

基于 GC-IMS 与 GC-MS 技术研究金华猪猪肉挥发性风味物质

盖凯丽^{1,2}, 秦凯鹏², 张若楠², 门小明², 王彬彬², 丁向彬¹, 徐子伟^{2*}, 齐珂珂^{2*}

(1. 天津农学院动物科学与动物医学学院, 天津市农业动物繁育与健康养殖重点实验室, 天津 300392;

2. 浙江省农业科学院畜牧兽医研究所, 浙江杭州 310021)

摘要: 为了探究金华猪猪肉优异风味的关键性挥发性成分, 本试验利用气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS) 与气相色谱-质谱联用技术 (GC-MS) 对 6 头金华猪去势公猪的背最长肌肌肉挥发性风味物质进行了定性、定量检测。结果表明: 2 种技术检测到 12 类物质, 包括醛类、醇类、酮类、酸类、酯类等 104 种挥发性化合物; GC-IMS 技术检测到 70 种化合物, 其中主要为醛类 (42.86%)、醇类 (11.43%)、酮类 (14.29%), GC-MS 技术检测到以醛类 (28.26%)、醇类 (13.04%)、酸类 (26.09%)、酯类 (13.04%) 为主的 46 种化合物; 综合 2 种方法检测结果并结合相对气味活度值 (Relative Odor Activity Value, ROAV) 进行分析, 确定壬醛、正己醛、庚醛、正辛醛、反-2-辛烯醛、(E)-2-壬烯醛、3-甲硫基丙醛、正庚醇及 1-辛烯-3-醇这 9 种化合物是金华猪的关键风味物质 (ROAV≥1), 其中 (E)-2-壬烯醛 (ROAV=100) 和壬醛 (ROAV=100) 为贡献度最高的关键物质。本研究揭示了金华猪优异风味产生的关键挥发性成分, 可为金华猪猪肉品质的有效利用及遗传改良提供参考。

关键词: 金华猪; 挥发性风味物质; GC-IMS; GC-MS; 相对气味活度值

中图分类号: S828

文献标识码: A

DOI 编号: 10.19556/j.0258-7033.20250217-02

随着人们消费水平的迭代升级, 猪肉的品质和口感越来越被重视。肉质风味是一种综合的品味感官印象^[1], 生肉加热后形成香味前体物, 再通过脂质氧化、美拉德

反应以及各种次级反应产生挥发性风味化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs)^[2-3], VOCs 共同作用形成特征香气^[4]。

目前, 猪肉中挥发性风味物质的检测方法有电子鼻^[5-6]、气相色谱-质谱联用技术 (GC-MS)、气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS)^[7]、气相色谱-嗅闻质谱 (GC-O-MS) 等^[8-9]。GC-MS 以其选择性强、灵敏度高的优势被广泛使用, 但对一些痕量化合物的检测存在局限性^[10]。而 GC-IMS 具有分析效率高、样品制备简单、风味物质可视化等优点逐渐被应用。杨智博等^[11]在猕猴桃果酒挥发性风味的研究中表明, 同时使用 GC-MS 和 GC-

收稿日期: 2025-02-17; 修回日期: 2025-03-16

资助项目: 浙江省农业新品种选育重大科技专项(2021C02068);

国家现代农业产业技术体系 (CARS-35)

作者简介: 盖凯丽 (1998-), 女, 山东滨州人, 硕士, 主要从事优质猪育种方向研究, E-mail: 13455436088@163.com

*通信作者: 齐珂珂 (1981-), 女, 河南偃师人, 博士, 副研究员, 主要从事优质猪育种方向研究, E-mail: nkyqkk@163.com; 徐子伟 (1956-), 男, 浙江永康人, 研究员, 博士生导师, 从事优质猪育种方向的研究, E-mail: xzwfyz@sina.com

gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)[J]. Meat Sci, 2021, 175(1): 108449.

[34] Zhang J, Cao J, Pei Z, et al. Volatile flavour components and the mechanisms underlying their production in golden pompano (*Trachinotus blochii*) fillets subjected to different drying methods: A comparative study using an electronic nose, an electronic tongue and SDE-GC-MS[J]. Food Res Int, 2019, 123(9): 217-225.

[35] 王学敬. 德州扒鸡风味成分分析及其工艺优化 [D]. 南京: 南

京农业大学, 2016.

[36] 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(9): 109104.

[37] 张懿, 张璐, 李凤, 等. 油炸食品中挥发性风味物质的研究进展 [J]. 食品科技, 2024, 49(4): 124-132.

(责任编辑: 周会会)

IMS 2 种技术相比于单一技术能检测出更多的挥发性物质。Xi 等^[12]同时使用 GC-IMS 和 GC-MS 技术对核桃油进行鉴定,共检测出 75 种挥发性有机化合物,揭示了不同阶段核桃油的关键挥发性成分。因此,2 种技术结合可以更全面地反映食品风味信息^[12-14]。

金华猪是中国四大名猪之一,具有肉质鲜红、肉味香郁、肥而不腻等特点。尽管金华猪以肉质风味著称,但其挥发性风味成分的解析仍缺乏系统性研究^[15-17]。因此,本研究拟利用 GC-IMS 与 GC-MS 技术对金华猪背最长肌挥发性风味物质进行检测,结合相对气味活度值(Relative Odor Activity Value, ROAV)鉴定金华猪优异风味的关键挥发性成分,为金华猪高端猪肉的开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 金华两头乌去势公猪 6 头,饲养日粮为玉米豆粕型,详见表 1。屠宰日龄为 330 d,屠宰体重为(70.75±1.92) kg,试验猪只由浙江伟丰肉食品有限公司永康伟丰猪场提供。

表 1 玉米豆粕型基础日粮组成和营养成分表	
项目	含量
原料, %	
玉米	68.62
豆粕	12.36
麦麸	16.00
石粉	0.94
大豆油	0.08
预混料	2.00
合计	100.00
营养水平	
消化能, MJ/kg	13.84
粗蛋白, %	13.50
钙 Ca, %	0.587
磷, %	0.472
赖氨酸, %	0.897
蛋氨酸 + 半胱氨酸, %	0.536
苏氨酸, %	0.511

注:①每千克预混料中维生素 A 6 500 IU, 维生素 B₁ 0.98 mg, 维生素 B₂ 3.2 mg, 维生素 B₆ 2.5 mg, 维生素 B₁₂ 26 μg, 维生素 D 3 813 IU, 维生素 E 85 IU, 维生素 K 32 mg, 烟酸 26 mg, 泛酸 19.9 mg, 叶酸 1.24 mg, 生物素 156 μg, Zn (ZnSO₄) 50 mg, Cu[Cu₂ (OH)₃Cl]15 mg, Fe (FeSO₄·7H₂O) 110 mg, Mn (MnSO₄) 10 mg, Se (Na₂SeO₃) 0.3 mg, I (KI) 0.2 mg。②蛋白质、钙和磷均为实测值,其余均为计算值。

1.2 样品采集 根据《瘦肉型猪胴体测定技术规范》

(NY/T825-2004)、《猪肌肉品质测定技术规范》(NY/T821-2004)进行宰前处理和取样,金华猪取样部位为左半胴体腰椎连接部背最长肌,0~4℃冷库内排酸 48 h,剔除表皮筋膜后使用绞肉机(Ymimi, 九阳股份有限公司)搅碎成泥,置于 5 mL PE 冻存管内,-80℃冰箱中保存待用。

1.3 GC-IMS 检测 准确称取 3.5 g 金华猪背最长肌肉样置于 20 mL 顶空瓶(山东海能科学仪器有限公司)进样中,基于 GC-IMS 平台(山东海能科学仪器有限公司),使用 Flavour Spec[®] 气相离子迁移谱联用仪(德国 G.A.S. 公司)进行分析。自动顶空进样条件:进样体积 500 μL, 孵育温度 100℃, 孵育时间 20 min, 进样针温度 105℃; 孵化转速 500 rpm。气相-离子迁移谱条件:色谱柱类型: MXT-5 (15 m×0.53 mm×1 μm; 美国 Restek 公司); 色谱柱温: 60℃; 分析时间 20 min; 载气: 高纯 N₂ (99.999%, 杭州今工特种气体有限公司), 载气流量: 2 mL/min 运行 2 min 后在分析时间内提高至 100 mL/min; IMS 迁移管温度: 45℃; 漂移气: 高纯 N₂ (99.999%, 杭州今工特种气体有限公司), 漂移气流量: 150 mL/min。使用 GC-IMS 联用仪配置的分析软件,其内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库可对物质进行定性分析,并绘制指纹图谱,基于峰体积大小进行定量分析。

1.4 GC-MS 检测 使用 7890A-5975 型气相色谱质谱联用仪(安捷伦科技(中国)有限公司)进行物质分析,称取 3.0 g 样品和内标物仲辛醇(上海麦克林生化科技有限公司)添加到顶空进样瓶内,放入活化后的薄膜固相微萃取装置(美国 Supelco),用 PTFE/S 瓶盖密封。将顶空瓶放置在加热摇床上,在 80℃、250 rpm 的条件下加热 20 min,萃取 30 min。萃取结束后取出萃取装置,将萃取装置插入热脱附装置内,于 250℃条件下解吸 5 min,联用仪自动采集数据。GC 条件: 色谱柱: DB-WAX (30 m×0.25 mm×0.25 μm; Agilent J&W), 载气为氦气(杭州今工特种气体有限公司), 流速: 3.0 mL/min。升温程序: 色谱柱起始柱温 40℃, 保持 2 min, 后以 5℃/min 提升到 250℃, 保持 10 min。MS 条件: GC-MS 接口温度: 250℃; EI 离子源: 电子能量 70 eV; 离子源温度: 230℃; 扫描范围: 33~350 m/e; 溶剂延迟时间: 3 min。

GC-MS 联用仪采集数据,人工筛选分子式及匹配

度、反匹配度均在 700 以上的物质, 并计算保留指数 I , 与标准保留指数进行比对确定, 并通过内标物仲辛醇计算挥发性风味物质含量 C 。

$$I=100 \times \left[n + \frac{\lg t'(i) - \lg t'(n)}{\lg t'(n+1) - \lg t'(n)} \right] \quad (1)$$

$$C = \frac{M_i X}{M_0 Y} \times 1000 \quad (2)$$

式(1)中, n 和 $n+1$ 为未知物流出前、后正构烷烃的碳原子数; $t'(n)$ 和 $t'(n+1)$ 为相应的正构烷烃的调整保留时间; $t'(i)$ 为待测组分的调整保留时间, $t'(n) < t'(i) < t'(n+1)$ 。

式(2)中, C 为挥发性风味物质的含量; M_i 为样品重量; X 为待测挥发性风味物质的峰面积; Y 为内标物仲辛醇的峰面积; M_0 内标物的质量。

1.5 关键挥发性物质的确定 关键挥发性物质的确定是从化合物的浓度 (C_i) 及阈值 (OT_i) 2 个维度出发, 其比值表示该化合物对该挥发性物质的贡献程度, 用相对气味活度值 ROVA 表示^[18]。

$$ROAV = \frac{C_A \%}{C\text{-stan}\%} \times \frac{T\text{-stan}}{T_A} \times 100 \quad (3)$$

式(3)中, C_A 表示某化合物的相对含量; T_A 表示某化合物的阈值; 以该方法检测到的最大挥发性化合物的相对含量为标准 $C\text{-stan}$; $T\text{-stan}$ 表示检测到的最大挥发性化合物的阈值。

1.6 数据处理 使用 WPS 进行数据整理, SPSS 27 对 2 种方法的检测结果进行独立 T 检验分析, $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著, 数据用平均值 $\pm$ 标准误差表示。利用 GraphPad Prism 8 软件进行图表绘制。

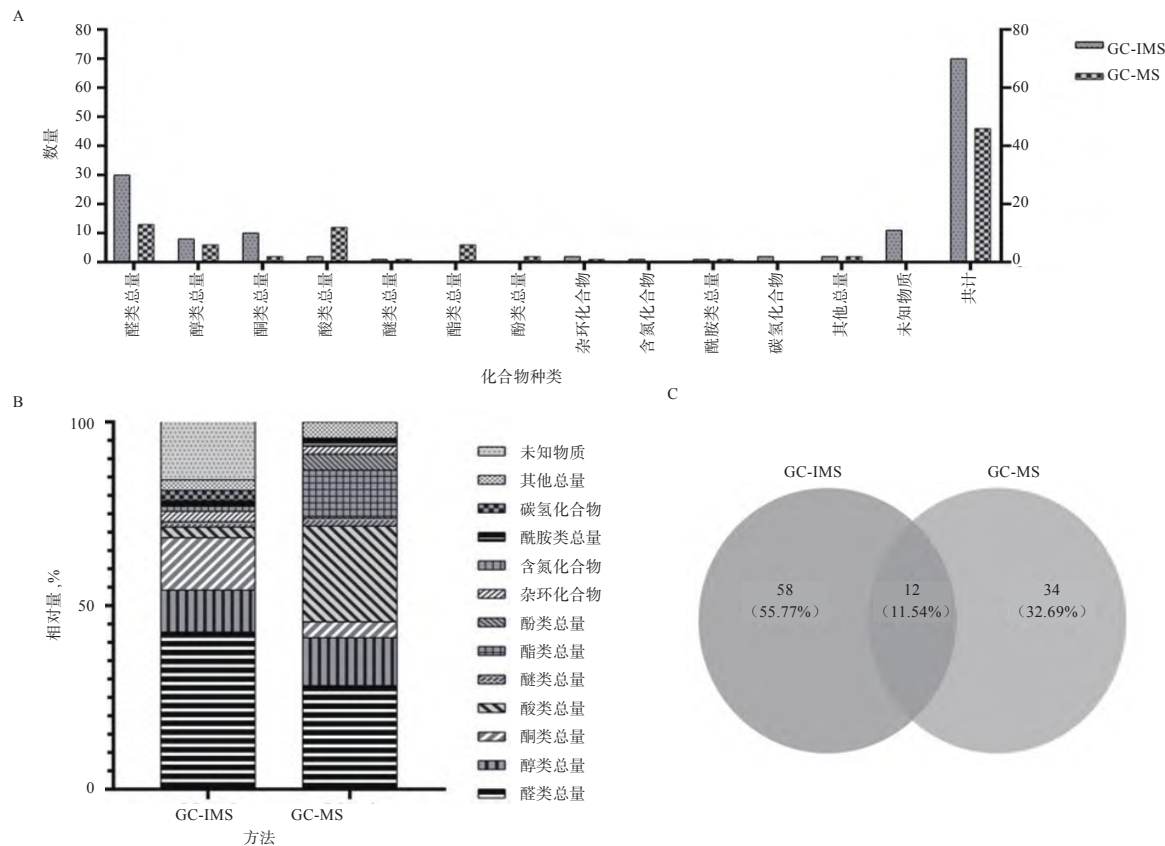
2 结果与分析

2.1 挥发性风味物质种类检测结果 使用 GC-IMS 与 GC-MS 技术对金华猪挥发性风味化合物的种类进行检测, 根据化合物的化学结构可分为 12 类(图 1A、1B)。其中 GC-IMS 技术检测种类为醛类(30)、醇类(8)、酮类(10)、酸类(2)、醚类(1)、杂环类(2)、含氮类(1)、酰胺类(1)、碳氢类(2)、其他物质(2)以及未定性物质(11), 共计 10 个类别 70 种化合物(单体和二聚体)。GC-MS 技术检测种类为醛类(13)、醇类(6)、酮类(2)、酸类(12)、醚类(1)、酯类(6)、酚类(2)、杂环类(1)、酰

胺类化合物(1)及其他物质(2), 共计 10 个类别 46 种化合物。GC-IMS 技术检测结果显示构成金华猪主要挥发性风味物质的种类是醛类(42.86%)、醇类(11.43%)及酮类(14.29%); GC-MS 技术检测结果显示构成金华猪挥发性风味物质的主要种类是醛类(28.26%)、醇类(13.04%)、酸类(26.09%)、酯类(13.04%)。由图 1C 可知, 利用 GC-IMS 技术和 GC-MS 技术对金华猪挥发性风味物质进行检测, 共计检测出 104 种化合物, 其中有 12 种为共有化合物。GC-IMS 检测出 70 种化合物, 占总化合物的 55.77%; GC-MS 检测出 46 种化合物, 占总化合物的 32.69%。其中 12 种共有化合物种类见表 2, 分别为正己醛、庚醛、正辛醛、壬醛、反-2-辛烯醛、癸醛、苯甲醛、1-戊醇、正己醇、1-辛烯-3-醇、己酸、2-正戊基呋喃, 包含醛类 7 种(58.36%), 醇类 3 种(25.03%), 酸类 1 种(8.31%)、杂环类 1 种(8.31%)。从共有物质的检测结果种类上可见, 2 种检测方法对醛类物质的检测数量最高, 醇类次之。

2.2 挥发性风味物质相对含量检测结果 由图 2A、2B 可知, 通过 GC-IMS 技术对金华猪挥发性有机化合物的相对含量进行检测, 结果显示, 醛类(54.67%)、醇类(6.19%)、酸类(3.48%)及酮类物质(25.27%)是构成其风味物质的主要成分; GC-MS 技术检测结果显示, 醛类(57.88%)、醇类(4.45%)、酸类(27.73%)、酯类(2.67%)及酮类物质(0.57%)是构成风味物质的主要成分。除 GC-IMS 技术未检测到酯类物质外, 2 种技术检测到的醛类、醇类、酸类及酮类物质分别占据了金华猪挥发性有机物总量的 89.61% 和 91.29%。对上述 4 类物质的相对含量进行差异性分析发现, GC-IMS 技术和 GC-MS 技术检测到的醛类含量差异不显著; 相较于 GC-MS 技术, GC-IMS 检测到的醇类含量显著高于 GC-MS 技术, 酸类含量极显著低于 GC-MS 技术, 酮类含量极显著高于 GC-MS 技术, 化合物类别总量差异不显著。

由图 2C、2D 可知, 对 2 种方法共同检测到的 12 种有机化合物的相对含量进行差异性分析发现, 不同方法相对含量存在一定差异, 但共计含量差异不显著。与 GC-MS 技术相比, GC-IMS 技术检测到的醛类相对总量显著低于 GC-MS 技术, 其中正己醛相对含量极显著低于 GC-MS 技术, 癸醛相对含量显著低于 GC-MS 技术, 而反-2-辛烯醛相对含量极显著高于 GC-MS 技术; 醇类



A: 2 种检测方法的挥发性有机化合物种类差异; B: 2 种检测方法的挥发性有机化合物种类构成比; C: 2 种检测方法鉴定的挥发性有机化合物的 Venn 图。

图 1 挥发性风味物质种类检测结果

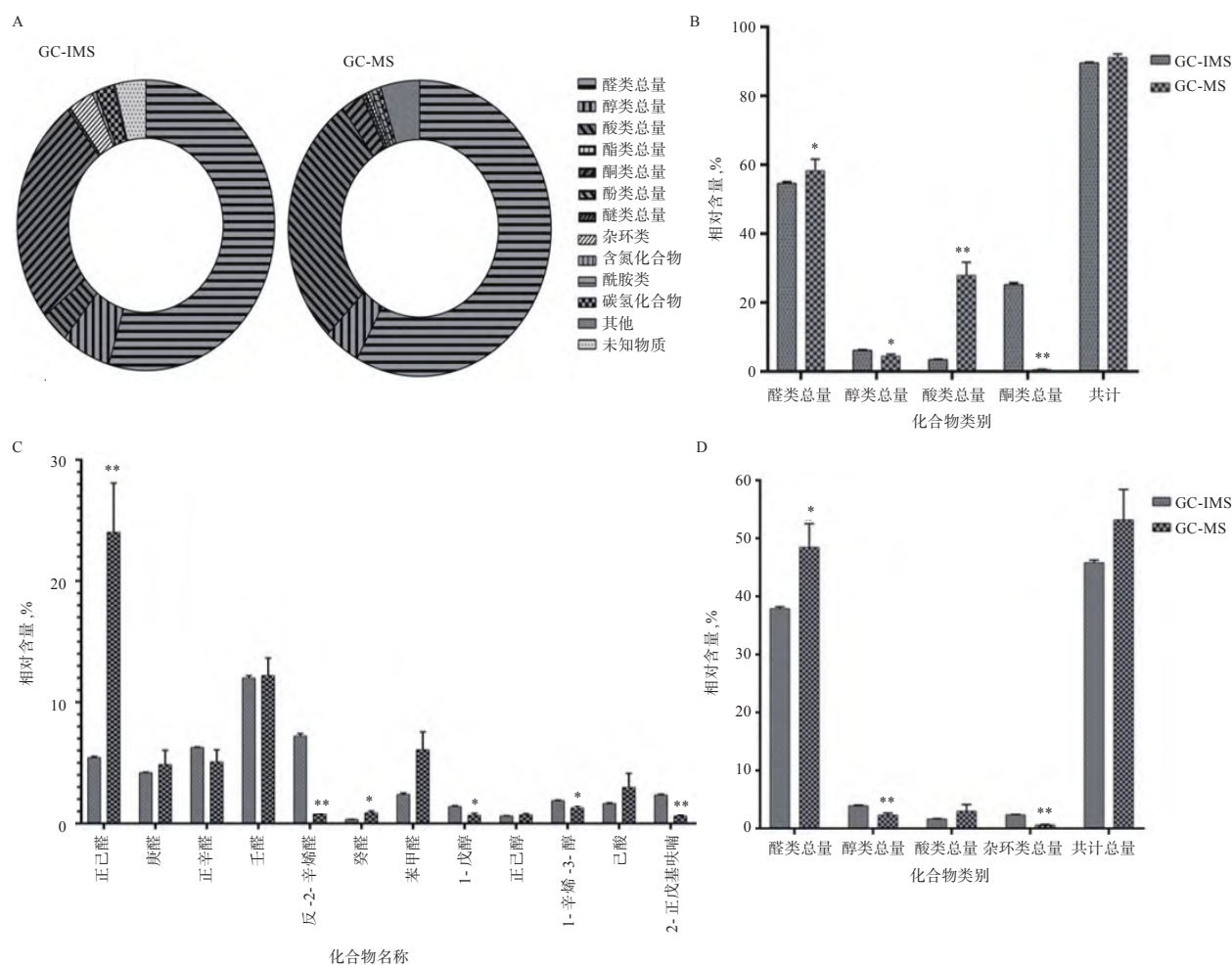
表 2 GC-IMS 与 GC-MS 2 种技术对金华猪样品共有挥发性风味物质种类检测结果

类别	化合物名称	CAS	分子量	化学式
醛类	Hexene (正己醛)	66-25-1	100.16	C ₆ H ₁₂ O
醛类	Heptaldehyde (庚醛)	111-71-7	114.19	C ₇ H ₁₄ O
醛类	Octanal (正辛醛)	124-13-0	128.21	C ₈ H ₁₆ O
醛类	1-Nonanal (壬醛)	124-19-6	142.24	C ₉ H ₁₈ O
醛类	(E)-2-Octenal (反-2-辛烯醛)	2548-87-0	126.20	C ₈ H ₁₄ O
醛类	Decyl aldehyde (癸醛)	112-31-2	156.27	C ₁₀ H ₂₀ O
醛类	Benzaldehyde (苯甲醛)	100-52-7	106.12	C ₇ H ₆ O
醇类	1-Pentanol (1-戊醇)	71-41-0	88.15	C ₅ H ₁₂ O
醇类	1-Hexanol (正己醇)	111-27-3	102.17	C ₆ H ₁₄ O
醇类	1-Octen-3-ol (1-辛烯-3-醇)	3391-86-4	128.21	C ₈ H ₁₆ O
酸类	Hexanoic acid (己酸)	142-62-1	116.16	C ₆ H ₁₂ O ₂
杂环类	2-Pentylfuran (2-正戊基呋喃)	3777-69-3	138.21	C ₉ H ₁₄ O

的相对总量极显著高于 GC-MS 技术,除正己醇外,1-戊醇和1-辛烯-3-醇含量均显著高于 GC-MS 技术;杂环类化合物2-正戊基呋喃相对含量也极显著高于 GC-MS。

2.3 金华猪的关键挥发性物质 由表3可知,对2种方法检测到的金华猪挥发性化合物进行香气贡献程度分析,计算其相对气味活度值 ROAV,共筛选到22种特

征性有机化合物,其中醛类有14种(63.64%),醇类4种(18.18%),酸类1种(4.55%),酯类1种(4.55%),酮类1种(4.55%),杂环类化合物1种(4.55%)。GC-IMS 技术检测到的(E)-2-壬烯醛相对含量较高(1.07%),且阈值较低(0.01 μg/kg),因此选用(E)-2-壬烯醛作为标准,记 ROVA=100;而 GC-MS



A: 2 种检测方法的挥发性有机化合物相对含量构成比例图; B: 2 种方法共检类别的相对含量差异图; C: 12 种共有挥发性有机化合物相对含量差异图; D: 12 种化合物所属类别差异图。* 表示数据差异显著 ($P<0.05$), ** 表示数据差异极显著 ($P<0.01$)。

图 2 挥发性风味物质相对含量检测结果

技术检测到的正辛醛相对含量较高 (12.2%) 且阈值较低 ($1 \mu\text{g}/\text{kg}$), 记 ROVA=100, 分别计算 2 种技术其他物质的 ROVA 值。其中通过 GC-IMS 技术得到的特征性化合物 16 种, GC-MS 技术得到的特征性化合物 14 种。

在 $\text{ROAV} \geq 1$ 范围内筛选的化合物是金华猪风味形成的关键物质, 2 种技术共同筛选到壬醛、正己醛、庚醛、正辛醛、反-2-辛烯醛 5 种关键香气化合物, 除此之外, GC-IMS 技术检测到 (E)-2-壬烯醛和 3-甲硫基丙醛, GC-MS 检测到 1-辛烯-3-醇和正庚醇。在 $0.1 \leq \text{ROVA} < 1$ 范围内筛选的化合物对金华猪风味的形成起修饰作用, GC-IMS 技术共筛选到 8 种化合物, 分别是癸醛、(E)-2-庚烯醛、正丁醛、异戊醛、2-甲基丁醛、正戊醛、1-辛烯-3-醇和 2-正戊基呋喃; GC-MS 技术共筛选到 6 种化合物, 分别是十三醛、辛醇、辛酸、癸

酸乙酯、2-癸酮和 2-正戊基呋喃。

3 讨论

3.1 基于 GC-IMS 技术对猪肉挥发性风味物质分析 GC-IMS 联用技术是将气相色谱 (GC) 和离子迁移谱 (IMS) 联合使用 [19]。挥发性有机物经气相色谱柱进行洗脱分离, 后进入 IMS 系统, 在电离源条件下, 经离子迁移管道进入离子探测器进行检测, 根据漂移速度与迁移时间 [20], 实现待测物质浓度确定。

本研究使用 GC-IMS 技术对金华猪背最长肌进行检测, 共检测到醛类、醇类、酮类、酸类、醚类、杂环类、含氮类、酰胺类、碳氢类、其他及未定性物质共计 10 类 70 种化合物, 其中定性化合物有 59 种。该检测结果比孟维一等 [21] 采用 GC-IMS 技术对市场购买的不同部位猪肉检测到的 41 种定性化合物多 18 种; 比 Duan 等 [22]

表 3 不同检测技术的 ROAV 值含量及气味描述

化合物名称	阈值, µg/kg	GC-IMS	GC-MS	气味描述
(E)-2- 壬烯醛	0.01	100.00	-	肉香、黄瓜青香
壬醛	1	11.33	100.00	橙子、玫瑰香
正己醛	4.5	1.15	46.72	油脂、青草、苹果香
庚醛	2.8	1.42	16.73	脂肪
正辛醛	0.59	10.12	74.96	脂肪、甜橙香
癸醛	3	0.11	-	花香、橙香
十三醛	70	-	0.11	油脂、柑橘香
3- 甲硫基丙醛	0.45	1.62	-	洋葱香、肉香
(E)-2- 庚烯醛	40	0.14	-	特殊芳香气味
正丁醛	2	0.65	-	醛味, 稀释后清香
异戊醛	1	0.61	-	苹果香、桃香
2- 甲基丁醛	1.5	0.80	-	咖啡、可可香
正戊醛	12	0.23	-	特征性气味
反 -2- 辛烯醛	3	2.27	2.40	脂肪、肉香、黄瓜青香
正己醇	250	0.00	0.03	嫩叶、果香、脂肪
辛醇	110	-	0.18	蜡脂、青草、果香
正庚醇	3	-	4.21	油脂、柑橘香气
1- 辛烯 -3- 醇	2	0.89	5.45	蘑菇、薰衣草、玫瑰、干草香
辛酸	300	-	0.10	稀释后呈果香
癸酸乙酯	5	-	0.79	果香
2- 癸酮	8.3	-	0.23	油脂、柑橘香
2- 正戊基呋喃	5.8	0.38	0.87	豆香、果香、泥土、青香

注：- 表示此物质在该检测方法中未检测到。

通过 GC-IMS 技术对外三元（杜×长×大）的腰、腿、肩、腹 4 个部位检测鉴定出的 49 种化合物多 10 种；比李睿等^[23]采用 GC-IMS 技术对不同加工方式的荣昌猪肉检测到 34 种已知化合物多 25 种。本研究发现醛类、醇类和酮类为是构成猪肉挥发性风味物质的主要成分，与孟维一等^[21]的研究结果一致。影响猪肉挥发性风味物质的因素有很多，其中品种、部位及加工方式均会造成化合物种类和含量差异。采用多种加工方式的荣昌猪^[23]，以及对不同部位进行综合检测的市场普通猪^[21]和外三元猪^[22]，其挥发性风味化合物的类型及数量上均少于金华猪，荣昌猪还检测到少量的酚类物质^[23]，酚类物质是猪肉经熏制而产生的特殊风味^[24]。

3.2 基于 GC-MS 技术对猪肉挥发性风味物质分析
GC-MS 技术是将气相色谱仪（GC）与气相质谱仪（MS）进行连接，挥发性物质通过色谱柱进行分离，在质谱仪中经离子源电离成离子^[25]，按照气态离子质荷比的大小进行分离^[2]，并根据化合物固有的特性质谱对化合物进行定性与定量。

本研究使用 GC-MS 技术对金华猪背最长肌进行风味物质检测，共检测到 10 类 46 种化合物。比 Dashmaa 等^[26]使用 GC-MS 技术对杜洛克猪、巴克夏猪和约克夏猪检测到的 40 种挥发性化合物多 6 种；比王克晨^[27]等对杜长大中检测到 35 种化合物多 11 种。本研究中华猪比藏香猪肉^[28]检测到的 40 种挥发性风味物质多 6 种，比原种青海八眉猪^[27]中检测到的 60 种挥发性风味物质少 14 种。杜长大中挥发性物质种类包括醛类、酸类、酮类、酯类、烃类及其他类共计 7 类^[27]；藏香猪的挥发性物质种类包括醛类、醇类、酯类、酸类等 12 类^[28]；青海八眉猪的挥发性物质种类包括醛类、醇类、烃类等 11 类^[27]，其中醛类、醇类、烃类、酮类、酸类物质分别包含 8、7、13、6、12 种化合物，这 5 类物质的相对含量分别为 17.161%、6.415%、21.136%、6.428%、10.793%^[27]。与青海八眉猪相比，本研究使用 GC-MS 技术检测到金华猪挥发性物质有醛类、醇类、酮类、酸类、醚类、酯类、酚类等共计 10 类，且金华猪中醛类、醇类、酸类、酯类及酮类物质分别包含 13、6、12、6、2 种化

合物,其相对含量分别为 57.88%、4.45%、27.73%、2.67%、0.57%。从挥发性风味物质的种类、数量及相对含量的结果上看,金华猪挥发性风味物质的丰富度更优于国外猪种、外三元及藏香猪,尽管八眉猪检测到金华猪未检测到的烃类物质,但烃类物质一般阈值较高,对猪肉风味的贡献小。

3.3 基于 GC-MS 技术与 GC-IMS 技术联合分析金华猪关键风味物质 本研究采用 GC-MS 和 GC-IMS 2 种不同技术对金华猪的风味物质进行检测,结果发现 2 种技术检测到的化合物种类与相对含量不同,这是由于不同检测器对物质的响应、色谱柱种类及孵育温度^[29]存在差异而引起的。马伟等^[30]发现不同型号的色谱柱对挥发性物质的分离程度不同。本研究中 GC-IMS 使用的色谱柱 MTX-5 属于弱极性色谱柱,而 GC-MS 检测使用的 DB-WAX 色谱柱属于强极性色谱柱,色谱柱极性不同,保留与分离的挥发性物质也不同,是本研究结果中 2 种技术鉴定物质种类不同的主要原因。样品检测时孵育温度的差异会导致脂质氧化反应产物不同,本研究中 GC-IMS 检测孵育温度 100℃,是本团队比较了 3 个温度水平(60℃、80℃、100℃)和 2 个时间水平(15、20 min)确定的最优检测条件。为了与 GC-IMS 一致确保检测样品达到熟制状态,结合文献报道^[28,31]将 GC-MS 检测孵育稳定设定为 80℃。

食物的香气特征不能仅由挥发性化合物的含量这一因素反映,评价每个挥发性成分的贡献度还需要与香气阈值相结合。ROVA 值^[18,33]常被用来判断香气成分对食物香气体系贡献大小。因此对于金华猪关键香气物质的确定,参照刘登勇等^[18]的 ROVA 值对其进行计算。尽管 2 种方法检测到的挥发性风味物质的种类及相对含量存在差异,但 2 种方法共检测到壬醛、正己醛、庚醛、正辛醛和反-2-辛烯醛 5 种关键香气化合物,除此之外,GC-MS 技术检测还检测到 1-辛烯-3-醇和正庚醇,GC-IMS 技术检测到(E)-2-壬烯醛和 3-甲硫基丙醛。醛类是构成猪肉挥发性风味的主要成分,因其阈值低是猪肉中的特征气味化合物,对猪肉风味的影响最大^[34-35]。陶旋等^[36]在影响肉类风味的各种非挥发性滋味物质和挥发性香味物质的基础上,筛选出己醛与壬醛的总量可以作为挥发性风味的评价指标。王言等^[33]认为己醛与壬醛含量低是引起四川成华猪和雅南猪肉风味相对较差的部分原因,本研究通过 GC-MS 技术检测到的己醛

和壬醛的相对含量显著高于其他醛类,推测具有橙香味的壬醛及具有脂肪、青香味的己醛对金华猪肉风味起重要贡献作用。GC-IMS 技术检测到的具有肉香味的 3-甲硫基丙醛与蛋氨酸的 Strecker 降解有关, Liu 等^[37]对牛肉加热过程中产生的关键气味物质进行鉴定,发现 3-甲硫基丙醛浓度降低会导致肉香风味减少。2 种技术都检测到 ROAV 值较高的正辛醛,该物质呈现橙香与脂肪香,其形成与油酸的氧化有关,可能与金华猪特有的脂肪酸组成密切相关^[17]。通常饱和醇的阈值较高,对猪肉风味形成的贡献较小^[38],而具有蘑菇香味的 1-辛烯-3-醇属于不饱和醇,其阈值(2 μg/kg)低且相对浓度较高,其形成过程与亚油酸的氧化降解有关,2 种检测方法对 1-辛烯-3-醇的检测含量不同,可能是由于 2 种技术的孵育温度不同引起的。与向进等^[39]研究结果不同的是 GC-MS 技术检测到具有油脂味的正庚醇对金华猪的风味形成起到关键作用。与 GC-MS 技术相比,GC-IMS 检测到了更高比例的酮类物质,可能是由于 MTX-5 弱极性色谱柱对极性化合物分离效率不同,在孵育温度高于 GC-MS 的条件下,酮类化合物更易洗脱。此外,酯类物质通常具有果香甜味^[10],GC-MS 技术检测到的癸酸乙酯对金华猪猪肉风味的形成也提供了重要的修饰作用。

4 结 论

本研究使用 GC-IMS 和 GC-MS 联合分析鉴定了金华猪背最长肌肌肉挥发性风味成分,共分离鉴定 104 种化合物,主要为醛类、醇类、酸类及酮类。结合相对气味活度值,以 ROAV 值大于 1 为界,筛选到(E)-2-壬烯醛、壬醛、正己醛、庚醛、正辛醛、反-2-辛烯醛、3-甲硫基丙醛、正庚醇和 1-辛烯-3-醇等 9 种化合物可以作为金华猪鲜肉挥发性香味形成的关键物质,为金华猪鲜肉风味特征鉴定及开发利用提供科学依据。

参考文献:

- [1] 钟志君,顾以初,杨雪梅,等.川藏黑猪和 DLY 猪肉质风味比较研究[A].中国地方猪种保护与利用协作组第十一届年会论文集[C].北京:全国畜牧总站,《中国猪业》编辑部,2015: 5.
- [2] 邹英子.传统良种猪肉与瘦肉型猪肉挥发性风味成分的差异分析[D].合肥:合肥工业大学,2013.
- [3] 于梓涓,吴冬蕊,孔佑梦,等.美拉德反应对肉类风味物质形成影响的研究进展[J].中国调味品,2024,49(12): 209-214.

- [4] Li D, Zhang Z Q, Zhang K H, *et al.* Comparative characterization of fatty acids and volatile substances in Chinese indigenous and hybrid pork in raw, cooked, and reheated states[J]. Food Bio Sci, 2024, 61: 104865.
- [5] 李思懿, 粘颖群, 谭建庄, 等. 基于电子鼻快速检测生鲜猪肉的异味[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 338-348.
- [6] Da D D, Nian Y Q, Zou B, *et al.* Influence of induction cooking on the flavor of fat cover of braised pork belly[J]. J Food Sci, 2021, 86(5): 1997-2010.
- [7] Zhao X, Feng J Y, Laghi L C, *et al.* Characterization of flavor profile of "Nanx Wudl" sour meat fermented from goose and pork using Gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) combined with electronic nose and tongue[J]. Foods, 2023, 12(11): 2194.
- [8] 许宇振. 肉品中挥发性与非挥发性风味成分检测技术研究进展[J]. 肉类工业, 2021(9): 40-45.
- [9] 刘浩悦, 李聪, 王颖, 等. 国内黑猪肉风味研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(9): 337-352.
- [10] Li W, Chen Y P, Blank I, *et al.* GC×GC-ToF-MS and GC-IMS based volatile profile characterization of the Chinese dry-cured hams from different regions[J]. Food Res Int, 2021, 142: 110222.
- [11] 杨智博, 张子涵, 何依璇, 等. 基于 GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 技术探究带皮发酵对猕猴桃果酒挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(21): 203-212.
- [12] Xi B N, Zhang J J, Xu X, *et al.* Characterization and metabolism pathway of volatile compounds in walnut oil obtained from various ripening stages via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chem, 2023, 435: 137547.
- [13] Fan X, Zhong M H, Feng L, *et al.* Evaluation of flavor characteristics in tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) by E-nose, GC-IMS, and HS-SPME-GC-MS: Influence of different roasting temperatures[J]. LWT, 2024, 191: 115672.
- [14] 齐宝坤, 刘雨雯, 姚玉雪, 等. 基于 HS-GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 的蛋白酶对豆粕挥发性风味的影响分析[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 352-367, 410.
- [15] 宋倩倩, 张金枝, 刘健, 等. 不同品种猪背最长肌风味物质的研究[J]. 中国畜牧杂志, 2016, 52(19): 9-12.
- [16] 宋倩倩, 张金枝, 刘健, 等. 不同品种猪肉质性状和脂肪酸含量的研究[J]. 家畜生态学报, 2018, 39(2): 24-28.
- [17] 张志豪, 党亚丽, 罗银梅, 等. 基于脂质组学的金华猪与杜长大猪猪肉脂质特征差异分析[J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60(8): 181-190, 98.
- [18] 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, 29(7): 370-374.
- [19] 陈通, 陆道礼, 陈斌. GC-IMS 技术结合化学计量学方法在食用植物油分类中的应用[J]. 分析测试学报, 2017, 36(10): 1235-1239.
- [20] 林若川, 邓榕, 许丽蓉. 基于 GC-IMS 技术的绿茶风味鉴别方法可行性的研究[J]. 广东化工, 2017, 44(23): 19-21.
- [21] 孟维一, 古瑾, 徐洪洪, 等. 顶空气相色谱-离子迁移谱分析不同部位和品种猪肉的挥发性风味化合物[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 206-212.
- [22] Duan S N, Tang X Y, Li W S, *et al.* Analysis of the differences in volatile organic compounds in different muscles of pork by GC-IMS[J]. Molecules, 2023, 28(4): 1726.
- [23] 李睿, 王海燕, 李星, 等. 不同加工方式荣昌猪肉风味差异性评价[J]. 肉类研究, 2021, 35(11): 31-37.
- [24] 李林, 吴倩, 林静, 等. 老腊肉腌制烟熏加工过程中主体特征风味及变化规律[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 175-179.
- [25] 曲庆. 气质联用仪在气体分析中的应用[J]. 低温与特气, 2006(1): 30-35.
- [26] Dashmaa D, Cho B-W, Odkhuu G, *et al.* Meat quality and volatile flavor traits of Duroc, Berkshire and Yorkshire breeds[J]. Food Sci Anim Resour, 2011, 31(6): 807-816.
- [27] 王克晨, 黄文颖, 周继平, 等. 青海八眉猪及其杂交猪肉挥发性成分分析[J]. 肉类研究, 2020, 34(5): 64-69.
- [28] 徐梓烺. HS-SPME-GC-MS 技术用于猪肉品质检测的方法研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [29] Dai Q Y, Yang X F, Gao W, *et al.* Effect of incubation temperature on identification of key odorants of sewage sludge using headspace GC analysis[J]. Environ Pollut, 2024, 355: 124189.
- [30] 马伟, 伍迎欢, 何媛, 等. 一种同时测定 12 种香型白酒中 35 种骨架风味物质的方法[J]. 中国酿造, 2024, 43(5): 242-248.
- [31] 杨树江, 张洁, 李英, 等. HS-SPME-GC/MS 结合 OAV 分析两种不同工艺的黔式腊肉主体风味物质[J]. 现代食品, 2023, 29(8): 192-194.
- [32] 徐梓烺, 舒畅, 罗中魏, 等. 响应面法优化 HS-SPME-GC-MS 法检测猪肉中挥发性风味物质[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 252-259.
- [33] 王言, 钟志君, 何志平, 等. 四川 6 个地方猪种的育肥和胴体性能以及肉质和风味物质比较研究[J]. 畜牧与兽医, 2021, 53(1): 7-12.
- [34] Liu D Y, Bai L, Feng X, *et al.* Characterization of Jinhua ham aroma profiles in specific to aging time by gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)[J]. Meat Sci, 2020, 168: 108178.
- [35] Machiels D, Ruth V M S, Posthumus A M, *et al.* Gas chromatography-olfactometry analysis of the volatile compounds of two commercial Irish beef meats[J]. Talanta, 2003, 60(4): 755-764.
- [36] 陶璇, 何志平, 钟志君, 等. 猪肉肉质风味评价指标体系研究[J]. 养猪, 2022(1): 56-58.
- [37] Liu J M, Deng S Y, Wang J F, *et al.* Comparison and elucidation of the changes in the key odorants of precooked stewed beef during cooking-refrigeration-reheating[J]. Food Chem X, 2024, 23: 101654.
- [38] Liu C, Yang P, Wang H L, *et al.* Identification of odor compounds and odor-active compounds of yogurt using DHS, SPME, SAFE, and SBSE/GC-O-MS[J]. LWT, 2022, 154: 112689.
- [39] 向进, 吴燕, 杨齐心, 等. 关岭猪和从江香猪肌肉中挥发性风味物质差异研究[J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60(8): 224-232.

(责任编辑: 石丽丹)