

DOI:10.13746/j.njkj.2021023

基于电子鼻及GC-MS技术的啤酒识别研究

谢宇飞¹,李臻峰^{1,2},李静^{1,2},宋飞虎^{1,2},向昊¹

(1.江南大学机械工程学院,江苏无锡214122; 2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室,江苏无锡214122)

摘要: 为区分不同品牌啤酒并分析样品间挥发性风味物质种类及含量的差异,采用PEN3电子鼻和气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术从宏观和微观上对5种品牌啤酒的挥发性成分进行检测。利用主成分分析(PCA)、Fisher判别分析(FDA)对电子鼻响应值进行处理并建立分类判别模型,并与GC-MS数据进行了相关性分析。结果表明,电子鼻PCA分析与FDA分析都能对样品进行区分,R6和R9传感器起主要区分作用。GC-MS共鉴定出24种酯类、16种醇类、13种酸类、10种醛类、12种烷类、7种酮类以及13种芳香族化合物等挥发性物质。5种啤酒的主要挥发性成分的种类大体相同,但是各组分含量有所区别。根据偏最小二乘回归模型,电子鼻与挥发性风味物质表现出良好的相关性。这两种方法在分类识别啤酒方面有很好的应用前景。

关键词: 啤酒; 电子鼻; GC-MS; 分类

中图分类号:TS262.5; TS261.7

文献标识码:A

文章编号:1001-9286(2021)05-0104-08

Discrimination of Beer Based on Electronic Nose and GC-MS

XIE Yufei¹, LI Zhenfeng^{1,2}, LI Jing^{1,2}, SONG Feihu^{1,2} and XIANG Hao¹

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122; 2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: To distinguish different brands of beer and to analyze the differences in the types and contents of volatile flavor substances among samples, PEN3 electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) were used to detect the volatile components of five brands of beer from macro and micro levels. The response values of electronic nose were processed by principal component analysis (PCA) and Fisher discriminant analysis (FDA), a classification discriminant model was established, and the correlation analysis with GC-MS data was performed. The results showed that both PCA analysis and FDA analysis could distinguish the samples, and the R6 and R9 sensors played a major role in distinguishing the samples. GC-MS identified 24 esters, 16 alcohols, 13 acids, 10 aldehydes, 12 alkanes, 7 ketones, 13 aromatic compounds, and other volatile substances. The main volatile components of the five brands of beer were roughly the same, but the content of each component was different. According to the partial least squares regression model, the electronic nose showed a good correlation with the volatile flavor substances. These two methods have a good application prospect in beer classification and identification.

Key words: beer; electronic nose; GC-MS; classification

啤酒营养物质丰富,是世界上产量和消费量最高的酒精饮料^[1]。啤酒的质量与很多因素有关,而最直观的就是风味。啤酒的挥发性风味物质是反

映啤酒品质的一个重要特征,也是啤酒产品质量的重要组成部分。不同品牌的啤酒因生产工艺的不同,挥发性风味物质的成分和含量会有所差异,所

基金项目:江苏省食品先进制造装备技术重点实验室开放课题(FMZ202002)。

收稿日期:2021-01-25; 修回日期:2021-04-12

作者简介:谢宇飞(1995-),男,湖北天门人,硕士,研究方向:食品无损检测。

通讯作者:李臻峰(1968-),男,博士,教授,研究方向为食品加工与过程控制研究。

以分析风味特性在啤酒品质鉴别中具有极其重要的地位。

气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术是检测啤酒挥发性成分的主要技术之一,能够对样品挥发性成分进行定性和定量分析^[2-3]。但是该方法操作复杂、费时费力,易对样品挥发性成分造成破坏。电子鼻是一种由传感器阵列和模式识别方法组成的人工嗅觉智能仪器,具有方便、快速、成本低等优点。张君生^[4]通过电子鼻对新产原酒进行等级评判,并利用PLSR实现总酸、总酯含量的预测。Shi^[5]对5种啤酒PEN3电子鼻数据深度特征进行挖掘,提高了电子鼻对啤酒分类的准确性。但是电子鼻只能从啤酒气味特征的整体风味进行分析,具有一定的局限性。电子鼻与GC-MS两种分析技术的配合能够从宏观和微观上研究食品风味,是目前食品检测的主要手段。刘芳^[6]采用电子鼻与GC-MS联用技术对7种不同品牌浓香型白酒进行很好区分,发现PCA分析中关系密切的样品在风味成分层面也存在相似性。Cao^[7]利用电子鼻与GC-MS联用技术对4种杨梅果酒进行鉴别分析,发现不同品种杨梅果酒风味特征存在差异。这些研究利用电子鼻与GC-MS技术研究酒类的识别分类和挥发性成分的组成,但是并没有分析电子鼻传感器与GC-MS检测出的挥发性成分之间的相关性,且电子鼻与GC-MS技术检测啤酒风味成分的研究相对较少。

本研究以市售5种品牌的啤酒为研究对象,运用PEN3电子鼻进行气味检测分析,通过数理统计方法对样品气味信息进行数据处理并建立判别模型,研究电子鼻区分识别不同品牌啤酒的可行性。结合GC-MS联用技术对样品的挥发性风味物质进行分析,使用PLSR建立挥发性化合物和电子鼻响应信号之间的相关性。为区分啤酒品牌及电子鼻传感器与挥发性成分之间相关性的研究提供一定的实验依据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料、仪器

酒样:选取5种不同品牌的淡爽型啤酒为实验

材料,详细信息如表1所示。

表1 5种不同品牌啤酒样品信息

NO.	酒精度 (%vol)	麦汁浓度 (°P)	原料	产地
1	≥3.6	9.7	水、麦芽、大米、酒花	武汉(WH)
2	≥4.3	11.0	水、麦芽、大米、酒花	青岛(QD)
3	≥3.1	7.5	水、麦芽、大米、酒花	上海(SH)
4	≥2.5	8.0	水、麦芽、糖浆、酒花	河北(HB)
5	≥5.0	11.4	水、麦芽、酒花	广州(GZ)

仪器设备:GC-MS联用仪,日本岛津公司。

PEN3型电子鼻:德国AIRSENSE公司,含有10个金属氧化物传感器,能够对食品和饮料中大多数挥发性化合物进行交叉响应。表2显示了每个传感器的灵敏度特性。

表2 传感器名称及其性能描述

NO.	传感器	敏感物质	备注
R1	W1C	芳香成分	甲苯,10 mg/L
R2	W5S	氮氧化物	二氧化氮,1 mg/L
R3	W3C	氨水、芳香类化合物	苯,10 mg/L
R4	W6S	对氢气有选择性	氢气,100 mg/L
R5	W5C	烷烃、芳香类化合物	丙烷,1 mg/L
R6	W1S	对甲基类灵敏	甲烷,100 mg/L
R7	W1W	无机硫化物	硫化氢,1 mg/L
R8	W2S	乙醇、芳香族化合物	一氧化碳,100 mg/L
R9	W2W	有机硫化物	硫化氢,1 mg/L
R10	W3S	烷烃	甲烷,100 mg/L

1.2 实验方法

1.2.1 电子鼻检测

在20℃±0.5℃的实验环境下,取5 mL待测样品于40 mL顶空色谱进样瓶中静置20 min,确保瓶内气体饱和。设置采样间隔1 s;冲洗时间60 s;零点调整时间5 s;测量时间100 s;预采样时间5 s;注射流量300 mL/min。5种品牌啤酒各取15个平行样,共计75个样本,待测样本重复测定3次取平均值,消除测量误差。

1.2.2 风味物质测定

萃取条件:吸取经除气处理的各酒样5 mL于20 mL固相微萃取专用顶空进样瓶中,添加10 μL规格为50 mg/L的2-辛醇作为内标并加入1.5 g NaCl促进有机相和水相分离。密封后于50℃下平衡5 min,插入萃取头萃取30 min,萃取完成以

后,解析1 min。

GC条件:DB-WAXETR色谱柱(60 m×0.050 mm×0.25 μm),进样口温度为250 ℃,以纯度为99.999%的高纯度氦气为载气,流速1 mL/min。分流比5:1。升温程序:初始温度为40 ℃,保持1 min,以3 ℃/min的升温速率升至180 ℃,再以20 ℃/min升温至230 ℃,保持10 min。

MS条件:EI电子电离源,电子能量70 eV,离子源温度230 ℃,扫描范围30~350 amu。

2 结果与讨论

2.1 不同品牌啤酒样品电子鼻分析

2.1.1 电子鼻响应值结果分析

啤酒样品电子鼻响应值曲线如图1所示,传感器的初始状态均为1,由于顶空进样瓶中样品香气成分的富集,经过10 s的反应时间响应值快速上升,并在40 s时趋于稳定,提取稳定阶段的95 s时响应值作为分析特征值。

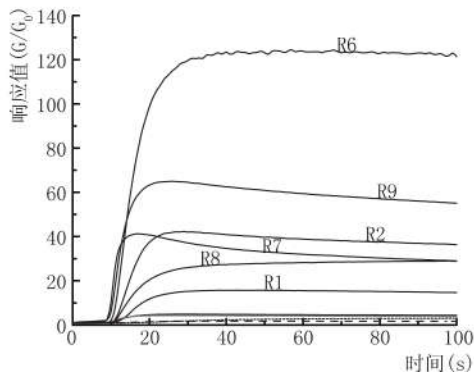


图1 电子鼻对啤酒样品的响应曲线

不同品牌样品的电子鼻响应曲线都有相同的变化趋势,说明不同品牌啤酒样品的挥发性成分类似,主要区别为含量的差异^[6]。各传感器对啤酒香气的响应程度不同,R6传感器响应值最高,表明啤酒当中甲基类化合物含量较多,酯类物质是啤酒当中种类最丰富的挥发性风味物质,推测R6传感器可能和酯类物质相关^[8]。其次为R9、R2、R7、R8和R1传感器,表明啤酒可能含有较高的醇类、硫化物、萜烯和芳香族化合物^[9]。R10传感器对啤酒香气的响应值非常低,趋近于基线,说明对样品香气检测的贡献较小。

图2为各样品传感器95 s响应值的平均值,展示不同品牌啤酒之间电子鼻响应值的差异性。电子鼻主要通过R1、R2、R6、R7、R8和R9传感器显示出区分不同品牌啤酒的良好能力。R3、R4和R5传感器虽然对啤酒香气具有响应值,但样品之间差异性较小,直观上不具备区分样品的能力。WH样品的R6传感器响应值显著高于其他4种,因此WH样品中可能含有的甲基类物质最多。R8传感器对醇类敏感,推测QD样品生成的醇类物质最多。仅通过观察传感器响应值无法区分不同品牌啤酒,因此,有必要进一步利用PCA和FDA进行分析。

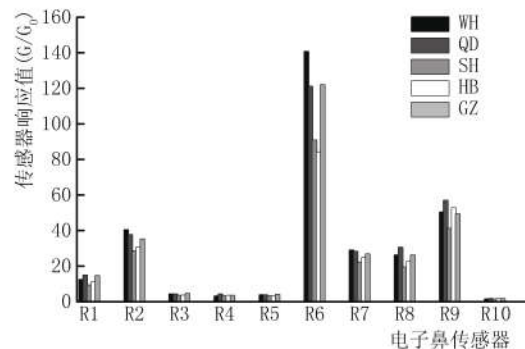


图2 5种品牌啤酒的电子鼻响应值

2.1.2 主成分分析

主成分分析(PCA)是比较常用的分析和简化数据的多元统计方法,是在不丢失大部分样品气味信息的条件下,选取少数几个综合指标来代替原来的变量,从而简化变量之间的关系^[10]。因此,在尽可能保留有用信息的前提下,对数据进行降维,提高样品区分度。

将电子鼻十个传感器的95 s稳态响应值作为特征值进行主成分分析,前两个主成分PC1和PC2的方差贡献率分别为90.99%和7.02%,累计贡献率达到98.01%,说明主成分PC1和PC2包含了原始样品98.01%的信息。如图3所示,5种啤酒样品均能聚集在一起,分布于各自独立的区域,说明不同品牌啤酒样品风味特征不同。

PCA中样品间的距离表征差异,SH与HB、QD与GZ的第一主成分接近,样本之间的差异主要体现在第二主成分上。GZ与WH的第二主成分接近,主要差异体现在第一主成分上。第一主成分的

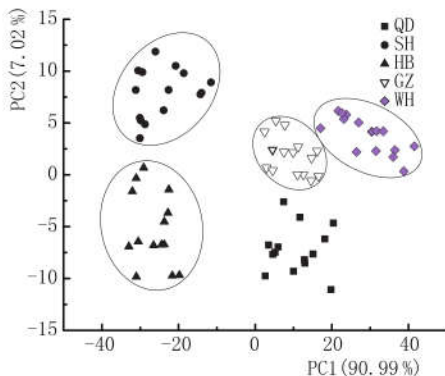


图3 基于电子鼻不同品牌啤酒PCA分析

方差贡献率远大于第二主成分,表明PC1轴上的距离越大,样品的差异性越大,SH、HB均与WH样品在PC1轴上的距离最远,由此判断SH、HB与WH在气味上的差别最为明显。若样品间的主要差异性体现在第二主成分上,其实际差异较小,说明SH和HB、QD和GZ的香气特征差别较小。主成分分析中,虽然样品间间距较小,但是边界区域无重叠,表明电子鼻与PCA分析技术能实现啤酒挥发性成分初步鉴别。

图4为PC1和PC2相应的载荷分析图,在载荷分析图中,各传感器在纵横坐标上的投影可以反映其对样品挥发性气味贡献率的大小,离原点越远的传感器对PCA的贡献越大,反之则越小^[11]。PEN3的十个传感器中,对第一主成分贡献最大的是R6(对甲基类敏感),对第二主成分贡献最大的是R9(对芳香成分敏感)。R3、R4、R5和R10传感器趋近于坐标原点,表明这四个传感器对啤酒挥发性香气成分差异性区分的贡献度低,只需要R1、R2、R6、R7、R8和R9六个传感器就可以完成样品的区分和鉴别。结合图2 PCA分析结果,SH与HB、QD与GZ样品的差异性主要体现在芳香类物质上,与WH样品的差异性主要体现在甲基类物质上。

2.1.3 Fisher判别分析

Fisher判别分析(FDA)通过函数优化重组传感器数据,去除对提高识别能力没有贡献或贡献很小的传感器数据,得到新的典型变量,使群体之间的差异最大化,并确保群体内部的差异最小化,从而使各个群体间的重心距离最大,进一步提高传感器

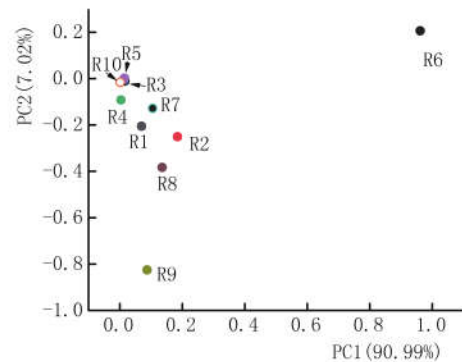


图4 基于电子鼻不同品牌啤酒的载荷图

识别能力^[12]。将75个啤酒样品按2:1分为训练集和测试集,得到50个训练集样本,25个测试集样本。

经过Fisher判别分析以后得到4个判别函数,对判别模型的贡献率分别为70.0%、19.1%、9.2%和1.7%。前两个判别函数的累计贡献率达到89.1%,包含了5种啤酒样品的主要信息,可以描述不同品牌啤酒之间风味物质特征的差异与联系。因此,选用前两个判别函数对5种啤酒进行分类。结果如图5所示,椭圆区域内各样品分布趋势各不相同,相比于PCA分析结果,5种啤酒分布区间更为分散,样品集中性更强,分类效果明显,为了验证Fisher判别分析的准确率,采用贝叶斯(bayes)判别函数对5种不同产地的啤酒进行分类,准确率高达93%,表明Fisher判别分析优于PCA,是更适用于电子鼻对啤酒品牌区分的统计分析工具。

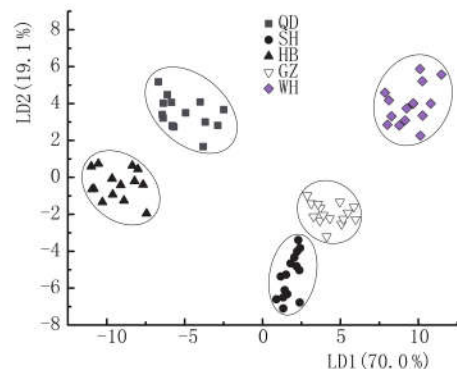


图5 基于电子鼻不同品牌啤酒的FDA分析

2.2 啤酒挥发性成分的GC-MS分析

电子鼻虽然能够对啤酒气味特征所代表的整

体风味进行分析,可以直观的反映不同品牌啤酒的差异性和相似性,但是对样品中挥发性风味物质的种类和含量的分析却受到了限制^[13]。为了进一步研究啤酒样品间风味成分之间的差异,使用GC-MS对5种啤酒进行测定,共鉴定出24种酯类、16种醇类、13种酸类、10种醛类、12种烷类、7种酮类以及13种芳香族化合物等挥发性物质,啤酒挥发性成分中主要的呈香物质通常为酯类、醇类和酸类^[14]。5种啤酒的主要挥发性成分的种类大体相同,但是各组分含量有所区别。

聚类热图可以直观的展示啤酒风味物质含量的差异,在啤酒挥发性成分中种类最为丰富的是酯类物质,是啤酒香气和风味的最重要的贡献者^[15]。WH样品中酯类物质含量最高,与电子鼻R6传感器结果一致,但是HB酯类含量高于QD和SH,与电子鼻结果具有差异性,可能是多种挥发性成分对R6传感器交叉响应的结果。图6是啤酒酯类物质含量归一化后绘制的聚类热点图,通过酯类物质对不同品牌啤酒进行进一步的聚类分析。WH样品和GZ样品的酯类物质含量最高,WH样品中辛酸异戊酯、癸酸乙酯、庚酸乙酯、乙酸庚酯、丁酸异戊酯和丁酸乙酯含量显著高于其他4种样品,被单独

归为一类。GZ样品中乙酸乙酯、乙酸异戊酯、乙酸异丁酯及乙酸苯乙酯和其他四种样品差异性显著,并含有甲酸辛酯特征风味物质,被归为一类。HB、SH、QD的啤酒酯类含量相对较低,酯类物质的种类及含量大致相同,被归为一类。

醇类对啤酒的风味感知起着重要作用,通常由酵母代谢麦汁中的氨基酸和糖类产生,且高级醇也是更具风味活性的酯的前驱体^[16]。5种啤酒样品中总醇相对百分含量为WH 21.11%、QD 24.97%、SH 18.31%、HB 20.56%、GZ 22.02%,QD样品的醇类物质含量最高,与电子鼻检测结果一致。由图7可知,5种啤酒通过醇类物质可以分为两大类,样品WH含有L-薄荷醇、异蒲勒醇、里哪醇等其他4种啤酒所没有的特征风味物质,被单独归为一类。HB、QD、SH、GZ的4种啤酒醇类物质种类和含量较为相近,被归为一类。

啤酒中的酸类物质主要在麦芽糖化过程和酵母菌代谢中形成,对啤酒的呈味起着至关重要的作用^[17]。在5种啤酒中,总酸相对百分含量为WH 11.28%、QD 11.94%、SH 12.34%、HB 11.08%和GZ 8.56%。如图8所示,酸类物质可以大致分为两类,WH样品由于酸类物质的种类高于其他4种啤酒,

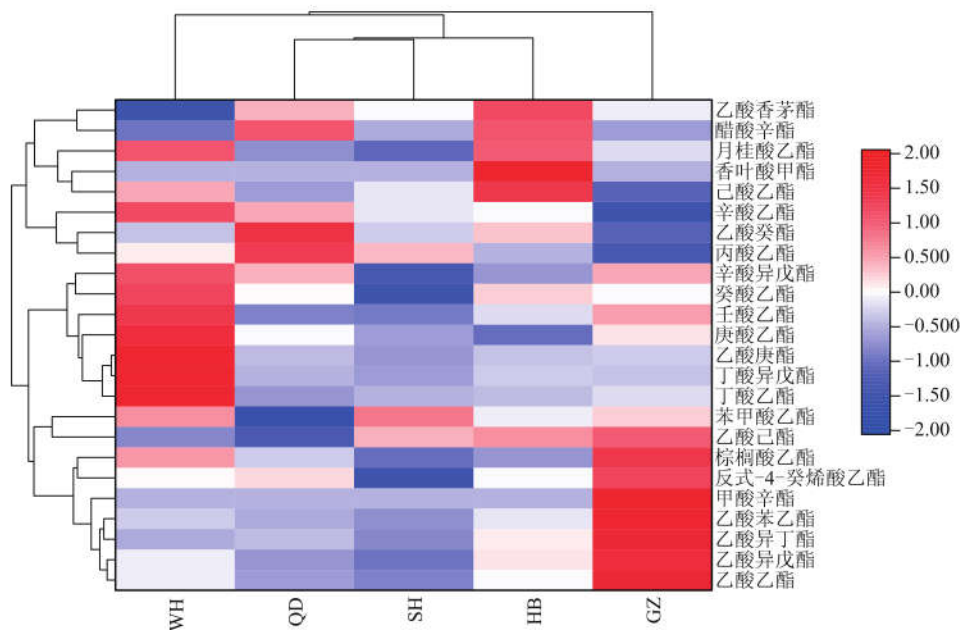


图6 不同品牌啤酒酯类物质聚类分析

具有 α -亚麻酸、壬酸等特征酸类物质,且主要的酸类物质乙酸、正己酸、正癸酸、月桂酸等含量高于其他种类啤酒,单独归为一类。HB、QD、SH、GZ 4种啤酒酸类物质种类和含量相近,被归为一类。

2.3 电子鼻数据与挥发性化合物的相关性

偏最小二乘回归(PLSR)是一种多元线性回归方法,用于因变量与自变量之间的线性关系^[18]。为了研究电子鼻传感器与啤酒挥发性风味物质的相关性,利用PLSR建立电子鼻响应值与啤酒样品挥发性风味物质之间的双因素模型,如图9所示,解

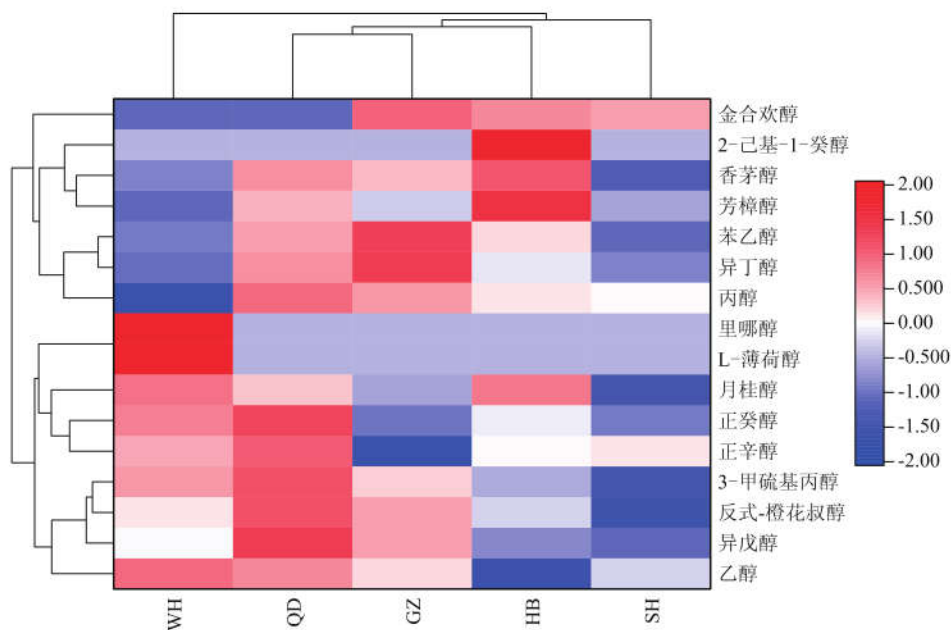


图7 不同品牌啤酒醇类物质聚类分析

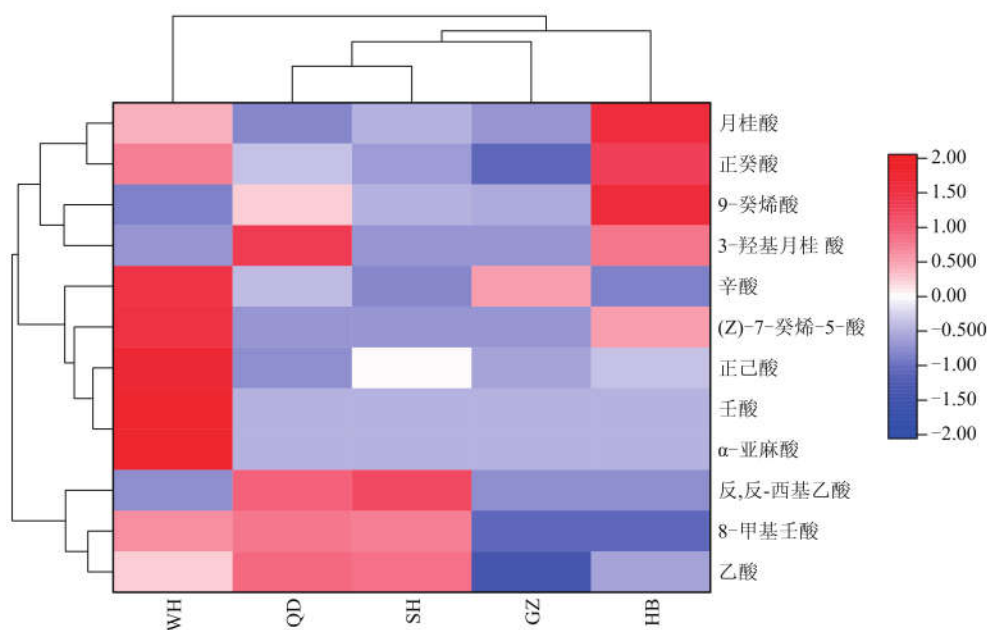


图8 不同品牌啤酒酸类物质聚类分析

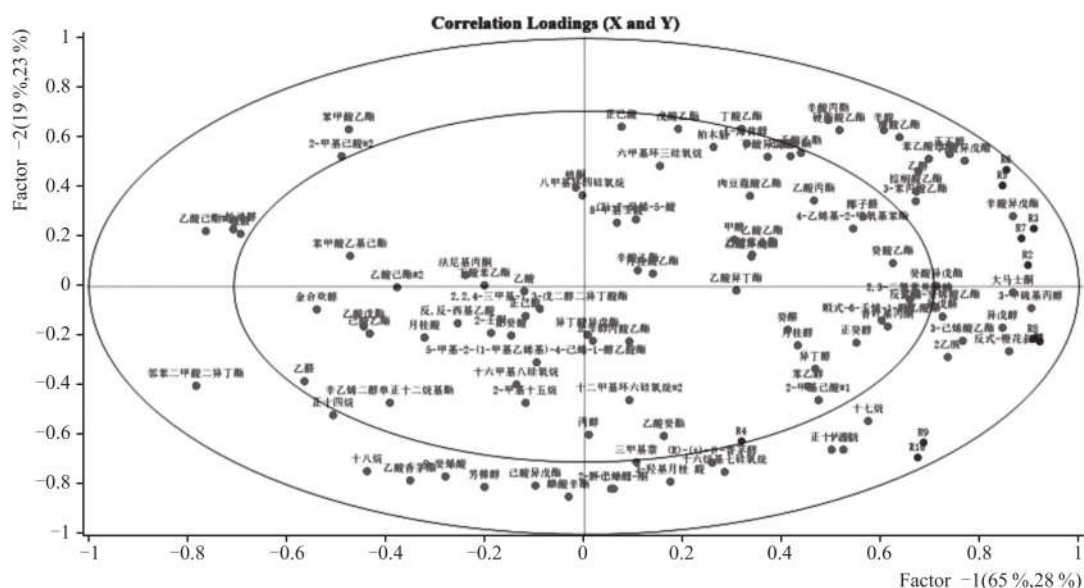


图9 电子鼻传感器与挥发性成分的PLSR相关性

释了X矩阵(电子鼻响应值)中的84%的方差和Y矩阵(挥发性风味物质)中51%的方差。双标图中挥发性化合物样本点与传感器之间距离越短,表明样本点和传感器的相关性越高^[19-20]。R1和R8传感器分布于第四象限,周围密布着醇类,如啤酒中含量最高的高级醇有异戊醇、反式-橙花叔醇、3-甲硫基丙醇等,表明这两个传感器与这些醇类物质正相关,醇类可能是影响R1、R8传感器变化的主要挥发性成分,与电子鼻特性一致。R4、R9和R10传感器周围分布着一些烷类,如十六烷基七硅氧烷、十五烷、正十六烷等,表明这几类传感器与啤酒挥发性风味物质中的烷类密切相关。R5、R6、R3、R7以及R2传感器周围分布着苯乙酸乙酯、丙酸异戊酯、辛酸异戊酯、棕榈酸乙酯、3-苯丙酸乙酯、正丁醇,表明这几类传感器的响应值与这些化合物正相关。

3 结论

采用PEN3电子鼻和气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术从宏观和微观上对5种品牌啤酒的挥发性成分进行检测。电子鼻结合PCA和FDA能够很好的区分5种啤酒,R6、R8和R9传感器起主要区分作用,FDA对5种啤酒的区分度更大,准确率达到100%。GC-MS共鉴定出24种酯类、16种醇类、13种酸类、10种醛类、12种烷类、7种酮类以及13

种芳香族化合物等挥发性物质。5种啤酒的主要挥发性成分的种类大体相同,但是各组分含量有所区别,且在主成分分析结果中,边缘区域相近的样品其风味物质的种类和含量具有一定相似性。根据偏最小二乘回归模型,电子鼻与挥发性风味物质表现出良好的相关性,醇类、酯类、烷类物质是引起传感器R6、R8和R9变化的主要挥发性成分。本研究为区分啤酒品牌及电子鼻传感器与挥发性成分之间相关性的研究提供进一步的实验依据和理论支撑。

参考文献:

- [1] KAPLAN N M, PALMER B F, DENKE M A. Nutritional and health benefits of beer[J]. American journal of the medical sciences, 2000, 320(5): 320-326.
- [2] 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.
- [3] JIAO J, DING N, SHI T, et al. Study of chromatographic fingerprint of the flavor in beer by HS-SPME-GC[J]. Analytical letters, 2011, 44(4): 648-655.
- [4] 张君生, 李臻峰, 宋飞虎, 等. 基于zNose-(TM)电子鼻的新产原酒品质检测[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(12): 216-220.
- [5] SHI Y, GONG F, WANG M, et al. A deep feature mining method of electronic nose sensor data for identifying beer

- olfactory information[J].Journal of food engineering, 2019,263: 437-445.
- [6] 刘芳,杨康卓,张建敏,等.基于电子鼻和气质联用技术的浓香型白酒分类[J].食品与发酵工业,2020,46(2): 73-78.
- [7] CAO Y, WU Z, WENG P. Comparison of bayberry fermented wine aroma from different cultivars by GC-MS combined with electronic nose analysis[J].Food science & nutrition,2020,8(1): 257-265.
- [8] 蒋立文,谢艳华,李跑,等.HS-SPME/GC-MS和电子感官技术分析毛霉型豆豉发酵过程中风味品质[J].核农学报,2020,34(7): 1497-1506.
- [9] SHI J, NIAN Y, DA D, et al. Characterization of flavor volatile compounds in sauce spareribs by gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose [J].LWT-food science and technology,2020,124: 109-182.
- [10] 李剑,李臻峰,宋飞虎,等.基于近红外光谱的水蜜桃采摘期的鉴别方法[J].传感器与微系统,2017,36(10): 48-50.
- [11] 程宏桢,蔡志鹏,王静,等.基于GC-MS、GC-O和电子鼻技术评价百香果酒香气特征[J].食品科学,2021(6): 256-263.
- [12] 李静,宋飞虎,浦宏杰,等.基于电子鼻的白酒品质检测[J].食品与发酵工业,2015,41(4): 160-164.
- [13] 陈廷廷,胡琼,唐洁,等.基于电子鼻及气相色谱-质谱联用技术对川西高原4种蜂蜜挥发性成分分析[J].食品科学,2018,39(16): 233-239.
- [14] BIAZON C L, BRAMBILLA R, RIGACCI A, et al. Combining silica-based adsorbents and SPME fibers in the extraction of the volatiles of beer: an exploratory study[J].Analytical & bioanalytical chemistry,2009,394(2): 549-556.
- [15] VIEJO C G, FUENTES S, TORRICO D D, et al. Chemical characterization of aromas in beer and their effect on consumers liking[J].Food chemistry,2019,293: 479-485.
- [16] VERA L, ACEÑA L, GUASCH J, et al. Characterization and classification of the aroma of beer samples by means of an MS e-nose and chemometric tools[J].Analytical & bioanalytical chemistry,2011,399(6): 2073-2081.
- [17] 程康.啤酒工艺学[M].北京:中国轻工业出版社,2013: 338-340,331-332.
- [18] DU D, XU M, WANG J, et al. Tracing internal quality and aroma of a red-fleshed kiwifruit during ripening by means of GC-MS and E-nose[J].RSC advances,2019,9(37): 21164-21174.
- [19] SHEN H, WEI T, ZHANG Z, et al. Discrimination of five brands of instant vermicelli seasonings by HS-SPME/GC-MS and electronic nose[J].Journal of food science and technology,2020,57(5): 4160-4170.
- [20] 刘梦楚,邹晓红,蓝伦礼,等.基于电子鼻及顶空-气质联用技术结合化学计量学区分不同产地的砂仁[J].中国实验方剂学杂志,2017,23(6): 35-42.

(上接第103页)

定。由此可以确认采用玛咖酒样浓缩后0.5%盐酸溶解,三氯甲烷-正丁醇提取,溴甲酚绿酸性染料显色的方式比色检测其总生物碱含量的方法操作简单,重复性好,灵敏可靠,可用于玛咖酒中总生物碱含量的测定。

试验中还发现,以下几方面会影响本法测量的准确度,需要在测定中特别注意:(1)在萃取时需加入过量的氯化钠以防止乳化反应,若萃取时仍存在乳化则应高速离心达到分层;(2)萃取液浓缩可以选择水浴锅或者真空浓缩仪,若选择真空旋蒸则应选择大容量鸡心瓶以避免爆沸;(3)溴甲酚绿显色时振摇不能太过剧烈,容易形成完全乳化,造成回收率偏低。

参考文献:

- [1] 安婧娴,刘芳,刘芳,等.近年来乌头属植物二萜生物碱化学成分及其镇痛活性研究进展[J].中南药学,2016,14(5): 521-525.
- [2] 韩佳,汤建才,张帆.天然药物中生物碱抗肿瘤作用机制的研究进展[J].中南药学,2018,16(7): 987-990.
- [3] 李丽,龚晓莹,姜蔓菁,等.酸性染料比色法测定总生物碱含量的研究进展[J].中南药学,2019,17(8): 1242-1246.
- [4] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:一部[M].北京:中国医药科技出版社,2015.
- [5] 高斌,李双玲,刘凤静,等.不同色型玛咖中总生物碱酸水提取工艺的优化[J].食品工业科技,2018,39(18): 176-180.