

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240422004

固相微萃取结合气相色谱-质谱法测定内蒙古通辽牛肉中挥发性风味物质

赵志惠, 张燕东, 盈盈, 李润航, 降晓伟, 刘江英, 黄奕颖, 阿嘎日, 吴洪新*

(1. 中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010000; 2. 通辽市科尔沁区农畜产品质量安全中心, 通辽 028000)

摘要: **目的** 探究内蒙古通辽地区牛肉中挥发性风味物质及特征风味物质, 以牛肉的前腿、后腿和背脊为研究对象, 对其挥发性风味物质进行测定分析。**方法** 利用固相微萃取结合气相色谱-质谱法(solid phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS)及AOC-6000自动进样器对牛肉3个部位共12个样本进行分析。**结果** 共鉴定出117种挥发性成分, 包括酮类、醇类、醛类、酸类、酯类、烷烃类和其他类化合物。利用偏最小二乘判别分析及聚类热图分析, 较好的识别3个部位之间的关系, 结合相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)初步得出影响通辽牛肉的9种风味化合物, 分别为十六醛、己醛、庚醛、辛醛、壬醛、(E)-2-壬烯醛、癸醛、(E)-2-癸烯醛和1-辛烯-3-醇。**结论** 本研究探讨了通辽牛肉3个部位中挥发性风味物质的相互关系, 初步确定牛肉的关键性风味化合物, 以为提升牛肉风味及其品质评价提供科学依据。

关键词: 通辽牛肉; 挥发性风味物质; 不同部位; 相对气味活度值

Determination of volatile flavor compounds in Inner Mongolia Tongliao beef by solid phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry method

ZHAO Zhi-Hui, ZHANG Yan-Dong, YING-Ying, LI Run-Hang,
JIANG Xiao-Wei, LIU Jiang-Ying, HUANG Yi-Ying, A Ga-Ri, WU Hong-Xin*

(1. Institute of Grassland Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010000, China;
2. Tongliao Keerqin District Agricultural and Livestock Product Quality and Safety Center, Tongliao 028000, China)

ABSTRACT: Objective To explore the volatile flavor compounds and characteristic flavor compounds in beef from the Tongliao region of Inner Mongolia, and to determine and analyze the volatile flavor compounds in the front leg, hind leg and back of beef. **Methods** This article used gas chromatography-mass spectrometry combined with solid-phase microextraction and AOC-6000 automatic sampler to analyze a total of 12 samples from three parts of beef. **Results** A total of 117 kinds of volatile components were identified, including ketones, alcohols, aldehydes, acids, esters, alkanes, and other compounds. Partial least squares discriminant analysis and cluster heatmap analysis were used to better identify the relationship between the three parts. Combined with relative odor activity value, 9 kinds of common key flavor substances were identified, namely hexadecanal, hexanal, heptanal, octanal, nonanal,

*通信作者: 吴洪新, 硕士, 研究员, 主要研究方向为牧草及草畜产品品质评价。E-mail: wuhongxin168@163.com

*Corresponding author: WU Hong-Xin, Master, Professor, Institute of Grassland Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010000, China. E-mail: wuhongxin168@163.com

(*E*)-2-nonenal, decanal, (*E*)-2-decenal and 1-octen-3-ol, respectively. **Conclusion** The interrelationships of volatile flavor substances in three parts of Tongliao beef were explored, and the key flavor substances of beef were preliminarily identified, with a view to providing a scientific basis for enhancing the flavor of beef and its quality evaluation.

KEY WORDS: Tongliao beef; volatile flavor; different part; relative odor activity value

0 引言

内蒙古通辽市地处科尔沁草原的腹地,是以农牧为主的经济类型区,享有“黄牛之乡”的美誉,因其独特的资源及地域优势,通辽市已成为内蒙古自治区发展肉牛产业的重要区域^[1]。牛肉因其高蛋白、低脂肪、富含丰富的维生素 B 和矿物质,具有补精血、温经脉、滋养脾胃等作用而广受消费者欢迎^[2-3]。通常消费者购买牛肉更加愿意选择鲜嫩、多汁且风味口感好的产品,而在嫩度和多汁性差异不大的情况下,风味更佳的牛肉便成为人们的最佳选择^[4-6]。随着生活水平的提高,人们对食品风味的要求也不断提高。但目前对于内蒙古通辽牛肉及其他地方特色牛肉的风味品质研究还很少。

牛肉风味物质主要是由水溶性小分子化合物和脂肪酸经热诱导后形成的非挥发性滋味物质和挥发性气味物质构成^[7],在肉制品加工过程中,脂类被脂肪酶水解产生游离脂肪酸等风味前体,然后进一步氧化形成挥发性风味化合物^[8]。目前,用于检测肉类中风味物质的研究方法有高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)^[9]、气相色谱法(gas chromatography, GC)^[9]、质谱法(mass-spectrometric, MS)^[9]、核磁共振技术(nuclear magnetic resonance, NMR)^[9]、电子鼻和电子舌技术^[10]、气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)^[11]等,由于气相色谱-质谱技术结合了 GC 和 MS 的优点,能够同时进行定性和定量分析,因而被广泛应用。固相微萃取技术(solid phase microextraction, SPME)可以将目标分析物吸附在微量固相吸附剂表面,从而实现萃取、分离、富集及分析检测^[12],在测定食品风味方面由于无溶剂、易操作、高灵敏度、高效浓缩、操作简单快速、低成本等特点及优势,已成为一种理想的食品风味测定方法。

因此,本研究通过固相微萃取结合气相色谱-质谱法(solid phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS)及 AOC-6000 自动进样装置分别对通辽牛肉 3 个部位中挥发性风味物质进行了测定分析,并通过偏最小二乘法判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)及聚类热图分析判断其相关差异,通过计算相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)筛选影响通辽牛肉的特征风味物质,以期为牛肉的风味品质提升提供科学的数据理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

牛肉样品按照 NY/T 5344.1—2006《无公害食品 产品抽样规范》第 1 部分通则、NY/T 5344.6—2006《无公害食品 产品抽样规范》第 6 部分畜禽产品规定的方法进行抽样,4 头牛肉样本经屠宰分割后,分别从每头牛胴体的前腿、后腿、背部 3 个部位取样分装,共计 12 个样品,运输过程中保持保温箱内温度不高于 4℃,24 h 内抵达送检测实验室。

氯化钠(分析纯,天津市鑫铂特化工有限公司)。

1.2 仪器与设备

GCMS-TQ8040 三重四极杆气质联用仪(附带 AOC-6000 自动进样器)、80 μm DVB/Carbon WR/PDMS 萃取纤维头、Rtx-5MS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(日本岛津公司);MR9405 高速组织搅拌机(广东新宝电器股份有限公司);电子天平[精度 0.01 g,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

将各牛肉样品 500~1000 g 用高速组织搅拌机搅成肉糜状,放置在自封袋中,-20℃冷冻备用。

1.3.2 实验条件

固相微萃取条件:称取 2.00 g 氯化钠于 20 mL 顶空进样瓶底部,再称取 5.00 g 牛肉样品,拧紧瓶盖,置于仪器自带的固相微萃取装置进样盘上。

1.3.3 自动进样装置设置条件

老化温度 250℃;老化时间:2 min;萃取温度 80℃;萃取时间:40 min;解析时间 3 min。

1.3.4 GC-MS 条件设置

色谱柱型号 Rtx-5MS (30 m×0.25 mm, 0.25 μm),柱初温:40℃,保留时间 2 min;8℃/min 升温至 150℃,不保持;10℃/min 升温至 260℃保持 15 min;分流比 5:1;质谱离子源 EI;离子源温度 220℃;接口温度 260℃;电子轰击能量 70 eV;采集方式:Q3 Scan;扫描范围 35~350 (*m/z*)。经过分离的各挥发性组分通过 Nist20 谱库进行定性分析,且匹配度大于 80 的组分予以确认,利用峰面积归一化法计算各组分相对含量。

1.4 ROAV

参考刘登勇等^[13]对于确定食品关键风味化合物的方法, 计算 ROAV 按以下公式(1)计算。

$$ROAV_i = 100 \times \frac{C_i}{C_{\max}} \times \frac{T_{\max}}{T_i} \quad (1)$$

其中 $ROAV_i$ 表示某挥发性风味物质的 ROAV; C_i 表示某挥发性风味物质的相对含量, C_{\max} 表示贡献最大风味物质的相对含量, T_{\max} 表示最大贡献风味物质的阈值, T_i 表示某种风味化合物的阈值。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件对原始数据进行整合计算, 运用 Origin Pro 2021 软件及 Metabo Analyst 6.0 网站作图。

2 结果与分析

2.1 挥发性风味物质组分分析

采用 SPME-GC-MS 法分别对牛肉的 3 个部位 12 个样

本进行分析, 共鉴定出 117 种挥发性风味物质, 其中酮类 6 种, 醇类 21 种, 醛类 27 种, 羧酸类 8 种, 酯类 12 种, 烃类 34 种, 其他类 9 种, 其中其他类化合物包括呋喃类、吡嗪类、含硫化合物及杂环类。采用峰面积归一化法计算各组相对含量, 结果见表 1。

如图 1 所示, 牛肉各部位中醛类平均相对含量最高, 醛类化合物通常由于脂肪氧化而产生^[14], 且阈值较低, 具有强烈的挥发性及脂肪香味, 对肉类风味的贡献较大, 被认为是肉类风味的主要挥发性成分之一^[15], 同时也是食物风味的重要来源^[16]。其次是醇类化合物, 醇类化合物是由肌肉中的亚油酸被脂肪酶及氢氧化物酶氧化降解产生^[17], 醇类化合物风味柔和^[18], 对于提升肉质的风味具有一定作用^[19], 羧酸类化合物与烃类化合物含量相近, 其中羧酸类化合物主要由肌肉中甘油酯和磷脂酶或加热氧化产生, 由于其阈值较高^[20], 对牛肉的风味影响不大。烃类化合物主要由脂肪酸的烷氧自由基均裂产生^[21], 由于其阈值较高, 对风味贡献较小^[22], 酯类化合物由游离氨基酸与醇相互作用

表 1 牛肉各部位挥发性风味物质结果 (%)
Table 1 Results of volatile flavor compounds in various parts of beef (%)

| 序号 | 化合物名称 | Cas 号 | A1 | A2 | A3 | A4 | B1 | B2 | B3 | B4 | C1 | C2 | C3 | C4 |
|----|----------------------|-------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 酮类 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 3-羟基-2-丁酮 | 513-86-0 | 1.63 | 3.71 | 1.99 | 5.34 | 3.20 | 2.35 | 2.26 | 4.51 | 2.57 | 2.80 | 1.34 | 1.08 |
| 2 | 4,5-辛二酮 | 5455-24-3 | 1.01 | 0.95 | 0.96 | 0.41 | 0.68 | 0.50 | - | 0.85 | 0.49 | 0.94 | 0.96 | 0.90 |
| 3 | 2-己基环戊酮 | 13074-65-2 | 0.36 | 0.34 | - | - | 0.43 | 0.31 | 0.32 | 0.33 | - | - | - | 0.30 |
| 4 | 3,3'-丁二酮 | 6951-22-0 | - | - | 0.20 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 5 | 3-异戊基哌酮 | 26537-51-9 | - | - | - | 0.24 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 6 | (Z)-2-硝基-4-叔丁基环己酮 | 74609-73-7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.33 | - | - |
| 总计 | | | 3.00 | 5.01 | 3.16 | 5.99 | 4.30 | 3.16 | 2.58 | 5.69 | 3.06 | 4.08 | 2.30 | 2.28 |
| 醇类 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1-戊醇 | 71-41-0 | 1.33 | 1.14 | 0.79 | 0.29 | 1.09 | 0.87 | 0.87 | 1.04 | 0.95 | 1.22 | 1.47 | 0.95 |
| 2 | 1-己醇 | 111-27-3 | 0.60 | 0.50 | 0.58 | 0.26 | 0.46 | 0.42 | 0.40 | 0.55 | 0.57 | 0.77 | 0.74 | 0.63 |
| 3 | 1-辛烯-3-醇 | 3391-86-4 | 10.48 | 9.61 | 4.81 | 2.46 | 7.40 | 6.45 | 8.27 | 8.57 | 4.97 | 4.62 | 4.60 | 5.13 |
| 4 | 2-乙基己醇 | 104-76-7 | 0.61 | 0.29 | 0.32 | 0.58 | 0.29 | - | 0.25 | 0.32 | 0.27 | 0.32 | - | 0.35 |
| 5 | 1-辛醇 | 111-87-5 | 3.02 | 3.18 | 4.24 | 2.30 | 3.13 | 2.27 | 1.87 | 3.14 | 2.85 | 2.68 | 3.59 | 3.66 |
| 6 | 1-壬醇 | 143-08-8 | 0.22 | 0.21 | 0.30 | 0.19 | 0.17 | 0.18 | 0.22 | 0.25 | - | 0.28 | 0.27 | 0.36 |
| 7 | 1-十二烷醇 | 112-53-8 | 1.92 | 0.47 | 0.39 | 0.32 | 2.11 | 3.41 | 6.89 | 3.71 | 0.62 | 0.63 | 0.37 | 0.88 |
| 8 | 1-十四醇 | 112-72-1 | 0.79 | - | - | - | 1.32 | 1.85 | 2.44 | 1.80 | - | - | - | - |
| 9 | 丙三醇 | 56-81-5 | - | 1.72 | 2.50 | 1.81 | 1.27 | 0.99 | - | - | 3.46 | 3.36 | 2.79 | 3.48 |
| 10 | 1-庚醇 | 111-70-6 | - | 1.71 | 2.43 | 1.07 | 1.59 | 1.09 | - | - | 1.77 | 1.81 | 4.27 | 2.56 |
| 11 | 4-乙基环己醇 | 4534-74-1 | - | 0.30 | 0.20 | - | 0.29 | - | 0.36 | - | - | - | - | - |
| 12 | (2R,3R)-(-)-2,3-丁二醇 | 24347-58-8 | - | - | 0.43 | 0.36 | 0.22 | - | - | 0.34 | - | - | - | - |
| 13 | 1-十六醇 | 36653-82-4 | - | 0.72 | 2.00 | - | - | - | - | - | - | 0.50 | 0.20 | 0.38 |
| 14 | 1-十七醇 | 1454-85-9 | - | - | - | 0.21 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 15 | 1-癸醇 | 112-30-1 | - | - | - | - | 0.19 | - | - | - | - | - | - | - |
| 16 | 1-十一醇 | 112-42-5 | - | - | - | - | 0.35 | 0.29 | 0.38 | - | - | - | - | - |
| 17 | 十三醇 | 112-70-9 | - | - | - | - | 0.72 | - | 0.97 | 0.66 | - | - | - | - |
| 18 | 2-己基-1-十二烷醇 | 110225-00-8 | - | - | - | - | 0.19 | - | - | - | - | - | - | - |
| 19 | (Z,Z)-5,10-十五碳二烯-1-醇 | 64275-51-0 | - | - | - | - | - | - | 0.15 | 0.17 | - | - | - | - |
| 20 | 2,6,10,14-四甲基十五烷-2-醇 | 21980-66-5 | - | - | - | - | - | - | - | 0.46 | - | - | - | - |
| 21 | 2-己基-1-癸醇 | 2425-77-6 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.31 | - |
| 总计 | | | 18.97 | 19.85 | 18.99 | 9.86 | 20.80 | 17.83 | 23.06 | 21.01 | 15.46 | 16.19 | 18.62 | 18.36 |

表 1(续)

| 序号 | 化合物名称 | Cas 号 | A1 | A2 | A3 | A4 | B1 | B2 | B3 | B4 | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-----|-------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 醛类 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 己醛 | 66-25-1 | 4.10 | 3.74 | 4.05 | 2.33 | 3.83 | 3.93 | 1.97 | 3.64 | 4.69 | 5.40 | 5.47 | 4.40 |
| 2 | 庚醛 | 111-71-7 | 2.20 | 2.00 | 3.38 | 1.64 | 2.71 | 1.89 | 0.70 | 2.16 | 2.52 | 2.87 | 4.74 | 2.98 |
| 3 | 3-甲硫基丙醛 | 3268-49-3 | 0.39 | 0.32 | 0.28 | - | 0.16 | - | 0.20 | 0.18 | - | 0.37 | 0.22 | - |
| 4 | 苯甲醛 | 100-52-7 | 3.89 | 3.13 | 3.12 | 4.79 | 3.10 | 3.16 | 2.28 | 2.49 | 10.74 | 12.07 | 3.43 | 6.47 |
| 5 | 辛醛 | 124-13-0 | 2.24 | 2.31 | 4.56 | 2.52 | 3.64 | 2.31 | 0.83 | 2.89 | 2.84 | 2.60 | 4.32 | 3.61 |
| 6 | 苯乙醛 | 122-78-1 | 0.42 | 0.44 | 0.19 | 0.26 | 0.23 | 0.19 | 0.28 | 0.30 | 0.38 | 0.50 | 0.32 | - |
| 7 | (E)-2-辛烯醛 | 2548-87-0 | 0.69 | 0.60 | 0.80 | 0.32 | 0.61 | 0.52 | 0.43 | 0.60 | 0.49 | 0.66 | 1.06 | 0.57 |
| 8 | 壬醛 | 124-19-6 | 6.14 | 6.63 | 12.35 | 9.57 | 8.26 | 6.80 | 2.79 | 7.78 | 7.76 | 7.56 | 9.80 | 10.26 |
| 9 | (E)-2-壬烯醛 | 18829-56-6 | 1.58 | 1.40 | 3.12 | 1.07 | 1.71 | 1.47 | 0.56 | 1.73 | 1.15 | 1.31 | 3.48 | 1.61 |
| 10 | 癸醛 | 112-31-2 | 0.31 | 0.28 | 0.48 | 0.45 | 0.35 | 0.37 | 0.28 | 0.38 | 0.55 | 0.43 | 0.34 | 0.44 |
| 11 | (E)-2-癸烯醛 | 3913-81-3 | 2.98 | 3.47 | 6.48 | 2.36 | 3.90 | 2.30 | 1.83 | 3.26 | 1.88 | 3.03 | 5.28 | 3.09 |
| 12 | 十一醛 | 112-44-7 | 0.30 | 0.24 | 0.34 | 0.28 | 0.45 | 0.47 | 0.43 | 0.45 | - | 0.41 | 0.27 | 0.28 |
| 13 | (E,E)-2,4-十一碳烯醛 | 13162-46-4 | 0.62 | 0.63 | 0.82 | 0.35 | 0.56 | 0.54 | 0.38 | 0.55 | 0.35 | 0.45 | 0.63 | 0.39 |
| 14 | 十二醛 | 112-54-9 | 0.74 | 0.38 | 0.66 | 0.61 | 1.18 | 1.35 | 1.93 | 1.28 | 0.84 | 0.67 | 0.50 | 0.58 |
| 15 | 十三醛 | 10486-19-8 | 1.05 | 1.00 | 1.10 | 0.82 | 1.27 | 1.43 | 1.11 | 1.19 | 0.76 | 0.93 | 0.47 | 0.75 |
| 16 | 十四醛 | 124-25-4 | 2.05 | 2.48 | 2.18 | 2.01 | 2.80 | 3.52 | 3.93 | 2.74 | 1.41 | 1.34 | 0.76 | 1.23 |
| 17 | 十五醛 | 316249 | 3.79 | 5.50 | 4.11 | 4.72 | 5.03 | 7.36 | 0.44 | 5.39 | 2.94 | 2.89 | 1.02 | 2.52 |
| 18 | 十六醛 | 629-80-1 | 15.56 | 17.94 | 11.56 | 23.26 | 20.16 | 23.95 | 23.50 | 15.85 | 16.58 | 12.78 | 13.33 | 15.81 |
| 19 | 十八醛 | 638-66-4 | 3.43 | 3.52 | 1.72 | 4.62 | 3.69 | 5.19 | 5.58 | 4.31 | 2.69 | 1.82 | 0.55 | 1.20 |
| 20 | (E)-2-庚烯醛 | 18829-55-5 | - | 0.15 | 0.22 | - | 0.15 | 0.14 | - | 0.17 | - | - | 0.61 | 0.36 |
| 21 | (E,E)-2,4-癸二烯醛 | 25152-84-5 | - | 0.13 | 0.26 | - | - | - | - | - | - | - | 0.34 | - |
| 22 | 2,4-十二烯醛 | 13162-47-5 | - | 0.10 | 0.18 | - | 0.13 | - | - | - | - | - | 0.19 | - |
| 23 | (E)-4-癸烯醛 | 65405-70-1 | - | - | 0.18 | - | - | 0.12 | - | - | - | - | - | - |
| 24 | (E,E)-2,4-十一烷二烯醛 | 30361-29-6 | - | - | 0.29 | - | 0.33 | 0.18 | - | - | - | - | - | - |
| 25 | (Z)-9-十六碳烯醛 | 56219-04-6 | - | - | - | 0.30 | - | 0.21 | - | - | - | - | - | - |
| 26 | 4-戊基苯甲醛 | 6853-57-2 | - | - | - | - | - | - | 0.50 | 0.51 | - | - | - | - |
| 27 | (Z)-9-十八碳烯醛 | 191297 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.23 | - | - |
| | 总计 | | 52.46 | 56.40 | 62.42 | 62.27 | 64.26 | 67.41 | 49.97 | 57.85 | 58.56 | 58.31 | 57.15 | 56.54 |
| 羧酸类 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | L-乳酸 | 79-33-4 | 11.98 | 6.59 | 3.22 | 3.96 | 2.84 | 3.28 | 4.41 | 5.60 | 6.27 | 4.84 | 8.33 | 9.01 |
| 2 | 2-甲基双环[2.2.1]庚-5-烯-2-羧酸 | 825-03-6 | 0.52 | - | 0.47 | 0.59 | 0.34 | - | 0.32 | 0.33 | - | 1.17 | - | 0.77 |
| 3 | 十四烷酸 | 544-63-8 | - | 0.14 | 0.45 | 0.31 | 0.13 | 0.28 | 0.23 | 0.23 | - | 0.32 | 0.20 | 0.38 |
| 4 | 十二烷酸 | 143-07-7 | - | - | 0.55 | 0.59 | 0.32 | 0.39 | 0.59 | 0.39 | - | - | - | - |
| 5 | 己酸 | 142-62-1 | - | - | - | 0.57 | - | - | - | - | - | 2.01 | - | - |
| 6 | 辛酸 | 124-07-2 | - | - | - | 0.65 | 0.69 | 0.51 | 0.70 | - | 0.67 | - | 0.81 | - |
| 7 | (Z,Z)-5,10-十五碳二烯酸 | 64275-69-0 | - | - | - | 0.21 | - | 0.19 | 0.16 | - | - | - | - | - |
| 8 | 正癸酸 | 334-48-5 | - | - | - | - | - | - | 2.23 | - | - | - | - | - |
| | 总计 | | 12.50 | 6.73 | 4.69 | 6.89 | 4.32 | 4.64 | 8.63 | 6.55 | 6.93 | 8.34 | 9.34 | 10.16 |
| 酯类 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 乳酸甲酯 | 547-64-8 | 0.25 | 0.25 | - | - | - | - | - | - | 0.31 | 0.82 | 0.50 | 0.40 |
| 2 | 邻苯二甲酸二异丁酯 | 84-69-5 | 0.57 | 0.63 | 1.34 | 1.11 | 0.29 | - | - | 0.68 | 1.14 | 0.70 | 0.48 | 0.94 |
| 3 | 2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯 | 6846-50-0 | 0.27 | - | - | - | - | - | - | - | 0.43 | - | - | 0.44 |
| 4 | (2E)-5-苯基-2-戊烯酸乙酯 | 55282-95-6 | - | - | - | - | 0.24 | - | - | 0.16 | - | - | - | - |
| 5 | 甲酸十二烷基酯 | 28303-42-6 | - | - | - | - | - | 0.82 | - | - | - | - | - | - |
| 6 | 亚油酸乙酯 | 544-35-4 | - | - | - | - | - | 0.10 | - | - | - | - | - | - |
| 7 | 乙酸壬酯 | 143-13-5 | - | - | - | - | - | - | 0.28 | - | - | - | - | - |
| 8 | 3,7-二甲基辛酸辛酯 | 20780-49-8 | - | - | - | - | - | - | - | 0.22 | - | - | - | - |
| 9 | 草酸二异丁酯 | 2050-61-5 | - | - | - | - | - | - | - | 0.45 | - | - | - | - |
| 10 | (Z)-肉桂酸甲酯 | 19713-73-6 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.38 | - | - | - |
| 11 | 乙二酸二丁酯 | 2050-60-4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.94 | - | 0.66 |

表 1(续)

| 序号 | 化合物名称 | Cas 号 | A1 | A2 | A3 | A4 | B1 | B2 | B3 | B4 | C1 | C2 | C3 | C4 |
|----|-----------------------------|-------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 12 | 邻苯二甲酸正丁基异丁基酯 | 17851-53-5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.36 |
| | 总计 | | 1.09 | 0.89 | 1.34 | 1.11 | 0.53 | 0.92 | 0.28 | 1.51 | 2.26 | 2.46 | 0.97 | 3.79 |
| | 烃类 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2,6,7-三甲基癸烷 | 62108-25-2 | 0.28 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 4,4-二乙基-2,5-辛二炔 | 61227-87-0 | 0.64 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | 3-甲基-5-丙基壬烷 | 31081-18-2 | 0.58 | - | 0.26 | 0.34 | - | - | - | 0.17 | 1.63 | 1.66 | 0.90 | 1.14 |
| 4 | 2,6,10-三甲基十三烷 | 3891-99-4 | 0.24 | 0.11 | 0.23 | - | - | - | - | - | 0.49 | 0.55 | 0.27 | - |
| 5 | 十六烷 | 544-76-3 | 1.29 | 0.72 | 1.36 | 1.78 | 0.60 | 1.09 | 0.68 | 0.66 | 1.47 | 1.22 | 0.87 | 1.20 |
| 6 | 8-甲基十七烷 | 13287-23-5 | 0.45 | - | - | 0.76 | 0.26 | - | - | 0.19 | - | - | - | - |
| 7 | 2,6,10,14-四甲基十六烷 | 638-36-8 | 0.81 | - | 0.74 | 1.03 | - | - | - | - | 0.98 | 1.26 | - | - |
| 8 | 3,7,11,15-四甲基十六碳-2-烯 | 2437-93-6 | 0.38 | 0.33 | 0.38 | 0.53 | 0.39 | - | - | - | 0.65 | 0.54 | 0.29 | 0.55 |
| 9 | (1-乙基癸基)苯 | 2400-00-2 | 0.20 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 10 | 十六烷基环氧乙烷 | 7390-81-0 | 0.84 | 2.44 | 0.49 | 2.51 | 1.93 | 2.69 | 2.82 | 2.42 | 0.60 | 0.53 | 0.21 | 0.38 |
| 11 | 十二烷 | 112-40-3 | - | 0.26 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 12 | 十七烷 | 629-78-7 | - | 0.49 | 0.51 | - | - | 0.25 | 0.23 | - | 0.97 | 0.84 | 0.58 | 0.86 |
| 13 | 4-甲基-4-甲氧基-1,2-戊二烯 | 49833-91-2 | - | 1.50 | - | 2.26 | - | - | - | 1.25 | - | - | - | - |
| 14 | 十八烷 | 593-45-3 | - | 0.22 | - | 0.63 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 15 | 己基环戊烷 | 4457-00-5 | - | - | 0.19 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 16 | 1,1'-亚甲基双吡咯烷 | 7309-47-9 | - | - | 0.44 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 17 | 1-苯基-5-甲基庚烷 | 103240-92-2 | - | - | 0.67 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.35 |
| 18 | 5-丙基十三烷 | 55045-11-9 | - | - | 0.26 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.38 |
| 19 | 3-甲基十八烷 | 6561-44-0 | - | - | 0.34 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 20 | 2-丁基噻唑烷 | 30188-50-2 | - | - | - | 0.30 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 21 | 2,6,10,14-四甲基十五烷 | 1921-70-6 | - | - | - | 0.30 | - | - | - | - | - | - | - | 0.25 |
| 22 | 2,3,5,8-四甲基癸烷 | 192823-15-7 | - | - | - | - | 0.18 | - | - | - | - | - | - | - |
| 23 | (1-乙基辛基)苯 | 4621-36-7 | - | - | - | - | 0.19 | - | - | - | - | - | - | - |
| 24 | 2-甲基十二烷 | 1560-97-0 | - | - | - | - | - | 0.13 | - | - | - | - | - | - |
| 25 | 1,E-4,Z-8-十二碳三烯 | 83489-22-9 | - | - | - | - | - | 0.14 | - | - | - | - | - | - |
| 26 | (1-甲基癸基)苯 | 4536-88-3 | - | - | - | - | - | 0.17 | 0.17 | - | - | - | - | - |
| 27 | (1-甲基十二烷基)苯 | 4534-53-6 | - | - | - | - | - | 0.16 | - | - | - | - | - | - |
| 28 | 1-甲基-4-(1-甲基乙基)环己烯 | 5989-54-8 | - | - | - | - | - | - | 0.18 | - | - | - | - | - |
| 29 | 反式,反式-2,8-二甲基螺[5.5]十一烷 | 95530-76-0 | - | - | - | - | - | - | 0.41 | - | - | - | - | - |
| 30 | 苯乙烯 | 100-42-5 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.46 | 0.38 | 0.95 | 0.67 |
| 31 | 2,3,5-三甲基癸烷 | 62238-11-3 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.76 | 0.93 | 0.37 | 0.69 |
| 32 | 壬基环戊烷 | 2882-98-6 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.49 | - | 0.25 | - |
| 33 | 3,7,11,15-四甲基-2-十六烯 | 14237-73-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.39 | - | - | - |
| 34 | 1-(1,5-二甲基己基)-4-(4-甲基戊基)环己烷 | 56009-20-2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.48 | - | - | - |
| | 总计 | | 5.70 | 6.08 | 5.86 | 10.44 | 3.56 | 4.62 | 4.49 | 4.69 | 9.38 | 7.90 | 4.69 | 6.47 |
| | 其他杂原子类 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2-正丁基咪喃 | 4466-24-4 | 3.13 | 2.95 | 1.19 | 0.85 | 0.89 | 1.10 | 2.21 | 2.53 | - | - | - | - |

表 1(续)

| 序号 | 化合物名称 | Cas 号 | A1 | A2 | A3 | A4 | B1 | B2 | B3 | B4 | C1 | C2 | C3 | C4 |
|----|-------------------------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2 | 3-甲基-2-(2-氧丙基)呋喃 | 87773-62-4 | 0.28 | - | - | - | - | 0.11 | - | 0.17 | - | - | 0.19 | - |
| 3 | 叔丁基 3-甲基丁基二硫化物 | 75203-68-8 | 0.28 | 0.24 | 0.21 | - | 0.26 | - | 0.24 | - | - | - | 0.22 | - |
| 4 | 2-(3-甲基丁基)-3, 5-二甲基吡嗪 | 111150-30-2 | 2.59 | 1.86 | 2.17 | 2.19 | 0.89 | 0.20 | - | - | 3.47 | 2.72 | 2.64 | 2.39 |
| 5 | 1 <i>H</i> -1,2,3-三唑 | 288-36-8 | - | - | - | 0.40 | - | - | - | - | 0.33 | - | - | - |
| 6 | 2-庚基呋喃 | 3777-71-7 | - | - | - | - | 0.19 | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | 3,4-二氨基-1,2,4(4 <i>H</i>)-三唑 | 38104-45-9 | - | - | - | - | - | - | 0.83 | - | - | - | - | - |
| 8 | 2-庚基-1,3-二氧戊环 | 4359-57-3 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.54 | - | 0.43 | - |
| 9 | 2-戊基呋喃 | 3777-69-3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 3.45 | - |
| | 总计 | | 6.29 | 5.05 | 3.56 | 3.44 | 2.23 | 1.41 | 3.28 | 2.71 | 4.34 | 2.72 | 6.94 | 2.39 |

注: -表示未检出, A、B、C 分别代表牛肉的前腿、后腿和背肌。

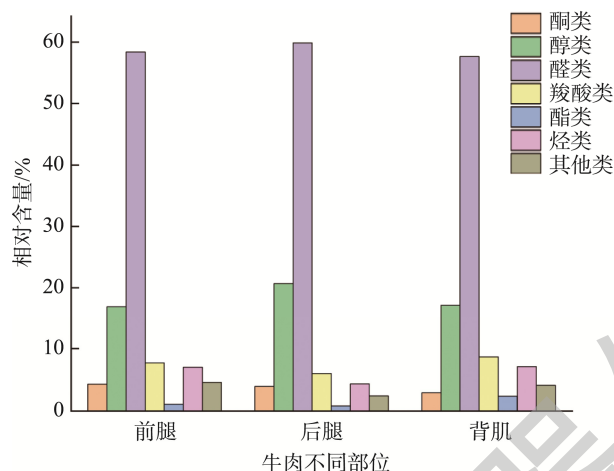


图1 牛肉不同部位挥发性风味物质相对含量

Fig.1 Relative content of volatile flavor compounds in different parts of beef

用产生, 不同碳链长度的酯类物质呈现不同的味道^[23], 由于其阈值较低, 能够平衡和调节样品的整体风味^[23], 酮类物质是由肌肉中多不饱和脂肪酸氧化、氨基酸降解或微生物氧化产生^[24], 由于其阈值远高于其他类化合物^[25], 所以对样品的整体风味影响不大。其他类化合物中, 含硫、含氧、含氮类化合物及呋喃、吡嗪等主要来源于美拉德反应及氨基酸的热解^[26], 也是肉品质中重要的呈味物质^[26]。

牛肉不同部位 A1、A2、A3、A4、B1、B2、B3、B4、C1、C2、C3 和 C4 样品分别检测到 49、51、60、54、58、52、51、52、48、50、53 和 50 种挥发性风味物质, 其中 4 个前腿样品中共有成分有 34 种, 4 个后腿样品中共有成分有 33 种, 4 个背肌样品中共有成分 36 种, 如图 2 可以看出 3 个部位中共有 25 种挥发性风味物质, 主要为醛类和醇类, 但在牛肉的不同部位中又有其独有的成分, 前腿中检测到了 2-乙基己醇, 后腿中检测到了 2-己基环戊酮、1-十四醇、十二烷酸、十四烷酸, 背肌中检测到了丙三醇、1-庚醇、乳酸甲酯、苯乙烯、2, 3, 5-三甲基癸烷、3-甲基-5-丙基壬烷、十七烷。

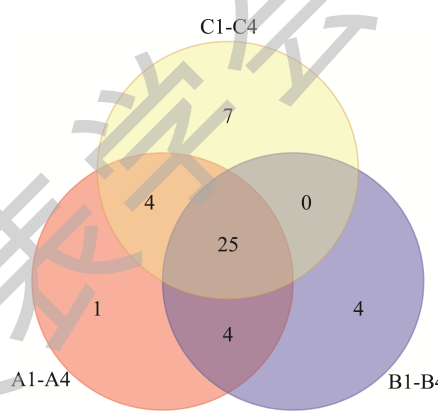


图2 前腿、后腿和背肌挥发性风味物质Venn图(n=4)

Fig.2 Venn plot of volatile flavor compounds in the front, back and back muscles (n=4)

2.2 牛肉不同部位挥发性风味物质的 PLS-DA 模型评价

虽然牛肉各部位中挥发性风味物质成分相近, 但含量分布有部分差异, 如图 3 所示, 基于牛肉 3 个部位 12 个样本数据的共有组分的含量, 建立了 PLS-DA 评价模型的

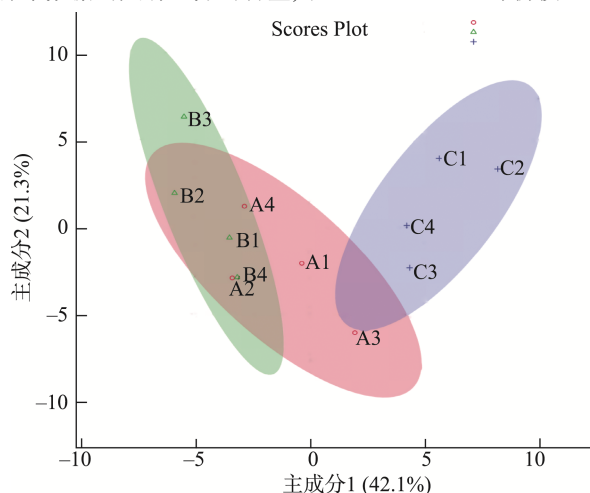


图3 牛肉不同部位样品挥发性风味组分的PLS-DA得分图

Fig.3 PLS-DA score of volatile flavor components in beef samples from different parts

得分图,可以直观的显示不同样本之间关系^[27],样品之间距离近表示差异较小,距离远代表差异明显^[28-29],从图 3 中可以看出,牛肉前腿与后腿之间的挥发性风味组分含量差异较小,而背肌与前腿、后腿之间的差异较大。

2.3 牛肉不同部位样品的聚类热图分析

基于通辽牛肉 3 个部位的 25 种共有组分,对其相对含量通过热图的统计方法进行聚合分析,其中横坐标代表各挥发性风味组分,纵坐标代表牛肉的不同部位,图中红色表示正相关,蓝色表示负相关^[30],从图 4 中可以看出,3 组样品含量分布差异明显,对于聚类样本,可以分为两类,A、B 组为一类,C 组为一类,与 PLS-DA 分析结果一致。

2.4 关键性风味物质分析

基于通辽牛肉中前腿、后腿、背肌 3 个部位的风味分析,对其共有组分运用 ROAV 进行分析评价^[31]。当挥发性风味化合物 ROAV ≥ 1 时,认为该化合物是该样品的

关键风味化合物,在一定范围内,ROAV 越大,表明该物质对整体风味的贡献越大^[32],从表 1 中可以看出,在不同样品中,十六醛的相对含量均为最高,因此将十六醛的 ROAV_{max} 定为 100,结合相关报道的化合物阈值,计算各组分的 ROAV 值,以此判断通辽牛肉中关键性风味成分^[33]。

通辽牛肉 3 种不同部位中共鉴定出 9 种共有香气化合物 ROAV > 1 ,认定为牛肉中的关键性风味物质,包括 8 种醛类,1 种醇类,分别为十六醛、己醛、庚醛、辛醛、壬醛、(E)-2-壬烯醛、癸醛、(E)-2-癸烯醛和 1-辛烯-3-醇。在醛类当中,直链脂肪醛和烯醛均是脂肪氧化的产物^[34],其中庚醛、辛醛、壬醛赋予了牛肉愉快的果香气味及水果味^[35-36],己醛呈现生油脂、青草及苹果香气^[35],十六醛具有甜杏及坚果味^[19],癸醛具有柑橘及青草香味^[35],(E)-2-壬烯醛、(E)-2-癸烯醛分别赋予牛肉黄瓜及柑橘类清香的味道^[35],1-辛烯-3-醇呈现蘑菇香及药草香味^[35],得到的 ROAV 结果如表 2 所示。

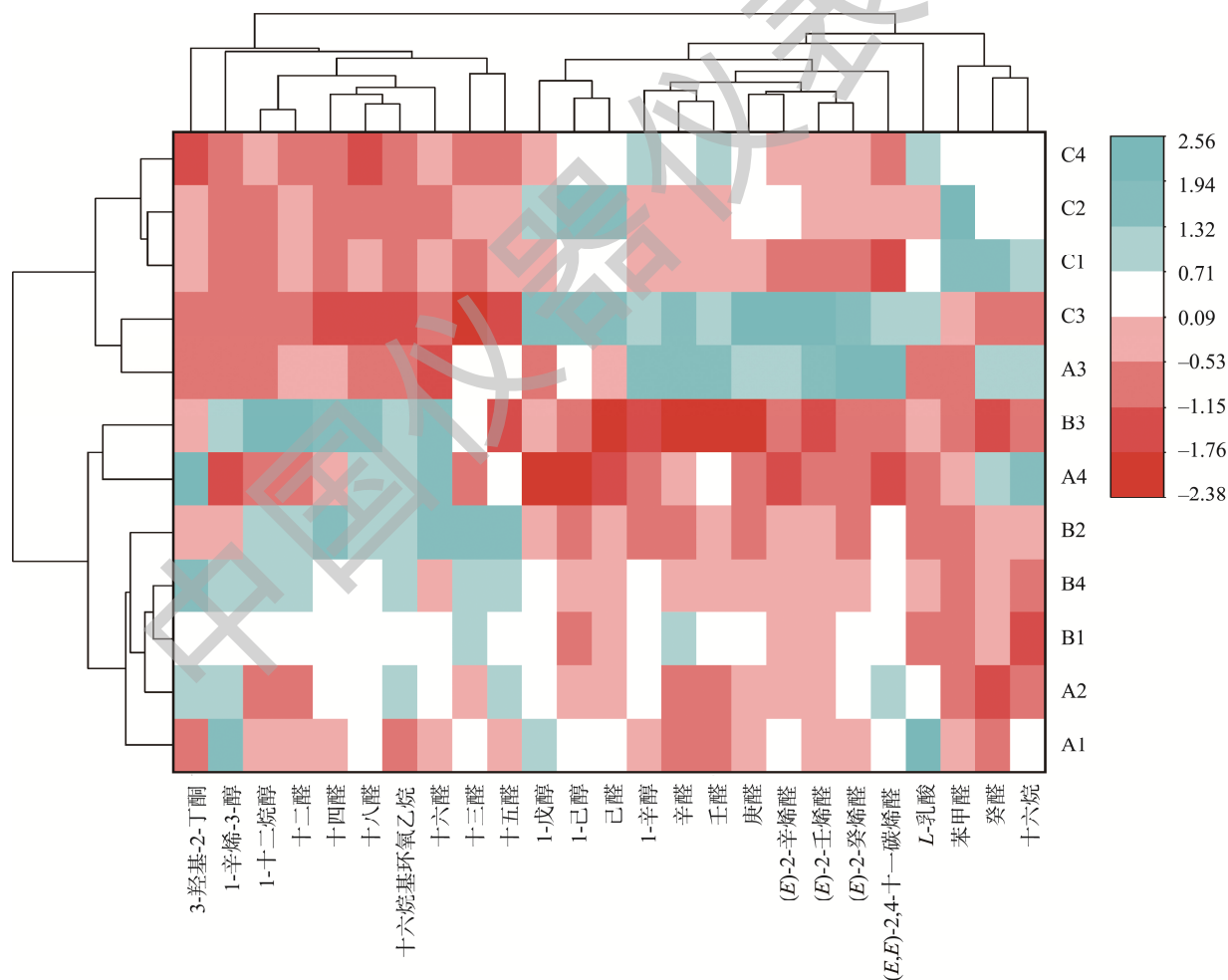


图4 不同部位牛肉样品挥发性风味组分相对含量聚类热图

Fig.4 Cluster heatmap of relative content of volatile flavor components in beef samples from different parts

表 2 牛肉中不同部位挥发性风味物质 ROAV
Table 2 Volatile flavor compounds ROAV in different parts of beef

| 化合物名称 | 感觉阈值 ($\mu\text{g}/\text{kg}$) | ROAV | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | A1 | A2 | A3 | A4 | B1 | B2 | B3 | B4 | C1 | C2 | C3 | C4 |
| 十六醛 | 0.91 ^[19] | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 3-羟基-2-丁酮 | 14 ^[37] | 0.68 | 1.35 | 1.12 | 1.49 | 1.03 | 0.64 | 0.63 | 1.85 | 1.01 | 1.43 | 0.65 | 0.45 |
| 1-戊醇 | 4000 ^[15] | 0.0019 | 0.0014 | 0.0015 | 0.0003 | 0.0012 | 0.0008 | 0.0008 | 0.0015 | 0.0013 | 0.0022 | 0.0025 | 0.0014 |
| 1-辛烯-3-醇 | 1 ^[15] | 61.29 | 48.73 | 37.83 | 9.64 | 33.38 | 24.52 | 32.02 | 49.19 | 27.27 | 32.89 | 31.43 | 29.50 |
| 1-辛醇 | 110 ^[13] | 0.16 | 0.15 | 0.30 | 0.08 | 0.13 | 0.08 | 0.07 | 0.16 | 0.14 | 0.17 | 0.22 | 0.19 |
| 1-十二烷醇 | 16 ^[37] | 0.70 | 0.15 | 0.19 | 0.08 | 0.59 | 0.81 | 1.67 | 1.33 | 0.21 | 0.28 | 0.16 | 0.32 |
| 己醛 | 4.5 ^[13] | 5.33 | 4.22 | 7.09 | 2.02 | 3.84 | 3.32 | 1.70 | 4.65 | 5.72 | 8.54 | 8.31 | 5.62 |
| 庚醛 | 3 ^[12] | 4.29 | 3.38 | 8.88 | 2.14 | 4.08 | 2.39 | 0.90 | 4.13 | 4.61 | 6.81 | 10.80 | 5.72 |
| 苯甲醛 | 350 ^[13] | 0.06 | 0.05 | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.17 | 0.25 | 0.07 | 0.11 |
| 辛醛 | 0.7 ^[31] | 18.70 | 16.71 | 51.23 | 14.06 | 23.49 | 12.54 | 4.58 | 23.71 | 22.29 | 26.48 | 42.17 | 29.71 |
| (E)-2-辛烯醛 | 3 ^[31] | 1.34 | 1.01 | 2.09 | 0.42 | 0.91 | 0.66 | 0.56 | 1.15 | 0.90 | 1.56 | 2.42 | 1.09 |
| 壬醛 | 1 ^[15] | 35.91 | 33.66 | 97.19 | 37.45 | 37.27 | 25.82 | 10.79 | 44.68 | 42.57 | 53.80 | 66.93 | 59.08 |
| (E)-2-壬烯醛 | 0.08 ^[31] | 115.82 | 88.81 | 306.99 | 52.15 | 96.35 | 69.60 | 27.17 | 124.28 | 78.71 | 116.70 | 297.04 | 115.59 |
| 癸醛 | 0.1 ^[35] | 18.02 | 14.22 | 38.12 | 17.42 | 15.82 | 14.14 | 10.87 | 21.98 | 30.20 | 30.64 | 23.39 | 25.37 |
| (E)-2-癸烯醛 | 5 ^[31] | 3.49 | 3.52 | 10.19 | 1.84 | 3.52 | 1.75 | 1.42 | 3.75 | 2.06 | 4.31 | 7.21 | 3.56 |
| (E,E)-2,4-十一碳烯醛 | 12.5 ^[37] | 0.29 | 0.26 | 0.51 | 0.11 | 0.20 | 0.16 | 0.12 | 0.25 | 0.15 | 0.25 | 0.34 | 0.18 |
| 十二醛 | 30 ^[37] | 0.14 | 0.06 | 0.17 | 0.08 | 0.18 | 0.17 | 0.25 | 0.24 | 0.15 | 0.16 | 0.11 | 0.11 |
| 十三醛 | 70 ^[37] | 0.09 | 0.07 | 0.12 | 0.05 | 0.08 | 0.08 | 0.06 | 0.10 | 0.06 | 0.09 | 0.05 | 0.06 |
| 十四醛 | 110 ^[37] | 0.11 | 0.11 | 0.16 | 0.07 | 0.11 | 0.12 | 0.14 | 0.14 | 0.07 | 0.09 | 0.05 | 0.06 |
| 十五醛 | 1000 ^[37] | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 |

3 结论

采用 SPME-GC-MS 对通辽牛肉前腿、后腿、背肌 3 个部位 12 个样品中的挥发性风味物质进行分析, 共鉴定出 117 种挥发性风味化合物, 包括酮类、醇类、醛类、酸类、酯类、烃类及其他类化合物, 其中醛类和醇类相对含量最高且对通辽牛肉的风味起着重要的作用, 通过韦恩图筛选出牛肉 3 个部位中 25 种共有挥发性风味物质, 建立 PLS-DA 评价模型得分图及聚类分析热图, 表明牛肉前腿和后腿中各挥发性风味组分差异较小, 背肌与前腿和后腿差异较大, 通过计算各组分的相对气味活度值, 初步得出影响通辽牛肉的 9 种风味化合物, 包括醛类 8 种, 醇类 1 种, 分别为十六醛、己醛、庚醛、辛醛、壬醛、(E)-2-壬烯醛、癸醛、(E)-2-癸烯醛和 1-辛烯-3-醇, 为提升牛肉风味及其品质评价提供科学依据。

参考文献

[1] 张向南. 内蒙古通辽市肉牛产业链研究[D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学, 2016.

2016.

ZHANG XN. Study on beef cattle industrial chain development of Tongliao in Inner Mongolia [D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2016.

- [2] 麻海峰, 常征, 杨光辉. 牛肉的营养价值及排酸、速冻工艺研究[J]. 农业科技与装备, 2010, (7): 34-36.
- MA HF, CHANG Z, YANG GH. Value of beef and its acid discharge and quick-freeze techniques [J]. Agric Sci Technol Equipment, 2010, (7): 34-36.
- [3] CHEN H, WANG C, SMUJI D, *et al.* Research progress of beef quality and its influencing factors [J]. Chin J Anim Nut, 2021, 33(2): 669-678.
- [4] KERTH CR, MILLER RK. Beef flavor: A review from chemistry to consumer [J]. J Sci Food Agric, 2015, 95(14): 2783-2798.
- [5] O'QUINN TG, LEGAKO JF, WOERNER DR, *et al.* A current review of US beef flavor II: Managing beef flavor [J]. Meat Sci, 2023, 209: 1.
- [6] 王惠惠, 马纪兵, 刘小波, 等. 甘肃牧区传统风干牦牛肉加工过程中挥发性风味物质变化分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(4): 200-204.
- WANG HH, MA JB, LIU XB, *et al.* Analysis of the changes of volatile flavor compounds during processing of traditional air-dried beef in pastoral area in Gansu Province [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(4):

- 200–204.
- [7] 肖志超, 葛长荣, 周光宏, 等. 肉的风味物质及其检测技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(9): 325–330.
XIAO ZC, GE CR, LIU XB, *et al.* Research progress on meat flavor substance and detecting technique [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(9): 325–330.
- [8] FU YH, CAO SY, LI Y, *et al.* Flavor formation based on lipid in meat and meat products: A review [J]. *J Food Biochem*, 2022. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14439>
- [9] 杜春林, 赵春平, 谭娅. 肉类风味物质检测技术研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(8): 46–51.
DU CL, ZHAO CP, TAN Y. Research progress on analytical techniques for detection of meat flavor substances [J]. *Meat Res*, 2023, 37(8): 46–51.
- [10] 刁小琴, 孙薇婷, 徐筱君. 等. 肉制品风味物质分析及其在加工中变化的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(8): 2291–2299.
DIAO XQ, SUN WT, XU XJ. *et al.* Research progress on analysis of flavor compounds in meat products and their changes during processing [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(8): 2291–2299.
- [11] 何晓娜, 席斌, 王芳, 等. 畜禽肉中风味物质检测方法研究进展[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(4): 139–145.
HE XN, XI B, WANG F. *et al.* Research progress of detection methods of flavor substances in livestock and poultry meat [J]. *Storage Process*, 2021, 21(4): 139–145.
- [12] 陶春旭, 王俊妍, 丁超, 等. 固相微萃取技术在生物毒素检测领域的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(6): 81–89.
TAO CX, WANG JY, DING X, *et al.* Application of solid phase micro-extraction technology in the detection of biotoxin [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(6): 81–89.
- [13] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法:“ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, (7): 370–374.
LIU DY, ZHOU GH, XU XL. “ROAV” method: A new method for determining key odor compounds of Rugao Ham [J]. *Food Sci*, 2008, (7): 370–374.
- [14] MA QL, HAMID N, BEKHIT AED. Evaluation of pre-rigor injection of beef with proteases on cooked meat volatile profile after 1 day and 21 days post-mortem storage [J]. *Meat Sci*, 2012, 92: 429–430.
- [15] 王伦兴, 张洪礼, 陈德琴, 等. 黔北麻羊不同部位肌肉挥发性风味物质分析[J]. 肉类研究, 2021, 35(1): 47–52.
WANG LX, ZHANG HL, CHEN DQ, *et al.* Volatile flavor compounds in muscles from different carcass cuts of qianbei ma goat [J]. *Meat Res*, 2021, 35(1): 47–52.
- [16] 方卉, 姜雪, 罗瑞明, 等. 不同加工条件对猪肉松中醛类物质含量的影响[J]. 工艺技术, 2022, 28(22): 104–108.
FANG H, JIANG X, LUO RM, *et al.* Effects of different processing conditions on the content of aldehydes in pork floss [J]. *Process Technol*, 2022, 28(22): 104–108.
- [17] 吕经秀, 刘裕, 王灵娟, 等. 脂质水解对肉品质及风味影响的研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(12): 43–48.
LV JX, LIU Y, WANG LJ, *et al.* Progress in research on the effects of lipid hydrolysis on meat quality and flavor [J]. *Meat Res*, 2022, 36(12): 43–48.
- [18] 唐人杰, 黄静, 罗丹, 等. 四川达州地区不同品牌灯影牛肉片的风味成分分析[J]. 中国调味品, 2023, 48(12): 170–175.
TANG RJ, HUANG J, LUO D, *et al.* Analysis of flavor components of different brands of Dengying beef slices in Dazhou area, Sichuan [J]. *China Cond*, 2023, 48(12): 170–175.
- [19] 程华峰, 林琳, 葛孟甜, 等. 3种生态环境中华绒螯蟹肉挥发性风味特征比较[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(23): 247–256.
CHEN HF, LIN L, GE MT, *et al.* Comparison of volatile flavor characteristics of Chinese mitten crab meat in three ecological environments [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(23): 247–256.
- [20] 俞彭欣, 斯叶青, 刘阳, 等. 新疆舍饲湖羊不同部位肌肉品质对比分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(5): 235–243.
YU PX, SI YQ, LIU Y, *et al.* Comparative analysis of different muscle parts from house-fed hu sheep in Southern Xinjiang [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2022, 38(5): 235–243.
- [21] 洛桑催成, 次仁曲珍, 平措班旦, 等. 彭波半细毛羊羊肉风味物质的鉴定与分析[J]. 中国草食动物科学, 2023, 43(6): 29–34.
LUO SCC, CHI RQZ, PING CBD, *et al.* Identification and analysis of flavor compounds in mutton of pengbo semi-fine wool sheep [J]. *Chin Herbivorous Anim Sci*, 2023, 43(6): 29–34.
- [22] 甄大卫, 徐玉霞, 张晨萍, 等. 调控氧化猪脂的香气成分分析[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(4): 96–105.
ZHEN DW, XU YX, ZHANG CP, *et al.* Analysis of aroma compounds in lard oxidized in control [J]. *J Food Sci Technol*, 2022, 40(4): 96–105.
- [23] 陈鹏羽, 张德权, 李少博, 等. 基于电子鼻和 HS-SPME-GC-O-MS 技术分析不同品种羊肉煮制风味特征[J]. 食品与发酵工业, 2023, 1: 1–10.
CHEN PY, ZHANG DQ, LI SB, *et al.* Analysis of flavor characteristics of cooked lamb based on electronic nose and HS-SPME-GC-O-MS [J]. *Food Ferment Ind*, 2023, 1: 1–10.
- [24] 崔艺燕, 马现永. 猪肉风味研究进展[J]. 肉类研究, 2017, 31(6): 55–60.
CUI YY, MA XY. Recent advances in the research on pork flavor compounds [J]. *Meat Res*, 2017, 31(6): 55–60.
- [25] 周芳. 酱肉加工工艺及挥发性风味物质研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
ZHOU F. Study on processing technology and volatile compounds of pork cured with sweet soybean paste [D]. Chongqing: Southwest University, 2008.
- [26] 李彦, 符慧靖, 秦建鹏, 等. 天然复合添加剂对卤牛肉贮藏品质及风味的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(11): 231–245.
LI Y, FU HJ, QIN JP, *et al.* The effect of natural composite additives on the storage quality and flavor of braised beef [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2023, 23(11): 231–245.
- [27] 邱月, 许蜜蜜, 谢雪华, 等. 基于 GC-IMS 和化学计量学分析热加工牛肉特征风味物质[J]. 浙江工业大学学报, 2023, 51(4): 448–454.
QIU Y, XU MM, XIE XH, *et al.* Analysis of characteristic flavor compounds of thermally processed beef based on GC-IMS and chemometrics [J]. *J Zhejiang Univ Technol*, 2023, 51(4): 448–454.
- [28] 古丽孜亚·吐尔斯别克, 马军, 祖木来提·热西提, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱法结合感官评价对不同药食同源处理低温风干羊肉挥发性风味物质的表征及分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 1: 1–13.
GULIZIYA TUERSIBIEKE, MA J, ZUMULAITI REXITI, *et al.* Characterization and analysis of volatile flavor compounds in low-temperature air dried mutton by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with sensory evaluation [J]. *Food Ferment Ind*,

- 2024, 1: 1–13.
- [29] 沙坤, 孙宝忠, 张泽俊, 等. 不同饲养方式的部位肉制作的哈萨克风牛肉挥发性风味成分差异分析[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 48–52.
SHA K, SUN BZ, ZHANG ZJ, *et al.* Analysis and comparison of volatile flavor compounds in Kazakh Dry-Cured beef from different feeding systems and muscle cuts [J]. Food Sci, 2017, 38(18): 48–52.
- [30] 孙光城, 罗秀群, 林丹, 等. 基于 GC-MS 分析牛肉不同部位对牛肝菌牛肉酱品质及挥发性香气成分的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 1: 1–17.
SUN GC, LUO XQ, LIN D, *et al.* Analysis of impact of different parts of beef on the quality and volatile aroma components of boletus beef sauce based on GC-MS [J]. Sci Technol Food Ind, 2024, 1: 1–17.
- [31] 刘梦, 陈松, 张顺亮, 等. 微发酵对牛肉干风味的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(14): 232–238.
LIU M, CHEN S, ZHANG SL, *et al.* Effect of light fermentation on the flavor of beef jerky [J]. Food Sci, 2021, 42(14): 232–238.
- [32] 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.
ZHANG H, YI YW, ZHANG ZY, *et al.* 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 [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(15): 195–205.
- [33] 赵玉欣, 韩丽娟, 葛世鹏, 等. 基于 GC-IMS 分析不同提取方法对藏羊油脂挥发性风味的影响[J/OL]. 中国油脂, 1-15. [2024-07-21]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230517>
ZHAO YX, HAN LJ, GE SP, *et al.* Analysis of the influence of different extraction methods on the volatile flavor of Tibetan sheep oil based on GC-IMS [J/OL]. China Oils Fats, 1-15. [2024-07-21]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230517>
- [34] 沙坤, 郭江南, 郎玉苗. 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): 233–238.
SHA K, GUO JN, LANG YM. Characteristics and differences analyses of volatile flavor compounds in dry-cured yak and beef [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2015, 46(12): 233–238.
- [35] 中拉毛草, 张锐, 林宇红, 等. 两种产地藏羊肉挥发性风味物质和脂肪酸组成比较研究[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(1): 48–57.
ZHONG LMC, ZHANG R, LIN YH, *et al.* Comparative study of volatile flavor substances and fatty acid compositions of Tibetan mutton from two regions [J]. Storage Process, 2024, 24(1): 48–57.
- [36] 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.
SHAO SX, XU MT, LIN YP, *et al.* Differential analysis of aroma components of Huangguanyin Wulong tea from different geographical origins using electronic nose and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Sci, 2023, 44(4): 232–239.
- [37] VAN LJ, GEMER TZ. Odourthresholds [M]. 2nded, The Netherlands: Oliemans Punter & Partners BV, 2011.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)

作者简介



赵志惠, 硕士, 主要研究方向为食品营养与安全检测。

E-mail: 1004032820@qq.com



吴洪新, 硕士, 研究员 主要研究方向为牧草及草畜产品品质评价。

E-mail: wuhongxin168@163.com