

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

张浩¹, 易宇文², 张振宇¹, 邓静², 周剑琴¹, 乔明峰², 白婷³, 刘阳^{2*}

(1. 四川旅游学院烹饪学院, 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, 成都 610100; 3. 肉类加工四川省重点实验室, 成都 610106)

摘要: **目的** 辨别影响不同部位牦牛肉风味特征及关键化合物。**方法** 采用固相微萃取气相色谱-质谱法 (solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS) 和电子鼻检测技术, 运用相对气味活度值 (relative odor activity value, ROAV)、偏最小二乘法 (partial least squares discriminant analysis, PLS-DA) 分析影响牦牛肉风味的关键化合物。**结果** 牦牛肉共检测出 60 种化合物, 醛类是牦牛肉含量最高化合物类别。ROAV 最终确定影响牦牛肉风味关键化合物是: 2-乙基-1-己醇、2-乙酰吡咯、壬醛、烯丙基甲基硫醚、辛醛、苯乙醛、丁酸、己醛、己酸、苯甲醛、1-辛醇、2-戊基-呋喃、间二甲苯 13 种共有化合物。其中, 2-乙基-1-己醇使牦牛肉呈现芳香味, 壬醛、辛醛带来清涩香味, 烯丙基甲基硫醚、2-乙酰吡咯、2-戊基-呋喃使牦牛肉呈现烤肉、烤面包的香气, 苯乙醛使牦牛肉具有花香气。影响牦牛肉风味的变量投影重要度值大于 1 的关键化合物: 2-乙基-1-己醇、苯甲醛、1-辛醇、间二甲苯、己酸。电子鼻感应器数据与牦牛肉关键化合物存在相关性。**结论** PLS-DA 证明腰大肌、胸横肌、肋间肌、臂肌风味相似, 半膜肌独立区别于其他样品。电子鼻能够区分不同部位牦牛肉气味特征, 且与 PLS 结果一致; 本研究结果为玉树牦牛肉特征及风味研究提供理论参考依据。

关键词: 牦牛肉; 固相微萃取气相色谱-质谱法; 挥发性化合物; 气味活度值; 偏最小二乘法

Analysis the key compounds affecting the flavor of yak meat based on solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with relative odor activity value

ZHANG Hao¹, YI Yu-Wen², ZHANG Zhen-Yu¹, DENG Jing², ZHOU Jian-Qin¹,
QIAO Ming-Feng², BAI Ting³, LIU Yang^{2*}

(1. Culinary Institute of Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China; 2. Laboratory of Cooking Science of Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China; 3. Laboratory of Meat Processing, Chengdu 610106, China)

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2023YFN0064)、四川省高校重点实验室项目(PRKX2022Z11)、肉类加工四川省重点实验室开放基金科研项目(22-R-05)、四川旅游学院工艺开发与技术支持项目(900201)

Fund: Supported by the Key Research and Development Project of Sichuan Provincial Department of Science and Technology (2023YFN0064), the Key Laboratory Project of Sichuan Provincial Universities (PRKX2022Z11), the Open Fund Research Project of Sichuan Key Laboratory for Meat Processing (22-R-05), and the Process Development and Technical Support Project of Sichuan Tourism University (900201)

*通信作者: 刘阳, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为食品检测。E-mail: 47684620@qq.com

*Corresponding author: LIU Yang, Master, Assistant Professor, Culinary Institute of Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China. E-mail: 47684620@qq.com

ABSTRACT: Objective To identify the flavor characteristics and key compounds affecting different parts of yak meat. **Methods** Using solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS) and electronic nose detection technology, relative odor activity value (ROAV) and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) were used to analyze the key compounds affecting the flavor of yak meat. **Results** A total of 60 compounds were detected in yak meat, and aldehydes were the highest compounds in yak meat. ROAV value results showed that the key compounds that ultimately affect the flavor of yak meat were: 2-ethyl-1-hexanol, 2-acetylpyrrole, nonanal, allyl methyl sulfide, octanal, phenylacetaldehyde, butyric acid, hexanal, caproic acid, benzaldehyde, 1-octanol, 2-pentylfuran, m-xylene, and 13 kinds of common compounds. Among them, 2-ethyl-1-hexanol gave yak meat an aromatic aroma, nonaldehyde octanal gave it a clear and astringent aroma, allyl methyl sulfide, 2-acetylpyrrole, and 2-pentylfuran gave yak meat a roasted meat and toast aroma, and phenylacetaldehyde gave yak meat a floral aroma. The key compounds with variable projection importance value greater than 1 affecting yak flavor were 2-ethyl-1-hexanol, benzaldehyde, 1-octanol, m-xylene and caproic acid. The data of electronic nose sensor were correlated with key compounds of yak meat. **Conclusion** PLS-DA proves that the flavors of yak tenderloin, brisket, sirloin, round are similar, and bottom round are independently different from other samples. The electronic nose can distinguish the odor characteristics of different parts of yak meat, and was consistent with the PLS results. The research results provide theoretical references for the flavor characteristics of Yushu yak meat in the future.

KEY WORDS: yak meat; solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry; volatile compounds; odor activity value, partial least square method

0 引言

青海省是我国养殖牦牛数量最多省份,玉树地区牦牛长期生活在海拔 3500~4500 m 的高寒、高海拔环境^[1],具有独特的风味。玉树散养牦牛肉脂肪低、富含蛋白质、氨基酸以及钙、磷等微量元素^[2],对提高人体免疫力具有显著作用^[3]。目前,牦牛肉研究主要集中在牦牛肉品质、蛋白质、氨基酸、化合物、产业发展等^[4-6],风味化合物和气味阈值相结合的研究很少。高原、散养牦牛肉不同部位的品质特征差异,导致风味特征不同,因此鉴别牦牛肉风味特征,找出关键化合物可以为今后牦牛肉研究提供参考和依据,食品加工企业可以根据不同部位风味特征采用适合的加工方法,更好的呈现牦牛肉品质、风味特点。

固相微萃取(solid phase micro extraction, SPME)作为一种集吸附、浓缩、进样为一体的无溶剂样品前处理方法,与同时蒸馏萃取、搅拌棒萃取、溶剂辅助蒸馏萃取等相比具有操作方便、样品用量少、灵敏度高等特点^[7]。气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)是分离、鉴定物质的有效工具,彭斌等^[8]采用 SPME-GC-MS 分析热风对草鱼肉挥发性物质的影响表明热风干燥的温度和时间对草鱼肉挥发性物质影响显著。电子鼻是能模拟人类嗅闻的智能检测技术,可识别特定气味物质,二者结合能综合分析挥发性化合物特征,刘鑫等^[9]采用电子鼻、电子舌与 SPME-GC-MS 三者结合研究不同替代盐干腌火腿的风味表明火腿整体气味、滋味轮廓和挥发性物质均存在差异;张娅俐等^[10]采用 GC-MS 检测肃南牦牛不

同部位脂肪中脂肪酸组成表明不同部位的脂肪酸含量存在显著差异。相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)分析,是利用化合物感觉阈值结合化合物相对含量,能够找出对牦牛肉风味影响最大的关键化合物;偏最小二乘法(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)分析是有监督模式统计,同主成分分析法(principal component analysis, PCA)无监督分析方法不同,经常被用来处理分类和判别问题^[11]。

本研究以玉树牦牛 5 个主要部位肌肉为研究对象,采用 SPME-GC-MS、电子鼻技术检测挥发性化合物,运用 ROAV、PLS-DA、指纹雷达图谱等方法,分析、判别牦牛肉不同部位整体风味信息,找出影响牦牛肉风味的关键化合物,为今后牦牛肉风味研究提供理论依据,为牦牛肉深加工企业针对不同部位风味特征选用最适宜的加工方式提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

玉树牦牛(青海圣洁高寒农牧科技有限公司提供 2.5 龄牦牛),经过 24 h 低温排酸,再湿式熟成包装 48 h,然后真空包装,冷链运输到实验室,恢复到室温 25℃。样品具体信息见表 1。

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

Q680+Clarus SQ8T 气相色谱质谱联用仪、色谱柱

Elite-5MS (30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(美国 Perkin Elmer 公司); PC-420D 专用磁力加热搅拌装置、75 μm CAR/PDMS 手动萃取头(美国 Supelco 公司); FOX4000 电子鼻(法国 Alpha MOS 公司); BT423S 型电子天平(精度 0.01 g, 德国 赛多利斯公司)。

表 1 牦牛肉 5 个部位样品
Table 1 Samples of 5 parts of yak meat

样品编号	样品名称(学名)	样品部位(俗称)
A	腰大肌	牛背肉
B	胸横肌	牛胸肉
C	肋间肌	牛腩肉
D	臂肌	前腿肉
E	半膜肌	后腿肉

1.3 实验方法

1.3.1 SPME-GC-MS 检测

样品前处理参考张爱萍等^[12]的方法: 分别把 5 个部位牦牛肉剔去筋膜、脂肪, 剁细, 精确称量 4.00 g 放入 20 mL 顶空瓶中, 然后加入 5 mL 饱和纯盐水, 使样品肉糜处于半浸泡状态(盐析, 适量添加 NaCl 可增加溶液离子强度, 提高萃取效率)加防爆盖、密封, 编号待检; 每个样品平行 3 次。

顶空条件: 样品置于磁力搅拌器(55°C 孵育 30 min), 然后将 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。

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 40°C, 保持 3 min, 以 5°C/min, 升至 80°C, 以 10°C/min 升至 120°C, 以 15°C/min 升至 240°C, 保留 3 min。载气: 氦气(99.999%), 流速 1 mL/min, 分流比 10:1。

质谱条件: 电子轰击离子源, 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。

定性、定量分析: 化合物定性以检索 NIST 2011 谱库结合人工解析质谱图进行确定, 保留匹配度大于 700 的成分; 定量采用峰面积归一法计算相对含量。

1.3.2 电子鼻检测

样品处理: 分别把 5 个部位牦牛肉剔去筋膜、脂肪, 剁细, 精确称量 2.00 g 样品, 放入 10 mL 顶空进样瓶中, 密封, 编号待检。

参考袁灿等^[13]的方法: 顶空加热温度 50°C, 加热时间 300 s, 载气流量 150 mL/s, 进样量(顶空气体)500 μL, 数据采集时间 120 s, 采集延迟 180 s。样品测定 10 次, 取后 3 组稳定结果分析。

1.3.3 相对气味活度值

ROAV 是采用挥发性化合物在空气中的气味阈值(μg/kg)计算样品的相对活度值。参考刘登勇等^[14]的研究方法, 先设定牦牛肉风味化合物最大样品 ROAV 为 100, 当

化合物 ROAV>1 时, 表示其对样品风味有贡献, 定义为影响风味的关键化合物; 当 0.01<ROAV<1 时, 表示该化合物对牦牛肉风味特征起辅助作用, 对风味有修饰作用。计算方法见公式(1):

$$ROAV_i \approx \frac{C_{ri}}{C - stan} \times \frac{T - stan}{T_{ri}} \times 100 \quad (1)$$

其中, C-stan 表示以最大化合物的相对含量为标准(%), T-stan 表示以最大化合物阈值作为标准(μg/kg); C_{ri} 表示某个化合物相对含量(%); T_{ri} 表示某个挥发性化合物阈值(μg/kg)。

1.4 数据处理

采用 SPSS 21 分析平均值及标准偏差($\bar{x} \pm s$)、进行显著性(P<0.05)分析、采用 Origin 2021 作图; 采用 SIMCA 14.113.0 进行数据处理、分析。SPME-GC-MS 实验采用 3 次平行、电子鼻实验采用 10 次平行, 取 3 次最佳数据。

2 结果与分析

2.1 牦牛肉挥发性化合物分析

2.1.1 挥发性化合物检测结果

由表 2、图 1 可见, 玉树牦牛肉共检测出 60 种化合物, 包括: 醛类、醇类、烃类、酸类、酮类以及其他杂类含氮、含硫化合物。

醛类是脂类氧化产生的, 是肉类香气主要指标^[15], 分别是: 苯甲醛、壬醛、庚醛、己醛、辛醛、糠醛、苯乙醛、3-噻吩甲醛、十六醛、肉桂醛、葵醛、2-苯基-2-丁烯醛, 合计 12 种; 朱青云等^[16]研究认为壬醛含量较高是青海牦牛肉区别于其他产地牦牛的标志化合物, 样品 D 壬醛相对含量高达 27.77%, 这与该研究结果相似; 魏晋梅^[17]研究认为高含量、低分子量的醛类物质与牛肉风味强度有很大关系, 而样品 C 苯甲醛相对含量高达 24.02%, 是牦牛肉重要化合物; 总体上看, 醛类是玉树地区牦牛肉相对含量最高的化合物类别。

醇类主要源于脂肪氧化^[18], 分别是: 2-乙基-1-己醇、苯甲醇、1-辛醇、1-辛烯-3-醇、1-丁醇、1-庚醇、1-己醇、1-戊醇、甲基-3-丁烯-1-醇、1-壬醇、2-呋喃甲醇, 合计 11 种; 徐若瑗等^[19]研究认为醇类、醚类和烃类一起构成牛肉的芳香风味, 样品 A 中 2-乙基-1-己醇相对含量高达 9.54%, 并且苯甲醇相对含量也高于其他样品, 这与孙斌等^[20]研究发现里脊中醇类化合物含量最高一致, 表明醇类能够为牦牛肉带来独特风味特征。

烃类是肉类氨基酸、脂肪氧化后期产物^[21], 分别是: 间二甲苯、邻二甲苯、对二甲苯、乙基苯、丁基化羟基甲苯、甲苯、萘、十一烷、间异丙基甲苯、2-甲基-萘、1-甲氧基-4-甲基苯, 合计 11 种; 沙坤等^[22]研究认为含苯芳香烃类主要来源于动物饲料, 然后沉积在动物脂肪里。样品 A、B、D 间二甲苯相对含量差异不大, 但是样品 C 间二甲苯相对含量高达 18.00%(样品 C 是牛腩部位, 靠近牛胃部,

因此样品 C 呈现较为浓烈的芳香风味); 样品 E 间二甲苯相对含量仅 1.31%, 且邻二甲苯、对二甲苯相对含量均较低, 表明样品 E 区别于其他样品。

酸类通常是脂肪酸、脂类氧化和酶解产生的, 分别是: 苯甲酸、己酸、壬酸、辛酸、丁酸、癸酸, 合计 6 种; 检测出的相对含量均不大, 由于样品前期屠宰后进行过排酸、熟成的工业加工过程, 提高了牦牛肉品质; 样品 D、E 中丁酸、辛酸等相对含量较高, 区别于其他部位。

酮类是美拉德反应后期产物, 大多具有奶香或是果香^[23], 对风味影响较大; 分别是: 苯乙酮、3-己酮、4-苯基-2-丁酮、2(5H)-呋喃酮, 合计 4 种; 由于采用生肉检测法, 虽然盐析后风味化合物产生较多, 但酮类作为美拉德反应后期产物, 实际检测出酮类物质较少(酮类物质较少, 另一个因素也许是草饲牛肉与谷饲牛肉脂肪含量差异较大);

样品 E 检测出 3-己酮相对含量是其他部位的 10 倍以上与其他样品表现出明显差异。

含硫、含氮、杂环化合物和含羰基化合物阈值一般较低^[24], 却是肉类风味影响最大的化合物, 分别是: 二乙二醇单乙醚、2-乙酰基噻唑、2,4-二叔丁基苯酚、乙酸(2-乙基己基)酯、烯丙基甲基硫醚、苯酚、2-乙酰吡咯、二乙基二硫甲酸甲酯、二甲基三硫化物、2-戊基-呋喃、二甲基二硫化物、甲基吡嗪、三甲基吡嗪、四甲基吡嗪、2,4,5 三甲基-噻唑, 合计 16 种; 样品 E 中 2-乙酰吡相对含量高达 4.70%, 关海宁等^[25]研究表明 2-乙酰吡属于麦香风味物质; 此外, 样品 E 中 2-戊基-呋喃(相对含量 1.24%)、烯丙基甲基硫醚(相对含量 3.83%)、三甲基吡嗪(相对含量 1.20%), 均显著高于其他样品。马建荣等^[26]研究表明 2-戊基-呋喃、烯丙基甲基硫醚、吡嗪类是肉类常见的烧烤风味物质, 表明样品 E 最突出。

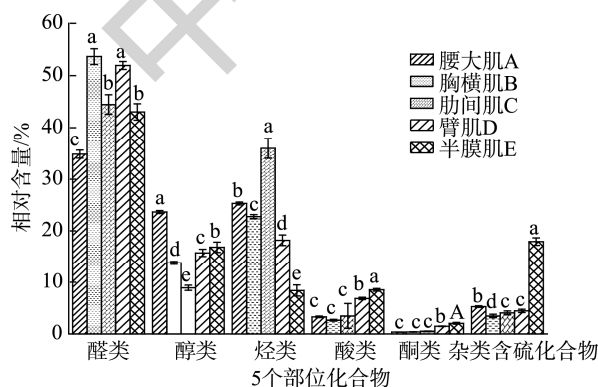
表 2 5 个部位牦牛肉挥发性化合物相对含量(%)
Table 2 Relative content of volatile compounds in yak meat from 5 parts (%)

种类	化合物名称	CAS 号	样品 A 腰大肌	样品 B 胸横肌	样品 C 肋间肌	样品 D 臂肌	样品 E 半膜肌
醛类(12)	苯甲醛	100-52-7	16.33±0.25 ^d	18.14±0.66 ^c	24.02±0.76 ^a	10.34±0.14 ^c	21.85±0.54 ^b
	壬醛	124-19-6	9.76±0.09 ^d	20.91±0.32 ^b	13.25±0.88 ^c	27.77±0.28 ^a	8.44±0.32 ^c
	庚醛	111-71-7	2.51±0.08 ^c	3.75±0.18 ^b	1.34±0.09 ^d	4.63±0.05 ^a	1.10±0.02 ^c
	己醛	75-07-0	2.42±0.10 ^b	4.03±0.02 ^a	1.85±0.02 ^d	2.06±0.08 ^c	1.55±0.05 ^c
	辛醛	124-13-0	1.43±0.09 ^d	5.71±0.17 ^b	2.92±0.04 ^c	6.70±0.16 ^a	1.36±0.03 ^d
	糠醛	35796	0.67±0.05 ^b	0.45±0.10 ^c	0.19±0.02 ^d	0.20±0.02 ^d	1.64±0.12 ^a
	苯乙醛	122-78-1	0.54±0.08 ^b	0.11±0.01 ^d	0.24±0.03 ^c	/	1.78±0.04 ^a
	3-噻吩甲醛	498-62-4	0.44±0.01 ^b	/	/	/	1.31±0.20 ^a
	十六醛	629-80-1	0.4±0.01 ^b	0.33±0.02 ^c	0.33±0.03 ^c	/	1.31±0.06 ^a
	肉桂醛	1504-74-1	0.36±0.03 ^b	0.22±0.01 ^c	/	0.24±0.04 ^c	1.44±0.09 ^a
	葵醛	14371-10-9	/	/	/	/	0.67±0.08 ^a
	2-苯基-2-丁烯醛	4411-89-6	/	/	0.32±0.01 ^b	/	0.58±0.03 ^a
	醇类(11)	2-乙基-1-己醇	68526-83-0	9.54±0.06 ^a	2.88±0.03 ^d	2.96±0.27 ^d	4.72±0.13 ^b
苯甲醇		100-51-6	4.56±0.05 ^a	1.53±0.02 ^d	1.35±0.02 ^c	3.19±0.12 ^b	2.32±0.15 ^c
1-辛醇		111-87-5	4.26±0.05 ^c	4.63±0.07 ^b	2.85±0.04 ^c	5.66±0.22 ^a	3.60±0.20 ^d
1-辛烯-3-醇		3391-86-4	1.28±0.01 ^c	1.75±0.04 ^b	0.81±0.08 ^d	1.63±0.18 ^b	3.23±0.27 ^a
1-丁醇		71-36-3	1.15±0.02 ^b	0.96±0.03 ^c	0.35±0.03 ^d	/	1.74±0.03 ^a
1-庚醇		111-70-6	0.85±0.01 ^b	0.66±0.02 ^c	0.33±0.02 ^d	0.17±0.03 ^c	1.12±0.02 ^a
1-己醇		111-27-3	0.75±0.03 ^a	0.59±0.01 ^b	0.26±0.04 ^d	0.35±0.03 ^c	0.56±0.02 ^b
1-戊醇		71-41-0	0.76±0.04 ^a	0.43±0.02 ^b	/	/	/
甲基-3-丁烯-1-醇		556-82-1	0.26±0.01 ^a	0.23±0.02 ^b	/	/	/
1-壬醇		143-08-8	0.25±0.01 ^a	0.12±0.01 ^b	/	/	0.14±0.02 ^b
2-呋喃甲醇		55038-01-2	/	/	/	/	0.59±0.05 ^a
烃类(11)	间二甲苯	108-38-3	8.72±0.05 ^b	8.79±0.07 ^b	18.00±0.84 ^a	8.50±0.49 ^b	1.31±0.03 ^c
	邻二甲苯	95-47-6	6.83±0.08 ^a	5.15±0.09 ^b	2.79±0.45 ^c	1.83±0.09 ^d	1.73±0.14 ^d
	对二甲苯	106-42-3	3.14±0.04 ^b	3.13±0.03 ^b	4.85±0.26 ^a	2.92±0.07 ^b	0.63±0.01 ^c
	乙基苯	100-41-4	2.66±0.02 ^b	2.73±0.02 ^b	3.96±0.03 ^a	1.87±0.12 ^c	0.97±0.73 ^d
	丁基化羧基甲苯	128-37-0	2.20±0.01 ^a	0.53±0.07 ^c	1.07±0.07 ^b	0.31±0.05 ^d	1.05±0.04 ^b
	甲苯	108-88-3	0.22±0.01 ^c	0.44±0.02 ^b	0.28±0.01 ^c	0.85±0.08 ^a	0.88±0.05 ^a

表 2(续)

种类	化合物名称	CAS 号	样品 A 腰大肌	样品 B 胸横肌	样品 C 肋间肌	样品 D 臂肌	样品 E 半膜肌
酸类(6)	萘	91-20-3	0.58±0.01 ^b	0.43±0.02 ^c	0.36±0.03 ^d	/	0.66±0.02 ^a
	十一烷	1120-21-4	0.96±0.06 ^c	0.75±0.03 ^d	1.13±0.12 ^b	1.53±0.10 ^a	/
	间异丙基甲苯	99-87-6	/	/	3.54±0.12 ^a	/	/
	2-甲基-萘	91-57-6	/	0.38±0.02 ^b	/	/	1.16±0.06 ^a
	1-甲氧基-4-甲基苯	104-93-8	/	0.43±0.02 ^a	/	0.37±0.03 ^b	/
	苯甲酸	65-85-0	1.29±0.02 ^a	0.54±0.01 ^a	1.78±2.28 ^a	1.29±0.07 ^a	1.14±0.03 ^a
	己酸	142-62-1	0.93±0.02 ^c	0.83±0.05 ^c	0.71±0.08 ^d	1.23±0.02 ^b	2.71±0.07 ^a
	壬酸	112-05-0	0.69±0.05 ^c	0.44±0.03 ^c	0.55±0.02 ^d	1.13±0.05 ^a	1.00±0.02 ^b
	辛酸	124-07-2	0.38±0.06 ^c	0.41±0.05 ^c	0.43±0.02 ^c	0.84±0.01 ^b	1.49±0.04 ^a
	丁酸	107-92-6	/	0.42±0.02 ^c	/	1.76±0.02 ^b	2.18±0.09 ^a
酮类(4)	癸酸	334-48-5	/	/	/	0.59±0.06 ^a	/
	苯乙酮	98-86-2	0.31±0.01 ^b	0.23±0.02 ^{cb}	0.23±0.02 ^{cb}	0.17±0.03 ^c	0.60±0.13 ^a
	3-己酮	589-38-8	0.05±0.01 ^c	0.15±0.02 ^b	0.13±0.02 ^b	/	1.44±0.05 ^a
	4-苯基-2-丁酮	2550-26-7	/	/	0.15±0.01 ^b	0.556±0.01 ^a	/
杂类含硫化物(16)	2(5H)-咪喃酮	497-23-4	/	/	/	0.74±0.01 ^a	/
	二乙二醇单乙醚	111-90-0	1.24±0.01 ^a	0.61±0.06 ^d	0.81±0.11 ^c	0.90±0.06 ^c	1.05±0.03 ^b
	2-乙酰基噻唑	24295-03-2	0.75±0.02 ^b	0.48±0.04 ^c	0.47±0.07 ^c	0.41±0.06 ^c	0.92±0.06 ^a
	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	0.98±0.01 ^a	0.62±0.07 ^c	0.66±0.02 ^c	0.76±0.02 ^b	1.07±0.07 ^a
	2-乙基苯乙酯	119-43-7	/	/	0.28±0.01 ^a	/	/
	乙酸(2-乙基己基)酯	31565-19-2	0.62±0.02 ^a	0.60±0.04 ^a	0.38±0.01 ^b	0.59±0.04 ^a	/
	烯丙基甲基硫醚	10152-76-8	0.37±0.03 ^b	/	/	/	3.83±0.15 ^a
	苯酚	108-95-2	0.36±0.02 ^b	/	0.25±0.02 ^c	0.23±0.03 ^c	0.47±0.10 ^a
	2-乙酰吡咯	1072-83-9	0.34±0.01 ^c	0.32±0.03 ^c	0.42±0.02 ^c	0.57±0.02 ^b	4.70±0.12 ^a
	二甲基二硫甲酸甲酯	686-07-7	0.21±0.01 ^a	0.13±0.01 ^c	/	0.15±0.01 ^b	/
	二甲基三硫化物	3658-80-8	0.18±0.01 ^c	0.11±0.02 ^d	0.24±0.01 ^b	0.12±0.02 ^d	1.17±0.05 ^a
	2-戊基-咪喃	100015-12-1	0.15±0.01 ^d	0.27±0.03 ^c	0.47±0.09 ^b	0.55±0.03 ^b	1.24±0.02 ^a
	二甲基二硫化物	624-92-0	0.07±0.01 ^d	0.25±0.02 ^b	0.08±0.01 ^d	0.16±0.02 ^c	1.22±0.02 ^a
	甲基吡嗪	109-08-0	/	/	/	/	0.53±0.02 ^a
	三甲基吡嗪	14667-55-1	/	/	/	/	1.20±0.07 ^a
	四甲基吡嗪	1124-11-4	/	/	/	/	0.52±0.02 ^a
2,4,5 三甲基-噻唑	13623-11-5	/	0.08±0.01 ^a	/	/	/	
总计			92.75±1.69	96.68±2.68	97.39±7.12	98.59±3.09	96.72±4.82

注: 同一行不同小写字母表示具有显著性差异($P<0.05$); /表示未检测到该化合物。



注: 不同小写字母表示组内具有显著性差异($P<0.05$)。

图 1 牦牛肉化合物类别含量比例(%)

Fig.1 Proportion of compound category content in yak meat (%)

2.1.2 相对气味活度值法分析

ROAV: 首先把牦牛肉化合物检测结果中, 相对含量最大的壬醛 ROAV 定义为 100, 然后把壬醛阈值定义为标准($T\text{-stan}=0.0031 \mu\text{g}/\text{kg}$)、壬醛含量定义为相对含量标准($C\text{-stan}=27.98\%$), 然后计算出每个风味化合物的 ROAV, 根据文献定义气味描述。

由表 3 可见, 牦牛肉 ROAV 中影响最大的是 2-乙基-1-己醇(具有香料的特殊芳香气味), 其次是壬醛(浓郁的脂肪味和青涩风味)、辛醛(具有果香味、橙香味)在样品 B、D 中 ROAV 较高, 可能由于是草饲牦牛肉, 靠近胃部肉质含有牧草气味^[29]会较大; 而样品 A、C、E ROAV 较低, 表明不同部位牦牛肉气味强度差异较大;

表3 牦牛肉相对气味活度值含量及其香味描述
Table 3 Relative odor activity value content and aroma description of yak meat

化合物名称	香气类别	风味描述	阈值* /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	ROAV A	ROAV B	ROAV C	ROAV D	ROAV E
苯甲醛	坚果香	杏仁味 ^[16]	0.085	2.14	2.38	3.15	1.36	2.87
壬醛	脂香	浓郁的脂肪味、青涩味 ^[16]	0.0031	35.15	75.30	47.71	100.00	30.39
庚醛	脂香	脂肪酸败味*	0.26	0.11	0.16	0.06	0.20	0.05
己醛	果香	脂肪味、清新的水果味 ^[16]	0.0045	6.00	10.00	4.59	5.11	3.85
辛醛	果香	果香、橙香味*	0.00088	18.14	72.43	37.04	84.99	17.25
糠醛	烘烤香	温和的油腻、烧焦气味*	2.8	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
苯乙醛	花香	强烈的风信子花香 ^[18]	0.00072	8.37	1.71	3.72	0.00	27.60
3-噻吩甲醛	/	/	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
十六醛	花香	花香和蜡的淡淡气味*	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
肉桂醛	/	/	0.14	0.03	0.02	0.00	0.02	0.11
葵醛	花香	花香味、肥皂香味 ^[18]	0.0026	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2-苯基-2-丁烯醛	/	/	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2-乙基-1-己醇	芳香	香料气味*	0.00031	343.54	103.71	106.59	169.97	126.76
苯甲醇	芳香	芳香气味*	0.051	1.00	0.33	0.30	0.70	0.51
1-辛醇	蘑菇香	土腥味、金属味 ^[16]	0.023	2.07	2.25	1.38	2.75	1.75
1-辛烯-3-醇	蘑菇香	蘑菇气味、泥土味 ^[18]	0.048	0.30	0.41	0.19	0.38	0.75
1-丁醇	芳香	有芳香、果味, 甜 ^[18]	0.48	0.03	0.02	0.01	0.00	0.04
1-庚醇	酒香	甜酒香气、坚果味*	0.023	0.41	0.32	0.16	0.08	0.54
1-己醇	果香	水果香、芳香气味*	0.034	0.25	0.19	0.09	0.11	0.18
1-戊醇	酒香	白兰地香气 ^[27]	0.1502	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00
3-丁烯-1-醇	/	有特殊刺激性气味*	0.004	0.73	0.64	0.00	0.00	0.00
1-壬醇	/	/	0.0053	0.53	0.25	0.00	0.00	0.29
2-呋喃甲醇	肉香	烤牛肉香味 ^[28]	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
间二甲苯	芳香	强烈的芳香味 ^[16]	0.18	0.54	0.55	1.12	0.53	0.08
邻二甲苯	芳香	带有甲苯的臭味 ^[16]	1.6	0.05	0.04	0.02	0.01	0.01
对二甲苯	芳香	具有芳香味 ^[16]	0.25	0.14	0.14	0.22	0.13	0.03
乙基苯	芳香	芳香味*	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
丁基化羟基甲苯	/	/	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
甲苯	/	/	0.3	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03
萘	/	/	0.45	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02
十一烷	/	/	5.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
间异丙基甲苯	/	/	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2-甲基-萘	/	/	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
甲氧基-4-甲基苯	/	/	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
苯甲酸	芳香	不好的芳香酸气*	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
己酸	脂香	奶酪味、酸奶油味 ^[27]	0.0048	2.16	1.93	1.65	2.86	6.30
壬酸	芳香	含有特殊的气味*	0.003	2.57	1.64	2.05	4.20	3.72
辛酸	脂香	脂肪味、蜡味 ^[27]	0.0051	0.83	0.90	0.94	1.84	3.26
丁酸	脂香	奶酪味、酸味 ^[27]	0.00094	0.00	5.30	0.00	20.63	26.87
癸酸	脂香	木香、奶酪、酸奶味 ^[17]	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
苯乙酮	/	/	0.0012	2.88	2.14	2.14	1.58	5.58
3-己酮	草香	青草、油脂香气*	0.0527	0.01	0.03	0.03	0.00	0.31
4-苯基-2-丁酮	脂香	奶油味*	0.003	0.00	0.00	0.54	2.07	0.00

表 3(续)

化合物名称	香气类别	风味描述	阈值* /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	ROAV A	ROAV B	ROAV C	ROAV D	ROAV E
2(5H)-呋喃酮	果香	烤焦菠萝香气 ^[17]	0.008	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00
二乙二醇单乙醚	芳香	令人愉快的气味*	2.1	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
2-乙酰基噻唑	烘烤香	玉米花、炒板栗香 ^[17]	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
二叔丁基苯酚	芳香	轻微的苯酚臭味*	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2-乙基苯乙酯	果香	葡萄甜香 ^[17]	0.001	0.00	0.00	3.13	0.00	0.00
乙酸(己基)酯	果香	苹果香、清香*	0.0018	3.85	3.72	2.36	3.66	0.00
烯丙基甲基硫醚	青菜香	蔬菜香气*	0.0005	8.26	0.00	0.00	0.00	85.51
苯酚	芳香	具有特殊的膻味 ^[16]	0.021	0.19	0.00	0.13	0.12	0.25
2-乙酰吡咯	烘烤香	有面包、烤榛子气 ^[17]	0.0004	9.49	8.93	11.72	15.91	131.17
二硫甲酸甲酯	/	/	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
二甲基三硫化物	/	/	0.014	0.14	0.09	0.19	0.10	0.93
2-戊基-呋喃	肉香	烤肉香气 ^[17]	0.0058	0.29	0.52	0.90	1.06	2.39
二甲基二硫化物	/	/	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
甲基吡嗪	烘烤香	烤坚果的甜味 ^[28]	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
三甲基吡嗪	/	/	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
四甲基吡嗪	/	/	/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,4,5 甲基-噻唑	/	/	0.022	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00

注: *相对气味活度阈值数据主要来源于《化合物嗅觉阈值汇编》; 风味描述未标注部分来自网站(<http://www.odour.org.uk>); /表示没有相关数据, 或者是未找到; 阈值单位为 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

气味阈值决定香味, 阈值越高, 香气越弱、阈值越低, 则香气越强^[30], 含硫、含氮、杂环化合物阈值对风味影响较大。牦牛肉烯丙基甲基硫醚(具有蔬菜香味)、2-乙酰吡咯(具有烤面包、烤榛子香气)、2-戊基-呋喃(具有烤肉香气), 在样品 E 中含量较高, 会使样品 E 呈现烤肉、烤面包的香气。这与前面挥发性风味化合物分析结果一致; 样品 E 苯乙醛(带有强烈的风信子花香味)与其他样品差异很大, 说明样品 E 具有浓郁的花香气味;

当化合物 ROAV>1 时, 表示其对样品风味有贡献, 定义为影响风味的关键化合物。因此, 影响牦牛肉风味的关键风味化合物是: 2-乙基-1-己醇、2-乙酰吡咯、壬醛、烯丙

基甲基硫醚、辛醛、苯乙醛、丁酸、己醛、己酸、苯乙酮、壬酸、乙酸(2-乙基己基)酯、辛酸、苯甲醛、2-乙基苯乙酯、1-辛醇、葵醛、2-戊基-呋喃、4-苯基-2-丁酮、间二甲苯, 共计 20 种, 其余的化合物 ROAV<1, 判断对牦牛肉风味特征起辅助作用, 对风味有修饰作用。

表 4 是结合 SPME-GC-MS 得到的关键化合物(相对含量>3%)与 ROAV 法分析得到的主要相对气味活度值(ROAV>1)共同比较后, 最终确定影响牦牛肉风味关键化合物是: 2-乙基-1-己醇、2-乙酰吡咯、壬醛、烯丙基甲基硫醚、辛醛、苯乙醛、丁酸、己醛、己酸、苯甲醛、1-辛醇、2-戊基-呋喃、间二甲苯 13 种影响力最大的化合物。

表 4 主要 ROAV 值样品与 SPME-GC-MS 关键化合物样品对比
Table 4 Comparison of main ROAV samples and SPME-GC-MS key compound samples

中文名称	ROAV: A	ROAV: B	ROAV: C	ROAV: D	ROAV: E	化合物相对含量/%				
						A 腰大肌	B 胸横肌	C 肋间肌	D 臂肌	E 半膜肌
1 2-乙基-1-己醇	343.54	103.71	106.59	169.97	126.76	9.56	2.90	3.14	4.82	3.73
2 2-乙酰吡咯	9.49	8.93	11.72	15.91	131.17	0.35	0.35	0.42	0.59	4.76
3 壬醛	35.15	75.30	47.71	100.00	30.39	9.79	20.93	13.78	27.98	8.48
4 烯丙基甲基硫醚	8.26	0.00	0.00	0.00	85.51	0.39	0.00	0.00	0.00	3.98
5 辛醛	18.14	72.43	37.04	84.99	17.25	1.44	5.89	2.95	6.87	1.40
6 苯乙醛	8.37	1.71	3.72	0.00	27.60	0.58	0.11	0.26	0.00	1.79
7 丁酸	0.00	5.30	0.00	20.63	26.87	0.00	0.45	0.00	1.75	2.28
8 己醛	6.00	10.00	4.59	5.11	3.85	2.45	4.03	1.87	2.00	1.61
9 己酸	2.16	1.93	1.65	2.86	6.30	0.92	0.84	0.70	1.22	2.79
10 苯甲醛	2.14	2.38	3.15	1.36	2.87	16.60	18.89	24.65	10.50	22.24
11 1-辛醇	2.07	2.25	1.38	2.75	1.75	4.25	4.55	2.81	5.64	3.81
12 2-戊基-呋喃	0.29	0.52	0.90	1.06	2.39	0.16	0.29	0.37	0.53	1.22
13 间二甲苯	0.54	0.55	1.12	0.53	0.08	8.73	8.83	18.78	8.68	1.34

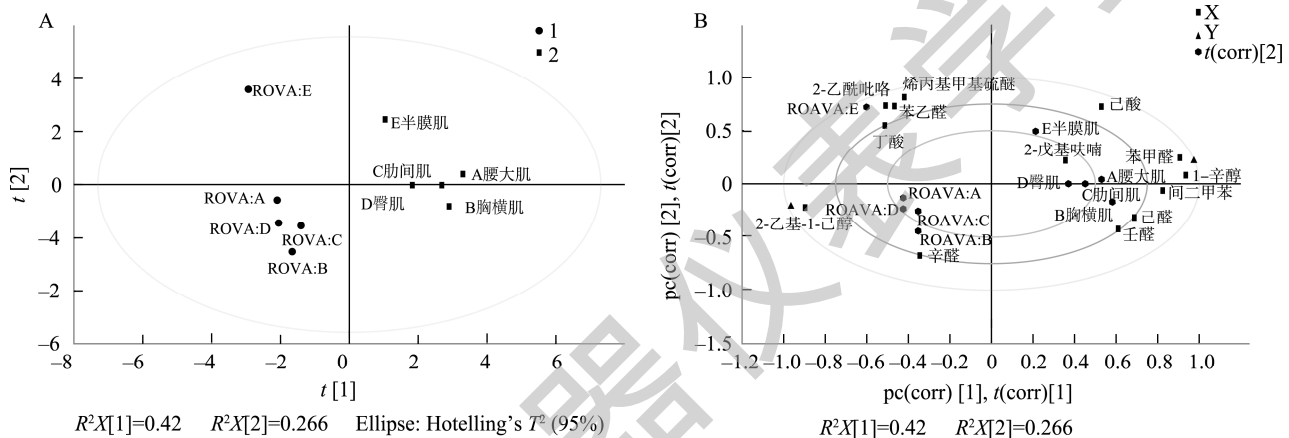
2.1.3 偏最小二乘法分析

PLS-DA 是一种将数据进行降维, 实现复杂数据的可视化及判别分析和预测^[31], 是有监督模式统计分析方法, 需要先进行 DA 判断, 然后进行 PCA-X 分析。

首先以最终确定的风味关键化合物相对含量为解释变量(X), 关键气味阈值为因变量(Y), 图 2 是 PCA-X 双标图, 图 2A DA 判别表明, 采用 PLS-DA 可以把两组样品很好的区分, 且相似率在 95%;

王永瑞等^[32]研究认为挥发性化合物离中心圆点和主要化合物越远, 说明其对已构建的模型贡献最大。图 2B 表明, 挥发性化合物: 样品 A 腰大肌、B 胸横肌、C 肋间肌、D 臀肌显著相关于风味物质壬醛(浓郁脂肪香气、青涩气味)、己醛(脂肪气味、清新的水果气味)、间二甲苯(强烈的芳香气

味)、1-辛醇(蘑菇香味)、苯甲醛(杏仁香气), 表明牦牛肉含有芳香、脂香、果香和坚果风味, 并且 4 个部位风味相似; 而样品 E 半膜肌显著相关于 2-戊基呋喃(烤肉的香气), 说明半膜肌带有烤肉的香气, 且相关于己酸(微带酸味和奶酪的气味), 与其他样品表现出较大风味差异。气味活度值 ROAV: A、B、C、D 样品气味均显著相关于辛醛(带有果香、橙香气味)、且相关于 2-乙基-1-己醇(具有香料气味), 表明牦牛肉芳香浓郁, 整体呈现果木香气, 且这 4 个部位气味相似度较高; 而样品 ROAV: 样品 E 位于第四象限, 显著相关于 2-乙酰吡咯(具有烤面包、烤榛子香气)、烯丙基甲基硫醚(蔬菜香气)、丁酸(奶酪气味、酸味)、苯乙醛(强烈的风信子花香), 表明牦牛肉半膜肌具有烤肉香气、奶酪气味, 并带有一定的花香, 且气味独立于其他样品。



注: A 为 DA 判别图, B 为双标图。

图 2 5 个部位牦牛肉主成分双标图

Fig.2 PCA-X double label of yak meat in 5 parts

采用 SIMCA 软件建立模型 $R^2X=0.814$, $R^2Y=0.994$, $Q^2=0.96$, 当 R^2 和 Q^2 在 0.5~1.0 之间的时候, 模型有较好解释率^[33], 对 PLS-DA 模型进行验证, 根据样本随机排列进行统计学推断^[34], 图 3 可以看出模型能有效拟合, $R^2=(0,$

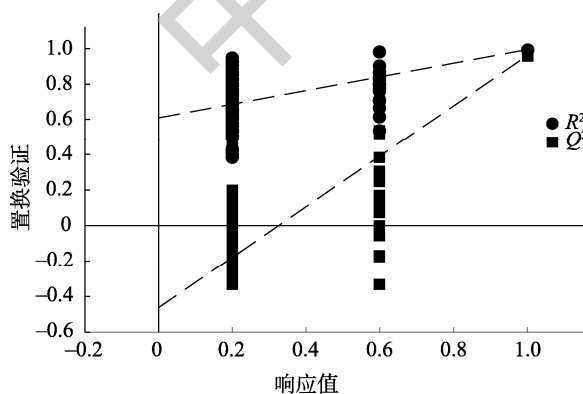


图 3 偏最小二乘法模型验证图

Fig.3 PLS-DA model verification diagram

0.611), $Q^2=(0, -0.473)$, 一共 3 组模型被用于拟合验证, R^2 数值均位于 0 横轴上方, Q^2 回归线是负数, 说明该模型可靠不存在过拟合现象, 模型相关性较好。

再对 PLS-DA 分析结果的变量投影重要度(variable importance or the projection, VIP)值, 如图 4 所示, 可以分辨影响牦牛肉风味的 VIP 值大于 1 的关键化合物: 2-乙基-1-己醇、苯甲醛、1-辛醇、间二甲苯、己酸。

2.2 牦牛肉电子鼻数据分析

2.2.1 电子鼻感应器数据 PCA 分析

图 5 电子鼻主成分图表明: PC1 贡献率为 90.04%, PC2 贡献率为 6.02%, 说明大量有效信息存在于第一主成分。有研究表明, 当 PC1 贡献率远大于 PC2, 说明样品在横坐标距离越大, 其差异性越大^[35]。样品 E 距离横坐标最大, 表明风味特征区别于其他样品; 样品 A 位于第二象限, 远离其他样品, 表现出显著差异性。样品 C、D 位于第一象限, 靠近 X 轴风味与位于第四象限的样品 B 靠近, 风味特征相似。电子鼻主成分图能明显区分牦牛肉风味特征。

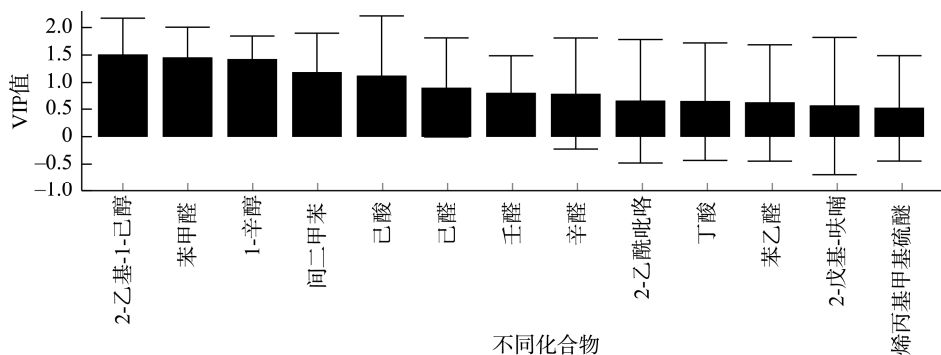


图 4 牦牛肉变量 VIP 值大于 1 的化合物
Fig.4 Yak compound with VIP value greater than 1

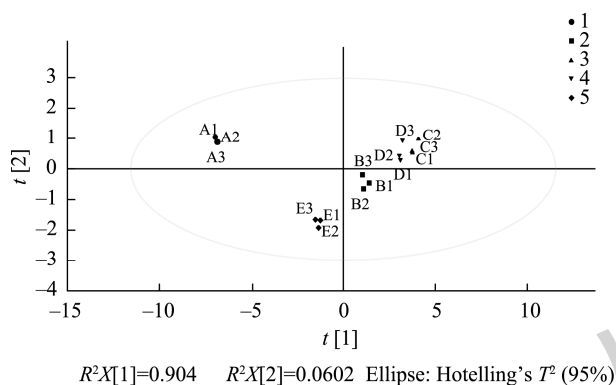
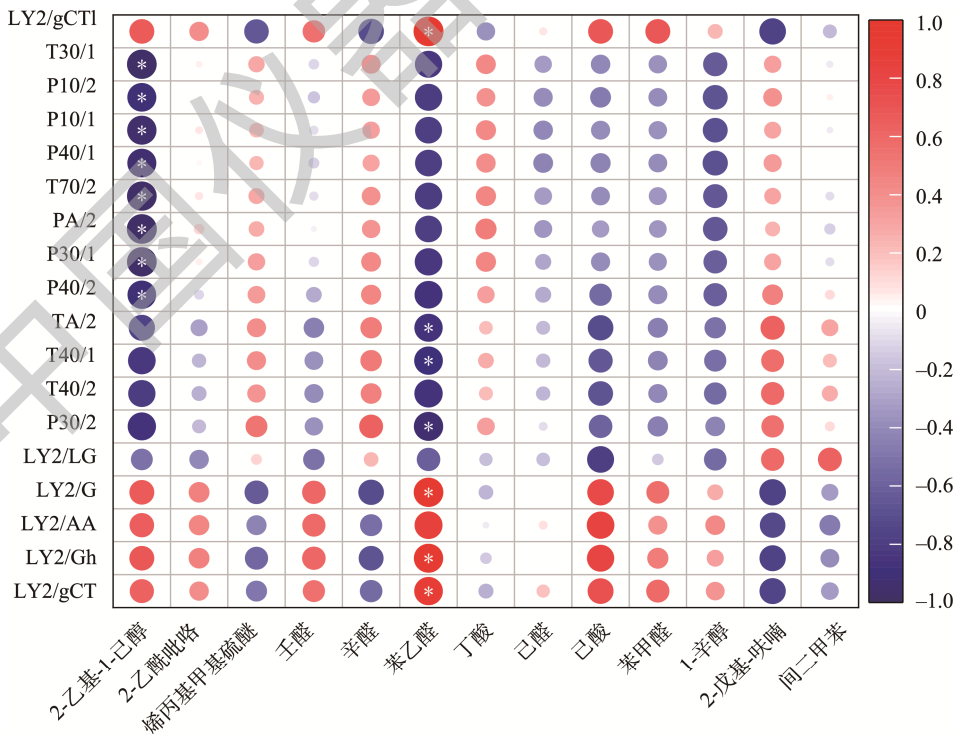


图 5 电子鼻主成分图
Fig.5 Principal component diagram of electronic nose

2.2.2 电子鼻感应器数据与牦牛肉关键化合物相关性分析

将电子鼻感应器数据与关键化合物数据进行 Pearson 线性相关系数分析, 其结果如图 6 所示: 2-乙基-1-己醇和所有的 P 型传感器呈显著负相关($P<0.05$), 与 T 型传感器呈负相关, (仅在 T30/1 呈显著负相关($P<0.05$), 这类传感器对有机化合物、芳香族化合物、极性化合物敏感, 在 LY2/G、LY2/AA、LY2/Gh、LY2/gCT 呈正相关; 苯乙醛则在 LY2/G、LY2/Gh、LY2/gCT、LY2/gCT1 呈显著正相关($P<0.05$), 在 TA/2、T40/1、P30/2 呈显著负相关($P<0.05$), 这类传感器对有机化合物、硫化氢敏感, 如硫化物、硫醚; 2-戊基-呋喃则在 LY2/G、LY2/Gh、LY2/AA、LY2/gCT、LY2/gCT1 呈显著负相关($P<0.05$)。表明关键化合物与传感器数据存在相关性。



注: *表示具有显著性差异, $P<0.05$ 。

图 6 电子鼻感应器数据与关键化合物相对含量相关性图
Fig.6 Correlation diagram between electronic nose sensor data and relative content of key compounds

3 结 论

牦牛肉 5 个部位肌肉共计检测出 60 种风味化合物; 牦牛肉主要化合物是: 壬醛、苯甲醛、间二甲苯、辛醛、邻二甲苯、1-辛醇、对二甲苯、2-乙基-1-己醇、2-乙酰吡咯、庚醛、苯甲醇、己醛、烯丙基甲基硫醚、乙基苯、1-辛烯-3-醇 15 种(样品相对含量>3%); 化合物分析表明: 样品 A、B、C、D 含有芳香、脂香、果香和坚果风味, 4 个部位特征相似; 样品 E 带有烤肉香气, 微带酸味和奶酪气味, 与其他样品表现出较大差异。

牦牛肉 ROAV 值影响最大的风味化合物是: 2-乙基-1-己醇、2-乙酰吡咯、壬醛、烯丙基甲基硫醚、辛醛、苯乙醛、丁酸、己醛、己酸、苯乙酮、壬酸、乙酸(2-乙基己基)酯、辛酸、苯甲醛、2-乙基苯乙酯、1-辛醇、葵醛、2-戊基-呋喃、4-苯基-2-丁酮、间二甲苯, 共计 20 种(样品 ROAV 值>1%)。相对气味活度值分析表明: 样品 A、B、C、D 气味相似, 均为芳香浓郁, 整体呈现果木香气; 样品 E 具有烤肉香气、奶酪气味, 并带有一定的花香, 气味独立于其他样品, 这应该是含量远高于其他样品的 2-戊基呋喃带来的烤肉香气、乙酸带来微酸味和奶酪的气味, 花香应该是各种芳香类化合物的共同作用。

最终确定影响牦牛肉风味关键化合物是: 2-乙基-1-己醇、2-乙酰吡咯、壬醛、烯丙基甲基硫醚、辛醛、苯乙醛、丁酸、己醛、己酸、苯甲醛、1-辛醇、2-戊基-呋喃、间二甲苯 13 种影响力最大化合物。

电子鼻能够区分不同部位牦牛肉气味特征, 电子鼻传感器数据与关键化合物数据存在明显相关性; 本研究旨在建立青海牦牛肉不同部位风味特征轮廓, 找出影响牦牛肉风味的关键化合物, 为今后牦牛肉风味研究提供理论依据和参考。

参考文献

- [1] 方有贵. 青海牦牛遗传资源的保护和利用[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2021, 51(3): 62-66.
FANG YG. Protection and utilization of Qinghai yak genetic resources [J]. Qinghai J Anim Husband Veter Sci, 2021, 51(3): 62-66.
- [2] 拜彬强, 郝力壮, 柴沙驼, 等. 牦牛肉品质特性研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(17): 290-296.
BAI SQ, HAO LZ, CHAI ST, *et al.* Research progress on quality characteristics of yak meat [J]. Food Sci, 2014, 35(17): 290-296.
- [3] 洪晶, 张娅俐, 张棚, 等. 肃南牦牛不同部位肉品质评价研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(18): 7153-7159.
HONG J, ZHANG YL, ZHANG P, *et al.* Evaluation of meat quality of different parts of Sunan yak [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(18): 7153-7159.
- [4] 罗毅皓, 刘书杰. 青海大通牦牛肉氨基酸及风味分析[J]. 食品科技, 2010, 35(2): 106-110, 113.
LUO YH, LIU SJ. Amino acid and flavor analysis of Qinghai Datong yak meat [J]. Food Sci Technol, 2010, 35(2): 106-110, 113.
- [5] 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.
LIU YN, SUN BZ, XIE P, *et al.* Comparative analysis of meat quality characteristics of Gan nan yak and Qinghai yak [J]. Food Ind Sci Technol, 2016, 37(1): 71-75.
- [6] 罗毅皓, 刘书杰. 青海大通牦牛肉氨基酸及风味分析[J]. 食品科技, 2010, 35(2): 106-110, 113.
LUO YH, LIU SJ. Amino acid and flavor analysis of Qinghai Datong yak meat [J]. Food Sci Technol, 2010, 35(2): 106-110, 113.
- [7] 陈佳新, 孔保华. 气质联用分析肉制品中风味物质的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(23): 202-206.
CHEN JX, KONG BH. Research progress in the analysis of flavor substances in meat products by GC-MS [J]. Food Res Dev, 2016, 37(23): 202-206.
- [8] 彭斌, 胡文婷, 胡祥飞, 等. 基于固相微萃取-气相色谱-质谱法分析热风干燥对草鱼肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(18): 5786-5794.
PENG B, HU WT, HU XF, *et al.* Analysis of the effect of hot air drying on volatile flavor compounds in grass carp meat based on solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(18): 5786-5794.
- [9] 刘鑫, 牟柏德, 鞠铭, 等. 基于 SPME-GC-MS、电子鼻、电子舌技术联用对不同替代盐干腌火腿风味成分表征[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 246-256.
LIY X, MOU BD, JU M, *et al.* Characterization of flavor components of dry cured ham with different salt substitutes based on SPME-GC-MS, electronic nose and electronic tongue technology [J]. Food Sci, 2022, 43(6): 246-256.
- [10] 张娅俐, 洪晶, 张棚, 等. 肃南牦牛不同部位脂肪中脂肪酸组成分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(18): 7168-7174.
ZHANG YL, HONG J, ZHANG P, *et al.* Analysis of fatty acid composition in different parts of fat of Sunan yak [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(18): 7168-7174.
- [11] 申晨曦, 杜晨晖, 李震宇, 等. 基于氢核磁共振与偏最小二乘法对酸枣仁及其掺伪品的鉴别[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 275-281.
SHEN CX, DU CH, LI ZY, *et al.* Identification of sour jujube kernel and its adulterants based on hydrogen nuclear magnetic resonance and partial least square method [J]. Food Sci, 2020, 41(8): 275-281.
- [12] 张爱萍, 李杨, 翟玉秀, 等. 顶空固相微萃取结合气质联用技术结合相对气味活度值对甘肃细毛羊肉特征挥发性风味物质的研究[J]. 畜牧兽医杂志, 2020, 39(3): 5-10.
ZANG AIP, LI Y, ZHAI YX, *et al.* Study on the characteristic volatile flavor compounds of Gansu fine wool mutton by headspace solid phase microextraction combined with gas chromatography coupled with relative odor activity values [J]. J Anim Husband Veter Med, 2020, 39(3): 5-10.
- [13] 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 C, HE L, HU JX, *et al.* Analysis of flavor differences between fish flavored shredded meat seasonings based on electronic tongue and electronic nose combined with amino acids [J]. Food Ind Sci Technol, 2022, 43(9): 48-55.
- [14] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲, 等. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROA”法[J]. 食品科学, 2008, (7): 370-374.
LIU DY, ZHOU GH, XU XL, *et al.* A new method for determining key flavor compounds in food: the “ROA” method [J]. Food Sci, 2008, (7): 370-374.
- [15] ZHANG X, WEI JP, ZHAO SY, *et al.* Flavor differences between commercial and traditional soybean paste [J]. LWT-Food Sci Technol,

- 2021, 142: 111052.
- [16] 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.
- ZHU QY, LI YL, TAN L, *et al.* Analysis of volatile flavor components in yak meat from different habitats in Qinghai Province using headspace solid phase microextraction coupled with gas chromatography/mass spectrometry [J]. *J Anim Nutr*, 2020, 32(6): 2831–2849.
- [17] 魏晋梅. 小牛肉风味物质、脂肪酸分析及镇静剂类药物残留检测方法研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015.
- WEI JM. Analysis of flavor substances and fatty acids in veal and study on the detection method of residues of sedatives [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015.
- [18] MOTTRAM DS, EDWARDS RA, HALLADAY-ACACIA JH. A comparison of the flavor volatiles from cooked beef and pork meat system [J]. *J Sci Food Agric*, 2010, 33(9): 934–940.
- [19] 徐若瑗, 薛纪元, 王敏, 等. 不同热处理方式对牛肉嫩度和挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 44(4): 77–87.
- XU RY, XUE JY, WANG M, *et al.* Effects of different heat treatment methods on beef tenderness and volatile flavor compounds [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2022, 44(4): 77–87.
- [20] 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.
- SUN B, CUI Y, SHENG WL, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds in different muscle tissues of Yanbian cattle by headspace solid phase microextraction coupled with gas chromatography mass spectrometry [J]. *Meat Res*, 2022, 36(4): 35–40.
- [21] 万晓玉, 向昱州, 周莺茹, 等. 冷吃牛肉特征风味物质[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 272–279.
- WAN XY, XIANG YZ, ZHOU YR, *et al.* Characteristic flavor substances of cold eating beef [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48 (19): 272–279.
- [22] 沙坤, 郭江南, 郎玉苗, 等. 牦牛干巴和黄牛干巴挥发性风味特征与差异分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 233–239.
- SHA K, GUO JN, LANG YM, *et al.* Volatile flavor characteristics and difference analysis of yak and yellow cattle jerky [J]. *J Agric Mach*, 2015, 46 (12): 233–239.
- [23] 罗玉龙, 靳志敏, 刘夏炜, 等. 肉制品中香味物质形成原因研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(2): 5.
- LUO YL, JIN ZM, LIU XW, *et al.* Research progress on the formation of aroma substances in meat products [J]. *Food Ferment Ind*, 2015, 41(2): 5.
- [24] 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.
- YANG YL, SHA K, SUN BZ, *et al.* Effects of different farming modes on volatile flavor compounds and fatty acid composition of the longissimus dorsi muscle of yaks [J]. *Meat Res*, 2020, 34(4): 46–52.
- [25] 关海宁, 徐筱君, 孙薇婷, 等. 肉汤中特征风味体系的形成机理及分析方法研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(1): 66–73.
- GUAN HL, XU XJ, SUN WT, *et al.* Progress in the formation mechanism and analytical methods of characteristic flavor systems in broth [J]. *Meat Res*, 2021, 35(1): 66–73.
- [26] 马建荣, 潘腾, 王振宇, 等. 传统炭烤羊腿特征挥发性风味物质分析[J]. 肉类研究, 2019, 33(1): 50–54.
- MA JR, PAN T, WANG ZY, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds in traditional charred lamb legs [J]. *Meat Res*, 2019, 33(1): 50–54.
- [27] 李扬, 李妍, 李栋, 等. 基于 ROAV 和嗅闻技术分析乳脂的关键风味化合物[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 262–267.
- LI Y, LI Y, LI D, *et al.* Analysis of key flavor compounds in milk fat based on ROAV and olfactory techniques [J]. *Food Sci*, 2023, 44(6): 262–267.
- [28] 刘同, 杨悠悠, 刘大鹏, 等. 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 T, YANG YY, LIU DP, *et al.* Identification of specific volatile flavor compounds in breast muscles of meat ducks [J]. *J Anim Husband Veter Med*, 2022, 53(2): 402–413.
- [29] 陈佳欣, 张英杰. 羊肉风味的形成及影响因素研究[J]. 饲料工业, 2020, 41(23): 22–26.
- CHEN JX, ZHANG YJ. Study on the formation and influencing factors of mutton flavor [J]. *Feed Ind*, 2020, 41(23): 22–26.
- [30] 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 CR, MA MH. Meat and meat product technology [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2002.
- [31] 胡雪, 李锦松, 唐永清, 等. 基于 GC-MS 结合化学计量学的浓香型白酒分类方法[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(8): 212–217.
- HU X, LI JD, TANG YQ, *et al.* Classified Lu-Zhou flavor wine based on GC-MS combined with chemometrics [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(8): 212–217.
- [32] 王永瑞, 柏霜, 罗瑞明, 等. 基于电子鼻、GC-MS 结合化学计量学方法鉴别烤羊肉掺假[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 291–298.
- WANG YR, BAI S, LUO RM, *et al.* Identification of adulterated roasted mutton based on electronic nose, GC-MS combined with chemometrics [J]. *Food Sci*, 2022, 43(4): 291–298.
- [33] QI Y, PI ZF, LIU SZ, *et al.* A metabonomic study of adjuvant induced arthritis in rats using ultra-performance liquid chromatography coupled with quadrupole time-of-flight mass spectrometry [J]. *Mol Biosyst*, 2014, 10(10): 2617–2625.
- [34] PERS T, ALBRECHTSEN A, HOLST C, *et al.* The validation and assessment of machine learning: A game of prediction from high dimensional data [J]. *PLoS One*, 2009, 4(8): e6287.
- [35] 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 TT, NAN JX, LIN M, *et al.* Volatile flavor compounds in Yan Bian yellow beef [J]. *Food Mach*, 2018, 34(8): 45–47.

(责任编辑: 韩晓红 郑 丽)

作者简介



张 浩, 讲师, 主要研究方向为食品风味化学。

E-mail: 283184500@qq.com



刘 阳, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为食品检测。

E-mail: 47684620@qq.com