、3-甲基丁醇、2-癸酮、苯甲醛、顺-3-己烯醇、2-乙基己醇、丁醇、芳樟醇、L-薄荷醇、(E)-芳樟醇氧化物(呋喃型)、冰片和异佛尔酮的离子峰强度呈现较高信号,赋予酒体水果甜香、清鲜花果香风味。如区域C所示,MLMJ-Beer中辛酸乙酯、4-甲基-2-戊酮、2-己酮、2-壬酮、(E)- β -石竹烯和6-甲基-5-庚烯-2-酮离子峰强度明显高于其他3种,使酒体具有独特木香。如区域D所示,乙醛、丙酮、乙酸、3-甲基丁酸丁酯、糠醛、正辛醇的离子峰信号强度在HCKF-Beer中较突出,为酒样带来柑橘类果香和杏仁味。

2.4 不同精酿啤酒中挥发性风味成分多元统计分析

采用PCA对4种精酿啤酒样品进行分析,如图3A所示,PC1和PC2的方差贡献率分别为37.12%和30.82%,累积方差贡献率为67.94%,表明PCA能够解释总变异的67.94%,具有较好的代表性。XYHC-Beer在PC1的正半轴,MJLC-Beer、MLMJ-Beer和HCKF-Beer在PC1的负半轴,从PC1的角度分析,XYHC-Beer可以与其他3种茶啤酒有效区分。

从PC2的角度分析,另外3个茶啤酒样品分布于不同象限中,说明三者存在差异。PCA载荷图如图3B所示,展示了每种挥发性风味成分的相对重要性以及它们与4种茶啤酒样品之间的关系(各挥发性风味成分序号与表2一致)。结合图3A和图3B可知,XYHC-Beer与其他3种茶啤酒的分离,主要与芳樟醇、(E)-芳樟醇氧化物(呋喃型)等有关,YAO HB等^[29]的研究发现信阳红茶中芳樟醇、芳樟醇氧化物的含量相对较高。图3C为4种茶啤酒的聚类树状图,由图3C可知,XYHC-Beer独自聚为一类,而其他3种茶啤酒聚为一类,这与PCA的分析结果一致。利用OPLS-DA进一步分析,由图3D可知,在OPLS-DA的模型中,4种茶啤酒样品组内差异小,组间实现完全分离。对OPLS-DA模型进行随机分组200次置换检验(图3E), $Q^2(-0.892)$ 与Y轴的截距小于0,说明模型不存在过拟合现象。由图3F可知,4种精酿啤酒共筛选出21种差异挥发性风味成分(VIP值>1),主要包括苯乙酮、2-甲基丙醇、3-甲基丁醇、芳樟醇、苯甲醛、L-薄荷醇、顺-3-己烯醇等。综上,XYHC-Beer样品与其他茶啤酒的挥发性风味成分差异较大,芳樟醇、(E)-芳樟醇氧化物等是其主要差异挥发性风味成分,这与茶啤酒在酿造过程中所使用的茶叶原料和种类有关。MJLC-Beer样品的主要差异化合物是苯甲醛和顺-3-己烯醇,MLMJ-Beer样品中主要差异化合物为4-甲基-2-戊酮、丁酸乙酯和糠醛,HCKF-Beer样品的主要差异化合物则为2-甲基丙醇、3-甲基丁醇、正辛醇和苯乙醇。

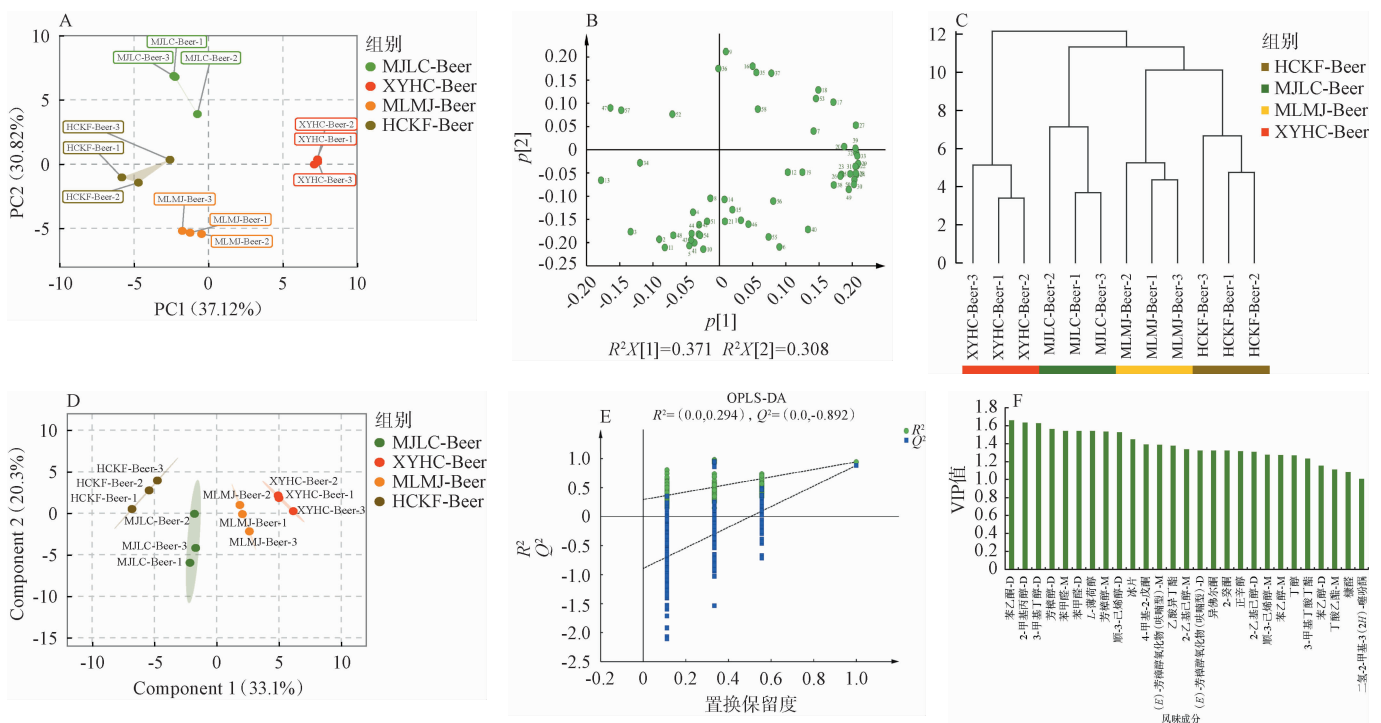


图3 不同精酿啤酒挥发性风味成分主成分分析散点图(A)、载荷图(B),层次聚类分析树状图(C),正交偏最小二乘判别分析得分散点图(D)、200次置换检验结果(E)和变量重要性投影值(F)

Fig. 3 Principal component analysis scatter plot (A), loading plot (B), hierarchical cluster analysis tree diagram (C), orthogonal partial least squares discriminant analysis scatter plot (D), 200 times permutation test results (E) and variable importance projection value (F) of volatile flavor components in the different craft tea beers

3 结论

本研究以毛尖绿茶、茉莉毛尖、信阳红茶和红茶咖啡精酿啤酒为研究对象,采用HS-GC-IMS技术对其挥发性风味成分进行测定分析。共鉴定出42种挥发性风味成分,包括13种醇类、10种酯类、10种酮类、3种醛类、2种烯烴类、2种含硫化合物和2种其他化合物。醇类、酯类和酮类化合物是精酿茶啤酒中主要的挥发性风味成分。GC-IMS差异图谱、指纹图谱和多元统计分析结果均表明4种精酿茶啤酒的挥发性风味成分存在差异,XYHC-Beer与其他3种精酿茶啤酒区别明显,其主要原因为茶啤酒在酿造过程中所使用的茶叶原料和种类不同。OPLS-DA结合VIP值共筛选出苯乙酮、2-甲基丙醇、3-甲基丁醇、芳樟醇、苯甲醛等21种差异挥发性风味成分(VIP值>1),其中,MJLC-Beer的主要差异化合物是苯甲醛和顺-3-己烯醇,XYHC-Beer的主要差异化合物包括芳樟醇、(E)-芳樟醇氧化物(呋喃型)、2-癸酮、3-甲基丁酸丁酯和2-乙基己醇,MLMJ-Beer的主要差异化合物为4-甲基-2-戊酮、丁酸乙酯和糠醛,HCKF-Beer的主要差异化合物为2-甲基丙醇、3-甲基丁醇、正辛醇和苯乙醇。研究结果可为精酿茶啤酒选择和使用原料茶提供科学依据,也为消费者选购不同风味的精酿茶啤酒提供参考。

参考文献:

- [1] LUO Q X, LUO L B, ZHAO J M, et al. Biological potential and mechanisms of Tea's bioactive compounds: An updated review[J]. *J Adv Res*, 2024, 65: 345-363.
- [2] ZHANG L, CAO Q Q, GRANATO D, et al. Association between chemistry and taste of tea: A review[J]. *Trends Food Sci Tech*, 2020, 101: 139-149.
- [3] 陈德权,朱艳,邹纯,等. 茶啤酒的研究进展[J]. *茶叶科学*, 2022, 42(2): 169-178.
- [4] 李德超,丁小燕,王连星,等. 11种市售茶啤酒的品质比较研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(22): 116-121.
- [5] CHEN D Q, ZOU C, HUANG Y B, et al. Adding functional properties to beer with jasmine tea extract[J]. *Front Nutr*, 2023, 10: 1109109.
- [6] YANG L X, LU Z D, LU J, et al. Evaluation of the antioxidant characteristics of craft beer with green tea[J]. *J Food Sci*, 2023, 88(2): 625-637.
- [7] WU J H, ZHANG Y, QIU R, et al. Effects of tea addition on antioxidant capacity, volatiles, and sensory quality of beer[J]. *Food Chem: X*, 2024, 21: 101193.
- [8] DE FRANCESCO G, BRAVI E, SANARICA E, et al. Effect of addition of different phenolic-rich extracts on beer flavour stability[J]. *Foods*, 2020, 9(11): 1638.
- [9] RONG L, PENG L J, HO C T, et al. Brewing and volatiles analysis of three tea beers indicate a potential interaction between tea components and lager yeast[J]. *Food Chem*, 2016, 197: 161-167.
- [10] 王艺,于华,夏婷,等. 茉莉花茶啤酒的酿造工艺优化[J]. *食品与发酵科技*, 2023, 59(5): 38-43, 51.
- [11] 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啤香气比较[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(7): 325-332.
- [12] 龚霄,陈廷慧,胡小军,等. 基于GC-IMS技术的百香果啤风味分析[J]. *食品与机械*, 2022, 38(11): 46-52, 75.
- [13] 李凤林,向思敏,李静,等. 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[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(7): 305-314.
- [14] 孙康辉,范宸铭,李学思,等. GC-IMS结合化学计量学表征河南不同品牌浓香型白酒挥发性风味物质特征[J]. *中国酿造*, 2025, 44(7): 264-272.
- [15] 占成,尹怀宁,徐洋辉,等. 基于GC-IMS技术分析不同香型白酒挥发性成分差异[J]. *中国酿造*, 2023, 42(3): 241-245.
- [16] 胡重庆. 绿茶啤酒的酿造研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2017.
- [17] 邹银隆. 红茶啤酒的酿造及功能性研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2018.
- [18] ZHU C Q, ZHOU Y, XIE Q C, et al. Integration of E-tongue, GC-IMS and chemometrics for unraveling the disparities in volatile profiles of optimized jujube craft beers[J]. *J Chromatogr A*, 2025, 1760: 466264.
- [19] 杨永学,孙晓璐. 基于GC-IMS技术的精酿龙井茶啤酒酿造过程中挥发性风味物质分析[J]. *延边大学农学学报*, 2025, 47(1): 87-93.
- [20] 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 Chem*, 2022, 376: 131933.
- [21] PIRES E J, TEIXEIRA J A, BRÁNYIK T, et al. Yeast: The soul of beer's aroma-a review of flavour-active esters and higher alcohols produced by the brewing yeast[J]. *Appl Microbiol Biot*, 2014, 98: 1937-1949.
- [22] 林睿,吴殿辉,彭政聪,等. 茶叶不同添加方式对太平猴魁绿茶啤酒风味影响[J]. *食品与发酵工业*, 2025, 51(1): 81-89.
- [23] VIEJO C G, FUENTES S, TORRICO D D, et al. Chemical characterization of aromas in beer and their effect on consumers liking[J]. *Food Chem*, 2019, 293: 479-485.
- [24] GUO X Y, HO C T, WAN X C, et al. Changes of volatile compounds and odor profiles in Wuyi rock tea during processing[J]. *Food Chem*, 2021, 341: 128230.
- [25] YAO H B, SU H, MA J Y, et al. Widely targeted volatileomics analysis reveals the typical aroma formation of Xinyang black tea during fermentation[J]. *Food Res Int*, 2023, 164: 112387.