

GC-IMS结合多元统计学比较不同产区市售酱香型白酒挥发性风味成分

冯雪莹^{1,2,3,4,5},倪慧^{3,4},侯强川^{1,2,3,4,5},叶明波⁵,郭壮^{1,2,3,4,5},王玉荣^{1,2,3,4,5*}

(1.湖北文理学院 酿酒技术产业学院,湖北 襄阳 441053;2.湖北文理学院 湖北省食品配料工程技术研究中心,湖北 襄阳 441053;
3.酱香型白酒固态发酵襄阳市重点实验室,湖北 襄阳 441053;4.襄阳市酱香型白酒固态发酵企校联合创新中心,湖北 襄阳 441053;
5.襄阳市酱香型白酒生态酿造企校联合创新中心,湖北 襄阳 441053)

摘要:该研究将4个产自茅台镇和4个产自其他地区的市售酱香型白酒作为研究对象,采用气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)技术结合多元统计学方法,比较分析了不同产区市售酱香型白酒挥发性风味成分的差异。结果表明,8个白酒样品中共检出51种挥发性风味成分,包括酯类24种、醇类9种、醛类10种和酮类8种。主成分分析(PCA)结果表明,茅台镇和其他产区酱香型白酒挥发性风味成分存在差异。基于相对气味活度值(ROAV)共筛选出6种关键挥发性风味化合物(ROAV>1),其中,对茅台镇酱香型白酒香气贡献更突出的是异戊酸乙酯、辛酸乙酯和乙酸异戊酯,ROAV分别为82.25、5.56、1.52,对其他产区酱香型白酒香气贡献更突出的为己酸乙酯、戊酸乙酯和丁酸乙酯,ROAV分别为33.19、32.55、10.48。

关键词:酱香型白酒;茅台镇和其他地区;气相色谱-离子迁移谱;多元统计学分析;关键差异挥发性风味化合物

中图分类号:TS201.3 文章编号:0254-5071(2026)01-0282-06 doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.01.038
引文格式:冯雪莹,倪慧,侯强川,等. GC-IMS结合多元统计学比较不同产区市售酱香型白酒挥发性风味成分[J]. 中国酿造,2026,45(1):282-287.

Comparative of volatile flavor components of commercially available sauce-flavor Baijiu from different production areas by GC-IMS combined with multivariate statistics

FENG Xueying^{1,2,3,4,5}, NI Hui^{3,4}, HOU Qiangchuan^{1,2,3,4,5}, YE Mingbo⁵, GUO Zhuang^{1,2,3,4,5}, WANG Yurong^{1,2,3,4,5*}

(1.Brewing Technology Industrial College, Hubei University of Arts and Sciences, Xiangyang 441053, China; 2.Hubei Provincial Engineering and Technology Research Center for Food Ingredients, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China;
3.Xiangyang Key Laboratory of Solid State Fermentation of Jiangxiang Baijiu, Xiangyang 441053, China;
4.Xiangyang Jiangxiang Baijiu Solid State Fermentation Enterprise-School Joint Innovation Center, Xiangyang 441053, China;
5.Xiangyang Maotai-Flavor Baijiu Ecological Brewing Enterprise-University Joint Innovation Center, Xiangyang 441053, China)

Abstract:Using four commercially available sauce-flavor (Jiangxiangxing) Baijiu produced in Maotai town and four from other production regions as the research objects, the differences of volatile flavor components of commercially available sauce-flavor Baijiu produced from different production areas were compared and analyzed based on gas chromatography ion mobility spectroscopy (GC-IMS) technology and multivariate statistical analysis method. The results showed that a total of 51 volatile flavor compounds were identified in the eight Baijiu samples, including 24 esters, 9 alcohols, 10 aldehydes, and 8 ketones. Principal component analysis (PCA) indicated that there were differences in volatile flavor components between Maotai town and other production areas of sauce-flavor Baijiu. Based on the relative odor activity value (ROAV), a total of 6 key volatile flavor compounds (ROAV>1) were screened out. Among them, ethyl isopentate, ethyl octanoate and isopentyl acetate contributed more significantly to the aroma of Maotai town's sauce-flavor Baijiu, with ROAV values of 82.25, 5.56 and 1.52, respectively. Ethyl hexanoate, ethyl valerate and ethyl butyrate contributed more significantly to the aroma of other production regions' sauce-flavor Baijiu, with ROAV values of 33.19, 32.55 and 10.48, respectively.

Key words:sauce-flavor Baijiu; Maotai town and other areas; GC-IMS; multiple statistical analysis; key differential volatile flavor compound

作为中国白酒最具代表性的香型之一^[1],酱香型白酒的生产过程较为复杂,对酿造原料、地理环境及其他微生态环境均有一定要求^[2]。酱香型白酒的核心产区主要分布于贵州省和四川省接壤的赤水河流域沿岸,独特的地理位置和气候条件孕育出一大批知名的酱香型白酒品牌,例如茅台、郎酒和习酒等。除此之外,我国山东省、河北省和黑

龙江省等北方地区亦衍生出许多酱香型白酒品牌,例如云门酱酒、北大仓酱酒和河北迎春酒等。由于酿造环境、工艺以及储藏方式的差异,有研究指出贵州省仁怀市和四川省出产的酱香型白酒具有自身独特的风味特征,仁怀产区样品主要呈现曲香,而四川产区样品则呈现青草香^[3]。此外,亦有研究指出河北和黑龙江地区出产的酱香型白酒风味

收稿日期:2025-04-09 修回日期:2025-08-22
基金项目:湖北省自然科学基金计划襄阳创新发展联合基金项目(2023AFD049)
作者简介:冯雪莹(2005-),女,本科生,研究方向为食品生物技术。
*通讯作者:王玉荣(1993-),女,讲师,博士,研究方向为食品生物技术。

特征亦存在显著差异,河北产区样品粮香、曲香、焦香突出,整体呈现焦中带酱的感官,而黑龙江产区样品甜香更为突出^[4]。因此,对不同产区出产的酱香型白酒风味物质进行解析,积极甄别不同产区酱香型白酒的风味特征物质,对酱香型白酒风味品质的提升具有积极意义。

气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)技术在发酵食品挥发性风味物质鉴别领域具有广泛的应用^[5],其通过高选择性识别样品中可挥发性成分,获得被测物质的三维数据(保留时间、迁移时间和离子强度),具有操作简单快捷、灵敏度高和谱图可视化的分析优势^[6]。在酿造酒风味研究领域,该技术已用于猕猴桃酒酒龄的识别^[7]、石榴果酒挥发性风味物质的动态变化规律揭示^[8]以及不同品质白酒挥发性风味物质的甄别^[9]等。由此可见,将GC-IMS技术用于酱香型白酒挥发性风味物质的解析具有一定的可行性。

本研究采用GC-IMS技术和多元统计学研究方法,对茅台镇和其他地区酱香型白酒样品的挥发性风味成分进行比较分析,结合主成分分析(principal components analysis, PCA)和相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)得到关键化合物(ROAV>1),以期为酱香型白酒产地与其风味品质之间对应关系的确立提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

酱香型白酒样品:市售,酒精度均为53%vol,均为2022年出厂。其中,4个样品产自贵州茅台镇(编号为S1、S2、S3、S4),其余4个样品分别产自河北邯郸市、河北磁县、北京昌平区和黑龙江齐齐哈尔市(编号分别为N1、N2、N3、N4)。

1.2 仪器与设备

Flavour Spec®气相色谱-离子迁移谱联用仪(配自动进样顶空装置):德国G.A.S公司;WAX毛细管色谱柱(30 m×0.53 mm, 1 μm);美国RESTEK公司;20 mL磁力钳口顶空进样瓶;中国浙江哈迈科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 不同产区酱香型白酒挥发性风味成分GC-IMS分析

样品前处理:准确吸取100 μL酱香型白酒样品于20 mL磁力钳口顶空进样瓶中,并加入900 μL蒸馏水稀释,用磁性铝盖和硅胶隔垫密封后常温下避光保存,每个样品做三组平行。

自动顶空进样条件:参考ZHANG Q等^[10]的方法,将处理好的白酒样品置于进样盘待检,设置顶空孵育温度:60℃;加热方式:振荡加热;孵育时间:15 min;孵化转速50 r/min;

平衡时间:5 min;顶空进样针温度:85℃;进样体积:100 μL;进样模式:不分流;使用高纯氮气(N₂)(纯度≥99.99%)推动和清洗顶空针;清洗时间:5 min。

气相色谱条件:参考YU H Y等^[11-12]的方法,气相色谱柱温度为60℃,以高纯度的N₂(纯度≥99.999%)作为载气,设置流速程序:初始流速2 mL/min,保持2 min,然后经过8 min线性增加到10 mL/min,再经过20 min线性增加到100 mL/min;采集时间30 min。

离子迁移谱条件:参考LIU C F等^[13-14]的方法,漂移管温度为45℃,以高纯度的N₂(纯度≥99.999%)作为漂移气,流速保持在150 mL/min,线性电压为500 V/cm。漂移管内部的电离源为氖辐射,即β射线,放射源为³H,电离模式为正离子模式。

定性定量分析:使用GC-IMS配套的VOCaI软件内置美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)数据库和IMS数据库对被测物质进行定性分析;根据峰体积归一化法计算已定性挥发性成分的相对含量。

1.3.2 相对气味活度值的测定

参考杨李娜等^[15]的方法计算样品中挥发性成分的ROAV。选取对样品总体风味贡献最大的挥发性风味成分的ROAV定义为100,并按照以下公式对其他化合物的ROAV进行计算。

$$\text{ROAV} \approx 100 \times \frac{C_i T_m}{C_m T_i}$$

式中: C_i 为样品中挥发性风味成分的相对含量,%; T_i 为该挥发性风味成分对应的阈值,μg/L; C_m 为对样品风味贡献最大的挥发性风味成分的相对含量,%; T_m 为对样品风味贡献最大的挥发性风味成分的阈值,μg/L。

1.3.3 数据处理

使用SAS 9.4软件对已定性挥发性风味成分进行主成分分析,使用Origin 2021软件绘制柱状图、因子载荷图和因子得分图,使用R 4.2.1软件绘制气泡图。

2 结果与分析

2.1 茅台镇和其他产区酱香型白酒挥发性风味成分定性分析

本研究采用GC-IMS技术对8个酱香型白酒样品进行定性分析,结果见表1。由表1可知,8个样品中共定性出51种挥发性风味成分,包括酯类24种、醇类9种、醛类10种和酮类8种,其中包含12种化合物的单体、二聚体和多聚体,这与张卜升等^[4]的研究结果较为相似,表明这些挥发性风味成分共同作用影响酱香型白酒的特征风味。

表1 茅台镇和其他产区酱香型白酒中挥发性风味成分GC-IMS分析结果

Table 1 GC-IMS analysis results of volatile flavor components in sauce-flavor *Baijiu* of Maotai town and other production areas

挥发性化合物	CAS号	保留指数	保留时间/ s	迁移时间/ ms	峰体积		备注
					茅台镇酱香型白酒	其他地区酱香型白酒	
丁酸丙酯	C105668	1 133.3	541.807	1.687 38	686.35±275.13	1 189.30±838.91	-

续表

挥发性化合物	CAS号	保留指数	保留时间/ s	迁移时间/ ms	峰体积		备注
					茅台镇酱香型白酒	其他地区酱香型白酒	
乙酸丁酯	C123864	1 087.3	465.677	1.627 25	1 156.89±173.84	1 070.71±491.93	-
乳酸乙酯	C97643	1 321.7	891.744	1.541 11	743.94±173.60	449.64±144.00	二聚体
乳酸乙酯	C97643	1 324.2	897.324	1.141 11	3 052.33±304.81	2 453.30±337.06	单体
异戊酸乙酯	C108645	1 077.1	454.128	1.654 71	14 162.39±2 499.47	9 814.84±6 074.19	-
乙酸乙酯	C141786	900.6	303.652	1.337 25	21 025.41±1 867.54	21 851.22±1 416.34	-
丁酸乙酯	C105544	1 046.7	419.731	1.560 74	17 221.40±2 852.97	19 928.88±2 311.96	-
甲酸乙酯	C109944	829.3	273.726	1.218 13	2 933.73±151.01	3 347.26±965.54	-
己酸乙酯	C123660	1 236.9	727.169	1.804 32	30 750.15±19 785.46	29 224.72±8 326.35	二聚体
己酸乙酯	C123660	1 234.2	722.492	1.338 79	12 763.13±3 052.30	14 098.42±712.30	单体
异丁酸乙酯	C97621	972.5	347.901	1.565 23	6 579.31±1 441.81	5 415.34±1 987.77	-
辛酸乙酯	C106321	1 407.5	1 086.358	2.031 22	239.97±109.51	160.20±8.25	二聚体
辛酸乙酯	C106321	1 407.1	1 085.417	1.479 25	1 646.72±1 033.11	749.59±151.24	单体
戊酸乙酯	C539822	1 141.7	556.926	1.683 26	13 822.41±5 198.54	15 912.69±5 058.68	二聚体
戊酸乙酯	C539822	1 151.0	573.667	1.265 08	4 069.86±465.61	4 194.58±786.69	单体
丙酸乙酯	C105373	961.2	340.528	1.454 08	8 035.95±510.08	8 481.14±1 121.74	-
乙酸己酯	C142927	1 275.6	795.828	1.403 93	321.57±154.46	148.61±56.49	-
乙酸异戊酯	C123922	1 132.6	540.563	1.750 10	2 034.11±372.64	1 354.11±358.76	二聚体
乙酸异戊酯	C123922	1 133.8	542.680	1.304 98	1 436.61±239.47	1 129.83±85.08	单体
乙酸异丁酯	C110190	1 018.8	388.107	1.618 58	606.89±319.52	415.34±314.29	-
乙酸丙酯	C109604	985.6	356.454	1.475 98	3 111.30±575.00	3 444.22±1 410.12	-
己酸丙酯	C626777	1 308.8	862.438	1.856 19	235.25±210.41	129.19±34.71	二聚体
己酸丙酯	C626777	1 312.0	869.564	1.409 79	1 631.62±1 159.50	1 090.77±326.70	单体
己酸丙酯	C626777	1 309.4	863.864	1.922 21	767.21±701.25	337.93±76.81	多聚体
己醇	C111273	1 329.4	909.007	1.639 80	215.65±115.30	146.14±42.28	二聚体
己醇	C111273	1 330.3	911.173	1.329 37	1 424.49±752.82	1 080.62±455.92	单体
2-甲基丙醇	C78831	1 099.6	481.011	1.364 57	5 553.51±494.91	3 937.95±1 068.08	-
戊醇	C71410	1 241.2	734.850	1.251 72	1 478.01±354.27	1 321.13±133.40	-
2-丁醇	C78922	1 030.6	401.531	1.462 07	470.87±180.35	453.42±297.79	-
3-甲基-1-丁醇	C123513	1 207.7	675.507	1.488 22	13 122.87±1 347.07	10 200.04±2 625.08	二聚体
3-甲基-1-丁醇	C123513	1 209.3	678.297	1.241 94	4 625.01±390.50	4 428.54±237.51	单体
丁醇	C71363	1 155.2	581.313	1.182 29	2 036.30±460.01	2 165.88±653.41	-
乙醇	C64175	948.7	332.346	1.139 06	17 578.36±1 289.95	16 906.98±469.77	-
2-甲基丙醛	C78842	801.0	261.818	1.279 76	1 205.56±254.36	1 076.1±424.67	-
3-甲基丁醛	C590863	919.7	313.429	1.410 65	1 499.22±349.57	1 108.59±312.73	-
苯甲醛	C100527	1 508.0	1 314.277	1.149 43	408.66±98.26	273.76±92.46	-
糠醛	C98011	1 443.5	1 167.969	1.339 46	1 225.23±737.81	586.67±529.28	二聚体
糠醛	C98011	1 444.8	1 170.759	1.079 95	4 998.62±1 348.16	2 754.41±1 975.12	单体
庚醛	C111717	1 195.5	653.886	1.333 94	513.47±176.02	383.52±172.70	-
壬醛	C124196	1 382.4	1 029.360	1.463 55	149.65±24.03	195.58±75.47	-
戊醛	C110623	991.0	359.993	1.421 24	1 019.67±297.69	1 256.58±599.52	-
丙醛	C123386	797.4	260.318	1.146 18	1 743.32±236.66	1 799.55±1 020.72	二聚体
丙醛	C123386	796.7	260.015	1.044 32	1 105.98±151.43	1 026.38±80.92	单体
2-丁酮	C78933	848.7	281.875	1.254 36	2 034.60±474.86	1 395.63±574.30	二聚体
2-丁酮	C78933	839.8	278.140	1.063 32	1 011.95±62.12	1 107.00±121.56	单体
2-庚酮	C110430	1 189.4	642.960	1.632 14	378.44±354.77	74.66±36.82	二聚体

续表

挥发性化合物	CAS号	保留指数	保留时间/ s	迁移时间/ ms	峰体积		备注
					茅台镇酱香型白酒	其他地区酱香型白酒	
2-庚酮	C110430	1 189.9	643.834	1.261 70	723.79±372.06	410.50±126.93	单体
2-戊酮	C107879	991.0	359.993	1.372 41	2 357.61±2 473.67	1 028.53±528.39	-
4-甲基-3-戊基-2-酮	C141797	1 126.2	528.951	1.443 15	561.76±550.07	315.15±301.20	-
丙酮	C67641	818.4	269.124	1.115 47	3 316.20±925.32	2 833.41±1 786.47	-
2-己酮	C591786	1 100.0	481.673	1.503 06	1 289.59±134.18	811.64±464.11	-
未定性	-	-	-	-	30 675.49±2 204.72	29 099.24±4 851.06	-

2.2 茅台镇和其他产区酱香型白酒挥发性风味成分相对含量分析

为了清晰地观察不同产区市售酱香型白酒中挥发性风味成分的构成,本研究基于归一化法对已定性挥发性风味成分进行相对定量分析,并统计各白酒样品中不同类挥发性风味成分累积占比,结果见图1。

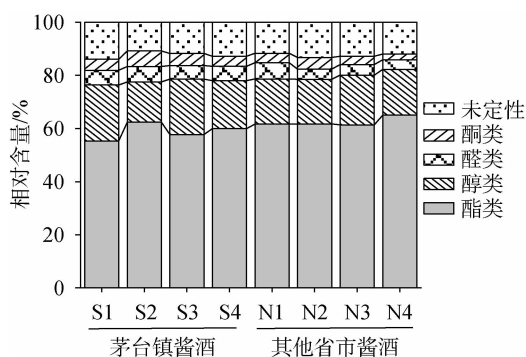


图1 茅台镇和其他产区酱香型白酒中不同类别挥发性成分的相对含量
Fig. 1 Relative contents of different categories of volatile components in sauce-flavor *Baijiu* of Maotai town and other production areas

由图1可知,酯类化合物是茅台镇和其他地区酱香型白酒的主要香气成分,相对含量分别在55.28%~62.38%和61.40%~65.09%之间,酯类物质可以赋予酱香型白酒浓郁的果香、花香和甜香等芳香风味^[16-17]。其次是醇类、醛类和酮类化合物,醇类化合物相对含量分别在15.18%~21.09%和16.79%~18.65%之间,醇类是白酒醇甜口感和助香气的主要来源^[18-19]。醛类化合物相对含量分别在5.13%~5.80%和3.67%~6.14%之间,酮类化合物相对含量分别在3.73%~5.81%和2.14%~4.43%之间,醛酮类化合物具有增加酒体的刺激性和芳香风味的作用^[20-21],这些化合物共同构建了酱香型白酒的主体香气特征。对以上结果进行方差分析发现,酯类、醇类、醛类和酮类化合物的相对含量在茅台镇和其他地区酱香型白酒之间差异均不显著($P>0.05$),说明不同产区酱香型白酒中挥发性成分整体较类似。唐平等^[22]采用GC-MS技术对赤水河流域的茅台镇、习水、遵义、金沙和古蔺5个产区酱香型白酒进行分析发现,赤水河流域酱

香型白酒的挥发性化合物种类丰富,但主要化合物种类均为酯类、醇类、醛类和酮类,且不同产区酱香型白酒中的酯类化合物种类和相对含量均占据绝对优势,这与本研究结果一致,体现了酱香型白酒酯香突出的主要风味特征。

2.3 茅台镇和其他产区酱香型白酒挥发性风味成分差异分析

基于PCA,本研究对茅台镇和其他产区酱香型白酒中挥发性风味成分进行了多元统计分析,探究了不同产地酱香型白酒中挥发性风味成分的差异,结果见图2。

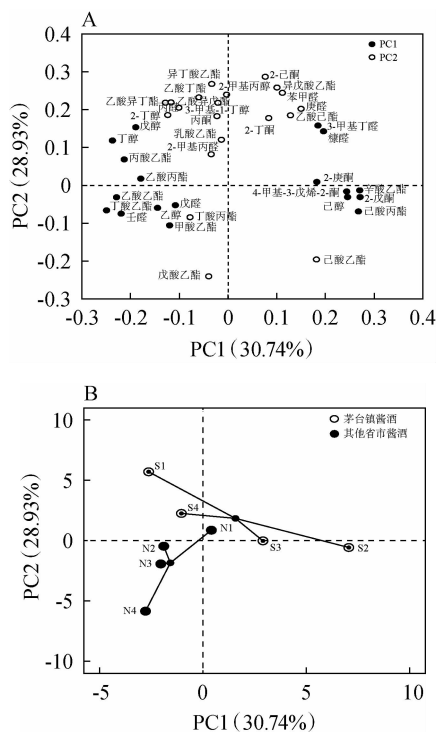


图2 基于挥发性风味成分茅台镇和其他产区酱香型白酒主成分分析
Fig. 2 Principal component analysis of Maotai flavor *Baijiu* based on volatile flavor components in Maotai town and other production areas

由图2(A)可知,PC1方差贡献率为30.74%,代表变量包括丙酸乙酯、乙酸丙酯、乙酸乙酯等,PC2方差贡献率为28.93%,代表变量包括己酸乙酯、丁酸丙酯、戊酸乙酯等,PC1和PC2可以累积反映原始数据标准变异的59.67%,基

本可以代表和解释8个酱香型白酒的大部分风味信息。由图2(B)可知,不同产地酱香型白酒样品在空间排布上具有明显的分离趋势,表明茅台镇和其他地区酱香型白酒样品之间挥发性成分构成具有明显差异。结合图2(A)发现异戊酸乙酯、异丁酸乙酯、乳酸乙酯、乙酸异戊酯、3-甲基-1-丁醇、2-甲基丙醇、糠醛、丙酮和2-丁酮等物质在茅台镇酱香型白酒中明显富集,乙酸乙酯、戊酸乙酯、丁酸乙酯、丙酸乙酯、乙酸丙酯、甲酸乙酯和乙醇等物质在其他地区酱香型白酒中明显富集,说明上述差异挥发性风味成分能有效区分茅台镇和其他产区白酒样品。

2.4 茅台镇和其他产区酱香型白酒关键差异挥发性风味化合物的筛选

已有研究证实,白酒中挥发性风味成分的含量与其对酒体的香气贡献不一定呈正相关,还需要结合酒体中各成分的阈值进行有效分析^[24]。为了进一步明晰茅台镇和其他产区区酱香型白酒中差异挥发性风味成分的贡献情况,本研究通过查阅相关文献确定了差异挥发性风味成分在白酒中的香气阈值,并计算了其ROAV,以ROAV>1作为关键差异挥发性风味化合物的筛选标准,ROAV越高表明其对酒体的香气贡献越突出^[15],结果见表2。由表2可知,从8个酱香型白酒样品中共获得6种关键挥发性风味化合物(ROAV>1),分别为异戊酸乙酯、己酸乙酯、戊酸乙酯、丁酸乙酯、辛酸乙酯和乙酸异戊酯,其中对茅台镇酱香型白酒香气贡献更突出的为异戊酸乙酯、辛酸乙酯和乙酸异戊酯,ROAV分别为82.25、5.56、1.52,对其他地区酱香型白酒香气贡献更突出的为己酸乙酯、戊酸乙酯、丁酸乙酯,ROAV分别为33.19、32.55、10.48。这些化合物对酱香型白酒香气轮廓的形成具有决定性的作用。结合挥发性风味成分的风味特征可知,茅台镇酱香型白酒果香味特征突出,而其他产区酱香型白酒则呈现窖香、果香、甜香等多种风味的复合表达。值得一提的是,纳入本研究的酱香型白酒样品均是经过勾调后的市售产品,为了迎合消费者的喜好,并没有完全保留住酱香型白酒的原有特征风味,从而可能影响酒体中挥发性风味化合物的香气贡献^[25]。

表2 茅台镇和其他产区酱香型白酒关键差异挥发性风味化合物
Table 2 Key differential volatile flavor compounds in sauce-flavor Baijiu of Maotai town and other production areas

化合物	阈值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) ^[26]	风味描述 ^[27]	ROAV	
			茅台镇酱香型白酒	其他地区酱香型白酒
异戊酸乙酯	6.89	果香	82.25	58.72
己酸乙酯	55.33	窖香、花香、果香	29.95	33.19
戊酸乙酯	26.68	果香、花香、甜香	26.20	32.55
丁酸乙酯	81.50	甜香、果香、花香	8.49	10.48
辛酸乙酯	12.87	果香、甜香、百合花香	5.56	3.01
乙酸异戊酯	93.93	果香、花香	1.52	1.13

3 结论

本研究采用GC-IMS技术结合多元统计学分析方法,对4个产自茅台镇和4个产自其他地区的市售酱香型白酒的挥发性风味成分进行比较分析。结果表明,8个白酒样品中共定性出51种挥发性风味成分,包括酯类24种、醇类9种、醛类10种和酮类8种。PCA结果表明,茅台镇和其他地区酱香型白酒中各挥发性风味成分存在差异。根据ROAV>1共筛选得到6种关键差异挥发性风味化合物,分别为异戊酸乙酯、己酸乙酯、戊酸乙酯、丁酸乙酯、辛酸乙酯和乙酸异戊酯。其中,对茅台镇酱香型白酒香气贡献更突出的为异戊酸乙酯、辛酸乙酯和乙酸异戊酯,对其他地区酱香型白酒香气贡献更突出的为己酸乙酯、戊酸乙酯、丁酸乙酯。

参考文献:

[1] WANG M Y, YANG J G, ZAHO Q S, et al. Research progress on flavor compounds and microorganisms of Maotai flavor Baijiu[J]. **J Food Sci**, 2019, 84(1): 6-18.

[2] LIU S P, JIANG Z F, MA D N, et al. Distance decay pattern of fermented-related microorganisms in the sauce-flavor Baijiu producing region [J]. **Food Biosci**, 2023, 51(2): 102305.

[3] 孙优兰,尹延顺,骆红波,等. 不同产区酱香型白酒感官特性及特征风味分析[J]. 酿酒科技, 2023(7): 57-64, 71.

[4] 张卜升,袁丛丛,高杏,等. 不同产地酱香型白酒化学风味和感官特征差异分析[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 235-243.

[5] 周晨曦,郑福平,孙宝国. 离子迁移谱技术在食品风味分析中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(18): 309-318.

[6] SUN X X, YU Y M, SALEH AHMED S M, et al. Characterization of aroma profiles of Chinese four most famous traditional red-cooked chickens using GC-MS, GC-IMS, and E-nose[J]. **Food Res Int**, 2023, 173(11): 113335.

[7] 宋艺君,庞来祥,袁筱,等. GC-IMS法比较不同酒龄猕猴桃酒特征香气物质差异[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(2): 58-65.

[8] 张卜升,高杏,闫昕,等. 基于GC-IMS技术分析石榴果酒酿制过程中挥发性风味成分的变化[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(7): 252-257.

[9] 鲁祥凯,杨彪,孙莹,等. 基于GC-IMS的白酒特征分析及鉴别[J]. 中国食品学报, 2023, 23(1): 278-295.

[10] ZHANG Q, MA J, YANG Y P, et al. Effects of *S. cerevisiae* strains on the sensory characteristics and flavor profile of kiwi wine based on E-tongue, GC-IMS and 1H-NMR[J]. **LWT-Food Sci Technol**, 2023, 185(8): 115193.

[11] YU H Y, GUO W, XIE T, et al. Aroma characteristics of traditional Huangjiu produced around Winter Solstice revealed by sensory evaluation, gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. **Food Res Int**, 2021, 145(7): 110421.

[12] 金文刚,刘俊霞,赵萍,等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱分析洋县不同色泽糙米蒸煮后挥发性风味物质差异[J]. 食品科学, 2022, 43(18): 258-264.

[13] LIU C F, LI M X, REN T, et al. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* and non-*Saccharomyces* strains on alcoholic fermentation behavior and aroma profile of yellow-fleshed peach wine[J]. **LWT-Food Sci Technol**, 2022, 155(2): 112993.

- [14] 姚文生,蔡莹暄,刘登勇,等.不同材料熏制鸡腿肉挥发性物质GC-IMS指纹图谱分析[J].食品科学技术学报,2019,37(6):37-45.
- [15] 杨李娜,郭兵,李恒阳,等.基于HS-GC-MS技术结合ROAV研究荆芥不同炮制品挥发性成分的变化[J].中国现代应用药学,2025,42(14):2384-2395.
- [16] LI T, WANG J, XU B Z, et al. Comparative analysis of the differences among Langya flavor *Baijiu* and strong and soy sauce flavor *Baijiu* by targeted flavor analysis[J]. **J Food Compos Anal**, 2023, 122(9): 105479.
- [17] 何东梅,马宇,黄永光,等.机械化酱香型轮次基酒风味结构及特征酯类化合物解析[J].食品科学,2021,42(10):269-275.
- [18] HUANG H, WU Y S, CHEN H, et al. Identification on regional-markers based on the flavor molecular matrix analysis of sauce-aroma style *Baijiu* [J]. **J Sci Food Agr**, 2023, 7(3): 12823.
- [19] 蒲璐璐,戴怡凤,李豆南,等.电子鼻和气质联用技术分析不同酒龄酱香型白酒挥发性成分[J].中国酿造,2021,40(7):171-175.
- [20] SUN J Y, ZHAO D R, ZHANG F G, et al. Joint direct injection and GC-MS chemometric approach for chemical profile and sulfur compounds of sesame-flavor Chinese *Baijiu* (Chinese liquor)[J]. **Eur Food Res Technol**, 2018, 244(1): 145-160.
- [21] 刘丽丽,杨辉,荆雄,等.不同贮酒容器对凤香型白酒风味物质的影响[J].食品科学,2022,43(16):285-293.
- [22] 唐平,卢君,毕荣宇,等.赤水河流域不同地区酱香型白酒风味化合物分析[J].食品科学,2021,42(6):274-281.
- [23] JIA W, DU A, FAN Z B, et al. Molecular mechanism of the role of Mare Nectaris in the Feng-flavor *Baijiu* aging[J]. **LWT-Food Sci Technol**, 2021, 135(1): 110254.
- [24] YANG S Q, ZHANG G H, XU L, et al. Investigation on the interaction between 1,3-dimethyltrisulfide and aroma-active compounds in sesame-flavor *Baijiu* by feller additive model, odor activity value and partition coefficient[J]. **Food Chem**, 2023, 410(1): 135451.
- [25] 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.
- [26] 范文来,徐岩.白酒79个风味化合物嗅觉阈值测定[J].酿酒,2011,38(4):80-84.
- [27] 刘发洋,李璐,游奇,等.基于OAV分析多粮浓香型调味酒陈酿过程中风味物质的变化[J].中国酿造,2023,42(5):237-242.