

牦牛不同部位肉风味差异分析及品质评价

李赵敏, 王姗姗, 张玉红, 胡 赟, 曹涵文

(西藏自治区农牧科学院农产品开发与食品科学研究所, 西藏 拉萨 850000)

摘要:为探究牦牛不同部位肉的风味和品质差异,采用电子鼻技术和顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用仪(HS-SPME-GC-MS),结合牦牛肉食用品质评价指标,对牦牛眼肉、霖肉和后腱子的风味成分及食用品质进行了分析。电子鼻实验结果表明:正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)能够较好地地区分3种不同部位的肉。HS-SPME-GC-MS实验结果显示:牦牛不同部位肉共测出了32种风味成分,其中11个差异风味物质可用于区分牦牛肉的各个部位。香气活性值(OAV)分析结果表明:己醛、壬醇、辛酸等风味成分在不同部位肉中的OAV值较为突出。基于差异风味物质的主成分分析(PCA)发现,两个主成分的累计方差贡献率达到80.59%,有效阐明了不同部位肉的整体风味特征。食用品质评价结果表明:后腱剪切力远大于眼肉和霖肉且存在显著性差异($p < 0.05$),pH值在不同部位肉中存在显著性差异($p < 0.05$),色泽分析发现后腱的L*值最低,霖肉的a*和b*相对较高,在持水性和TPA特性方面,后腱肉要优于其他部位肉。

关键词:牦牛肉;差异风味物质;香气活性值;主成分分析;品质评价

中图分类号:TS201.4

文献标识码:A

Analysis of Flavor Differences and Meat Quality Evaluation in Different Parts of Yak Meat

LI Zhaomei, WANG Shanshan, ZHANG Yuhong, HU Yun, CAO Hanwen

(Institute of Agricultural Products Development and Food Science, Xizang Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lhasa Xizang 850000, China)

Abstract: This study aimed to investigate the differences in flavor and edible quality among different parts of yak meat. We employed electronic nose technology and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), combined with edible quality evaluation indicators for yak meat, to analyze the flavor components and edible quality of yak eye meat, Lin meat, and hind tendon. The electronic nose results showed that Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis (OPLS-DA) could effectively distinguish the three different meat parts. HS-SPME-GC-MS analysis revealed a total of 32 flavor components in yak meat from different parts, among which 11 differential flavor substances were identified as markers for distinguishing between the parts. Aroma activity value (OAV) analysis indicated that flavor components such as hexanal, nonanol, and caprylic acid exhibited relatively high OAV values in different meat parts. Furthermore, principal component analysis (PCA) based on the differential flavor substances demonstrated that the cumulative variance contribution rate of the two principal components reached 80.59%, effectively elucidating the overall flavor characteristics of the different parts. Edible quality evaluation results indicated that the shear force of hind tendon meat was significantly higher than that of eye meat and Lin meat ($p < 0.05$). Additionally, pH differed significantly among the different parts ($p < 0.05$). Color analysis showed that hind tendon had the lowest L* value, while Lin meat had relatively higher a* and b* values. In terms of water-holding capacity and TPA properties, hind tendon meat was superior to the other parts.

Key words: yak meat; differential flavor substances; aroma activity value; principal component analysis; quality evaluation

收稿日期:2025-11-11

基金项目:西藏自治区财政专项资金项目——牦牛、藏羊肉低嘌呤烹饪方式研究项目(XZCZ-SS-2025-008);国家重点研发计划项目——藏羊精深加工及副产物综合利用项目(2022YFD1302105);西藏自治区财政专项资金项目——畜产品加工与品质评价平台建设项目(XZNKYSPS-2024-C-047)。

作者简介:李赵敏(1994—),女,硕士,研究实习员,主要从事畜产品加工与品质评价研究,E-mail:lzm1994@126.com。

通信作者:曹涵文(1989—),男,硕士,助理研究员,主要从事畜产品加工与品质评价研究,E-mail:751261399@qq.com。

西藏作为中国的传统牧区,拥有丰富的畜牧资源,现有牲畜存栏总数高达1 726.46万头,其中牦牛数量约为490万头^[1],牦牛产业不仅根植于西藏当地深厚的畜牧业文化,还为当地经济发展提供了重要支持。此外,西藏地区独特的地理环境和气候条件孕育出多种优良的牦牛地方品种,如娘亚牦牛、斯布牦牛等,这些地方品种的牦牛在各自的饲养模式下,形成了独特的品质特点。牦牛肉的品质受多种因素影响,包括品种、饲养模式和屠宰方式等。风味作为评定牦牛肉品质的重要因素^[2-3],一直深受消费者和市场的高度重视。近年来,随着消费者对优质牦牛肉需求不断上升,西藏牦牛的出栏数、出栏率以及肉产量持续增长^[4],体现出该行业的发展潜力。同时,得益于冷链物流及精细分割技术的进步,精细分割的牦牛冷鲜肉在市场上越来越受到消费者的喜爱,逐渐成为高端肉类消费的重要选择。由于消费者对牦牛肉不同部位的偏好和认可度存在差异,开展对牦牛肉不同部位肉的风味特征及食用品质的深入研究显得尤为必要。

挥发性化合物与牦牛肉的风味特征之间存在密切关系,但在风味物质的提取和分离过程中,容易受到外界环境因素的影响。因此,选择合适的设备和方法对于风味物质的测定至关重要。电子鼻利用传感器和模式识别系统,能够生成不同的“气味指纹”以鉴别风味样本。然而,该技术的局限性在于无法进行风味成分的分离和鉴定。相较之下,顶空固相微萃取(HS-SPME)技术在富集挥发性化合物方面表现出色,具备高效率 and 便捷性。气质联用(GC-MS)主要用于挥发性风味物质的定性和定量分析,充分发挥气相色谱在分离能力上的优势以及质谱在灵敏度上的特性,从而实现对痕量物质的系统分析^[5-7]。目前,众多学者从不同角度对牦牛肉的风味进行了研究,如皮立等^[8]对不同性别的玉树牦牛肉的挥发性风味成分进行了比较分析,发现母牦牛肉的风味品质较为优越;张婧年等^[9]的研究表明,3-甲基丁醛、2-甲基丙酸乙酯及1-戊烯-3-酮是影响牦牛不同部位肉风味差异的重要物质;左子珍等^[10]的研究则发现,饲喂过瘤胃蛋氨酸的麦注牦牛,其挥发性风味物质的含量会受到显著影响。

本研究选取了牦牛胴体的眼肉、霖肉和后腱子3个特征部位,采用电子鼻结合顶空固相微萃

取-气相色谱-质谱联用仪(HS-SPME-GC-MS)技术,对牦牛不同部位肉的风味差异进行分析和品质评价,以期为扩充牦牛肉的分级和分类标准提供理论支撑,并为生鲜牦牛肉的精细分割产业化发展提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

牦牛肉采自西藏圣佳食品开发有限公司,牦牛来源为青海玉树,选取体况评分一致的年龄为3岁左右公牦牛6头且未阉割,屠宰时间为2024年7月,屠宰后冷却排酸48 h,选取眼肉、霖肉、后腱子3个部位肉装入冻存管中,液氮运输后于-80℃保存。另选取不同部位牦牛鲜肉置于冰袋中保存,用于食用品质评价。

2-甲基-3-庚酮(分析纯),上海西格玛奥德里奇贸易有限公司;氯化钠(分析纯),国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

电子鼻PEN3,北京盈盛恒泰科技有限责任公司;气相色谱质谱联用(GC-MS)Clarus 680-SQ8,美国铂金埃尔默公司;DB-WAX毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm),美国安捷伦公司;电子分析天平称 Electronic Balance,深圳市普云电子有限公司;萃取头120 μm DVB/CAR/PDMS,美国安捷伦公司;固相微萃取装置SPME Allow Cond, CTC Analytics AG;便携式pH计BLD-pH205,北京布拉德科技发展有限公司;FTC质构仪,北京盈盛恒泰科技有限责任公司。

1.3 方法

1.3.1 电子鼻测定

1.3.1.1 样品前处理

将肉样搅碎,称量3.00 g(精确值0.001 g)肉末放入到50 mL顶空瓶中水浴30 min,检测倒计时10 s左右取出。

1.3.1.2 电子鼻检测参数

气体流量为300 mL/min;进样准备等待时间为10 s;样品清洗时间为90 s;样品测定时间为60 s;操作环境温度25℃。

1.3.2 气相色谱质谱测定

1.3.2.1 样品前处理

将冷冻后的样品放入搅拌机中粉碎处理,准确称量5.00 g肉样放入到20 mL顶空瓶中,分别

加入 5 mL 饱和氯化钠溶液和 20 μL 2-甲基-3-庚酮溶液(16.32 $\mu\text{g}/\text{mL}$),使用硅胶顶空隔垫钳口盖密封顶空瓶,加入转子置于磁力搅拌器中。

1.3.2.2 顶空固相微萃取条件

将萃取头插入进样口,在 250 $^{\circ}\text{C}$ 温度下老化 5 min 后,插入到顶空瓶中,萃取头距离肉糜样品约 1 cm,在 65 $^{\circ}\text{C}$ 条件下平衡 20 min,萃取 30 min,插入 GC 进样口,250 $^{\circ}\text{C}$ 条件下解析 4 min^[11]。

1.3.2.3 气相色谱质谱条件

采用不分流进样,溶剂延迟 0 min^[12-13],载气流速为 1.0 mL/min 高纯度氦气(99.999%);升温程序:初始温度 40 $^{\circ}\text{C}$,保持 3 min,以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温到 150 $^{\circ}\text{C}$,保持 1 min,再以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温到 200 $^{\circ}\text{C}$,并以 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 230 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min^[8];进样口、接口、离子源、传输线温度均为 250 $^{\circ}\text{C}$;电子能量为 70 eV,扫描方式为全扫描模式(SCAN),质量扫描范围 30~600 m/z,标准调协文件^[14]。

1.3.2.4 气味活度值(OAV)

参考黄宇杏等^[15]的研究方法,以每种香气成分的浓度与对应物质嗅觉阈值的比值计算 OAV 值,具体测算公式(1)如下:

$$OAV = \frac{C}{T} \quad (1)$$

式中:C 为样品中测得香气成分的含量($\mu\text{g}/\text{kg}$);T 为该香气成分在油中的觉察阈值($\mu\text{g}/\text{kg}$)。

1.3.3 食用品质评价

1.3.3.1 色度测定

参考茹志莹等^[16]的方法,分别用白板和黑板对色差仪进行校正,将色差仪探头紧贴肉样表面,对同一块肉选取不同的 5 个位点,测定牦牛肉的 L^* (亮度)、 a^* (红度)、 b^* (黄度),计算其平均值为该肉样的色度值。

1.3.3.2 pH 值测定

参考周立等^[17]的方法,对 pH 计进行校正,将 pH 计垂直插头肉样中约 2 cm,取 5 次测定的平均值为该肉样的 pH 值。

1.3.3.3 剪切力测定

参考吴文君^[18]的方法,将样品修剪为 2 cm \times 2 cm \times 1 cm 小块肉样,沿着肌纤维垂直方向进行剪切测定,取 3 次测定的平均值为该肉样的剪切力。

1.3.3.4 全质构测定(TPA)

参考刘亚娜等^[19]的方法并略作修改,将样

品切成 2 cm \times 2 cm \times 1 cm 的肉块,探头回升高度为 15 mm,测试前速率 2 mm/s,检测速率 1 mm/s,测试后速率 5 mm/s,压缩比 75%,最小起始力 0.25 N,数据收集频率 100 Hz,通过力量-时间曲线获得 TPA 参数。测定样品的硬度、粘附性、弹性、胶黏性、咀嚼性等指标。

1.3.3.5 持水力测定

1) 汁液流失:参照《肉的食用品质客观评价方法》(NY/T 2793—2015)进行测定^[20]。

2) 贮藏损失:参照《肉的食用品质客观评价方法》(NY/T 2793—2015)进行测定^[20]。

3) 蒸煮损失:参考贾娜等^[21]的方法并略做修改,准确称取肉样放入蒸煮袋中并置于 72 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温水浴锅中加热,当待肉样中心温度上升至 70 $^{\circ}\text{C}$ 后流水冷却 30 min,擦净表面水分并称重,取 3 次测定的平均值为该肉样的蒸煮损失。

4) 加压损失:参考李文东等^[22]的方法,取厚度为 1 cm 的肉样,准确测定其初始重量,采用纱布包裹并在下方放置定性分析滤纸,设置压力为 1 283.80 N,持续时间为 5 min,测定其重量,取 3 次测定的平均值为该肉样的加压损失。

5) 离心损失:参考路立立等^[23]的方法并略做修改,取 3.00 g 左右肉样准确称量其重量并放入离心管中,在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下,9 000 r/min 离心 10 min 并称重,计算其差值,取 3 次测定的平均值为该肉样的离心损失。

1.4 数据分析

SIMCA 14.1 软件进行正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA),计算预测变量重要性投影(VIP),绘制主成分分析图;SPSS 27.0 软件进行单因素分析,以 $p < 0.05$,VIP ≥ 1 为条件筛选差异风味成分;Origin 2021 软件绘制雷达图、瀑布图谱、聚类热图。

2 结果与分析

2.1 牦牛不同部位肉品质差异分析

牦牛不同部位肉电子鼻稳定响应数据如表 1 所示。通过对牦牛不同部位肉电子鼻数据进行 OPLS-DA 分析,结果如图 1A 中 3 个部位在得分散点图的横轴和纵轴上实现了部位区分,自变量拟合指数(R^2_x)为 0.999,因变量拟合指数(R^2_y)为 0.919,模型预测指数(Q^2)为 0.911,对于牦牛不同部位肉的预测率为 91.1%。后腱子

肉主要在纵轴上半部分分布,霖肉在坐标系左下部分分布,眼肉在坐标系右下部分分布。经过200次置换检验,如图1B, Q^2 回归线与纵轴的交点小于零,说明模型不存在过拟合,模型验证有效,该结果可用于牦牛肉不同部位的鉴别分析。

结合表1数据绘制的电子鼻特征气味雷达指纹图(图1C),可看出10个传感器对牦牛不同部位肉挥发性成分的响应值不同。在10个传感

器中,R2、R6、R7、R8这4个传感器 $VIP > 1$,其中R2、R7传感器响应值霖肉 $>$ 后腱 $>$ 眼肉 ($p < 0.05, VIP > 1$),认为这些传感器可能在本试验 OPLS-DA 判别模型中的贡献较大。R2传感器对氮氧化物敏感、R7传感器对硫化物敏感,相关研究表明,这两类传感器在区分常温和冷藏鸡肉不同储藏时间过程中发挥了主要作用^[24]。

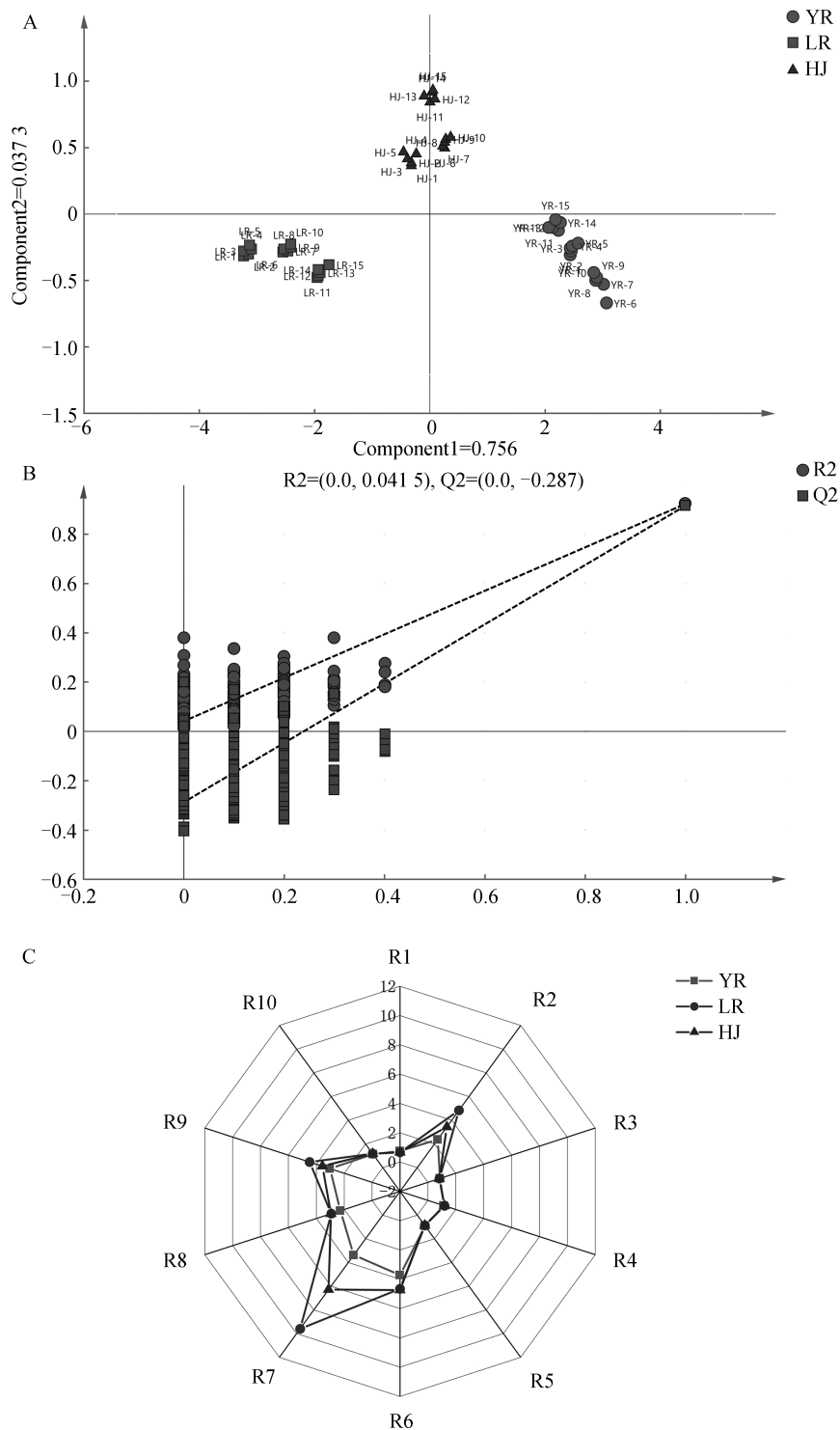


图1 牦牛不同部位肉的正交偏最小二乘判别分析(A)、模型交叉验证结果(B)及雷达图(C)

表 1 牦牛不同部位肉电子鼻响应值

传感器编号	性能特点	响应值			VIP 值
		眼肉	霖肉	后腱	
R1	对芳香成分灵敏	0.75±0.06a	0.66±0.01b	0.66±0.01b	0.43
R2	对氮氧化合物很灵敏	2.38±0.51c	4.84±0.33a	3.43±0.19b	1.29
R3	对氨水 芳香成分灵敏	0.87±0.03a	0.83±0.01b	0.83±0.01b	0.31
R4	对氢气有选择性	1.14±0.03b	1.19±0.01a	1.19±0.01a	0.32
R5	对烷烃 芳香成分灵敏	0.91±0.02a	0.88±0.01b	0.88±0.01b	0.27
R6	对甲烷灵敏	3.71±1.24b	4.65±0.17a	4.73±0.05a	1.21
R7	对硫化物灵敏	3.37±0.77c	9.59±0.95a	6.29±0.30b	2.03
R8	对乙醇灵敏	2.28±0.58b	2.92±0.07a	2.95±0.03a	1.08
R9	对芳香成分、有机硫化物灵敏	3.02±0.66c	4.48±0.11a	3.57±0.15b	0.99
R10	对烷烃灵敏	1.13±0.03b	1.17±0.01a	1.18±0.01a	0.30

注:表中数值为平均值±标准差,英文小写字母不同表示差异显著 $p < 0.05$,小写字母相同表示差异不显著 $p > 0.05$ 。下同。

2.2 牦牛不同部位肉风味成分特征分析

为研究不同部位牦牛肉的风味特征,利用 HS-SPME-GC-MS 联用的方法对牦牛 3 个部位肉风味化合物成分及相对含量进行分析鉴定。由表 2 可知,共检测到 32 种风味成分,其中醛类化合物 8 种、醇类化合物 11 种、酮类化合物 2 种、酯类化合物 3 种、酸类化合物 6 种、萜烯类化合物 2 种。以 32 个风味组分作为因变量,不同部位肉为自变量,通过 OPLS-DA 分析(图 2A),

可以实现 2 个牦牛部位肉的有效区分。本次分析中的自变量拟合指数(R^2_x)为 0.988,因变量拟合指数(R^2_y)为 0.973,模型预测指数(Q^2)为 0.973, R^2 和 Q^2 超过 0.5 表示模型拟合结果可接受^[25]。经过 200 次置换检验,如图 2B, Q^2 回归线与纵轴的交点小于零,说明模型不存在过拟合,模型验证有效,该结果可用于牦牛不同部位肉的鉴别分析。

表 2 牦牛不同部位肉的香气成分

编号	保留时间 /min	化学物质 登录号	物 质	含量/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)			VIP 值
				眼肉	霖肉	后腱	
1	5.668	66-25-1	正己醛	6.51±0.33c	43.71±1.85a	17.56±0.79b	1.10
2	11.337	124-13-0	正辛醛	6.04±0.32c	10.60±0.86a	2.48±0.80b	1.08
3	15.295	124-19-6	正壬醛	2.56±0.60c	7.19±0.55b	10.11±2.08a	1.12
4	18.087	112-31-2	癸醛	0.72±0.05b	6.51±0.18c	3.42±0.40a	1.75
5	18.593	100-52-7	苯甲醛	2.90±0.47c	12.39±0.94a	9.18±2.00b	0.64
6	32.886	112-54-9	十二醛	1.42±0.19c	4.39±0.66a	2.79±0.55b	0.31
7	35.335	124-25-4	十四烷醛	1.41±0.20c	2.13±0.64b	5.11±0.28a	0.53
8	37.586	2765-11-9	十五醛	1.61±0.20b	1.69±0.19b	4.08±1.44a	0.43
醛类	—	—	—	21.17±1.88	72.61±14.46	53.73±5.33	—
9	10.977	71-41-0	正戊醇	0.74±0.07c	0.66±0.16b	2.08±0.34a	2.12
10	15.009	31502-14-4	反-2-壬烯-1-醇	3.56±0.10b	3.46±0.35b	13.87±0.88a	0.91
11	17.096	4938-52-7	1-庚烯-3-醇	1.28±0.20c	4.45±0.24b	8.03±2.17a	0.69
12	18.212	104-76-7	2-乙基己醇	10.14±2.51b	22.01±0.58a	34.21±5.99a	1.56
13	18.341	22104-80-9	2-癸烯-1-醇	0.77±0.06c	1.30±0.09b	1.70±0.11a	0.25
14	19.919	78-70-6	芳樟醇	5.98±1.00a	3.45±0.24b	2.41±0.16c	0.48
15	20.359	111-87-5	正辛醇	4.44±0.68a	2.35±0.35b	4.65±0.10a	0.29
16	20.653	6982-25-8	2,3-丁二醇	1.49±0.18b	2.56±0.21a	1.70±0.58b	0.17
17	23.286	143-08-8	壬醇	21.61±0.70a	6.96±0.42b	2.77±0.57c	1.12
18	26.023	106-22-9	香茅醇	3.14±0.28a	2.68±0.18b	1.25±0.15c	0.37
19	31.312	112-42-5	十一醇	4.32±1.04a	3.99±0.33a	1.99±0.36b	0.39
醇类	—	—	—	57.47±6.09	53.87±5.91	64.66±7.17	—
20	12.148	513-86-0	3-羟基-2-丁酮	25.52±2.84a	149.63±20.94c	56.2±9.95b	2.02
21	13.223	110-93-0	甲基庚烯酮	1.21±0.05c	1.69±0.11b	2.88±0.52a	0.34

续表2 牦牛不同部位肉的香气成分

编号	保留时间/min	化学物质登录号	物质	含量/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)			VIP 值
				眼肉	霖肉	后腱	
酮类	—	—	—	26.73±17.19	151.32±104.61	59.08±37.70	—
22	17.166	112-23-2	甲酸庚酯	0.56±0.04c	0.79±0.15b	2.15±0.38a	0.35
23	21.524	96-48-0	γ -丁内酯	0.79±0.10b	0.76±0.34b	1.08±0.14a	0.12
24	21.843	52-01-7	螺内酯	3.87±0.13a	0.69±0.15b	3.63±1.37a	0.32
脂类	—	—	—	5.22±1.74	2.24±0.75	6.86±2.29	—
25	22.926	495-69-2	马尿酸	128.71±14.77c	440.78±91.46a	189.72±33.26b	3.13
26	26.287	4080-48-2	6-甲基吡啶甲酸	18.36±1.99b	7.02±0.44c	37.87±5.46a	1.34
27	33.518	124-07-2	辛酸	28.93±0.84a	4.61±0.13c	9.95±0.96b	1.09
28	16.866	64-19-7	冰醋酸	2.09±0.15	—	—	—
29	38.231	334-48-5	正癸酸	11.82±1.46	—	—	—
30	39.025	50-53-3	无环羧酸	—	2.03±1.17a	0.96±0.23b	—
酸类	—	—	—	189.91±60.89	454.44±251.13	238.5±96.74	—
31	14.079	4312-76-9	1-氢过氧己烷	1.18±0.05b	1.01±0.15c	1.48±0.25a	0.14
32	37.629	7320-37-8	1,2-环氧十六烷	1.72±0.17c	3.78±0.82b	4.98±0.40a	0.46
烯萜类	—	—	—	2.90±0.38	4.79±1.96	6.46±2.47	—
总计	—	—	—	289.49±24.11	737.24±84.68	428.33±35.79	—

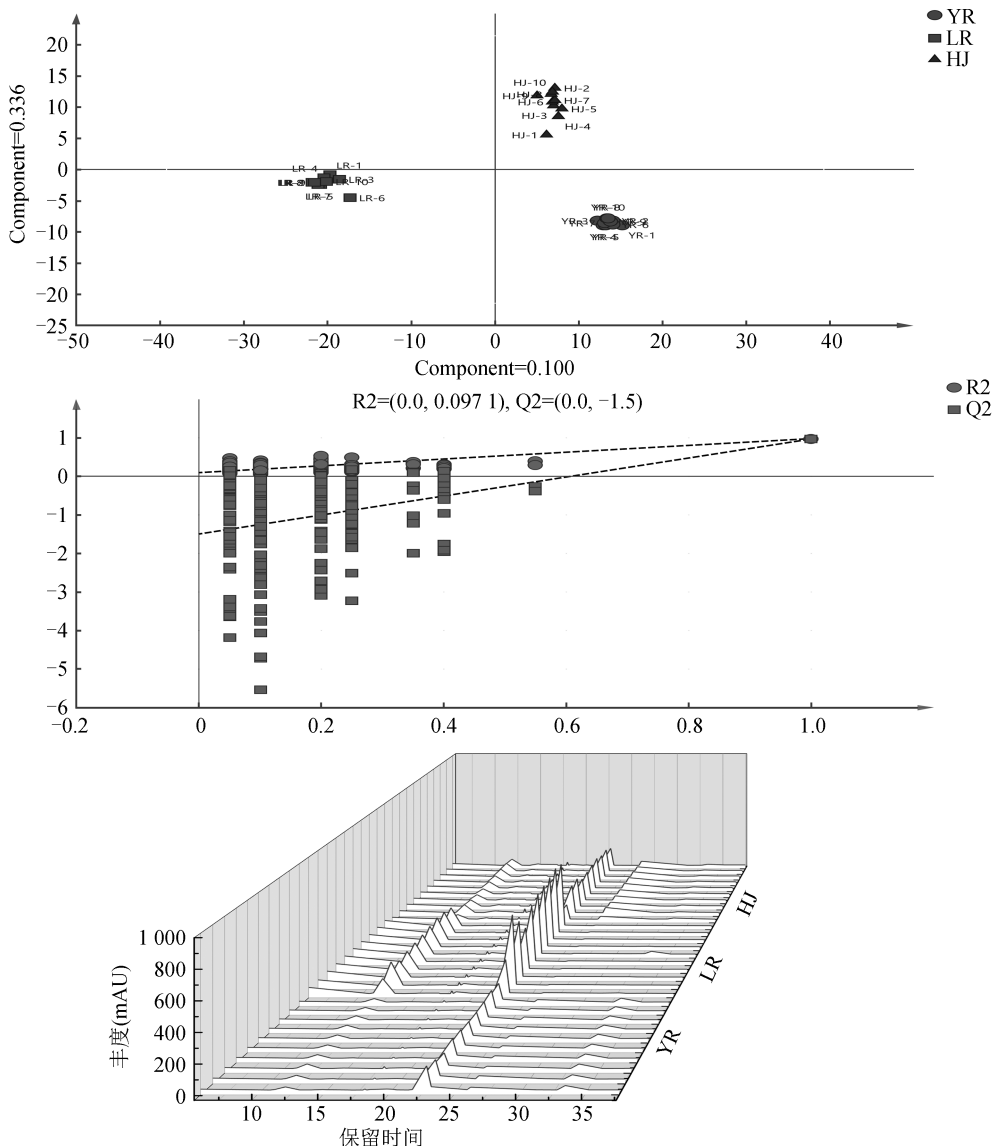


图2 不同部位牦牛肉的正交偏最小二乘判别分析(A)、模型交叉验证结果(B)及风味瀑布图(C)

根据牦牛肉风味成分的峰保留时间、峰面积值等相关参数建立牦牛不同部位肉风味瀑布图谱(图 2C), 如图所示, 牦牛不同部位肉风味瀑布图谱之间具有明显差异。从整体来看, 风味物质的组成非常相似, 但单一成分的含量存在差异, 含量最高的风味组分是酸类, 其次是醇类、醛类和酮类, 其中霖肉中的酸类和酮类化合物的含量远高于眼肉和后腱。研究发现牦牛肉富含丰富的醇类、醛类、醇类物质, 这与蔡雨静等^[26]的研究结果一致, 朱青云等^[27]的研究也证实了这一观点。

醛类物质主要来源于糖类降解和不饱和脂肪酸氧化^[28], 其阈值较低, 但对肉类的风味贡献较大, 是牦牛肉的特征风味化合物^[29]。牦牛不同部位肉中共鉴定出 8 种醛类物质, 分别占据其总质量的 7.31%、9.85%、12.54%。壬醛作为有效鉴别青海牦牛与其他产地牦牛的标志性化合物^[27], 正壬醛在醛类物质的占比为 10.75%, 与前人的研究结果接近。此外, 试验中的醛类主要为 C₅-C₉ 的醛, 其对应的风味主要为脂香和清香^[30]。

醇类物质主要来源于脂肪的氧化^[31], 牦牛不同部位肉中共鉴定出 11 种醇类物质, 分别占据其总质量的 18.82%、7.31%、15.96%。其中 2-乙基己醇在醇类物质中的占比高达 32.58%, 是不同部位牦牛肉的优势醇类, 这与张浩等^[14]的研究结果基本一致。孙斌等^[32]的研究表明里脊中含有较高的醇类化合物, 是牦牛肉独特风味的关键物质。

酮类物质不稳定, 容易被氧化还原为醇类物质, 与醇类相似主要来源于脂肪的氧化^[6,33]。牦牛不同部位肉中共鉴定出 2 种酮类物质, 这可能与作为中间体不稳定的化学性质有关, 分别占据其总质量的 9.23%、20.53%、13.79%。其中 3-羟基-2-丁酮在酮类物质中的占比高达 97.60%, 前人的研究表明 3-羟基-2-丁酮具有浓郁的奶香味^[34], 能够使牦牛肉的风味更加浓郁。

脂类物质是肉类的典型风味, 主要来源于酯化反应^[35], 主要表现为果香味和甜味^[36]。牦牛不同部位肉中共鉴定出 3 种脂类物质, 分别占据其总质量的 1.80%、0.30%、1.60%。前人的研究表明脂类物质的检测阈值较低, 同样属于重要的

风味物质^[9]。

酸类物质主要来源于脂肪酸以及脂类物质的氧化分解, 主要表现为酸味及不愉快的风味, 这可能与牦牛肉特殊气味密切相关。牦牛不同部位肉中共鉴定出 6 种酸类物质, 分别占据其总质量的 65.60%、61.64%、55.68%。马尿酸又名苯甲酰氨基乙酸, 主要来源于食植动物代谢的副产物^[37], 相关研究表明乳品中的乳酸菌能够将马尿酸转化为苯甲酸, 但在牦牛机体内部的转化过程罕见报道。

2.3 牦牛不同部位肉风味成分差异分析

为进一步探究不同风味成分对区牦牛不同部位肉的贡献率, 根据 $VIP > 1$ 及 $p < 0.05$ 的标准, 筛选出 11 种牦牛不同部位肉风味差异物质, 其中醇类 3 种、醛类 4 种、酮类 1 种、酸 3 种。眼肉含量较为突出的风味成分是辛酸和壬醇, 霖肉含量较为突出的风味成分是辛醛、2-乙基己醇、马尿酸、3-羟基-2-丁酮、己醛, 后腱含量较为突出的风味成分是 6-甲基吡啶甲酸、戊醇、癸醛、壬醛。

2.3.1 差异风味的 OAV 值分析

单一风味成分含量高低并不能作为特征香气的判定依据, 相关的研究表明, 特征香味成分通常取决于化合物浓度和气味阈值, 通过测算 OAV 值来判断风味物质对整体的贡献大小。当 $OAV > 1$ 时, 认为该化合物对牦牛肉的风味具有一定的影响, 当 $OAV > 10$ 时, 认为该化合物对牦牛肉的整体风味贡献极大^[38]。表 3 结果表明, 结合相关文献共有 8 种风味成分可计算 OAV 值, 结果均 > 1 , 由此推断上述物质对于牦牛肉的特征风味具有重要作用。

2.3.2 基于差异风味成分的主成分分析

选取 11 种差异风味成分进行归一化处理, 进行主成分分析。由表 4 可知, 4 个主成分的特征值均 > 1 , 其中主成分 1(PC1) 和主成分 2(PC2) 的贡献率分别为 48.26% 和 32.33%, 累计贡献率为 80.59%, 表明该主成分经过降维处理后能够反映整体风味信息。牦牛不同部位肉主成分散点图(图 3A)对不同部位肉的风味物质实现了有效区分。碎石图表明(图 3B), $PC1 > PC2 > PC3 > PC4$, 且 PC1 和 PC2 值远大于 PC3, 说明选取 PC1 和 PC2 分析样本具有较好的可靠性。

表3 牦牛不同部位肉的差异风味成分 OAV 值

化学物质 登录号	物质	阈值 ^[9,14,39-40] /($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	OAV 值			香气描述
			眼肉	霖肉	后腱	
66-25-1	己醛	4.50	1.45±0.07	9.71±0.41	3.90±0.18	青草香、苹果香味
124-13-0	辛醛	0.000 88	6 863.64±363.64	12 045.45±977.27	2 818.18±909.09	果香、橙香味
124-19-6	壬醛	0.003 1	825.81±193.55	2 319.35±177.42	3261.29±670.97	脂肪味、青涩味道
112-31-2	癸醛	0.002 6	276.92±19.23	2 503.85±69.23	1 315.38±153.85	花香味、肥皂香味
71-41-0	戊醇	0.150 2	4.93±0.47	4.40±1.01	13.87±2.27	白兰地香气
104-76-7	2-乙基己醇	0.003 1	3 270.97±809.68	7 100.00±187.10	11 035.48±1932.26	香料气味
513-86-0	3-羟基-2-丁酮	—	—	—	—	奶香味
495-69-2	马尿酸	—	—	—	—	—
143-08-8	壬醇	0.005 3	4 077.35±132.08	1 313.21±79.24	522.64±107.54	—
4080-48-2	6-甲基吡啶甲酸	—	—	—	—	—
124-07-2	辛酸	0.005 1	5 672.54±164.70	903.92±25.49	1 950.98±188.23	脂肪味、蜡味

注:表中数值为平均值±标准差;“—”表示无法计算 OAV 值。

表4 主成分特征值及其贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
PC1	14.00	48.26	48.26
PC2	9.38	32.33	80.59
PC3	1.34	4.62	85.22
PC4	1.12	3.86	89.07

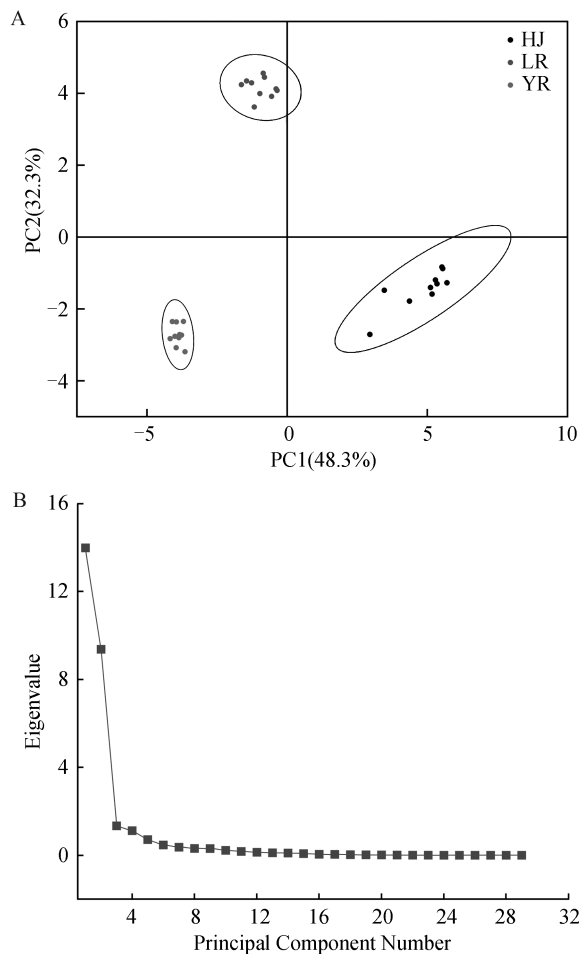


图3 牦牛不同部位肉风味成分主成分散点图(A)和碎石图(B)

2.4 肉品质分析

剪切力能够直观反应肉的嫩度,其数值的大小与肌纤维种类密切相关。肉的嫩度主要取决于结缔组织状态、肌原纤维结构及蛋白水解程度^[41],剪切力数值越高说明肉品的嫩度越好^[42]。如图4A所示,后腱肉的剪切力为169.45 N,分别大于霖肉的69.17 N和眼肉的51.55 N,且存在显著性差异($p < 0.05$)。pH值能够反应肉品的新鲜程度及冻存条件,如图4B所示,眼肉、霖肉、后腱3种部位肉的pH值分别为5.44、5.53、5.78,存在上升的趋势,且3种部位肉之间存在显著性差异($p < 0.05$)。

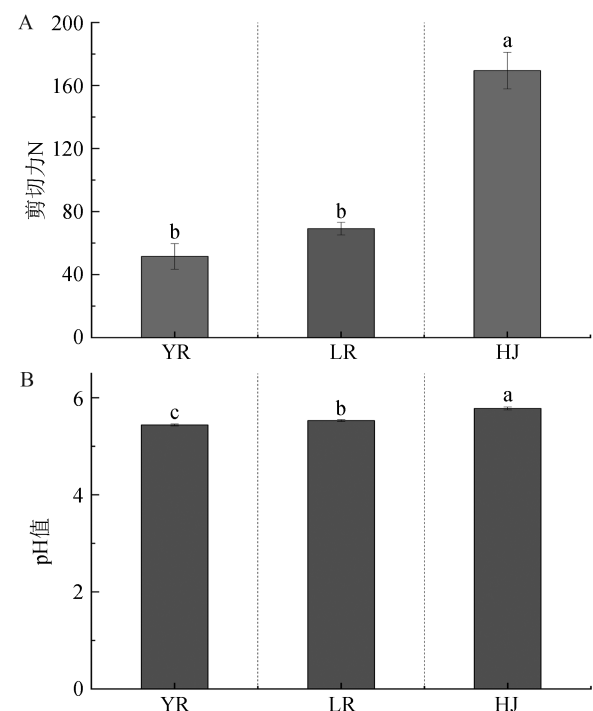


图4 牦牛不同部位肉剪切力(A)和pH值(B)

肉色能够直观反应肉品的新鲜程度^[43],如图 5 所示,后腱的 L^* 值远低于其他部位,且存在显著性差异($p < 0.05$),这可能与肌纤维类型及含水量的差异,从而导致光的折射率变化,相关研究表明,肌肉亮度与鲜肉中胶原蛋白含量呈正相关^[44]。霖肉中的 a^* 值最高为 20.52,高于其他两个部位肉,表明霖肉中的血红蛋白和氧合肌红蛋白等物质含量更丰富^[45]。此外,霖肉中的 b^* 值最高为 13.44,与其他部位肉且存在显著性差异($p < 0.05$),相关研究表明,这可能与肉中的脂肪含量有关^[46]。

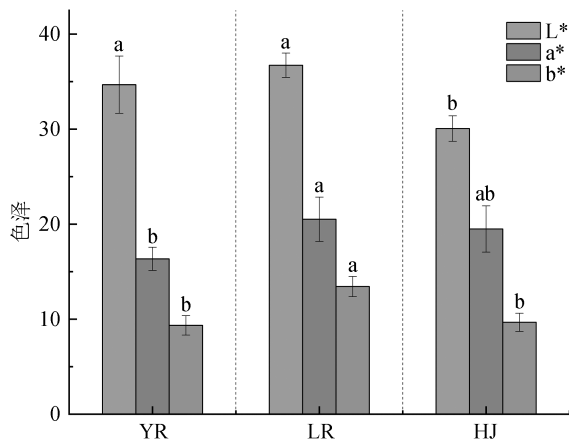


图 5 牦牛不同部位肉色泽

蒸煮损失、离心损失、汁液流失等指标是反应肉品持水性的重要指标,其数值越大表明肉的持水性越差^[47]。牦牛不同部位肉的持水性具有

较大差异(图 6),从整体上看,后腱肉的持水性相对较好,眼肉的蒸煮损失高于霖肉和后腱,霖肉的离心损失和加压损失要高于眼肉和后腱肉,这主要是由肌肉纤维和蛋白质组成差异所导致的^[46]。

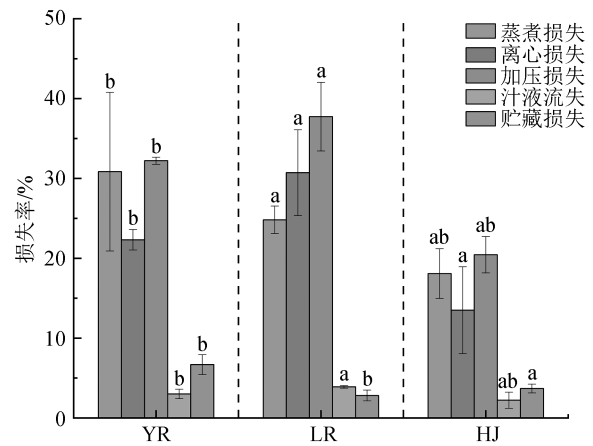


图 6 牦牛不同部位肉的持水性测定

TPA 全质构检测广泛应用于肉品质检测,主要从硬度、粘附性、弹性、胶黏性、咀嚼性等方面描述肉的质构特性^[48]。由表 5 可知,眼肉和霖肉中的 TPA 指标较为接近,无显著性差异($p > 0.05$),而后腱的各项 TPA 指标则明显高于眼肉和霖肉,且存在显著性差异($p < 0.05$),这可能与后腱这一特殊部位的结构和功能所决定的,相关研究表明生物功能、蛋白质类型及占比不同,会导致 TPA 特性差异^[49]。

表 5 牦牛不同部位肉 TPA 特性

组别	眼肉	霖肉	后腱
硬度/N	101.94 ± 12.89b	123.60 ± 34.69b	143.52 ± 14.94a
粘附性/(N · mm ⁻¹)	0.69 ± 0.27b	0.52 ± 0.12b	0.98 ± 0.15a
弹性/mm	3.61 ± 0.62b	3.03 ± 0.44b	5.08 ± 0.95a
胶黏性/N	34.66 ± 2.75b	40.66 ± 18.89b	61.85 ± 12.53a
咀嚼性/mj	126.15 ± 28.69b	125.50 ± 69.18b	323.23 ± 117.72a

3 讨论与结论

本研究采用电子鼻技术对不同部位牦牛肉风味成分进行分析,所形成的风味指纹图谱能够对不同部位肉进行有效区分。采用 HS-SPME-GC-MS 技术对不同部位肉风味物质分析发现,不同部位牦牛肉共检测到 32 种风味成分,其中醛类化合物 8 种、醇类化合物 11 种、酮类化合物 2 种、酯类化合物 3 种、酸类化合物 6 种、萜烯类化合物 2 种。壬醛作为有效鉴别青海牦牛与其他产地牦牛的标志性化合物,壬醛在醛类物质的

占比为 10.75%,风味成分在种类上相似,但在含量上存在明显差异,具有明显的部位特征。

基于 $p < 0.05$ 和 VIP 值 > 1 ,进一步筛选出与肉品质相关的正己醛、正戊醇、1-壬醇、3-羟基-2-丁酮、马尿酸、6-甲基吡啶甲酸、辛酸等 11 个差异风味成分。通过对不同部位肉 OAV 值对比分析,共筛选出 8 种牦牛肉关键香气物质,经过定性及定量得出影响风味差异的化合物分布结果为:2-乙基己醇、壬醇、辛酸主要存在于眼肉中,呈现的风味为香料气味和脂肪味,霖肉中富含己醛、辛醛、癸醛,主要呈现的风味为青草香、

果香和花香,后腱中富含壬醛、戊醇,主要呈现的风味为脂肪味和肥皂香味。采用11种差异风味成分主成分分析表明,两个主成分累计方差贡献率达到80.59%,能够对部位肉整体风味信息进行有效解释,进一步对不同部位肉有效区分进行验证。

不同部位肉品质特性分析发现,后腱剪切力远大于眼肉和霖肉且存在显著性差异($p < 0.05$),表明后腱具有更强的耐咀嚼型,可能更加适应于年轻群体。pH值在不同部位肉中存在显著性差异($p < 0.05$),肉质越细嫩,其pH变化相对就越快,但不利于长期存储。色泽分析发现,霖肉的 a^* 值相对较高,表明霖肉中的血红蛋白和氧合肌红蛋白等物质含量更丰富,在持水性和TPA特性方面,后腱肉要优于其他部位肉。

本研究对牦牛的眼肉、后腱、霖肉的风味成分和品质特性进行对比分析,为牦牛不同部位肉的判别提供了理论参考。基于当前牦牛肉“二分体”或“四分体”售卖的实际情况,通过精细分割、风味分析及品质评价,有助于理解牦牛不同部位肉的品质特点,对生鲜牦牛肉的“精品化”路线及肉产品的深加工提供参考依据。

参考文献:

- [1] 尼玛群宗,达瓦,陈瑶,等.西藏雅江雪牛与牦牛肉质特性比较研究[J].食品安全质量检测学报,2020,11(11):3642-3648.
- [2] 拉毛才让,纪庆慧,陈潮,等.玛多牦牛肉营养成分及风味物质研究[J].中国草食动物科学,2025,45(1):88-94.
- [3] 靳生伟,孙永刚,祁增源,等.冷季不同饲养方式对青海高原型牦牛肉品质的影响[J].饲料研究,2024,47(23):6-11.
- [4] 廖阳慈,李蕊蕊,索朗斯珠,等.西藏自治区牦牛生产现状和趋势分析[J].中国畜禽种业,2023,19(6):72-79.
- [5] ZHU WENYAO, BENKWITZ F, SARMAID B, et al. Validation study on the simultaneous quantitation of multiple wine aroma compounds with static headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(49):15020-15035.
- [6] DENG SIYANG, LIU YUNHE, HUANG FENG, et al. Evaluation of volatile flavor compounds in bacon made by different pig breeds during storage time[J]. Food Chemistry. 2021;357:129765-129765.
- [7] 黄晶晶,周迎芹,张福生,等.6种安徽地方火腿不同部位特征香气的气相色谱-离子迁移谱表征[J].肉类研究,2021,35(8):28-36.
- [8] 皮立,谭亮,曹俊虎.基于多元统计方法不同性别玉树牦牛肉挥发性风味成分差异比较研究[J].肉类研究,2023,37(8):20-26.
- [9] 张婧年,李升升,马纪兵,等.基于GC-IMS的牦牛部位肉特征风味物质分析[J].食品工业科技,2025,46(2):258-270.
- [10] 左子珍,王海波,柴志欣,等.过瘤胃蛋氨酸对牦牛半腱肌肉品质、挥发性风味物质及脂肪酸组成的影响[J].畜牧兽医学报,2024,55(3):1102-1114.
- [11] 李武峰,邱丽霞,关家伟,等.基于HS-SPME-GC-MS和OPLS-DA模型探究不同嫩度驴肉的关键挥发性物质成分差异[J].畜牧兽医学报,2022,53(12):4258-4270.
- [12] 杨媛丽,沙坤,孙宝忠,等.不同养殖模式对牦牛背最长肌挥发性风味物质及脂肪酸组成的影响[J].肉类研究,2020,34(4):46-52.
- [13] 刘梦,张顺亮,臧明伍,等.牛肉干法成熟过程挥发性风味物质的变化规律[J].食品科学,2022,43(16):279-284.
- [14] 张浩,易宇文,张振宇,等.基于固相微萃取-气相色谱-质谱法结合相对气味活度值分析影响牦牛肉风味的关键化合物[J].食品安全质量检测学报,2023,14(15):195-205.
- [15] 黄宇杏,方炜聪,徐纯伟,等.GC-MS-O结合OAV鉴定花生油特征香气成分[J].现代食品科技,2023,39(4):278-288.
- [16] 茹志莹,陈芷雯,吴少福,等.冰温气调保鲜对鸡肉保鲜的影响[J].江西农业大学学报,2020,42(6):1213-1221.
- [17] 周立,张锐,王卫,等.不同气调包装对冷鲜羊肉保鲜效果研究[J].包装工程,2022,43(21):1-9.
- [18] 吴文君.新鲜猪肉贮藏过程的品质变化研究[J].云南农业,2020(9):69-71.
- [19] 刘亚娜,孙宝忠,谢鹏,等.甘南牦牛和青海牦牛肉质特性的对比分析[J].食品工业科技,2016,37(1):71-75.
- [20] 中华人民共和国农业部.肉的食用品质客观评价方法:NY/T 2793-2015[S].北京:中国农业出版社,2015.
- [21] 贾娜,李博文,孔保华.盐水注射及食用胶对酱牛肉品质的影响[J].食品与发酵工业,2015,41(3):96-99.
- [22] 李文东,韩玲,余群力,等.冷却方式对牦牛肉贮藏过程中品质变化的影响[J].食品与发酵工业,2020,46(20):199-207.
- [23] 路立立,胡宏海,张春江,等.气调包装中氧气含量对冷鲜猪肉品质的影响[J].食品与发酵工业,2015,

- 41(7):215-219.
- [24] 张虹艳.电子鼻技术对鸡肉、鸡蛋、羊奶贮藏时间的快速检测[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [25] YUN JING, CUI CHUANJIAN, ZHANG SHIHUA, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea [J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 130033-130033.
- [26] 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.
- [27] 朱青云,李玉林,谭亮,等.顶空固相微萃取-气质联用技术分析青海省不同产地牦牛肉中挥发性风味成分[J].*动物营养学报*,2020,32(6):2831-2849.
- [28] 陈丽兰,吴华昌,胡琦锋,等.不同部位牛肉制作的干扁牛肉品质及挥发性风味成分差异性分析[J].*中国调味品*,2023,48(1):80-86.
- [29] SUN WEIZHENG, ZHAO QIANGZHONG, ZHAO HAIFENG, et al. Volatile compounds of cantonese sausage released at different stages of processing and storage[J]. *Food Chemistry*, 2010,121(2):319-325.
- [30] 郇延军,周光宏,徐幸莲.脂类物质在火腿风味形成中的作用[J].*食品科学*,2004,25(1):186-190.
- [31] MOTTRAM D, EDWARDS R, MACFIE J. A comparison of the flavour volatiles from cooked beef and pork meat systems[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,1982,33(9):934-944.
- [32] 孙斌,崔岩,盛万里,等.顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用分析延边牛不同肌肉组织的挥发性风味物质[J].*肉类研究*,2022,36(4):35-40.
- [33] CHEN MINGJIE, CHEN TONG, QI XINGPU, et al. Analyzing changes of volatile components in dried pork slice by gas chromatography-ion mobility spectroscopy[J]. *Cyta-journal of Food*, 2020,18(1):328-335.
- [34] 顾赛麒,唐锦晶,周绪霞,等.腌腊鱼传统日晒干制过程中品质变化与香气形成[J].*食品科学*,2019,40(17):36-44.
- [35] FOURATI M, SMAOUI S, HLIMA H, et al. Synchronised interrelationship between lipid/protein oxidation analysis and sensory attributes in refrigerated minced beef meat formulated with punica granatum peel extract[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019,55(3):1080-1087.
- [36] REINHARD H, SAGER F, ZOLLER O. Citrus juice classification by SPME-GC-MS and electronic nose measurements[J]. *LWT*,2008,41(10):1906-1912.
- [37] 刘玉娟,韩奕奕,章慧,等.生鲜乳中苯甲酸与马尿酸转化规律的研究[J].*食品工业*,2017,38(7):66-68.
- [38] 冯花,王飞权,张渤,等.不同茶树品种白牡丹茶香气成分的 HS-SPME-GC-MS 分析[J].*现代食品科技*,2021,37(12):252-264,251.
- [39] 邵淑贤,徐梦婷,林燕萍,等.基于电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 技术对不同产地黄观音乌龙茶香气差异分析[J].*食品科学*,2023,44(4):232-239.
- [40] DU WEI, ZHAO MENGYAO, ZHEN DAWEI, et al. Key aroma compounds in Chinese fried food of youtiao[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2019, 35(1):88-98.
- [41] CHRISTENSEN M, ERTBJERG P, FAILLA S, et al. Relationship between collagen characteristics, lipid content and raw and cooked texture of meat from young bulls of fifteen European breeds[J]. *Meat Science*, 2011,87(1):61-65.
- [42] 薛盼盼,章海风,李旭,等.对三粉公驴不同部位肉品质的测定分析[J].*食品科学*,2021,42(22):276-282.
- [43] 王文琪,张雅玮,李加慧,等.蛋白质磷酸化对宰后肉品质影响研究进展[J].*食品科学*,2023,44(9):221-230.
- [44] ATSBHA K, GEBREMARIAM T, AREGAWI T. Slaughter performance and meat quality of Begait breed lambs fattened under different diets[J]. *Helvion*, 2021,7(5):e06935-e06935.
- [45] 王甜甜,朱逸宸,谢勇,等.肌红蛋白在加工贮藏过程中结构与功能特性的变化及其对肉制品色泽的影响研究进展[J].*食品科学*,2023,44(3):393-399.
- [46] 窦玉琴,孙万成,罗毅皓,等.不同部位及地区藏羊肉的肉品质及其组织学特性[J].*食品研究与开发*,2023,44(9):59-68.
- [47] 张远红,董华发,李滢,等.电击晕处理对肉鸽屠宰应激及宰后鸽肉品质的影响[J].*食品科学*,2023,44(5):62-67.
- [48] MODZELEWSKA-KAPITUŁA M, ŻMIJEWSKI T. The influence of age and gender on the quality of raw and roasted wild boars (*Sus scrofa*) meat[J]. *Meat Science*, 2021,181(0):108600-108600.
- [49] JOO S, KIM G, HWANG Y, et al. Control of fresh meat quality through manipulation of muscle fiber characteristics[J]. *Meat Science*, 2013,95(4):828-836.