

添加不同酒类对红烧牦牛肉香气特征的影响

张思思¹, 彭毅秦², 李丹丹¹, 唐 娅¹, 白 婷³, 朱开宪^{2,3*}

(1.四川旅游学院 烹饪与食品工程学院, 四川 成都 610100; 2.四川旅游学院 烹饪科学四川省高等学校重点实验室, 四川 成都 610100; 3.肉类加工四川省重点实验室, 四川 成都 610100)

摘 要:为探究经不同酒烹煮后的红烧牦牛肉挥发性风味物质的变化规律,通过添加黄酒、啤酒、白酒和红酒4种酒烹煮红烧牦牛肉,以未添加酒的烹煮牦牛肉作为对照,利用电子鼻、气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)等技术分别测定5种红烧牦牛肉的挥发性风味物质,对结果进行主成分分析(PCA)及正交偏最小二乘-判别分析(OPLS-DA),并结合感官评价解析红烧牦牛肉香气特征差异。结果表明,5种红烧牦牛肉样品通过GC-IMS分析共检出47种挥发性风味物质,其中包括酯类17种、醇类9种、酮类8种、醛类5种、酸类3种、吡嗪类3种、烯腈类2种。电子鼻分析结果表明,四种酒类处理后的红烧牦牛肉样品之间差异较小,但均与对照差异较大。感官评价结果表明,白酒组红烧牦牛肉的色香味更好,处理效果更明显。通过变量投影重要性(VIP)值共筛选出8种差异风味物质(VIP>1),苯甲酸甲酯、丁醇、1-戊醇等风味物质为不同酒类处理后牦牛肉的关键差异风味物质。

关键词:青海牦牛肉;不同酒类;挥发性风味物质;电子鼻;气相色谱-离子迁移谱;感官评价

中图分类号:TS201.1 文章编号:0254-5071(2025)08-0176-08 doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2025.08.026

引文格式:张思思,彭毅秦,李丹丹,等.添加不同酒类对红烧牦牛肉香气特征的影响[J].中国酿造,2025,44(8):176-183.

Effect of different alcoholic drinks addition on the aroma characteristics of braised yak meat

ZHANG Sisi¹, PENG Yiqin², LI Dandan¹, TANG Ya¹, BAI Ting³, ZHU Kaixian^{2,3*}

(1.College of Culinary and Food Science Engineering, Sichuan Tourism College, Chengdu 610100, China;
2.Sichuan Key Laboratory of Culinary Science, Sichuan Tourism College, Chengdu 610100, China;
3.Sichuan Key Laboratory of Meat Processing, Chengdu 610100, China)

Abstract:In order to explore the changes of volatile flavor substances in braised yak meat cooked by different alcoholic drinks, braised yak meat was cooked by adding four kinds of alcoholic drinks, including *Huangjiu*, beer, *Baijiu* and wine. Using the cooked yak meat without adding the alcoholic drink as the control, the volatile flavor substances of 5 kinds of braised yak meat were determined by electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). The results were analyzed by principal component analysis (PCA) and orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA), and the differences in aroma characteristics of braised yak meat were analyzed by sensory evaluation. The results showed that a total of 47 volatile flavor substances were detected in 5 kinds of braised yak meat samples by GC-IMS, including 17 esters, 9 alcohols, 8 ketones, 5 aldehydes, 3 acids, 3 pyrazines and 2 nitriles. The results of electronic nose analysis indicated that the differences among the 4 kinds of braised yak meat samples treated with the different alcoholic drinks were relatively small, but all showed significant differences to the control. The results of sensory evaluation showed that the color and aroma of braised yak meat in the *Baijiu* groups were better, and the treatment effect was more obvious. A total of 8 differential flavor substances (VIP>1) were screened by variable importance in projection (VIP) value. The flavor substances such as methyl benzoate, butanol and 1-pentanol *Baijiu* were the key differential flavor substances in yak meat after treatment with the different drinks.

Key words:Qinghai yak meat; different alcoholic drinks; volatile flavor component; electronic nose; gas chromatography-ion mobility spectrometry; sensory evaluation

红烧牛肉是我国传统菜肴,风味独特,深受人们的喜爱^[1],取青海牦牛肉牛腩部分,以食盐、老抽、酱油、料酒、菜籽油、干辣椒以及葱、姜、蒜等为调料制成,因其口味浓郁、营养丰富、色泽诱人而深受人们的喜爱。但牦牛肉伴有一定的膻味,主要来源是支链脂肪酸,4-甲基辛酸等物质,长链

烯醛类物质,如(*E*)-壬烯醛等物质,在制作红烧牦牛肉时常用的脱膻的方式有添加料酒、香辛料等,而牛肉膻味的主要研究方法有气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)、智能感官及高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)等。

收稿日期:2025-04-09

修回日期:2025-07-09

基金项目:四川省自然科学基金(2022NSFSC1763);教育部产学研合作协同育人项目(241203242180007);固态发酵资源利用四川省重点实验室项目(2021GTY02);四川旅游学院校级科研资助项目(2024SCYUZZ01);四川旅游学院校级科研资助项目(2024SCTUBZK02);肉类加工四川省重点实验室开放基金科研项目(22-R-06)

作者简介:张思思(2003-),女,本科生,研究方向为食品检测。

*通讯作者:朱开宪(1984-),女,副教授,硕士,研究方向为食品科学。

料酒在食品行业和烹饪行业中广泛使用,随着现代社会经济的发展和人们生活水平的提高,大众对料酒的品质需求也随之增加^[9]。近几十年来,啤酒、红酒、白酒和黄酒等均能用作料酒,使烹饪的菜肴口味更加鲜美,但市场上的料酒主要是以黄酒为主,对于使用红酒、啤酒以及白酒来调味的相对较少,但不同酒本身都有着特殊的芳香与风味,在烹调中也经常用来为菜品调味^[4]。红酒可在畜肉、野味等的烹调中作为料酒^[9];白酒中所含有较高的乙醇利用相似相溶的原理能使肉类中具有腥味的蛋白和胺类物质挥发掉,且不破坏肉的蛋白和酯类,达到去腥、调香和防腐的目的^[9],因此可在香肠、畜肉等的烹调中作为料酒;而啤酒因为其独特的苦味和香味,经过啤酒腌制的肉制品,具有淡淡的啤酒香,且滋味独特^[7],大都在海鲜食品、畜肉等的烹饪中作为料酒^[8];黄酒是作为我国历史上烹饪时使用的最多的料酒,具有口感清爽、营养丰富和香气浓郁的特点^[9]。

为探究不同酒类处理后红烧牦牛肉气味特征的变化,通过添加黄酒、啤酒、白酒和红酒4种酒烹煮红烧牦牛肉,以未添加酒的烹煮牦牛肉作为对照,利用电子鼻、气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)等技术分别测定5种红烧牦牛肉的挥发性风味物质,对结果进行主成分分析(principal component analysis, PCA)及正交偏最小二乘-判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA),结合感官评价解析红烧牦牛肉香气特征差异,旨在确定红烧牦牛肉加工工艺参数,为红烧牦牛肉品质提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

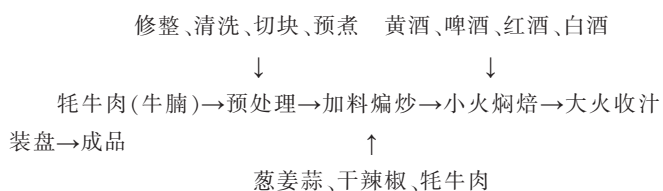
牦牛肉(牛腩,产地为青海):京东商城;金龙鱼菜籽油;益海嘉里金龙鱼粮油股份有限公司;半甜型黄酒(酒精度10%vol,产地为浙江绍兴)、啤酒(熟啤)(酒精度9%vol,产地为山东青岛)、酱香型白酒(酒精度53%vol,产地为四川泸州)、红酒(干红)(酒精度12%vol,产地为山东烟台):市售;生姜、辣椒、小葱、川晶加碘食用盐、海天老抽王、海天上等蚝油、千禾零添加酱油:永辉超市。

1.2 仪器与设备

FlavourSpec®气相离子迁移谱仪:德国G.A.S公司;FOX 4000电子鼻:法国Alpha MOS公司;BT423S型电子天平:德国赛多利斯公司;MC-HX2227电磁炉:美的集团股份有限公司;MXT-WAX色谱柱:美国RESTEK公司。

1.3 方法

1.3.1 红烧牦牛肉加工工艺流程及操作要点



操作要点:

原料选择:选择健康状况佳、经过检验确认质量合格,且肥瘦比例适宜的牦牛肉牛腩作为原料,所有的辅料均满足国家标准的各项要求。

修整:精准地清理掉牦牛腩上不必要的脂肪和杂质。

清洗:洗去淤血等杂质,沥干。

切块:将1 000 g牦牛肉平均分为5份,每次取一份进行实验,将牦牛肉切成2 cm×2 cm方形的肉块。

预煮:先把切好的牦牛肉放入适量的水中预煮,在清除肉沫后捞出牦牛肉,让其沥干,将浸过牦牛肉的开水存留好,以便后续需要时使用。

加料煸炒:设定煸炒温度为160℃,倒入适量菜籽油,当油沸腾后,加入食盐、葱、姜、蒜和干辣椒进行煸炒爆香,接着放入已经预煮好的牦牛肉,继续煸炒5 min左右。

小火焖焙:把浸过牦牛肉的开水加入锅内,分别添加30 mL、120 mL、8 mL、35 mL黄酒、啤酒、白酒、红酒^[10-13],再放入少许蚝油和老抽,把温度调整到100℃后,开始焖焙,整个焖焙过程持续60 min。

大火收汁装盘:牦牛肉达到软嫩酥烂的程度后,对烹饪温度进行调整,让汤汁在持续加热的过程中慢慢收浓,待汤汁稠度符合预期,便将牛肉连同汤汁一起盛出装盘,即得红烧牦牛肉成品。

1.3.2 感官评价

红烧牦牛肉样品采用定量描述分析法(quantitative descriptive analysis, QDA)进行感官评价^[10]。将制作好的红烧牦牛肉置于干净的烧杯中,经过分类编号后交予有感官评鉴知识储备的专业人员(共10人,男女对半)进行品鉴,分别从成品的香气、色泽及异味3个方面进行评价打分,满分100分。结合本实验情况,红牦牛肉烧感官评分标准见表1^[13]。

表1 红烧牦牛肉感官评分标准
Table 1 Sensory evaluation standards of braised yak meat

项目	评分标准	感官评分/分
香气 (45分)	无肉味和酱香味	1~10
	有肉味,酱香味较淡	15~30
	肉味和酱香味充足	30~45
色泽 (25分)	呈浅灰色,无光泽感	1~5
	呈棕红色,稍有光泽	6~15
	呈酱红色,有光泽	16~25
异味 (30分)	有明显焦味,难以忍受	1~10
	略带焦味,可以接受	11~20
	无异味	21~30

1.3.3 挥发性风味物质GC-IMS分析

样品前处理:以未添加酒的烹煮牦牛肉作为对照组,分别添加黄酒、啤酒、白酒和红酒4种酒烹煮红烧牦牛肉,精

准称量2.00 g样品,每组样品进行3次平行实验,放入20 mL顶空进样瓶中。

GC-IMS 条件:MXT-WAX 色谱柱(30 m×0.53 mm×2.00 μm);柱温 60 ℃;分析时长30 min;载气/漂移气氮气为纯度99.999%以上的氮气(N₂);漂移气流速150 mL/min;漂移管温度45 ℃;IMS 温度45 ℃;孵化转速500 r/min;进样体积500 μL;孵育温度50 ℃;孵育时间15 min;载气流量为初始流速2 mL/min,保持0~2 min;2~5 min 线性升至10 mL/min;10~15 min 线性升至15 mL/min;15~20 min 线性升至50 mL/min;20~30 min线性升至100 mL/min。

定性定量方法:使用C₄~C₉正酮标准品,基于Flavor Spec物质图谱进行分析。借助仪器配套的Laboratory Analytical Viewer软件与Library Search软件,通过比对美国国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)和信息管理系统(Information Management System, IMS)数据库,对挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)进行定性鉴定;并依据峰信号值强度,利用quantification方法开展半定量分析。

1.3.4 电子鼻分析

电子鼻分析条件:准确称量不同红烧牦牛肉样品2.00 g,移至10 mL顶空进样瓶中,密封,进行电子鼻测定。顶空加热温度60 ℃,加热时间300 s,载气流量150 mL/min,进样量(顶空气体)500 μL,数据采集时间120 s,数据采集延迟180 s。

表2 电子鼻传感器名称及其性能		
Table 2 Name and performance of electronic nose sensor		
序号	传感器名称	敏感物质类型
1	LY2/LG	氯、氟、氮氧化物、硫化物
2	LY2/G	氨、胺类化合物、氮氧化物
3	LY2/AA	乙醇、丙酮、氨
4	LY2/Gh	氨、胺类化合物
5	LY2/gCT1	硫化物
6	LY2/gCT	丙烷、丁烷
7	T30/1	极性化合物、氯化氢
8	P10/1	非极性;碳氢化合物、氨、氯
9	P10/2	非极性;甲烷、乙烷
10	P40/1	氟、氯
11	T70/2	甲苯、二甲苯、一氧化碳
12	PA/2	乙醇、氨水、胺类化合物
13	P30/1	碳氢化合物、氨、乙醇
14	P40/2	氯、硫化氢、氟化物
15	P30/2	硫化氢、酮
16	T40/2	氯
17	T40/1	氟
18	TA/2	乙醇

1.3.5 数据处理分析

GCxIMS Library Search 软件内置的NIST数据库和 IMS 数据库可对挥发性风味物质进行定性分析,通过与数据库匹配可确定单体、二聚体^[14]。用 GalleryPlot 插件进行指纹图谱对比,直接比较不同样品间存在的挥发性风味物质差异^[15]。感官评价直方图,电子雷达图,主成分分析,数据归一化处理及制图均采用Origin 2021 软件,采用SPSS26.0进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同酒类添加对红烧牦牛肉感官品质影响

由图1可知,不同处理红烧牦牛肉样品的感官评分为62.5~90.0分,由高至低为:白酒组>红酒组>黄酒组>啤酒组>对照组。白酒组红烧牦牛肉样品的感官评分最高(86.5分),表明用白酒对牦牛肉进行处理后,牦牛肉色香味更好,处理效果明显。除对照组外,啤酒组红烧牦牛肉样品的感官评分最低(70.13分),表明在添加酒类处理牦牛肉过程中,啤酒对红烧牦牛肉感官品质效果相对较差。

2.2 电子鼻测定不同酒处理后的四种牦牛肉的风味物质

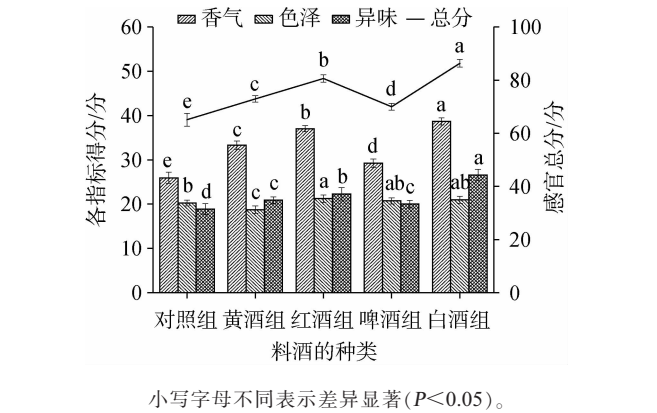
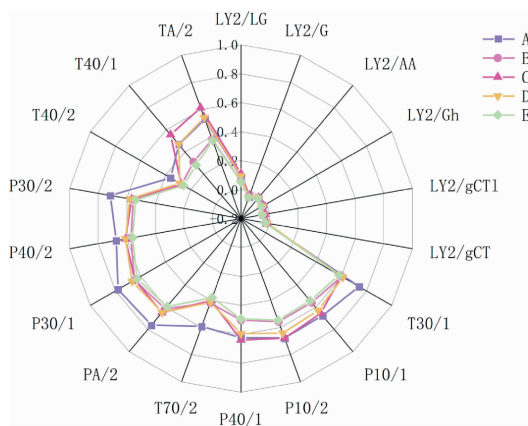


图1 不同酒类处理红烧牦牛肉样品感官评价结果
Fig. 1 Sensory evaluation results of braised yak meat samples with different alcoholic drinks treatment

2.2.1 不同酒处理的牦牛肉样品风味雷达指纹图谱分析

电子鼻的18个传感器对气味的敏感程度都不同,采用电子鼻对不同酒处理后的红烧牦牛肉样品进行风味轮廓分析,结果见图2。由图2可知,电子鼻对不同酒类处理的牦牛肉中不同挥发性物质均有响应,并且响应强度各不相同,所以运用电子鼻对牦牛肉样品进行风味检测与分析具有可行性。由图2可知,PA/2、P30/1、P40/2、p30/2传感器的响应强度均高于其他14个传感器。其中黄酒组红烧牦牛肉样品和白酒组红烧牦牛肉样品的响应强度与其他样品相比,相对较高。说明黄酒组和白酒组红烧牦牛肉样品中含有的碳氢化合物、氨、乙醇、乙醇、氨水、胺类化合物等挥发性风味物质的种类和含量较高。LY2/G、LY2/AA、LY2/Gh、LY2/gCT 传感器对应敏感物质如氮氧化物、硫化物、丙酮、丙烷

和丁烷等的响应值较低,5个样品之间差异也不明显。因此,由电子鼻分析结果得知,黄酒和白酒对红烧牦牛肉气味特征影响较大,增强了红烧牦牛肉的香气物质,因此黄酒组红烧牦牛肉样品风味较好。



A为黄酒组;B为红酒组;C为啤酒组;D为白酒组;E为对照组。下同。

图2 不同处理红烧牦牛肉样品风味电子鼻分析响应值雷达图

Fig. 2 Radar chart of response values for flavor of braised yak meat samples with different treatment by electronic nose analysis

2.2.2 不同酒处理的牦牛肉样品电子鼻分析结果主成分分析

为了更直观的比较不同种类的酒对红烧牦牛肉处理后,其整体风味之间存在的差异,通过Origin 2021软件对红烧牦牛肉样品电子鼻检测结果进行PCA,结果见图3。由图3可知,电子鼻分析第一主成分方差贡献率为96.87%,第二主成分方差贡献率为2.6%,累积方差贡献率之和为99.47%,能够反映红烧牦牛肉样品的主要特征。PCA可以较好的反映牦牛肉样品的主要特征信息以及总体风味轮廓,更加直观的展现出用不同品种的酒类对牦牛肉进行处理后风味成分的明显差异。A、B、E这三种样品分布在X轴下方,分别在第三和第四象限,则说明这四种样品差异显著。而且从图上

还可以更加直观的看出A、B分布在同一象限,E(对照组)单独于一个象限,表明用酒处理后的样品风味成分与未用酒处理的样品间存在显著差异。A、B、C、D样品分布在Y轴左侧,分别分布在第二和第三象限,表示用黄酒、红酒、啤酒和白酒等四种酒类对牦牛肉进行处理后的样品差异来源于第二主成分,而第二主成分仅有2.6%,表明四种酒类处理后的红烧牦牛肉样品之间差异较小,但均与对照差异较大。结果表明,PCA能够有效区分添加不同酒类的红烧牦牛肉。

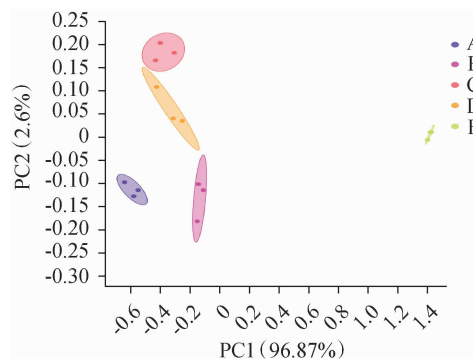


图3 不同处理红烧牦牛肉风味电子鼻分析响应值主成分分析结果

Fig. 3 Principal component analysis results of response values for flavor of braised yak meat samples with different treatment by electronic nose analysis

2.3 GC-IMS测定不同酒处理后红烧牦牛肉的挥发性风味物质

2.3.1 不同酒处理的红烧牦牛肉挥发性风味物质GC-IMS分析指纹图谱

不同酒处理的红烧牦牛肉挥发性风味物质GC-IMS分析指纹图谱见图4,每一行代表一个样品的全部信号峰,每一列代表同一种风味特征物质成分在不同样品中的信号峰,亮点的颜色越深代表挥发性化合物的含量越高,反之代表挥发性化合物的含量越低^[6]。

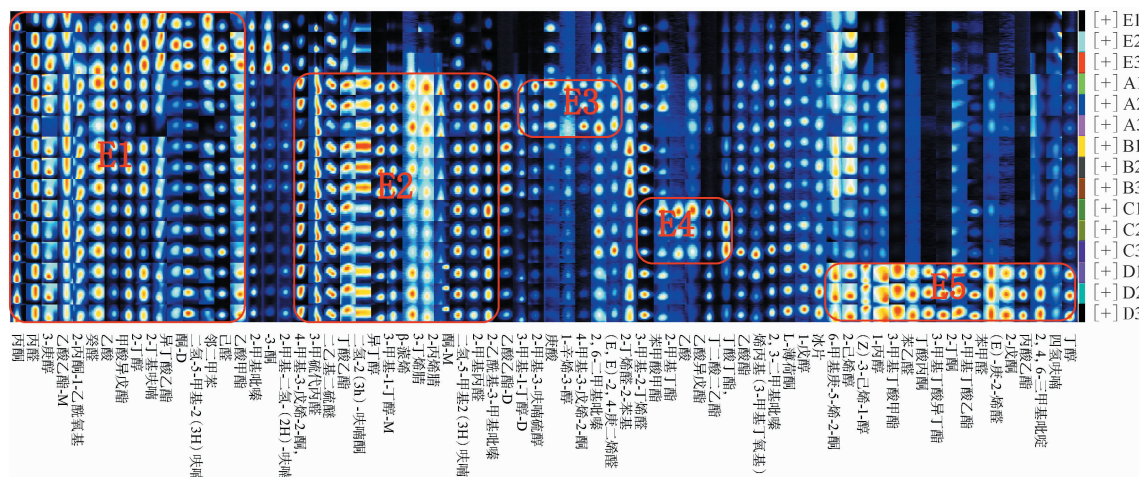


图4 不同处理红烧牦牛肉挥发性风味成分GC-IMS分析指纹图谱

Fig. 4 Fingerprints of volatile flavor components for flavor of braised yak meat samples with different treatment analysis by GC-IMS

由图4可知,不同样品的特征物质种类及浓度差异,E1区域是不同酒处理后共有的且差异较小的物质成分,主要包括丙酮、丙醛和3-庚醇等;E2区域是对照样品含量较少但其他四个样品含量相对较多的成分,主要包括3-甲硫代丙醛、二乙基二硫醚、丁酸乙酯和2H-2(3H)-呋喃酮等;E3区域则是样品A含量较高的挥发性风味物质,样品B含量较少而其他样品没有的挥发性风味物质,主要有2-甲基-3-呋喃硫醇、庚酸以及1-辛烯-3-醇等;E4区域是样品C含量较多的挥发性风味物质,E5区域是样品D含量较多的挥发性风味物质,其他样品含量较少。由图4亦可知,样品A与样品D的挥发性风味物质含量和种类明显比样品B与样品C高。

2.3.2 不同酒处理对红烧牦牛肉挥发性风味物质影响的GC-IMS谱图对比分析

采用GC-IMS分析不同酒处理红烧牦牛肉中挥发性风味物质,根据二维图谱提供的整体信息区分样本之间挥发性物质的差异^[17]。这些区域点显示出不同的保留时间(Y轴),不同的相对漂移时间(X轴),以及不同信号强度(Z轴),以不加酒的处理作为参考,从中扣除其GC-IMS谱图,原始背景色褪为白色,红色的点表示挥发性成分的含量高于参照样品,蓝色的点则表示低于参照样品^[18]。

不同酒处理对红烧牦牛肉挥发性风味物质影响的GC-IMS谱图见图5。三维地形图初步分析红烧牦牛肉挥发性化合物的浓度,提供一个偏差视觉印象^[19]。由图5a可知,不同处理红烧牦牛肉样品在香气方面存在较大差异,表明GC-IMS技术可以用于区分不同样本之间的香气差异。由图5b可知,5个样本之间差异点大多数在保留时间为200~1 400 s之间的化合物,离子保留时间在0.5~1.0 ms之间。4种酒类

处理对红烧牦牛肉中挥发性风味物质影响差异不明显。

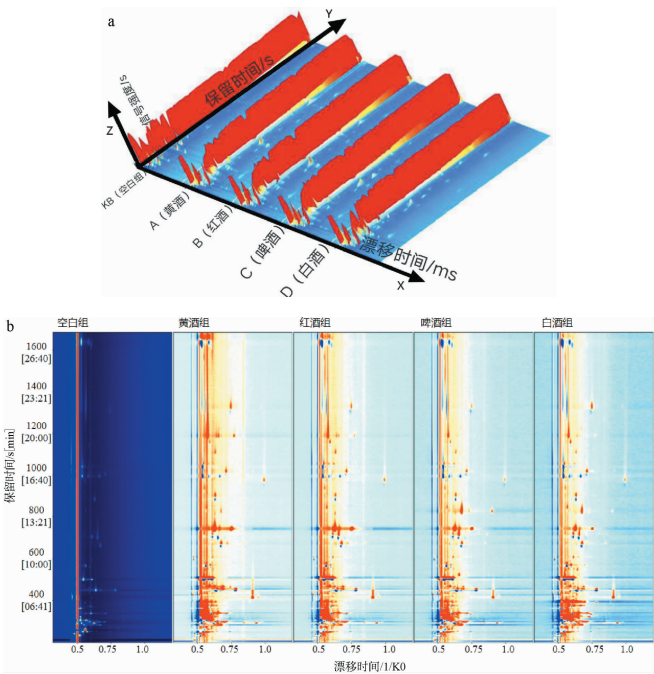


图5 不同处理红烧牦牛肉样品挥发性风味物质GC-IMS分析三维(a)及二维差异(b)谱图

Fig. 5 Three-dimensional (a) and two-dimensional differential (b) spectra of volatile flavor components of braised yak meat samples with different treatment analysis by GC-IMS

2.4 挥发性风味物质定性及定量分析

采用保留时间(retention time, RT)和离子迁移时间对挥发性风味化合物进行定性分析,利用IMS系统峰体积进行定量分析^[20],结果见表3。一些化合物可以以二聚体或三聚体的形式存在,从而产生部分信号峰^[21]。

表3 不同酒类处理红烧牦牛肉的挥发性风味物质测定结果
Table 3 Determination results of volatile flavor components of braised yak meat with different alcoholic drinks treatments

序号	化合物	保留指数	峰体积				
			对照组(E)	A	B	C	D
酸类	乙酸	1 433.5	8 730.42±779.64b	9 994.47±533.65a	7 196.36±631.02c	5 608.38±305.576d	4 750.19±107.11d
	庚酸	1 074.8	85.25±5.83d	813.14±281.99a	554.63±62.63b	268.05±20.68cd	333.03±22.99bc
	丁酸	819.9	37.14±2.50b	121.13±6.91a	70.07±2.19b	158.13±51.62a	42.77±2.93b
	1-辛烯-3-醇	1 433.5	926.50±119.31a	1 090.82±217.94a	601.71±89.99b	415.31±19.26b	376.87±6.75b
	1-戊醇	1 216.5	652.61±94.31ab	642.87±87.54ab	546.54±23.91b	649.67±50.60ab	787.79±94.48a
醇类	甲基1-丁醇D	1 176.0	200.12±9.55c	2 604.24±409.37a	2 694.38±286.71a	1 188.63±191.48b	1 059.65±119.15b
	3-甲基1-丁醇	1 176.0	354.45±32.93c	5 526.22±370.80a	5 637.79±232.28a	3 881.28±293.17b	3 619.71±210.92b
	丁醇	1 117.1	191.30±24.62c	309.33±34.12b	262.34±18.78b	282.50±0.52b	930.94±35.71a
	丙醇	1 024.0	315.05±251.95d	1 142.64±194.02b	999.10±46.36bc	753.30±91.37c	2 808.22±49.25a
	异丁醇	1 091.9	350.33±3.23d	1 018.06±108.48b	1 352.08±122.65a	671.06±31.57c	1 098.62±27.66b
吡嗪类	2-丁醇	1 010.1	43.57±11.72b	57.16±4.68b	45.34±4.55b	51.62±3.23b	496.42±24.61a
	3-庚醇	900.7	986.29±237.04a	889.36±576.04a	1 163.56±44.83a	885.87±44.83a	1 156.51±44.83a
	2,3-二甲基吡嗪	1 336.1	765.66±51.58a	1 443.86±340.40a	1 275.99±77.56a	1 522.36±918.42a	1 334.42±477.89a
	2,6-二甲基吡嗪	1 294.7	250.72±24.05b	914.65±215.22a	395.02±27.41b	219.82±23.47b	322.34±34.45b
	2-甲基吡嗪	1 256.1	2 807.51±284.80a	1 585.76±205.72b	1 737.93±213.54b	1 670.78±89.73b	1 700.47±41.59b

续表

序号	化合物	保留指数	峰体积				
			对照组(E)	A	B	C	D
酯类	3-甲基丁氧基乙酸酯	1 244.1	597.30±71.32b	1 130.85±140.20a	1 097.78±90.51a	1 103.47±379.94a	1 039.02±82.74a
	苯甲酸甲酯	1 091.3	1 371.44±62.35e	2 468.99±122.16c	3 991.74±122.16a	1 975.67±183.36d	3 460.82±143.56b
	甲酸异戊酯	1 070.6	3 356.17±445.94a	2 501.38±780.60b	2 743.59±58.88ab	2 885.48±225.26ab	2 714.32±69.32ab
	甲基丁酸甲酯	1 022.9	124.23±10.62d	570.50±116.31b	405.17±24.32c	342.14±34.76c	1 305.74±1.97a
	异丁酸乙酯	982.7	1 553.510 3±223.153 52a	658.881 6±30.579 85c	699.583±22.556 48c	915.56±43.46b	989.16±11.57b
	乙酸异戊酯	1 097.4	62.46±5.90b	71.25±12.32b	87.03±4.35b	344.20±84.88a	121.36±4.01b
	丁酸丙酯	1 107.5	55.67±12.08b	47.90±8.14b	42.62±2.07b	55.07±6.19b	252.51±26.74a
	异丁基3-甲基丁酸酯	1 023.3	39.70±2.33b	51.57±29.27b	38.80±3.06b	39.76±3.78b	682.07±39.51a
	2-甲基丁酸乙酯	1 010.3	94.80±9.03c	178.20±18.31b	162.72±17.41b	177.74±7.96b	478.58±19.03a
	乙酸乙酯	871.7	1 019.88±45.95d	5 575.02±568.26ab	3 438.52±58.26c	6 169.86±995.80a	4 856.20±171.45b
	2-甲基丁酯	884.0	184.84±40.56a	367.28±237.62a	273.59±8.28a	437.49±150.18a	357.31±34.06a
	乙酸甲酯	858.3	297.51±110.38a	252.15±12.08ab	254.71±11.36ab	186.55±12.20b	301.43±7.57a
	乙酸乙酯	866.3	552.87±59.72ab	542.09±33.31ab	625.96±7.03a	564.4003±68.36ab	532.02±6.50b
	丙酸乙酯	94.313 71	61.71±2.05b	59.62±11.26b	56.90±2.31b	63.41±8.82b	624.95±32.21a
	丁酸乙酯	94.475 6	409.36±104.39b	553.87±127.63a	582.81±14.36a	630.54±22.83a	597.38±21.86a
	丁基丁酸酯	1 197.3	408.57±34.26b	972.53±291.64b	381.10±23.64b	2 465.94±1036.79a	2 113.68±179.38a
	丁二酸二乙酯	1 167.9	613.09±95.49b	575.47±133.33b	1 185.89±279.79b	3 204.48±989.09a	1 157.60±242.67b
酮类	2-甲基-二氢-(2H)-呋喃-3-酮	1 243.6	3 895.86±887.23a	812.67±44.99b	1 103.25±32.74b	705.12±31.00b	770.90±15.31a
	二氢5-甲基2(3H)呋喃酮-M	989.9	896.66±987.08d	4 776.24±544.60a	3 205.79±267.86b	2 109.31±122.46c	3 010.91±93.06bc
	二氢5-甲基2(3H)呋喃酮-D	980.0	643.14±242.38b	398.40±46.04b	425.56±10.24b	619.52±94.11b	951.74±110.79a
	二丁酮	890.5	3 713.16±334.81a	1 777.03±1344.86b	3 140.66±214.37a	1 488.41±328.92b	3 023.88±289.18a
	丙酮	816.4	13 151.61±868.79c	1 3121.67±625.62c	14 181.41±162.20b	11 828.92±421.58d	15 907.78±229.27a
	二氢-2(3h)-呋喃酮	910.7	326.14±79.16b	551.27±176.62a	654.06±12.77a	641.40±25.03a	666.69±20.16a
	6-甲基庚-5-烯-2-酮	1 285.4	281.59±28.63c	391.63±72.32b	493.63±48.07b	403.35±33.47b	661.42±77.44a
	1-乙酰氧基-2-丙酮	879.3	815.36±25.47a	785.17±277.35a	982.68±8.93a	953.29±62.52a	822.30±24.02a
烯腈类	3-丁烯腈	1 200.9	218.97±154.60a	342.35±18.21a	275.73±37.78a	233.04±26.67a	339.14±18.21a
	2-丙烯腈	1 001.6	68.82±20.99c	177.52±16.68a	143.27±9.57b	163.93±19.06ab	169.02±7.78ab
	己醛	1 070.2	1 914.32±667.20a	1 416.13±813.73a	1 404.24±63.67a	1 565.61±274.41a	1 349.29±69.85a
醛类	(E,E)-2,4-庚二烯醛	1 009.7	354.21±73.29c	557.51±82.04a	419.41±18.59bc	520.60±36.72ab	493.50±21.98ab
	苯甲醛	968.6	60.55±2.27c	78.03±16.65c	52.15±6.39c	128.99±46.03b	323.51±26.89a
	(E)-庚-2-烯醛	947.9	38.02±25.30c	96.80±15.64b	38.85±2.12c	80.66±12.24b	378.37±9.25a
	2-甲基丙醛	797.3	94.88±27.17b	178.44±36.08a	186.80±9.52a	217.84±8.57a	203.04±7.03a

注:不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

由表3可知,通过GC-IMS系统内置的NIST和数据库对检出的物质进行鉴定,共识别出47种挥发性风味物质,其中酯类17种、醇类9种、酮类8种、醛类5种、酸类3种、吡嗪类3种、烯腈类2种。白酒组共检出44挥发性风味物质,其中酯类10种、醇类7种、酮类6种、醛类6种、酸类1种、吡嗪类1种、烯腈类3种;黄酒组共检出35种挥发性风味物质,其中酯类6种、醇类5种、酮类6种、醛类7种、酸类2种、吡嗪类2种、烯腈类4种;啤酒组共检出34种挥发性风味物质,其中酯类11种、醇类4种、酮类5种、醛类5种、酸类2种、吡嗪类1种、烯腈类3种;红酒组共检出30种挥发性风味物质,其中酯类7种、醇类4种、酮类5种、醛类6种、酸类1种、吡嗪类1种、烯腈类3种。结果

表明,酯类、醇类、酮类、醛类及酸类物质是赋予红烧牦牛肉独特风味的主要物质。

不同酒处理5个红烧牦牛肉样品各类别挥发性风味物质含量见图6。酮类物质主要由来自脂肪酸的自动氧化和革兰氏阴性菌对脂质的水解作用^[2]。由图6可知,共检出8种酮类物质,在对照组含量最高(峰体积25 815.637),然后依次是啤酒组、黄酒组、红酒组、白酒组,峰体积最低为18 749.32。

酯类物质是不同酒处理后牦牛肉中种类最丰富的挥发性化合物,酯类物质主要由醇和酸通过非酶催化的酯化反应以及微生物作用下的酶催化酯化反应产生^[2]。由图6

可知,共检出17种酯类物质,其含量由高至低依次为对照组>白酒组>红酒组>啤酒组>黄酒组,峰体积最高为21 584.19,最低为10 803.096。

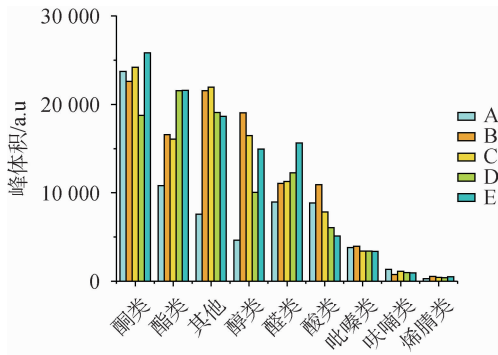


图6 不同酒类处理红烧牦牛肉各类挥发性风味物质峰体积
Fig. 6 Peak volume of various categories volatile flavor components in braised yak meat samples with different alcoholic drinks treatments

醇类物质来源广泛,包括碳水化合物发酵、甲基酮还原、氨基酸代谢和脂质氧化^[24]。由图6可知,共检出10种醇类物质,其含量由高至低依次为红酒组>啤酒组>对照组>白酒组>黄酒组,峰体积最高为19 053.06,最低为4 650.32。结果表明,啤酒对抑制脂肪酸氧化的效果更好,黄酒对脂肪酸氧化的抑制效果相对较差。

醛类物质的产生与脂质氧化和微生物的氨基酸代谢有关^[25]。醛类物质的含量与风味可接受度成反比,脂质的过度氧化可引起以己醛为主的醛类物质大量增加,形成腐臭味^[26]。由图6可知,共检出5种醛类物质,其含量由高至低依次为白酒组>啤酒组>红酒组>黄酒组>对照组。添加不同酒类后,醛类物质含量明显下降,以黄酒最为明显,说明添加不同酒类能抑制牦牛肉脂质氧化。

酸类物质主要在炖煮过程中产生,由图6可知,在样品中仅检测出乙酸、庚酸及丁酸三种酸类物质,并且酸类物质在五个样品中的差异相对较小,说明酒类的添加可能对酸类物质的影响较小。

2.5 OPLS-DA模型分析

正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)是具有监督、高效,能够对复杂数据进行降维、可视化判别的分析方法^[27],为进一步的探究不同处理红烧牦牛肉后的风味差异,通过以挥发性风味物质为因变量,不同的酒类作为自变量,进行OPLS-DA、模型置换检验、聚类分析及基于OPLS-DA分析不同处理红烧牦牛肉挥发性风味物质变量投影重要性值,结果见图7。OPLS-DA主成分图搜集到所有样本信号值在Hotelling T²区间内,总的分数达到95%,说明该模型能很好地反应不同样本之间的差异^[30]。由图7a可知,5个样本分布在4个象限,其中A样本在第三象限,B样本在第一、三象限,C样本在第二象限,E样本在第四象限。结果表明,PLS-DA能有效区分不同处理红烧牦牛肉样品。

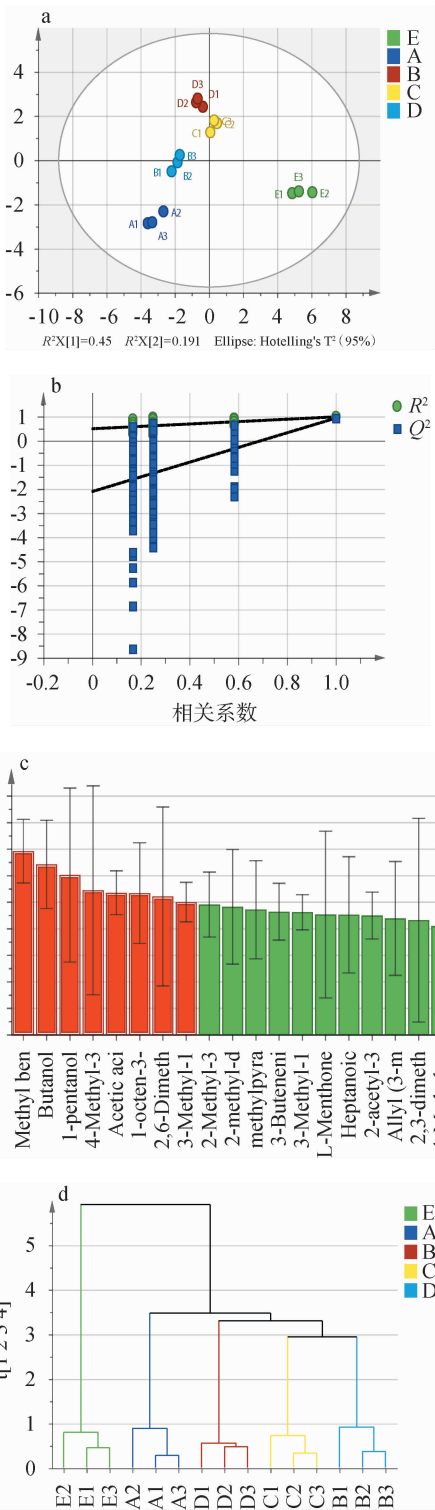


图7 不同酒类处理红烧牦牛肉挥发性风味物质正交偏最小二乘判别分析 (a),置换检验结果(b),变量投影重要性值(c)及聚类分析(d)
Fig. 7 Orthogonal partial least squares–discriminant analysis (a), permutation test result (b), variable important in the projection values (c) and cluster analysis (d) of volatile flavor components of braised yak meat with different alcoholic drinks treatments

由图7b可知,通过交叉验证方差分析,对模型各指标进行200次置换检验。自变量拟合指数 $R^2X=0.979$,因变量拟合指

数 $R^2Y=0.979$,模拟预测指数 $Q^2=0.908$, Q^2 的回归截距-2.256且未超过0.5,表示模型未出现过拟合现象^[28],说明该模型能够较好地用于不同样本挥发性化合物之间的鉴别分析^[29]。

为获得OPLS-DA模型中不同处理红烧牦牛肉样品差异风味物质,通过计算变量投影重要性来评估筛选出每个变量对样本的影响和解释能力^[30]。变量投影重要性(variable important for the projection, VIP)值越高,差异越显著,说明该挥发性物质对样本有较高的重要性^[32]。以VIP>1为筛选标准,筛选不同处理红烧牦牛肉样品差异风味物质。由图7c可知,一共筛选出8种差异风味物质,其中4种醇类、1种酯类、1种酮类、1种酸类、1种吡嗪类。

聚类分析可以分析样本之间的相似性,按相似度自然聚集分析评价,结果直观科学^[33]。由图7d可知,空白组与其他四种样品的差异最显著,黄酒组和白酒组的差异较小,这与电子鼻和GC-IMS结论相符。

3 结论

本研究采用电子鼻和GC-IMS技术从宏观和微观上对不同种类酒对红烧牦牛肉中的风味特征成分进行分析。由电子鼻结果分析得知,不同烹饪工艺的红烧牦牛肉差异明显,且黄酒组红烧牦牛肉样品风味较好。PCA结果表明,四种酒类处理后的红烧牦牛肉样品之间差异较小,但均与对照差异较大。GC-IMS构建的香气轮廓共识别出47种挥发性香气成分,其中包括17种酯类、9种醇类、8种酮类、5种醛类、3种酸类、3种吡嗪类、2种烯腈类,其中经白酒处理后的红烧牦牛肉的挥发性物质的种类和含量最高。通过变量投影重要性(VIP)值共筛选出8种差异风味物质(VIP>1),经不同酒类处理后,苯甲酸甲酯、丁醇、1-戊醇等风味物质含量逐渐增加,表明醇类物质为不同酒类处理后牦牛肉的关键差异风味物质。本研究建立了不同烹饪方式的红烧牦牛肉挥发性物质指纹图谱,电子鼻和GC-IMS联用可快速直观地对不同烹饪工艺的红烧牦牛肉进行差异分析。可为牦牛肉加工处理方式优化提供可靠依据。

参考文献:

- [1] 尹含靓,肖何,邓高文,等. 基于GC-IMS技术分析不同香辛料水煮液的风味物质组成差异[J]. 食品工业科技, 2021, 42(17): 278-284.
- [2] 崔保威,欧阳远鑫,马杨柳,等. 不同产地秀丽白虾干风味物质GC-IMS指纹图谱分析[J]. 食品工业, 2022, 43(7): 311-315.
- [3] 赵笑颖,秦雅莉,沈圆圆,等. 料酒腌制对油炸罗非鱼风味的变化分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(3): 233-240.
- [4] 刘丽丽,杨辉,荆雄,等. 基于GC-IMS和电子鼻技术分析贮存容器对凤香型白酒香气成分的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 257-263.
- [5] 王丽梅,雷秋琪,钟珍,等. 不同处理方式对花椒提取液及卤鸭脖挥发性风味成分的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 67-75.
- [6] 王福成,米思,李劲松,等. 基于气相色谱-离子迁移谱技术分析不同包装条件对黄瓜风味的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 296-304.
- [7] 王子妍,窦博鑫,贾健辉,等. GC-IMS结合PCA法分析不同焙炒程度留胚米挥发性化合物指纹差异[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 212-218.
- [8] 何晓娜,杨晓玲,王宏博,等. 羊肉冷藏期间蛋白与脂质氧化及风味变化分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 36-42.

- [9] 朱文政,张一凡,沙文轩,等. 添加不同酒对红烧肉水分迁移及食用品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 104-111.
- [10] 李海涛,姚开,贾冬英. 料酒祛羊肉膻味和增香的机理分析[J]. 农业技术与装备, 2010, 204(24): 9-11.
- [11] LOU X W, ZHANG Y B, SUN Y Y, et al. The change of volatile compounds of two kinds of vinasse-cured ducks during processing[J]. *Poultry Sci*, 2018, 97(7): 2607-2617.
- [12] 庞一扬. 阳朔啤酒鱼风味及风味改良即食啤酒鱼工艺研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021, 2021. 001727.
- [13] 周鑫. 红烧牦牛肉加工工艺优化及其品质研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- [14] 刘吟,段丽萍,陈胜,等. 基于气相色谱-离子迁移谱法分析酸角和甜角中挥发性成分差异[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6181-6189.
- [15] 张敏敏,路岩翔,赵志国,等. 气相-离子迁移谱结合化学计量学方法快速区分不同年份酿造白酒[J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 226-232.
- [16] 孟祥春,黄泽鹏,凡超,等. 1-MCP对黄金百香果贮藏品质及风味变化的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 277-281.
- [17] 漆明星,孙明. 电子鼻的发展与应用综述[C]. 鹤壁: 中国畜牧兽医学信息分会第十二届学术研讨会, 2017: 24-28.
- [18] 尹含靓,肖何,邓高文,等. 基于GC-IMS技术分析不同香辛料水煮液的风味物质组成差异[J]. 食品工业科技, 2021, 42(17): 278-284.
- [19] CHRISTMANN J, ROHN S, ROHN P. GC-IMS-TOOLS-a new python package for chemometric analysis of GC-IMS data[J]. *Food Chem*, 2022, 394: 133476.
- [20] ZHANG P Y, MENG N, LIU M, et al. Effects of low temperature plasma treatment on flavor characteristics of raw and cooked brown rice[J]. *Food Sci*, 2021, 42(15): 74-80.
- [21] 周煦成. 基于蚕丝素纤维的气敏传感器开发及检测猪肉新鲜度研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [22] SOLOMANDO J C, ANTEQUERA T, MARTÍN A, et al. Fish oil microcapsules as omega-3 enrichment strategy: Changes in volatile compounds of meat products during storage and cooking[J]. *Foods*, 2021, 10(4): 745.
- [23] 陈媛媛,马凯华,张雨婷,等. 微生物亚硝化抑制剂对风干肠风味物质形成的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 25-36.
- [24] 邓静,罗晶晶,朱开宪,等. 基于电子鼻和气相色谱-离子迁移谱法分析不同等级俄色绿茶香气物质差异[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 236-243.
- [25] MARTÍN GÓMEZ A, RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ P, CARDADOR M J, et al. Guidelines to build PLS-DA chemometric classification models using a GC-IMS method: dry-cured ham as a case of study[J]. *Talanta Open*, 2023, 7: 100175.
- [26] 倪瑞洁,詹萍,田洪磊,等. 基于GC-IMS结合多元统计方法分析炸制时间对花椒调味油挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 279-286.
- [27] 周佳,苏丹,王志霞,等. 基于HS-SPME-GC-MS和多元统计分析三种红茶特征挥发性成分[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 342-350.
- [28] LIU Z J, HUANG Y Q, KONG S S, et al. Selection and quantification of volatile indicators for quality deterioration of reheated pork based on simultaneously extracting volatiles and reheating precooked pork[J]. *Food Chem*, 2023, 419: 135962.
- [29] 秦力悦,石萍萍,李荣辉,等. 基于主成分分析和聚类分析的烘烤类澳洲坚果果仁综合品质评价[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 331-341.
- [30] 李娟. 贵州红酸汤优势菌群及特征风味相关性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [31] 陈德勇,张泽洲,赵珊珊,等. 气相色谱-离子迁移谱法结合多元统计分析方法鉴定不同产地贝母[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(1): 19-26.
- [32] 蔡冰冰,李宁,李成,等. 不同成熟期草莓果实风味指纹图谱构建及差异分析[J]. 河北农业大学学报, 2022, 45(6): 45-52, 80.
- [33] 陈丽兰,杨心怡,乔明峰,等. 基于GC-IMS、GC-MS和OAV法分析花椒粉颗粒度对花椒油挥发性香气成分的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 301-310.