

电子鼻结合HS-GC-IMS技术分析不同种类风干肉干挥发性风味特征

韩沅汐, 蒋思源, 张二豪, 刘振东, 薛蓓, 李梁

Analysis of Volatile Flavor Characteristics of Different Types of Air-dried Jerky Based on Electronic Nose Combined with HS-GC-IMS Technology

HAN Yuanxi, JIANG Siyuan, ZHANG Erhao, LIU Zhendong, XUE Bei, and LI Liang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070090>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于电子鼻和顶空气相色谱-离子迁移谱分析不同干燥方式对羊肚菌挥发性化合物的影响

Analysis the Effects of Different Drying Methods on the Volatile Compounds in *Morchella esculenta* Based on Electronic Nose and Headspace Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry

食品工业科技. 2024, 45(7): 261-269 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050088>

基于气相色谱-离子迁移谱和电子鼻技术分析制坯方式对三华李果坯挥发性成分的影响

Effects of Billet-Making Methods on Volatile Flavor Components of Sanhua Plum Fruit Billets Based on Headspace-Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy and Electronic Nose

食品工业科技. 2023, 44(23): 253-261 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010024>

基于电子鼻、HS-GC-IMS和HS-SPME-GC-MS分析五种水产原料的风味特征

Analysis of Flavor Characteristics of Five Aquatic Raw Materials Based on Electronic Nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS

食品工业科技. 2021, 42(19): 106-117 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021030193>

基于GC-IMS和电子鼻分析牛肉腐败进程中挥发性风味物质的变化

Changes of Volatile Flavor Substances of Beeves in Spoilage Process Based on Gas Chromatography Ion Mobility Spectrometry and Electronic Nose

食品工业科技. 2024, 45(11): 235-244 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070121>

基于HS-SPME-GC-MS和GC-IMS结合电子鼻分析真空冷却对酱牛肉风味的影响

Analysis of the Effect of Vacuum Cooling on the Flavor of Sauce Beef Based on HS-SPME-GC-MS and GC-IMS Combined with Electronic Nose

食品工业科技. 2022, 43(9): 341-348 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080267>

电子鼻结合气相-离子迁移谱联用技术分析兰茂牛肝菌气调贮藏期间挥发性风味物质的变化

Changes in Volatile Compounds of *Lanmaoa asiatica* during Controlled Atmosphere Storage Using Electronic Nose Combined with Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy

食品工业科技. 2021, 42(21): 111-117 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070297>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

韩沅汐, 蒋思源, 张二豪, 等. 电子鼻结合 HS-GC-IMS 技术分析不同种类风干肉干挥发性风味特征 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 281–291. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070090

HAN Yuanxi, JIANG Siyuan, ZHANG Erhao, et al. Analysis of Volatile Flavor Characteristics of Different Types of Air-dried Jerky Based on Electronic Nose Combined with HS-GC-IMS Technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 281–291. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070090

· 分析检测 ·

电子鼻结合 HS-GC-IMS 技术分析不同种类风干肉干挥发性风味特征

韩沅汐^{1,*}, 蒋思源^{1,†}, 张二豪¹, 刘振东¹, 薛蓓^{2,*}, 李 梁^{1,*}

(1. 西藏农牧学院食品科学学院, 高原特色农产品研发中心,
西藏特色农牧资源研发协同创新中心, 西藏林芝 860000;
2. 西藏民族大学医学院, 陕西咸阳 712082)

摘要: 为探究市售易混淆且难以肉眼辨别的不同种类风干肉干的风味组成及特征, 以牦牛肉干、牛肉干、鸡肉干、鸭肉干和猪肉干为研究对象, 采用电子鼻结合顶空气相色谱离子迁移谱技术 (headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry, HS-GC-IMS) 分析不同种类肉干的风味轮廓及组成。通过相对香气活度值及多元统计分析法评估对肉干整体风味贡献显著的关键挥发性风味物质和有助于区分肉干种类的特征挥发性风味物质。电子鼻结果表明, 不同种类肉干整体风味轮廓相似, 但响应度存在差异; HS-GC-IMS 共检测出 42 种挥发性化合物, 包括醇类 9 种、酮类 5 种、萜烯类 9 种、酸类 2 种、酯类 8 种、醛类 6 种、吡嗪类 2 种和呋喃化合物 1 种, 其中醇类化合物的相对含量占比最高, 为 16.04%–32.41%。综合分析发现, 基于电子鼻数据的主成分分析具有良好的区分度, 不同种类肉干风味轮廓具有差异; 不同种类肉干关键挥发性化合物主要包括 (R/S)-芳樟醇、3-羟基-2-丁酮、 α -蒎烯、乙酸乙酯、异戊醛、壬醛、1,8-桉叶素和 β -月桂烯。其中异戊醛和 3-羟基-2-丁酮-D 是关键挥发性风味物质和特征挥发性风味物质, 其相对含量分别与鸡肉干和牦牛肉干存在关联性。综上所述, 本研究通过分析不同种类风干肉干的挥发性风味特征, 可为风干肉干的种类区分提供理论支持。

关键词: 风干肉干, 顶空气相色谱离子迁移谱技术, 挥发性化合物, 风味轮廓, 种类区分

中图分类号: TS251.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)11-0281-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070090



本文网刊:

Analysis of Volatile Flavor Characteristics of Different Types of Air-dried Jerky Based on Electronic Nose Combined with HS-GC-IMS Technology

HAN Yuanxi¹, JIANG Siyuan^{1,†}, ZHANG Erhao¹, LIU Zhendong¹, XUE Bei^{2,*}, LI Liang^{1,*}

(1. Food Science College, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, R & D Center of Agricultural Products with Tibetan Plateau Characteristics, the Provincial and Ministerial Co-founded Collaborative Innovation Center for R & D in Tibet Characteristic Agricultural and Animal Husbandry Resources, Nyingchi 860000, China;
2. Medical College, Tibet Minzu University, Xianyang 712082, China)

Abstract: To investigate the flavor composition and characteristics of air-dried jerkies that are confused and difficult to

收稿日期: 2024-07-08 +并列第一作者

基金项目: 西藏自治区中央引导地方项目 (XZ202202YD0004C); 西藏农牧学院研究生教学改革建设项目 (YJSJG2023-015); 西藏农牧学院研究生教育创新计划项目 (YJS2023-05)。

作者简介: 韩沅汐 (2000–), 女, 硕士研究生, 研究方向: 高原特色农产品产地溯源与真实性研究, E-mail: 903767780@qq.com。

蒋思源 (2000–), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1317493836@qq.com。

* 通信作者: 薛蓓 (1983–), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品微生物学及生物技术, E-mail: 13658940092@163.com。

李梁 (1990–), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 高原特色农产品功能成分挖掘与产地溯源, E-mail: jwllk@sina.com。

distinguish with naked eye on the market, electronic nose (E-Nose) combined with headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) was used to analyze the flavor profiles and compositions of different jerky types, including air-dried yak, beef, chicken, duck and pork jerkies. Through relative odor activity value (ROAV) and multivariate statistical analysis, the key volatile compounds and characteristic volatile compounds that contributed significantly to the overall flavor of different jerkies and helped distinguish between jerky types were screened. The E-Nose results showed that the overall flavor profiles of different jerkies were similar, although their responsiveness differed. A total of 42 volatile compounds were identified by HS-GC-IMS, including 9 alcohols, 5 ketones, 9 terpenes, 2 acids, 8 esters, 6 aldehydes, 2 pyrazines, and 1 furan. Among them, the highest percentage of relative content of alcohol compounds was 16.04% to 32.41%. The comprehensive analysis revealed that the principal component analysis based on E-nose data achieved good discrimination, and that the flavor profiles differed across different jerky types. The key volatile compounds of various jerkies included (R/S)-linalool, 3-hydroxy-2-butanone, α -pinene, ethyl acetate, isovaleraldehyde, 1-nonyl aldehyde, 1,8-cineole and β -myristate. Among them, isovaleraldehyde and 3-hydroxy-2-butanone-D were key volatile substances and characteristic volatile compounds, whose relative contents were correlated with chicken and yak jerkies, respectively. In conclusion, by analyzing the characteristics of flavour characteristics for different types of air-dried jerkies, which could provide theoretical support for the differentiation of air-dried jerky types.

Key words: air-dried meat jerky; headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry; volatile compounds; flavor profile; classification

肉干是一种传统的干制肉类食品,最初目的是通过腌制和脱水工艺延长鲜肉的保质期^[1]。随着加工技术的进步,肉干不再仅仅用于保存肉类,而是逐渐成为一种深受欢迎的休闲食品。其以单一畜禽肉为原料,经过修割、腌制和烘干等工艺制成,具有独特风味和口感的同时,还保留了鲜肉的营养成分。加之其储存期长,方便携带的特点而受到广大消费者的喜爱。现今,市面上的肉干种类繁多,包括牛肉干、猪肉干和鸡肉干等,满足了不同消费者的选择偏好^[2]。然而,由于原料的稀缺性及饲养生长环境的差异,不同种类的肉干在市场价值上存在明显差距,如牦牛肉的饲养成本较高,其价格通常是普通牛肉的2~10倍^[3]。在市场需求增加的背景下,一些商家利用不同种类肉干的市场价值差异,通过伪劣标签或假冒产品的方式追求不当利润。这些假冒伪劣行为包括但不限于利用成本较低的鸭肉干或猪肉干冒充高价值的牦牛肉干进行售卖。此外,不同物种鲜肉在经腌制加工后其风味和外观往往相似且难以辨别,这使得消费者在购买过程中难以识别产品的真实性。

在肉类热加工过程中,美拉德反应通过脂质转化产生独特的风味。然而不同物种鲜肉的脂质构成及含量迥异,尤其是肌肉脂质。这些差异影响其加工后所产生的风味,并与物种间存在特异相关性^[4-5]。例如,鸡肉中的高不饱和脂肪酸含量促使其在加工处理后产生特有的挥发性醛类物质,从而形成独特的香气。YANG等^[6]在对煎烤鸭肉、鸡肉、牛肉、羊肉和猪肉等5种常见肉类的鉴别研究中发现,2-戊基呋喃、2-丁基呋喃、2-己基呋喃、1-辛烯-3-醇和1-辛烯-3-酮与鸭肉的风味特征密切相关,而甲酯则被确定为牛肉的主要鉴别生物标志物。这种特异相关性将会是区分不同种类肉制品的关键依据。

近年来,挥发组学技术因其识别及定量食品中风味特征的能力,已成为评估食品真实性及产地来源

的新兴技术^[7]。其中,电子鼻和气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)是两种关键的分析工具。电子鼻通过捕捉样品中的挥发性化合物,生成特定的气味轮廓,适合快速、无损的初步筛查和大规模检测^[8]。而GC-IMS则能详细分析和定量特定成分,若采用顶空进样技术(headspace sampling, HS),可在无需样品预处理的情况下实现低检测限和高灵敏度^[9]。两者的结合使用,能够更全面、科学地揭示样品的香气信息,提高分析的准确性和效率。通过电子鼻与GC-IMS结合,张宗国等^[10]成功地鉴别了掺假羊肉;赵改名等^[11]确定了12种鸭肉腥味特征物质;王天杨等^[12]和徐丽娜等^[13]分析了在不同烹饪方式下猪肉的挥发性化合物,以探讨其香气特征差异;而赵志平等^[14]分析了牛肉腐败过程中挥发性风味物质的变化,以探讨其腐败特征并筛选出潜在的生物标志物质。尽管这种结合技术对鲜肉不同加工方式、品种及质量变化过程中的风味特征分析方面取得了显著进展,但对肉干产品的相关研究较为有限。

因此本研究以市面上常易混淆且消费者难以通过感官辨别的5种风干肉干为研究对象,基于电子鼻结合HS-GC-IMS技术分别对牦牛肉干、牛肉干、鸡肉干、鸭肉干和猪肉干的挥发性成分进行检测。采用相对香气活度值及多元统计分析方法,以深入探讨不同种类肉干的风味组成,确定关键挥发性风味物质及特征挥发性风味物质,并探究不同种类肉干中的风味组成成分与其种类间的关联性,以期对风干肉干的种类区分提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

为保证样品的一致性和真实性,本试验样品委托西藏天湖放牧人农牧科技开发有限公司按照NY/T 2782-2015风干肉加工技术规范标准统一加工

制作商品风干牦牛肉干(MNR)、风干牛肉干(NR)、风干鸡肉干(JR)、风干鸭肉干(YR)和风干猪肉干(ZR)。所用原料包括精瘦鲜牦牛后腿肉、黄牛后腿肉、鸡胸肉、鸭胸肉和猪后腿肉,均购于拉萨畜禽批发市场,并在-18℃条件下运输至西藏天湖放牧人农牧科技开发有限公司加工基地进行处理;C₄~C₉正构酮混合标准品:2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮、2-壬酮(所有试剂均为色谱纯,用于GC-IMS校准曲线的建立)阿拉丁公司。

FlavourSpec®气相离子迁移谱 德国 G.A.S.公司;CTC-PAL 3 静态顶空自动进样装置 瑞士 CTC Analytics AG 公司;DB-WAX 毛细管色谱柱(15 m×0.53 mm, 1.0 μm) 美国 Restek 公司;C-Nose 型电子鼻 上海保圣实业发展有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 风干肉干制备 将解冻并清洗后的原料肉去除表面筋膜、结缔组织以及多余脂肪,修整成 15 cm×4 cm×3 cm 的条状块。加入西藏天湖放牧人产品制作的基础腌制液,并添加基础配方(包括食盐、白糖、辣椒、花椒粉、味精及香辛料等)进行调味。腌制过程在 4℃下,使用保鲜膜密封腌制 24 h。腌制完成后,将腌制肉条悬挂于风干架上,在风干室内于 25℃、湿度 60%~80% 和风速大于 1.0 m/s 的条件下自然风干 72 h,之后进行 180℃烘烤 3 min。烘烤后摊晾降温,再使用高温蒸煮袋袋装封口,并在微波杀菌总功率 8 kW 下微波加热 4 min,保温 5 min。最终成品在常温下贮藏备用。

1.2.2 电子鼻检测 C-Nose 型电子鼻由 10 个具有不同性质的金属氧化物半导体传感器组成,如表 1 所示。进行检测时,准确称取不同种类肉干样品 0.5 g,于 60℃水浴密封保温 30 min 后,将探头插入瓶内以吸取顶端气体。每种肉干测定 3 组平行,具体设置采样时间与传感器清洗时间为 120 s。

表 1 电子鼻传感器响应物质
Table 1 Electronic nose sensor response substances

阵列序号	传感器	响应物质
R1	Sn_1	烷烃
R2	Sn_2	醇类、醛类、短链烷烃类
R3	Sn_3	臭氧
R4	Sn_4	硫化物
R5	Sn_5	有机胺
R6	Sn_6	有机气体、苯酮类、醇醛类、芳香化合物
R7	Sn_7	短链烷烃类
R8	Sn_8	芳香化合物、醇醛类
R9	Sn_9	含氢气体
R10	Sn_10	可燃气体物质

1.2.3 HS-GC-IMS 检测 参考 BI 等^[15]的方法,准确称取不同种类肉干 0.5 g 放入 20 mL 顶空瓶中,在 60℃、500 r/min 条件下孵育 15 min 后进样,每种肉干测定 3 组平行。采用顶空进样方式,进样针

温度设置为 80℃,载气使用高纯氮气(纯度≥99.999%)。选择不分流模式,进样量为 1000 μL;色谱柱温度设定为 60℃,分析时间 30 min;设置 IMS 迁移管(长度 53 mm)温度为 45℃,其漂移气使用高纯氮气(纯度≥99.999%)。分析过程中采用正离子模式,气体流速程序为:0~2 min 漂移气流速 150 mL/min、载气流速 2 mL/min 开始数据采集;2~10 min 漂移气流速 150 mL/min、载气流速 10 mL/min;10~20 min 漂移气流速 150 mL/min、载气流速 100 mL/min;20~30 min 漂移气流速 150 mL/min、载气流速 100 mL/min,最后在 30 min 停止数据采集。

通过上述 GC-IMS 条件检测正构酮混合标准品,建立保留时间和保留指数的校准曲线,以便根据目标挥发性化合物的保留时间计算出该物质的保留指数,计算公式如(1)所示^[16]。同时,利用 VOCal 软件内置的 GC 保留指数(NIST 2020)数据库和 IMS 迁移时间数据库进行检索对比,以对不同种类肉干中的挥发性化合物进行定性分析。最后,根据面积归一法计算各挥发性化合物的相对含量^[17]。

$$RI(X) = RI(Z) + \frac{[RI(Z+1) - RI(Z)] \times [\log R(X) - \log R(Z)]}{\log R(Z+1) - \log R(Z)} \quad \text{式 (1)}$$

式中:RI(X)为目标挥发性化合物的保留指数;RI(Z)和 RI(Z+1)分别为目标挥发性化合物流出前后的正构酮所含碳原子数目的保留指数;R(X)为目标挥发性化合物的保留时间;R(Z)和 R(Z+1)分别为目标挥发性化合物流出前后的正构酮所含碳原子数目的保留时间,t 为保留时间。

1.2.4 关键挥发性风味物质评价 以相对香气活度值(relative odor activity value, ROAV)为标准,用于评估不同种类肉干中各挥发性化合物对肉干样品整体风味的贡献率。定义对肉干样品整体风味贡献程度最大的组分 ROAV 值为 100。当挥发性化合物的 ROAV<0.1 时表示该化合物对样品的整体风味没有影响;0.1≤ROAV<1 表明该化合物对整体风味具有重要的修饰作用;1≤ROAV≤100 表示该化合物为样品的关键挥发性化合物,其 ROAV 值越大则表明该组分对样品整体风味的贡献越大^[18-19]。

$$ROAV \approx 100 \times \frac{C_{ti}}{C_{ts}} \times \frac{T_s}{T_i} \quad \text{式 (2)}$$

式中:C_{ts}表示对整体风味影响贡献最大的化合物组分的相对含量;C_{ti}表示各个挥发性化合物的相对含量;T_s表示整体风味影响贡献最大的化合物组分的感知阈值;T_i表示各个挥发性化合物的感知阈值。

1.2.5 多元统计分析 使用主成分分析对电子鼻数据进行分析,以探索不同种类肉干的风味轮廓数据间的潜在结构。采用随机森林法(设置决策树数量为 100)评估每种挥发性化合物在区分不同种类样品中

的重要性^[14],该方法能够识别有助于区分不同种类肉干的特征挥发性化合物。

1.3 数据处理

使用 Origin 8.5 绘制电子鼻检测的雷达图和主成分分析图。利用 VOCal 数据处理软件的 Reporter 和 Gallery Plot 插件生成挥发性成分的三维谱图、二维谱图和指纹图谱,便于比较肉干间挥发性化合物的差异。此外,采用 Excel 2021、SPSS 22.0 和 Python 3.11 进行数据的多元统计分析、差异显著性分析及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同种类肉干电子鼻分析

电子鼻检测的响应结果如图 1 所示,10 种传感器对不同种类肉干挥发性组分的响应轮廓相似,但响应程度存在差异。在 5 种肉干中,传感器 R1(Sn_1)、R2(Sn_2)、R4(Sn_4)、R5(Sn_5)、R6(Sn_6)和 R8(Sn_8)均表现出较强的响应信号,这些传感器对烷烃、硫化物、有机胺、苯酮类、芳香类及醇醛类组分响应灵敏。这与 CUI 等^[20]的研究结果相似,表明醛类、醇类、含硫化合物及芳香类物质为猪肉、牛肉、鸡肉和鸭肉的主要风味物质。相比之下,对臭氧、含氢气体和可燃气体物质响应灵敏的传感器,其响应信号较弱。进一步对比分析显示,ZR、YR 及 NR 在除 R3 以外的传感器上响应值均高于 MNR 和 JR,说明 ZR、YR 和 NR 中的挥发性组分浓度较高,或具有更为丰富的特定挥发性化合物种类和数量;NR 在 R4 传感器上的响应值显著高于 JR 和 MNR($P<0.05$),说明 NR 中硫化物的浓度较二者更高,这与 CUI 等^[20]结果部分吻合。

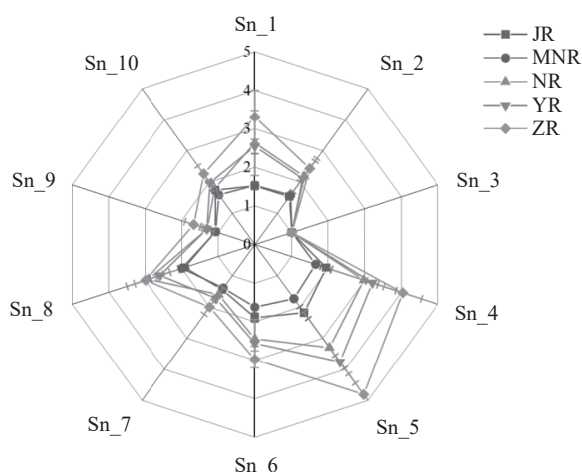


图 1 不同种类肉干挥发性组分的传感器雷达图

Fig.1 Sensor radar chart of volatile components from different types of jerky

2.2 电子鼻主成分分析

通过主成分分析的线性变换,将原始数据转换成在不同维度上相互独立的指标,从而更直观地解释不同种类肉干样品与电子鼻传感器之间的关系。如图 2 所示,主成分 1(PC1)的贡献率为 85.82%,主

成分 2(PC2)的贡献率为 11.38%,主成分 3(PC3)的贡献率为 1.53%。前三主成分的累计贡献率为 98.73%,几乎涵盖了肉干样品的全部信息。此外,5 组肉干样品在主成分空间内无交叉区域,显示出良好的区分度^[21]。其中 PC1 反映了样品间的主要差异信息,对肉干整体风味影响显著。具体分析显示,在 PC1-PC2 空间内,YR 和 ZR 样品在 PC1 轴上的差异较小,说明两者间风味轮廓相似。在 PC1-PC3 空间中,尽管 JR 和 MNR 在 PC3 轴上相距较远,但由于 PC3 的贡献率小,因此 JR 和 MNR 的风味轮廓差异较小。综上所述,MNR 与 YR、ZR 的风味差异大,而与 JR 的风味差异较小。尽管电子鼻技术有效识别不同种类肉干样品风味差异,却未能精确指示具体的风味物质。因此为深入探究,进一步应用了 HS-GC-IMS 对不同种类肉干的挥发性成分进行了鉴定与分析。

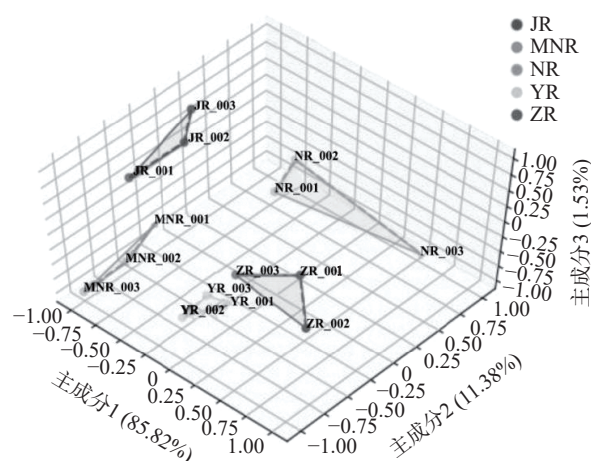


图 2 不同种类肉干电子鼻主成分分析图

Fig.2 Principal component analysis plot of different types of jerky electronic nose

2.3 不同种类肉干的 HS-GC-IMS 分析

2.3.1 不同种类肉干挥发性风味物质谱图分析 通过 HS-GC-IMS 技术对不同肉干的挥发性风味物质进行检测,结果如图 3 所示。该图展示了不同肉干风味物质的三维谱图,可直观呈现肉干种类间挥发性风味物质组成。为消除毛细管柱温度和载气流速的影响,对 $X=1.0$ 处的响应离子峰进行了归一化处理^[22],以便进一步从俯视角度进行分析比较。图 4 显示不同种类肉干的响应信号主要集中在 1000~

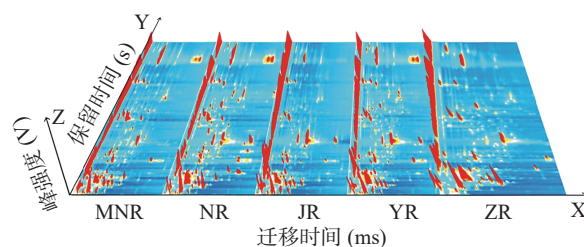


图 3 不同种类肉干挥发性成分 HS-GC-IMS 三维谱图

Fig.3 HS-GC-IMS three-dimensional spectrum plot of volatile components in different types of jerky

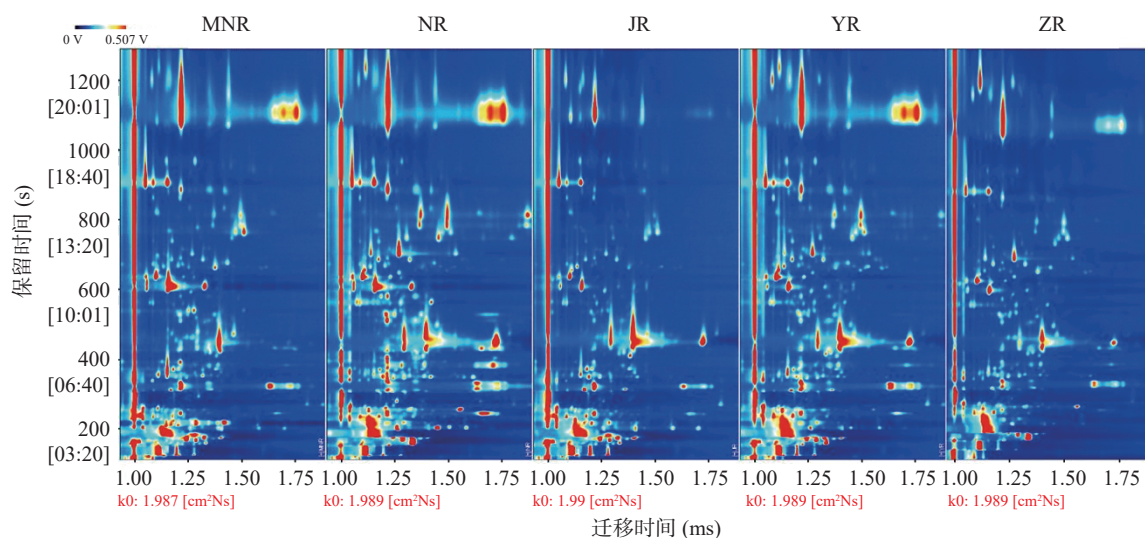


图 4 不同种类肉干挥发性成分 HS-GC-IMS 二维谱图

Fig.4 HS-GC-IMS two-dimensional spectrum plot of volatile components in different types of jerky

1200 s 保留时间范围内,图中所呈现的颜色代表着各挥发性化合物的信号强度,从蓝色到红色,颜色越深表示峰强度越大。某些挥发性化合物会形成多个信号峰,以单体、二聚体或三聚体形式存在,其现象与该化合物的浓度有关^[23]。图 3 和图 4 中均可见不同种类肉干的挥发性组分得到了较好分离且分布相似,但特定组分含量存在明显差异,这可能是由于不同种类肉干所用的原料不同。通过纵坐标观察发现,在保留时间 600 s 内, NR 与其余样品相比具有更高的峰强度和响应峰数量;在 600~1000 s 内, JR 与 ZR 样品呈现出相似的峰值分布;在 1000~1200 s 内, MNR、NR 与 YR 三种样品显示的峰信号强度相近,而 JR 样品信号强度则相对较弱。若要深入研究不同种类肉干的挥发性化合物组成情况,需要与相应的指纹图谱进行对比。

为直观比较分析不同种类肉干挥发性化合物的差异,依据特征峰选取规则^[24],将识别出的特征峰区域进行逆行排序,构建了不同种类肉干的风味指纹图谱,具体如图 5 所示。在不同种类肉干中检测出的挥发性化合物种类相似,但部分挥发性化合物相对含量差别显著并形成了共性峰区域和特征峰区域。通

过分析这些区域中的挥发性化合物,可以了解不同种类肉干的风味特征。在图 5 中,区域 A 为 5 种肉干的共性峰区域,主要包括乙醇、乙酸、2-丙酮和 β -蒎烯共 4 种挥发性化合物;区域 B 为 MNR 的特征峰区域,主要包括 2-丁酮、反式-2-己烯-1 醇、2-己烯-1 醇、反式-2-戊烯醛和正戊醛共 5 种挥发性化合物;区域 C 为 NR 的特征峰区域,主要包括 α -蒎品烯、异戊酸乙酯、丙酸乙酯、 β -月桂烯、蒎品油烯、 γ -蒎品烯、(+)-柠檬烯、乳酸乙酯、乙酸丁酯、正己酸乙酯和丁酸乙酯共 11 种挥发性化合物;区域 D 为 JR 的特征峰区域,主要包括 2-甲基-1-丙醇、异戊醛和 2-甲基-2-丙醇共 3 种挥发性化合物;区域 E 为 YR 的特征峰区域,主要包括庚醛、2,5-二甲基吡嗪和 2,6-二甲基吡嗪共 3 种挥发性化合物;区域 F 为 ZR 的特征峰区域,主要包括丙酸、2-庚醇、3-甲基-1-丁醇、1-辛烯-3-酮和乙酸乙酯共 5 种挥发性化合物。这表明在同一加工条件下,不同种类肉干拥有相似风味。然而由于制作原料的脂肪含量、肌肉结构和氨基酸组成等因素受其物种影响而存在差异,因此不同种类肉干风味也有所不同。

2.3.2 不同种类肉干挥发性风味物质分析 通过

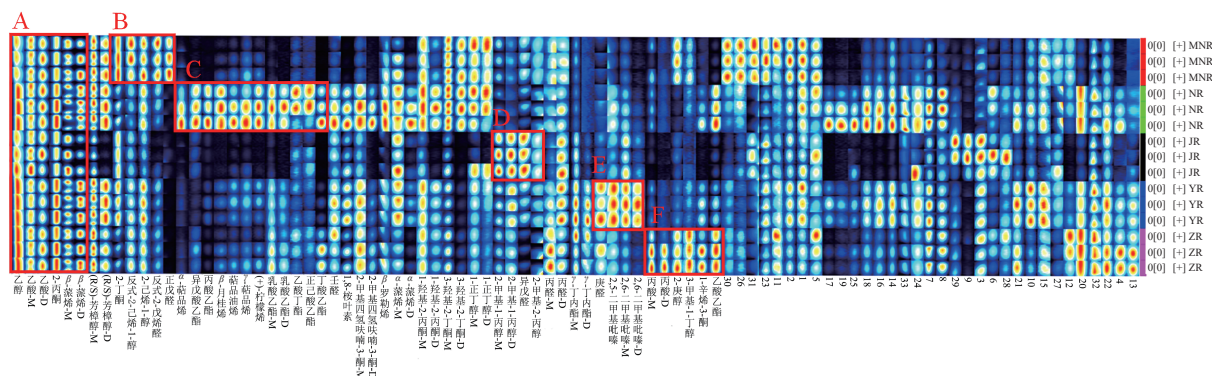


图 5 不同种类肉干中风味物质指纹图谱

Fig.5 Fingerprint of volatile components in different types of jerky

HS-GC-IMS 共检测出 89 种挥发性化合物,经过数据库对比定性后,明确识别出 42 种单体挥发性化合物及部分化合物的二聚体形式。根据面积归一法对峰体积进行挥发性化合物的相对含量计算^[17],结果如

表 2 所示。分析结果表明,不同种类肉干中均存在多种挥发性化合物,主要包括醇类 9 种、酮类 5 种、萜烯类 9 种、酸类 2 种、酯类 8 种、醛类 6 种、吡嗪类 2 种和呋喃化合物 1 种。

表 2 不同种类肉干中挥发性成分
Table 2 Volatile components in different types of jerky

物质类别	中文名称	英文名称	CAS号	保留指数	保留时间(s)	迁移时间(ms)	相对含量(%)				
							MNR	NR	JR	YR	ZR
醇类	(R/S)-芳樟醇-M	(R/S)-Linalool-M	78-70-6	1557.6	1098.43	1.22	19.4±0.10 ^a	19.05±0.78 ^{ab}	8.75±0.80 ^c	18.0±0.37 ^b	18.30±0.36 ^b
	(R/S)-芳樟醇-D	(R/S)-Linalool-D	78-70-6	1560.3	1105.25	1.76	6.03±0.44 ^b	7.13±0.55 ^a	0.62±0.08 ^d	7.27±0.23 ^a	5.02±0.66 ^c
	反式-2-己烯-1-醇	(E)-2-Hexen-1-ol	928-95-0	1400.5	768.9	1.52	1.08±0.17 ^a	0.53±0.08 ^d	0.60±0.05 ^{cd}	0.75±0.04 ^{bc}	0.83±0.01 ^b
	乙醇	Ethanol	64-17-5	933.1	189.1	1.16	3.27±0.05 ^c	4.24±0.06 ^b	3.63±0.25 ^b	4.11±0.07 ^a	4.21±0.03 ^a
	1-正丁醇-M	1-Butanol-M	71-36-3	1154.5	373.3	1.18	0.34±0.06 ^a	0.32±0.05 ^{ab}	0.17±0.15 ^b	0.22±0.04 ^{ab}	0.21±0.01 ^{ab}
	1-正丁醇-D	1-Butanol-D	71-36-3	1154.2	372.91	1.38	0.08±0.02 ^a	0.08±0.03 ^a	0.04±0.04 ^a	0.05±0.01 ^a	0.04±0.00 ^a
	2-己烯-1-醇	2-Hexen-1-ol	2305-21-7	1384.5	741.59	1.18	0.20±0.02 ^a	0.16±0.01 ^c	0.10±0.01 ^d	0.18±0.00 ^b	0.15±0.00 ^c
	2-甲基-1-丙醇-M	2-Methyl-1-Propanol-M	78-83-1	1105.4	314.6	1.17	0.48±0.05 ^b	0.25±0.02 ^c	1.07±0.10 ^a	0.54±0.01 ^b	0.53±0.05 ^b
	2-甲基-1-丙醇-D	2-Methyl-1-Propanol-D	78-83-1	1106.4	315.68	1.37	0.13±0.01 ^d	0.06±0.01 ^c	0.31±0.01 ^a	0.22±0.01 ^b	0.18±0.01 ^c
	2-庚醇	2-Heptanol	543-49-7	1337	665.69	1.38	0.46±0.05 ^a	0.09±0.01 ^c	0.17±0.03 ^b	0.19±0.01 ^b	0.48±0.07 ^a
	2-甲基-2-丙醇	2-Methyl-2-propanol	75-65-0	908.2	177.14	1.33	0.43±0.00 ^c	0.45±0.01 ^c	0.57±0.02 ^a	0.51±0.02 ^b	0.39±0.03 ^d
	3-甲基-1-丁醇	3-Methyl-1-Butanol	123-51-3	1218.4	465.7	1.25	0.08±0.01 ^b	0.04±0.01 ^c	0.03±0.00 ^c	0.04±0.00 ^c	0.10±0.01 ^a
酮类	总计						32.04±0.12 ^a	32.41±0.56 ^a	16.04±1.29 ^c	32.12±0.24 ^a	30.48±1.08 ^b
	2-丁酮	2-Butanone	78-93-3	906.2	176.2	1.25	1.45±0.07 ^a	0.71±0.04 ^c	1.05±0.01 ^b	1.11±0.06 ^b	0.57±0.02 ^d
	1-羟基-2-丙酮-M	1-Hydroxy-2-propanone-M	116-09-6	1318	637.65	1.06	0.46±0.04 ^b	0.56±0.02 ^a	0.25±0.06 ^c	0.48±0.02 ^b	0.47±0.02 ^b
	1-羟基-2-丙酮-D	1-Hydroxy-2-propanone-D	116-09-6	1317.07	637.25	1.23	0.10±0.03 ^c	0.27±0.04 ^a	0.02±0.01 ^d	0.19±0.01 ^b	0.15±0.01 ^b
	3-羟基-2-丁酮-M	Acetoin-M	513-86-0	1298.1	609.49	1.06	1.45±0.04 ^a	1.43±0.06 ^a	0.56±0.18 ^c	0.64±0.06 ^{bc}	0.78±0.04 ^b
	3-羟基-2-丁酮-D	Acetoin-D	513-86-0	1298.7	610.29	1.33	1.59±0.09 ^a	1.59±0.12 ^a	0.09±0.03 ^c	0.19±0.04 ^{bc}	0.28±0.01 ^b
	2-丙酮	2-Propanone	67-64-1	815.2	138.78	1.12	9.04±0.78 ^b	11.68±0.98 ^a	8.50±0.20 ^b	11.3±0.26 ^a	11.30±0.64 ^a
	1-辛烯-3-酮	1-Octen-3-one	4312-99-6	1326.3	649.69	1.27	0.06±0.01 ^b	0.16±0.06 ^a	0.03±0.00 ^b	0.17±0.03 ^a	0.25±0.09 ^a
	总计						14.15±0.85 ^b	16.39±0.96 ^a	10.51±0.13 ^c	14.16±0.13 ^b	13.83±0.66 ^b
	萜品油烯	α -Terpinolene	586-62-9	1283.8	582.41	1.22	0.12±0.05 ^b	0.46±0.16 ^a	0.07±0.02 ^b	0.23±0.04 ^b	0.16±0.07 ^b
	β -罗勒烯	β -Ocimene	13877-91-3	1257.2	531.66	1.21	0.40±0.12 ^b	0.77±0.16 ^a	0.16±0.02 ^c	0.49±0.05 ^b	0.48±0.15 ^b
萜烯类	γ -萜品烯	γ -Terpinene	99-85-4	1246.5	512.64	1.22	0.17±0.06 ^b	0.43±0.13 ^a	0.07±0.03 ^b	0.21±0.04 ^b	0.17±0.07 ^b
	1,8-桉叶素	1,8-Cineole	470-82-6	1208.3	449.83	1.73	0.20±0.06 ^c	4.20±1.09 ^a	2.27±0.73 ^b	3.79±0.46 ^a	2.22±0.62 ^b
	β -月桂烯	β -Myrcene	123-35-3	1162.6	383.95	1.71	0.16±0.06 ^{bc}	1.08±0.07 ^a	0.06±0.02 ^c	0.28±0.06 ^b	0.28±0.12 ^b
	α -蒎烯-M	α -Pinene-M	80-56-8	1028.4	246.69	1.22	0.52±0.20 ^{bc}	0.75±0.03 ^{ab}	0.78±0.21 ^a	0.75±0.01 ^{ab}	0.46±0.05 ^c
	α -蒎烯-D	α -Pinene-D	80-56-8	1028.4	246.69	1.67	0.18±0.10 ^b	1.12±0.41 ^a	0.23±0.10 ^b	0.53±0.07 ^b	0.16±0.05 ^b
	α -萜品烯	α -Terpinene	99-86-5	1177.9	404.96	1.22	0.11±0.01 ^b	0.64±0.24 ^a	0.06±0.01 ^b	0.12±0.02 ^b	0.10±0.02 ^b
	β -蒎烯-M	β -Pinene-M	127-91-3	1113.9	324.11	1.22	3.28±0.13 ^a	2.70±0.23 ^b	3.15±0.46 ^{ab}	3.07±0.13 ^{ab}	3.26±0.08 ^a
	β -蒎烯-D	β -Pinene-D	127-91-3	1114.9	325.19	1.64	2.21±0.60 ^b	3.05±0.19 ^a	1.16±0.26 ^c	3.06±0.04 ^a	2.68±0.35 ^{ab}
	(+)-柠檬烯	(+)-Limonene	138-86-3	1197.9	434.05	1.66	0.17±0.07 ^{bc}	0.74±0.12 ^a	0.05±0.01 ^c	0.31±0.07 ^b	0.24±0.13 ^b
	总计						7.52±1.45 ^c	15.93±1.88 ^a	8.08±1.76 ^c	12.85±0.26 ^b	10.21±1.50 ^{bc}
	丙酸-M	Propanoic acid-M	79-09-4	1611.8	1242.42	1.12	1.87±1.01 ^b	2.13±0.09 ^b	0.64±0.25 ^b	1.75±0.23 ^b	4.98±1.37 ^a
酸类	丙酸-D	Propanoic acid-D	79-09-4	1610.7	1239.3	1.27	0.22±0.07 ^b	0.25±0.02 ^b	0.11±0.02 ^b	0.23±0.01 ^b	0.78±0.37 ^a
	乙酸-M	Acetic acid-M	64-19-7	1472.8	906.06	1.05	3.03±0.10 ^{ab}	3.10±0.14 ^a	3.15±0.11 ^a	2.85±0.06 ^c	3.00±0.10 ^{ab}
	乙酸-D	Acetic acid-D	64-19-7	1473.4	907.39	1.15	2.25±0.18 ^{ab}	2.40±0.09 ^a	2.06±0.48 ^{ab}	1.84±0.27 ^b	2.28±0.14 ^{ab}
	总计						7.38±0.91 ^b	7.88±0.12 ^b	5.95±0.61 ^b	6.67±0.41 ^b	11.05±1.90 ^a
	异戊酸乙酯	Ethyl isovalerate	108-64-5	1070.6	281.44	1.26	0.02±0.00 ^d	0.24±0.04 ^a	0.06±0.00 ^{bc}	0.03±0.00 ^{cd}	0.08±0.02 ^b
酯类	丁酸乙酯	Butanoic acid ethyl ester	105-54-4	1041.8	257.2	1.56	0.03±0.00 ^b	0.91±0.30 ^a	0.03±0.00 ^b	0.14±0.03 ^b	0.81±0.29 ^a
	乙酸乙酯	Acetic acid ethyl ester	141-78-6	876.5	162.99	1.34	0.42±0.04 ^c	4.65±0.75 ^a	0.68±0.07 ^c	2.07±0.47 ^b	5.04±0.49 ^a
	乳酸乙酯-M	Ethyl 2-hydroxypropanoate-M	97-64-3	1364.6	708.85	1.14	0.09±0.00 ^d	0.75±0.07 ^a	0.12±0.02 ^d	0.48±0.02 ^c	0.57±0.04 ^b
	乳酸乙酯-D	Ethyl 2-hydroxypropanoate-D	97-64-3	1362.6	705.63	1.54	0.02±0.00 ^c	0.23±0.05 ^a	0.02±0.00 ^c	0.13±0.01 ^b	0.15±0.04 ^b
	乙酸丁酯	Acetic acid butyl ester	123-86-4	1077.7	287.74	1.24	0.02±0.00 ^b	0.07±0.02 ^a	0.03±0.01 ^b	0.03±0.00 ^b	0.04±0.01 ^b
	γ -丁内酯-M	γ -Butyrolactone-M	96-48-0	1597.4	1202.46	1.09	0.65±0.09 ^c	0.56±0.04 ^c	1.17±0.07 ^b	1.68±0.18 ^a	1.37±0.30 ^b

续表 2

物质类别	中文名称	英文名称	CAS号	保留指数	保留时间(s)	迁移时间(ms)	相对含量(%)				
							MNR	NR	JR	YR	ZR
酯类	γ -丁内酯-D	γ -Butyrolactone-D	96-48-0	1598.7	1205.91	1.3	0.19±0.03 ^b	0.18±0.01 ^b	0.24±0.03 ^b	0.58±0.11 ^a	0.54±0.06 ^a
	正己酸乙酯	Ethyl caproate	123-66-0	1224.2	474.95	1.79	0.03±0.00 ^b	0.19±0.06 ^a	0.09±0.03 ^b	0.07±0.01 ^b	0.09±0.01 ^b
	丙酸乙酯	Ethyl propanoate	105-37-3	963.1	204.57	1.45	0.05±0.01 ^b	1.45±0.27 ^a	0.12±0.03 ^b	0.30±0.08 ^b	0.14±0.03 ^b
	总计						1.53±0.13 ^b	9.22±1.21 ^a	2.56±0.11 ^b	5.52±0.85 ^b	8.85±0.54 ^a
	庚醛	Heptaldehyde	111-71-7	1186.6	417.55	1.34	0.06±0.00 ^c	0.07±0.01 ^c	0.09±0.02 ^c	0.23±0.04 ^a	0.17±0.04 ^b
醛类	异戊醛	3-Methyl butanal	590-86-3	905.4	175.84	1.41	0.34±0.01 ^b	0.17±0.05 ^d	0.57±0.03 ^a	0.29±0.02 ^c	0.09±0.00 ^c
	丙醛-M	Propanal-M	123-38-6	779.4	126.37	1.05	0.09±0.01 ^b	0.07±0.01 ^c	0.05±0.00 ^d	0.09±0.01 ^b	0.14±0.01 ^a
	丙醛-D	Propanal-D	123-38-6	777.8	125.84	1.14	0.14±0.01 ^c	0.16±0.02 ^c	0.20±0.01 ^b	0.26±0.01 ^a	0.20±0.02 ^b
	壬醛	1-Nonanal	124-19-6	1389.5	750.03	1.46	0.21±0.03 ^c	0.59±0.10 ^a	0.40±0.04 ^b	0.55±0.05 ^a	0.51±0.10 ^{ab}
	正戊醛	n-Pentanal	110-62-3	991.6	220.43	1.42	1.60±0.25 ^a	0.15±0.02 ^b	0.18±0.06 ^b	0.06±0.01 ^b	0.07±0.01 ^b
	反式-2-戊烯醛	(E)-2-Pentenal	928-95-0	1142.6	358.16	1.11	0.73±0.06 ^a	0.33±0.07 ^b	0.12±0.06 ^c	0.31±0.05 ^b	0.34±0.03 ^b
	总计						3.17±0.22 ^a	1.53±0.06 ^c	1.60±0.07 ^{bc}	1.78±0.05 ^b	1.51±0.09 ^c
吡嗪类	2,5-二甲基吡嗪	2,5-Dimethylpyrazine	123-32-0	1331.9	658.1	1.12	0.13±0.01 ^d	0.28±0.02 ^b	0.22±0.02 ^c	0.38±0.01 ^a	0.23±0.01 ^c
	2,6-二甲基吡嗪-M	(2,6)-Dimethylpyrazine-M	108-50-9	1338.5	667.96	1.14	0.11±0.01 ^d	0.19±0.03 ^c	0.30±0.03 ^b	0.38±0.02 ^a	0.16±0.01 ^c
	2,6-二甲基吡嗪-D	(2,6)-Dimethylpyrazine-D	108-50-9	1338.2	667.51	1.53	0.01±0.00 ^c	0.03±0.01 ^{bc}	0.04±0.01 ^b	0.11±0.01 ^a	0.02±0.00 ^c
	总计						0.25±0.01 ^d	0.49±0.05 ^b	0.56±0.06 ^b	0.87±0.03 ^a	0.42±0.02 ^c
呋喃类	2-甲基四氢呋喃-3-酮-M	2-Methyl-3-ketotetrahydrofuran-M	3188-00-9	1275.5	566.04	1.08	0.12±0.01 ^c	0.37±0.04 ^a	0.18±0.01 ^b	0.35±0.02 ^a	0.35±0.05 ^a
	2-甲基四氢呋喃-3-酮-D	2-Methyl-3-ketotetrahydrofuran-D	3188-00-9	1275	565.24	1.42	0.04±0.01 ^c	0.44±0.19 ^a	0.05±0.01 ^c	0.18±0.03 ^{bc}	0.27±0.08 ^b
	总计						0.16±0.01 ^c	0.81±0.22 ^a	0.24±0.02 ^c	0.53±0.05 ^b	0.62±0.12 ^{ab}

注:“M”表示单体;“D”表示二聚体;结果表示为平均值±标准差(n=3),同一行中不同小写字母表示显著性差异, $P<0.05$ 。

在不同种类肉干样品中各类挥发性化合物的占比不同。其中醇类化合物种类最为丰富,其相对含量为 16.04%~32.41%,占比最高。主要包括直链醇(乙醇、1-正丁醇、2-庚醇)、分支醇(2-甲基-1-丙醇、3-甲基-1-丁醇、2-甲基-2-丙醇、反式-2-己烯-1-醇、2-己烯-1-醇)和萜醇((R/S)-芳樟醇)。短链直醇因其分子结构简单在感官上呈现柔和的香气特征^[17],主要通过脂肪氧合酶和过氧化物酶的作用^[25]产生;与短链直醇相比,分支醇对肉干样品香气层次的增加具有潜在的促进作用,可能来源于美拉德反应和氨基酸的 Strecker 降解^[25]; (R/S)-芳樟醇呈现花香和柠檬的风味,主要来源于香辛料。进一步对比分析发现,乙醇在 NR、YR 和 ZR 中的相对含量相近; (R/S)-芳樟醇、1-正丁醇和 2-己烯-1 醇在 JR 中的相对含量最低; 2-甲基-1-丙醇在 MNR 和 NR 中的相对含量低于 JR、YR 和 ZR; 3-甲基-1-丁醇在 ZR 中的相对含量最高。

在不同种类肉干中检测出的酮类化合物相对含量为 10.51%~16.39%, 占据次高比例, 这些物质通常被认为在肉制品的挥发性风味中起协调作用^[25]。主要包括 2-丁酮、1-羟基-2-丙酮、3-羟基-2-丁酮、2-丙酮和 1-辛烯-3-酮。其中 2-丙酮、3-羟基-2-丁酮和 2-丁酮的相对含量排名靠前。2-丙酮主要来源于动物胴体肌肉中的糖原降解, 主要通过糖原降解产物乙酰辅酶 A 转换获得^[26], 并赋予了肉干黄油味和果香; 3-羟基-2-丁酮则主要通过美拉德反应产生; 而 2-丁酮来自于 β -酮酸的脱羧或饱和脂肪酸的 β 氧化, 并可作为脂肪风味形成的重要前体。进一步对比分析发现, 2-丙酮在 NR、YR 和 ZR 中的相对含量接近; 1-

羟基-2-丙酮和 1-辛烯-3-酮在 MNR 与 JR 中相对含量显著低于 NR、YR 和 ZR ($P<0.05$); 3-羟基-2-丁酮在 MNR 和 NR 中的相对含量显著高于其余 3 种肉干 ($P<0.05$)。

在不同种类肉干中检测出的萜烯类化合物的相对含量为 7.52%~15.93%, 主要包括单萜烯类(萜品油烯、 γ -萜品烯、 β -月桂烯、 α -蒎烯、 β -蒎烯、 α -萜品烯、(+)-柠檬烯)、倍半萜烯类(β -罗勒烯)和双萜烯类(1,8-桉叶素)。其中单萜烯类物质如 α -蒎烯、 β -蒎烯和(+)-柠檬烯来源于胡椒^[27]。此外(+)-柠檬烯的存在也可能源于以青草和油籽为食的动物在脂质组织中的累积^[2]。进一步对比分析发现, 萜品油烯、 β -月桂烯、 γ -萜品烯和 α -萜品烯在 NR 中的相对含量显著高于其余 4 种肉干 ($P<0.05$), 而 β -罗勒烯在 JR 中的相对含量最低, 1,8-桉叶素在 MNR 中的相对含量同样最低。

在不同种类肉干中检测出的酸类化合物的相对含量为 5.95%~11.05%, 主要包括乙酸和丙酸。这两者在挥发性化合物分析中通常被归类为脂肪酸类挥发性化合物。乙酸普遍被认为是动物胴体中碳水化合物发酵、脂质或氨基酸分解代谢过程中的产物^[28]。此外, 在肉干制品中乙酸也可能来自用于改善肉干品质或延长保质期的添加剂^[29] 以及美拉德反应^[30]。与乙酸类似, 丙酸也可能来源于添加剂。进一步对比分析发现, 乙酸在 MNR 和 ZR 中的相对含量相接近, 丙酸在 ZR 中的相对含量最高。

在不同种类肉干中检测出的酯类化合物的相对含量为 1.53%~9.22%, 一般认为来源于游离的脂肪

酸和醇的酯化反应产生^[31]。主要包括短链酯类(乙酸乙酯、丁酸乙酯、乙酸丁酯、丙酸乙酯)、中链酯类(异戊酸乙酯、乳酸乙酯、正己酸乙酯)和环状酯类(γ -丁内酯)。其中乙酸乙酯具有水果和酯类香气; γ -丁内酯由 γ -羟基丁酸经水解、加热脱水并环化后形成^[32]。进一步对比分析发现,异戊酸乙酯、丙酸乙酯、乳酸乙酯、乙酸丁酯、正己酸乙酯和丁酸乙酯在 NR 中的相对含量最高; γ -丁内酯在 YR 中的相对含量最高;乙酸乙酯在 NR 和 ZR 中的相对含量高于 MNR、JR 和 YR。

在不同种类肉干中检测出的醛类化合物的相对含量为 1.51%~3.17%,这些醛类化合物主要来自脂质的氧化过程,MOTTRAM^[33] 认为其是熟肉产品挥发性化合物的重要来源。主要包括饱和醛(正戊醛、异戊醛、丙醛、壬醛、庚醛)和不饱和醛(反式-2-戊烯醛)。肉类中的脂肪酸种类是多种醛类化合物产生的来源,其中正戊醛是 MNR 中相对含量最多的醛类化合物,主要由亚油酸和亚麻酸等不饱和脂肪酸氧化分解产生^[34];壬醛则由 n-9 类多不饱和脂肪酸氧化产生;异戊醛来源于缬氨酸,通过 Strecker 降解反应中的氧化脱氨和脱羧步骤产生^[26];除了脂质氧化和蛋白质降解外,壬醛还是美拉德反应产物中发现的主要醛类化合物之一^[35]。进一步对比分析发现,反式-2-戊

烯醛在 MNR 中的相对含量显著高于其余 4 种肉干($P<0.05$);壬醛在 MNR 中的相对含量最低;庚醛在 MNR、NR 和 JR 中的相对含量相近。

在肉干中检测出的吡嗪类化合物的相对含量为 0.25%~0.87%,可能来源于 Strecker 反应中醛和酮类物质的缩合过程,或在干制加热过程中抗坏血酸和蛋白质的反应过程^[36]。主要包括烷基吡嗪(2,5-二甲基吡嗪和 2,6-二甲基吡嗪)。烷基吡嗪常常描述带有坚果或烘焙香味^[37] 并被普遍认为是赋予肉制品其特征性烤制风味的关键成分^[38]。进一步对比分析发现,2,5-二甲基吡嗪和 2,6-二甲基吡嗪在 YR 中相对含量显著高于其余 4 种肉干($P<0.05$)。

2.3.3 关键挥发性风味物质评价 在评估不同种类肉干样品风味特性时,风味的形成不仅受挥发性化合物浓度的影响,还需达到感觉阈值才能被感知^[19]。通过结合浓度与感官阈值分析,可以客观评价各化合物对肉干风味的贡献。本研究采用 ROAV 法,将(R/S)-芳樟醇定义为对肉干整体风味贡献最大的组分,并计算每个挥发性化合物的 ROAV。计算结果与对应的气味描述如表 3 所示,其中仅列出了 ROAV>0.1 的化合物。

在 5 种肉干中, $1 \leq \text{ROAV} \leq 100$ 的挥发性化合物包括(R/S)-芳樟醇、3-羟基-2-丁酮、 α -蒎烯、乙酸

表 3 不同种类肉干中挥发性风味物质的 ROAV
Table 3 ROAV of volatile components in different types of jerky

序号	化合物名称	CAS	阈值($\mu\text{g/kg}$) ^[38-39]	ROAV					气味描述 ^[39-40]
				MNR	NR	JR	YR	ZR	
1	(R/S)-芳樟醇	78-70-6	6	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	芫荽、花香、柠檬
2	2-丙酮	67-64-1	832	0.26	0.32	0.65	0.32	0.35	芳香、水果
3	β -蒎烯	127-91-3	140	0.92	0.94	1.97	1.04	1.09	松木
4	3-羟基-2-丁酮	513-86-0	14	5.12	4.95	2.96	1.39	1.95	黄油、青椒
5	正戊醛	110-62-3	12	3.14	0.29	0.95	0.12	0.14	青草、绿色
6	α -蒎烯	80-56-8	6	2.73	7.16	10.75	5.05	2.63	松木
7	2-甲基-1-丙醇	78-83-1	550	0.03	0.01	0.16	0.03	0.03	苦味、可可、葡萄酒
8	2-庚醇	543-49-7	65.235	0.17	0.03	0.16	0.07	0.19	柑橘、泥土、蘑菇、油
9	乙酸乙酯	141-78-6	5	2.00	21.30	8.71	9.81	25.90	芳香、白兰地
10	异戊醛	590-86-3	1.1	7.32	3.48	33.17	6.27	2.04	巧克力味、麦芽味
11	丙醛	123-38-6	9.5	0.58	0.55	1.65	2.17	2.34	花香、辛辣
12	壬醛	124-19-6	1	4.98	13.50	25.44	12.95	13.00	脂肪、花香、绿色
13	1,8-桉叶素	470-82-6	1.3	3.63	74.12	5.24	3.25	2.06	樟脑、桉叶油醇
14	γ -萜品烯	99-85-4	6.5	0.63	1.52	0.74	0.77	0.68	苦味、柑橘
15	β -月桂烯	123-35-3	1.2	3.18	20.54	3.38	5.61	6.07	香醋、水果、天竺葵、
16	2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	80	0.04	0.08	0.17	0.11	0.07	可可、烤牛肉、烤坚果
17	萜品油烯	586-62-9	41	0.07	0.26	0.12	0.13	0.10	松木
18	α -萜品烯	99-86-5	80	0.03	0.18	0.05	0.03	0.03	柠檬
19	3-甲基-1-丁醇	123-51-3	4	0.48	0.24	0.00	0.24	0.64	焦味、可可味、花香
20	1-辛烯-3-酮	4312-99-6	4	0.36	0.94	0.43	1.04	1.64	泥土、蘑菇
21	庚醛	111-71-7	4.1	0.34	0.38	1.43	1.31	1.07	脂肪、绿色、坚果
22	丙酸乙酯	105-37-3	10	0.12	3.32	0.76	0.72	0.37	苦味、麦芽、油、辛辣
23	正己酸乙酯	123-66-0	2.2	0.34	1.96	2.57	0.79	1.08	苹果皮、白兰地、过熟水果
24	丁酸乙酯	105-54-4	0.9	0.70	23.17	2.25	3.68	23.18	苹果、黄油、奶酪
25	异戊酸乙酯	108-64-5	0.69	0.54	7.98	5.84	1.10	2.96	水果、酸味

乙酯、异戊醛、壬醛、1,8-桉叶素和 β -月桂烯共 8 种化合物,表明这 8 种化合物为 5 种肉干的关键挥发性化合物; $0.1 \leq \text{ROAV} < 1$ 的挥发性化合物为 2-丙酮,表明 2-丙酮对 5 种肉干风味均有重要的修饰作用; $\text{ROAV} < 0.1$ 的挥发性化合物包括乙酸、乙醇、丙酸、2-丁酮、 γ -丁内酯、反式-2-戊烯醛、1-羟基-2-丙酮、2-甲基-2-丙醇、1-正丁醇、(+)-柠檬烯、2,6-二甲基吡嗪、乳酸乙酯和乙酸丁酯共 13 种化合物,表明这 13 种挥发性化合物对 5 种肉干整体风味没有影响。尽管 5 种肉干中检测出的挥发性化合物的种类几乎一致,但是部分挥发性化合物在不同种类肉干中的香气贡献程度不同。其中正己酸乙酯、丁酸乙酯和异戊酸乙酯在 MNR 风味中起到修饰作用,而在其他 4 种肉干中则是关键的挥发性化合物并呈现果味;正戊醛是 MNR 的关键挥发性化合物,对其余 4 种肉干风味起到修饰性作用;2-甲基-1-丙醇在 JR 风味中起修饰作用,对其余 4 种肉干整体风味没有影响。

2.4 不同种类肉干特征挥发性风味物质评估及分析

为进一步深入探索有助于区分不同种类肉干的特征挥发性化合物,本研究采用了随机森林算法,对不同种类肉干中的挥发性化合物进行了重要性评

估。同时使用了相关性热图以可视化不同种类肉干与挥发性化合物相对含量之间的潜在联系,具体结果如图 6 所示。

在随机森林分析中,变量重要性指标被转换为热图中的圆圈表示,以便更直观地展示各挥发性化合物的重要性。根据每种挥发性化合物在 5 种肉干中的变量重要性总和进行排序后显示,异戊醛、2,6-二甲基吡嗪-M、丙酸-D、萘品油烯、正己酸乙酯和 3-羟基-2-丁酮-D 这 6 种化合物的变量重要性均超过 10.0%,位居前六。这一结果表明,这些挥发性化合物在区分肉干种类时起到关键作用。结合 2.3.3 结果分析,异戊醛和 3-羟基-2-丁酮-D 不仅是有助于区分不同种类肉干的特征挥发性风味物质,同时也是 5 种肉干整体风味的关键挥发性风味物质。

在相关性热图中显示,异戊醛、2-甲基-2-丙醇、2-甲基-1-丙醇-D 和 2-甲基-1-丙醇-M 与 JR 具有潜在相关关系,其中异戊醛在 PRANATA 等^[41]对牛肉、鸡肉、野猪及其混合肉丸中的鉴别研究中是鸡肉丸的预测变量显著性最高的挥发性化合物。3-羟基-2-丁酮-D、2-丁酮、正戊醛、2-己烯-1-醇、反式-2-戊烯醛、反式-2-己烯-1-醇和 3-羟基-2-丁酮-M 与 MNR 具有潜在相关关系,这与 HUANG 等^[25]和

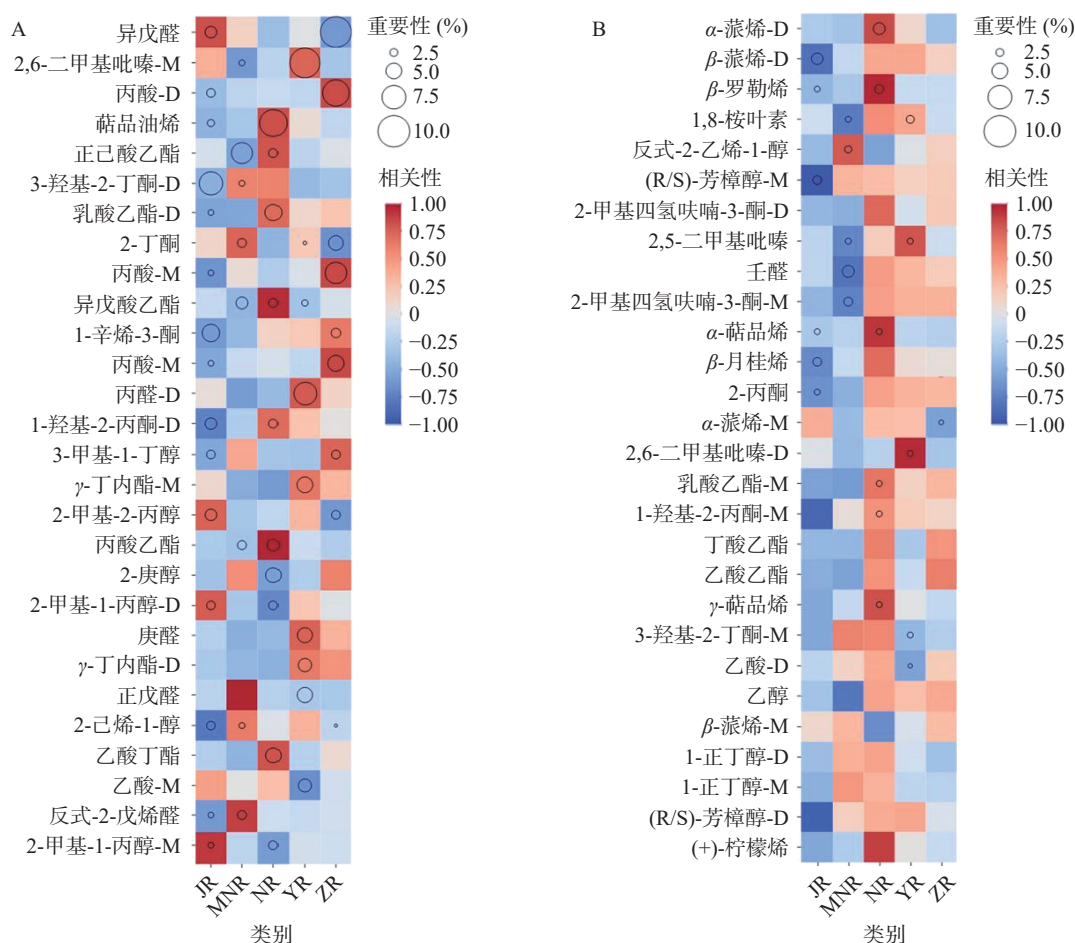


图 6 随机森林变量重要性评价与相关性热图

Fig.6 Random forest variable importance evaluation and correlation heat map

注: A 图为变量重要性总和排序 1~28 的挥发性化合物, B 图为变量重要性总和排序 29~56 的挥发性化合物。

XIONG 等^[42]的研究结果相似,两项研究中指出在牦牛肉氧化过程中 3-羟基-2-丁酮是酮类中含量最高的挥发性化合物并被认为是牦牛肉的整体香气贡献最大。萘品油烯、正己酸乙酯、3-羟基-2-丁酮-D、乳酸乙酯-D、异戊酸乙酯、1-羟基-2-丙酮-D、丙酸乙酯、乙酸丁酯、 α -蒎烯-D、 β -罗勒烯、1,8-桉叶素、2-甲基四氢呋喃-3-酮-D、 α -萘品烯、 β -月桂烯、乳酸乙酯-M、1-羟基-2-丙酮-M、丁酸乙酯、乙酸乙酯、 γ -萘品烯、3-羟基-2-丁酮-M 和(+)-柠檬烯共 21 种挥发性化合物与 NR 具有潜在相关关系;2,6-二甲基吡嗪-M、丙醛-D、 γ -丁内酯-M、庚醛、 γ -丁内酯-D、2,5-二甲基吡嗪和 2,6-二甲基吡嗪-D 与 YR 具有潜在相关关系;丙酸-D、丙醛-M、1-辛烯-3-酮、丙酸-M、3-甲基-1-丁醇、2-庚醇、 γ -丁内酯-D、丁酸乙酯和乙酸乙酯与 ZR 具有潜在相关关系,其中 1-辛烯-3-酮在 PAVLIDIS 等^[43]对牛肉和猪肉的区分研究中显示,其含量与猪肉呈现正相关,而 3-甲基-1-丁醇被认为有助于区分猪肉^[44]。

3 结论

本研究采用电子鼻结合 HS-GC-IMS、ROAV 和多元数据分析技术,深入探究了市面上常易混淆的 5 种风干肉干的挥发性风味组成与特征分析。电子鼻检测结果显示,尽管不同种类肉干气味轮廓相似,但气味响应信号强度存在差异,并在主成分分析中显示出良好区分度。通过 HS-GC-IMS 技术共鉴定出 42 种挥发性化合物,主要包括醇类 9 种、酮类 5 种、萘烯类 9 种、酸类 2 种、酯类 8 种、醛类 6 种、吡嗪类 2 种和呋喃化合物 1 种,其中醇类化合物的相对含量在 5 种肉干中最高,相对含量为 16.04%~32.41%。尽管不同种类肉干中的挥发性化合物种类相似,但含量差异显著,形成了共性峰区域和特征峰区域。通过 ROAV 法评价出(R/S)-芳樟醇、3-羟基-2-丁酮、 α -蒎烯、乙酸乙酯、异戊醛、壬醛、1,8-桉叶素和 β -月桂烯共 8 种关键挥发性风味物质,这些物质在不同种类肉干的整体风味中具有重要影响。进一步使用随机森林分析对各挥发性化合物进行变量重要性评价,结果显示异戊醛和 3-羟基-2-丁酮-D 不仅是关键挥发性风味物质,同时也是有助于区分肉干种类的特征挥发性风味物质,并且其相对含量与鸡肉干和牦牛肉干显示出较强的相关性。综上所述,电子鼻结合 HS-GC-IMS 分析技术不仅可以对不同种类肉干风味特征进行详细分析,还为风干肉干种类区分方法的建立提供理论依据。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] DINÇER E A. Dried meat products obtained by different methods from past to present[J]. *Food Reviews International*, 2023,

39(5): 2457-2476.

[2] LEE J H, ALFORD L, KANNAN G, et al. Curing properties of sodium nitrite in restructured goat meat (chevon) jerky[J]. *International Journal of Food Propert*, 2017, 20(3): 526-537.

[3] WANG Y Y, HE K, FAN L, et al. DNA barcoding reveals commercial fraud related to yak jerky sold in China[J]. *Science China Life Sciences*, 2016, 59(1): 106-108.

[4] SHAHIDI F, HOSSAIN A. Role of lipids in food flavor generation[J]. *Molecules*, 2022, 27(15): 5014.

[5] ERASMUS S W, SOHAIB M, REVILLA I, et al. Markers for meat provenance and authenticity with an account of its defining factors and quality characteristics-a review[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 104(12): 7027-7084.

[6] YANG Y Y, LI J, XING J T, et al. Untargeted profiling and differentiation of volatiles in varieties of meat using GC Orbitrap MS[J]. *Foods*, 2022, 11(24): 3997.

[7] KALDELI A, ZAKIDOU P, PARASKEVOPOULOU A. Volatilomics as a tool to ascertain food adulteration, authenticity, and origin[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2024, 23(4): e13387.

[8] HUANG X C, GUO C F, YUAN Y H, et al. Detection of medicinal off-flavor in apple juice with artificial sensing system and comparison with test panel evaluation and GC-MS[J]. *Food Control*, 2015, 51: 270-277.

[9] CHEN Y P, CAI D D, LI W Q, et al. Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) and ultrafast gas chromatography electronic-nose (UF-GC E-nose) to distinguish four Chinese freshwater fishes at both raw and cooked status[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2022, 46(6): e13840.

[10] 张宗国, 陈东杰, 孟一, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱与电子鼻技术快速检测宁夏滩羊肉中掺假鸭肉[J]. *肉类研究*, 2020, 34(12): 43-48. [ZHANG Z G, CHEN D J, MENG Y, et al. Rapid detection of Ningxia Tan sheep meat adulteration with duck meat using gas chromatography-ion mobility spectrometry and electronic nose[J]. *Meat Research*, 2020, 34(12): 43-48.]

[11] 赵改名, 王森, 祝超智, 等. 基于顶空气相离子迁移色谱对鸭肉腥味特征物质的鉴定[J]. *食品科学*, 2023, 44(4): 247-255. [ZHAO G M, WANG S, ZHU C Z, et al. Identification of characteristic substances of fishy odour of duck meat based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Food Science*, 2023, 44(4): 247-255.]

[12] 王天杨, 关睢, 罗晶晶, 等. 基于电子鼻结合 GC-IMS 分析不同烹饪方式猪肉的挥发性成分差异[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(14): 234-244. [WANG T Y, GUAN J, LUO J J, et al. Analysis of differences in volatile components of pork between cooking methods based on electronic nose combined with GC-IMS[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(14): 234-244.]

[13] 徐丽娜, 黄峻榕, 赵莱昱, 等. 不同加工方式下藏猪肉和杜长大猪肉品质差异分析[J]. *食品工业科技*, 2025, 46(6): 293-302.

[XU L N, HUANG J R, ZHAO L Y, et al. Analysis of quality differences between Tibetan pigs and Duroc×Landrace×Yorkshire pigs under different thermal processing[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2025, 46(6): 293-302.]

[14] 赵志平, 张盛源, 陈泓帆, 等. 基于 GC-IMS 和电子鼻分析牛肉腐败进程中挥发性风味物质的变化[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(11): 235-344. [ZHAO Z P, ZHANG S Y, CHEN H F, et al. Changes of volatile flavor substances of beeves in spoilage process based on gas chromatography-ion mobility spectrometry and electronic nose[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(11): 235-344.]

[15] BI J C, LIN Z Y, LI Y, et al. Effects of different cooking

methods on volatile flavor compounds of chicken breast[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2021, 45(8): 12.

[16] 彭旭阳,陈君然,崔瀚元,等.基于 GC-IMS 分析新疆不同寄主肉苁蓉挥发性物质[J].*食品工业科技*, 2024, 45(9): 272–279.

[PENG X Y, CHEN J R, CUI H Y, et al. Volatile substances of different hosts of *Cistanche deserticola* in Xinjiang based on GC-IMS[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(9): 272–279.]

[17] 刘春云,赵鑫琦,孔令茹,等.桑葚白兰地对风干肠挥发性风味成分及品质的影响[J].*食品科学*, 2023, 44(6): 244–253. [LIU C Y, ZHAO X Q, KONG L R, et al. Effects of mulberry brandy on volatile flavor components and quality of air-dried sausage[J]. *Food Science*, 2023, 44(6): 244–253.]

[18] LI Y, YUAN L, LIU H J, et al. Analysis of the changes of volatile flavor compounds in a traditional Chinese shrimp paste during fermentation based on electronic nose, SPME-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. *Food Science Human Wellness*, 2023, 12(1): 173–182.

[19] 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 dairy fat products using relative odor activity value and olfactometry[J]. *Food Science*, 2023, 44(6): 262–267.]

[20] CUI H, WANG Y, LIU X, et al. Identification of common aroma contributors and the regulated metabolites of different kinds of meat[J]. *LWT*, 2023, 181: 114737.

[21] LI X, AMADOU I, ZHOU G Y, et al. Flavor components comparison between the neck meat of donkey, swine, bovine, and sheep[J]. *Food Science of Animal Resources*, 2020, 40(4): 527–540.

[22] GOU Y Z, HAN Y P, LI J, et al. Discriminant analysis of aroma differences between cow milk powder and special milk powder (donkey, camel, and horse milk powder) in Xinjiang based on GC-IMS and multivariate statistical methods[J]. *Foods*, 2023, 12(21): 4036.

[23] 姚文生,蔡莹莹,刘登勇,等.不同材料熏制鸡腿肉挥发性物质 GC-IMS 指纹图谱分析[J].*食品科学技术学报*, 2019, 37(6): 37–45. [YAO W S, CAI Y X, LIU D Y, et al. Volatile compounds analysis in chicken thigh smoked with different materials by GC-IMS fingerprint[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 37(6): 37–45.]

[24] 巨晓军,单艳菊,刘一帆,等.基于气相-离子迁移谱技术分析不同生长速度肉鸡肌肉中挥发性有机物的差异[J].*食品与发酵工业*, 2021, 47(3): 170–175. [JU X J, SHAN Y J, LIU Y F, et al. The analysis of volatile organic compounds in broiler muscles with different growth rates based on GC-IMS technology[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(3): 170–175.]

[25] HUANG Q, DONG K, WANG Q, et al. Changes in volatile flavor of yak meat during oxidation based on multi-omics[J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131103.

[26] HUAN Y J, ZHOU G H, ZHAO G M, et al. Changes in flavor compounds of dry-cured Chinese Jinhua ham during processing[J]. *Meat Science*, 2005, 71(2): 291–299.

[27] LUO Y L, ZHAO L H, XU J Q, et al. Effect of fermentation and postcooking procedure on quality parameters and volatile compounds of beef jerky[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(5): 2316–2326.

[28] VIALLO C, BERDAGUE J L, MONTEL M C, et al. The effect of stage of ripening and packaging on volatile content and flavour of dry sausage[J]. *Food Research International*, 1996, 29(7): 667–674.

[29] GARCÍA-DÍEZ J, SARAIVA C. Use of starter cultures in foods from animal origin to improve their safety[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(5): 2544.

[30] LIU D Y, YANG C, BAI L, et al. Analysis of volatile compounds in Jinhua ham using three extraction methods combined with gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry[J]. *Foods*, 2022, 11(23): 3897.

[31] ZHANG L, BADAR I H, CHEN Q, et al. Changes in flavor, heterocyclic aromatic amines, and quality characteristics of roasted chicken drumsticks at different processing stages[J]. *Food Control*, 2022, 139: 109104.

[32] JIANG H, ZHANG M T, YE J J, et al. HS-SPME-GC-MS and OAV analyses of characteristic volatile flavour compounds in salt-baked drumstick[J]. *LWT-Food Science Technology*, 2022, 170: 114041.

[33] MOTTRAM D S. Flavour formation in meat and meat products: A review[J]. *Food Chemistry*, 1998, 62(4): 415–424.

[34] BIOLATTO A, GRIGIONI G, IRURUETA M, et al. Seasonal variation in the odour characteristics of whole milk powder[J]. *Food Chemistry*, 2007, 103(3): 960–967.

[35] YUAN X Y, CUI H X, JIN Y X, et al. Fatty acid metabolism-related genes are associated with flavor-presenting aldehydes in Chinese local chicken[J]. *Frontiers in Genetics*, 2022, 13: 902180.

[36] ADAMS A, DE KIMPE N. Formation of pyrazines from ascorbic acid and amino acids under dry-roasting conditions[J]. *Food Chemistry*, 2009, 115(4): 1417–1423.

[37] JAYASENA D D, AHN D U, NAM K C, et al. Flavour chemistry of chicken meat: A review[J]. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 2013, 26(5): 732–742.

[38] MOON S Y, CLIFF M A, LI-CHAN E C Y. Odour-active components of simulated beef flavour analysed by solid phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry and -olfactometry[J]. *Food Research International*, 2006, 39(3): 294–308.

[39] LIU X S, LIU J B, YANG Z M, et al. Aroma-active compounds in Jinhua ham produced with different fermentation periods[J]. *Molecules*, 2014, 19(11): 19097–19113.

[40] 李想,邓静,易宇文,等.电子舌和气相色谱-离子迁移谱技术分析炖煮时间对松茸鸡汤风味的影响[J].*中国食品学报*, 2024, 24(1): 336–348. [LI X, DENG J, YI Y W, et al. Electronic tongue and gas chromatography-ion mobility spectrometry techniques to analyse the simmering time effect on the flavour of matsutake chicken soup[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(1): 336–348.]

[41] PRANATA A W, YULIANA N D, AMALIA L, et al. Volatilomics for halal and non-halal meatball authentication using solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2021, 14(5): 103146.

[42] XIONG L, PEI J, WANG X D, et al. Effect of lipids in yak muscle under different feeding systems on meat quality based on untargeted lipidomics[J]. *Animals*, 2022, 12(20): 2814.

[43] PAVLIDIS D E, MALLOUCHOS A, ERCOLINI D, et al. A volatilomics approach for off-line discrimination of minced beef and pork meat and their admixture using HS-SPME GC/MS in tandem with multivariate data analysis[J]. *Meat Science*, 2019, 151: 43–53.

[44] VILAR E G, O'SULLIVAN M G, KERRY J P, et al. Volatile organic compounds in beef and pork by gas chromatography-mass spectrometry: A review[J]. *Separation Science Plus*, 2022, 5(9): 482–512.