

蔡雨静,张振宇,王彩玲,等.电子鼻、电子舌结合 SPME-GC-MS 对青海玉树牦牛肉挥发性化合物分析[J].食品工业科技,2023,44(16):348-357. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100236

CAI Yujing, ZHANG Zhenyu, WANG Cailing, et al. Application of Electronic Nose, Electronic Tongue Intelligent Detection Combined with SPME-GC-MS in the Identification of Flavor Characteristics of Yushu Yak[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(16): 348-357. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100236

· 分析检测 ·

电子鼻、电子舌结合 SPME-GC-MS 对青海玉树牦牛肉挥发性化合物分析

蔡雨静¹,张振宇¹,王彩玲¹,刘冬梅¹,白婷²,易宇文³,张浩^{1,*}

(1.四川旅游学院烹饪学院,四川成都 610100;

2.肉类加工四川省重点实验室,四川成都 610106;

3.四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)

摘要:为寻找青海玉树牦牛肉挥发性化合物差异,以牦牛前胸、前腿、背部、后腿四个部位为研究对象,采用电子鼻、电子舌智能检测,结合 SPME-GC-MS,对牦牛肉风味、滋味和挥发性物质做主成分(PCA)、聚类(CA)、相关性分析(Pearson)。结果表明:电子舌味觉强度差异明显,表明牦牛肉不同部位滋味差异较大,且样品 HT 滋味优于其他样品。电子鼻主成分分析结果表明 HT、HB、QT 靠近 X 轴,气味特征相似,样品 QX 远离 X 轴与其他样品差异较大。牦牛肉共检测出 57 种挥发性化合物,包括:醛类(12 种)、醇类(11 种)、烃类(11 种)、酸类(5 种)、酮类(3 种)、其他杂类含硫化合物(15 种);其中,苯甲醛、壬醛、2-乙基-1-己醇、间二甲苯、烯丙基甲基硫醚、2-乙酰吡咯在牦牛肉后腿含量都明显区别于其他部位,显示牦牛肉后腿风味与其他部位差异较大。这与电子鼻数据分析相同;研究结果为今后牦牛肉烹饪加工工艺和风味特征辨别提供理论依据和数据参考。

关键词:牦牛肉,电子舌,电子鼻,SPME-GC-MS,挥发性物质,风味

中图分类号:TS201.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2023)16-0348-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100236



本文网刊:

Application of Electronic Nose, Electronic Tongue Intelligent Detection Combined with SPME-GC-MS in the Identification of Flavor Characteristics of Yushu Yak

CAI Yujing¹, ZHANG Zhenyu¹, WANG Cailing¹, LIU Dongmei¹, BAI Ting², YI Yuwen³, ZHANG Hao^{1,*}

(1.Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China;

2.Laboratory of Meat Processing, Chengdu 610106, China;

3.Laboratory of Cooking Science of Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

Abstract: The current study aimed to investigate the difference of volatile compounds in Qinghai Yushu yak. In this experiment, brisket, round, tenderloin, bottom round of yak was taken as the research object, the electronic nose, electronic tongue intelligent detection combined with the solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry method (SPME-GC-MS) to analyze the flavor, the principal component analysis (PCA), the cluster analysis (CA) and correlation analysis (Pearson) of yak meat. The results showed that the taste intensity of electronic tongue was significantly different, the taste of different parts of yak meat was significantly different, and the taste of sample HT was better than that of other samples. The principal component analysis results of electronic nose showed that HT, HB and QT were close to the X axis,

收稿日期: 2022-10-24

基金项目: 肉类加工四川省重点实验室开放基金科研项目(22-R-05);四川省高校重点实验室项目(PRKX2020Z11);四川旅游学院工艺开发与技术支持项目(900201);川菜发展研究中心科研一般项目(CC21Z26);2022年度校级大学生科研项目(2022XKZ03)。

作者简介: 蔡雨静(1999-),女,本科,研究方向:烹饪与营养教育,E-mail: 475329309@qq.com。

* 通信作者: 张浩(1970-),男,本科,讲师,研究方向:食品风味化学,E-mail: 283184500@qq.com。

and the odor characteristics were similar. A total of 57 volatile compounds were detected in yak meat, including aldehydes (12 kinds), alcohols (11 kinds), hydrocarbons (11 kinds), acids (5 kinds), ketones (3 kinds), and other miscellaneous sulfur compounds (15 kinds). Among them, the results of PCA-GC-MS showed the contents of benzaldehyde, nonaldehyde, 2-ethyl-1-hexanol, m-xylene, allyl methyl sulfide and 2-acetylpyrrole in the bottom round of yak were significantly different from those in other parts, indicating that the flavor of bottom round of yak was significantly different from that in other parts which was the same as the results of electronic nose PCA showed that data analysis. The results would provide a theoretical basis and a data reference for the processing technology and flavor characteristic identification of yak in the future.

Key words: yak meat; electronic tongue; electronic nose; solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS); volatile compounds; flavor

青海省牦牛养殖数量位居全国第一, 占我国牦牛总数量 38%^[1]。玉树牦牛生活在海拔 3500 米到 4500 米高原、高山、高寒地区, 属于散养草饲牦牛。草饲牦牛肉高蛋白、低脂肪、营养丰富^[2]。牦牛肉烤制后风味深受消费者喜爱, 但不同部位风味、肉质差异较大, 要寻找最适合烧烤的牦牛肉部位, 需要对牦牛肉不同部位的滋味、气味和风味特征进行研究。

目前, 关于牦牛肉研究大多集中于牦牛肉品质影响因素^[3-4]、牦牛产业发展现状^[5-7]、不同性别牦牛肉营养成分分析^[8-10]、不同地区牦牛肉营养分析^[11-12]等。对于牦牛不同部位的风味研究很少, 特别是气味和滋味研究较少。

食品的风味包括滋味和气味, 常见的食品风味鉴别方法主要是感官评价。目前先进的电子感官智能检测系统包括电子舌(electronic tongue)和电子鼻(electronic nose), 可以模仿人类嗅觉和味觉, 从食物的气味和滋味方面识别样品中整体风味信息^[13-15]。固相微萃取-气质联用(Solid-phase micro extraction, SPME-GC-MS)技术主要检测挥发性化合物, 能够区分不同的风味物质^[16]。电子感官智能系统结合固相微萃取-气质联用技术共同分析食品的风味, 可以综合判别肉类的气味、滋味、化合物风味特征。潘晓倩等采用 GC-MS 的研究表明, 牛肉的特征风味物质主要是醛类、醇类、酮类及烯炔类化合物构成^[17], 刘晓等的研究认为 SPME-GC-MS 具有灵敏度高、抗干扰性强等优点, 可用于萃取、吸附挥发性及半挥发性成分^[18]。对牦牛肉风味化合物的分析, 可以帮助确认烧烤后风味物质来源, 确定相对含量较高的部位, 香味挥发性化合物含量较高的部位就是最适合烧烤的部位。

本研究以牦牛前胸肉、前腿肉、背部肉、后腿肉四个部位为研究对象, 分别采用传统感官评价和 E-tongue、E-nose 智能感官系统, 以及 SPME-GC-MS 检测挥发性化合物, 运用感官评价、主成分分析(PAC)、聚类(CA)、相关性分析(Pearson)等方法, 从牦牛肉风味特征入手, 分析风味物质和滋味数据, 找出影响牦牛肉风味特征的主要化合物, 为今后牦牛肉烹饪加工工艺和风味特征辨别提供理论依据和数据参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

选取自然放牧、发育正常、健康无病、体重相近、年龄在 3 岁左右, 青海玉树地区高原草饲牦牛。取胴体左侧四个部位, 先进行 24 h 低温排酸, 然后真空包装进行 36 h 湿式熟成, 再冷冻到 -18 °C 后运送到实验室, 解冻到室温 25 °C, 剔去筋膜和脂肪, 剁成肉糜待检。样品编号分类见表 1。

表 1 牦牛肉部位样品分类
Table 1 Beef samples from different regions

| 样品编号 | 牛肉部位 | 样品肌肉学名 |
|------|-------------------|--------|
| QX | 前胸肉(Brisket) | 胸横肌 |
| QT | 前腿肉(Round) | 臂肌 |
| HB | 后背肉(Tenderloin) | 腰大肌 |
| HT | 后腿肉(Bottom Round) | 半膜肌 |

BCD-206SM 冰箱 青岛海尔集团; WP-UP-UV-20 去离子水机 四川沃特尔公司; FALLC4N 电子天平 常州市衡正电子仪器有限公司; FOX 4000 电子鼻 法国 Alpha MOS 公司; α -ASTREE 电子舌 法国 Alpha MOS 公司; SQ680+Clarus SQ8T 气质联用仪、色谱柱 Elite-5MS 美国 PerkinElmer; 固相微萃取装置、PC-420D 专用磁力加热搅拌装置、75 μ m CAR/PDMS 手动萃取头 美国 Supelco; 15 mL 顶空瓶 北京谱朋科技有限公司;

1.2 实验方法

1.2.1 感官评价 参考 GB/T 22210-2008《国家肉与肉制品感官评定规范标准》鉴定标准, 随机选取 10 位烹饪营养与教育专业学生组成评定小组, 先期进行感官评价培训, 内容包括: 肉类色泽鉴别、肉类表面粘度鉴别、肉类气味鉴别、肉类横切面组织鉴别。然后在专业感官品评实验室对样品进行感官评价。评分标准见表 2。

1.2.2 电子舌分析 法国产电子舌传感器包括: AHS-Sourcess、PKS、CTS-Saltiness、NMS-umami、CPS、ANS、SCS, 其中 Ag/AgCl 作为参比电极^[19]。传感器 AHS-Sourcess(酸味)、CTS-Saltiness(咸味)、NMS-umami(鲜味)对食品酸、咸、鲜三种滋味可以直接辨别, 而对甜味、苦味、涩味识别, 需要添加标准

表2 鲜牦牛肉感官评分标准

Table 2 Sensory evaluation requirements of fresh yak

| 项目 | 评分标准 | 分值 |
|--------------|--------------------|-------|
| 色泽鉴别(25分) | 牛肉表面有光泽,色泽鲜红 | 17~25 |
| | 牛肉表面色泽感官度低、色泽暗红 | 9~16 |
| | 牛肉表面无光泽、呈灰色 | 1~8 |
| 表面粘度鉴别(25分) | 牛肉表面多汁、光亮,不黏手 | 17~25 |
| | 牛肉表面湿润,微有黏手 | 9~16 |
| | 牛肉表面干燥,黏手 | 1~8 |
| 气味鉴别(25分) | 牛肉嗅闻无膻味,香气正常 | 17~25 |
| | 牛肉嗅闻微有膻味,微有铁腥味 | 9~16 |
| | 牛肉膻味大,气味异味浓郁 | 1~8 |
| 横切面组织鉴别(25分) | 牛肉横切面平整,组织细密,手压不松散 | 17~25 |
| | 牛肉横切面组织松散、手压变形 | 9~16 |
| | 牛肉横切面不平整,组织完全变形 | 1~8 |

品来识别。运用 Alpha MOS 电子舌分析软件,能够获得样品在 0~10 之间的酸、咸、鲜、甜和苦味的相对强度值,利用强度值可对样品在酸、咸、鲜、甜和苦味维度上进行滋味强度排序^[20]。

1.2.2.1 样品处理 参考袁灿的方法^[21]:取四个部位牦牛肉样品剁碎,每个样品取 10.0 g 碎牦牛肉放入烧杯中,然后倒入 100 mL 去离子水充分搅拌,用 50 HZ 超声波浸提 30 min(不加热),取上清液中性滤纸过滤,最后将 80 mL 滤液移至电子舌专用烧杯分别编号待检。

1.2.2.2 分析条件 自动进样,数据采集时间 120 s,采集周期为 1.0 s,采集延迟 10 s,搅拌速度 1 r/s,样品平行检测 5 次,样品间隔 80 mL 去离子水清洗感应器。取 3 次传感器在 120 s 时三个相对稳定数据进行分析^[22]。

1.2.3 电子鼻分析 法国产电子鼻是通过 MXT-5(弱极性)和 MXT-7(中极性)色谱柱分离气味物质,一共由 18 根金属氧化传感器组成,每根传感器对应一类或几类物质敏感^[23],采用氢离子检测器分析色谱信息^[24],完成检测后,即可使用仪器自带数据库对样品挥发性物质进行定性、定量分析。电子鼻传感器性能特点见表 3。

1.2.3.1 样品处理 将四个部位牦牛肉剁碎,分别取 2.00 g 肉末放入 10 mL 顶空瓶中密封,分别编号待检。

1.2.3.2 分析条件 电子鼻设备初始化、校准、诊断。顶空温度 40 °C,顶空加热 300 s;载气流量 150 mL/s;进样量 1.00 mL;进样速度 1.00 mL/s;数据采集时间 120 s;数据采集延迟 180 s;手动进样实验方法。每个样品平行测试 5 次。取 3 次传感器在第 120 s 时获得的稳定信号进行分析。

1.2.4 固相微萃取-气质联用技术(SPME-GC-MS)分析

1.2.4.1 样品处理 分别取四个部位牦牛肉剁细,精确称量 4.00 g 样品,放入 15 mL 顶空进样瓶中,加入 20% NaCl 饱和液进行盐析,密封,编号待检。

1.2.4.2 顶空条件 样品置于磁力搅拌器(60 °C,

表3 电子鼻传感器性能特点

Table 3 Performance characteristics of electronic nose sensor

| 序号 | 传感器名称 | 性能 | 敏感物质类型 |
|----|----------|---------------|-----------|
| 1 | LY2/LG | 对氧化能力较强的气体敏感 | 氯、氟、硫化物 |
| 2 | LY2/G | 对有毒气体敏感 | 氨、胺类化合物 |
| 3 | LY2/AA | 对有机化合物敏感 | 乙醇、氨 |
| 4 | LY2/Gh | 对有毒气体敏感 | 氨、胺类化合物 |
| 5 | LY2/gCTI | 对有毒气体敏感 | 硫化物 |
| 6 | LY2/gCT | 对易燃气体敏感 | 丙烷、丁烷 |
| 7 | T30/1 | 对极性化合物敏感 | 丙醇、氯化氢 |
| 8 | P10/1 | 对非极性化合物敏感 | 碳氢化合物、正辛烷 |
| 9 | P10/2 | 对非极性易燃气体敏感 | 甲烷、正庚烷 |
| 10 | P40/1 | 对氧化能力较强的气体敏感 | 氟、氯、甲基糖 |
| 11 | T70/2 | 对芳香族化合物敏感 | 二甲苯、甲苯 |
| 12 | PA/2 | 对有机化合物、有毒气体敏感 | 乙醛、胺类化合物 |
| 13 | P30/1 | 对可燃气体、有机化合物敏感 | 氨、乙醇 |
| 14 | P40/2 | 对氧化能力较强的气体敏感 | 氯、甲硫醇 |
| 15 | P30/2 | 对有机化合物敏感 | 硫化氢、铜 |
| 16 | T40/2 | 对氧化能力较强的气体敏感 | 氯 |
| 17 | T40/1 | 对氧化能力较强的气体敏感 | 氟 |
| 18 | TA/2 | 对有机化合物敏感 | 乙醇 |

30 min),后将老化(250 °C, 5 min)的 75 μm CAR/PDMS 手动萃取头插入顶空瓶中吸附 30 min,将进样针插入 GC-MS 进样口,解析 600 s。

1.2.4.3 气相条件 进样口温度 250 °C;色谱柱 Elite-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm);升温程序:起始温度 50 °C,保持 2 min,以 3 °C/min,升至 80 °C,以 5 °C/min 升至 120 °C,以 10 °C/min 升至 250 °C,保留 5 min。载气:高纯氦气,流速 1 mL/min,分流比 10:1。

1.2.4.4 质谱条件 EI 离子源,电子轰击能量为 70 eV,离子源温度 230 °C;全扫描,质量扫描范围 30~600 m/z;标准调谐文件。

数据先进行定量、定性分析,检索 NIST 2011 谱库、计算其保留指数,结合人工解析质谱图进行确定,选取正反匹配度>600 的化合物进行判断,采用峰面积归一法计算出相对含量,最后进行归一化处理。

1.3 数据处理

利用 SPSS26、Origin2021、Microsoft Excel 16 进行数据处理和主成分分析、雷达图分析等。其中, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 感官评价结果分析

表 4 感官评价结果表明:HB>HT>QT>QX。感官评价结果平均值差异主要是由于个体嗅闻对评分影响较大。样品 HB 得分最高,但平均差也较大,主要是感官评价人为的对脂肪层风味和色泽喜爱、嗜好差异大;样品 HT 得分其次,但平均差较小,说明认可度均衡,数据真实度强;样品得分最差的是 QX,主要是嗅闻气味得分低,以及色泽和肌肉组织的触感较差。

表 4 牦牛肉感官评分结果
Table 4 Sensory scoring standards for yak meat

| 样品名称 | 横切面照片 | 学名 | 感官描述 | 评分结果 |
|------|-------|--------------------------------|--|---------|
| QX | | 胸横肌(Brisket) 前胸肉 | 色泽: 感官可见颜色暗淡, 光泽度高; 表面: 水分多, 不黏手、光滑; 气味: 嗅闻微有膻味, 且微带铁腥味; 组织: 横切面松散, 组织纤维长, 受压凹陷 | 83±1.26 |
| QT | | 臂肌 (Round) 前腿肉 | 色泽: 感官可见颜色暗淡, 光泽度不高; 表面: 不黏手、光滑, 水分含量较少; 气味: 嗅闻微有膻味; 组织: 横切面松散, 组织纤维细腻; | 85±2.46 |
| HB | | 腰大肌 (Tenderloin) 后背肉 | 色泽: 感官可见颜色鲜红, 光泽度很高; 表面: 不黏手、光滑, 水分含量较少; 气味: 嗅闻无膻味, 香气正常; 组织: 横切面纤维细腻, 含脂肪组织; | 94±3.43 |
| HT | | 半膜肌 (Bottom Round) (后腿肉) | 色泽: 感官可见颜色深红, 光泽度不高; 表面: 不黏手、光滑, 水分含量很少; 气味: 嗅闻无膻味, 香气正常; 组织: 横切面纤维细腻, 不含脂肪组织; | 92±1.13 |

2.2 电子舌分析结果

2.2.1 传感器味觉强弱分析 图 1A 是电子舌味觉信号强度图, 可见酸味强度值(AHS): HT>QX>HB>QT, 且样品 HT 与样品 QT 酸味强度值相差 5.2, 差异显著; 咸味强度值(CTS): QT>HB>HT>QX, 且样品 QT 与样品 QX 咸味强度值相差 4.9, 差异明显; 鲜味强度值(NMS): HT>QX>HB>QT, 且样品 HT 与样品 QT 鲜味强度值相差 4.7, 差异明显。电子舌味觉信号强度差异表明牦牛肉不同部位滋味差异明显。

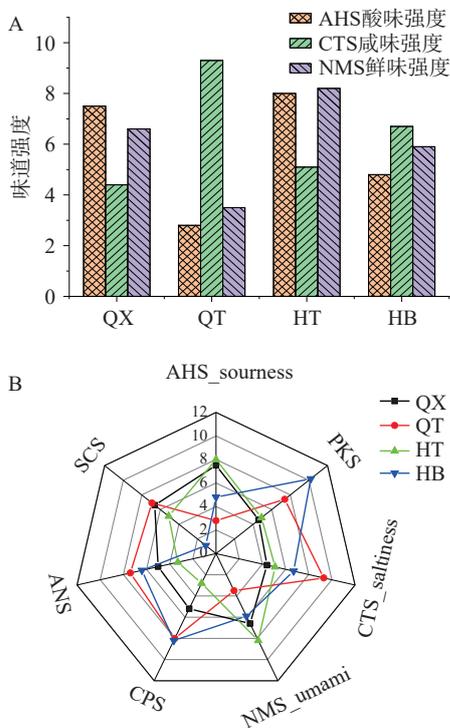


图 1 电子舌味觉强度、雷达图

Fig.1 Taste intensity and radar map of the electronic tongue

样品 QT 咸味强度值高达 9.3, 与其他样品显示出较大差异, 蓬桂华等^[25]的研究表明这可能是高浓

度的水溶性离子型有机物和无机物等咸味贡献物质造成的。样品 HT 鲜味强度数值高达 8.2, 有研究表明, 可能是由于含有较高浓度的核苷酸、氨基酸等鲜味贡献物质^[26], 而氨基酸通过自身热降解和参与美拉德反应两种途径形成一系列挥发性芳香成分^[27], 因此可以判定样品 HT 滋味较好。

2.2.2 电子舌主成分分析 图 2 显示主成分 PC1 贡献率为 73.36%、PC2 贡献率为 22.10%, 表明主成分降维后数据能反映原数据的整体信息, 四个样品分布在四个象限中, 无重叠, 表明样品之间存在较明显差异性。主成分双标图贡献影响因子在图中以线段表示, 越靠近样品所在坐标轴, 说明影响因子对其影响越大。样品 HT 最靠近 X 轴, 且样品 HT 与 QX 相近, 滋味相似; 样品 HB 距离其他样品较远, 位于第四象限, 其滋味差异主要体现在 PC1 上; 结果表明, 电子舌能明显区分四个部位样品, 且样品之间滋味差异明显。

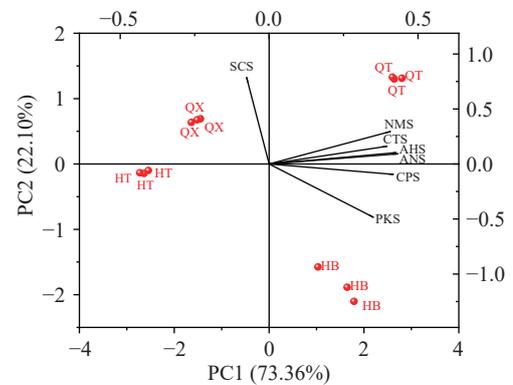


图 2 电子舌主成分双标图

Fig.2 Ballot of principal components of electronic tongue

2.3 电子鼻分析结果

2.3.1 气味指纹图谱分析 四个部位电子鼻气味指纹雷达图 3 表明: 样品 HT 在 P10/1、P10/2、P40/1

与其他样品出现差异, P型传感器一般对极性化合物和非极性化合物敏感; 样品 HT 与 QT 在 T40/2、T40/1、TA/2 区分较为明显, 而 T型传感器对氧化气体和含硫化合物敏感^[28], 说明在含硫化合物含量上样品 HT 与样品 QT 差异较大。孙晓红等的研究认为, 电子鼻在化合物分析上还需结合不同的数据才能将其结果量化^[29], 需要结合 SPME-GC-MS 数据对具体化合物进行研判。

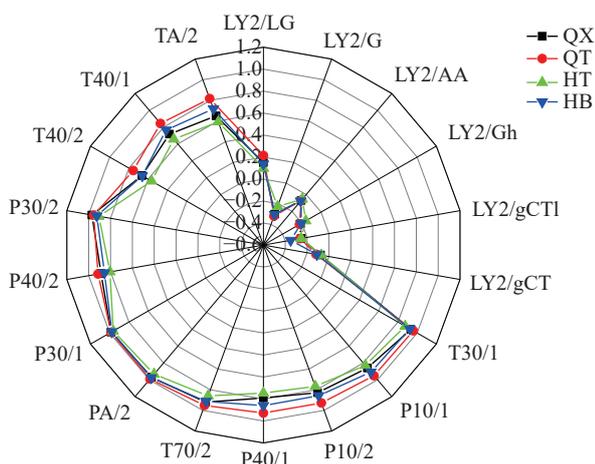


图3 电子鼻指纹雷达图
Fig.3 Electronic nose odor fingerprint

2.3.2 主成分分析 如图4所示: 四个部位样品能够独立区分出来, 说明电子鼻能够辨别样品气味特征, 且 PC1 贡献率为 87.06%、PC2 贡献率为 7.77%, 说明大量有效信息存在于第一主成分。候婷婷等的研究表明当 PC1 远大于 PC2, 说明样品在横坐标距离越大, 其差异性越大^[30]。可以判断, 样品 HT、HB、QT 气味特征相近, 样品 QX 气味特征与其他部位差

异较大。

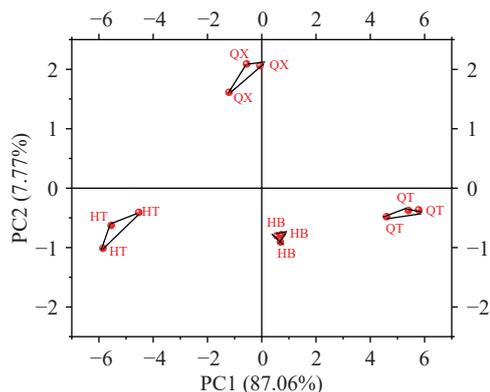


图4 电子鼻主成分图
Fig.4 Electronic nose principal component score chart

2.4 SPME-GC-MS 固相微萃取-气质联用技术结果分析

2.4.1 牦牛肉四个部位样品 SPME-GC-MS 挥发性风味物质检测结果 表5~表6可见, 牦牛肉共鉴定出 57 种挥发性物质, 包括: 醛类(12 种)、醇类(11 种)、烃类(11 种)、酸类(5 种)、酮类(3 种)和其它杂类含硫化合物(15 种); 其样品 QX、QT、HT、HB 分别含有 45、41、49、46 种。其中, 醛类化合物相对含量在 35.350%~54.746%, 可见醛类是牦牛肉风味主体化合物; 醇类化合物相对含量在 9.205%~23.687%、烃类化合物相对含量在 8.105%~25.402%之间, 可见醇类、烃类是牦牛肉风味重要构成; 杂环含硫化合物相对含量在 3.598%~18.333% 之间, 差异巨大, 可见影响牦牛肉风味的最大因素是杂环含硫化合物含量差异。

表5 牦牛肉挥发性风味物质检测结果

Table 5 Detection results of volatile flavor substances in yak meat

| 种类 | 序号 | 中文名称 | 风味特征 | 分子式 | QX | QT | HT | HB |
|----|----|------------|--------------------------|---|---------|---------|---------|---------|
| | | | | | 相对含量(%) | 相对含量(%) | 相对含量(%) | 相对含量(%) |
| 醛类 | 1 | 苯甲醛 | 杏仁、樱桃及坚果香 | C ₇ H ₆ O | 16.595 | 24.652 | 22.236 | 18.886 |
| | 2 | 壬醛 | 玫瑰、柑橘等香气 ^[31] | C ₉ H ₁₈ O | 9.789 | 13.775 | 8.48 | 20.933 |
| | 3 | 庚醛 | 强烈、不愉快脂肪气味 | C ₇ H ₁₄ O | 2.57 | 1.378 | 1.075 | 3.861 |
| | 4 | 己醛 | 果香 | C ₂ H ₄ O | 2.449 | 1.869 | 1.607 | 4.028 |
| | 5 | 辛醛 | 很强的水果香味 | CH ₃ (CH ₂) ₄ CHO | 1.44 | 2.95 | 1.395 | 5.887 |
| | 6 | 糠醛 | | C ₅ H ₄ O ₂ | 0.693 | 0.187 | 1.621 | 0.486 |
| | 7 | 苯乙醛 | 清香、花香气 ^[32] | C ₈ H ₈ O | 0.578 | 0.26 | 1.791 | 0.113 |
| | 8 | 3-噻吩甲醛 | | C ₅ H ₄ OS | 0.429 | - | 1.405 | - |
| | 9 | 十六醛 | 有花和蜡的弱香气 | C ₁₆ H ₃₂ O | 0.412 | 0.314 | 1.383 | 0.328 |
| | 10 | 3-苯基-2-丙烯醛 | | C ₁₀ H ₁₀ O ₂ | 0.394 | - | 1.343 | 0.224 |
| | 11 | 癸醛 | | C ₁₂ H ₂₂ O | - | - | 0.582 | - |
| | 12 | 2-苯基-2-丁烯醛 | | C ₁₀ H ₁₀ O | - | 0.334 | 0.612 | - |
| 醇类 | 1 | 2-乙基-1-己醇 | 香料特殊气味 | C ₈ H ₁₈ O | 9.558 | 3.135 | 3.729 | 2.902 |
| | 2 | 苯甲醇 | 芳香醇, 花香 | C ₇ H ₆ O | 4.553 | 1.373 | 2.49 | 1.523 |
| | 3 | 1-辛醇 | 可用作香料 ^[32] | C ₈ H ₁₈ O | 4.254 | 2.805 | 3.806 | 4.548 |
| | 4 | 1-辛烯-3-醇 | 蘑菇、干草香气 ^[32] | C ₈ H ₁₆ O | 1.289 | 0.89 | 3.114 | 1.783 |
| | 5 | 1-丁醇 | 有不愉快感觉 ^[32] | C ₄ H ₁₀ O | 1.167 | 0.377 | 1.712 | 0.992 |

续表 5

| 种类 | 序号 | 中文名称 | 风味特征 | 分子式 | QX | QT | HT | HB |
|--------|----|---------------|--------------------------|---|---------|---------|---------|---------|
| | | | | | 相对含量(%) | 相对含量(%) | 相对含量(%) | 相对含量(%) |
| | 6 | 1-庚醇 | 香味是甜酒、坚果 | C ₇ H ₁₆ O | 0.861 | 0.342 | 1.113 | 0.68 |
| | 7 | 1-己醇 | 略有气味 | C ₆ H ₁₄ O | 0.766 | 0.283 | 0.574 | 0.589 |
| | 8 | 1-戊醇 | | C ₅ H ₁₂ O | 0.72 | — | — | 0.429 |
| | 9 | 3-甲基-3-丁烯-1-醇 | | C ₅ H ₁₀ O | 0.255 | — | — | 0.247 |
| | 10 | 1-壬醇 | 脂肪、香草气味 | C ₉ H ₂₀ O | 0.255 | — | 0.155 | 0.115 |
| | 11 | 2-呋喃甲醇 | | C ₉ H ₈ O ₂ | — | — | 0.62 | — |
| 烃类 | 1 | 间二甲苯 | 强烈芳香味 ^[33] | C ₈ H ₁₀ | 8.727 | 18.775 | 1.337 | 8.826 |
| | 2 | 邻二甲苯 | 甲苯臭 ^[33] | C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂ | 6.868 | 2.274 | 1.814 | 5.073 |
| | 3 | 对二甲苯 | 具有芳香味 ^[33] | C ₈ H ₁₀ | 3.177 | 5.092 | 0.626 | 3.159 |
| | 4 | 乙基苯 | 芳香味 | C ₈ H ₁₀ | 2.646 | 3.944 | 0.547 | 2.748 |
| | 5 | 丁基化羟基甲苯 | 芳香味 ^[33] | C ₁₅ H ₂₄ O | 2.191 | 1.152 | 1.063 | 0.56 |
| | 6 | 甲苯 | | C ₇ H ₈ | 0.232 | 0.294 | 0.818 | 0.417 |
| | 7 | 萘 | | C ₁₀ H ₈ | 0.592 | 0.371 | 0.678 | 0.438 |
| | 8 | 十一烷 | | C ₁₁ H ₂₀ | 0.969 | 1.14 | — | 0.761 |
| | 9 | 间异丙基甲苯 | | C ₁₀ H ₁₄ | — | 3.568 | — | — |
| | 10 | 2-甲基-萘 | | C ₁₁ H ₁₀ | — | — | 1.222 | 0.392 |
| | 11 | 1-甲氧基-4-甲基苯 | | C ₈ H ₁₀ O | — | — | — | 0.425 |
| 酸类 | 1 | 苯甲酸 | 不好的芳香酸 | C ₆ H ₅ COOH | 1.295 | 0.478 | 1.173 | 0.527 |
| | 2 | 己酸 | 不愉快的椰肉油气味 | C ₂ H ₄ O ₂ | 0.924 | 0.696 | 2.794 | 0.838 |
| | 3 | 壬酸 | 微有特殊气味 | C ₉ H ₁₈ O ₂ | 0.704 | 0.571 | 1.002 | 0.463 |
| | 4 | 辛酸 | | C ₈ H ₁₆ O ₂ | 0.41 | 0.44 | 1.501 | 0.416 |
| | 5 | 丁酸 | 有刺激性及难闻气味 | C ₄ H ₈ O ₂ | — | — | 2.282 | 0.447 |
| 酮类 | 1 | 苯乙酮 | | C ₈ H ₈ O | 0.32 | 0.247 | 0.663 | 0.208 |
| | 2 | 3-己酮 | | C ₆ H ₁₂ O | 0.045 | 0.154 | 1.401 | 0.165 |
| | 3 | 4-苯基-2-丁酮 | 奶香味、脂肪油腻 | C ₁₀ H ₁₂ O | — | — | 0.556 | — |
| 杂类含硫化物 | 1 | 二乙二醇单乙醚 | 令人愉快的气味 ^[34] | C ₈ H ₁₆ O ₄ | 1.237 | 0.758 | 1.02 | 0.626 |
| | 2 | 2-乙酰基噻唑 | 有爆玉米、炒板栗 ^[34] | C ₅ H ₅ NOS | 0.733 | 0.547 | 0.977 | 0.524 |
| | 3 | 2,4-二叔丁基苯酚 | 轻微的苯酚臭味 ^[34] | C ₁₄ H ₂₂ O | 0.973 | 0.647 | 1.014 | 0.656 |
| | 4 | 2-乙基苯乙酯 | | C ₁₂ H ₁₆ O ₂ | — | 0.293 | — | — |
| | 5 | 乙酸(2-乙基己基)酯 | 香蕉水果气味 ^[34] | C ₁₀ H ₂₀ O ₂ | 0.607 | 0.386 | — | 0.63 |
| | 6 | 烯丙基甲基硫醚 | 洋葱、甘蓝菜香气 | C ₄ H ₈ S | 0.39 | — | 3.979 | — |
| | 7 | 苯酚 | 具有特殊气味 | C ₆ H ₆ O | 0.382 | 0.237 | 0.413 | — |
| | 8 | 2-乙酰吡咯 | 核桃、面包、榛子香气 | C ₆ H ₇ NO | 0.354 | 0.422 | 4.761 | 0.352 |
| | 9 | 二乙基二硫甲酸甲酯 | | C ₆ H ₁₃ NS ₂ | 0.213 | — | — | 0.138 |
| | 10 | 二甲基三硫化物 | 槟榔香气、硫香 | C ₂ H ₆ S ₃ | 0.194 | 0.245 | 1.226 | 0.116 |
| | 11 | 2-戊基-呋喃 | 烤肉香气 ^[34] | C ₉ H ₁₄ O | 0.164 | 0.37 | 1.218 | 0.287 |
| | 12 | 二甲基二硫化物 | | C ₂ H ₆ S ₂ | 0.071 | 0.086 | 1.206 | 0.269 |
| | 13 | 甲基吡嗪 | 烤坚果香气 ^[34] | C ₅ H ₆ N ₂ | — | — | 0.534 | — |
| | 14 | 三甲基吡嗪 | 烤坚果香气 | C ₇ H ₁₀ N ₂ | — | — | 1.275 | — |
| | 15 | 四甲基吡嗪 | 烤坚果香气 | C ₈ H ₁₂ N ₂ | — | — | 0.51 | — |
| | | 合计: 57种 | | | 45种 | 41种 | 49种 | 46种 |
| | | | | | 93.451 | 98.031 | 98.453 | 98.015 |

注: —表示未检测到该物质, 风味描述来源于参考文献和网站(<http://www.odour.org.uk>)。

2.4.2 牦牛肉化合物类别分析 醛类化合物是肉类加热后脂类氧化产生的挥发性化合物, 是肉类香气主要指标^[35]。四个部位牦牛肉共检测出 12 种醛类化合物, 其中最突出的是: 苯甲醛、壬醛、庚醛、己醛、辛醛; 样品 QT、HT 中苯甲醛(带有坚果香气)相对含量 22.236%~24.652%, 高于其他部位, 这也许是玉树牦牛前腿、后腿风味较好, 且带有坚果风味的重要原因, 也是影响牦牛肉风味主要化合物; 样品 HB 中壬醛(带有玫瑰和柑橘香气)含量高达 20.933%, 是其他

样品的 2.5 倍, 壬醛含有玫瑰和柑橘的香气应该是后背肉风味清淡的重要原因。

醇类化合物源自脂肪氧化分解^[36]。牦牛肉共检测出 11 种醇类化合物, 其中最为突出的是: 2-乙基-1-己醇、苯甲醇、1-辛醇; 样品 QX 中 2-乙基-1-己醇(有香料特殊气味)含量高达 9.558%, 是其他部位的 3 倍左右, 表明样品 QX 含有较多的脂肪成分, 降解后会产生高于其他部位的醇类物质。

烃类化合物是肉类氨基酸、脂肪氧化后期产

表6 牦牛肉化合物相对含量统计
Table 6 Statistical table of compound content in yak meat

| 化合物类别 | 相对含量(%) | | | |
|---------|---------|--------|--------|--------|
| | 前胸QX | 前腿QT | 后腿HT | 后背HB |
| 醛类 | 35.350 | 45.719 | 43.53 | 54.746 |
| 醇类 | 23.687 | 9.205 | 17.313 | 13.808 |
| 烃类 | 25.402 | 36.610 | 8.105 | 22.799 |
| 酸类 | 3.330 | 2.185 | 8.752 | 2.691 |
| 酮类 | 0.365 | 0.401 | 2.620 | 0.373 |
| 杂类含硫化合物 | 5.318 | 3.991 | 18.133 | 3.598 |
| 合计 | 93.451 | 98.031 | 98.453 | 98.015 |

物。牦牛肉共检测出 11 种烃类化合物,其中最为突出的是:间二甲苯、邻二甲苯、对二甲苯。间二甲苯(有强烈芳香味),样品 QT 含量高达 18.775%,而 HT 含量仅仅 1.337%,凸显出前后腿牦牛肉风味差异很大;普遍认为会带来甲苯臭味的邻二甲苯在样品 QT、HT 分别是 2.274% 和 1.814%,而样品 QX、HB 分别是 6.868% 和 5.073%,说明牦牛腿肉整体气味优于前胸和后背部位。

酸类化合物相对含量不大,共检测出 5 种,包括苯甲酸(难闻芳香酸)、乙酸(不愉快椰肉油味)、壬酸(特殊味道)、丁酸(难闻刺激性气味)等,都是牦牛肉难闻的特征化合物。样品 HT 中己酸、丁酸含量明显高于其他部位,导致酸类总含量在 8.752%,高于样品 QT(酸类总量 2.691%),表明 HT 部位气味与其他样品差异较大。

酮类化合物在生肉检测中出现很少,目前只检测出 4 种,美拉德反应后对风味有一定的影响。

杂类含硫化合物:对肉类风味起决定作用的是含硫、含氮、杂环化合物和含羰基化合物^[37],含硫化合物和其他杂类化合物阈值低^[38],但对牛肉风味贡献大。四个部位牦牛肉共检测出杂类化合物 15 种,相对含量在 3.598%~18.133% 之间,差异五倍之多;其中,李少颀研究认为吡嗪类为含氮类化合物(具有坚果香气),可能为美拉德反应产物^[39],在样品 HT 中均检测出,可以判定:牦牛肉四个部位烧烤后,含硫化合物形成的风味物质会有巨大的差异;样品 HT 中 2-乙酰吡咯(烤坚果的风味)含量为 4.761%,表明牦牛后腿肉烧烤后风味较好;样品 HT 中 2-硝基吡啶、噻吩、2-乙基呋喃(有烤肉香气)、2-戊基呋喃等物质^[40]等主要呈香特征物质,检测中均含量较高;样品 QT、HB 杂类含硫化合物总含量仅 3.991%、3.598%,与 HT(总含量 18.133%)差异较大的原因主要是 2-乙酰吡咯(4.76%)、烯丙基甲基硫醚(3.979%)含量非常突出,基本可以判断这两种化合物对牦牛肉四个部位风味差异有较大影响。

2.4.3 牦牛肉挥发性化合物主成分分析 挥发性化合物数据归一化处理后,进行主成分分析。图 5 显示 PC1 贡献率 86.70%,PC2 贡献率 6.92%,表明主成分经降维后数据能反映原数据整体信息;其中,苯

甲醛、壬醛、2-乙酰吡咯、2-乙基-1-己醇、间二甲苯相对含量突出,构成牦牛肉的主要化合物;样品 HT 中苯甲醛(带有坚果香气)、2-乙酰吡咯(烤坚果的风味)相对含量较高,可以确定牦牛肉后腿带有坚果风味,烧烤后风味独特;而样品 QX、HB、QT 风味化合物主要构成是壬醛、间二甲苯、2-乙基-1-己醇,位置相对较近,判断风味相似。

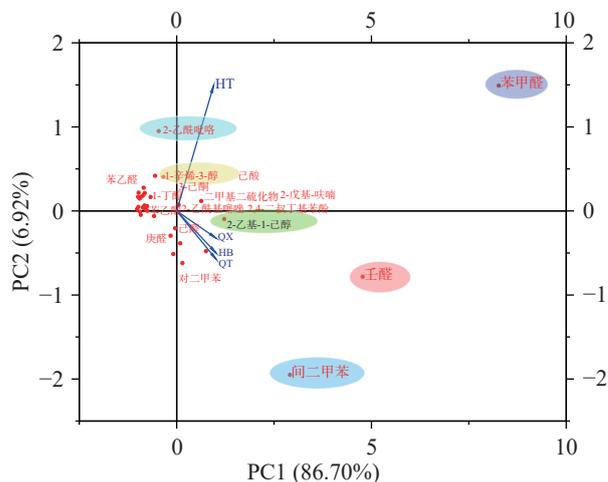


图5 牦牛肉挥发性化合物主成分图
Fig.5 Principal components of volatile compounds in four parts of yak

2.4.4 SPME-GC-MS 与电子鼻数据相关性分析 研究表明,取每个类别、相对含量前五挥发性化合物做相关性热图^[41],可以辨别两个数据之间的关联性和差异性。电子鼻传感器数据是宏观化合物解析、SPME-GC-MS 是具体化合物相对含量,因此有一定的相关性。采用 Pearson 相关性分析,将电子鼻传感器数据与 SPME-GC-MS 相对含量较高的主要数据,归一化处理后,进行相关性分析。 r 代表反映 X 轴、Y 轴的线性相关程度, $|r|$ 越大相关性越强, $|r|$ 越小相关性越弱(r 值在 -1~1 之间), $P \leq 0.5$ 表示显著,其结果如图 6 所示。

1-辛醇、1-辛烯-3-醇、庚醛、己醛均同 P 型、T 型的全部 12 根传感器呈显著相关或正相关,这类传感器对有机化合物、芳香族化合物、极性化合物敏感,比如醇类、醚类、甲烷、乙醇、碳氧基化合物,而在 LY2/LG、LY2/G、LY2/G、LY2/AA、LY2/Gh、LY2/gCT1、LY2/gCT 呈显著负相关或负相关,这类传感器对有机化合物、硫化氢敏感,如硫化物、硫醚、碳氧基化合物敏感;间二甲苯、对二甲苯、乙基苯、丁基化羟基甲苯均同 P 型、T 型传感器呈显著负相关或负相关,而在 LY2/LG、LY2/G、LY2/G、LY2/AA、LY2/Gh、LY2/gCT1、LY2/gCT 呈显著正相关或正相关,可以看出甲苯类化合物在电子鼻中的位置与醛类、醇类和杂类含硫化合物刚好相反。

综上分析可见,电子鼻传感器数据与主要风味化合物呈现相关性,因此判定电子鼻也能区分牦牛肉挥发性化合物,并且辨别气味特征。

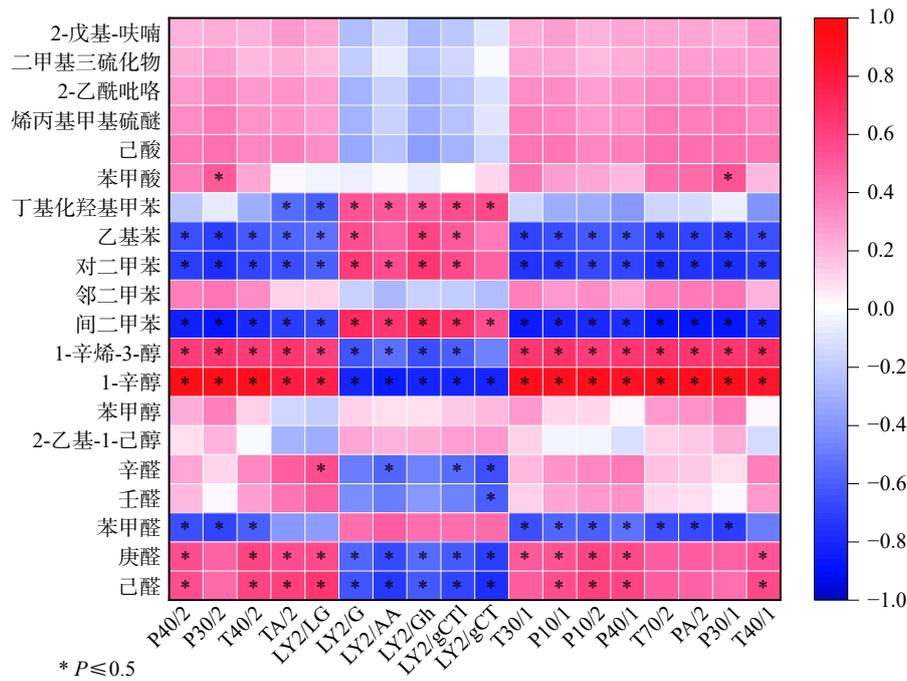


图 6 电子鼻数据与主要化合物相关性热图

Fig.6 Thermal diagram of correlation between electronic nose data and main compounds

3 结论

电子舌可以区分四个部位样品滋味, 且样品之间差异明显; 其中, 样品 HT 与 QX 滋味相似, 样品 HB 独立区别于其他样品。

电子鼻可以区分四个部位风味特征, 结果显示样品 HB、QT 气味相似, 而样品 HT 与 QX 相对独立于其他样品。

挥发性风味物质结果表明, 牦牛肉共鉴定出 57 种挥发性物质, 包括: 醛类、醇类、烃类、酮类和其它杂类含硫化合物; 其中, 醛类化合物相对含量在 35.350%~54.746%, 可见醛类是牦牛肉风味主体化合物; 醇类化合物相对含量在 9.205%~23.687%、烃类化合物相对含量在 8.105%~25.402% 之间, 表明醇类、烃类是牦牛肉风味重要构成; 杂环含硫化合物相对含量在 3.598%~18.333% 之间, 证明影响牦牛肉风味的最大因素是含硫杂类化合物, 这与电子鼻数据分析相同; 样品 QT、HT 中苯甲醛(带有坚果香气)相对含量 22.236%~24.652%, 高于其他部位, 表明玉树牦牛肉前腿、后腿风味较好, 且带有坚果风味; 牦牛后腿肉苯甲醛、2-乙酰吡咯相对含量较高, 可以确定风味独特; 胸肉、前腿肉、后背肉的风味化合物主要构成是壬醛、间二甲苯、2-乙基-1-己醇, 判断风味相似; 研究结果为今后牦牛肉加工和风味特征辨别提供理论依据和数据参考。

参考文献

[1] 杜美云. 三江源地区放牧牦牛种群优化模型与可持续发展决策支持系统[D]. 西宁: 青海大学, 2019. [DU Meiyun. Optimization model and sustainable development decision support system for grazing yak population in the three rivers source area[D]. Xining: Qinghai University, 2019.]

[2] 骆正杰, 马进寿, 保广才, 等. 青海省牦牛种业发展现状、存在问题及应对策略[J]. 中国畜牧杂志, 2021, 57(2): 231-234. [LUO Zhengjie, MA Jinshou, BAO Guangchai, et al. Development status, existing problems, and response strategies of yak seed industry in Qinghai Province[J]. Chinese Journal of Animal Husbandry, 2021, 57(2): 231-234.]

[3] 杨昌福, 柏雪, 高彦华, 等. 全放牧与舍饲育肥对牦牛肉品质及安全性的影响[J]. 畜牧与兽医, 2019, 51(1): 23-28. [YANG Changfu, BAI Xue, GAO Yanhua, et al. The effects of full grazing and house feeding fattening on the quality and safety of yak meat[J]. Livestock and Veterinary Medicine, 2019, 51(1): 23-28.]

[4] 张筱蕾, 唐善虎, 李思宁, 等. 天然复合保鲜剂对冷却牦牛肉品质的影响[J]. 四川畜牧兽医, 2017, 44(12): 21-23. [ZHANG Xiaolei, TANG Shanhu, LI Sining, et al. The effect of natural composite preservatives on the quality of chilled yak meat[J]. Sichuan Livestock and Veterinary Medicine, 2017, 44(12): 21-23.]

[5] 于启凤. 西藏牦牛肉电子商务发展现状及其对策[J]. 西部皮革, 2021, 43(3): 40-41. [YU Qifeng. Development status and countermeasures of E-commerce for Tibetan yak meat[J]. Western Leather, 2021, 43(3): 40-41.]

[6] 单斌, 马福全. 浅析果洛州牦牛肉产业状况及发展建议[J]. 青海农林科技, 2018(2): 42-45. [SHAN Bin, MA Fuquan. Analysis of the status and development suggestions of yak meat industry in Guillou Prefecture[J]. Qinghai Agriculture and Forestry Technology, 2018(2): 42-45.]

[7] 李红波, 张金山, 闫向民. 新疆巴音郭楞蒙古自治州牦牛产业调研报告[J]. 中国牛业科学, 2017, 43(5): 65-68. [LI Hongbo, ZHANG Jinshan, YAN Xiangmin. Research report on yak industry in Baying Olin Mongolian Autonomous Prefecture, Xinjiang[J]. China Bull Science, 2017, 43(5): 65-68.]

[8] 贾红亮, 于豪杰, 黄彩霞. 淘汰母牦牛肉品质特性与感官评定[J]. 中国奶牛, 2021(5): 45-50. [JIA Hongliang, YU Haojie, HUANG Caixia. Quality characteristics and sensory evaluation of eliminated female yak meat[J]. Chinese Cow Journal, 2021(5): 45-50.]

- [9] 徐焕, 郝力壮, 刘书杰, 等. 不同地区淘汰母牦牛肉营养品质的比较分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 232-237. [XU Huan, HAO Lizhuang, LIU Shujie, et al. Comparative analysis of nutritional quality of female yak meat phased out in different regions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(9): 232-237.]
- [10] 曾钰, 彭忠利, 高彦华, 等. 性别对舍饲育肥牦牛肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(18): 293-299, 318. [ZENG Yu, PENG Zhongli, GAO Yanhua, et al. The effect of gender on the quality of fattened yak meat in barn feeding[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(18): 293-299, 318.]
- [11] 朱青云, 谭霞, 赵静, 等. 青海高原地区牦牛肉营养成分分析与品质评价[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(11): 97-111. [ZHU Qingyun, TAN Liang, ZHAO Jing, et al. Nutrient composition analysis and quality evaluation of yak meat in Qinghai Plateau region[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2021, 40(11): 97-111.]
- [12] 毛进彬, 毛旭东, 王俊杰, 等. 亚丁牦牛肉品质分析[J]. 中国草食动物科学, 2020, 40(3): 31-35. [MAO Jinbin, MAO Xudong, WANG Junjie, et al. Analysis of Yarding yak meat quality[J]. Chinese Herbivorous Animal Science, 2020, 40(3): 31-35.]
- [13] TAN J Z, XU J. Applications of electronic nose (e-nose) and electronic tongue (e-tongue) in food quality-related properties determination: A review[J]. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2020, 4: 104-115.
- [14] 李建军, 常筱沛, 马静潇, 等. 电子眼、电子鼻和电子舌鉴别不同品种、不同产地生地黄[J]. *中成药*, 2022, 44(11): 3549-3554. [LI Jianjun, CHANG Xiaopie, MA Jingxiao, et al. Identification of different varieties and origins of Radix Rehmannian with electronic eyes, nose and tongue[J]. *Traditional Chinese Patent Medicines and Simple Preparations*, 2022, 44(11): 3549-3554.]
- [15] 黄嘉丽, 黄宝华, 卢宇靖, 等. 电子舌检测技术及其在食品领域的应用研究进展[J]. 中国调味品, 2019, 44(5): 189-193, 196. [HUANG Jiali, HUANG Baohua, LU Yujing, et al. Research progress on electronic tongue detection technology and its application in the food industry[J]. Chinese Seasonings, 2019, 44(5): 189-193, 196.]
- [16] 胡金祥, 何莲, 王林, 等. 基于部分专一传感器电子舌和 Hercules II 电子鼻评价川式相似复合味型(鱼香、荔枝和糖醋味)[J]. 食品科技, 2021, 46(8): 244-250. [HU Jinxiang, HE Lian, WANG Lin, et al. Evaluation of Sichuan style similar composite flavor types (fish aroma, lychee and sweet and sour flavor) based on partial specialized sensor electronic tongue and Hercules II electronic nose[J]. Food Technology, 2021, 46(8): 244-250.]
- [17] 潘晓倩, 张顺亮, 李素, 等. 吹扫/捕集-热脱附-气相色谱-质谱联用法分析不同解冻温度对牛肉风味品质的影响[J]. 肉类研究, 2019. [PAN Xiaolian, ZHANG Shunliang, LI Su, et al. Analysis of the effect of different thawing temperatures on beef flavor quality by purge/trap thermal desorption gas chromatography mass spectrometry[J]. Meat Research, 2019.]
- [18] 刘晓, 刘广瑞, 隋璐, 等. 应用 HS-SPME 结合 GC-MS 分析半固态发酵浓香型酒醪中挥发性成分[J]. 酿酒科技, 2020(4): 102-106. [LIU Xiao, LIU Guangrui, SUI Lu, et al. Application of HS-SPME combined with GC-MS analysis of volatile components in semi solid fermentation strong aroma fermented grains[J]. Brewing Technology, 2020(4): 102-106.]
- [19] 王丹丹, 凌霞, 王念, 等. 基于电子舌技术对市售生抽酱油滋味品质的评价[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(6): 244-249. [WANG Dandan, LING Xia, WANG Nian, et al. Evaluation of the taste and quality of commercially available soy sauce based on electronic tongue technology[J]. Food and Fermentation Industry, 2017, 43(6): 244-249.]
- [20] 文攀, 薛长风, 裴志胜, 等. 基于电子舌与电子鼻评价烘焙时间对黄秋葵籽风味品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 289-293. [WEN Pan, XUE Changfeng, PEI Zhisheng, et al. Evaluation of the effect of baking time on the flavor quality of okra seeds based on electronic tongue and electronic nose[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 289-293.]
- [21] 袁灿, 何莲, 胡金祥, 等. 基于电子舌和电子鼻结合氨基酸分析鱼香肉丝调料风味的差异[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 48-55. [YUAN Can, HE Lian, HU Jinn Xiang, et al. Analysis of flavor differences in fish flavored shredded meat seasonings based on electronic tongue and electronic nose combined with amino acids[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 48-55.]
- [22] 许凌云, 刁钢, 石小亮, 等. 基于 SPME-GC-MS 技术结合电子鼻电子舌分析不同热处理牛乳风味的差异[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(1): 55-64. [XU Lingyun, DIAO Gang, SHI Xiaoliang, et al. Analysis of differences in flavor of different heat treatment cow milk based on SPME-GC-MS technology and electronic nose electronic tongue[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2023, 35(1): 55-64.]
- [23] 易宇文, 范文教, 贾洪峰. 基于电子舌的微冻鲢鱼新鲜度识别研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 142-145. [YI Yuwen, FAN Wenjiao, JIA Hongfeng. Research on the freshness recognition of micro frozen silver carp based on electronic tongue[J]. Food and Machinery, 2014, 30(2): 142-145.]
- [24] 高凤泽, 王治同. 食品挥发性化合物的提取与分析技术[J]. 中国果菜, 2022, 42(5): 45-53. [GAO Fengze, WANG Zhitong. Extraction and analysis techniques for volatile compounds in food[J]. Chinese Journal of Fruits and Vegetables, 2022, 42(5): 45-53.]
- [25] 蓬桂华, 李文馨, 殷勇, 等. 电子鼻和电子舌在分析桑果果汁风味上的应用[J]. 食品工业科技, 2020, 41(12): 234-237. [PENG Guihua, LI Wenxin, YIN Yong, et al. Analysis of flavor difference of mulberry juice by E-nose and E-tongue[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(12): 234-237.]
- [26] MAMUN M O-R, NICHOLAS E O, BHISHMA S, et al. Fatty acid composition of yak (*Boss grannies*) cheese including conjugated linoleum acid and trans-18: 1 fatty acid[J]. Agric Food Chem, 2018, 56(5): 1654-1660.
- [27] 崔伟, 孟祥忍, 高子武, 等. 牛肉低温蒸煮过程中挥发性风味成分及其前体物动态变化[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 20-28, 244. [CUI Wei, MENG Xiangren, GAO Ziwu, et al. Dynamic changes of volatile flavor components and their precursors during low-temperature cooking of beef[J]. Food and Machinery, 2022, 38(4): 20-28, 244.]
- [28] 李双艳. 基于电子鼻、电子舌比较分析冷藏方式对小香鸡风味的影响[J]. 肉类研究, 2017, 31(4): 50-55. [LI Shuangyan. Comparative analysis of the effect of refrigeration methods on the flavor of chicken based on electronic nose and electronic tongue[J]. Meat Research, 2017, 31(4): 50-55.]
- [29] 孙晓红, 刘军军, 蓝蔚青, 等. 气味指纹技术在水产品品质评价中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(5): 314-320. [SUN Xiaohong, LIU Junjun, LAN Weiqing, et al. Research progress on the application of odor fingerprint technology in the quality evaluation of aquatic products[J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 46(5): 314-320.]

- [30] 侯婷婷, 南京熙, 林墨, 等. 延边黄牛肉挥发性风味物质[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 45-47. [HOU Tingting, NAN Jingxi, LIN Mo, et al. Volatile flavor compounds in Yangban yellow beef[J]. Food and Machinery, 2018, 34(8): 45-47.]
- [31] 罗玉龙, 靳志敏. 肉制品中香味物质形成原因研究进展[J]. 食品与发酵工业, DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201502045. [LUO Yulong, JIN Zhimin. Research progress on the formation of aroma substances in meat products[J]. Food and Fermentation Industry, DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201502045.]
- [32] 刘同, 杨悠悠. 肉鸭胸肌特异挥发性风味物质的鉴定[J]. 畜牧兽医学报, 2022, 53(2): 402-413. [LIU Tong, YANG Youyou. Identification of specific volatile flavor compounds in meat duck breast muscle[J]. Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2022, 53(2): 402-413.]
- [33] 风味描述参考文献网站[Z]. <http://www.odour.org.uk>. [Flavor description reference website[Z]. <http://www.odour.org.uk>.]
- [34] 葛长荣, 马美湖. 肉与肉制品工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2002. [GE Changrong, MA Meihu. Horse meat and horse meat products technology[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2002.]
- [35] ESTÉVEZ M, MORCUENDE D, VENTANAS S, et al. Analysis of volatiles in meat from Iberian pigs and lean pigs after refrigeration and cooking by using SPME-GC-MS[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(11): 3429-3435.
- [36] 李素. 不同加水量腌制酱牛肉中挥发性风味物质变化[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 199-205. [LI Su. Changes of volatile flavor compounds in pickled beef with different water contents[J]. Food Science, 2019, 40(10): 199-205.]
- [37] 吴肖, 蔡连坤, 孔令会, 等. 传统烹饪盐和工业化水盐鸡溶剂提取法香气成分差异性分析[J]. 食品工业科技, 2018, 39(14): 235-238, 243. [WU Xiao, CAI Liankun, KONG Linghui, et al. Analysis of differences in aroma components between traditional cooking salt and industrialized water salt chicken solvent extraction method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(14): 235-238, 243.]
- [38] 单启梅. 滩羊肌肉在煮制过程中可挥发性化合物的变化[J]. 食品科学, 2021, 42(8): 165-171. [SHAN Qimei. Changes in volatile compounds in tan sheep muscle during cooking[J]. Food Science, 2021, 42(8): 165-171.]
- [39] 李少颢. 肉类风味影响因素研究进展[J]. 中国调味品, 2020, 45(2): 188-191. [LI Shaojin. Research progress on factors affecting meat flavor[J]. Chinese Seasonings, 2020, 45(2): 188-191.]
- [40] 顾赛麒, 王锡昌, 陶宁萍, 等. 基于主成分分析和聚类分析评价中华绒螯蟹肉香气品质的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(24): 120-124. [GU Saiqi, WANG Xichang, TAO Ningping, et al. Evaluation of the aroma quality of Chinese mitten crab meat based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(24): 120-124.]
- [41] ZHANG X, WEI J P, ZHAO S Y, et al. Flavor differences between commercial and traditional soybean paste[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142: 111052.