

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250409001

引用格式: 潘佳宇, 张吉祥, 赵晨阳, 等. 低温等离子体处理 4 °C 贮藏过程中金鲳鱼粗脂肪风味表征及分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 41-49.

PAN JY, ZHANG JX, ZHAO CY, *et al.* Characterisation and analysis of crude fat flavour of *Trachinotus ovatus* during storage at 4 °C by atmospheric cold plasma treatment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 41-49. (in Chinese with English abstract).

低温等离子体处理 4 °C 贮藏过程中金鲳鱼粗脂肪 风味表征及分析

潘佳宇^{1#}, 张吉祥^{1#}, 赵晨阳¹, 王钰翔¹, 应晓国^{1*}, 伍思惠², 马路凯²

(1. 浙江省海鲜健康危险因素重点实验室, 浙江海洋大学食品药学院, 舟山 316022;

2. 农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 仲恺农业工程学院食品科学与工程学院, 广州 510225)

摘要: **目的** 研究低温等离子体(atmospheric cold plasma, AP)处理对金鲳鱼粗脂肪在 4 °C 贮藏期间产生的挥发性化合物, 并对其进行表征和分析。**方法** 用电子鼻和气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)定性定量分析 4 °C 贮藏过程中 AP 处理后金鲳鱼粗脂肪产生的挥发性有机化合物, 用电子舌检测金鲳鱼粗脂肪的滋味物质。**结果** AP 处理组检出的醇类和酸类物质的种类和含量均较低。气味活性值表明, 异丁醛、丁基羟基甲苯、(Z)-3-苯基丙烯醛、乙酸桂酯和邻苯二甲酸二丁酯是金鲳鱼新鲜组、AP 处理组和贮藏对照组的主要挥发性化合物。电子鼻雷达图显示 AP 处理组传感器响应与另外两者相比较弱。**结论** AP 处理能够有效保护食品在 4 °C 贮藏过程中的风味稳定性, AP 处理组能为金鲳鱼粗脂肪带来特殊的挥发性化合物, 同时减缓了 4 °C 贮藏过程中脂质氧化速度。本研究有助于探索 AP 处理在水产品方面的应用。

关键词: 低温等离子体; 粗脂肪; 电子鼻; 挥发性化合物; 金鲳鱼

Characterisation and analysis of crude fat flavour of *Trachinotus ovatus* during storage at 4 °C by atmospheric cold plasma treatment

PAN Jia-Yu^{1#}, ZHANG Ji-Xiang^{1#}, ZHAO Chen-Yang¹, WANG Yu-Xiang¹,
YING Xiao-Guo^{1*}, WU Si-Hui², MA Lu-Kai²

收稿日期: 2025-04-09

基金项目: 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设(加工与保鲜共性关键技术)(2024CXTD16); 广东省大学生创新创业训练计划项目(X202411347192); 国家自然科学基金项目(32302135, 32072291); 大宗水产品预制菜肴加工关键技术研发项目(2023C03006)
#潘佳宇和张吉祥为共同第一作者

第一作者: 潘佳宇(2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与贮藏工程。E-mail: ybbdgt@163.com

张吉祥(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与贮藏工程。E-mail: Z806592291@163.com

*通信作者: 应晓国(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水产品冷链物流。E-mail: yingxiaoguo@zjhou.edu.cn

(1. Key Laboratory of Health Risk Factors for Seafood of Zhejiang Province, Food and Pharmacy College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology, School of Food Science and Engineering, Zhongkai College of Agricultural Engineering, Guangzhou 510225, China)

ABSTRACT: Objective To study the volatile compounds produced by atmospheric cold plasma (AP) treatment on the crude fat of *Trachinotus ovatus* during storage at 4 °C, and characterize and analyze them. **Methods** The volatile organic compounds in the crude fat of *Trachinotus ovatus* after AP treatment during storage at 4 °C were qualitatively and quantitatively analyzed by electronic-nose and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and the taste substances of crude fat of *Trachinotus ovatus* were detected by electronic tongue. **Results** The types and content of alcohols and acids detected in the AP treatment group were low. The odor activity values showed that isobutyraldehyde, butyl hydroxytoluene, (Z)-3-phenylacrolein, cinnamyl acetate and dibutyl phthalate were the main volatile compounds in the fresh group, AP treatment group and storage control group. The electronic-nose radar map showed that the sensor response of the AP treatment group was weaker than the other two. **Conclusion** AP treatment can effectively protect the flavor stability of food during storage at 4 °C. AP treatment group can bring special volatile compounds to the crude fat of *Trachinotus ovatus*, and slow down the rate of lipid oxidation during storage at 4 °C. This research is helpful to explore the application of AP treatment in aquatic products.

KEY WORDS: atmospheric cold plasma; crude fat; electronic-nose; *Trachinotus ovatus*

0 引言

金鲷鱼学名卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*), 是一种重要的海水养殖鱼类, 因其富含不饱和脂肪酸且具有独特风味, 在市场上广受欢迎^[1]。目前, 关于金鲷鱼的研究主要集中在腐败与氧化和加工利用方面^[2]。然而, 关于金鲷鱼脂质氧化的过程与机制仍缺乏深入研究。赵腾飞等^[3]采用脂质组学方法研究了大黄鱼油在低温贮藏期间的脂质组成变化, 发现脂质氧化会影响大黄鱼的品质。本研究对于金鲷鱼粗脂肪在贮藏或加工过程中的脂质氧化规律进行了进一步探究。

脂质氧化是食品风味形成的一种重要途径, 其反应产物(如醛类、酮类和醇类等挥发性化合物)直接影响食品的香气特征与感官品质^[4]。适度脂质氧化可赋予水产品独特且愉悦的风味特征, 而过度氧化则会导致不良风味物质(如己醛、2,4-癸二烯醛)引起食品产生腥味、哈喇味等品质劣变问题, 显著降低产品的可接受性^[5-6]。因此, 分析金鲷鱼粗脂肪在贮藏过程中挥发性化合物的含量与变化, 能侧面反映出其脂质氧化规律^[7]。

低温等离子体(atmospheric cold plasma, AP)作为一种新兴的非热加工技术, 因其具有安全性高、处理条件温和、成本效益显著等优势, 近年来在食品杀菌领域展现出巨大潜力^[8]。该技术是在两个金属电极间设置绝缘介质, 以阻挡板间的气隙, 使气隙通道内放电不产生电弧, 而是在大压力放电过程中产生丝状放电的模式^[9]。AP通过产生高活性粒子可对细菌、真菌及孢子等微生物表现出广谱灭活效应。同时, 因其具有非热特性, 对食品营养成分和感官品

质的影响较小^[10]。此外, AP技术不仅能有效延缓水产品腐败变质, 还能较好地维持其原有品质特性, 因而在水产保鲜领域具有广阔应用前景^[11]。ZHANG等^[12]在研究中发现长期冷链贮藏过程中AP处理可以更好地保护风味特征, 且对其他品质指标无显著影响。本研究探究在4 °C贮藏过程中AP处理对金鲷鱼粗脂肪挥发性化合物的影响。

多技术联用分析可以更好地解释食品风味成分的变化, 从而理解某种香气的作用机制^[13]。其中, 电子鼻和电子舌是基于多学科交叉的新型智能感官分析技术, 通过模拟人类嗅觉和味觉感知系统, 可实现对大批量样品气味和滋味特征的客观评价^[14]。本研究应用该技术对金鲷鱼粗脂肪样品的风味进行表征分析^[15]。气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)是一种利用标准参考数据库分析食品中挥发性化合物的技术^[16], 该技术可对复杂试样组分进行定量和定性分析。目前, 电子鼻、电子舌和GC-MS均已广泛应用于食品工业的风味分析和质量控制, 可以更全面揭示食品风味的本质特征。

在本研究中, 使用AP处理金鲷鱼并进行冷藏实验, 采用电子鼻、电子舌和GC-MS技术, 对AP处理的金鲷鱼粗脂肪在4 °C贮藏期间的风味成分进行定性定量分析。本研究可为AP技术在水产品加工和贮藏的应用及粗脂肪挥发性化合物的变化机制提供新的参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

金鲷鱼[重量(520±60) g, 长(29±3) cm]购自舟山国际水产城水产品贸易区(2024年11月, 中国)。整条鱼在低温

下被运送到实验室, 保留腹部部分, 待用。

石油醚(沸程 30~60 °C)、无水硫代硫酸钠、冰醋酸、酚酞指示剂、氢氧化钾、乙醇、吐温 80、氯化钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

FOSS 自动索氏提取器(丹麦 FOSS 分析有限公司); HP-5MS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)、PAL/PAL3 自动进样器系统、5975B 气相色谱质谱仪(美国 Agilent 公司); BK130/36 低温等离子体反应装置(美国 PHENIX 公司); PEN-3 电子鼻系统(德国 AIRSENSE 公司); iTongue20 电子舌(浙江浙科仪器设备有限公司); T 25 digital ULTRA-TURRAX 剪切机(德国 IKA 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备和贮藏

金鲳鱼取腹部可食用位置, 分装样品, 每份样品(92±8) g, 放入聚乙烯塑料盒中。将金鲳鱼放在平板中心的位置上, 在 30 kV 的放电电压下处理 1.5 min, 等离子体可以均匀分布在整个放电空间。未冷藏处理的金鲳鱼为新鲜组, AP 处理后在-4 °C 保存 0、3、6、9、12 d 的作为 AP 组, 未用 AP 处理的作为对照组。

1.3.2 粗脂肪提取率

粗脂肪提取参考李郁宇等^[17]的方法, 采用 FOSS 自动索氏抽提仪, 样品在浸提纸筒内称重后装入浸提器, 在封闭系统中加入溶剂, 样品与石油醚料液比为 1:5 (g:mL), 通过电子加热板对浸提杯加热。萃取程序包括 4 个步骤: 热浸提、淋洗、溶剂回收和预干燥。金鲳鱼脂肪的提取率计算如公式(1)所示。

$$W/\% = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W 为金鲳鱼粗脂肪提取率, %; m_1 为提取器的质量, g; m_2 为提取杯的质量, g; m 为金鲳鱼样品的称样质量, g。

1.3.3 金鲳鱼粗脂肪酸价测定

测定酸价(acid value, AV)的方法参考赵思敏等^[18]方法, 并稍作修改。将提取的 5.00 g 粗脂肪溶解在石油醚和乙醇中(1:1, $V:V$)。随后, 用 0.10 mol/L 氢氧化钾标准滴定剂测定样品溶液中的游离脂肪酸含量。以酚酞指示剂颜色变化作为终点判定依据。用滴定结束时消耗的标准滴定溶液的体积来计算粗脂肪的 AV, 如公式(2)所示。

$$X_{AV} = \frac{(V - V_0) \times c \times 56.1}{m_3} \quad (2)$$

式中: X_{AV} 为粗脂肪的 AV, mg/g; V 为试剂测定所消耗的标准溶液的体积, mL; V_0 为相应的空白测定所消耗的标准滴定溶液的体积, mL; c 为标准滴定溶液的摩尔浓度, mol/L; 56.1 为氢氧化钾的摩尔质量, g/mol; m_3 为粗脂肪样品的称样量, g。

1.3.4 GC-MS 对金鲳鱼粗脂肪挥发性化合物检测

参考 WANG 等^[19]的方法, 并作出适当修改。称取 5 g 金鲳鱼粗脂肪于顶空瓶中, 加入 1 g 饱和氯化钠, 压盖, 置于 80 °C 水浴中平衡 20 min, 再将固相微萃取针扎进顶空中, 继续放入 80 °C 水浴中 30 min, 250 °C 进样口解析 5 min。HP-5MS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm), 初温柱温 50 °C 保持 2 min, 以 5 °C/min 升至 180 °C 保持 5 min, 再以 10 °C/min 升至 250 °C, 保持 5 min。进样口温度 250 °C, 传输线温度 280 °C, 载气流: 1.0 mL/min。离子源温度: 230 °C, 四极杆温度 150 °C, 电子轰击源(electron ionization source, EI), 全扫 40~600 m/z 。

1.3.5 气味活性值分析

气味活性值(odor activity value, OAV)是根据样品中香气活性成分的浓度与嗅觉阈值的比值得出的^[20], 通过计算 OAV, 可以评估每种挥发性化合物对样品整体香气特征的贡献程度。OAV 的计算如公式(3)所示。

$$OAV = C_i / T_i \quad (3)$$

式中: C_i 是样品中化合物的浓度, μg/kg; T_i 是化合物的气味阈值, μg/kg。

1.3.6 电子舌检测金鲳鱼粗脂肪的滋味物质

参考陈戈辉等^[21]的方法, 并作适当修改。取 25 g 温度回升至室温金鲳鱼粗脂肪于烧杯中, 加入 75 mL 超纯水, 再加入 5 g 乳化剂(吐温 80), 用剪切机以 8500 r/min 搅拌 10 min, 使其成为乳液, 将预处理后的各样品每个等分为 15 mL 用于电子舌检测。用待测样品对进行仪器预热, 使传感器全部运行数次以使传感器稳定, 进样后, 根据传感器响应信号值的大小及响应曲线进行灵敏度的调节, 最终确定各个传感器的灵敏度, 每个样品重复 6 次平行。

1.3.7 电子鼻对金鲳鱼粗脂肪挥发性化合物检测

参考魏来等^[22]的方法, 并作适当修改。电子鼻由传感部分、信号传输部分和信息处理部分 3 个主要部分组成传感器。将金鲳鱼粗脂肪解冻且温度回升至室温后, 摇匀后称取 0.5 g 置于 100 mL 烧杯中, 双层保鲜膜封口, 静置 30 min 后上机测试。将进样针头插入含样品的密封烧杯中, 电子鼻进行测定。测定条件: 采样时间为 1 s/组; 传感器自清洗时间为 80 s; 传感器归零时间为 5 s; 样品准备时间为 5 s; 进样流量为 400 mL/min; 分析采样时间为 80 s。

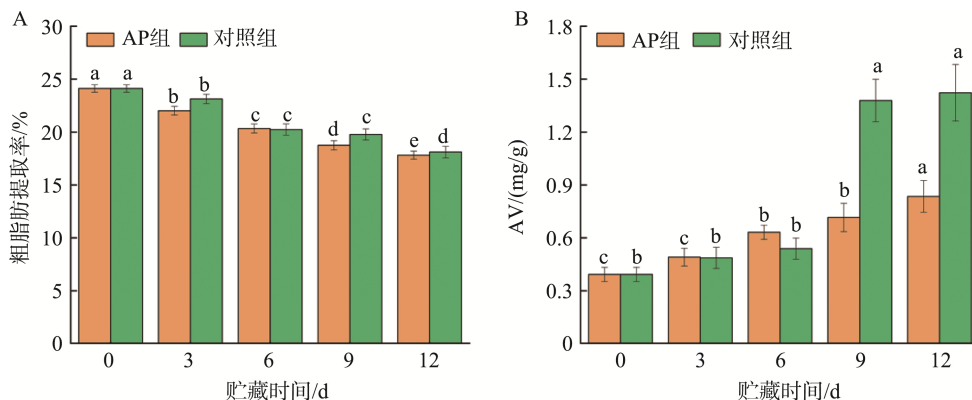
1.4 数据处理

使用 OriginPro 9.1 进行分析。对实验结果进行统计分析, 根据 3 个独立实验的结果计算平均值和标准偏差。采用多范围检验评估均数的差异, 在 $P < 0.05$ 时认为差异有显著性意义。

2 结果与分析

2.1 粗脂肪提取率分析

如图 1A 所示, 0 d 金鲳鱼组粗脂肪的提取率为



注: 不同小写字母表示组内显著性差异($P < 0.05$)。

图 1 金鲳鱼在不同处理条件下粗脂肪提取率(A)和 AV (B)

Fig.1 Crude fat extraction rates (A) and AV (B) of *Trachinotus ovatus* under different treatment conditions

24.12%±1.06%, 初始金鲳鱼粗脂肪提取率有一定的波动, 这可能与金鲳鱼购买时间、金鲳鱼的状态和实验过程中的操作有关。在贮藏时间延长的条件下, AP 处理组和对照组的粗脂肪提取率均呈现显著下降趋势。经过 12 d 贮藏后 AP 处理的金鲳鱼粗脂肪提取率为 18.32%±0.78%, 对照组粗脂肪提取率为 19.51%±0.85%。这表明, AP 处理过程中释放高活性自由基可能会与鱼肉中的不饱和脂肪酸发生反应, 导致油脂氧化, 氧化的油脂在提取过程中容易形成沉淀, 从而降低粗脂肪提取率, 因此需要进一步研究 AP 处理对金鲳鱼粗脂肪的影响。

2.2 酸价测定分析

AV 测量结果反映了鱼油的氧化特性, 可作为评价新鲜鱼油的指标。通过图 1B 可知, 新鲜组金鲳鱼粗脂肪 AV 为(0.39±0.04) mg/g, 经过 12 d 贮藏后 AP 处理的金鲳鱼粗脂肪 AV 为(0.84±0.09) mg/g, 对照组金鲳鱼粗脂肪 AV 为(1.32±0.16) mg/g, 均达到 SC/T 3502—2016《鱼油》中粗鱼油一级标准^[23]。AV 的增加与粗脂肪在贮藏期间发生的氧化降解过程呈正相关, 表明鱼油品质在贮藏过程中出现渐进性劣变。当贮藏时间延长至 6 d 时, 对照组样品的 AV 显著性升高, 这可能是由于油脂的氧化降解以及水解反应造成的。而 AP 处理在初始阶段促进了金鲳鱼粗脂肪的初级氧化反应, 但贮藏后期并无显著性影响, 基于此, 需要进一步研究 AP 处理对贮藏过程中金鲳鱼粗脂肪挥发性化合物的影响。

2.3 GC-MS 对挥发性化合物分析

采用 GC-MS 对 3 组粗脂肪中挥发性有机化合物进行了定性和定量分析。不同组的挥发性有机物含量不同, 说明 3 组间的香气特征不同^[24]。通过表 1 能看到, 不同储藏时间以及是否经过 AP 处理的挥发性有机物类型与含量存在差异。新鲜组检测出烷烃类挥发性化合物 9 种, 醇类未检测到, 醛类 2 种, 酮类 5 种, 酸类 1 种, 酯类 3 种, 其他类 6 种。AP 组-12 检测出烷烃类挥发性化合物 11 种, 醇

类未检测到, 醛类 2 种, 酮类 5 种, 酸类 2 种, 酯类 6 种, 其他类 12 种。对照组-12 检测出烷烃类挥发性化合物 7 种, 醇类 3 种, 醛类 0 种, 酮类 5 种, 酸类 6 种, 酯类 7 种, 其他类 6 种。通过 GC-MS 数据得到, 挥发性挥发物主要为烷烃类, 烷烃是形成杂环化合物的重要中间体, 它们广泛存在于水产品的挥发性化合物中, 但是大多数烷烃通常具有较高的气味阈值, 对水产品整体气味的贡献最小^[25]。相较于对照组, AP 处理组的醇类和酸类物质的种类和含量均较低。醇类和酸类是脂质氧化产生的次生代谢产物, 主要来源于多不饱和脂肪酸的氧化降解。因此可以得到对照组在多不饱和脂肪酸氧化方面高于 AP 处理组。经过 AP 处理的金鲳鱼粗脂肪的酮类和其他类挥发性化合物相对含量高于对照组, 说明 AP 处理为金鲳鱼粗脂肪带来了特殊的挥发性化合物, 但也有可能是粗脂肪的其他氧化产物, 值得进一步研究。

2.4 气味活性值数据分析

化合物嗅觉阈值是表征气味物质特性的重要指标, 对关键致香物质鉴定、异味污染的形成机制、恶臭评估以及污染控制有重要意义, 是判定化合物对香气和恶臭贡献率的基础性数据, 0.1<OAV<1 的化合物被认为是气味活性物质, OAV≥1 的化合物被进一步定义为主要气味活性物质^[26]。如表 2 所示, 3 组共筛选出 5 种 OAV>1 的关键挥发性化合物, 分别为异丁醛、丁基基甲苯、(Z)-3-苯基丙烯醛、乙酸桂酯和邻苯二甲酸二丁酯。在新鲜组金鲳鱼粗脂肪中, 丁基基甲苯、(Z)-3-苯基丙烯醛、乙酸桂酯和邻苯二甲酸二丁酯的 OAV 均大于 1, 表明其对该样品风味具有贡献。新鲜组的气味活性特征主要与脂类挥发性化合物相关, 同时检测到少量苯类挥发性化合物。苯类物质的生成可能源于脂质氧化或苯丙氨酸的降解代谢, 这说明新鲜金鲳鱼粗脂肪在初期就已发生轻微脂质氧化, 结合 AV 检测综合分析, 可以判定新鲜组金鲳鱼粗脂肪属于优质脂质。

表 1 GC-MS 分析对照组、AP 贮藏 12 d 和新鲜金鲳鱼粗脂肪中的挥发性有机化合物

Table 1 Volatile organic compounds in crude fat of control group, AP storage for 12 d and fresh *Trachinotus ovatus* analysed by GC-MS

类别	化合物名称	CAS	分子式	相对含量/%		
				新鲜组	AP 组-12	对照组-12
烷烃类	2-叔丁基磺酰基-2-甲基丙烷	1886-75-5	C ₈ H ₁₈ O ₂ S	ND	0.67	ND
	正戊烷	109-66-0	C ₅ H ₁₂	ND	2.50	ND
	4,6-二甲基十二烷	61141-72-8	C ₁₄ H ₃₀	1.54	0.97	ND
	1-丁基-1-甲基-2-丙基环丙烷	41977-34-8	C ₁₁ H ₂₂	ND	0.42	ND
	2,6,11,15-四甲基十六烷	504-44-9	C ₂₀ H ₄₂	ND	1.20	ND
	2,5,5-三甲基庚烷	1189-99-7	C ₁₀ H ₂₂	ND	1.02	ND
	正十七烷	629-78-7	C ₁₇ H ₃₆	3.58	2.94	1.46
	姥鲛烷	1921-70-6	C ₁₉ H ₄₀	4.92	2.14	1.12
	正二十一烷	629-94-7	C ₂₁ H ₄₄	ND	0.97	1.75
	正十八烷	593-45-3	C ₁₈ H ₃₈	ND	0.93	ND
	角鲨烷	111-01-3	C ₃₀ H ₆₂	ND	0.46	ND
	十五烷	629-62-9	C ₁₅ H ₃₂	8.70	ND	1.11
	3-甲基-5-丙基壬烷	31081-18-2	C ₁₃ H ₂₈	ND	ND	0.58
	5-乙基-5-甲基癸烷	17312-74-2	C ₁₃ H ₂₈	ND	ND	0.72
	7-甲基庚烷	20959-33-5	C ₁₈ H ₃₈	ND	ND	1.16
	正丁基正丁烷-	111-92-2	C ₈ H ₁₉ N	7.63	ND	ND
	5-甲基-5-丙基-壬烷	17312-75-3	C ₁₃ H ₂₈	0.71	ND	ND
	3-甲基十一烷	1002-43-3	C ₁₂ H ₂₆	0.75	ND	ND
	3-乙基-3-甲基癸烷-	17312-66-2	C ₁₃ H ₂₈	0.71	ND	ND
	3,5-二甲基十一烷-	17312-81-1	C ₁₃ H ₂₈	1.59	ND	ND
醇类	2,4,6-三甲基苯甲硫醇	21411-42-7	C ₁₀ H ₁₄ S	ND	ND	0.98
	11-甲基十二醇	85763-57-1	C ₁₃ H ₂₈ O	ND	ND	0.82
	2-己基-1-癸醇	2425-77-6	C ₁₆ H ₃₄ O	ND	ND	0.91
醛类	异丁醛	78-84-2	C ₄ H ₈ O	ND	1.31	ND
	甲基 4-甲酰苯甲酸酯二缩醛	42228-16-0	C ₁₁ H ₁₄ O ₄	ND	3.02	ND
	(Z)-3-苯基丙烯醛	57194-69-1	C ₉ H ₈ O	5.14	ND	ND
	2,6-二甲基-10-亚甲基十二碳-2,6,11-三烯-1-醛	60066-88-8	C ₁₅ H ₂₂ O	2.90	ND	ND
酮类	4-(4-甲氧苯基)-3-丁烯-2-酮	943-88-4	C ₁₁ H ₁₂ O ₂	ND	0.19	ND
	过氧化乙酰丙酮	592-20-1	C ₅ H ₈ O ₃	ND	1.79	ND
	1-[5-乙基-3-(5-硝基-2-咪喃基)-1H-1,2,4-三唑-1-基]-乙酮	35732-76-4	C ₁₀ H ₁₀ N ₄ O ₄	ND	0.16	ND
	2-氨基-4-羟基-6,8-二甲基-7(8H)-蝶呤酮	25477-64-9	C ₈ H ₉ N ₅ O ₂	ND	0.45	ND
	4-甲氧基-3-(异戊烯-2-基)苯乙酮	26931-99-7	C ₁₄ H ₁₈ O ₂	ND	1.50	1.01
	2,3-二氢-3-羟基-2-(4-二甲氨基苯基)铬-4-酮	101442-35-7	C ₁₇ H ₁₅ NO ₃	ND	ND	0.46
	8-胍-1,3,7-三甲基-3,7-二氢-嘌呤-2,6-二酮	53703-63-2	C ₈ H ₁₂ N ₆ O ₂	ND	ND	0.49
	2-丁酮	78-93-3	C ₄ H ₈ O	2.34	ND	ND
	1-羟基-2-丁酮	5077-67-8	C ₄ H ₈ O ₂	1.24	ND	ND
	(+/-)-1,3,5-三甲基-5-苯基-2,4-咪唑啉二酮	55822-88-3	C ₁₂ H ₁₄ N ₂ O ₂	ND	ND	0.51
	2-亚甲基-5-(1-甲基乙基)环己酮	15297-07-1	C ₁₀ H ₁₆ O	ND	ND	0.53
	水合茛三酮	485-47-2	C ₉ H ₆ O ₄	1.29	ND	ND
	(2S, 6R)-2-甲基-6-壬基哌啶-4-酮	264149-06-6	C ₁₅ H ₂₉ NO	2.72	ND	ND
	5-庚基-吡咯烷-2-酮	2405-92-7	C ₁₁ H ₂₁ NO	0.84	ND	ND

表 1(续)

类别	化合物名称	CAS	分子式	相对含量/%			
				新鲜组	AP 组-12	对照组-12	
酸类	1-氰基-1-[2-(2-苯基-1,3-二氧杂环戊-2-基)乙基]戊基乙烷丙酸	58422-92-7	C ₁₉ H ₂₅ NO ₅	ND	2.37	ND	
	3,4-二甲氧基肉桂酸	14737-89-4	C ₁₁ H ₁₂ O ₄	ND	0.51	8.98	
	2,5-二甲氧基肉桂酸	10538-51-9	C ₁₁ H ₁₂ O ₄	ND	ND	0.18	
	4-苯并吡喃酮-2-羧酸	4940-39-0	C ₁₀ H ₆ O ₄	ND	ND	0.68	
	3,4-二甲氧基肉桂酸	2316-26-9	C ₁₁ H ₁₂ O ₄	ND	ND	0.21	
	2,3-二甲氧基肉桂酸	7345-82-6	C ₁₁ H ₁₂ O ₄	ND	ND	0.90	
	5-叔丁基-1,3-苯二羧酸	2359-09-3	C ₁₂ H ₁₄ O ₄	ND	ND	4.74	
	4-苄氧基-3-甲氧基-2-硝基苯甲酸	3584-32-5	C ₁₅ H ₁₃ NO ₆	1.15	ND	ND	
酯类	异氰酸酯	75-13-8	CHNO	ND	7.45	ND	
	DL-去甲缬氨酸甲酯	51220-50-9	C ₆ H ₁₃ NO ₂	ND	1.81	ND	
	3,4-二甲基-2-(3-甲基丁基)苯甲酸甲酯	71940-29-9	C ₁₅ H ₂₀ O ₃	ND	0.30	ND	
	邻苯二甲酸二甲酯	131-11-3	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	ND	5.95	8.70	
	十四酸甲酯	124-10-7	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	ND	1.06	0.56	
	棕榈酸甲酯	112-39-0	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	ND	1.80	1.54	
	2-氨基对苯二甲酸二甲酯	5372-81-6	C ₁₀ H ₁₁ NO ₄	ND	ND	0.27	
	2-甲酰基-4,6-二甲氧基-7-甲酰基庚-2-基苯甲酸酯	312305-59-2	C ₁₈ H ₂₄ O ₆	ND	ND	0.51	
	原苯甲酸三甲酯	707-07-3	C ₁₀ H ₁₄ O ₃	ND	ND	1.05	
	对甲酰基苯甲酸甲酯	1571-08-0	C ₉ H ₈ O ₃	ND	ND	1.20	
	N-(2-苄基-3-氧代-4-异恶唑烷基)-氨基甲酸苄酯	28832-03-3	C ₁₈ H ₁₈ N ₂ O ₄	1.68	ND	ND	
	乙酸桂酯	103-54-8	C ₁₁ H ₁₂ O ₂	1.82	ND	ND	
	邻苯二甲酸二丁酯	84-74-2	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	6.31	ND	ND	
	其他	四氮唑	288-94-8	CH ₂ N ₄	ND	0.51	ND
		4H-苯并[def]咪唑	203-65-6	C ₁₄ H ₉ N	ND	0.63	ND
4,5,6,7-四甲基苯并[c][1,2,5]-噻二唑		106148-64-5	C ₁₀ H ₁₂ N ₂ S	ND	0.63	ND	
5-氨基-2-巯基苯并咪唑		2818-66-8	C ₇ H ₇ N ₃ S	ND	15.69	ND	
5-甲基-3-(5-硝基-2-咪唑基)吡唑		16239-90-0	C ₈ H ₇ N ₃ O ₃	ND	1.59	ND	
5-甲基-5H 萘并[2,3-c]咪唑		100025-44-3	C ₂₁ H ₁₅ N	ND	ND	0.49	
1-甲氧基-4-(1-甲基丙基)苯		4917-90-2	C ₁₁ H ₁₆ O	ND	1.70	ND	
1-(1,2-二甲氧基丙基)-4-甲氧基苯		138169-72-9	C ₁₂ H ₁₈ O ₃	ND	2.96	ND	
丁基羟基甲苯		128-37-0	C ₁₅ H ₂₄ O	27.60	28.59	53.89	
N-噻吩并[3,2-c]吡啶-3-基乙酰胺		28783-16-6	C ₉ H ₈ N ₂ OS	ND	0.13	ND	
N-(叔丁基)-2-哌啶甲酰胺		179007-60-4	C ₁₀ H ₂₀ N ₂ O	ND	0.58	ND	
3-羟基-4-苯基 2(3H)-噻唑亚胺		58275-64-2	C ₉ H ₈ N ₂ OS	ND	ND	0.15	
环丁基胺		2516-34-9	C ₄ H ₉ N	1.95	ND	ND	
1-(1-乙基-1H-1,2,4-三唑-5-基)乙胺		1015846-51-1	C ₆ H ₁₂ N ₄	0.46	ND	ND	
N-苯基噻唑啉-4-胺		34923-95-0	C ₁₄ H ₁₁ N ₃	6.92	ND	ND	
2,3,4-三甲氧基苯乙腈		68913-85-9	C ₁₁ H ₁₃ NO ₃	ND	1.77	ND	
2-氨基-5-异丙基-8-甲基-1-氮杂环碳腈		93946-48-6	C ₁₅ H ₁₆ N ₂	ND	ND	1.72	
双(五甲基苯基)-氧化膦		122085-61-4	C ₂₂ H ₃₁ OP	ND	0.39	ND	
9-[2,2-双(羟甲基)-1-丙基]蒽		144000-85-1	C ₁₉ H ₂₀ O ₂	ND	ND	0.29	
二苯并[a,c]吩嗪		215-64-5	C ₂₀ H ₁₂ N ₂	ND	ND	0.14	
八氢-2,2'-联[2H-吡喃]	16282-29-4	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	0.87	ND	ND		
β-石竹烯	87-44-5	C ₁₅ H ₂₄	2.98	ND	ND		

注: ND 表示未检测到或者检测结果低于仪器的检出限, 下同; AP 组-12 表示 AP 组贮藏 12 d; 对照组-12 表示对照组贮藏 12 d。

AP 组-12 处理组中, 金鲳鱼粗脂肪检出 2 种 OAV>1 的关键挥发性化合物(异丁醛和丁基羟基甲苯)。而对照组-12 仅检出丁基羟基甲苯一种关键挥发性化合物。丁基羟基甲苯作为一种抗氧化剂, 不具有挥发性气味。对照组-12 丁基羟基甲苯 OAV 远高于 AP 组-12 和新鲜组, 这表明 AP 组-12 处理组氧化程度较轻, 消耗丁基羟基甲苯较少, 而对照组因氧化严重需要更多丁基羟基甲苯残留来维持稳定性。佐证了 AP 处理能减缓粗脂肪氧化并对挥发性化合物起到一定的保护作用^[27]。

表 2 AP、对照组贮藏 12 d 和新鲜组金鲳鱼粗脂肪挥发性化合物的 OAV

Table 2 OAV of volatile compounds in crude fat of *Trachinotus ovatus* in the AP, control group storage for 12 d and fresh group

化合物名称	嗅觉阈值	OAV		
		新鲜组	AP 组-12	对照组-12
异丁醛	0.41	ND	3.20	ND
正戊烷	4.1	ND	0.61	ND
丁基羟基甲苯	1.0	27.60	28.59	53.89
正十八烷	157	ND	ND	ND
棕榈酸甲酯	2	ND	0.90	0.77
2-丁酮	29	0.08	ND	ND
环丁基胺	32.5	0.06	ND	ND
正丁基正丁烷	36	0.31	ND	ND
(Z)-3-苯基丙烯醛	0.37	13.89	ND	ND
β -石竹烯	12	0.25	ND	ND
乙酸桂酯	0.15	12.13	ND	ND
邻苯二甲酸二丁酯	0.26	24.27	ND	ND

2.5 电子舌检测金鲳鱼粗脂肪的滋味物质分析

采用电子舌对金鲳鱼粗脂肪中的滋味物质进行系统分析, 如图 2 所示。图 2 中每一个点代表每一次重复实验,

不同点组合成的簇代表一类样品, 样本空间分布的距离直观反映了各组样品整体感官品质的差异程度。从图 2 中可以看出: 电子舌通过滋味的识别将不同组的粗脂肪样品区分开来。新鲜组、AP 组-12 和对照组-12 在 PCA 图上呈现明显分离状态, 且不同组的样品粗脂肪的含量存在比较明显的差异, 可以根据实际应用场景需求作进一步的探究^[28]。

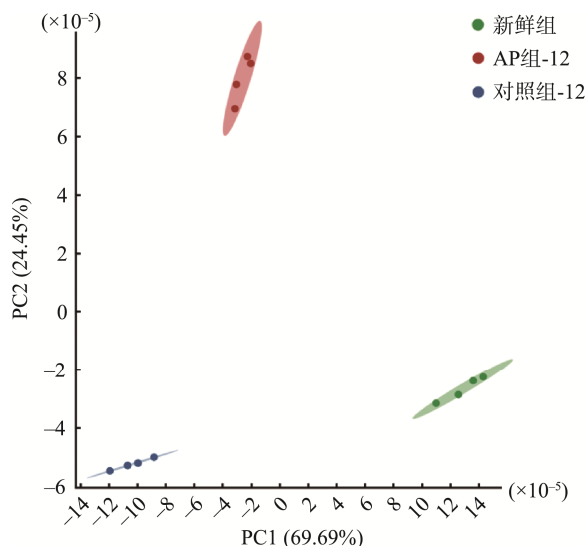


图 2 AP、对照组贮藏 12 d 和新鲜组电子舌 PCA 图
Fig.2 Electronic tongue PCA diagram of AP, control group storage for 12 d and fresh group

2.6 电子鼻特征挥发性风味物质分析

选取每个样品特征图上 71~72 s 对金鲳鱼粗脂肪进行分析, 结果如图 3 PCA 所示, 第一和第二主成份贡献率之和达到 90%以上, 第一主成分占比 83.81%, 第二主成分贡献率是 9.91%, 说明样品 PCA 数据是可信的。通过电子鼻雷达图和 PCA 分析可见, 3 个粗脂肪样品在气味上存在明显的差异, 在 PCA 图中可被明确的区分开来,

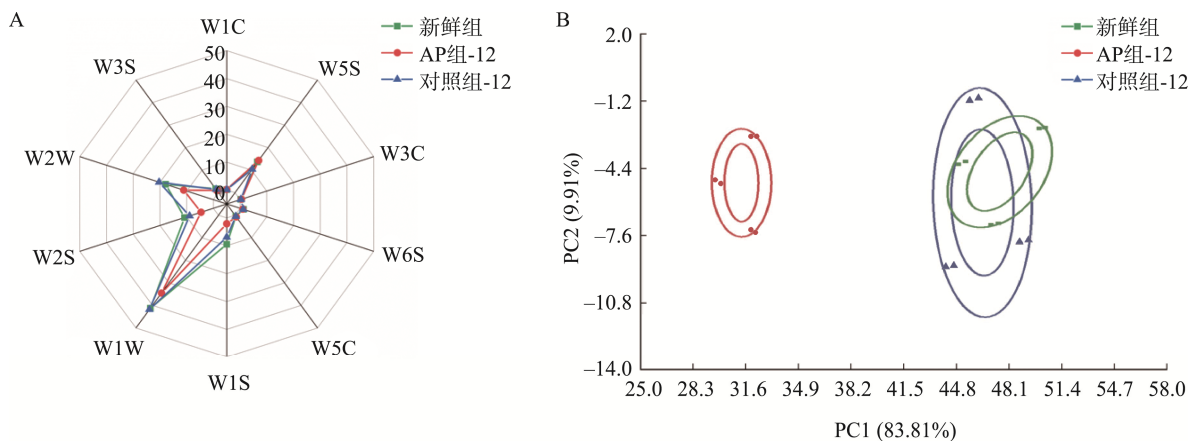


图 3 AP、对照组贮藏 12 d 和新鲜组的电子鼻雷达图(A)和 PCA 图(B)
Fig.3 Electronic-nose radar map (A) and PCA map (B) of AP, control group storage for 12 d and fresh group

基于样品在 PCA 图中的空间分布特征及传感器响应可知, 样品之间的差异主要表现在第一主成分上, 对照组-12 和新鲜组重叠分布在一起, 表明 AP 组-12 与另外二者在气味上差异最大, 对照组-12 和新鲜组二者在气味上更为接近。电子鼻传感器对粗脂肪样品有明显的应答, 响应值较大的传感器主要是 W5S、W1S、W1W、W2S、W2W; 此外, 对照组-12 和新鲜组的传感器信号强度较高, AP 组-12 中除 W5S 传感器外, 其余通道的信号强度均低于另外两组。这表明 AP 组-12 挥发性风味物质的释放量较少, 有效抑制了脂质的氧化反应; 并且 AP 组-12 可能具有更温和的风味特征(对照组-12 和新鲜组可能由于氧化导致哈喇味或者鱼腥味)。电子鼻在宏观检测数据上与 GC-MS 检测出的数据相似, 说明 AP 处理在不显著影响其他特性的情况下, 对挥发性化合物起到了很好的保护效果^[29-30]。

3 结 论

本研究利用电子舌区分滋味物质, 结合 GC-MS 和电子鼻技术, 系统分析了 AP 处理对金鲳鱼 4 °C 贮藏期间粗脂肪挥发性化合物的特征, 揭示了 AP 处理对金鲳鱼粗脂肪挥发性有机物的组成差异及风味特征。GC-MS 联用 OAV 共检测到异丁醛、丁基羟基甲苯、(Z)-3-苯基丙烯醛、乙酸桂酯和邻苯二甲酸二丁酯 5 种关键挥发性化合物, 新鲜组主要为脂类挥发性化合物, 对照组检出的苯类物质与新鲜组和 AP 处理组存在差异, 对照组中检出的挥发性化合物主要与苯类化合物相关, 说明 AP 处理能减缓脂质氧化。电子鼻雷达图显示新鲜组与对照组-12 的挥发性物质有部分重叠, 而 AP 组-12 与其他两组差异较大, 这些差异可能与 AP 处理在 4 °C 冷藏过程中脂质氧化和代谢密切相关, 在挥发性化合物检测方面与 GC-MS 结果相似。综上所述 AP 处理为金鲳鱼粗脂肪带来了特殊的挥发性化合物并减缓了 4 °C 贮藏过程中脂质氧化。本研究详细表征了 AP 处理金鲳鱼在 4 °C 贮藏过程中挥发性化合物的差异变化, 为 AP 在水产品挥发性化合物方面的应用和质量控制方面提供了理论依据。此外, 本研究的不足之处在于样本代表性不足, 未涵盖不同季节、养殖环境的样本, 可能影响结果的普适性。未来研究可结合多组学技术和动态监测以全面评估 AP 的作用机制。

参考文献

- 陈冠怡, 许陈彩, 李佳玲, 等. 亚油酸介导氧化的金鲳鱼肌原纤维蛋白结构和凝胶特性变化[J]. 现代食品科技, 2024, 40(9): 248-256.
CHEN GY, XU CC, LI JL, *et al.* Changes in the structure and gel properties of golden pomfret myofibrillar protein induced by linoleic acid-mediated oxidation [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2024, 40(9): 248-256.
- 苏梓盈, 陆旭丽, 代亚萍, 等. 响应面法优化金鲳鱼皮抗氧化肽制备工艺及其组成分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 198-207.
SU ZY, LU XL, DAI YP, *et al.* Optimization of preparation process of antioxidant peptides from golden pompano (*Trachinotus ovatus*) skin by response surface method and its composition analysis [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(23): 198-207.
- 赵腾飞, 应晓国, 张宾, 等. 大黄鱼鱼油的制备及其理化性质[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 6-10.
ZHAO TF, YING XG, ZHANG B, *et al.* Preparation and physicochemical properties of *Larimichthys crocea* fish oil [J]. *China Oils and Fats*, 2021, 46(10): 6-10.
- 潘晓倩, 张顺亮, 臧明伍, 等. 即食肉丸短期贮藏过程中脂质氧化产物与挥发性风味物质分析[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 244-251.
PAN XQ, ZHANG SL, ZANG MW, *et al.* Analysis of lipid oxidation products and volatile flavor compounds in instant meatballs during short-term storage [J]. *Food Science*, 2023, 44(12): 244-251.
- 赵燕芬, 张玉莹, 张雪迪, 等. 水产品挥发性风味化合物生成机理及其分析技术研究进展[J]. 水产科学, 2024, 43(4): 664-674.
ZHAO YF, ZHANG YY, ZHANG XD, *et al.* Research progress on formation mechanism and analysis techniques of volatile flavor compounds in fishery products [J]. *Fisheries Science*, 2024, 43(4): 664-674.
- 崔娜, 刘凯, 孙美君, 等. 水产品劣变机制及其保鲜技术研究进展[J]. 肉类研究, 2024, 38(12): 55-62.
CUI S, LIU K, SUN MJ, *et al.* Research progress on the deterioration mechanism and preservation technologies for aquatic products [J]. *Meat Research*, 2024, 38(12): 55-62.
- YING XG, LI TY, DENG SG, *et al.* Advancements in nonthermal physical field technologies for prefabricated aquatic food: A comprehensive review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science Food Safety*, 2024, 23(1): 1-34.
- 彭思维, 蒋沁芸, 张睿涵, 等. 低温等离子体预处理对贮藏期间蟹糊品质变化研究[J]. 食品科技, 2024, 49(10): 155-163.
PENG SW, JIANG QY, ZHANG RH, *et al.* Effect of atmospheric cold plasma pretreatment on the quality of crab paste during storage [J]. *Food Science and Technology*, 2024, 49(10): 155-163.
- 徐迪莎, 丁怡萱, 廖月琴, 等. 低温等离子体对蓝圆鲹在冷藏过程中的品质影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(13): 266-273.
XU DS, DING YX, LIAO YQ, *et al.* Effects of atmospheric cold plasma on the quality of *Decapterus maruadsi* in cold storage process [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(13): 266-273.
- 陈姑, 姜竹茂, 位正鹏, 等. 低温等离子体处理加速罗非鱼肌原纤维蛋白的氧化及结构改变[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 88-95.
CHEN G, JIANG ZM, WEI ZP, *et al.* Cold plasma treatment accelerated the oxidation and structural changes of myofibrillar in *Tilapia* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(4): 88-95.
- 桑晓涵, 王媛媛, 王佳媚, 等. 低温等离子体激发介质对罗非鱼片脂质氧化和酶活性影响[J/OL]. 现代食品科技, 1-9. [2025-05-03]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0364>
SANG XH, WANG YY, WANG JM, *et al.* Effects of cold plasma excitation medium on lipid oxidation and enzyme activity of tilapia fillets [J/OL]. *Modern Food Science and Technology*, 1-9. [2025-05-03]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0364>
- ZHANG JX, WU FF, KASATO Y, *et al.* Effect of atmospheric cold plasma treatment on the flavor of high-fat aquatic products: A case study

- of golden pomfret (*Trachinotus ovatus*, family Bramidae) oil using GC-MS, GC-IMS, and an E-nose [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 210: 116843.
- [13] 范霖澳, 陈婷茹, 陈继承, 等. 气相色谱-质谱法及其衍生技术在水产品风味中的应用研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(20): 1–11.
FAN LAO, CHEN TR, CHEN JC, *et al.* Progress of gas chromatography-mass spectrometry and its derivatization techniques in the flavouring of aquatic products [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(20): 1–11.
- [14] 贺子倩, 游恩卓, 吴志康, 等. 盐焗虾的工艺优化及智能感官评价[J]. *食品工业*, 2024, 45(4): 58–63.
HE ZQ, YOU ENZ, WU ZK, *et al.* Process optimization and intelligent sensory evaluation of salt-baked shrimp [J]. *The Food Industry*, 2024, 45(4): 58–63.
- [15] 刘美娇, 黎铸毅, 陈秋翰, 等. 酶解-美拉德反应制备金鲳鱼调味基料的工艺研究及风味分析[J]. *中国调味品*, 2024, 49(6): 83–90, 118.
LIU MJ, LI ZY, CHEN QH, *et al.* Study on preparation process of seasoning basic material of *Trachinotus ovatus* by enzymatic hydrolysis-maillard reaction and flavor analysis [J]. *China Condiment*, 2024, 49(6): 83–90, 118.
- [16] 刘建华, 朱荣荣, 曾倩华, 等. 基于 SPME-GC-MS 和电子鼻分析臭氧-流态冰处理对大黄鱼风味的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2023, 41(1): 154–162.
LIU JH, ZHU RR, ZENG QH, *et al.* Effects of ozone-ice slurry treatment on flavor of *pseudosciaena crocea* based on SPME-GC-MS and electronic nose analysis [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 41(1): 154–162.
- [17] 李邵宇, 阎莹莹, 应晓国, 等. 带鱼鱼油的提取及理化特性研究[J]. *浙江海洋大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(1): 20–28.
LI TY, YAN YY, YING XG, *et al.* Study on extraction and physicochemical properties of fish oil from *Trichiurus japonicus* [J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2023, 42(1): 20–28.
- [18] 赵思敏, 贝文戈, 鲍泽洋, 等. 流化冰对养殖大黄鱼保鲜效果的研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(1): 297–303.
ZHAO SM, BEI WG, BAO ZY, *et al.* Fresh-keeping effect of slurry ice on farmed *Pseudosciaena crocea* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(1): 297–303.
- [19] WANG RJ, LIU Y, WANG YC, *et al.* Characterization of the flavor profile of four major Chinese carps using HS-SPME-GC-MS combined with ultra-fast gas chromatography-electronic nose [J]. *Food Chemistry*, 2025, 463: 141264.
- [20] 秦菲, 张舒雨, 魏好程, 等. 戊糖片球菌发酵大黄鱼风味代谢途径分析[J]. *食品科学*, 2024, 45(24): 81–91.
QIN F, ZHANG SY, WEI HC, *et al.* Flavor metabolic pathways of fermented large yellow croaker with *Pediococcus pentosaceus* [J]. *Food Science*, 2024, 45(24): 81–91.
- [21] 陈戈辉, 王智慧, 鲁怡婷, 等. 不同蒸煮方式对克氏原螯虾滋味的影响[J]. *食品工业科技*, 1–18. [2025-05-03]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024100217>
CHEN GH, WANG ZH, LU YT, *et al.* The influence of different steaming and boiling methods on the taste of *Procambarus clarkii* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 1–18. [2025-05-03]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024100217>
- [22] 魏来, 王芳, 谭嘉慧, 等. 水产品腥味来源、检测及去除技术研究进展[J]. *生物技术进展*, 2024, 14(5): 745–760.
WEI L, WANG F, TAN JH, *et al.* Origins, Detection and removal technology of off-flavor compounds in aquatic products [J]. *Current Biotechnology*, 2024, 14(5): 745–760.
- [23] 赵腾飞, 贺苏, 王道飞, 等. 大黄鱼油提取工艺优化及品质分析[J]. *湖北农业科学*, 2023, 62(1): 145–151.
ZHAO TF, HE S, WANG DF, *et al.* Optimization of extraction process of large yellow croaker oil and quality analysis [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2023, 62(1): 145–151.
- [24] ISRA L, ALI MS, SALMA U, *et al.* Physical, nutritional, and sensory characterization of pangas (*Pangasianodon hypophthalmus*) fish ball incorporated with moringa leaves powder [J]. *Food Chemistry Advances*, 2024, 4: 100715.
- [25] XU KL, YI YW, DENG J, *et al.* Evaluation of the freshness of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets by the NIR, E-nose and SPME-GC-MS [J]. *RSC Advances*, 2022, 12(19): 11591–11603.
- [26] YANG BX, CHEN QH, LIU SC, *et al.* Characterization of the effect of different cooking methods on volatile compounds in fish cakes using a combination of GC-MS and GC-IMS [J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 22: 101291.
- [27] MOZZON M, FOLIGNI R, MANNOZZI C, *et al.* Assessment of lipid oxidation in fish and fish products processed by cold plasma technologies [J]. *Applied Food Research*, 2024, 4(2): 100646.
- [28] WANG F, GAO YQ, WANG HB, *et al.* Analysis of volatile compounds and flavor fingerprint in Jingyuan lamb of different ages using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. *Meat Science*, 2021, 175: 108449.
- [29] CHUTIA H, MAHANTA CL, OJAH N, *et al.* Fuzzy logic approach for optimization of blended beverage of cold plasma treated TCW and orange juice [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14(4): 1926–1938.
- [30] YANG WJ, YU J, PEI F, *et al.* Effect of hot air drying on volatile compounds of *Flammulina velutipes* detected by HS-SPME-GC-MS and electronic nose [J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 860–866.

(责任编辑: 安香玉 于梦娇)