DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.17.023

基于 HS-SPME-GC-MS 与电子感官技术的山楂处理鸡肉挥发性风味物质分析

臧家祎[1,2],尹力[3],苏嘉敏[3],王玉宝[2],马祥玉[2],章海风[3*]
(1. 扬州大学 食品科学与工程学院,江苏 扬州 225127;2. 浙江旅游职业学院,浙江 杭州 310000;
3. 扬州大学 旅游烹饪学院,江苏 扬州 225127)

摘　要:为探究山楂处理对鸡肉挥发性风味物质的影响,采用顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用(headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry,HS-SPME-GC-MS)技术结合电子鼻和电子舌对山楂处理组和对照组鸡肉进行分析。结果表明,2 组样品共鉴定出 60 种挥发性化合物,山楂处理显著改变了挥发性成分组成结构:醛类含量增加 197.8%,酮类含量增加 136.9%,醇类含量降低 65.2%。基于气味活度值(odor activity value,OAV)分析筛选出 6 种关键香气物质(OAV>1),其中苯甲醛仅在山楂处理组中具有香气贡献(OAV 为 118.53),己基乙酸酯仅在对照组检出(OAV 为 295.38),表明山楂处理显著改变了鸡肉的香气轮廓。电子鼻和电子舌主成分分析结果均实现了 2 组样品的良好分离(累积方差贡献率分别为 80.84% 和 99.37%)。正交偏最小二乘判别分析结合 *t* 检验最终筛选出 35 种风味差异显著的特征性挥发性成分。

关键词:山楂;鸡肉;挥发性风味物质;电子鼻;电子舌

Analysis of Volatile Flavor Compounds in Hawthorn-Treated Chicken Meat Based on HS-SPME-GC-MS and Electronic Sensory Techniques

ZANG Jiayi[1,2], YIN Li[3], SU Jiamin[3], WANG Yubao[2], MA Xiangyu[2], ZHANG Haifeng[3*]
(1. School of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, Jiangsu, China;
2. Tourism College of Zhejiang, Hangzhou 310000, Zhejiang, China; 3. School of Tourism and Cuisine, Yangzhou University, Yangzhou 225127, Jiangsu, China)

Abstract: To investigate the effect of hawthorn treatment on volatile flavor compounds in chicken meat, HS-SPME-GC-MS combined with an electronic nose and an electronic tongue was employed to analyze hawthorn-treated and control chicken samples. A total of 60 volatile compounds were identified, and hawthorn treatment significantly altered the volatile composition: aldehyde content increased by 197.8%, ketone content increased by 136.9%, and alcohol content decreased by 65.2%. Based on odor activity value (OAV) analysis, six key aroma compounds (OAV>1) were identified, among which benzaldehyde contributed to aroma only in the hawthorn-treated group (OAV of 118.53), and hexyl acetate was detected only in the control group (OAV of 295.38), indicating that hawthorn treatment significantly altered the aroma profile. E-nose and E-tongue PCA results both achieved good separation between the two groups (cumulative variance contribution rates of 80.84% and 99.37%, respectively). Orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) combined with *t*-test finally identified 35 significantly different characteristic volatile compounds.

Key words: hawthorn; chicken meat; volatile flavor compounds; electronic nose; electronic tongue

引文格式:
臧家祎,尹力,苏嘉敏,等. 基于 HS-SPME-GC-MS 与电子感官技术的山楂处理鸡肉挥发性风味物质分析[J]. 食品研究与开发,2026,47(17):193-202.
ZANG Jiayi, YIN Li, SU Jiamin, et al. Analysis of Volatile Flavor Compounds in Hawthorn-Treated Chicken Meat Based on HS-SPME-GC-MS and Electronic Sensory Techniques[J]. Food Research and Development,2026,47(17):193-202.

基金项目:中国营养学会-合理膳食基金资助项目(CNS-RDSF-2025-012);广西高校桂菜工业化加工与安全重点实验室 2023 年度开放课题(LPSGC21K0202)
作者简介:臧家祎(1999—),男(汉),助教,本科,研究方向:食品的加工与安全。
*通信作者:章海风,男,副教授,博士,主要从事膳食营养与健康方面研究。

鸡肉因高蛋白、低脂肪的营养特性以及温和适口的风味特征，已成为全球消费量最大的肉类产品之一[1]。风味是衡量鸡肉产品品质优劣的重要指标，也是影响消费者接受度和购买意愿的关键因素，主要由挥发性化合物和非挥发性滋味物质共同决定[2]。鸡肉中的挥发性风味物质种类繁多，主要包括醛类、醇类、酮类、酯类、含硫化合物和杂环化合物等，这些化合物的种类、含量及相互作用共同构成了鸡肉特有的风味轮廓[3]。然而，鸡肉在加工和贮藏过程中容易因脂质氧化、蛋白质降解等化学反应产生不良风味，严重影响产品的感官品质和货架期[4]。因此，探索有效的风味调控手段对提升鸡肉产品品质具有重要的理论意义和实践价值。

天然植物源性添加物在改善肉类品质方面展现出显著的应用潜力，已成为食品科学领域的研究热点[5]。山楂（*Crataegus pinnatifida*）作为我国传统药食同源植物，富含有机酸（如柠檬酸、苹果酸和酒石酸）、多酚类物质（如表儿茶素、原花青素和绿原酸）、黄酮类化合物以及维生素 C 等多种生物活性成分[6]。已有研究表明，山楂中的有机酸能够降低肉类体系的 pH 值，促进肌原纤维蛋白的变性和水解，从而发挥嫩化作用[7]；山楂多酚类物质具有较强的抗氧化活性，能够清除自由基、螯合金属离子，有效抑制脂质过氧化反应的发生[8]。脂质氧化是肉类挥发性风味物质形成的重要途径之一，多不饱和脂肪酸的氧化降解可产生大量的醛类、酮类和醇类化合物[9]。因此，山楂中活性成分对脂质氧化途径的调控可能显著影响鸡肉挥发性风味物质的组成和含量，进而改变产品的整体风味特征。

近年来，随着仪器分析技术的快速发展，顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用（headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography - mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS）技术因其高灵敏度、高分辨率和良好的重现性，已成为食品挥发性成分分析的主流方法[10]。结合气味活度值（odor activity value，OAV）分析，可从众多挥发性成分中筛选出对样品整体香气具有实际贡献的关键香气物质。电子鼻和电子舌作为仿生传感技术，能够快速、无损地获取样品的整体嗅觉和味觉信息，与气相色谱-质谱联用（gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS）技术形成有效互补[11]。主成分分析（principal component analysis，PCA）、线性判别分析（linear discriminant analysis，LDA）、正交偏最小二乘判别分析（orthogonal partial least squares discriminant analysis，OPLS-DA）计算变量投影重要性（variable importance in projection，VIP）等多元统计分析方法的综合运用，可从不同维度系统揭示样品间的风味差异特征[12]。

目前，关于山楂在肉制品加工中应用的研究主要集中在嫩化效果和抗氧化性能方面，而山楂处理对鸡肉挥发性风味物质影响的系统性研究尚十分有限，尤其是从挥发性成分组成、关键香气物质识别到整体风味特征表征的多层次综合分析鲜有报道。深入探究山楂对鸡肉风味的调控作用及其机制，对于拓展天然植物源性添加物在肉类加工中的应用、实现鸡肉风味品质的定向调控具有重要的科学意义和实用价值。鉴于此，本文以鸡肉为研究对象，采用 HS-SPME-GC-MS 技术系统分析其挥发性成分组成，利用 OAV 分析筛选关键香气物质，并运用电子鼻和电子舌技术对样品的整体风味特征进行表征，同时结合 PCA、LDA 和 OPLS-DA 等多元统计方法深入解析山楂处理对鸡肉风味的调控作用及其潜在机制，以期为山楂在鸡肉加工中的应用提供科学依据，并为肉类风味品质调控提供新的思路和理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜三黄鸡胸肉、新鲜山楂果实：市售；正构烷烃标准品（C7~C40）、2，4，6-三甲基吡啶（分析纯）：美国 Sigma-Aldrich 公司；氯化钠（分析纯）：国药集团化学试剂有限公司；试验用水为超纯水（电阻率 ≥18.2 MΩ/cm）。

1.2 仪器与设备

TSQ 9000 型气相色谱-质谱联用仪：美国 Thermo Fisher Scientific 公司；PEN3 型电子鼻系统：德国 Airsense Analytics 公司；SA402B 型电子舌系统：日本 Insent 公司；HWS-12 型恒温水浴锅：德国 Memmert 公司；手动固相微萃取（solid - phase microextraction，SPME）进样器及纤维头支架、SPME 纤维头[50/30 μm 二乙烯基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷（divinylbenzene/carboxen/polydimethylsiloxane，DVB/CAR/PDMS）]：美国 Supelco 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备

选取新鲜三黄鸡胸肉（同一批次、同一品种、新鲜度一致），去除表面筋膜和可见脂肪，切成约 2 cm×2 cm×1 cm 的肉块，混匀后随机分为 2 组。山楂处理组（山楂处理组）：将色泽均匀、无病虫害、成熟度一致的新鲜山楂果实洗净去核，榨汁过滤后取山楂汁，按照山楂汁与鸡肉 1∶5（质量比）的比例将山楂汁均匀涂抹于鸡肉表面，于 4 ℃条件下腌制处理 2 h（该工艺条件经前期单因素试验和响应面优化确定）。对照组为未添加山楂汁的鸡肉样品，以等量超纯水替代山楂汁，其余处理条件与山楂处理组保持一致。处理完成后，2 组样品分别于沸水浴中蒸煮 30 min（中心温度达到 85 ℃以上），冷却至室温后立即进行后续检测分析。每组样品设置 3 个重复。

1.3.2　顶空固相微萃取条件

准确称取 3.0 g 样品(绞碎混匀)置于 20 mL 顶空瓶中,加入 1.0 g 氯化钠以提高萃取效率,再加入 2 μL 质量浓度为 10 μg/kg 的内标溶液(2,4,6-三甲基吡啶)。将顶空瓶用聚四氟乙烯/硅胶隔垫密封后,置于 60 ℃恒温水浴中平衡 15 min。将预先于 250 ℃活化 30 min 的 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 纤维头插入顶空瓶顶空部分,于 60 ℃下萃取 40 min。萃取完成后,将纤维头插入 GC 进样口于 250 ℃热解吸 5 min。

1.3.3　色谱条件

HP-5MS 毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm,0.25 μm);载气为高纯氦气(纯度 ≥ 99.999%),流速 1.0 mL/min;进样口温度 250 ℃,不分流进样;升温程序:初始温度 40 ℃,保持 3 min,以 5 ℃/min 升至 150 ℃,再以 10 ℃/min 升至 250 ℃,保持 5 min。

1.3.4　质谱条件

电子轰击(electron ionization,EI)离子源;电子能量 70 eV;离子源温度 230 ℃;传输线温度 280 ℃;质量扫描范围 m/z 35~500;全扫描模式。

1.3.5　定性与定量分析

将采集的质谱图与 Wiley 8n 和 NIST 21 质谱数据库进行比对,匹配度(match factor)>80% 的化合物视为可靠鉴定结果,并通过与 C7~C40 正构烷烃标准品在相同色谱条件下的保留时间计算各化合物的保留指数(retention index,RI),与文献报道值进行对照验证。采用内标法进行半定量分析,以 2,4,6-三甲基吡啶为内标物(质量浓度 10 μg/kg),各化合物的质量分数按以下公式计算。

$$m = a/b \times m_1$$

式中:m 为化合物质量分数,μg/kg; a 为化合物峰面积;b 为内标物峰面积;m_1 为内标物质量分数,μg/kg。

气味活度值按以下公式计算。

$$R = m/c$$

式中:R 为气味活度值;m 为化合物质量浓度,μg/kg;c 为嗅觉阈值,μg/kg。

OAV>1 的化合物定义为关键香气物质。阈值数据主要参考文献[13]及 ChemicalBook 化学数据库。内标法半定量分析假设各化合物与内标物具有相似的检测器响应因子,因此所得质量分数为近似值,仅用于组间相对比较。

1.3.6　电子鼻分析

采用电子鼻系统对样品进行检测。电子鼻配备 10 个金属氧化物传感器阵列,分别为 W1C(芳香型化合物敏感)、W5S(广谱响应型)、W3C(芳香型化合物敏感)、W6S(氢气类敏感)、W5C(芳香-脂肪族化合物敏感)、W1S(广谱-甲烷类敏感)、W1W(硫化物-有机化合物敏感)、W2S(广谱-醇类敏感)、W2W(硫化物-氯化物敏感)和 W3S(甲烷-脂肪族化合物敏感)。准确称取 5.0 g 样品置于电子鼻专用顶空瓶中,密封后于 25 ℃恒温条件下平衡 10 min。检测参数设置如下:进样流速 400 mL/min,清洗时间 120 s,检测时间 80 s,取 75~80 s 稳定阶段的传感器响应值作为最终数据。其中 W1C、W3C 和 W5C 传感器的原始数据取倒数后使用,其余传感器直接使用原始响应值。每组样品设置 3 个平行。

1.3.7　电子舌分析

采用电子舌系统对样品进行滋味特征分析,检测酸味(sourness)、苦味(bitterness)、涩味(astringency)、苦味回味(aftertaste-B)、涩味回味(aftertaste-A)、鲜味(umami)、丰富度(richness)和咸味(saltiness)8 个滋味指标。准确称取 10.0 g 样品,加入 50 g 超纯水[料液比 1∶5 (g/mL)],进行匀浆(10 000 r/min,2 min),经 4 ℃、8 000×g 离心 10 min 后取上清液,再经 0.45 μm 微孔滤膜过滤,取滤液作为测试样品。每组样品设置 3 个平行。

1.4　数据处理与统计分析

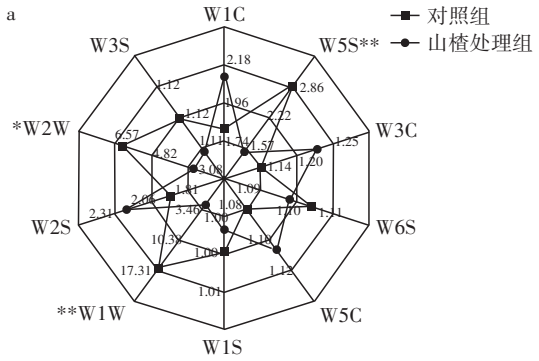
所有试验数据以平均值±标准差表示,每组试验设 3 个生物学重复。采用独立样本 t 检验对 2 组样品间的差异进行显著性分析。采用 PCA 对数据进行降维和可视化;采用 LDA 评价分类判别能力;采用 OPLS-DA 筛选特征化合物,模型通过 200 次置换检验验证有效性。数据分析和可视化采用 Python 3.8 编程语言实现。

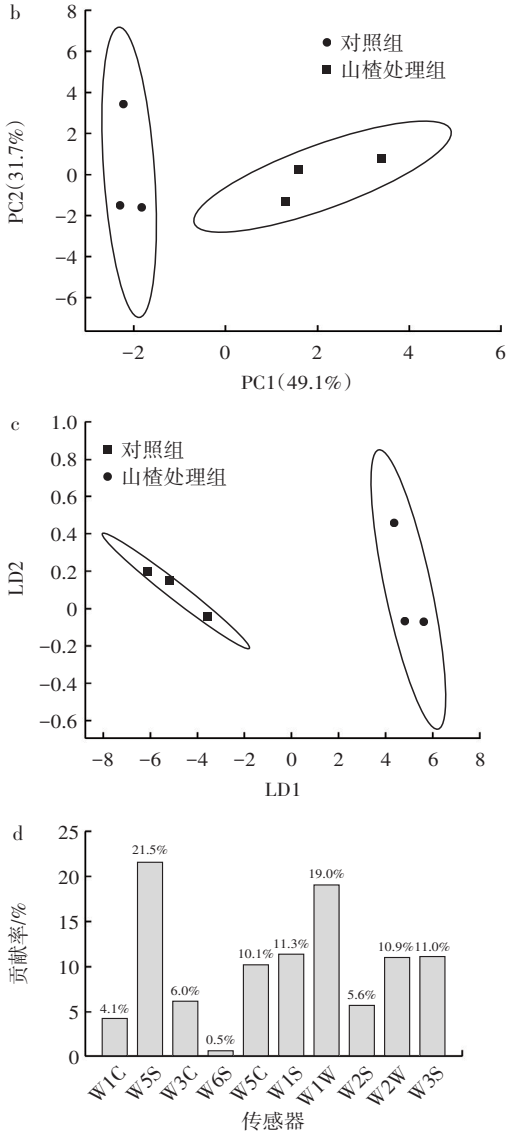
2　结果与分析

2.1　基于电子鼻技术的鸡肉挥发性成分分析

电子鼻配备的 10 个金属氧化物传感器(W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W、W3S)分别对不同类型的挥发性化合物具有选择性响应。鸡肉挥发性成分分析见图 1。

由图 1a 可以看出,2 组样品在多个传感器上的响应信号存在明显差异,表明山楂处理改变了鸡肉的整体挥发性成分轮廓。其中,W5S 传感器(广谱响应型)和 W1W 传感器(硫化物-有机化合物敏感)在 2 组样品间表现出较大的响应差异,提示山楂处理对鸡肉中





a. 雷达图;b. PCA 得分图;c.LDA 判别图;d. 传感器贡献率。*表示差异显著(p<0.05);**表示差异极显著(p<0.01)。

图 1　电子鼻分析

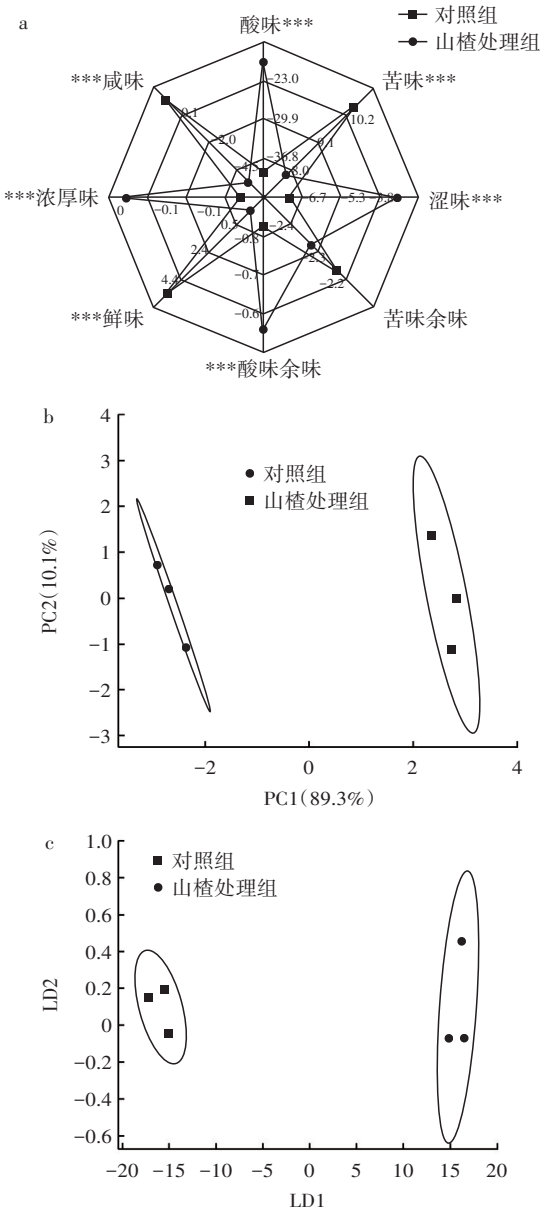
Fig.1　Electronic nose analysis

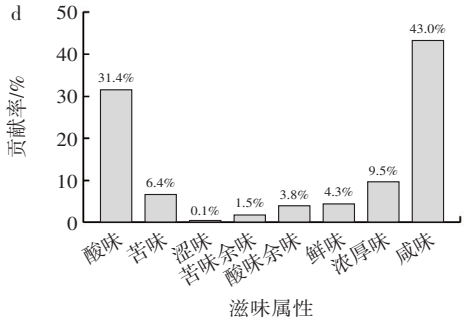
广谱挥发性化合物和含硫化合物的组成产生了显著影响。为进一步揭示 2 组样品挥发性成分特征的整体差异,对电子鼻数据进行 PCA 和 LDA 分析。如图 1b 示,PCA 得分图中前 2 个主成分的累积方差贡献率达 80.84%(PC1 为 49.1%,PC2 为 31.7%),能够有效解释原始数据的主要变异信息。对照组和山楂处理组样品在 PCA 得分图中呈现出明显的分离趋势,95% 置信椭圆无重叠,表明 2 组样品的挥发性成分特征存在显著差异。由图 1c 可知,模型对所有样品的分类准确率为 100%,混淆矩阵显示无错分样品,表明电子鼻技术结合 LDA 算法能够有效区分山楂处理组与对照组鸡肉样品。图 1d 显示,W5S 传感器对 LDA 分类模型的贡献率最高(21.5%),其次为 W1W(19.0%)、W1S(11.3%)、W3S(11.0%)和 W2W(10.9%),这些传感器所响应的挥发性化合物类型是区分 2 组样品的关键嗅觉标志物。W5S 传感器作为广谱响应型传感器,对多种挥发性化合物均具有较高的灵敏度,其最高的贡献率表明山楂处理对鸡肉挥发性成分的整体轮廓产生了全面性的调控作用[14];W1W 传感器主要响应硫化物和有机化合物,其较高的贡献率提示山楂处理可能通过影响含硫氨基酸的降解途径改变含硫挥发性成分生成。

2.2　基于电子舌技术的鸡肉滋味特征分析

采用电子舌系统对 2 组鸡肉样品的滋味特征进行分析,结果见图 2。

由图 2a 可以看出,山楂处理显著改变了鸡肉的滋味轮廓。山楂处理组的酸味响应值(−19.5)高度显著高于对照组(−38.9),变化幅度达 49.9%(p<0.001),这与山楂中富含的有机酸成分(柠檬酸、苹果酸和酒石酸





a. 雷达图；b. PCA 得分图；c. LDA 判别图；d. 滋味指标贡献率。***表示差异高度显著（$p<0.001$）。

图 2 电子舌分析

Fig.2 Electronic tongue analysis

等）在处理过程中渗透到鸡肉组织有关[6]。对照组在鲜味（5.3）和咸味（1.3）指标上显著高于山楂处理组（鲜味−0.5、咸味−5.7），表明山楂处理改变了鸡肉中游离氨基酸和离子的分布状态，从而影响了鲜味和咸味的感知。苦味指标方面，对照组（10.4）高于山楂处理组（7.9），山楂处理高度显著降低了鸡肉的苦味强度（$p<0.001$），这可能与山楂中多酚类化合物对苦味物质的掩蔽效应有关。由图 2b 可知，前 2 个主成分的累积贡献率高达 99.4%（PC1 为 89.3%，PC2 为 10.1%），表明 PC1 和 PC2 几乎完全捕获了原始数据的变异信息。2 组样品在 PCA 得分图中实现了完全分离，置信椭圆无任何重叠区域，证实了山楂处理对鸡肉滋味特征的显著调控效应。图 2c 对所有样品实现了 100% 的分类准确率，进一步验证了电子舌技术在区分 2 组样品方面的有效性。图 2d 表明，咸味传感器的贡献率最高（43.0%），其次为酸味传感器（31.4%），两者累积贡献率达 74.4%，是区分山楂处理组与对照组鸡肉样品的最关键滋味特征指标。结合山楂富含有机酸的化学特性[6]，酸味和咸味的显著变化可能是山楂中有机酸对鸡肉组织中离子平衡和 pH 值调控作用的直接反映[7,15]。

2.3 山楂处理对鸡肉挥发性成分组成的影响

采用 HS-SPME-GC-MS 技术对 2 组鸡肉样品进行挥发性成分分析，2 组样品共鉴定出 60 种挥发性化合物，其中山楂处理组检测到 44 种，对照组检测到 51 种，35 种为共有成分，山楂处理组特有成分 9 种，对照组特有成分 17 种。共有成分代表了鸡肉的基础挥发性物质特征，而特有成分的差异则反映了山楂处理对鸡肉风味形成途径的调控作用。山楂处理组总挥发性成分含量为 365.06 μg/kg，对照组为 353.38 μg/kg，2 组样品总含量差异较小，但挥发性成分的组成结构发生了显著变化。鸡肉挥发性成分种类及含量的分析结果见表 1，60 种化合物的完整鉴定信息见表 2。

由表 1 可知，山楂处理显著改变了各类挥发性化合物的含量分布。醛类含量方面，山楂处理组[（74.58±

表 1 鸡肉挥发性成分种类及含量比较

Table 1 Comparison of types and contents of volatile components in chicken

种类	山楂处理组		对照组		显著性
	含量/（μg/kg）	占比/%	含量/（μg/kg）	占比/%	
醛类	74.58±1.58	20.43	25.05±0.89	7.09	*
酮类	62.58±1.63	17.14	26.41±1.01	7.47	*
醇类	20.92±0.42	5.73	60.10±0.83	17.01	*
酯类	91.72±1.48	25.12	97.20±2.38	27.50	ns
烃类	54.74±1.85	14.99	105.97±1.68	29.98	*
酸类	25.48±0.56	6.98	25.67±0.52	7.27	ns
酚类	14.07±0.56	3.85	nd	-	-
胺类	9.36±0.14	2.56	8.85±0.25	2.50	ns
醚类	9.74±0.18	2.67	1.75±0.02	0.50	*
其他	1.86±0.04	0.51	2.37±0.06	0.67	ns
合计	365.06±2.42	100.00	353.38±1.02	100.00	ns

注：*表示组间差异极显著（$p<0.01$），ns 表示差异不显著（$p>0.05$）；nd 表示未检出；-表示不适用。

表 2 鸡肉挥发性成分鉴定结果

Table 2 Identification results of volatile components in chicken

序号	化合物	RI 值	山楂处理组/（μg/kg）	对照组/（μg/kg）
1	苯甲酸异丙酯	737	1.405±0.036	-
2	2,3-戊二酮	890	1.636±0.047	-
3	二硫化碳	935	1.801±0.010[b]	9.084±0.006[a]
4	丙酸	1 010	2.488±0.086[a]	1.674±0.029[b]
5	异戊醇	1 010	11.798±0.184[b]	20.942±0.269[a]
6	1-甲氧基-2-丙胺	1 028	9.365±0.141[a]	8.855±0.254[a]
7	γ-壬内酯	1 100	24.938±0.349[a]	3.010±0.148[b]
8	2-戊基呋喃	1 140	1.861±0.035[a]	1.228±0.025[b]
9	4-乙烯基苯酚	1 172	14.071±0.563	-
10	γ-癸内酯	1 175	4.882±0.151[b]	7.141±0.196[a]
11	壬-3,5-二烯-2-酮	1 212	22.527±0.155[a]	1.857±0.017[b]
12	丙酰乙酸乙酯	1 221	10.276±0.187[b]	16.159±0.703[a]
13	壬基环丁烷羧酸酯	1 266	1.987±0.038[a]	1.767±0.020[a]
14	戊酸-4-己烯-1-基酯	1 268	1.657±0.040[b]	26.829±0.728[a]
15	莰烯	1 272	2.524±0.113[b]	24.766±0.789[a]
16	异戊酸己酯	1 310	7.555±0.161[a]	6.558±0.255[a]
17	5-甲基-2-苯基-2-己烯醛	1 336	3.760±0.078[a]	4.165±0.034[a]
18	(*E*)-香叶酸甲酯	1 344	22.426±0.119[a]	1.047±0.016[b]
19	丙酸丁酯	1 367	1.619±0.036[b]	10.392±0.284[a]
20	2,3-丁二酮	1 384	1.043±0.022	-
21	碳酸癸基-2-乙基己基酯	1 385	4.394±0.120	-
22	DL-2-甲基丁酸	1 821	6.038±0.031[a]	2.359±0.052[b]
23	羰基硫	1 427	1.122±0.034[b]	19.930±0.536[a]
24	2,6,10-三甲基十四烷	1 436	15.914±0.540[b]	25.936±0.314[a]

续表 2　鸡肉挥发性成分鉴定结果

Continue table 2　Identification results of volatile components in chicken

序号	化合物	RI 值	山楂处理组/(μg/kg)	对照组/(μg/kg)
25	壬酸	1 442	4.545±0.294	-
26	苯甲醛	1 444	5.927±0.105	-
27	癸酸	1 448	9.703±0.178[a]	10.244±0.227
28	十五醛	1 481	28.718±0.635[a]	7.996±0.235[b]
29	α-草澄茄烯	1 490	3.273±0.109[a]	1.023±0.034[b]
30	5-甲基-5-己烯-2-酮	1 490	19.218±0.097	-
31	β-大马酮	1 516	1.615±0.063[b]	2.558±0.042[a]
32	2-十一烯醛	1 519	13.129±0.629[a]	4.328±0.066[b]
33	庚醛	1 519	1.101±0.013[b]	2.697±0.109[a]
34	γ-十一内酯	1 562	1.345±0.020[b]	2.523±0.111[a]
35	新薄荷醇	1 564	7.531±0.133	-
36	癸基环氧乙烷	1 621	24.047±1.126[a]	4.429±0.069[b]
37	甲基丙基二硫醚	1 641	9.736±0.179[a]	1.752±0.015[b]
38	β-紫罗兰酮-5,6-环氧化物	1 669	16.538±0.415[a]	1.138±0.040[b]
39	柠檬烯	1 702	6.073±0.059[a]	2.140±0.061[b]
40	戊酸	1 706	2.711±0.110[b]	11.397±0.452[a]
41	丙基己酸酯	1 719	9.231±0.100[a]	2.126±0.090[b]
42	*E*-2-壬烯醛	1 722	18.687±0.153[a]	1.474±0.011[b]
43	3,5-辛二烯-2-醇	1 792	1.588±0.035[a]	1.218±0.031[b]
44	2-庚烯醛	1 796	3.255±0.079[b]	4.384±0.206[a]
45	2,2,6-三甲基环己酮	734	-	20.869±0.837
46	5-乙基-1,3-环己二烯	927	-	1.269±0.016
47	环丙烷羧酸乙酯	950	-	1.040±0.015
48	1-十一醇	1 054	-	6.080±0.092
49	2-乙基-3-羟基己基-2-甲基丙酸酯	1 065	-	1.567±0.049
50	己基乙酸酯	1 175	-	11.815±0.431
51	4-丙基环己醇	1 180	-	2.758±0.008
52	β-松油烯	1 200	-	2.318±0.042
53	环癸烯	1 252	-	1.081±0.040
54	(*Z*)-β-罗勒烯	1 252	-	5.907±0.114
55	s-甲基-3-甲基丁硫酸酯	1 292	-	1.866±0.029
56	1-十九烯	1 464	-	3.341±0.112
57	草蒿脑	1 519	-	1.143±0.032
58	3-甲基壬烷	1 521	-	2.934±0.068
60	正癸酸正癸酯	1 616	-	3.368±0.082
61	乙基甲苯	1 846	-	1.806±0.039

注:同行不同字母表示组间差异显著(p<0.05);-表示未检出。

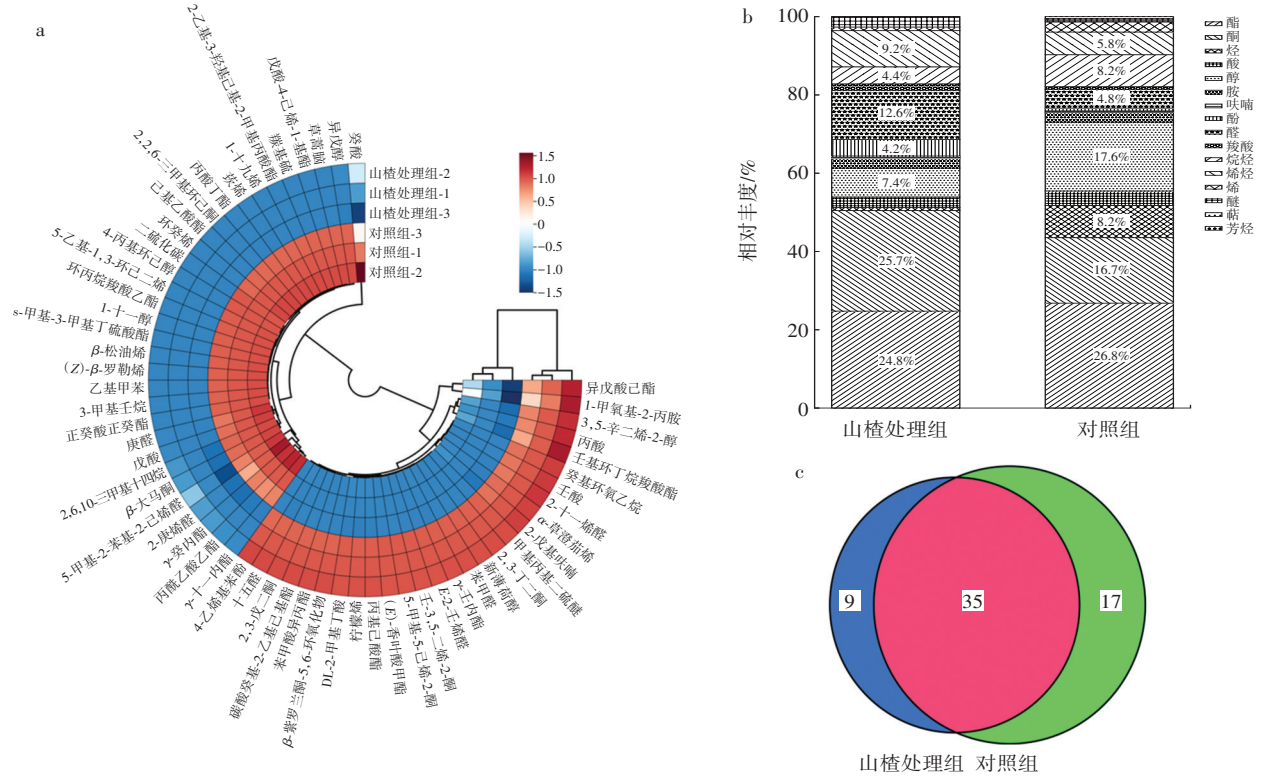
1.58) μg/kg,占 20.43%)]极显著高于对照组[(25.05±0.89) μg/kg,占 7.09%](p<0.01),增幅达 197.72%。醛类化合物是肉类风味的重要贡献者,主要来源于不饱和脂肪酸(如亚油酸、花生四烯酸)的氧化降解[16]。已有研究表明,低 pH 值环境能够加速脂质氢过氧化物的分解并促进醛类生成[17],山楂汁中丰富的有机酸(柠檬酸、苹果酸)降低了鸡肉体系的 pH 值,这一作用机制与 Liu 等[18]报道的柠檬酸处理对猪肉风味的调控效应一致。此外,Mottram[19]指出氨基酸与还原糖在较低 pH 值条件下更倾向于发生 Strecker 降解而非缩合反应,生成更多的醛类物质。酮类含量在山楂处理组[(62.58±1.63) μg/kg,占 17.14%]极显著高于对照组[(26.41±1.01)μg/kg,占 7.47%](p<0.01),增幅达 136.96%。Shahidi 等[16]指出酮类化合物可通过脂质氢过氧化物的 β-裂解或脂肪酸的 β-氧化途径生成,山楂处理后酮类含量的大幅增加与脂质氧化途径的改变密切相关。醇类含量呈现相反的变化趋势,对照组[(60.10±0.83) μg/kg,占 17.01%]极显著高于山楂处理组[(20.92±0.42) μg/kg,占 5.73%](p<0.01),降幅为 65.19%。这一变化趋势与 Yang 等[15]报道的有机酸处理对肉制品中醇类化合物的抑制效应相似,其原因可能包括 1)酸性条件促进了醇类与有机酸之间的酯化反应;2)酸性环境改变了醛酮还原酶的活性,抑制了醛类还原为醇类的途径。酯类是 2 组样品中含量较高的化合物种类之一,山楂处理组为(91.72±1.48) μg/kg,占 25.12%,对照组为(97.20±2.38) μg/kg,占 27.50%,差异不显著(p>0.05)。烃类在对照组中含量较高[(105.97±1.68) μg/kg,占 29.98%],极显著高于山楂处理组[(54.74±1.85) μg/kg,占 14.99%](p<0.01)。酚类仅在山楂处理组中检出,对照组未检出。山楂处理组中 4-乙烯基苯酚(14.07 μg/kg)为酚类的主要贡献成分,该化合物是阿魏酸热降解的典型产物[20],其在山楂处理组中的大量生成与山楂果实中丰富的酚酸类物质(特别是绿原酸和阿魏酸)在蒸煮过程中的热分解直接相关[6]。此外,山楂处理组[(9.74±0.18) μg/kg]的醚类含量极显著高于对照组[(1.75±0.02) μg/kg](p<0.01),其中甲基丙基二硫醚为主要成分,可能来源于含硫氨基酸在酸性条件下的分解[19]。酸类含量在 2 组样品间差异不显著(p>0.05),山楂处理组为(25.48±0.56) μg/kg,占 6.98%,对照组为(25.67±0.52) μg/kg,占 7.27%。

鸡肉挥发性成分组成分析见图 3。

由图 3 可知,聚类热图分析图 3a 直观展示了 60 种挥发性成分在各样品中的相对含量分布模式。双向层次聚类结果显示,山楂处理组 3 个平行样品紧密聚类在一起,对照组 3 个平行样品同样形成独立的聚类分支,表明组内重复性良好,组间差异显著。种类含量堆积柱状图 3b 清晰呈现了 2 组样品在化合物种类组成上的差异,山楂处理组以酮类和醛类为主要组成,而对照组以酯类和醇类含量较高。图 3c 展现了山楂处理组独有的挥发性成分有 9 种,对照组独有的挥发性成分有 17 种,两组共有的挥发性成分有 35 种。

2.4　挥发性成分多元统计分析

为从整体层面系统比较 2 组样品挥发性成分的差

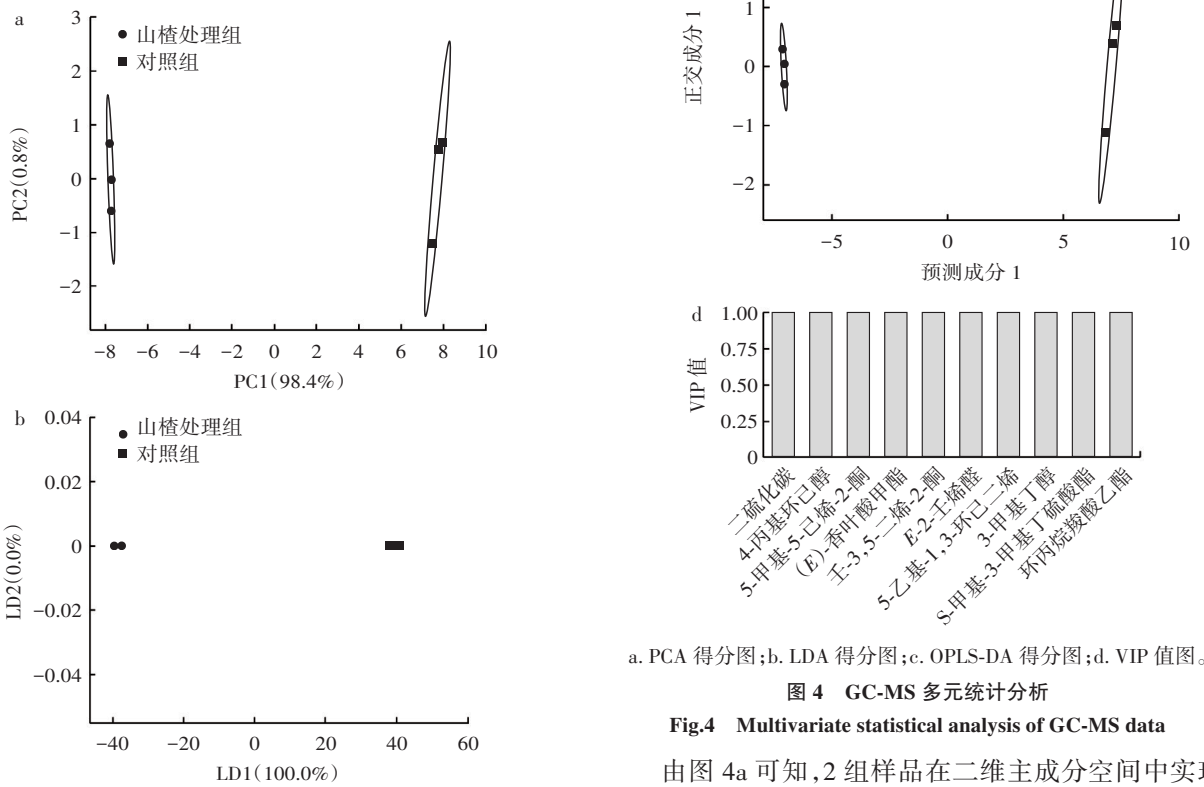


a. 聚类热图；b. 种类含量堆积柱状图；c. 韦恩图。

图 3　GC-MS 挥发性成分组成分析

Fig.3　Composition analysis of volatile components by GC-MS

异特征，采用 PCA、LDA 和 OPLS-DA 等多元统计分析方法对 GC-MS 数据进行深入解析[21]。对挥发性成分进行多元统计分析，结果见图 4。



a. PCA 得分图；b. LDA 得分图；c. OPLS-DA 得分图；d. VIP 值图。

图 4　GC-MS 多元统计分析

Fig.4　Multivariate statistical analysis of GC-MS data

由图 4a 可知，2 组样品在二维主成分空间中实现

了良好的分离，95% 置信椭圆无重叠，表明 2 组样品的挥发性成分轮廓存在本质性差异。图 4b 的分类准确率为 100%，留一法交叉验证准确率同样为 100%。本研究仅涉及 2 个类别的样品，LDA 在 2 类分类问题中天然具有较高的准确率，其分类结果的参考价值有限[22]。因此，LDA 在本研究中主要作为 PCA 分析的辅助验证手段，用于确认 2 组样品在挥发性成分特征上的分离趋势，而非作为独立的分类判别模型。OPLS-DA 分析用于筛选导致 2 组样品差异的特征挥发性成分。图 4c 中，2 组样品沿预测成分方向实现了完全分离，正交成分则反映了组内变异。模型通过 200 次置换检验验证，R^2_Y 截距和 Q^2 截距均满足模型有效性标准，排除了过拟合的可能性。基于 OPLS-DA 模型计算的 VIP 值（图 4d），以 VIP>1 为初步筛选标准，共筛选出 53 种化合物（占总检出化合物的 88%）。该比例较高，说明在仅有 2 组样品的试验设计中，VIP>1 的筛选阈值区分力有限。因此，本研究进一步结合独立样本 t 检验对 VIP>1 的化合物进行二次筛选，最终确认了 35 种同时满足 VIP>1 且组间差异显著的特征性挥发性成分（见表 2 中标注不同字母的化合物）。VIP 排名前列且组间差异显著的化合物主要涉及醛类（如 *E*-2-壬烯醛、2-十一烯醛）、酮类（如壬-3，5-二烯-2-酮、*β*-紫罗兰酮-5，6-环氧化物）和酯类[如 γ-壬内酯、(*E*)-香叶酸甲酯]，这些化合物的差异变化揭示了山楂处理对鸡肉脂质氧化途径和美拉德反应产物的调控作用[9,18]。

电子鼻/电子舌的传感器响应数据与 GC-MS 鉴定结果之间存在一定的关联性。电子鼻中贡献率最高的 W5S 传感器（广谱响应型）和 W1W 传感器（硫化物-有机化合物敏感）的响应差异，与 GC-MS 结果中几种含硫化合物的含量变化相吻合：甲基丙基二硫醚在山楂处理组中的含量为 9.736 μg/kg，显著高于对照组的 1.752 μg/kg；而羰基硫在山楂处理组中为 1.122 μg/kg，低于对照组的 19.930 μg/kg。电子舌中酸味传感器的贡献率为 31.38%，这与山楂汁富含有机酸、导致处理后鸡肉体系酸度升高的特征一致。GC-MS 数据中酸类化合物的变化也印证了这一关联：丙酸在山楂处理组中的含量为 2.488 μg/kg，高于对照组的 1.674 μg/kg；壬酸仅在山楂处理组中检出。上述多技术交叉验证结果表明，电子鼻/电子舌的快速检测结果与 GC-MS 定量数据在反映山楂处理效应方面具有良好的一致性。

2.5 关键香气物质分析

OAV 是评价挥发性化合物对食品整体香气贡献的重要指标[23]，OAV>1 的化合物被认为是对样品香气具有实际贡献的关键香气物质[13]。基于 OAV 分析，从 2 组样品中共筛选出 6 种关键香气物质，如表 3 所示。

表 3 鸡肉关键香气物质 OAV 含量

Table 3 Odor activity values of key aroma compounds in chicken

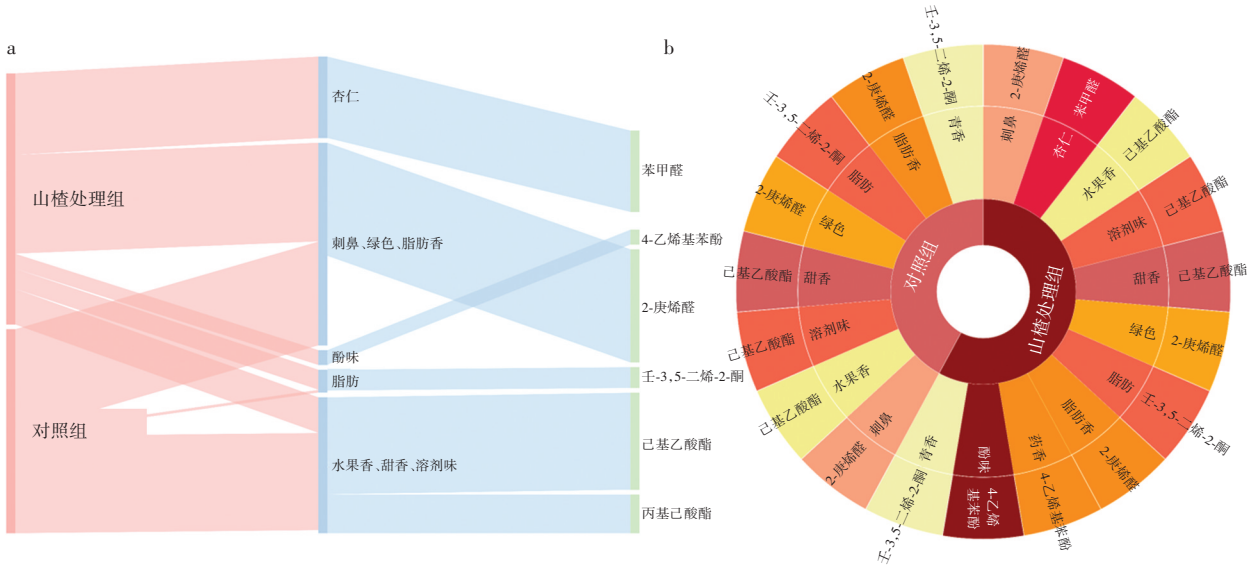
化合物名称	香气描述	阈值/(μg/kg)	山楂处理组含量/(μg/kg)	对照组含量/(μg/kg)	显著性
2-庚烯醛	刺鼻、青草味、脂肪味	0.01	325.43±7.88	438.43±20.59	*
己基乙酸酯	水果香、甜香	0.04	-	295.38±10.78	-
苯甲醛	杏仁味	0.05	118.53±2.10	-	-
丙基己酸酯	水果香、甜香	1.3	7.10±0.08	1.64±0.07	*
壬-3，5-二烯-2-酮	脂肪味、青香	10	2.25±0.02	<1	*
4-乙烯基苯酚	酚味、药香	10	1.41±0.06	-	-

注：*表示组间 OAV 差异极显著（p<0.01）；-表示未检出或不适用（仅一组检出，无法进行组间比较）。

由表 3 可知，2-庚烯醛是 2 组样品中 OAV 最高的关键香气物质，其呈现刺鼻、青草味和脂肪味，主要来源于亚油酸 ω-6 多不饱和脂肪酸的氧化降解物[9]。对照组的 OAV（438.43±20.59）极显著高于山楂处理组（325.43±7.88）μg/kg（p<0.01），表明山楂处理降低了 2-庚烯醛的生成量。Han 等[23]在炖猪肉风味研究中同样发现 2-庚烯醛是 OAV 最高的关键香气物质。山楂多酚（特别是原花青素和表儿茶素）可通过供氢机制清除脂质过氧自由基，从而在一定程度上抑制亚油酸氧化产生 2-庚烯醛的链式反应[8]。己基乙酸酯仅在对照组中检出[OAV 为（295.38±10.78）μg/kg]，呈现水果香和甜香特征。该化合物在山楂处理组中未被检测到，其原因可从两个方面解释：一是山楂汁中有机酸导致的低 pH 环境促进了酯键的酸催化水解反应[24]；二是酸性条件可能改变了脂肪酶的活性，影响了酯类化合物的生物合成途径。苯甲醛仅在山楂处理组中具有显著的香气贡献[OAV 为（118.53±2.10）μg/kg]，呈现杏仁味特征。苯甲醛的生成途径包括苯丙氨酸的 Strecker 降解反应和山楂中苯甲酸类物质的脱羧反应[19]。Resconi 等[25]在反刍动物肉类香气研究中也证实了苯甲醛对肉制品坚果类香气的重要贡献。丙基己酸酯在 2 组样品中均具有香气贡献，山楂处理组[OAV（7.10±0.08）μg/kg]极显著高于对照组[（1.64±0.07）μg/kg]（p<0.01），表明山楂处理选择性地促进了该酯类化合物的生成。壬-3，5-二烯-2-酮仅在山楂处理组中 OAV[（2.25±0.02）μg/kg]>1，呈现脂肪味和青香，该化合物属于共

轭烯酮类，是亚麻酸 ω-3 不饱和脂肪酸氧化降解的特征物[16]。4-乙烯基苯酚仅在山楂处理组中 OAV[(1.41±0.06) μg/kg]>1，呈现酚味和药香。如前所述，4-乙烯基苯酚为山楂中阿魏酸热降解的直接产物，该化合物在葡萄酒和啤酒风味研究中也被广泛报道为酚酸热解标志物[20]。

关键香气物质分析见图 5。



a. 关键香气物质桑基图；b. 风味轮。

图 5 关键香气物质分析

Fig.5 Analysis of key aroma compounds

由图 5 可知，山楂处理显著改变了鸡肉的香气轮廓。对照组的香气特征以刺鼻的脂肪味(2-庚烯醛)和水果香(己基乙酸酯)为主；而山楂处理组的香气特征更为多元化，在保留脂肪味基调的同时，新增了苯甲醛赋予的杏仁味、壬-3,5-二烯-2-酮赋予的青香以及 4-乙烯基苯酚赋予的酚味和药香。这一结果与吴惠玲等[26]关于不同烹饪方式影响鸡肉风味轮廓的研究结论相呼应，说明前处理方式对鸡肉关键香气物质的种类和丰度具有显著的调控作用。苯甲醛、壬-3,5-二烯-2-酮和 4-乙烯基苯酚可作为山楂处理鸡肉的特征香气标志物，己基乙酸酯可作为对照组的特征标志物，为山楂处理组的风味品质评价提供了可量化的化学指标。

3 结论

本研究采用 HS-SPME-GC-MS 结合电子鼻和电子舌技术系统分析了山楂处理对鸡肉挥发性风味物质的影响，发现山楂处理极显著改变了挥发性成分的组成结构(p<0.01)：醛类含量增加 197.8%，酮类含量增加 136.9%，醇类含量降低 65.2%，酚类仅在山楂处理组中检出(14.07 μg/kg)，这些变化与山楂有机酸对脂质氧化途径的调控以及酚酸的热降解密切相关。山楂处理赋予了鸡肉以杏仁味和酚香为特征的差异化香气轮廓。电子鼻和电子舌 PCA 结果均实现了 2 组样品的良好分离(累积方差贡献率分别为 80.84% 和 99.37%)，且传感器响应差异与 GC-MS 定量结果之间具有良好的一致性。OPLS-DA 结合独立样本 t 检验筛选出 35 种差异显著的特征挥发性成分。本研究揭示了山楂处理对鸡肉挥发性风味物质组成、关键香气物质和整体风味特征的调控作用，可为山楂在鸡肉加工中的应用提供科学依据和实践指导。后续研究应进一步测定山楂处理前后鸡肉的 pH 值、脂质氧化指标和游离氨基酸含量等辅助数据，以阐明风味调控的具体分子机制。

参考文献：

[1] 李晓明, 张德权, 任聪, 等 . 不同烹饪方式对鸡肉挥发性风味化合物的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(3): 1052-1068.
LI Xiaoming, ZHANG Dequan, REN Cong, et al. Effects of cooking methods on the volatile flavor compounds of chicken meat[J]. Food Science, 2023, 44(3): 1052-1068.

[2] ZHANG W G, XIAO S, AHN D U. Protein oxidation: Basic principles and implications for meat quality[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(11): 1191-1201.

[3] WANG X, LI Y, ZHOU G, et al. Characterization of key aroma compounds in chicken meat using GC-MS-olfactometry[J]. Food Research International, 2021, 150: 110764.

[4] LIU Y, CHEN H, SUN J, et al. Lipid oxidation and volatile compounds in chicken meat during storage[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131256.

[5] CHEN X, WANG Y, ZHANG L, et al. Application of natural plant extracts in meat processing: A review[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134820.

[6] 吴杰, 李明, 周倩, 等 . 山楂化学成分及生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 286-295.
WU Jie, LI Ming, ZHOU Qian, et al. Chemical composition and bio-

active properties of hawthorn (Crataegus spp.): A comprehensive review[J]. Food Science, 2022, 43(15): 286-295.

[7] YANG F, LIU Q, ZHANG H, et al. Effects of organic acids on meat tenderization mechanisms[J]. Meat Science, 2021, 176: 108465.

[8] SUN Q, ZHANG B, YAN Q, et al. Antioxidant activity of hawthorn extract and its application in meat preservation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 173: 114371.

[9] DOMÍNGUEZ R, PATEIRO M, GAGAOUA M, et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products[J]. Antioxidants, 2019, 8(10): 429.

[10] XIAO Z, WANG Y, NIU Y, et al. Solid-phase microextraction approaches for analysis of volatile compounds in food: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 103: 37-48.

[11] JIANG H Y, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Application of electronic tongue for fresh foods quality evaluation: A review[J]. Food Reviews International, 2018, 34(8): 746-769.

[12] DUAN Y, ZHANG L, WANG B, et al. Multi-omics approaches for revealing the complexity of meat flavor[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133535.

[13] (荷)里奥·范海默特 . 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
L. J. van Gemert Compilations of flavour threshold values in water and other media[M]. Beijing: Science Press, 2015.

[14] 田怀香, 于海燕, 陈臣, 等 . 电子鼻技术在肉品品质检测中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(19): 296-305.
TIAN Huaixiang, YU Haiyan, CHEN Chen, et al. Advances in application of electronic nose technology in meat product quality detection[J]. Food Science, 2021, 42(19): 296-305.

[15] YANG F, LIU Q, ZHANG H, et al. Effects of organic acids on meat tenderization and flavor formation mechanisms[J]. Meat Science, 2022, 185: 108726.

[16] SHAHIDI F, ZHONG Y. Lipid oxidation and improving the oxidative stability[J]. Chemical Society Reviews, 2010, 39(11): 4067.

[17] WARAHO T, MCCLEMENTS D J, DECKER E A. Mechanisms of lipid oxidation in food dispersions[J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(1): 3-13.

[18] LIU Y, LI S, WANG Z, et al. Effects of citric acid treatment on the volatile compounds and flavor characteristics of pork[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131069.

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

[20] VANBENEDEN N, GILS F, DELVAUX F, et al. Formation of 4-vinyl and 4-ethyl derivatives from hydroxycinnamic acids: Occurrence of volatile phenolic flavour compounds in beer and distribution of Pad1-activity among brewing yeasts[J]. Food Chemistry, 2008, 107(1): 221-230.

[21] WORLEY B, POWERS R. Multivariate analysis in metabolomics[J]. Current Metabolomics, 2012, 1(1): 92-107.

[22] BRERETON R G, LLOYD G R. Partial least squares discriminant analysis: Taking the magic away[J]. Journal of Chemometrics, 2014, 28(4): 213-225.

[23] HAN D, ZHANG C H, FAUCONNIER M L, et al. Characterization and comparison of flavor compounds in stewed pork with different processing methods[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 144: 111229.

[24] FENNEMA O R. Food Chemistry[M]. New York: M. Dekker, 1976: 225-319.

[25] RESCONI V C, ESCUDERO A, CAMPO M M. The development of aromas in ruminant meat[J]. Molecules, 2013, 18(6): 6748-6781.

[26] 吴惠玲, 范志勇, 白卫滨, 等 . 电子鼻和气相色谱-质谱联用分析不同烹饪方式鸡胸肉挥发性风味物质[J]. 食品科学, 2021, 42(2): 234-241.
WU Huiling, FAN Zhiyong, BAI Weibin, et al. Analysis of volatile flavor compounds in chicken breast meat with different cooking methods by electronic nose and GC-MS[J]. Food Science, 2021, 42(2): 234-241.

加工编辑:李文欣
收稿日期:2026-03-27