

岳凤丽, 黄忠民, 白杨, 等. 基于电子鼻和 GC-IMS 分析香茅提取物对黄河鲤鱼脱腥效果的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 310-320. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050016

YUE Fengli, HUANG Zhongmin, BAI Yang, et al. Effects of Lemongrass Extract on the Deodorization of Yellow River Carp Based on Electronic Nose and GC-IMS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 310-320. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050016

· 分析检测 ·

基于电子鼻和 GC-IMS 分析香茅提取物 对黄河鲤鱼脱腥效果的影响

岳凤丽^{1,2}, 黄忠民^{1,2,3}, 白杨⁴, 雷萌萌^{1,2,3}, 张泉^{5,*}, 潘治利^{1,2,3,*}

(1. 河南农业大学食品科学技术学院, 河南郑州 450002;

2. 国家速冻米面制品加工技术专业研发中心, 河南郑州 450002;

3. 农业农村部大宗粮食加工重点实验室, 河南郑州 450002;

4. 思念食品(河南)有限公司, 河南郑州 450044;

5. 河南禾胜合食品有限公司, 河南新乡 453500)

摘要: 为探究香茅提取物(Lemongrass extract, LE)对黄河鲤鱼腥味作用的影响。本研究以腥值、硫代巴比妥酸(Thiobarbituric acid, TBA)值和感官评分为评价指标,对脱腥工艺进行优化,采用电子鼻及气相色谱-离子迁移谱(Gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)技术,结合正交偏最小二乘判别分析对脱腥前后挥发性成分进行分析。结果表明,在 LE 浓度为 1.5%,料液比为 1:5(g:mL),浸泡时间为 46 min 的条件下,腥值和 TBA 值最低,分别为 1.248 分和 0.264 mg MDA/kg。电子鼻分析显示,LE 处理后对含硫、醇、醛酮类致腥物质具有抑制作用。GC-IMS 共鉴定出 42 种挥发性风味物质,其中脱腥前醛类化合物含量最高,经脱腥处理后,显著降低 76.62%;利用相对气味活性值和变量投影重要性因子筛选出鲤鱼脱腥前特征化合物为戊醛、丁醛、庚醛、丙醛、1-己醛-M、1-己醛-D,经脱腥处理后特征香气化合物主要有丙酮和乙酸乙酯,可为鱼体带来令人愉悦的果味和花香。综上,香茅提取物可有效降低黄河鲤鱼的特征性腥味,改善其整体风味品质,为今后在水产品加工中的产业化应用提供一定理论基础。

关键词: 黄河鲤鱼, 香茅提取物, 脱腥, 电子鼻, 气相色谱-离子迁移谱, 正交偏最小二乘判别分析

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2026)09-0310-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050016



本文网刊:

Effects of Lemongrass Extract on the Deodorization of Yellow River Carp Based on Electronic Nose and GC-IMS

YUE Fengli^{1,2}, HUANG Zhongmin^{1,2,3}, BAI Yang⁴, LEI Mengmeng^{1,2,3}, ZHANG Xiao^{5,*}, PAN Zhili^{1,2,3,*}

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. National R & D Center of Quick-frozen Rice and Noodle Products Processing Technology, Zhengzhou 450002, China;

3. Key Laboratory of Bulk Grain Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhengzhou 450002, China;

4. Synear Food (Henan) Co., Ltd., Zhengzhou 450044, China;

5. Henan Heshenghe Food Co., Ltd., Xinxiang 453500, China)

Abstract: To investigate the influence of lemongrass extract on the fishy odor of Yellow River carp, this study focused on the fishy smell value and thiobarbituric acid (TBA) and sensory score as evaluation indicators to optimize the deodorization

收稿日期: 2025-05-08

基金项目: 河南省重大科技专项(231100110400)。

作者简介: 岳凤丽(2001-),女,硕士研究生,研究方向:速冻食品,E-mail:yuefl0604@163.com。

* 通信作者: 张泉(1975-),男,本科,高级经济师,研究方向:预制菜,E-mail:676702253@qq.com。

潘治利(1979-),男,博士,教授,研究方向:食品科学,E-mail:zl_pan@126.com。

process. Using the electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) technology, combined with orthogonal partial least squares discriminant analysis, the volatile components before and after deodorization were analyzed. The results showed that under the conditions of LE concentration of 1.5%, material-liquid ratio of 1:5 (g:mL), and soaking time of 46 min, the fishy degree value and TBA value were the lowest, which were 1.248 points and 0.264 mg MDA/kg respectively. Electronic nose analysis showed that LE treatment had an inhibitory effect on fishy substances containing sulfur, alcohol, aldehydes and ketones. A total of 42 volatile flavor substances were identified by GC-IMS. Among them, the content of aldehyde compounds was the highest before deodorization, and it was significantly reduced by 76.62% after deodorization treatment. By using the relative odor activity value and the variable projection importance factor, the characteristic compounds of carp before deodorization were screened out as valeraldehyde, butyraldehyde, heptanaldehyde, propionaldehyde, 1-hexaldehyde-M, and 1-hexaldehyde-D. After deodorization treatment, the main characteristic aroma compounds were acetone and ethyl acetate, which could bring pleasant fruity and floral flavors to the fish body. In conclusion, lemongrass extract can effectively reduce the characteristic fishy smell of Yellow River carp and improve its overall flavor quality, providing a certain theoretical basis for its industrial application in aquatic product processing in the future.

Key words: Yellow River carp; lemongrass extract; remove fishy smell; electronic nose; gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS); orthogonal partial least squares discriminant analysis

黄河鲤鱼是黄河流域特有的淡水经济鱼类,生物学特性及食用价值展现出鲜明的地域特色,其蛋白质含量范围在 11.8%~18%,脂肪含量介于 6.8%~12.4%,且主要由不饱和脂肪酸构成^[1]。然而,淡水鱼相较于海鱼往往具有更为明显的鱼腥味和土腥味,这一特性严重制约了其产业发展的深度拓展及市场接受度的提升。因此,腥味物质的控制与去除仍是水产品加工领域需要重点突破的技术方向之一。目前脱腥技术主要分为物理、化学和生物三大类^[2],随着健康消费理念的普及,富含生物活性成分的天然物质在食品加工领域的应用日益受到市场关注和消费者认可。熊华兴等^[3]发现,蓝莓花青素对罗非鱼鱼皮进行处理能够显著降低其特征性醛类物质的含量。王源渊等^[4]采用迷迭香提取物对鲑鱼进行脱腥,发现鱼肉腥味明显减弱,风味得到改善。香茅,俗称柠檬草,富含多种生物活性成分,其含有的柠檬醛和香叶醇等特征性化合物表现出显著的抗菌、抗氧化及保鲜功能^[5],是一种安全高效的新型天然去腥物质。目前,香茅提取物用于鲤鱼脱腥的报道较少。

气相色谱-离子迁移谱(Gas chromatography-ion migration spectrometry, GC-IMS)技术能高效地对复杂样品进行挥发性有机物的分离并实现高灵敏度的检测^[6]。它能提供准确的定性分析,同时建立高分辨率的非靶标挥发性指纹图谱。近年来,GC-IMS 技术已广泛应用于水产品的风味分析,包括罗非鱼^[7]、鲈鱼^[8]、黑鱼^[9]等。因此,本研究以香茅提取物为原料制作脱腥液用于黄河鲤鱼脱腥,通过对感官评分、腥程度值及 TBA 值的测定确定最佳工艺参数,同时,采用电子鼻及气相色谱-离子迁移谱技术,对处理前后样品中的挥发性风味成分进行分析。为进一步评估这些成分的变化,结合正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)与相对气味活性值(ROAV),确定影响黄河鲤鱼特征风味的关键化合物。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

黄河鲤鱼(重约 1~1.25 kg) 郑州盒马鲜生;香茅提取物(20 kg 香茅全草浓缩萃取成 1 kg 提取物) 陕西海益生物科技有限公司;1,1,3,3-四乙氧基丙烷、三氯乙酸、硫代巴比妥酸、乙二胺四乙酸二钠 国药集团化学试剂有限公司。

DZKW 型电热恒温水浴锅 北京市永光明医疗仪器有限公司;TU-1810 紫外分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司;PEN-3 电子鼻 德国 AIRSENSE 公司;FlavourSpec®风味分析仪 德国 G.A.S 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品预处理 新鲜鲤鱼去除头部、内脏及鳞片,充分清洗后将鱼肉分割成规格一致的小块(20 g 左右)。

1.2.2 单因素实验

1.2.2.1 LE 浓度对脱腥效果的影响 准确称取鲤鱼肉 20 g,设定浸泡时间为 45 min,料液比为 1:5 (g/mL),分别添加不同浓度(0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%)的 LE 脱腥液,以腥程度值、感官评分和 TBA 值为评价指标,探究 LE 浓度对鲤鱼脱腥效果的影响。

1.2.2.2 浸泡时间对脱腥效果的影响 准确称取鲤鱼肉 20 g,设定 LE 浓度为 1.5%,料液比为 1:5 (g/mL),分别在不同浸泡时间(15、30、45、60、75 min)下进行处理,以腥程度值、感官评分和 TBA 值为评价指标,探究浸泡时间对鲤鱼脱腥效果的影响。

1.2.2.3 料液比对脱腥效果的影响 准确称取鲤鱼肉 20 g,设定 LE 浓度为 1.5%,浸泡时间为 45 min,分别在不同料液比(1:1、1:3、1:5、1:7、1:9 (g:mL))下进行处理,以腥程度值、感官评分和 TBA 值为评价指标,探究料液比对鲤鱼脱腥效果的影响。

1.2.3 响应面试验 将 LE 浓度(A)、浸泡时间(B)和料液比(C)作为自变量,设定腥度和 TBA 值为响应指标,构建三因素三水平试验方案,因素和水平见表 1。

表 1 Box-Behnken 试验因素与水平
Table 1 Factor and level of Box-Behnken test

水平	因素		
	LE浓度(%)	浸泡时间(min)	料液比(g:mL)
-1	1	30	1:3
0	1.5	45	1:5
1	2	60	1:7

1.2.4 腥度的测定 根据鲍佳丽等^[10]的方法并稍作修改。采用六分制感官评价体系,由 10 名经过培训的食品专业研究生对鲤鱼样品脱腥处理前后的腥强度进行量化评估。具体标准见表 2。

表 2 腥值评分标准
Table 2 Scoring criteria for fishiness value

程度	无	微弱	弱	一般	较重	重	很重
分值(分)	0	1	2	3	4	5	6

1.2.5 感官评分 根据张海燕等^[11]的方法并稍作修改。将处理后的鱼肉蒸制 3 min 后,由 10 名经专业培训的感官评定员从气味、滋味、质地和色泽四个维度进行评分,具体评分标准见表 3。

表 3 感官评分标准
Table 3 Sensory evaluation criteria

指标	权重(%)	标准	评分(分)
气味	40	鱼香味不明显,鱼腥味较浓	0~60
		鱼香较弱,稍伴有鱼腥味	61~80
		鱼肉浓郁,有鱼肉固有鲜香味	81~100
滋味	30	无明显鱼鲜味,鱼腥味明显	0~60
		鱼鲜味清淡,稍伴有鱼腥味	61~80
		正常鱼鲜味,无异味,无腥味	81~100
质地	20	质地不均匀,鱼肉粗糙	0~60
		质地较均匀,形态较完整,鱼肉稍粗糙	61~80
		质地均匀,形态完整,鱼肉较嫩	81~100
色泽	10	颜色暗淡不均匀	0~60
		色泽较暗淡,鱼肉偏黄	61~80
		色泽光亮,鱼肉嫩白	81~100

1.2.6 TBA 值的测定 参考 GB 5009.181-2016《食品中丙二醛的测定》进行测定。

1.2.7 电子鼻测试 根据 Yin 等^[12]的方法并加以修改。准确称取 5 g 鱼肉样品并转移至 50 mL 离心管中,密封后在室温条件下平衡 30 min,随后使用电子鼻系统进行检测,设定参数如下:采样间隔为 1 s,传感器清洗时间为 100 s,进样时间为 5 s,载气流速设为 400 mL/min,检测时间为 80 s。每组样品测试三次,选取 69~71 s 数据为结果进行后续汇总与分析。电子鼻传感器敏感物质见表 4。

1.2.8 GC-IMS 分析 参考 Kang 等^[13]的方法并稍

表 4 电子鼻传感器敏感物质

Table 4 Electronic nose sensor corresponding sensitive substances

编号	代码	敏感物质
1	W1C	芳烃化合物
2	W3C	氨,芳香分子
3	W5C	烯烃、芳族,极性分子
4	W1S	烷类
5	W2S	醇、醛、酮、醚等物质
6	W3S	烷类和脂肪族
7	W5S	氮化合物
8	W6S	氢化物
9	W1W	硫化物
10	W2W	芳烃化合物,硫的有机化合物

作修改,将 2 g 切碎的鱼肉转移至 20 mL 样品瓶中,在自动进样器单元中以 500 r/min 的转速在 60 °C 下孵育 15 min,将从顶空获得的 500 μL 气体样品注入气相色谱进样器。

1.2.8.1 GC 条件 气相色谱设置:DB-WAX 石英毛细管柱(15 m×0.53 mm×1 μm);N₂ 作为载气;色谱柱温度为 60 °C;流速程序:起始流速为 2 mL/min,2 min 时增至 5 mL/min,10 min 时达 10 mL/min,20 min 时为 100 mL/min,并在 25 min 时最终达到 150 mL/min。

1.2.8.2 IMS 条件 漂移管温度为 45 °C,使用高纯氮气为漂移气体,漂移流速为 150 mL/min,所有测试均采用一式三份进行。

1.2.8.3 定性定量分析 利用 FlavourSpec®风味分析仪进行物质图谱分析,使用 GC×IMS Library Search 软件内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库定性,采用峰面积归一化法进行定量。

1.2.9 相对气味活性值 参考 Li 等^[14]提出的 ROAV 评价方法确定黄河鲤鱼中挥发性有机化合物(VOCs)对其整体风味的贡献水平。计算方法为:以对样品整体风味贡献度最高的 VOCs 组分作为参照物质(ROAV_{stan}=100),其余组分的相对贡献值按下式进行计算:

$$ROAV_i = 100 \times \frac{C_i}{T_i} \times \frac{T_{stan}}{C_{stan}}$$

式中: C_i 为目标挥发性化合物的相对含量(%), T_i 为该化合物的感官阈值(μg/kg), C_{stan} 和 T_{stan} 分别表示具有最高气味活性值的化合物的相对百分比含量(%)和相应的气味阈值(μg/kg)。

1.3 数据处理

实验重复 3 次,数据以平均值±标准差表示。分别运用 Microsoft Excel 进行数据整理和分析,Origin 2022 绘图,SPSS 27.0 进行统计分析,Design Expert 8.0.6 处理响应面数据,SIMCA 14.1 执行 OPLS-DA 和 VIP 值计算。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 LE 浓度对脱腥效果的影响 TBA 值是利用脂肪酸在氧化过程中产生的丙二醛(MDA)与硫代巴比妥酸发生特异性反应来量化的,从而确定脂质氧化的次生产物的形成^[15]。鱼体内的脂肪容易发生氧化分解,产生带有腥味的醛、酮类挥发性物质。TBA 值越高,脂质氧化程度越高。由图 1 可知,腥程度随着脱腥液浓度的增大而呈现逐渐降低的趋势,感官评分呈现先升后降的变化趋势,TBA 值则先下降随后趋于平稳。当浓度为 1.5% 时,鱼肉的感官评分最高,TBA 值最低。这可能是因为随着脱腥液浓度的增高,其有效成分增加,香茅中的特征性活性成分如柠檬醛、柠檬烯等萜类化合物,能够有效控制微生物的生长,进而延缓食品腐败和变质,同时具有清除自由基的能力^[5],可以有效抑制腥味物质的生成,然而,当脱腥液浓度超出适宜范围时,鱼体会残留明显的香茅特征性气味,致使鱼体本身的固有风味受到显著影响,感官评分降低。因此,选择 1%~2% 作为脱腥工艺优化的关键参数区间。

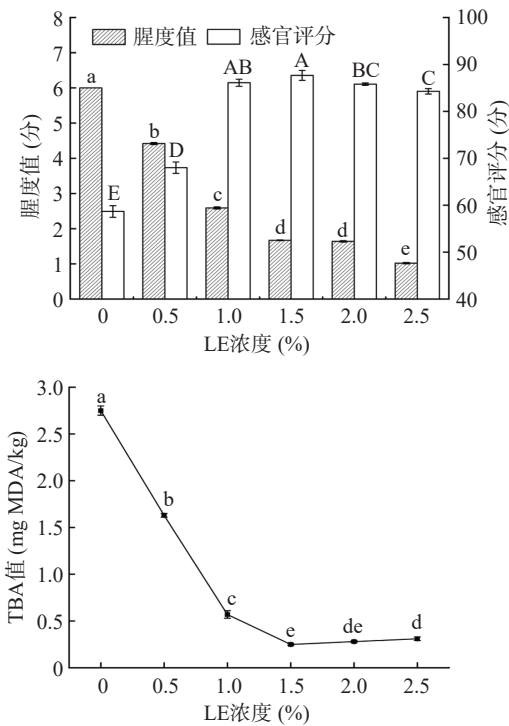


图 1 LE 浓度对鲤鱼感官评分、腥程度和 TBA 值的影响
Fig.1 Effect of LE concentration on sensory score, fishiness degree and TBA values in carp

注: 不同字母表示差异显著($P < 0.05$), 图 2~图 3 同。

2.1.2 浸泡时间对脱腥效果的影响 由图 2 可知,随着处理时间的增加,鲤鱼肉的腥程度呈现出下降的趋势,感官评分呈现先升后降的变化规律,TBA 值则表现为先降低后平稳的特征,当处理时间为 45 min 时,样品达到最佳品质状态,此时感官评分最高且 TBA 值最低。这可能与蛋白质溶出效应有关:过长的浸泡时间会导致水溶性蛋白流失,引起肌肉组织结

构松散和表面黏度增加^[16];同时,香茅特征性成分的过度渗透会掩盖鱼体本身的鲜味特征,并对质地产生负面影响。因此,选择 30~60 min 作为脱腥工艺优化的关键参数区间。

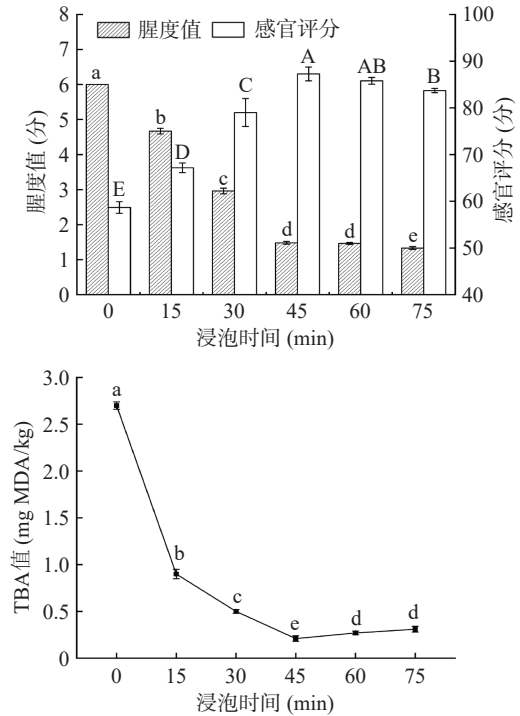


图 2 浸泡时间对鲤鱼感官评分、腥程度和 TBA 值的影响
Fig.2 Effect of soaking time on sensory scores, fishiness degree and TBA values in carp

2.1.3 料液比对脱腥效果的影响 由图 3 可知,随着料液比的提升,鱼肉的腥程度呈递减趋势,感官评

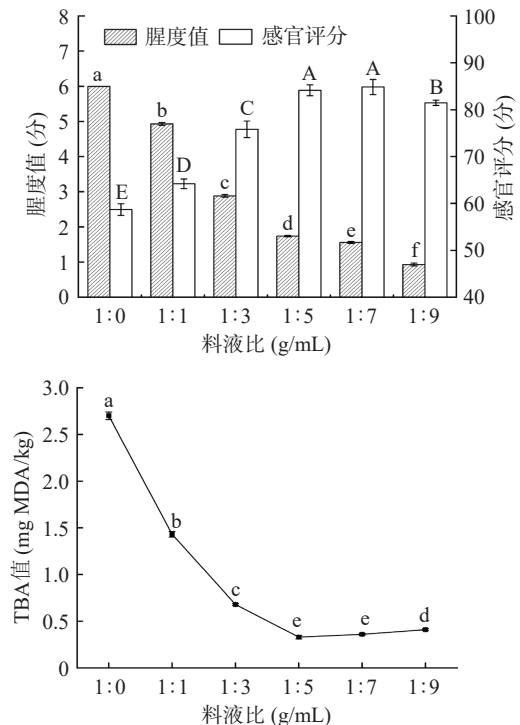


图 3 料液比对鲤鱼感官评分、腥程度和 TBA 值的影响
Fig.3 Effect of solid-liquid ratio on sensory scores, fishiness degree and TBA values in carp

分呈现先升高后降低的变化特征, TBA 值则表现为初期显著下降($P<0.05$)随后趋于平缓。当料液比达 1:5(g:mL)时, 样品获得最优品质, 此时感官评分最高且 TBA 值最低。这可归因于溶剂用量的增加促进了活性成分与鱼体的充分接触, 从而增强了脱腥效果。然而, 过高的溶剂比例会导致香茅特征性成分过度渗透, 不仅影响鱼体原有风味特征, 其色素成分的溶出还会改变产品外观品质, 最终导致感官接受度下降。因此, 选择 1:3~1:7(g:mL)作为脱腥工艺优化的关键参数区间。

2.2 响应面优化结果

2.2.1 试验结果与回归模型方差分析 为了进一步优化脱腥条件, 基于前期单因素实验的结果, 采用 Box-Behnken 设计方案进行响应面优化, 试验结果见表 5。

表 5 响应面优化设计及其结果

Table 5 Design and results of response surface experiment

试验号	因素			腥值 (分)	TBA 值 (mg MDA/kg)
	脱腥液浓度 (%)	浸泡时间 (min)	料液比 (g:mL)		
1	1	30	1:5	3.55	0.57
2	2	30	1:5	3.61	0.55
3	1	60	1:5	3.36	0.49
4	2	60	1:5	3.51	0.51
5	1	45	1:3	2.77	0.52
6	2	45	1:3	2.92	0.51
7	1	45	1:7	3.02	0.49
8	2	45	1:7	2.98	0.47
9	1.5	30	1:3	3.37	0.52
10	1.5	60	1:3	3.23	0.50
11	1.5	30	1:7	3.31	0.55
12	1.5	60	1:7	3.22	0.51
13	1.5	45	1:5	1.21	0.25
14	1.5	45	1:5	1.27	0.26
15	1.5	45	1:5	1.25	0.28
16	1.5	45	1:5	1.29	0.29
17	1.5	45	1:5	1.23	0.26

运用 Design-Expert 8.0.6 软件对表 5 中的试验数据进行多变量回归分析, 通过方差分析得出脱腥液浓度(A)、浸泡时间(B)和料液比(C)与腥值(Y_1)、TBA 值(Y_2)的二次回归方程: $Y_1=1.25+0.0400A-0.0650B+0.0300C+0.0225AB-0.0475AC+0.0125BC+0.9487A^2+1.31B^2+0.7238C^2$; $Y_2=0.2680-0.0038A-0.0225B-0.0038C+0.0100AB-0.0025AC-0.0050BC+0.1198A^2+0.1423B^2+0.1098C^2$ 。

由表 6、表 7 可知, 所建立的回归模型达到极显著水平($P<0.01$), 且失拟项不显著($P>0.05$), 表明该模型具有良好的预测精度和可靠性。二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 的 $P<0.0001$, 表明三因素均对鲤鱼脱腥效果具有显著影响。腥值回归模型中决定系数 R^2 达到 0.9984, 逼近于 1, 表明该回归模型具有极强的数

表 6 腥值回归模型方差分析

Table 6 Analysis of variance for the regression model of fishiness value

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	14.70	9	1.63	481.53	<0.0001	**
A-脱腥液浓度	0.0128	1	0.0128	3.77	0.0932	
B-浸泡时间	0.0338	1	0.0338	9.96	0.0160	*
C-料液比	0.0072	1	0.0072	2.12	0.1885	
AB	0.0020	1	0.0020	0.5968	0.4651	
AC	0.0090	1	0.0090	2.66	0.1469	
BC	0.0006	1	0.0006	0.1842	0.6807	
A^2	3.79	1	3.79	1117.05	<0.0001	**
B^2	7.21	1	7.21	2125.61	<0.0001	**
C^2	2.21	1	2.21	650.05	<0.0001	**
残差	0.0238	7	0.0034			
失拟项	0.0197	3	0.0066	6.58	0.0501	
纯误差	0.0040	4	0.0010			
总和	14.73	16				

注: *差异显著, $P<0.05$; **差异极显著, $P<0.01$, 表7同。

表 7 TBA 值回归模型方差分析

Table 7 TBA value regression model analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.2238	9	0.0249	55.17	<0.0001	**
A-脱腥液浓度	0.0001	1	0.0001	0.2496	0.6327	
B-浸泡时间	0.0040	1	0.0040	8.99	0.0200	*
C-料液比	0.0001	1	0.0001	0.2496	0.6327	
AB	0.0004	1	0.0004	0.8875	0.3775	
AC	0.0000	1	0.0000	0.0555	0.8206	
BC	0.0001	1	0.0001	0.2219	0.6519	
A^2	0.0604	1	0.0604	133.96	<0.0001	**
B^2	0.0852	1	0.0852	189.03	<0.0001	**
C^2	0.0507	1	0.0507	112.52	<0.0001	**
残差	0.0032	7	0.0005			
失拟项	0.0021	3	0.0007	2.56	0.1928	
纯误差	0.0011	4	0.0003			
总和	0.2270	16				

据拟合能力, 可准确表征自变量与响应值之间的映射关系。经校正后的 R^2_{adj} 值为 0.9963, 意味着该模型能有效捕捉鲤鱼腥值 99.63% 的变异特征, 仅存在 0.37% 的变异未被解释。TBA 值回归模型中决定系数 R^2 为 0.9861, 接近 1, 说明该方程可以很好拟合, 校正决定系数 R^2_{adj} 为 0.9682, 说明此模型能够解释鲤鱼 TBA 值中 96.82% 的变化。因此, 利用此模型可以较为准确地预测不同处理条件下鲤鱼腥值和 TBA 值的变化趋势, 为优化脱腥工艺条件提供了坚实的理论基础。

2.2.2 验证实验 通过响应面优化分析, 确定了鲤鱼脱腥工艺的最优条件: LE 浓度 1.498%、浸泡时间 45.743 min、料液比 1:5(g:mL)。在此条件下, 预测的腥值和 TBA 值最低, 分别为 1.250 分和 0.267 mg MDA/kg。为了兼顾实验操作的可行性和实际应用中的便利性, 对工艺参数进行了适当修正, 将 LE 浓

度调整为 1.5%, 浸泡时间调整为 46 min, 料液比保持为 1:5(g:mL)。在修正后的条件下, 验证实验的腥程度值为 1.248 ± 0.01 分, TBA 值为 0.264 ± 0.01 mg MDA/kg, 与模型预测结果高度一致, 进一步证明了优化模型的可靠性与实用性。

2.3 黄河鲤鱼脱腥前后电子鼻结果分析

将鲤鱼样品分为两组, 即脱腥前和脱腥后, 利用主成分分析法(PCA)对电子鼻系统中 10 个传感器采集的多维响应数据进行降维处理, 以提取主要特征信息。电子鼻系统包含交叉敏感传感器阵列和模式识别算法两大核心部分, 可用于定性区分气体分子及其响应特征^[17-18]。由图 4(a)可知, 电子鼻的 10 种传感器对脱腥前后鱼肉的风味均有响应值, 其中响应值变化较为明显的传感器为 W1S、W2S、W1W、W3S, 在去腥前样品中, 烷烃类、醇类、醛类、酮类、醚类、芳香族化合物、含硫化合物及脂肪族化合物是主要的气味化合物, 经 LE 处理后, W3S 和 W1W 仍具有较高的响应值, 但与未处理组相比均呈现显著降低 ($P < 0.05$), 表明其对含硫、醇、醛酮类致腥物质具有抑制作用。由图 4(b)可知, 第一主成分 PC1 和第二主成分 PC2 的累积贡献率达 93.9%, 能够充分表征原始高维矩阵数据的特征信息, 说明该技术可有效鉴别脱腥处理前后鱼样在气味特征上的差异性^[19]。为深入探究脱腥处理对鱼肉风味特征的影响机制, 采用 GC-IMS 对挥发性风味物质开展更细致、全面的分析与鉴定。

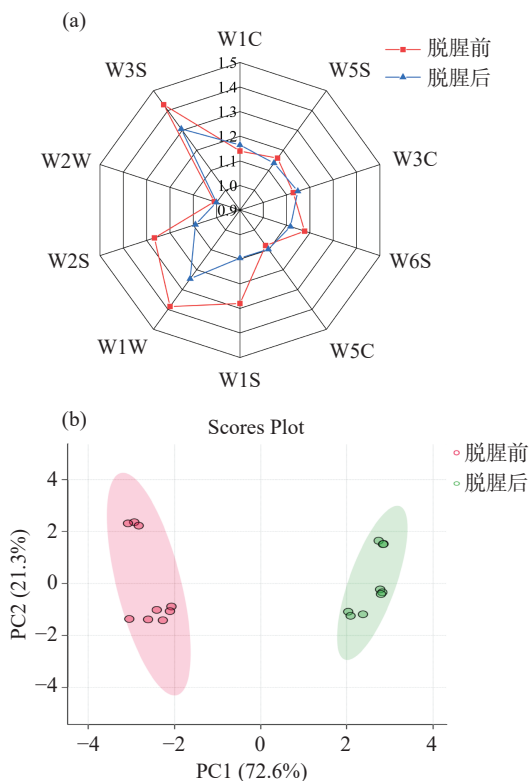


图 4 黄河鲤鱼脱腥前后风味化合物的雷达图(a)和 PCA 图(b)
Fig.4 Radar (a) and PCA (b) maps of flavor compounds of Yellow River carp before and after deodorization

2.4 黄河鲤鱼脱腥前后的挥发性风味物质 GC-IMS 结果分析

2.4.1 黄河鲤鱼脱腥前后挥发性风味物质图谱分析

采用 HS-GC-IMS 法分析脱腥前后鱼肉样品中挥发性有机化合物(VOCs)的差异与变化情况, 结果以图 5 中的三维和二维图谱表示。三维图谱(图 5a)中红色豎形峰表示反应离子峰, 两侧的点代表挥发性风味物质, 其中白色点表示响应信号较弱, 红色点表示响应信号较强, 颜色越深响应信号越大^[20]。对三维光谱进行投影, 得到自上而下的二维光谱图(图 5b), 可以更好地阐明脱腥前后鱼肉样品中挥发性有机物的差异强度^[21]。为有效地对比脱腥前后鱼肉中挥发性化合物差异, 以脱腥前样品作为参比, 对脱腥后样品的图谱进行扣减, 得到差异对比图(图 5c)。扣除后的白色区域表明 VOCs 含量相同, 红色和蓝色的区域则表明该挥发性物质的含量分别高于和低于基准参照。从图 5 可以看出, 大部分 VOCs 的保留时间集中在 200~1200 s 之间, 漂移时间在 1.00~2.00 ms 之间。结果表明, 脱腥前后鱼肉的出峰位置、峰数量大致相同, 但峰强度表现出一定的变化, 表明脱腥前

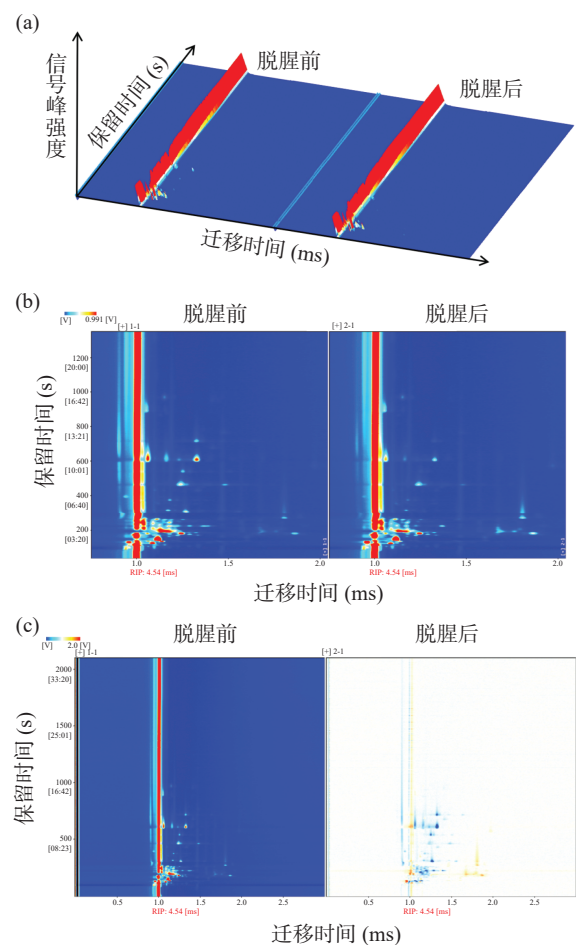


图 5 黄河鲤鱼脱腥前后挥发性物质三维谱图(a)、二维谱图(b)和差异对比图(c)

Fig.5 3D spectrum (a), 2D spectrum (b) and difference comparison (c) of volatile components in Yellow River carp before and after deodorization

后鱼肉中所含 VOCs 存在差异,这和电子鼻的结果一致。

2.4.2 黄河鲤鱼脱腥前后挥发性风味物质指纹图谱分析 为了系统且直观地评估脱腥处理前后鲤鱼肉中挥发性有机化合物组成的差异,通过软件内置 Gallery Plot 插件生成指纹图谱,如图 6 所示,共检测出 42 种 VOCs,矩阵中每个纵向维度对应特定挥发性风味组分在全部受检样本中的响应强度分布,横向维度代表着单一样本内所有挥发性成分的特征信号谱图信息,颜色从蓝到红代表信号强度由弱到强,同时体现挥发性风味物质含量由低至高的变化趋势^[22]。从图中可以明确看出,黄河鲤鱼脱腥前后表现出独特的挥发性成分特征分布,在区域 A 中,两组样品的挥发性风味物质含量表现出相似性,区域 B 在脱腥前样品中呈现高信号强度,主要富集醛类化合物,包括戊醛、庚醛、丁醛及 1-己醛-M,这些物质通常与鱼腥味特征密切相关,经脱腥处理后,该区域信号强度显著降低,表明脱腥工艺有效减少了腥味相关醛类的含量,区域 C 突出显示了脱腥后样本的主要挥发性化

合物,主要包括 2-丁酮-D、2-戊酮-D、庚酸乙酯和乙酸乙酯等酯类与酮类衍生物,与脱腥前相比,该区域的亮度增加,说明这些化合物的浓度明显提升。

2.4.3 黄河鲤鱼脱腥前后挥发性化合物相对含量变化分析 如表 8 所示,对脱腥处理前后的鲤鱼样品进行分析,共识别出 42 种挥发性成分,按类别划分为醛类(6 种)、醇类(11 种)、酮类(13 种)、酯类(4 种)以及其他类别(8 种)。采用峰面积归一化法计算各化合物的相对含量,结果如图 7 所示,脱腥前鲤鱼样品中醛类含量占比最高(36.14%),其次是酮类(27.90%)、醇类(19.79%)和酯类(4.52%),脱腥后鲤鱼样品中酮类含量占比最高(41.68%),其次是醇类(21.56%)、酯类(12.64%)和醛类(8.45%),其中醛类含量显著降低 76.62%。

醛类物质的产生主要源于两个方面,一方面是脂质发生氧化反应,另一方面是美拉德反应所诱导的氨基酸降解过程^[23],通常阈值较低,气味浓郁,主要呈现出鱼腥味、脂肪味等,是水产品重要的香气来源。鲤鱼脱腥前醛类物质的含量占比高达 36.14%,庚

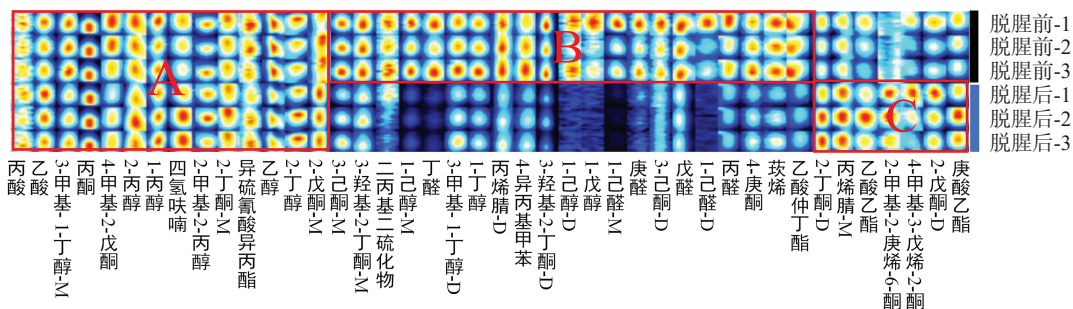


图 6 黄河鲤鱼脱腥前后挥发性成分指纹图谱

Fig.6 Fingerprint of volatile components of Yellow River carp before and after deodorization

表 8 黄河鲤鱼脱腥前后挥发性风味成分及相对含量

Table 8 Volatile flavor components and relative contents of Yellow River carp before and after deodorization

类别	化合物	CAS号	保留指数	保留时间(s)	迁移时间(ms)	相对含量(%)	
						脱腥前	脱腥后
醛类	庚醛	111-71-7	1180.9	430.388	1.33565	5.31±0.07 ^a	2.00±0.06 ^b
	丁醛	123-72-8	905.7	175.657	1.28978	6.36±0.02 ^a	0.69±0.04 ^b
	戊醛	110-62-3	983.9	225.623	1.18894	10.54±0.20 ^a	2.02±0.04 ^b
	丙醛	123-38-6	826.2	136.195	1.14165	4.50±0.18 ^a	1.81±0.10 ^b
	1-己醛-D	66-25-1	1078.4	308.001	1.55851	3.78±0.04 ^a	1.34±0.10 ^b
	1-己醛-M	66-25-1	1077.9	307.468	1.26754	5.65±0.13 ^a	0.60±0.01 ^b
醇类	1-己醇-M	111-27-3	1349.2	717.516	1.32894	2.46±0.02 ^a	1.84±0.03 ^b
	1-己醇-D	111-27-3	1349.2	717.516	1.63298	2.85±0.07 ^a	1.84±0.09 ^b
	1-戊醇	71-41-0	1257.4	540.213	1.2534	1.39±0.06 ^a	0.93±0.05 ^b
	3-甲基-1-丁醇-M	123-51-3	1207.8	466.253	1.24047	2.08±0.06 ^b	2.75±0.02 ^a
	3-甲基-1-丁醇-D	123-51-3	1205.8	463.503	1.48328	1.36±0.10 ^a	1.21±0.02 ^b
	1-丁醇	71-36-3	1138.5	374.79	1.18252	1.31±0.05 ^a	0.77±0.05 ^b
	1-丙醇	71-23-8	1031.2	263.554	1.11173	1.94±0.03 ^b	2.93±0.09 ^a
	乙醇	64-17-5	931.2	190.611	1.12023	2.18±0.08 ^b	3.07±0.08 ^a
	2-甲基-2-丙醇	75-65-0	924	186.232	1.32505	0.55±0.03 ^b	0.85±0.03 ^a
	2-丙醇	67-63-0	958.9	208.254	1.09053	2.58±0.19 ^a	2.51±0.04 ^a
	2-丁醇	78-92-2	1028.6	261.376	1.15525	1.11±0.03 ^b	2.85±0.05 ^a

续表 8

类别	化合物	CAS号	保留指数	保留时间(s)	迁移时间(ms)	相对含量(%)	
						脱腥前	脱腥后
酮类	3-羟基-2-丁酮-M	513-86-0	1300.7	615.189	1.06145	2.47±0.04 ^a	2.46±0.02 ^a
	3-羟基-2-丁酮-D	513-86-0	1297.7	609.397	1.32894	2.00±0.05 ^a	1.92±0.10 ^b
	2-甲基-2-庚烯-6-酮	110-93-0	1335	685.906	1.17614	0.49±0.01 ^b	2.63±0.03 ^a
	3-己酮-M	589-38-8	1086.1	315.896	1.17448	1.44±0.05 ^b	1.56±0.04 ^a
	4-甲基-3-戊烯-2-酮	141-79-7	1120.9	353.928	1.11793	0.35±0.04 ^b	1.89±0.03 ^a
	3-己酮-D	589-38-8	1085.3	315.042	1.47445	1.06±0.03 ^a	0.56±0.02 ^b
	4-甲基-2-戊酮	108-10-1	1008.3	244.46	1.18126	1.76±0.14 ^b	1.99±0.03 ^a
	2-戊酮-D	107-87-9	982.2	224.401	1.3716	0.76±0.03 ^b	2.47±0.10 ^a
	2-丁酮-D	78-93-3	914.8	180.841	1.24256	1.10±0.02 ^b	3.31±0.04 ^a
	2-丁酮-M	78-93-3	912	179.213	1.05991	1.63±0.03 ^b	2.41±0.03 ^a
	2-戊酮-M	107-87-9	984	225.684	1.12263	2.28±0.04 ^b	3.20±0.08 ^a
	酯类	丙酮	67-64-1	853.1	148.469	1.11675	11.15±0.23 ^b
4-庚酮		123-19-3	1138.4	374.663	1.22047	1.40±0.03 ^a	1.44±0.01 ^a
庚酸乙酯		106-30-9	1331.3	677.937	1.41367	0.63±0.04 ^b	3.61±0.07 ^a
乙酸乙酯		141-78-6	897.8	171.302	1.33563	0.97±0.04 ^b	5.60±0.05 ^a
异硫氰酸异丙酯		2253-73-8	1183.5	433.797	1.09889	1.05±0.02 ^b	2.01±0.05 ^a
乙酸仲丁酯		105-46-4	979.9	222.72	1.22106	1.87±0.05 ^a	1.42±0.10 ^b
丙酸		79-09-4	1541	1317.959	1.09855	1.73±0.03 ^b	2.54±0.03 ^a
乙酸		64-19-7	1444.7	971.162	1.1534	1.26±0.01 ^b	2.51±0.04 ^a
二丙基二硫化物		629-19-6	1369.7	765.783	1.47348	1.21±0.03 ^b	1.33±0.01 ^a
其他		4-异丙基甲苯	99-87-6	1299.2	612.293	1.16113	2.44±0.07 ^a
	丙烯腈-D	107-13-1	1002.1	239.464	1.09175	2.48±0.03 ^a	1.34±0.05 ^b
	四氢呋喃	109-99-9	895.1	169.791	1.2256	0.50±0.06 ^b	2.04±0.02 ^a
	茨烯	79-92-5	1085.6	315.401	1.21242	1.36±0.03 ^a	0.77±0.02 ^b
	丙烯腈-M	107-13-1	1009.2	245.116	1.03544	0.67±0.02 ^b	3.73±0.06 ^a

注:“M”代表单倍体,“D”代表二聚体;不同小写字母用于标记组间存在显著性差异($P<0.05$)。

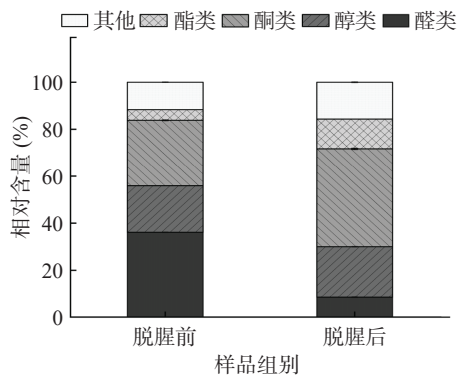


图 7 黄河鲤鱼脱腥前后挥发性风味成分相对含量

Fig.7 Relative contents of volatile flavor substances in Yellow River carp before and after deodorization

醛、丁醛、戊醛、丙醛、己醛均被检出。庚醛是油酸氧化的特征产物,呈现典型的鱼腥味和脂肪味,己醛作为亚油酸在热降解作用下的产物,散发着浓郁且强烈的青草味^[24],在鱼肉的风味构成方面发挥着重要作用,丁醛作为一种具有刺激性气味的挥发性物质,不仅会直接引起感官不适,还能与鱼体中的其他风味成分产生协同作用,共同形成特征性的鱼腥气味。经 LE 处理后,醛类物质相对含量下降为 8.45%,这可能是因为在 LE 中含有的柠檬醛、香叶醇、香茅醇等活性成分具有较强的抗氧化性,减缓了多不饱和脂肪酸的

氧化,进而减少了醛类物质的产生。这与吴燕燕等^[5]的研究一致。

醇类物质主要产生于脂质氧化,同时也可通过糖类、醛类化合物及氨基酸等前体物质的还原反应生成^[25],通常阈值较高,对肉制品特征风味贡献相对较小,但这类物质往往能赋予食品独特的花香和果香等愉悦风味特征,可能对形成鱼类特有的香气轮廓具有重要贡献。经去腥处理后,鲤鱼样品中的 3-甲基-1-丁醇-M、1-丙醇、乙醇、2-甲基-2-丙醇和 2-丁醇的含量显著增加($P<0.05$)。酮类物质的生成主要源于以下几种途径:一是多不饱和脂肪酸进行氧化或者降解反应;二是氨基酸出现降解;三是微生物氧化进程的发生^[26-27],通常具有较高的阈值,因此对鱼肉的风味贡献较小,但 2-酮类对肉品风味具有重要贡献^[28],脱腥处理后 2-丁酮和 2-戊酮的相对含量显著提高($P<0.05$),其中 2-丁酮具有奶糖味、水果味,2-戊酮具有水果味、橘皮味,均对鱼体的风味具有改善作用。丙酮在样品中相对含量较高,促进了肉品中甜香味的形成^[29]。酯类物质主要源于有机酸与醇之间发生的酯化反应,阈值较低,往往散发宜人的水果香,能够减轻由脂肪酸所引发的苦味与刺激味道,有效改善鲤鱼整体风味品质^[30]。其中脱腥处理后的特征性物质乙酸乙酯散发着独特的果香和酒香,对鱼肉风味具有促进作用。

2.4.4 黄河鲤鱼脱腥前后关键风味物质分析 挥发性成分对样品风味的实际贡献度不仅取决于其相对含量,更需结合各物质的风味阈值进行综合评估^[31]。ROAV法作为当下备受认可的一种方法,在评定食品的关键风味化合物方面得到了广泛应用,一般认为,ROAV ≥ 1 的挥发性组分被判定为关键风味物质,0.1 \leq ROAV < 1 在香气中起修饰作用^[32]。结合表8和表9可知,脱腥前样品中,庚醛不仅含量较高,而且气味阈值较低,表明它对整体风味具有显著的影响,因此庚醛被选定为脱腥前样品中的关键风味成分。脱腥后样品中,乙酸乙酯含量较高且阈值较小,故乙酸乙酯被选定为脱腥后样品的关键风味成分,通过1.2.9公式计算出各挥发性化合物的ROAV,得出脱腥前后样品中ROAV ≥ 1 的挥发性风味物质有庚醛、戊醛、丁醛、丙醛、3-甲基-1-丁醇-M、3-甲基-1-丁醇-D、1-己醛-M、1-己醛-D、3-羟基-2-丁酮-M、3-羟基-2-丁酮-D、丙酮、乙酸乙酯和4-异丙基甲苯。其中经过脱腥处理后,庚醛、戊醛、丁醛、丙醛、1-己醛-D、1-己醛-M及4-异丙基甲苯共7种挥发性风味物质的ROAV整体呈下降趋势,醛类物质对鱼腥味具有很大贡献,其ROAV值降低,表明鱼腥味得到改善。相反的是,3-甲基-1-丁醇-M、3-甲基-1-丁醇-D、3-羟基-2-丁酮-M、3-羟基-2-丁酮-D、丙酮及乙酸乙酯的ROAV值明显增加,醇类化合物一般源自脂肪的氧化降解过程,这类物质能够赋予水产品清新的香气,酮类化合物由于阈值较高,对鱼肉的整体风味贡献较小,乙酸乙酯带有明显的果香和酒香气息,这些特性能够显著提升鱼体的整体风味。

表9 黄河鲤鱼脱腥前后关键风味物质的ROAV结果
Table 9 ROAV results of key flavor substances of Yellow River carp before and after deodorization

化合物	阈值($\mu\text{g}/\text{kg}$)	ROAV		气味描述
		脱腥前	脱腥后	
庚醛	2.8	100	63.78	鱼腥味、脂肪味
戊醛	12	46.32	15.03	辛辣、刺激
丁醛	11	30.49	5.60	香蕉味、辛辣味
丙醛	15	15.82	10.77	焦糖味、甜味
1-己醛-M	4.5	66.21	11.90	青草味、牛油气味
1-己醛-D	4.5	44.29	26.59	青草味、牛油气味
3-甲基-1-丁醇-M	4	27.42	61.38	发酵味、油味、果味
3-甲基-1-丁醇-D	4	17.93	27.00	发酵味、油味、果味
3-羟基-2-丁酮-M	14	9.30	15.69	黄油味、草味
3-羟基-2-丁酮-D	14	7.53	12.24	黄油味、草味
丙酮	832	0.71	1.70	甜香味
乙酸乙酯	5	10.23	100	果味、甜味
4-异丙基甲苯	5.01	25.68	24.77	-

注: 阈值数据主要来源于《化合物嗅觉阈值汇编》。气味描述主要来源于网站<http://www.flavornet.org/flavornet.html>。

2.4.5 黄河鲤鱼脱腥前后的 OPLS-DA 及 VIP 分析

OPLS-DA 是一种多变量统计方法,主要用于数据可视化及样本差异的定量分析^[33]。通常用 R^2X 和 R^2Y 评估模型的解释能力, Q^2 用于衡量模型的预测

能力,当 R^2 和 Q^2 趋近于 1,表明该模型具有更好的拟合效果和更高的预测可靠性。将 GC-IMS 检测到的 42 种挥发性化合物作为因变量,组别作为自变量,OPLS-DA 结果如图 8a 所示,其中 R^2X 为 0.993, R^2Y 为 1, Q^2 为 1,表明该模型具有良好的预测能力,脱腥前后样品位于不同象限,能有效区分。为了评估模型的有效性,再对模型进行 200 次置换检验,模型有效性的标准为: Q^2 的回归线与纵轴相交于零或小于零,如图 8b 所示,检验结果为 $R^2=0.753$, $Q^2=0.265$,表明该模型可靠,没有出现过拟合现象。为进一步解析脱腥前后鲤鱼样品挥发性化合物之间的差异,在 OPLS-DA 的基础上进行 VIP 分析,当 $VIP \geq 1$ 表明该挥发性化合物能表达模型的差异特征,被称为标志性风味物质, VIP 值越大,影响越大。如图 9 所示,按照 $VIP \geq 1$ 和 $P < 0.05$ 的原则筛选出了 14 种挥发性物质,依次为戊醛、丁醛、1-己醛-M、丙酮、乙酸乙酯、庚醛、丙烯腈-M、庚酸乙酯、丙醛、1-己醛-

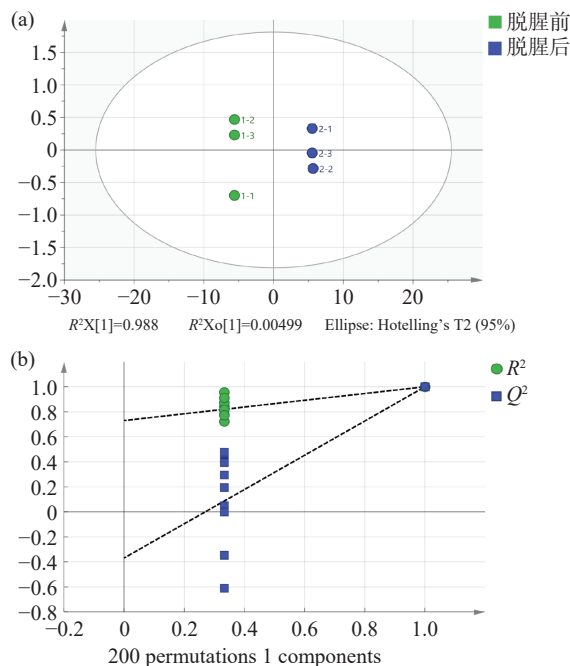


图8 黄河鲤鱼脱腥前后挥发性风味物质 OPLS-DA 得分图(a)和置换检验图(b)

Fig.8 Score chart of volatile flavor substances OPLS-DA (a) and displacement test chart (b) of Yellow River carp before and after fishiness removal

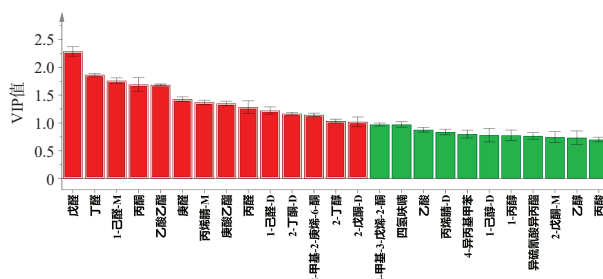


图9 基于 OPLS-DA 模型分析的 VIP 值分布图
Fig.9 VIP value distribution map based on OPLS-DA model analysis

D、2-丁酮-D、2-甲基-2-庚烯-6-酮、2-丁醇、2-戊酮-D,可作为脱腥前后鲤鱼中贡献较大的关键挥发性物质。为了更精确地确定关键风味物质,对满足相对气味活度值(ROAV)≥1 和变量重要性投影(VIP)值≥1 这两个条件的挥发性风味物质进行综合分析对比,得出戊醛、丁醛、1-己醛-M、1-己醛-D、庚醛、丙醛、丙酮以及乙酸乙酯共 8 种挥发性化合物,作为鲤鱼在脱腥处理前后样品中的核心气味标志物。

3 结论

本研究采用 LE 脱腥液对黄河鲤鱼脱腥工艺进行优化,电子鼻及 HS-SPME-GC-IMS 结合多元统计分析对鲤鱼脱腥前后风味特征进行综合表征。结果表明:在 LE 浓度为 1.5%,料液比为 1:5(g:mL),浸泡时间为 46 min 的条件下,测得的鲤鱼腥值最低为 1.248 分,TBA 值最低为 0.264 mg MDA/kg。GC-IMS 共鉴定出 42 种挥发性风味物质,包含 6 种醛类、11 种醇类、13 种酮类、4 种酯类,在脱腥处理前,醛类化合物在所有挥发性风味物质中所占比例最高,经过脱腥处理后,醛类化合物的含量显著降低了 76.62%。利用 ROAV 和 OPLS-DA 共筛选出戊醛、丁醛、1-己醛-M、1-己醛-D、丙酮、乙酸乙酯、庚醛、丙醛 8 种关键气味标志物。其中,戊醛、丁醛、1-己醛-M、1-己醛-D、庚醛、丙醛被鉴定为鲤鱼脱腥处理前样品的关键挥发性物质,使鱼体带有鱼腥味;丙酮和乙酸乙酯作为脱腥后样品的关键挥发性物质,使鱼体具有更宜人的果香、酒香及甜香味。电子鼻结果与 GC-IMS 一致,能有效区分脱腥前后鲤鱼样品的风味变化。综上,LE 脱腥液可有效改善鲤鱼的鱼腥味,为预制水产品的脱腥以及深加工提供理论参考。

© The Author(s) 2026. 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] SOBCZAK M, PANICZ R, ELJASIK P, et al. Quality improvement of common carp (*Cyprinus carpio* L.) meat fortified with n-3 PUFA[J]. Food and Chemical Toxicology, 2020, 139: 111261.
- [2] 邓静,杨荭,朱佳倩,等.水产原料腥味物质的形成及脱腥技术研究进展[J].食品安全质量检测学报,2019,10(8):2097-2102. [DENG J, YANG H, ZHU J Q, et al. Research progress on the formation of off-flavor compounds in aquatic raw materials and deodorization techniques[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(8): 2097-2102.]
- [3] 熊华兴,何远菊,王辉,等.蓝莓花青素对罗非鱼鱼皮脱腥及挥发性风味物质的影响[J].中国食品学报,2024,24(4):381-390. [XIONG H X, HE Y J, WANG H, et al. Effects of blueberry anthocyanins on deodorization and volatile flavor compounds of tilapia skin[J]. Chinese Journal of Food Science, 2024, 24(4): 381-390.]
- [4] 王源渊,张正雨,祁立波,等.基于 GC-IMS 结合多元统计分析方法分析迷迭香提取物对鲈鱼脱腥效果的影响[J].食品工业科技,2025,46(7):187-197. [WANG Y Y, ZHANG Z Y, QI L B, et al. Effect of rosemary extract on deodorization of mackerel based

on GC-IMS combined with multivariate statistical analysis method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 187-197.]

[5] 吴燕燕,朱小静,林婉玲,等.香菜和香茅对鲜鲈鱼片的脱腥、抑菌效果[J].中国食品学报,2018,18(12):188-194. [WU Y Y, ZHU X J, LIN W L, et al. Deodorization and antibacterial effects of coriander and lemongrass on fresh perch fillets[J]. Chinese Journal of Food Science, 2018, 18(12): 188-194.]

[6] WANG S, CHEN H, SUN B. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)[J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126158.

[7] SUN X, LIU X, YANG W, et al. Establishment of intermittent ultrasound-complex enzyme deodorization technology for tilapia based on GC-IMS and HS-SPME-GC/MS analysis[J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104806.

[8] NIE S, LI L, WANG Y, et al. Discrimination and characterization of volatile organic compound fingerprints during sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fermentation by combining GC-IMS and GC-MS[J]. Food Bioscience, 2022, 50: 102048.

[9] 栗紫慧,曲映红,施文正,等.利用顶空-气相色谱-离子迁移谱结合电子鼻分析黑鱼蒸制过程中挥发性风味物质的变化[J].食品与发酵工业,2025,51(1):322-329. [LI Z H, QU Y H, SHI W Z, et al. Analysis of volatile flavor compounds changes in snakehead fish during steaming process by HS-GC-IMS combined with electronic nose[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(1): 322-329.]

[10] 鲍佳丽,方旭波,陈小娥,等.巴沙鱼片脱腥工艺优化及腥味物质分析[J].食品工业科技,2022,43(6):70-76. [BAO J L, FANG X B, CHEN X E, et al. Optimization of deodorization process and analysis of fishy aftertaste substances in *Pangasius bocourti* fillets[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(6): 70-76.]

[11] 张海燕,吴燕燕,李来好,等.响应面法优化海鲈鱼片脱腥工艺[J].食品与发酵工业,2019,45(11):143-149. [ZHANG H Y, WU Y Y, LI L H, et al. Optimization of deodorization process for sea bass fillets using response surface methodology[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(11): 143-149.]

[12] YIN X Y, WEN R X, SUN F D, et al. Collaborative analysis on differences in volatile compounds of Harbin red sausages smoked with different types of woodchips based on gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose[J]. LWT, 2021, 143: 111144.

[13] KANG M, GUO Y, REN Z Y, et al. Volatile fingerprint and differences in volatile compounds of different foxtail millet (*Setaria italica* Beauv.) varieties[J]. Foods, 2023, 12(23): 4273.

[14] LI Y, YUAN L, LIU H, 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 and Human Wellness, 2023, 12(1): 173-182.

[15] WANG B, SUN Y, JIANG Q, et al. Effects of different reheating methods on lipid oxidation in frozen silver carp fish cakes[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(11): 8191-8203.

[16] 陈鸿彬,梁鹏,汪晴,等.响应面法优化海鲈鱼鱼肉脱腥工艺[J].食品安全质量检测学报,2022,13(13):4203-4211. [CHEN H B, LIANG P, WANG Q, et al. Optimization of deodorization process for sea bass muscle using response surface methodology[J].

- Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2022, 13(13): 4203–4211.]
- [17] PERSAUD K, DODD G. Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose[J]. Nature, 1982, 299: 352–355.
- [18] YANG X, LI M, JI X H. Recognition algorithms in E-nose: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23: 20460–20472.
- [19] 顾赛麒, 胡彬超, 张月婷, 等. 基于电子鼻、气-质联用技术和感官评价方法优化海带发酵脱腥工艺[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(19): 124–129. [GU S Q, HU B C, ZHANG Y T, et al. Optimization of fermentation deodorization process for kelp based on electronic nose, GC-MS and sensory evaluation[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(19): 124–129.]
- [20] FISCHER M, WOHLFAHRT S, VARGA J, et al. Evolution of volatile flavor compounds during roasting of nut seeds by thermogravimetry coupled to fast-cycling optical heating gas chromatography-mass spectrometry with electron and photoionization[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10: 49–62.
- [21] 刘彩玲, 李雪, 刘光宪, 等. 4种江西不同地方鸡品种对鸡汤滋味及挥发性风味的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 71–83. [LIU C L, LI X, LIU G X, et al. Effects of four different Jiangxi native chicken breeds on taste and volatile flavor compounds of chicken soup[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 71–83.]
- [22] GU S, ZHANG J, WANG J, et al. Recent development of HS-GC-IMS technology in rapid and non-destructive detection of quality and contamination in agri-food products[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2021, 144: 116435.
- [23] LI D F, DUAN F X, TIAN Q X, et al. Physicochemical, microbiological and flavor characteristics of traditional Chinese fermented food Kaili red sour soup[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142: 111044.
- [24] ZANG M, WANG L, ZHANG Z, et al. Changes in flavour compound profiles of precooked pork after reheating (warmed over flavour) using gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry with chromatographic feature extraction[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020, 55(3): 978–987.
- [25] 王玉, 赵延宁, 薛勇, 等. 基于电子鼻与 SPME-GC-MS 法分析咸鲛鱼加工过程挥发性风味成分变化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 266–272. [WANG Y, ZHAO Y N, XUE Y, et al. Analysis of volatile flavor components changes during salted Spanish mackerel processing based on electronic nose and SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 266–272.]
- [26] FAN X J, JIAO X, LIU J G, et al. Characterizing the volatile compounds of different sorghum cultivars by both GC-MS and HS-GC-IMS[J]. Food Research International, 2020, 140: 109975.
- [27] 顾赛麒, 唐锦晶, 周绪霞, 等. 腌腊鱼传统日晒干制过程中品质变化与香气形成[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 36–44. [GU S Q, TANG J J, ZHOU X X, et al. Quality changes and aroma formation in traditional sun-dried cured fish during processing[J]. Food Science, 2019, 40(17): 36–44.]
- [28] 丁习林, 王桂瑛, 邹颖玲, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱结合多元统计学分析 KCl 部分替代 NaCl 对宣威火腿挥发性风味化合物的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 190–198. [DING X L, WANG G Y, ZOU Y L, et al. Analysis of volatile flavor compounds in Xuanwei ham with partial substitution of NaCl by KCl using GC-IMS combined with multivariate statistics[J]. Food Science, 2020, 41(24): 190–198.]
- [29] 杜晓兰, 杨文敏, 黄永强, 等. 基于顶空气相离子迁移谱比较 3 种加工方式对番鸭肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 269–275. [DU X L, YANG W M, HUANG Y Q, et al. Comparison of volatile flavor compounds in muscovy duck meat processed by three different methods based on HS-GC-IMS[J]. Food Science, 2021, 42(24): 269–275.]
- [30] HUANG X L, LEI J J, HUANG W Y, et al. Effects of different thermal processing methods on the physicochemical properties, volatile flavor substances and sensory quality of crayfish hepatopancreas[J]. Meat Science and Technology of Food Industry, 2025: 1–16.
- [31] ZHANG Y R, ZHANG S W, FAN W X, et al. Identification of volatile compounds and odour activity values in Quinoa porridge by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(8): 3957–3966.
- [32] HU M Y, WANG S Y, LIU Q, et al. Flavor profile of dried shrimp at different processing stages[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111403.
- [33] 杨学博, 陈秋翰, 刘寿春, 等. 基于 GC-IMS 和 OPLS-DA 分析酵母-藿香复合对罗非鱼脱腥效果的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 1–11 [2025-05-04]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036573>. [YANG X B, CHEN Q H, LIU S C, et al. Analysis of deodorization effect of yeast-patchouli compound on tilapia based on GC-IMS and OPLS-DA[J/OL]. Food and Fermentation Industries, 1–11 [2025-05-04]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036573>.]