

气相色谱质谱联用法测定白酒中 4 类风味物质

Determination of 4 categories of flavor substances in liquor by gas chromatography mass spectrometry

徐志飞 吴宇伉 蒋瑜宏 周 闰

XU Zhi-fei WU Yu-kang JIANG Yu-hong ZHOU Run

(无锡市疾病预防控制中心, 江苏 无锡 214023)

(Wuxi Center for Disease Control and Prevention, Wuxi, Jiangsu 214023, China)

摘要:目的:探究不同香型白酒风味成分组成规律与差异。方法:建立了同时测定白酒中酯类、醇类、酸类、醛类等微量成分的气相色谱质谱联用法(GC-MS)。采用选择离子(SIM)模式,外标法定量,并通过质谱数据库匹配、日内及日间相对标准偏差等进行方法考察。结果:白酒中酯类、醇类、醛类、酸类的检出限为 0.007~0.070 mg/L,定量限为 0.020~0.200 mg/L,并且在 0.000 5~5.0 g/L 的范围内线性良好,相关系数 $R^2 \geq 0.998 5$ 。在 60%乙醇水溶液中分别添加低、中、高 3 个浓度水平的标准品进行准确度试验,4 类风味物质的平均回收率为 87.8%~107.4%,相对标准偏差为 2.0%~7.4% ($n=6$)。结论:试验方法可用于白酒中多类风味物质的定量分析。

关键词:气相色谱—质谱法;白酒;风味物质;香型

Abstract: Objective: To establish an analytical method for the determination of four main flavor substances in liquor. **Methods:** A gas chromatography mass spectrometry (GC-MS) method was established for the simultaneous determination of esters, alcohols, acids, and aldehydes in liquor. Single ion monitoring (SIM) mode was chosen. Then the method was inspected through comparison with the standard mass spectrum database, quantitative analysis of the external standard method and relative standard deviation of day-in and day-out were investigated. **Results:** The limits of detection of the four types of flavor compounds in liquor were 0.007~0.070 mg/L, and the limits of quantitation were 0.020~0.200 mg/L, and the linearities were satisfactory in the range of 0.000 5~5.0 g/L, with the

correlation coefficients of $R^2 \geq 0.998 5$. The accuracy was tested by adding three levels of low, medium and high concentrations of standard substances to ethanol in water (60%), and the average recoveries of the four categories of flavor substances were 87.8%~107.4%, with the relative standard deviations (RSDs) of 2.0%~7.4% ($n=6$). **Conclusion:** The method is accurate and reliable, with good repeatability and high sensitivity. The method is stable and can be used for the determination of various trace substances in wine. It was found that the volatile flavor compounds of different flavor liquors were different to some extent, which could provide a reference for further research on the flavor compounds of liquor.

Keywords: gas chromatography-mass spectrometry; liquor; flavoring substances; flavor type

白酒复杂酒体体系中的某些微量成分不仅影响其风味、口感、品质,还有益于健康,探究白酒中微量成分对白酒品质和风味的影响是近年来白酒领域研究的热点^[1-3]。

影响白酒风味的微量物质主要包括酯类、醇类、酸类、醛类、酮类、酚类、缩醛类等^[4-6]。在白酒生产过程中,酸类通过酶催化与乙醇反应形成酯^[7]。而酯化是一种可逆的化学反应,在白酒发酵后期以及贮存过程中,酯类又会分解成醇和酸,对白酒风味的形成起决定性作用^[8]。醇类、酸类、醛类作为白酒风味的骨架成分,各类微量物质的不同造成不同香型白酒中风味物质的差异,研究白酒中各种风味物质对于提高白酒风味品质具有重要意义^[9-11]。

现有白酒中风味物质分析检测的方法主要有气相色谱(GC)法^[12-13]、气相色谱—质谱联用(GC-MS)法^[14-15]、全二维气相色谱—飞行时间质谱(GC×GCT-OFMS)^[5]、气相色谱—嗅闻(GC-O)法^[16]和电子鼻^[17]等。GC法的灵敏度较低,特异性不高,只凭保留时间难以对复杂化合物中微量组分做出可靠的定性鉴定;GC×GC/

基金项目:无锡市卫生健康委员会科研课题(编号:M202047);无锡市卫生健康委员会医学创新团队项目(编号:CXTD2021004)

作者简介:徐志飞,女,无锡市疾病预防控制中心高级实验师,学士。

通信作者:周闰(1984—),女,无锡市疾病预防控制中心副主任医师,学士。E-mail:jnthd@163.com

收稿日期:2022-08-08 **改回日期:**2022-10-29

TOFMS可对白酒中上百种成分进行定性分析,但普及度不高,暂且无法作为白酒分析的常规技术手段进行推广。GC-MS法灵敏度高、特异性强,应用范围较广,适用于常规的日常检测工作。目前白酒风味物质最常用的预处理方法有:直接进样(DI)、固相微萃取(SPME)、液液萃取(LLE)和固相萃取(SPE)、超临界流体萃取(SFE)^[18-19]、同时蒸馏萃取(SDE)^[20]等。LLE方法样品及萃取剂用量大、选择性差、对低沸点挥发性成分存在一定的损失;SPE方法所需萃取柱的成本较高、需要进行反复的试验优化、样品吸附量少、耗时长;传统的SPME具有萃取量不足和吸附竞争等缺点^[13,21]。DI法操作简单、分析快速、可避免有机溶剂的污染和微量成分的损失,故研究拟建立直接进样联合GC-MS的方法测定白酒中风味物质,运用该方法测定市售3种不同香型白酒中的4类风味物质,探究不同香型白酒风味成分组成规律与差异,以期对白酒风味物质的进一步研究提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

白酒(清香型、浓香型、酱香型各2份):市售;

无水乙醇:纯度 $\geq 99.8\%$,上海安谱实验科技股份有限公司;

乙酸乙酯、丁酸乙酯、己酸乙酯、乳酸乙酯、丙醇、异丁醇、正丁醇、异戊醇:纯度 $\geq 99.0\%$,天津市康科德科技有限公司;

乙酸、丁酸、戊酸、己酸:纯度 $\geq 99.5\%$,德国 Dr. Ehrenstorfer 公司;

壬醛、癸醛:纯度 $\geq 99.1\%$,上海安谱实验科技股份有限公司;

Agilent FFAP、DB-1、DB-5、DB-624 毛细管色谱柱(30 m \times 250 μ m,0.25 μ m);安捷伦科技有限公司。

1.2 仪器与设备

气相色谱-质谱联用仪:Agilent 7890B-7000C型,美国安捷伦公司;

超纯水系统:Milli-Q Reference型,美国 Millipore 公司;

电子天平:XSI05DU型,梅特勒托利多科技(中国)有限公司;

涡旋混匀器:IKA KS260型,德国 IKA 公司。

1.3 方法

1.3.1 标准溶液制备 称取14种风味物质各500 mg分别置于10 mL容量瓶中,加乙醇溶液(60%)定容,配制质量浓度为50.0 g/L的标准物质储备液。分别移取一定量的单标储备液配制酯类质量浓度为5 g/L,酸类质量浓度为2.5 g/L,醇类和醛类质量浓度为0.5 g/L的混合标准溶液,再逐级稀释成标准曲线,使用前配制,混匀后上

机测定。

1.3.2 样品处理 采集市场上不同香型不同品牌的6个白酒样品,移液器直接移取1 mL酒样于进样小瓶中,与标准曲线在相同色谱条件下直接进样检测,重复测定2次,以均值作为样品结果进行计算。另取60%乙醇溶液做基质,分别添加3种不同浓度的标准溶液进行加标回收试验的分析,每个加标水平重复6次。

1.3.3 色谱条件 进口样温度250 $^{\circ}$ C,进样量1 μ L,分流比20:1;载气流量1.5 mL/min;FFAP色谱柱(30 m \times 250 μ m,0.25 μ m);采用程序升温模式:80 $^{\circ}$ C(1 min) \rightarrow 10 $^{\circ}$ C/min \rightarrow 180 $^{\circ}$ C(1 min) \rightarrow 30 $^{\circ}$ C/min \rightarrow 240 $^{\circ}$ C(1 min)。

1.3.4 质谱条件 电子轰击电离源(EI),电离能量70 eV;离子源温度230 $^{\circ}$ C;传输线温度250 $^{\circ}$ C;选择离子扫描(SIM),参数如表1所示;溶剂延迟1.5 min。

1.3.5 数据处理 采用安捷伦 Mass Hunter workstation 软件提取保留时间和色谱峰面积,每组试验重复测定回收率和相对标准偏差,用 Microsoft Office Excel 2017 软件进行数据处理。使用 Origin 8.0 绘图。

2 结果与讨论

2.1 色谱柱的选择

用同一份白酒样品分别使用不同极性的色谱柱(DB-1、DB-5、DB-624、FFAP)测试后发现,各待测物在非极性至中极性的柱子上虽能分离,但峰形较差,影响定量结果的准确性;而在FFAP柱上,各峰峰形尖锐,可获得满意的分离效果。故选用FFAP毛细管柱。14种目标物的定性离子、定量离子(见表1)色谱峰均获得良好分离,其中丁酸乙酯与正丙醇保留时间相近,但两种物质的定量离子不同,在定量计算中不受影响,标准色谱图(质量浓度为1.0 g/L的标准溶液)如图1所示。

2.2 分流比的选择

选择适当的分流比可改善峰形,特别是可显著改善醇类的峰形。试验设置分流比分别为1:1.5:1,10:1,20:1,30:1,进样后发现随着分流比的增加,几种待测物色谱峰拖尾现象明显好转,但分流比较大时,检测器响应信号也变低(见图2),综合考虑,选择分流比为20:1。

2.3 方法学考察

2.3.1 线性方程、检出限和定量限 根据实际样品中目标物的可能浓度范围,用乙醇溶液(60%)配制了不同浓度范围的混合标准溶液,其中酯类0.005~5.0 g/L,酸类0.0025~2.5 g/L,醇类和醛类0.0005~0.5 g/L,14种化合物线性良好,相关系数 R^2 均大于0.9985。将最低点混合标准溶液逐级稀释,取稀释后的溶液注入仪器,进样分析,选择3倍信噪比(S/N)对应的浓度即为检出限,10倍

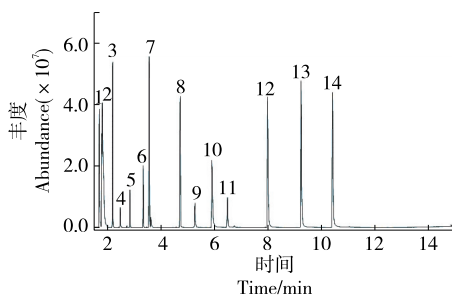
表 1 白酒中 4 类风味物质的 SIM 参数

Table 1 SIM parameters of four types of main flavor compounds in liquor

类别	名称	CAS 号	保留时间/min	定量离子	定性离子 1	定性离子 2
酯类	乙酸乙酯	141-78-6	1.708	43	45	61
	丁酸乙酯	105-54-4	2.227	71	43	88
	己酸乙酯	123-66-0	3.556	88	43	99
	乳酸乙酯	97-64-3	4.757	45	43	75
醇类	正丙醇	71-23-8	2.189	59	42	60
	异丁醇	78-83-1	2.457	43	55	74
	正丁醇	71-36-3	2.854	56	55	43
	异戊醇	123-51-3	3.374	55	70	42
酸类	乙酸	64-19-7	5.843	43	45	60
	丁酸	107-92-6	7.928	60	73	43
	戊酸	109-52-4	9.220	60	73	55
	己酸	142-62-1	10.404	60	73	87
醛类	壬醛	124-19-6	5.318	57	70	98
	癸醛	12-31-2	6.460	57	70	82

(S/N)对应的浓度即为定量限,根据结果可知,14 种风味物质的检出限为 0.007~0.07 mg/L,定量限为 0.02~0.20 mg/L。线性方程、检出限和定量限详见表 2。

2.3.2 准确度与精密度 在白酒的风味构成中以酯类含量最多,酸类及醇类其次,根据样品的实际情况以 60%乙醇溶液为基质进行低、中、高浓度水平的加标试验,酯类



1. 乙酸乙酯 2. 正丙醇 3. 丁酸乙酯 4. 异丁醇 5. 正丁醇 6. 异戊醇 7. 己酸乙酯 8. 乳酸乙酯 9. 壬醛 10. 乙酸 11. 癸醛 12. 丁酸 13. 戊酸 14. 己酸

图 1 14 种风味物质的标准品谱图

Figure 1 Standard chromatogram of 14 flavor substances

加标质量浓度为 0.10,0.50,1.0 g/L;醇类及醛类加标质量浓度为 0.01,0.05,0.1 g/L;酸类加标质量浓度为 0.05,0.25,0.50 g/L,每个浓度水平重复检测 6 次。由表 3 可知,14 种风味物质的加标回收率为 87.8%~107.4%,相对标准偏差(RSDs)为 2.0%~7.4%。GB/T 10345—2022《白酒分析方法》中规定在重复性条件测定下 4 种酯类的精密度的不超过 5%,乙酸和己酸不超过 10%,研究结果符合国家标准的规定,说明试验测定结果准确,能满足酒样直接测定的需要。

2.4 与已知方法比较

现有白酒中风味物质分析检测方法研究见表 4。GC 作为白酒中风味物质常用的定量技术,适用于白酒中常

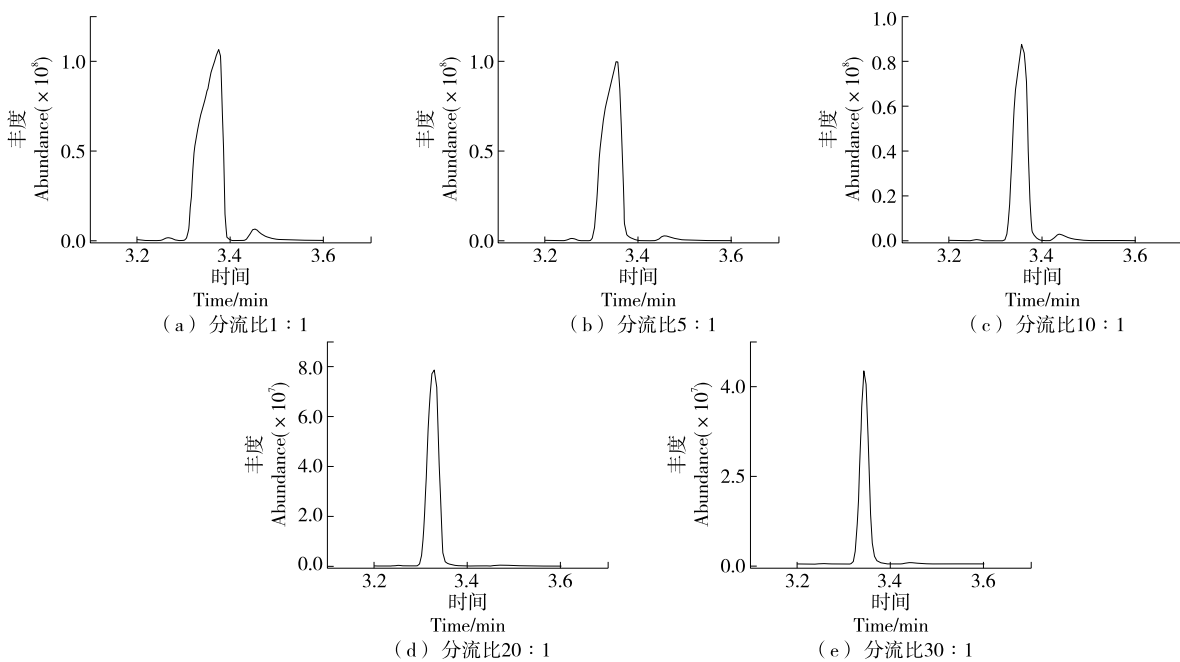


图 2 不同分流比下的色谱图

Figure 2 Chromatograms under different split ratios

表2 白酒中4类风味物质的线性范围、检出限和定量限

Table 2 Linear range, limits of detection and quantitation of four types of main flavor compounds in liquor

目标物	线性范围/(g·L ⁻¹)	线性方程	R ²	检出限/(mg·L ⁻¹)	定量限/(mg·L ⁻¹)
乙酸乙酯	0.005~5	Y=26 639 142X+1 613 375	0.998 5	0.07	0.2
丁酸乙酯	0.005~5	Y=18 787 077X+2 152 884	0.999 4	0.07	0.2
己酸乙酯	0.005~5	Y=41 473 506X+2 531 492	0.999 4	0.03	0.1
乳酸乙酯	0.005~5	Y=43 607 720X+2 152 711	0.998 7	0.07	0.2
正丙醇	0.000 5~0.5	Y=813 214X+178 188	0.999 1	0.07	0.2
异丁醇	0.000 5~0.5	Y=3 557 046X+54 644	0.999 8	0.03	0.1
正丁醇	0.000 5~0.5	Y=6 128 133X+18 546	0.999 9	0.02	0.06
异戊醇	0.000 5~0.5	Y=6 478 459X+39 200	0.999 9	0.007	0.02
乙酸	0.002 5~2.5	Y=6 566 883X-416 525	0.999 5	0.07	0.2
丁酸	0.002 5~2.5	Y=40 890 311X-2 480 663	0.998 8	0.03	0.1
戊酸	0.002 5~2.5	Y=40 500 534X-2 308 850	0.999 3	0.03	0.1
己酸	0.002 5~2.5	Y=33 486 243X-1 725 656	0.999 7	0.03	0.1
壬醛	0.000 5~0.5	Y=3 761 762X-56 293	0.999 9	0.07	0.2
癸醛	0.000 5~0.5	Y=3 594 669X-18 890	0.999 9	0.07	0.2

表3 加标回收率和精密度

Table 3 Spiked recoveries and precisions (n=6)

目标物	加标质量浓度/ (g·L ⁻¹)	实测质量浓度/ (g·L ⁻¹)	回收率/ %	精密度/ %	目标物	加标质量浓度/ (g·L ⁻¹)	实测质量浓度/ (g·L ⁻¹)	回收率/ %	精密度/ %
乙酸乙酯	0.100	0.094±0.025 2	94.4	3.3	异戊醇	0.010	0.010±0.000 3	99.7	5.6
	0.500	0.475±0.013 3	95.0	3.3		0.050	0.047±0.001 5	94.0	4.4
	1.000	0.975±0.021 1	97.5	2.2		0.100	0.090±0.018 1	90.4	3.5
丁酸乙酯	0.100	0.102±0.023 0	102.0	3.1	乙酸	0.050	0.049±0.012 7	98.0	3.3
	0.500	0.495±0.014 2	99.0	2.8		0.250	0.252±0.005 8	101.0	4.0
	1.000	0.985±0.030 3	98.5	2.5		0.500	0.475±0.013 2	95.0	2.7
己酸乙酯	0.100	0.096±0.028 2	96.0	3.8	丁酸	0.050	0.044±0.011 1	88.2	3.1
	0.500	0.492±0.015 8	98.4	2.5		0.250	0.226±0.004 8	90.4	3.6
	1.000	1.010±0.040 4	101.0	2.0		0.500	0.466±0.010 3	93.2	2.7
乳酸乙酯	0.100	0.105±0.029 7	105.0	4.1	戊酸	0.050	0.049±0.010 9	97.9	3.0
	0.500	0.537±0.012 3	107.4	3.4		0.250	0.233±0.003 7	92.8	3.3
	1.000	1.030±0.030 2	103.0	2.6		0.500	0.446±0.080 3	89.2	2.3
正丙醇	0.010	0.009±0.000 5	89.8	7.4	己酸	0.050	0.046±0.010 9	92.4	3.8
	0.050	0.044±0.001 3	87.8	4.0		0.250	0.222±0.007 3	88.8	3.2
	0.100	0.091±0.020 1	91.0	2.8		0.500	0.467±0.008 4	93.4	2.8
异丁醇	0.010	0.009±0.000 4	90.0	6.3	壬醛	0.010	0.010±0.013 2	101.0	3.2
	0.050	0.047±0.001 2	93.6	3.5		0.050	0.049±0.020 2	98.4	2.6
	0.100	0.089±0.002 0	88.9	2.9		0.100	0.093±0.017 4	93.3	3.4
正丁醇	0.010	0.009±0.000 4	93.0	5.8	癸醛	0.010	0.010±0.000 4	101.0	6.3
	0.050	0.048±0.001 2	96.8	3.1		0.050	0.046±0.013 0	92.3	3.4
	0.100	0.092±0.017 8	92.1	3.6		0.100	0.096±0.018 8	96.2	3.7

表 4 与已知的白酒中微量物质测定方法的比较

Table 4 Reported analytical methods for the analysis of trace components in Chinese liquor

检测方法	预处理方法	检出限/(mg·L ⁻¹)	精密度/%	回收率/%	参考文献
GC-FID	直接进样	0.006~4.275	0.10~3.60	84.9~115.4	[22]
GC-FID	滤膜过滤	0.1~1.5	<5.00	94.0~108.1	[12]
GC×GC/TOFMS	液液萃取	/	/	/	[5]
GC×GC/TOFMS	顶空固相微萃取	/	9.79~11.80	/	[18]
GC-MS	顶空固相微萃取	/	/	/	[14]
GC-MS	蒸馏萃取	/	/	/	[15]
GC-MS	直接进样	0.007~0.070	2.00~7.40	87.0~107.4	/

规化合物的测定,而对于风味物质中微量成分则无法准确定性,在胡瑾等^[22]的研究中,虽然测定了白酒中多达 57 种风味物质,但未进行酸类物质定量检测。GC×GC/TOFMS 可对白酒中上百种成分进行定性,但均未进行准确定量分析,且该类仪器的普及度远不如常规的色谱分析。

2.5 实际样品检测

研究采集江苏无锡市场上 3 种最常见香型(酱香型、浓香型、清香型)6 个不同品牌白酒样品进行检测,结果见表 5。6 个酒样中 4 类风味物质均可检测到,酯类相对含量在 55.39%~75.41%,醇类相对含量在 0.56%~9.23%,酸类相对含量在 22.02%~37.67%,醛类相对含量在 0.02%~0.07%。3 种不同香型白酒中酯类、醇类和酸类物质占比较高,而醛类含量较低。酯类含量在不同香型白酒中差异较大,相较于浓香型和酱香型白酒,清香型酒样中酯类和酸类的总量最低,醇类和醛类无明显差异。

浓香型白酒中主要呈香物质为酯类和酸类,两类物质占总数的 97%左右,其中己酸乙酯、乙酸乙酯、乳酸乙

酯、乙酸贡献最大,相对含量高达 86%,己酸乙酯是其中占比最高的,其特殊的气味,赋予浓香型白酒香味,成为影响浓香型白酒风味的主要化合物。清香型白酒中酯类物质为主要的呈香成分,占比为 67%左右,但低于浓香型白酒中酯类的相对含量 74%,其中乙酸乙酯、己酸乙酯、乙酸贡献最大,相对含量高达 70%左右,是清香型白酒的主要风味成分。2 种酱香型白酒中酯类物质相对含量最高,但占比差异较大,其中样品 5 酯类物质为 55%,样品 6 酯类含量为 70%,因为“酱香”是由多种风味物质共同作用的结果,该结果与 Liu 等^[20]的发现一致。白酒中的醇类不仅能呈香,而且能呈味,在 6 个酒样的醇类物质中,异戊醇含量最高。白酒中的酸类物质能起协调风味的作用,也是形成酯的前体物质,其中乙酸和己酸的含量相对较高,与李俊刚等^[15]的研究结果一致。

3 结论

该研究利用气相色谱质谱技术分析了白酒中 4 类风味物质,建立了一个快速、稳定、灵敏的可有效分离 4 类风味物质并准确测定的方法。该方法分离效果好,可在

表 5 实际样品的检测结果

Table 5 Measurement results of real samples %

样品	乙酸乙酯	丁酸乙酯	己酸乙酯	乳酸乙酯	正丙醇	异丁醇	正丁醇
1(清香型)	31.19	2.90	30.18	4.07	0.13	0.17	0.09
2(清香型)	28.31	0.82	19.90	18.21	3.83	0.54	0.05
3(浓香型)	24.16	4.14	26.06	19.66	0.51	0.33	0.51
4(浓香型)	22.49	3.44	27.16	22.31	0.52	0.57	0.42
5(酱香型)	34.55	0.01	0.04	20.80	5.31	0.05	0.00
6(酱香型)	34.41	6.12	0.95	28.74	0.13	0.13	0.02
样品	异戊醇	乙酸	丁酸	戊酸	己酸	壬醛	癸醛
1(清香型)	0.18	15.85	1.48	0.76	12.97	0.02	0.01
2(清香型)	4.81	20.74	0.58	0.63	1.49	0.02	0.05
3(浓香型)	1.23	15.85	1.05	0.46	6.03	0.01	0.01
4(浓香型)	1.04	14.65	1.07	0.56	5.74	0.01	0.01
5(酱香型)	1.55	34.60	0.56	1.14	1.37	0.02	0.01
6(酱香型)	2.06	21.52	3.22	1.20	1.47	0.01	0.02

15 min 内完成白酒中 4 类风味物质的同时测定与定量分析,具有良好的线性关系,相关系数 $R^2 \geq 0.9985$, 加标回收率在 87.8%~107.4%, 精密密度在 2.0%~7.4%, 检出限为 0.007~0.070 mg/L。酒样无需处理,直接进样,一定程度上消除了操作条件等的变化所引起的误差,测定结果干扰少,使白酒样品的测定更加简便,因此 4 类微量物质的实测结果即为最终报告结果。后期可尝试将不同预处理方法有机结合,进一步开展更多风味成分的检测分析。

参考文献

- [1] 孙宝国, 吴继红, 黄明泉, 等. 白酒风味化学研究进展[J]. 中国食品学报, 2015, 15(9): 1-8.
SUN B G, WU J H, HUANG M Q, et al. Research progress on chemistry of liquor flavor[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(9): 1-8.
- [2] 孙宝国, 李贺贺, 胡萧梅, 等. 健康白酒的发展趋势[J]. 中国食品学报, 2016, 16(8): 1-6.
SUN B G, LI H H, HU X M, et al. The development trend of healthy liquor[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(8): 1-6.
- [3] 郭学武, 范恩帝, 马冰涛, 等. 中国白酒中微量成分研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 267-276.
GUO X W, FAN E D, MA B T, et al. Recent progress in micro components of Chinese Baijiu[J]. Food Science, 2020, 41(11): 267-276.
- [4] ZHU S K, LU X, LI K L, et al. Characterization of flavor compounds in Chinese liquor moutai by comprehensive two-dimensional gas chromatography/time-of-flight mass spectrometry [J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 597(2): 340-348.
- [5] 季克良, 郭坤亮, 朱书奎, 等. 全二维气相色谱/飞行时间质谱用于白酒微量成分的分析[J]. 酿酒科技, 2007(3): 100-102.
JI K L, GUO K L, ZHU S K, et al. Analysis of microconstituents in liquor by full two-dimensional gas chromatography/time of flight mass spectrum[J]. Liquor-making Science & Technology, 2007(3): 100-102.
- [6] 纪南, 廖永红, 丁芳, 等. 市售 5 种酱香型白酒挥发性风味物质的主成分分析[J]. 酿酒科技, 2016(9): 17-22, 30.
JI N, LIAO Y H, DING F, et al. Principal component analysis of volatile flavoring compounds in five kinds of Jiangxiang Baijiu[J]. Liquor-making Science & Technology, 2016(9): 17-22, 30.
- [7] 徐军. 浓香型枝江白酒香味成分的分析研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019: 1-20.
XU J. Study on aroma components of strong-aroma Zhijiang Baijiu[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019: 1-20.
- [8] 邢爽. 白酒发酵过程中酯类物质形成机理的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2018: 1-10.
XING S. Research of the formation mechanism of esters in process of liquor fermentation[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018: 1-10.
- [9] 廖永红, 杨春霞, 胡佳音, 等. 气相色谱-质谱法分析比较牛栏山牌清香型二锅头酒和浓香型白酒中的香味成分[J]. 食品科学, 2012, 33(6): 181-185.
LIAO Y H, YANG C X, HU J Y, et al. Comparison of aroma compounds in mild aromatic niulanshan erguotou liquor and strong aromatic niulanshan liquor by GC-MS[J]. Food Science, 2012, 33(6): 181-185.
- [10] 邵燕, 张宿义, 祝成, 等. 浓香型白酒风味物质与感官评定相关性研究[J]. 中国酿造, 2012, 31(8): 92-95.
SHAO Y, ZHANG S Y, ZHU C, et al. Study on the correlation of flavor of Luzhou-flavor liquor with sensory evaluation[J]. China Brewing, 2012, 31(8): 92-95.
- [11] 周玮婧, 江小明. 气相色谱法测定不同香型白酒中醇类与醛类物质含量[J]. 中国酿造, 2017, 36(4): 180-183.
ZHOU W J, JIANG X M. Determination of the alcohols and the aldehydes contents in different flavor types of Baijiu (Chinese liquor) by gas chromatography[J]. China Brewing, 2017, 36(4): 180-183.
- [12] 刘莎, 周玉, 余义, 等. 气相色谱同时测定白酒中 22 种风味物质的方法研究[J]. 酿酒科技, 2019(2): 113-116.
LIU S, ZHOU Y, YU Y, et al. Simultaneous determination of 22 flavoring substances in Baijiu by GC[J]. Liquor-making Science & Technology, 2019(2): 113-116.
- [13] 张晓娟, 邱树毅, 王晓丹, 等. 白酒挥发性风味物质气相分析方法及研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(14): 313-320.
ZHANG X J, QIU S Y, WANG X D, et al. Gas chromatography methods and research progress of volatile flavor substances in Chinese liquor (Baijiu) [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(14): 313-320.
- [14] 董文静, 钱承敬, 穆蕾, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法分析馥郁香型白酒风味物质[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(10): 2362-2368.
DONG W J, QIAN C J, MU L, et al. Analysis of flavor compounds of Fuyu flavor liquor by head space-solid phase microextraction with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(10): 2362-2368.
- [15] 李俊刚, 郭文字, 罗英, 等. 利用 GC-MS 法对不同窖龄下浓香型白酒风味物质的研究[J]. 中国酿造, 2015, 34(9): 141-144.
LI J G, GUO W Y, LUO Y, et al. Analysis of volatile compounds of Luzhou-flavor liquor from different pit ages by GC-MS[J]. China Brewing, 2015, 34(9): 141-144.
- [16] FAN H Y, FAN W L, XU Y. Characterization of key odorants in Chinese chixiang aroma-type liquor by gas chromatography-olfactometry, quantitative measurements, aroma recombination, and omission studies[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(14): 3660-3668.
- [17] 罗琪, 张贵宇, 虞先国, 等. 电子鼻在成品白酒检测中的应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(4): 4-7.
LUO Q, ZHANG G Y, TUO X G, et al. Analysis of volatile components in sauce-flavor Baijiu with different ages by electronic nose and GC-MS[J]. Analysis and Examination, 2022, 35(4): 4-7.

(下转第 124 页)

- vision[J]. *Sensors and Materials*, 2019, 31(12): 4 135-4 154.
- [11] LI W, LIU K. Confidence-aware object detection based on Mobile-Netv2 for autonomous driving[J]. *Sensors*, 2021, 21(7): 2 380.
- [12] MALEKABADI A J, KHOJASTEHPOUR M, EMADI B, et al. Development of a machine vision system for determination of mechanical properties of onions[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2017, 141: 131-139.
- [13] 郭丽丽, 丁世飞. 深度学习研究进展[J]. *计算机科学*, 2015, 42(5): 28-33.
- GUO L L, DING S F. Research progress of deep learning[J]. *Computer Science*, 2015, 42(5): 28-33.
- [14] ATILA M, UAR M, AKYOL K, et al. Plant leaf disease classification using EfficientNet deep learning model[J]. *Ecological Informatics*, 2021, 61: 101182.
- [15] DUONG L T, NGUYEN P T, DI SIPIO C, et al. Automated fruit recognition using EfficientNet and MixNet [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 171: 105326.
- [16] 李文宝, 曹成茂, 张金炎, 等. 基于深度学习的山核桃破壳物料分类识别[J]. *食品与机械*, 2021, 37(9): 133-138, 185.
- LI W B, CAO C M, ZHANG J Y, et al. Classification and recognition of pecan shell breaking materials based on deep learning[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(9): 133-138, 185.
- [17] MA H, CHEN M, ZHANG J W. Study on the fruit grading recognition system based on machine vision[J]. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2015, 8(11): 777-780.
- [18] 赵世达, 王树才, 李振强, 等. 基于 U 型卷积神经网络的羊肋排图像分割[J]. *食品与机械*, 2020, 36(9): 116-121, 154.
- ZHAO S D, WANG S C, LI Z Q, et al. Segmentation of sheep rib image based on U-shaped convolution neural network[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(9): 116-121, 154.
- [19] 张璐, 李卓识, 李玉. 鹅膏属真菌形态特征的主成分与聚类分析[J]. *菌物学报*, 2018, 37(5): 559-564.
- ZHANG L, LI Z S, LI Y. Principal component and cluster analysis of morphological characteristics of *Amanita fungi* [J]. *Mycosystema*, 2018, 37(5): 559-564.
- [20] 王海燕, 张渺, 刘虎林, 等. 基于改进的 ResNet 网络的中餐图像识别方法[J]. *陕西科技大学学报*, 2022, 40(1): 154-160.
- WANG H Y, ZHANG M, LIU H L, et al. Chinese food image recognition method based on improved ResNet[J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2022, 40(1): 154-160.

(上接第 81 页)

- [18] 李俊, 王震, 郭晓关, 等. 基于全二维气相飞行时间质谱联用方法分析贵州酱香型白酒挥发性风味成分[J]. *酿酒科技*, 2016(12): 102-106.
- LI J, WANG Z, GUO X G, et al. Analysis of volatile flavoring components in Guizhou Jiangxiang Baijiu by two comprehensive dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry[J]. *Liquor-making Science & Technology*, 2016(12): 102-106.
- [19] 廖永红, 赵爽, 张毅斌, 等. LLE、SDE、SPME 和 GC-MS 结合保留指数法分析二锅头酒中的风味物质[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(6): 220-228.
- LIAO Y H, ZHAO S, ZHANG Y B, et al. Analysis of flavor substances in erguotou wine by LLE, SDE, SPME and GC-MS combined with kovats retention indices[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14(6): 220-228.
- [20] LIU H L, SUN B G. Effect of fermentation processing on the flavor of Baijiu[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(22): 5 425-5 432.
- [21] 唐平, 山其木格, 王丽, 等. 白酒风味化学研究方法及其酱香型白酒风味化学研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(17): 315-324.
- TANG P, SHAN Q M G, WANG L, et al. A review of research methods in baijiu flavor chemistry and recent progress in the flavor chemistry of maotai-flavored Baijiu[J]. *Food Science*, 2020, 41(17): 315-324.
- [22] 胡瑾, 马一飞, 罗佳雪, 等. 气相色谱法同时测定白酒中 57 种风味物质[J]. *中国酿造*, 2022, 41(5): 206-211.
- HU J, MA Y F, LUO J X, et al. Simultaneous determination of 57 flavor substances in Baijiu by GC[J]. *China Brewing*, 2022, 41(5): 206-211.

(上接第 85 页)

- [4] 潘丽霞, 徐信贵. 论食品安全监管中的政府信息公开[J]. *中国行政管理*, 2013(4): 29-31, 14.
- PAN L X, XU X G. On government information disclosure in food safety supervision[J]. *China Administration*, 2013(4): 29-31, 14.
- [5] 罗季阳, 张晓娟, 李经津, 等. 形成出口花生黄曲霉毒素风险的外源性因素分析[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(10): 406-408.
- LUO J Y, ZHANG X J, LI J J, et al. Analysis of exogenous factors that form the risk of peanut aflatoxin export[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2011, 32(10): 406-408.
- [6] 闫海, 潘俊雅. 我国食品安全风险评估的改革重点与法制建议[J]. *政法学刊*, 2019, 36(1): 78-83.
- YAN H, PAN J Y. Reform focus and legal suggestions on food safety risk assessment in China[J]. *Journal of Political Science and Law*, 2019, 36(1): 78-83.
- [7] 罗季阳, 张晓娟, 王欣, 等. 突发食品安全风险的早期识别[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(20): 53-55, 59.
- LUO J Y, ZHANG X J, WANG X, et al. Early identification of unexpected food safety risks[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(20): 53-55, 59.
- [8] 丰苏, 杜琳, 袁刚, 等. 运用智慧监管理念构建统一的食品安全监管平台[J]. *中国市场监管研究*, 2021(11): 30-34, 51.
- FENG S, DU L, YUAN G, et al. Building a unified food safety supervision platform with the concept of smart supervision[J]. *China Market Supervision Research*, 2021(11): 30-34, 51.