

基于电子鼻与气相色谱-质谱联用区分不同陈酿期恒顺香醋风味物质

邝格灵¹, 王新宇¹, 李 树¹, 王 昊¹, 李 信², 余永建², 赵国忠^{1,*}

(1. 省部共建食品营养与安全国家重点实验室, 天津科技大学食品工程与生物技术学院, 天津 300457;

2. 江苏恒顺醋业股份有限公司, 江苏 镇江 212143)

摘要: 为区分不同陈酿期恒顺香醋, 并构建其香气特征, 选取陈酿期3、5、10 a的恒顺香醋作为研究对象, 采用电子鼻与气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)方法, 并结合主成分分析和载荷分析量化主成分贡献率和样品间风味的区分度。结果显示: 电子鼻能够很好地区分3种不同陈酿期香醋的风味, 电子鼻传感器W2S、W5S对恒顺香醋香气的区分能力最强。GC-MS分析结果表明糠醛和川芎嗪的相对含量对区别不同陈酿期恒顺香醋贡献率最大。可见, 通过电子鼻技术和GC-MS相结合的手段, 可以较好区分不同陈酿期的恒顺香醋, 可为鉴别不同陈酿期的恒顺香醋提供理论依据和技术参考。

关键词: 恒顺香醋; 电子鼻; 气相色谱-质谱法; 风味

Discriminating the Volatile Flavor Composition of Hengshun Vinegars of Different Ages Using Electronic Nose and Gas Chromatography-Mass Spectrometry

KUANG Geling¹, WANG Xinyu¹, LI Shu¹, WANG Hao¹, LI Xin², YU Yongjian², ZHAO Guozhong^{1,*}

(1. State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, College of Food Engineering and Biotechnology,

Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. Jiangsu Hengshun Vinegar Ind. Co. Ltd., Zhenjiang 212143, China)

Abstract: In order to distinguish Hengshun vinegars of different ages and to establish their aroma characteristics, the volatile flavor compounds of 3-, 5-, and 10-year-old Hengshun vinegars were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and their flavor characteristics were evaluated using an electronic nose. Principal component analysis (PCA) and loading analysis (LA) were performed to determine the contribution ratio of each principal component and the degree of differentiation among vinegars of different ages in terms of flavor. The results showed that the electronic nose could clearly discriminate the three vinegar samples with W2S and W5S being the most efficient sensors. In addition, GC-MS analysis showed that the relative contents of furfural and Ligustrazine contributed most to discriminate these vinegars. Therefore, our results support the combined use of electronic nose and GC-MS to discriminate Hengshun vinegars of different ages.

Keywords: Hengshun balsamic vinegar; electronic nose; gas chromatography-mass spectrometry; flavor

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190508-071

中图分类号: TS207.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2020)12-0228-06

引文格式:

邝格灵, 王新宇, 李树, 等. 基于电子鼻与气相色谱-质谱联用区分不同陈酿期恒顺香醋风味物质[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 228-233. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190508-071. <http://www.spkx.net.cn>

KUANG Geling, WANG Xinyu, LI Shu, et al. Discriminating the volatile flavor composition of Hengshun vinegars of different ages using electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2020, 41(12): 228-233. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190508-071. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2019-05-08

基金项目: 天津科技大学大学生实验室创新基金项目(30003)

第一作者简介: 邝格灵(1991—)(ORCID: 0000-0001-9584-3868), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品微生物学。

E-mail: 1175020233@qq.com

*通信作者简介: 赵国忠(1983—)(ORCID: 0000-0002-7992-4331), 男, 副教授, 博士, 研究方向为食品微生物学与食品风味组学。E-mail: zgjiangnan@163.com

镇江香醋世界闻名,是最受欢迎的中国食醋之一^[1],以糯米为原料,经固态发酵生产而成,具有独特的风味和生物活性^[2]。醋的化学和感官特性随时间而变化,其商业价值随时间的增长发生很大变化^[3]。然而许多商家为了追求经济利益,虚报醋的生产年份,以新充陈,欺骗消费者。目前,人们主要凭借某些简单的理化指标以及色、香、味、体等感官指标评判陈酿食醋真伪,评价结果具有较大片面性与主观性^[4]。因此,建立一种快速、准确、无损的鉴别不同醋龄掺假的方法具有重要的意义和价值。

电子鼻是利用气体传感器阵列的响应图谱识别气味的电子系统,能够快速、实时和连续性地监测气味指纹及其变化,然后将测得的指纹数据与建立的标准数据库比对,应用软件进行电子指纹识别^[5]。它是一种简单和经济有效的气味分析工具,可以将挥发性有机样品的混合物作为一个整体进行识别,而无需在样品混合物中识别单个化学物质^[6]。气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用与电子鼻相反,可以检测单一物质含量。GC-MS的分析结果有利于对电子鼻分析结果进行解释,两者结合可同时对宏观和微观上对样品香气进行阐述,目前已经成为对挥发性成分及挥发性物质组成进行精确定性、定量分析的有效手段^[7]。本研究采用电子鼻和GC-MS联用技术,研究不同醋龄恒顺香醋的香气指纹特征,探讨恒顺香醋关键的特征香气成分。此方法可为鉴别不同陈酿期的恒顺香醋提供理论依据和技术参考,而且也可以避免不法商家虚报醋的生产年份,以新充陈,欺骗消费者的不诚信行为。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

恒顺香醋陈酿3 a (HS3: S1、S2、S3)、陈酿5 a (HS5: S4、S5、S6)、陈酿10 a (HS10: S7、S8、S9) 江苏恒顺醋业股份有限公司; C₆~C₂₅正构烷烃 美国AccuStandard公司; 2-辛醇 英国Alfa Aesar公司; 氯化钠 上海兴萌化工科技有限公司; 所有其他化学试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

PEN3型便携式电子鼻传感器 德国Airsense公司; GC-MS联用仪 日本岛津公司; 75 μm CAR/PDMS萃取头、顶空瓶 上海安谱实验科技股份有限公司; 磁力搅拌器 德国IKA公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

1.3.1.1 电子鼻

样品用蒸馏水稀释10倍,吸取6 mL于15 mL顶空瓶

中,加转子,用聚四氟乙烯隔垫密封置于50 ℃加热平台水浴加热50 min,转速600 r/min。每个样品做3个平行。

1.3.1.2 顶空固相微萃取

样品用蒸馏水稀释10倍,吸取6 mL于15 mL顶空瓶中,加入1.5 g氯化钠和二辛醇内标,加转子,聚四氟乙烯封口,50 ℃、600 r/min磁力搅拌器水浴平衡10 min,插入75 μm CAR/PDMS萃取头(使用前按说明进行老化)顶空吸附40 min,吸附结束后拔出萃取头,迅速插入GC-MS进样口中,250 ℃解吸5 min,同时启动仪器采集数据。

1.3.2 仪器分析条件

1.3.2.1 电子鼻条件

电子鼻参数设置:样品间隔时间1 s,清洗时间60 s,归零时间10 s,样品准备时间5 s,测定时间98 s,载气流速200 mL/min,进样流量200 mL/min。传感器信息见表1。

表1 电子鼻传感器名称与其相应物质
Table 1 Electronic nose sensors and their responses to odorant compounds

阵列序号	传感器名称	性能描述
1	W1C	芳香成分,苯类
2	W5S	灵敏度大,对氮氧化物很灵敏
3	W3C	芳香成分灵敏,氨类
4	W6S	主要对氢化物有选择性
5	W5C	短链烷烃芳香成分
6	W1S	对甲基类灵敏
7	W1W	对硫化物灵敏
8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
9	W2W	芳香成分
10	W3S	对长链烷烃灵敏

1.3.2.2 GC-MS条件

GC条件:色谱柱采用Rtx-5MS石英毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm);升温程序:40 ℃保持3 min,以4 ℃/min升温至150 ℃,保持1 min,再以8 ℃/min升温至250 ℃;进样口温度为250 ℃;载气:氦气,纯度99.999%,流速1 mL/min;进样方式:手动;进样模式:分流进样,分流比10:1。

MS条件:电离方式为电子电离源,电子能量70 eV,离子源温度200 ℃,接口温度220 ℃,m/z 35~500进行质量扫描,溶剂延迟1.5 min,检索图库为NIST11。GC-MS测定结果通过NIST 2011图库检索,并用峰面积归一法测算各化学成分的相对含量。

1.4 数据分析

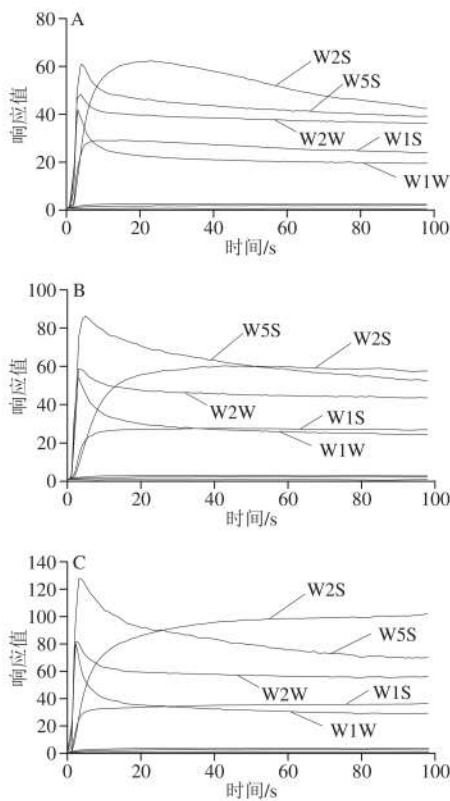
定性和定量分析:由GC-MS得到的谱图,经计算机在标准谱库NIST11和Wiley中检索对比各色谱峰的质谱信息,选择相似度达70%以上的成分结构信息,并根据烷烃标准品(C₆~C₂₅)提供的可靠信息计算保留指数,准确鉴定不同陈酿期恒顺香醋的挥发性成分。同时采用内标法进行半定量,得到各组分的质量浓度。

电子鼻所测数据用其自带的Winmuster软件进行主成分分析 (principal component analysis, PCA) 和载荷分析 (loading analysis, LOA), 采用Origin 2019b进行雷达图及GC-MS的数据分析。

2 结果与分析

2.1 基于电子鼻技术对不同陈酿期的恒顺香醋风味品质差异性分析

2.1.1 电子鼻传感器对不同陈酿期恒顺香醋的信号响应



A~C分别为HS3、HS5、HS10。

图1 电子鼻传感器对恒顺香醋的响应曲线

Fig. 1 Response curves of electronic nose sensors to Hengshun vinegar

如图1所示, 10条曲线分别代表电子鼻的10个传感器对恒顺香醋香气的响应情况, 传感器W2S、W5S、W2W、W1S、W1W响应曲线较高, 其中, 传感器W2S响应曲线最高, 说明该传感器对香醋香气的响应最强。有些传感器对香气的响应值非常低, 接近基值“1”, 说明对于样品香气检测的贡献较小。通过比较HS3、HS5和HS10的传感器响应曲线, 可以发现随着陈酿年份的增加, 传感器W2S、W5S的响应值也相应增加 (HS10 > HS5 > HS3), 且变化非常明显。

2.1.2 不同陈酿期恒顺香醋雷达图分析

图2中主要涉及3个传感器W2S (对醇类、醛酮类灵

敏)、W2W (芳香成分, 对有机硫化物灵敏) 和W5S (对氮氧化物很灵敏)。W2S的区分能力最强, 其次是W5S和W2W, 其中HS10 > HS5 > HS3, 说明这三种传感器所检测的恒顺香醋物质含量和陈酿期相关, 且HS10的响应值最高。因此不同陈酿期恒顺香醋中醇醛酮类、氮氧化物、有机硫化物的含量区别较明显。

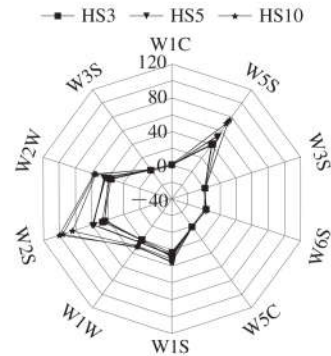


图2 传感器对不同陈酿期恒顺香醋的响应雷达图

Fig. 2 Radar chart showing electronic nose sensor responses to Hengshun vinegars of different ages

2.1.3 不同陈酿期恒顺香醋的PCA

PCA是一种方便的数据转换和降维处理方法^[8]。在用PCA进行分析时, 若两主成分的贡献率小于95%, 则表示分析中有干扰成分的存在, 从而说明该方法在数据分析中不合适。从图3可以看出, PCA结果可以很好地区分样本, 其中PC1贡献率92.10%, PC2贡献率为7.77%, 前两个主成分解释了总方差的99.87%, 所以这两个主成分已经基本代表了样品的主要特征信息。HS3、HS5和HS10数据点之间无重叠, 可以较好地进行识别分类, 而且陈酿期较短 (HS3) 和陈酿期较长 (HS10) 的香醋存在显著性差异。

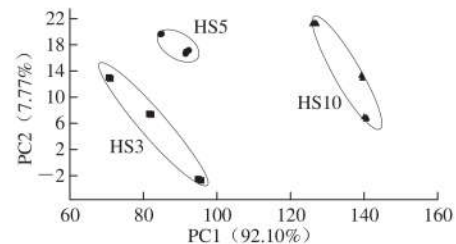


图3 3种不同陈酿期恒顺香醋的电子鼻结果的PCA

Fig. 3 PCA of electronic nose results for Hengshun vinegars of different ages

2.1.4 不同陈酿期恒顺香醋的LOA

LOA与PCA法相关度较高^[9], 主要是对传感器进行研究, 表征出每一种传感器的分析能力, 通过LOA, 可以得出电子鼻的10个传感器分别对样品的PCA的贡献率,

由图4可知, 传感器W2S对PC1贡献率最大, 说明PC1主要反映的是醇、醛、酮类。W5S对PC1和PC2贡献率都非常大, 对PC2的贡献率最大, 说明了PC2主要反映的是氮氧化合物成分。传感器W2S、W5S发挥了较大的作用, 起主要区分作用, 而其他传感器响应较小, 区分作用不明显。因此, 可以通过LOA辅助辨别不同陈酿期恒顺香醋。

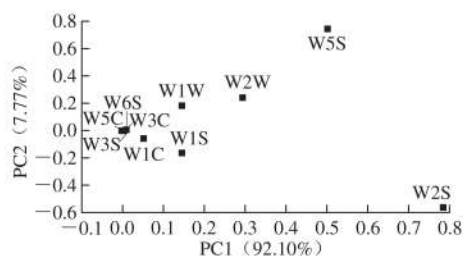


图4 3种不同陈酿期恒顺香醋的LOA图

Fig. 4 Loading analysis of Hengshun vinegars of different ages

2.2 基于GC-MS技术对3种不同陈酿期恒顺香醋风味品质的差异性分析

2.2.1 3种不同陈酿期恒顺香醋挥发性成分含量对比

经SPME-GC-MS分离和鉴定, 共检测出136种化合物, 其中HS3、HS5各占85种, HS10占98种。恒顺香醋的风味主要由醇、酯、酸类、酮、醛、酚、吡嗪、呋喃、恶唑和醚等物质组成, 各香气成分种类数量及平均相对含量见表2。

表2 3种不同陈酿期恒顺香醋挥发性风味物质种类及相对含量
Table 2 Types and relative contents of volatile flavor compounds in Hengshun vinegars of different ages

种类	HS3		HS5		HS10	
	种类数量	相对含量/%	种类数量	相对含量/%	种类数量	相对含量/%
醇	8	7.27±0.13	8	3.31±0.03	7	3.03±0.03
酯	20	21.3±0.88	22	11.38±0.01	21	8.99±0.15
酸	7	8.43±0.16	5	7.49±0.11	6	13.26±0.10
酮	14	4.65±0.11	16	5.35±0.06	15	6.17±0.03
醛	17	39.35±0.75	14	29.09±0.46	16	16.45±0.19
酚	1	11.18±0.30	1	18.48±0.54	1	10.71±0.08
烃类	3	0.08±0.01	3	0.07±0.00	8	0.30±0.02
吡嗪	4	1.78±0.05	7	17.50±0.55	9	32.75±3.15
呋喃	0	0.00±0.00	1	0.30±0.02	4	1.02±0.01
恶唑	2	0.93±0.02	2	5.49±0.05	3	5.64±0.26
醚	0	0.00±0.00	0	0.00±0.00	1	0.01±0.00
其他	9	5.02±0.11	6	1.56±0.62	8	1.68±0.12

3种不同陈酿期恒顺香醋中醛类、酯类、酚类和酸类的相对含量均较高, 此外, 酸类、酮类、恶唑和吡嗪类化合物随着陈酿时间的延长而增加, 而醛类大量减少。HS3和HS5相对含量最高的均为醛类, 分别占39.35%和29.09%, 在3个不同陈酿年份中, HS3中的醛类相对含量最高。醛是由微生物发酵或氨基酸降解而产生, 通常具有较低的阈值^[10], 稀释后的醛通常具有花香和果香,

可提高食醋的品质^[11]。而HS10含量最高的为吡嗪类化合物, 其平均相对含量达到了32.75%, 远高于HS3和HS5。吡嗪是一类杂环化合物, 具有对位两个氮原子, 具有坚果焙烤香气^[12], 在“烤”味中起着重要作用。另外, 在各种各样的食品中都有发现, 吡嗪对提高食品的风味方面有很大的作用^[13]。此外, 国外的研究还表明, 吡嗪类的化合物还具有预防心血管疾病的作用^[14]。

2.2.2 3种不同陈酿期恒顺香醋主要挥发性风味物质的PCA

3种不同陈酿期恒顺香醋中平均相对含量大于1.0%的挥发性风味物质(表3)主要包括苯乙醇、乙酸苯乙酯、乙酸乙酯、醋酸、2,3-丁二酮、糠醛、苯甲醛、2,4-二叔丁基酚、2,3,5-三甲基吡嗪、川芎嗪、2,4,5-三甲基恶唑、丙二醇甲醚醋酸酯和2-戊二酰-1,3-二氧杂环乙烷13种物质。

表3 恒顺香醋中相对含量大于1%的风味物质
Table 3 Flavor substances with relative contents more than 1% in Hengshun vinegars

风味物质	香气特征描述	相对含量/%		
		HS3	HS5	HS10
苯乙醇	玫瑰香 ^[15]	4.72±0.05	2.78±0.02	2.19±0.03
乙酸苯乙酯	花香和玫瑰香 ^[16]	7.48±0.12	4.66±0.03	4.10±0.06
丙二醇甲醚醋酸酯	甜香气味 ^[17]	1.58±0.10	0.24±0.02	0.22±0.01
乙酸乙酯	风梨的果香 ^[18]	9.69±0.46	4.97±0.04	3.24±0.04
醋酸	刺激酸味	6.31±0.11	6.43±0.11	12.53±0.11
2,3-丁二酮	奶油香味 ^[19]	0.46±0.01	1.89±0.10	2.84±0.04
糠醛	杏仁, 烤土豆, 面包 ^[20]	33.43±0.75	24.57±0.40	12.29±0.19
苯甲醛	苦杏仁香 ^[21]	2.29±0.06	2.39±0.03	2.23±0.06
2,4-二叔丁基酚	天然存在于水果、种子中 ^[22]	11.18±0.30	18.48±0.54	10.71±0.08
2,3,5-三甲基吡嗪	可可、烤香 ^[23]	0.40±0.03	1.61±0.03	2.02±2.93
川芎嗪	杏仁, 烤土豆, 面包 ^[24]	1.31±0.03	14.63±0.56	28.25±0.37
2,4,5-三甲基恶唑	烘烤、蔬菜、焦糖和清香香气 ^[25]	0.86±0.02	5.20±0.03	4.88±0.23
2-戊二酰-1,3-二氧杂环乙烷	—	1.99±0.04	0.37±0.02	0.40±0.06

注: —, 未查到。

对平均相对含量大于1.0%的挥发性风味物质进行PCA, 由图5可以看出, PCA结果可以很好区分样本, 其中PC1贡献率72.30%, PC2贡献率为25.73%, 前两个主成分解释了总方差的98.03%, 所以这两个主成分已经基本代表了样品的主要特征信息。另外, 对PC1贡献最大的是糠醛, 对PC2贡献最大的是川芎嗪, 它们对风味差异区分有重要影响, 这和电子鼻分析的结果一致。糠醛在HS3、HS5和HS10中的相对含量分别为33.43%、24.57%、12.29%, 它是恒顺香醋中含量最高的醛, 其相对含量随醋龄增加呈现不断下降的趋势。糠醛又称呋喃甲醛或麸醛, 主要是由戊聚糖分解或酵母发酵所产生^[26], 但糠醛通常被研究为食品热加工过程中形成的美拉德反应和糖热解中间体^[27]。它是一种天然挥发性物

质,存在于许多食品中,如水果、肉类产品和饮料中。此外,糠醛还被用作食品的调味剂,有助于杏仁、烤土豆、面包、烧焦味^[20]。但是,研究表明,糠醛在达到一定剂量时会对人体的肝脏、肾脏、心脏等器官产生不良影响^[28-29]。对PC2贡献最大的是川芎嗪,它在HS3、HS5和HS10中的平均相对含量存在显著的差异,分别为1.31%、14.63%、28.25%。川芎嗪具有令人愉悦的坚果、烘烤的味道,通常用于食品工业,以提高产品的风味^[23]。当前学术界认为川芎嗪的产生方式有两种:第1种是通过糖和氨基酸发生美拉德反应;第2种则是通过微生物合成^[30]。同时,它也是中药川芎中分离出的一种生物碱,是食醋中重要的保健功能性物质,其含量是评价食醋品质的重要指标之一^[12]。因此,可以通过检测糠醛和川芎嗪的含量来鉴别不同陈酿期的恒顺香醋。

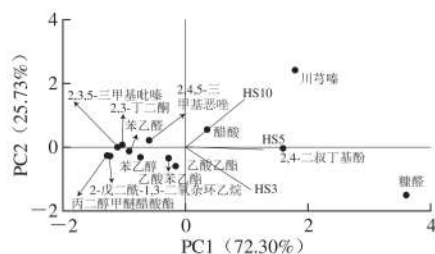


图5 主要风味物质PCA

Fig.5 PCA of the flavor substances in Hengshun vinegars

3 结论

采用电子鼻与GC-MS联用并结合PCA和LOA,结果显示电子鼻对3种不同陈酿期的恒顺香醋的香气具有明显的响应,HS3、HS5和HS10数据点之间无重叠,可以较好地进行识别分类,且传感器W2S、W5S起主要区分作用。通过对平均相对含量大于1.0%的挥发性风味物质进行PCA发现,糠醛和川芎嗪的相对含量对区别不同陈酿期恒顺香醋的贡献率最大,糠醛的相对含量随醋龄增加呈现不断下降的趋势,而川芎嗪呈现上升的趋势。电子鼻技术检测3种不同陈酿期恒顺香醋整体香气物质的区分趋势和GC-MS技术检测的具体香气物质结果一致。这为鉴别不同陈酿期的恒顺香醋提供理论依据和技术参考。

参考文献:

[1] WANG Z B, LI T T, LIU F Y, et al. Effects of ultrasonic treatment on the maturation of Zhenjiang vinegar[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 39: 272-280. DOI:10.1016/j.ulsonch.2017.04.020.

[2] LU Z M, XU W, YU N H, et al. Recovery of aroma compounds from Zhenjiang aromatic vinegar by supercritical fluid extraction[J].

International Journal of Food Science and Technology, 2011, 46(7): 1508-1514. DOI:10.1111/j.1365-2621.2011.02649.x.

[3] CHEN Q, SUN C, OUYANG Q, et al. Classification of vinegar with different marked ages using olfactory sensors and gustatory sensors[J]. *Analytical Methods*, 2014, 6(24): 9783-9790. DOI:10.1039/c4ay02386b.

[4] 黄群. 不同年份陈酿湘西原香醋的光谱特性[J]. *食品科学*, 2012, 33(23): 107-109.

[5] 赵慧君, 王玉荣, 李昕沂, 等. 基于电子鼻和GC-MS技术分析大头菜的挥发性风味物质[J]. *中国调味品*, 2018, 43(11): 23-28. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2018.11.004.

[6] SUN F, WN Z, CHEN Y, et al. Analysis of odors from thermally modified bamboo assessed by an electronic nose[J]. *Building and Environment*, 2018, 144: 386-391. DOI:10.1016/j.buildenv.2018.08.057.

[7] 陈静慧, 石浩, 张强, 等. 基于电子鼻和顶空固相微萃取-气相质谱联用技术对柠檬草挥发性成分的判别与分析[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(3): 231-236. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.017488.

[8] WANG H, ZHANG J, ZHU Y, et al. Volatile components present in different parts of grass carp[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2018, 42(6): e12668. DOI:10.1111/jfbc.12668.

[9] 周围, 王波, 刘倩倩, 等. 基于电子鼻和GC-MS对不同品种玫瑰“活体”香气的研究[J]. *香料香精化妆品*, 2017(2): 1-6; 72.

[10] 王灼琛, 余丽, 程江华, 等. 苦荞粉、苦荞壳及苦荞麸皮挥发性成分分析[J]. *食品科技*, 2014, 39(11): 171-177.

[11] 石芬芬, 李文梦, 王庭欣. 食醋发酵过程中风味物质的研究[J]. *中国调味品*, 2017, 42(2): 159-162.

[12] 杨晰, 杨继涛, 乔海军. 云晓熏醋香味成分的GC-MS分析[J]. *中国酿造*, 2010, 29(9): 149-151.

[13] RUDOLF M, RAPPERT S. Pyrazines: occurrence, formation and biodegradation[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 85(5): 1315-1320. DOI:10.1007/s00253-009-2362-4.

[14] HO J, JIE M. Pharmacological activity of cardiovascular agents from herbal medicine[J]. *Cardiovascular & Hematological Agents in Medicinal Chemistry*, 2007, 5(4): 273-277. DOI:10.1007/s00253-009-2362-4.

[15] CONDE-BÁEZ L, CASTRO-ROSAS J, VILLAGÓMEZ-IBARRA J R, et al. Evaluation of waste of the cheese industry for the production of aroma of roses (phenylethyl alcohol)[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2017, 8(4): 1343-1350. DOI:10.1007/s12649-016-9654-6.

[16] MARTÍNEZ O, SÁNCHEA A, FONT X, et al. Bioproduction of 2-phenylethanol and 2-phenethyl acetate by *Kluyveromyces marxianus* through the solid-state fermentation of sugarcane bagasse[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102(11): 4703-4716. DOI:10.1007/s00253-018-8964-y.

[17] 徐增慧, 贾建会, 吕晓莲, 等. 高静压和热杀菌对桃汁香气成分的影响[J]. *食品科学*, 2012, 33(5): 25-28.

[18] NIU, Y W, YAO Z M, XIAO Q, et al. Characterization of the key aroma compounds in different light aroma type Chinese liquors by GC-olfactometry, GC-FPD, quantitative measurements, and aroma recombination[J]. *Food Chemistry*, 2017, 233: 204-215. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.04.103.

[19] DONG D, ZHENG W, JIAO L, et al. Chinese vinegar classification via volatiles using long-optical-path infrared spectroscopy and chemometrics[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 95-100. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.08.005.

[20] CEPEDA-VÁZQUEZ M, BLUMENTHAL D, CAMEL V, et al. Multivariate optimization of headspace trap for furan and furfural

- simultaneous determination in sponge cake[J]. *Talanta*, 2017, 164: 708-715. DOI:10.1016/j.talanta.2016.10.073.
- [21] KUNJAPUR A M, PRATHER K L J. Microbial engineering for aldehyde synthesis[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, 81(6): 1892-1901. DOI:10.1128/AEM.03319-14.
- [22] VARSHA K K, DEVENDRA L, SHILPA G, et al. 2,4-Di-*tert*-butyl phenol as the antifungal, antioxidant bioactive purified from a newly isolated *Lactococcus* sp.[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2015, 211: 44-50. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2015.06.025.
- [23] STANLEY T H, VAN BUITEN C B, BAKER S A, et al. Impact of roasting on the flavan-3-ol composition, sensory-related chemistry, and *in vitro* pancreatic lipase inhibitory activity of cocoa beans[J]. *Food Chemistry*, 2018, 255: 414-420. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.02.036.
- [24] XIAO Z J, ZHAO L, LI T. GC-FID determination of tetramethylpyrazine and acetoin in vinegars and quantifying the dependence of tetramethylpyrazine on acetoin and ammonium[J]. *Food Chemistry*, 2018, 239: 726. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.07.015.
- [25] 王石, 谢建春, 孙宝国, 等. 食用香料2,4,5-三甲基噁唑和4-乙基-2,5-二甲基噁唑的合成[J]. *食品科学*, 2010, 31(24): 163-167.
- [26] 邱勇, 赵姗, 黄婕, 等. 紫外分光光度法测定黑曲霉发酵液中糠醛的含量[J]. *山地农业生物学报*, 2018, 35(7): 80-83. DOI:10.15958/j.cnki.sdnyswxb.2018.05.016.
- [27] PETISCA C, HENRIQUES A R, PÉREZ-PALACIOS T, et al. Assessment of hydroxymethylfurfural and furfural in commercial bakery products[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2013, 33(1): 20-25. DOI:10.1016/j.jfca.2013.10.004.
- [28] 张玉玉, 宋弋, 李全. 食品中糠醛和5-羟甲基糠醛的产生机理、含量检测及安全性评价研究进展[J]. *食品科学*, 2012, 33(5): 275-280. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201205059.
- [29] 孙莹, 苗榕芯. 浅谈饮料中5-羟甲基糠醛的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(13): 206-209.
- [30] 马美荣, 周林艳, 王德斌, 等. 高产四甲基吡嗪芽孢杆菌的筛选及在清香型原酒生产中的应用研究[J]. *酿酒科技*, 2018(7): 104-107. DOI:10.13746/j.njkj.2018163.