

伍欣雨, 章传奇, 姚峥, 等. 超声辅助提取黑鱼内脏鱼油工艺优化及其品质分析 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 169–177. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030369

WU Xinyu, ZHANG Chuanqi, YAO Zheng, et al. Optimization of Ultrasound-assisted Extraction of Fish Oil from Snakehead Viscera and Its Quality Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 169–177. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030369

· 工艺技术 ·

超声辅助提取黑鱼内脏鱼油工艺 优化及其品质分析

伍欣雨¹, 章传奇¹, 姚 峥¹, 钟比真¹, 彭 斌¹, 余诚玮¹, 胡明明^{1,*}, 涂宗财^{1,2}, 李金林^{1,*}

(1. 江西师范大学生命科学院, 国家淡水鱼加工技术研发专业中心, 江西南昌 330022;

2. 南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江西南昌 330047)

摘 要: 本文以黑鱼内脏为研究对象, 通过单因素实验和正交试验优化超声辅助正己烷提取黑鱼内脏粗鱼油的制备工艺, 并对所得粗鱼油的理化性质及挥发性风味物质进行分析。结果表明, 超声波辅助正己烷提取黑鱼内脏粗鱼油的最佳提取条件为: 超声温度 50 ℃, 超声时间 50 min, 超声功率 300 W, 液料比 3:1 mL/g, 在最佳条件下, 黑鱼内脏粗鱼油得率为 79.80%。超声辅助溶剂法所得粗鱼油理化性质良好, 酸价和茴香胺值相比传统的蒸煮法或溶剂法更低; 富含不饱和脂肪酸 (64.95%), 其中油酸、亚油酸分别为 23.67%、24.29%, 二十碳五烯酸 (Eicosapentaenoic acid, EPA) 和二十二碳六烯酸 (Docosahexenoic acid, DHA) 的总含量为 8.84%, 挥发性风味物质以无机硫化物、甲基类和芳香成分、有机硫化物为主。超声辅助提取黑鱼内脏鱼油具有较高的提取得率以及特有的挥发性风味物质, 且在一定程度上可以延缓氧化酸败, 提高粗鱼油中不饱和脂肪酸的含量。

关键词: 黑鱼内脏, 鱼油, 理化指标, 脂肪酸组成, 挥发性风味物质

中图分类号: TS225.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2025)07-0169-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030369



本文网刊:

Optimization of Ultrasound-assisted Extraction of Fish Oil from Snakehead Viscera and Its Quality Analysis

WU Xinyu¹, ZHANG Chuanqi¹, YAO Zheng¹, ZHONG Bizhen¹, PENG Bin¹, YU Chengwei¹,
HU Mingming^{1,*}, TU Zongcai^{1,2}, LI Jinlin^{1,*}

(1. National R & D Center for Freshwater Fish Processing, College of Life Science, Jiangxi Normal University,
Nanchang 330022, China;

2. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

Abstract: In this work, the crude fish oil was extracted from snakehead viscera by ultrasound-assisted n-hexane extraction, and the process conditions were optimized through single factor experiments and orthogonal experiments. Then, the physicochemical indexes as well as volatile flavor components of the obtained crude fish oil were evaluated. The results showed that the optimal extraction conditions of crude fish oil from snakehead viscera were determined as follows: Ultrasound temperature of 50 ℃, ultrasound time of 50 min, ultrasound power of 300 W, liquid to material ratio of 3:1 mL/g. Under the optimal conditions, the yield of crude fish oil from snakehead viscera was 79.80%. The crude fish oil obtained by ultrasound-assisted solvent extraction had good physical and chemical properties with lower acid value and anisidine value compared to those obtained by traditional water-boiling extraction or solvent extraction. The crude fish oil was rich in

收稿日期: 2024-03-25

基金项目: 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-45); 国家自然科学基金项目 (32260635); 江西省主要学科学术和技术带头人培养项目 (20232BCJ22021)。

作者简介: 伍欣雨 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工及产品开发应用, E-mail: 1843833105@qq.com。

* 通信作者: 胡明明 (1986-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 水产品精深加工和高值化综合利用, 油脂加工, E-mail: 2006abc-hmm@163.com。

李金林 (1983-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 水产加工、风味化学与副产物高值化利用, E-mail: lijnlin405@126.com。

unsaturated fatty acids (64.95%), including oleic acid 23.67%, linoleic acid 24.29%, and a total content of EPA and DHA of 8.84%. Besides, the volatile flavor components of crude fish oil were mainly inorganic sulfides, methyl groups, aromatic components and organic sulfides. Ultrasonic-assisted extraction of snakehead visceral fish oil possessed an excellent yield and unique volatile flavor substances, and could delay oxidation rancidity, and increase the content of unsaturated fatty acids in crude fish oil in a certain extent.

Key words: snakehead viscera; fish oil; physicochemical indexes; fatty acid composition; volatile flavor substances

黑鱼(Snakehead, 拉丁名 *Channa argus*), 又称乌鱼, 鲈形目鳢科鳢属的底栖性鱼类, 黑鱼生长迅速、适应能力强、养殖潜力大, 并且口感鲜美、营养丰富、可食率高^[1]。近年来黑鱼加工产业逐渐扩大, 2023 年我国淡水养殖黑鱼总产量达到 55.32 万吨^[2], 其加工产品以冷冻预制黑鱼片、黑鱼头汤粉为主。黑鱼在加工过程中会产生大量废弃脚料, 如鱼骨、鱼鳞、鱼内脏等, 而其中以黑鱼内脏为主。目前, 黑鱼内脏只有少部分用于动物饲料、调味品等加工, 其余大部分都被直接丢弃, 未能得到充分利用, 这不仅浪费了淡水鱼资源还污染了环境。现有研究发现黑鱼内脏油脂含量高, 且脂肪酸成分丰富^[3], 如 EPA、DHA、 α -亚麻酸, 具有调节血脂、治疗糖尿病、抗炎、抗癌等生理功能^[4]。因此, 研究黑鱼内脏鱼油的高效提取对黑鱼内脏高值化开发利用, 促进黑鱼加工产业发展具有非常重要的意义。

目前, 国内淡水鱼加工副产物油脂提取方法主要有蒸煮法、有机溶剂提取法、超声辅助有机溶剂提取法、超临界流体萃取法等^[5]。蒸煮法操作简易、成本低, 但高温处理易破坏鱼油品质。有机溶剂法成本低、易操作, 但提取效率低且可能会产生溶剂残留。超临界萃取法提取效率高, 但其设备造价高, 大规模生产具有局限性。超声辅助溶剂提取法具有经济效益显著、操作简易、提取率高等优点, 其原理是利用超声波产生的空化作用及机械效应会使组织细胞瞬间破裂, 胞内有效成分得到释放, 从而增加提取率^[6-7], 已被广泛应用于亚麻籽油^[8]、虹鳟鱼油^[9]、罗非鱼油^[10]等的提取。超声波辅助溶剂法在油脂提取、精炼、深加工产业的应用潜力巨大, 然而目前采用该方法提取黑鱼内脏鱼油却鲜有报道。

理化性质与风味是判断鱼油品质的重要指标。不同的提取工艺会影响鱼油的产量、理化性质和风味。目前, 我国对淡水鱼油的加工研究主要集中在油脂提取、精制工艺优化和理化性质评价上, 而提取工艺对淡水鱼油的风味影响研究相对较少。晏小霞等^[11]比较了 5 种不同提取方法所得益智果实挥发油化学成分的差异, 结果表明不同提取方法所得油脂挥发性风味物质种类和含量都存在较大差异。赵玉欣等^[12]分析了五种不同提取方法对藏羊油脂挥发性风味的影响, 发现通过挥发性风味物质可以显著区分索氏抽提法与其他提取方法所得羊油。徐咏菁等^[13]研究了冷冻干燥前处理对小黄鱼下脚料粗鱼油挥发性风味成分的影响, 发现冷冻干燥前处理在一定程度上

改善了粗鱼油的风味。本课题组前期研究了黑鱼内脏粗鱼油在精制过程中挥发性风味物质的变化^[14]以及三种不同淡水鱼粗鱼油的挥发性风味物质差异^[15], 但超声处理是否会对鱼油的挥发性风味物质产生影响还未可知。因此, 本文通过单因素实验和正交分析优化超声辅助提取黑鱼内脏中粗鱼油的最佳工艺, 并与传统的溶剂提取法、蒸煮法所得粗鱼油的理化性质和挥发性风味物质进行对比, 以期黑鱼内脏鱼油的精深加工及资源高值化利用等提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

黑鱼内脏 江西海阔食品有限公司提供; 异辛烷、正己烷 上海国药集团化学试剂有限公司; 硫代硫酸钠标准液 上海麦克林生化科技股份有限公司; 韦氏(Wijs)试剂、p-4 茴香胺 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 三氯甲烷 天津风船化学试剂科技有限公司; 均为分析纯; 37 种脂肪酸甲酯混合标准品 北京索莱宝科技有限公司。

KH-500DE 型数控超声波清洗器 昆山禾创超声仪器有限公司; N-2000 型紫外检测仪 上海嘉鹏科技有限公司; TD5Z 型低速离心机 上海卢湘仪离心机仪器有限公司; V-300 旋转蒸发仪 厦门经艺兴业科技优有公司; HH-4 型电热水浴锅 上海比朗仪器有限公司; PEN3 电子鼻 德国 Airsense 公司; 8890N/5977 气相色谱-质谱联用仪 美国 Agilent 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 黑鱼内脏粗鱼油提取工艺 黑鱼内脏→洗净沥干→搅碎→与溶剂混合→超声波处理→离心→取上清液→旋转蒸发→黑鱼内脏粗鱼油。

参考张权等^[14]方法, 略作修改。将黑鱼内脏洗净沥干后搅碎, 称取 50 g 搅碎的黑鱼内脏置于 500 mL 烧杯中, 加入一定量的正己烷, 充分混匀, 双层保鲜膜封口密封, 超声水浴处理一段时间。超声结束后将黑鱼内脏正己烷混合液体移入离心杯, 在 4000 r/min, 25 °C 下离心 10 min, 收集上清液。然后使用旋转蒸发仪在 45 °C 下将正己烷脱除得到黑鱼内脏粗鱼油, 根据下列公式计算鱼油得率。提取的鱼油保存在 -20 °C 的冰柜中, 待测。

$$W(\%) = \frac{m}{M} \times 100$$

式中: W 表示黑鱼内脏粗鱼油得率, %; m 表示黑鱼内脏粗鱼油质量, g; M 表示黑鱼内脏质量, g。

1.2.2 单因素实验 固定其他反应条件, 分别探讨超声时间、超声功率、液料比、超声温度对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响。

1.2.2.1 超声时间对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响 称取黑鱼内脏 50 g, 将正己烷作为提取试剂, 在液料比 2:1 mL/g, 超声功率 300 W, 超声温度 40 ℃ 条件下, 以超声时间 20、30、40、50、60 min 为梯度, 探究超声时间对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响。

1.2.2.2 超声功率对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响 称取黑鱼内脏 50 g, 将正己烷作为提取试剂, 在液料比 2:1 mL/g, 超声时间 40 min, 超声温度 40 ℃ 条件下, 以超声功率 200、250、300、350、400 W 为梯度, 探究超声功率对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响。

1.2.2.3 液料比对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响 称取黑鱼内脏 50 g, 将正己烷作为提取试剂, 在超声功率 300 W, 超声时间 40 min, 超声温度 40 ℃ 条件下, 以液料比 1:1、2:1、3:1、4:1、5:1 mL/g 为梯度, 探究液料比对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响。

1.2.2.4 超声温度对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响 称取黑鱼内脏 50 g, 将正己烷作为提取试剂, 在液料比 3:1 mL/g, 超声功率 300 W, 超声温度 40 min 条件下, 以超声温度 20、30、40、50、60 ℃ 为梯度, 探究超声温度对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响。

1.2.3 正交试验优化 在单因素实验基础上, 将正己烷作为提取试剂, 以超声时间、超声功率、超声温度和液料比为主要影响因素, 以粗鱼油得率为衡量指标, 选用 $L_9(3^4)$ 正交试验表对粗鱼油的提取工艺进行优化, 最终确定最佳工艺条件。正交试验因素及水平设计见表 1。

表 1 正交试验因素及水平设计
Table 1 Design of factors and levels of orthogonal test

水平 A	超声时间(min)	B 超声功率(W)	C 超声温度(℃)	D 液料比(mL/g)
1	30	250	30	1:1
2	40	300	40	2:1
3	50	350	50	3:1

1.2.4 不同提取方法所得粗鱼油得率及品质的比较

1.2.4.1 粗鱼油的不同提取方法 超声辅助溶剂提取法参考张权等^[14]的方法: 采用单因素实验和正交试验后优化得到的条件对黑鱼内脏进行鱼油的提取, 即以正己烷为溶剂, 按液料比 3:1 mL/g、超声时间 50 min、超声温度 50 ℃、超声功率 300 W 提取粗鱼油, 并保存在-20 ℃ 的冰柜中, 待测。

溶剂提取法参考付雪媛等^[16]的方法, 并稍作修改: 称取 50 g 搅碎的黑鱼内脏置于 250 mL 烧杯中, 加入 150 mL 正己烷, 充分搅匀, 双层保鲜膜封口密封, 水浴 50 ℃ 处理 40 min。水浴结束后将黑鱼内脏正己烷混合液体移入离心杯, 在 4000 r/min, 25 ℃ 下离心 10 min, 收集上清液。然后使用旋转蒸发仪在 45 ℃ 下将正己烷脱除, 计算粗鱼油得率。提取的

鱼油保存在-20 ℃ 的冰柜中, 待测。

蒸煮法参考张权等^[15]方法: 称取 50 g 搅碎的黑鱼内脏置于 250 mL 烧杯中, 加入 150 mL 纯净水, 充分搅匀, 双层保鲜膜封口密封, 水浴 50 ℃ 处理 40 min。水浴结束后将黑鱼内脏正己烷混合液体移入离心杯, 在 4000 r/min, 25 ℃ 下离心 10 min, 收集上清液。然后使用旋转蒸发仪在 100 ℃ 下将水脱除, 计算粗鱼油得率。提取的鱼油保存在-20 ℃ 的冰柜中, 待测。

1.2.4.2 粗鱼油理化性质分析 酸价(AV)的测定参照 GB 5009.229-2016 中的冷溶剂指示剂滴定法; 碘值(IV)的测定参照 GB/T 5532-2022; 茴香胺值(p-AV)的测定参照 GB/T 24304-2009。

1.2.4.3 粗鱼油脂肪酸组成 GC-MS 分析 a.样品甲酯化: 参考江鑫等^[17]的方法, 并稍作修改。称取粗鱼油 15.00 mg 置于离心管内, 加入 1 mL 正己烷(HPCL 级)和 100 μL 4% 的氢氧化钠-甲醇溶液, 充分混匀, 放置 37 ℃ 恒温水浴锅中 35 min, 离心取上层清液 1 mL, 使用 0.22 μm 有机滤膜过滤, 进样分析。

b.气相色谱-质谱联用仪条件: 色谱条件: 色谱柱, DB-wax 毛细管柱(30 m×0.25 μm×0.25 mm); 进样口温度 250 ℃; 载气 He; 流速 1.0 mL/min; 采用不分流模式; 进样体积 1 μL; 升温程序: 起始温度 40 ℃, 维持 3 min, 以 5 ℃/min 升温至 240 ℃, 维持 15 min。

质谱条件: EI 电离源; 电离电压 70 eV; 离子源温度 230 ℃; 四极杆温度 150 ℃。

定性定量分析: 脂肪酸定性以 37 种脂肪酸甲酯标准品保留时间分别与样品的保留时间比照确定, 以各个脂肪酸甲酯的峰面积百分比作为相对含量。

1.2.4.4 粗鱼油挥发性风味物质电子鼻分析 参考王正云等^[18]的方法并加以修改, 称取 5.00 g 鱼油样品置于 15 mL 样品瓶内, 双层保鲜膜封口密封, 40 ℃ 水浴加热 30 min 后进行检测, 电子鼻测定条件为: 载体流量 400 mL/min, 采用流量 400 mL/min, 传感器清洗时间 90 s, 采样时间间隔 5 s, 零点微调时间 5 s,

表 2 电子鼻不同传感器对应物质种类

Table 2 Corresponding aroma types of different sensors of electronic nose

阵列序号	传感器名称	响应物质类型
1	W1C	对芳香成分灵敏
2	W5S	对氮氧化物灵敏
3	W3C	对氨类、芳香成分灵敏
4	W6S	对氢化物有选择性
5	W5C	对短链烷烃、芳香成分灵敏
6	W1S	对甲基类灵敏
7	W1W	对无机硫化物灵敏
8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
9	W2W	对芳香成分、有机硫化物灵敏
10	W3S	对芳香成分、有机硫化物灵敏

检测时间 80 s。电子鼻 10 个不同传感器对应物质种类见表 2。

1.3 数据处理

所有试验均为 3 次平行,使用 EXCEL 和 SPSS-19.0 统计软件对数据进行单因素方差同质性分析(ANOVA),显著性差异分析采用 Duncan 检验,结果以平均值±标准差表示, $P<0.05$ 表示存在显著性差异;采用 Origin2019 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 超声时间对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响 由图 1 可知,黑鱼内脏粗鱼油的得率随超声时间的延长先增大后趋于稳定,在超声时间为 20~40 min 内时,随着超声时间的延长,黑鱼内脏粗鱼油的得率呈增加的趋势,当超声时间超过 40 min 时,粗鱼油得率无显著差异($P>0.05$),这可能是在超声过程的初始阶段,内脏与正己烷之间的浓度差异大,导致固液间的扩散驱动力增大,随着超声时间的增长,鱼油在内脏与溶剂中的浓度达到了饱和状态,鱼油得率基本稳定^[19]。然而,与本研究略有不同的是,权煜等^[20]在超声辅助提取油莎豆油时,随着提取时间的延长,油莎豆油的得率先升高后下降,在提取时间超过适宜时间(20 min)后,由于油莎豆中不溶性物质等杂质悬浮在提取物中,或重新吸附到破裂的组织颗粒上,降低了溶剂对细胞结构的渗透性,进而导致油莎豆油的得率降低。综合考虑,选择黑鱼内脏粗鱼油的超声时间为 40 min 较为适宜,选择超声时间 30~50 min 作为正交试验水平。

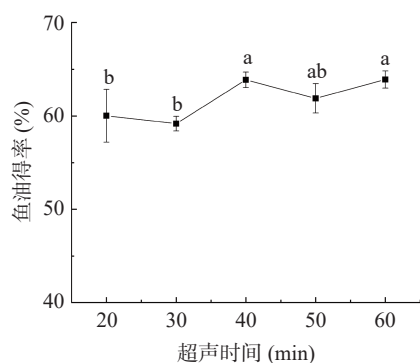


图 1 超声时间对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响

Fig.1 Influence of ultrasound time on the yield of snakehead visceral oil

注:不同字母表示样品间存在显著性差异($P<0.05$),图 2~图 5 同。

2.1.2 超声功率对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响 由图 2 可知,随超声功率的延长,黑鱼内脏粗鱼油的得率先增大后趋于稳定,在超声功率为 200~300 W 时,随着超声功率增大,黑鱼内脏粗鱼油得率呈增大趋势,这可能是由于超声波空化作用能使细胞破裂,使溶剂和黑鱼内脏细胞内物质之间的接触面积增大,表面的鱼油浓度更高^[21]。但当超声功率超过 300 W

后,黑鱼内脏粗鱼油得率趋于平缓,无显著性差异($P>0.05$),这可能是由于超声功率到达 300 W 时即可使大部分油脂分子进入正己烷溶剂中,因此即使超声功率增加后,鱼油得率增加趋势并不显著^[22]。王新宇等^[23]利用超声辅助乙醇提取金枪鱼鱼油,以及汪学荣等^[24]采用纯水提取三文鱼鱼油时也都发现,随着超声功率增加后,鱼油提取率先上升后逐渐平缓,这与本研究结果一致。综合考虑,选择黑鱼内脏粗鱼油的超声功率为 300 W 较为适宜,选择超声功率 250~350 W 作为正交试验水平。

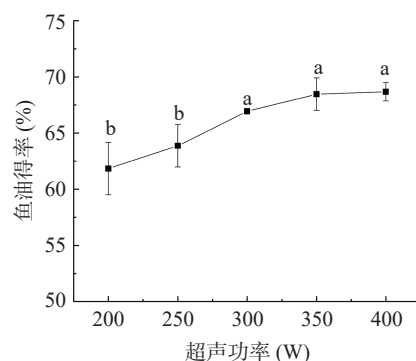


图 2 超声功率对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响

Fig.2 Influence of ultrasound power on the yield of snakehead visceral oil

2.1.3 液料比对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响 由图 3 可知,在液料比为 1:1~3:1 mL/g 时,随着液料比的上升,黑鱼内脏粗鱼油的得率呈增大的趋势,且在液料比为 3:1 mL/g 时的鱼油得率最佳,而后液料比继续增加则鱼油得率趋于平缓,无显著性差异($P>0.05$),其原因可能是液料比影响了正己烷与黑鱼内脏接触面的浓度差,随着液料比的上升,黑鱼内脏与正己烷接触面的浓度差也增大,加快了鱼油向正己烷渗透的速率,从而使鱼油得率上升,但当液料比过大时,对于在底部沉积的黑鱼内脏,超声产生的空化和机械等效应强度减弱,导致正己烷的浪费并使液料比将不再影响鱼油得率^[25]。赵保堂等^[26]在研究超声辅助石油醚提取虹鳟鱼内脏鱼油时发现,鱼油得率随液料比的增大呈先上升而后趋于稳定的趋势,这与本

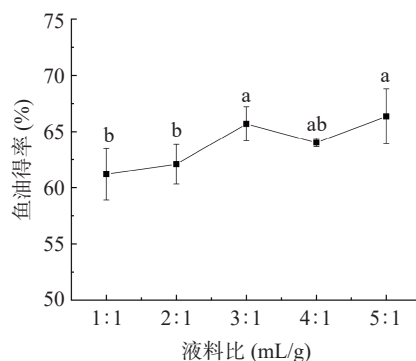


图 3 液料比对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响

Fig.3 Influence of liquid to material ratio on the yield of snakehead visceral oil

研究结果一致。因此,选择黑鱼内脏粗鱼油的液料比为 3:1 mL/g 较为适宜,同时,综合考虑成本^[27],选择液料比为 1:1~3:1 mL/g 作为正交试验水平。

2.1.4 超声温度对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响 由图 4 可知,在超声温度为 20~50 ℃ 时,黑鱼内脏粗鱼油得率随着超声温度的升高而升高;当超声温度高于 50 ℃ 后,粗鱼油得率增加缓慢,无显著性差异($P>0.05$)。这可能是由于随着超声温度的增加会加强超声波空化作用产生的热效应,加速组织和细胞的破裂,有利于鱼油的渗透,并且超声温度的升高也会降低鱼油与内脏之间的黏度,使鱼油流动性增强^[6],因而鱼油的得率提高,当达到 50 ℃ 后,大部分油脂分子已经渗出,因此,即使温度继续升高,鱼油得率也不再显著上升。李笑等^[28]在超声辅助环己烷提取鳙鱼内脏粗鱼油时发现,随着超声温度的升高,鱼油得率也出现先上升后趋于平缓的趋势,与本研究结果类似。高娟等^[29]在利用超声辅助正己烷-异丙醇混合溶剂提取鲑鱼肝脏油脂时也发现,当超声温度为 50 ℃ 时,提取率达到最大值,当超声温度继续上升后对鱼油提取率也无显著影响。因此,选择黑鱼内脏粗鱼油的超声温度为 50 ℃ 较为适宜,同时,综合考虑成本^[27],选择超声温度为 30~50 ℃ 作为正交试验水平。

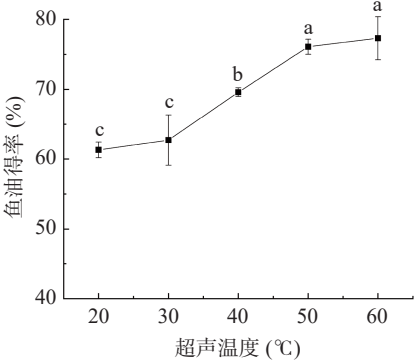


图 4 超声温度对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响
Fig.4 Influence of ultrasound temperature on the yield of snakehead visceral oil

2.1.5 正交试验结果分析 以黑鱼内脏粗鱼油得率为考察指标,根据表 1 设计进行正交试验,结果见表 3,方差分析见表 4。

由正交试验极差(R)分析可知,影响超声辅助提取黑鱼内脏粗鱼油得率的 4 个考察因素的主次顺序为: A>D>C>B,即超声时间>液料比>超声温度>超声功率;由方差分析得出液料比、超声时间和超声温度对黑鱼内脏粗鱼油得率影响极其显著($P<0.01$)。同时,正交试验校正决定系数 R^2_{Adj} 的值为 90.10%,表明实验误差小,模型拟合较好。获得超声辅助提取黑鱼内脏粗鱼油的理论最佳提取工艺方案为 $A_3D_3C_3B_2$:以正己烷为溶剂,按液料比 3:1 mL/g、超声时间 50 min、超声温度 50 ℃、超声功率 300 W 提取黑鱼内脏粗鱼油的得率可能是最高的。经三次验证试验表明,在最优提取工艺条件下,黑鱼内脏粗鱼油的平

表 3 正交试验设计与结果

Table 3 Orthogonal experiment design and results

试验号	A超声时间 (min)	B超声功率 (W)	C超声温度 (℃)	D液料比 (mL/g)	得率 (%)
1	1(30)	1(250)	1(30)	1(1:1)	63.39
2	1	2(300)	2(40)	2(2:1)	71.47
3	1	3(350)	3(50)	3(3:1)	71.72
4	2(40)	1	2	3	76.63
5	2	2	3	1	72.47
6	2	3	1	1	72.57
7	3(50)	1	3	2	76.18
8	3	2	1	3	75.06
9	3	3	2	1	71.91
K_1	206.58	216.20	211.03	207.77	
K_2	221.67	219.00	220.01	220.22	
K_3	223.15	216.20	220.36	223.41	
k_1	68.86	72.07	70.34	69.26	
k_2	73.89	73.00	73.34	73.41	
k_3	74.38	72.07	73.45	74.47	
R	5.52	0.93	3.11	5.21	

表 4 正交试验结果方差分析

Table 4 Analysis of variance for the experimental results of orthogonal experiment

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
修正模型	380.932 ^a	8	47.615	30.620	0.000	**
A	173.418	2	86.709	55.760	0.000	**
B	4.394	2	2.197	1.413	0.269	
C	59.345	2	29.673	19.082	0.000	**
D	143.766	2	71.883	46.226	0.000	**
误差	27.991	18	1.555			
总计	142091.412	27				
修正后总计	408.914	26				

注: **表示差异极其显著($P<0.01$)。

均得率为 79.80%±1.50%。因此,综合单因素实验和正交试验确定上述优化的工艺方案为超声辅助提取黑鱼油的最佳工艺,鱼油提取得率更高。

2.2 不同提取方法所得黑鱼内脏粗鱼油得率及品质的比较

2.2.1 黑鱼内脏粗鱼油得率比较分析 由图 5 可知,蒸煮法鱼油得率为 50.18%,与张权等^[14]研究的黑鱼

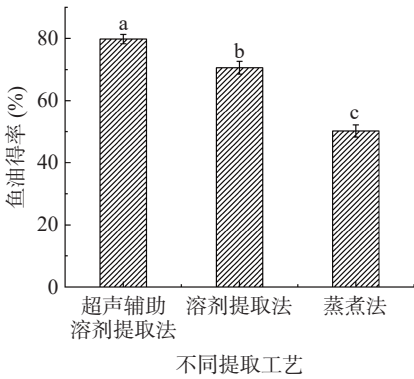


图 5 不同提取工艺对黑鱼内脏粗鱼油得率的影响
Fig.5 Influence of different extraction methods on the yield of snakehead visceral oil

内脏鱼油得率结果相当。溶剂提取法所得鱼油得率为 70.16%，显著高于蒸煮法($P<0.05$)，而利用超声辅助溶剂提取鱼油得率最高，为 79.80%，相比蒸煮法和溶剂提取法分别提高了 29.62%、9.64%，说明超声辅助溶剂提取法可以有效提升鱼油得率。单钱艺^[30]采用超声辅助溶剂提取法、蒸煮法提取中华鳖油，鳖油得率分别为 71.24%、31.51%，超声辅助溶剂提取法鳖油得率也显著高于蒸煮法。

2.2.2 黑鱼内脏粗鱼油理化性质分析 AV 通常作为衡量鱼油氧化酸败的重要指标，与鱼油中游离脂肪酸含量有关，通常鱼油中游离脂肪酸含量越高，鱼油的氧化酸败越严重。超声辅助溶剂提取法提取的粗鱼油 AV 值在 SC/T 3502-2016 二级粗鱼油标准内。此外，从表 5 结果可以看出，超声辅助溶剂提取法提取的粗鱼油 AV 与蒸煮法无显著性差异($P>0.05$)，但相比溶剂提取法显著更低($P<0.05$)，说明超声辅助提取并不会加快鱼油酸败，反而可能会延缓鱼油酸败，其原因还待进一步研究。

表 5 黑鱼内脏粗鱼油理化性质对比
Table 5 Comparison of physicochemical properties of snakehead visceral oil

指标	超声辅助溶剂提取法	溶剂提取法	蒸煮法	SC/T 3502-2016 粗鱼油		
				一级	二级	三级
AV(mg/g)	9.58±0.13 ^b	9.91±0.08 ^a	9.56±0.11 ^b	≤8.0	≤15.0	≤30.0
IV(g/100 g)	111.94±3.58 ^a	111.57±0.68 ^a	110.09±1.74 ^a		≥120	
p-AV	3.19±0.23 ^b	4.11±0.12 ^a	3.74±0.23 ^a			—

注：同行不同字母表示差异显著($P<0.05$)；表 6 同。

IV 可以反映鱼油的不饱和程度^[31]，与鱼油中不饱和脂肪酸的比例有关。超声辅助溶剂法所得粗鱼油与蒸煮法、溶剂提取法所得粗鱼油 IV 结果无显著性差异($P>0.05$)，均低于 SC/T 3502-2016 粗鱼油标准，其原因可能是黑鱼属于淡水鱼，其不饱和脂肪酸含量较低^[32]，加上黑鱼内脏原料非新鲜获取，在贮运期间其不饱和脂肪酸会发生一定程度的氧化，因此碘值整体偏低。此外，三种方法所提取的鱼油 IV 值无显著差异($P>0.05$)，表明原料相同下，三种提取方法所得鱼油不饱和和油脂含量差别较小。

p-AV 可表征鱼油中醛、酮等次级氧化产物的含量^[33]。表 5 结果显示，超声辅助溶剂提取法所得鱼油 p-AV 为 3.19，相比溶剂提取法和蒸煮法相比显著更低($P<0.05$)，溶剂提取法的鱼油的 p-AV 相对偏高，说明超声处理并不会明显加速鱼油次级氧化。

2.2.3 黑鱼内脏粗鱼油脂肪酸成分分析 由表 6 可知，超声辅助溶剂提取法制得的黑鱼内脏粗鱼油共检测出 18 种脂肪酸，分布范围 C₁₀~C₂₂，包括饱和脂肪酸 9 种、单不饱和脂肪酸 3 种、多不饱和脂肪酸 6 种，其中以棕榈酸(C_{16:0})、油酸(C_{18:1n9c})、亚油酸(C_{18:2n6c})为主，三者总相对含量占总脂肪酸的 74.26%。一般而言，鱼油不饱和和脂肪酸含量越高，营

表 6 不同提取工艺所得黑鱼内脏粗鱼油脂肪酸成分
Table 6 Fatty acid composition of different extraction methods for snakehead visceral oil

脂肪酸	相对含量(%)		
	超声辅助溶剂提取法	溶剂提取法	蒸煮法
C _{10:0}	0.20±0.05 ^a	0.20±0.00 ^a	0.01±0.00 ^b
C _{11:0}	0.01±0.00 ^a	0.01±0.00 ^a	0.01±0.00 ^a
C _{12:0}	0.48±0.17 ^a	0.52±0.08 ^a	0.72±0.33 ^a
C _{14:0}	7.62±1.95 ^a	9.44±0.62 ^a	8.48±2.12 ^a
C _{16:0}	26.30±0.89 ^b	30.15±2.07 ^a	25.67±1.31 ^b
C _{17:0}	—	1.48±0.05	—
C _{18:0}	0.79±0.34 ^b	1.22±1.05 ^b	3.02±0.18 ^a
C _{20:0}	1.38±0.35 ^b	1.51±0.22 ^{ab}	2.01±0.26 ^a
C _{22:0}	0.19±0.06 ^a	0.19±0.04 ^a	0.20±0.45 ^a
ΣSFA	36.79±3.81 ^c	44.72±4.13 ^a	40.12±4.65 ^b
C _{16:1}	5.12±0.21 ^a	4.87±0.03 ^b	4.97±0.15 ^a
C _{18:1n9t}	1.55±0.20	—	—
C _{18:1n9c}	23.67±1.79 ^a	21.10±1.15 ^a	22.62±1.28 ^a
ΣMUFA	30.34±2.20 ^a	25.97±1.18 ^b	27.59±1.43 ^{ab}
C _{18:2n6c}	24.29±1.46 ^a	22.05±1.40 ^a	21.84±1.39 ^a
C _{18:3n6}	0.89±0.09 ^a	0.66±0.13 ^b	0.92±0.60 ^a
C _{18:3n3}	0.06±0.01 ^a	0.05±0.01 ^a	0.06±0.01 ^a
C _{20:4n6}	0.53±0.05 ^a	0.62±0.04 ^a	0.16±0.05 ^b
C _{20:5n3} (EPA)	0.70±0.45 ^a	0.67±0.04 ^b	0.59±0.06 ^c
C _{22:6n3} (DHA)	8.14±0.04 ^a	7.96±0.05 ^a	6.79±0.05 ^b
EPA+DHA	8.84±0.49 ^a	8.63±0.09 ^a	7.38±0.10 ^b
ΣPUFA	34.61±2.10 ^a	32.01±1.67 ^{ab}	30.36±2.16 ^b

注：ΣSFA、ΣMUFA、ΣPUFA 分别表示饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸的总含量；—为未检出该物质。

养价值相对越高^[34]。溶剂提取法和蒸煮法所得鱼油不饱和脂肪酸无显著性差异($P>0.05$)，相对含量偏低，分别为 57.98% 和 57.95%，而超声辅助溶剂法所得鱼油不饱和脂肪酸相对含量显著更高($P<0.05$)，为 64.95%。超声辅助溶剂法鱼油含有丰富的单不饱和脂肪酸，主要有油酸(C_{18:1n9c})、棕榈油酸(C_{16:1})，相对含量达 30.34%，其中棕榈油酸相对含量显著高于常规的溶剂提取法($P<0.05$)；多不饱和脂肪酸主要有亚油酸(C_{18:2n6c})、亚麻酸(C_{18:3n3})和 DHA，相对含量为 34.61%，显著高于常规的蒸煮法($P<0.05$)。EPA 可降低血液中胆固醇和甘油三酯，促进循环系统健康、预防心血管疾病，而 DHA 对脑部发育极其重要，二者对人体健康具有重要作用^[35]。不同方法提取的粗鱼油 EPA 和 DHA 相对含量有所差异，超声辅助溶剂法鱼油 EPA 相对含量为 0.70%，显著高于溶剂提取法和蒸煮法($P<0.05$)；超声辅助溶剂法鱼油 DHA 和 EPA+DHA 相对含量分别为 8.14% 和 8.84%，与溶剂提取法相当($P>0.05$)，但显著高于蒸煮法($P<0.05$)。

现代医学认为人体摄入过多的反式脂肪酸(Trans fatty acid, TFA)和饱和脂肪(Satu-rated fatty acid, SFA)，会对人的身体健康造成危害，引发心血管疾病、肥胖症、高血压等疾病^[36]，超声辅助溶剂法鱼油中 SFA 相对含量为 36.79%，显著低于溶剂提取

法和蒸煮法($P<0.05$),但超声辅助溶剂法鱼油同时也含有微量的 TFA(1.55%),而 TFA 在溶剂提取法和蒸煮法并未检测到,因此,在工业化加工应用时需特别关注 TFA 含量。整体而言,超声辅助溶剂提取法可在一定程度上提升粗黑鱼油的营养价值,但同时需注意控制有害物的生成。

2.2.4 黑鱼内脏粗鱼油电子鼻雷达图分析 图 6 雷达图显示了电子鼻的 10 个传感器对鱼油的响应值大小,由图 6 可知, W1C、W3S、W2S、W5S、W6S、W3C 传感器对所有鱼油的响应值都很小,没有明显差异。与其他传感器相比,超声辅助提取法鱼油样品对 W1W(对无机硫化物)传感器的响应值最大,其次是 W1S(对甲基类灵敏)和 W2W(对芳香成分、有机硫化物灵敏)传感器。此外,超声辅助提取法鱼油的响应值均明显比蒸煮法提取的鱼油大,但与溶剂提取法的响应值差别不大,这可能是因为蒸煮法是用纯净水进行提取,而超声辅助提取法与溶剂提取法均是使用正己烷溶剂进行提取,导致其挥发性物质种类更多^[37],另外,超声波处理会引起分子电磁振动,增加分子运动,导致热量产生,也会加快挥发性风味物质扩散。上述结果表明,提取工艺会影响鱼油的挥发性风味物质产生,超声辅助溶剂法所得鱼油的挥发性气味物质主要是硫化物和芳香成分。

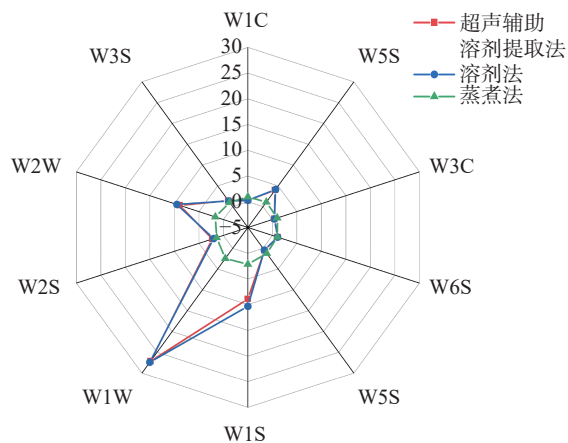


图 6 黑鱼内脏粗鱼油电子鼻雷达图

Fig.6 Electronic nose radar diagram of snakehead visceral oil

2.2.5 黑鱼内脏粗鱼油电子鼻主成分分析 主成分分析(Principal components analysis, PCA)是一种多元技术探索性数据分析方法,并被广泛应用于电子鼻检测数据,可实现进一步鉴别分析和监测的目的^[38]。对黑鱼内脏鱼油电子鼻数据进行 PCA 分析,结果如图 7A 所示,主成分 1(PC1)的贡献率达到 98.80%,而主成分 2(PC2)的贡献率为 1.00%,PC1、PC2 累计贡献率达到 99.80%,大于 85.00%,表明 PC1 和 PC2 可以反映黑鱼内脏鱼油挥发性物质的主要信息特征。PCA 图(图 7A)结果显示,黑鱼内脏粗鱼油可分为 2 个相对独立的区域,即 2 种不同的风味类型。超声辅助溶剂提取法数据分布在右侧,溶剂提取法与

其相距较近,而蒸煮法的数据相对集中位于左侧,表明不同提取工艺所得鱼油挥发性气味物质成分存在差异,超声辅助溶剂提取的鱼油在挥发性风味物质上更接近溶剂提取法。载荷图(图 7B)可反映各传感器对于超声辅助溶剂提取法与溶剂提取法、蒸煮法提取的鱼油样品区分的贡献,距离原点越远贡献越大。结果显示, W1W(无机硫化物)、W2W(芳香成分、有机硫化物)和 W1S(甲基类)传感器对 PC1 贡献值较大, W1S(甲基类)对 PC2 的贡献值较大,因此通过这些特征传感器可知超声辅助溶剂提取法所得鱼油挥发性风味物质与传统方法的异同,这与图 6 中的雷达图结果相一致。

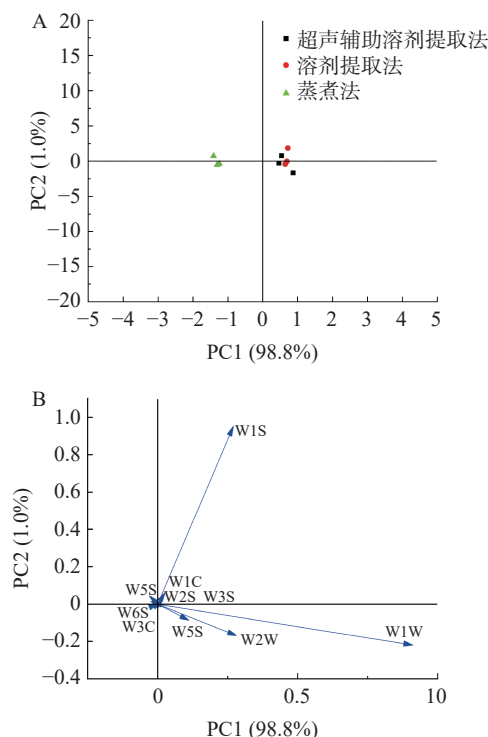


图 7 黑鱼内脏粗油电子鼻数据 PCA 图(A)及载荷图(B)

Fig.7 PCA diagram (A) and load diagram (B) of electronic nose data of snakehead visceral oil

3 结论

本研究以黑鱼内脏为研究对象,通过单因素实验和正交试验对超声波辅助正己烷提取鱼油工艺进行了优化,得到最佳工艺条件为:超声温度 50 ℃,超声时间 50 min,超声功率 300 W,液料比 3:1 mL/g。在此条件下黑鱼内脏油的得率可达到 79.80%,相比蒸煮法和溶剂提取法分别提高了 29.62%、9.64%,该工艺制备所得黑鱼内脏粗鱼油可在一定程度上延缓氧化酸败,提高粗鱼油中不饱和脂肪酸的含量,尤其是 MUPA 和 EPA,同时需注意控制有害物 TFA 的生成。电子鼻分析结果表明黑鱼内脏粗鱼油挥发性风味物质主要以无机硫化物、甲基类物质、芳香成分、有机硫化物为主,但其具体关键特征挥发性风味物质还需进一步研究。本研究不仅提供了一种利用超声辅助溶剂高效提取黑鱼内脏粗鱼油的加工方

法, 而且对超声辅助溶剂法提取鱼油的品质和风味与传统的蒸煮法和溶剂提取法进行比较分析, 以期为黑鱼内脏资源的高值化应用提供一定的理论和技术参考价值。

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

参考文献

- [1] 李凯. 山东省乌鳢养殖产业发展分析[J]. 渔业信息与战略, 2021, 36(2): 96-103. [LI K. Development of *Channa argus* in aquaculture Shandong Province[J]. Fishery Information & Strategy, 2021, 36(2): 96-103.]
- [2] 王丹, 吴反修. 2023 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023. [WANG D, WU F X. China fishery statistical year-book[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2023.]
- [3] FATAHI S, SOHOULI M H, MAGALHAES E I D, et al. Comparing the effects of docosahexaenoic and eicosapentaenoic acids on cardiovascular risk factors: Pairwise and network meta-analyses of randomized controlled trials[J]. *Nutrition, Metabolism, and Cardiovascular Diseases: NMCD*, 2023, 33(1): 11-21.
- [4] ESTIASIH T, AHMADI K, ALI D Y, et al. Valorisation of viscera from fish processing for food industry utilizations[J]. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 2021, 924(1): 12024.
- [5] 郑学超. 章鱼副产物中鱼油的提取方法研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018. [ZHENG X C. Study on fish oil extraction technology of octopus by-product[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018.]
- [6] 袁雅雯. 栀子果油的超声辅助水酶法提取及其纳米乳液制备的研究[D]. 杭州: 浙江科技学院, 2023. [YUAN Y W. Study on ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction of gardenia fruit (*Gardenia jasminoids* Ellis) oil and preparation of nanoemulsions[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2023.]
- [7] DELGADO G M J, SANCHEZ G M M, GARCIA M M V, et al. Study of a laboratory-scaled new method for the accelerated continuous ageing of wine spirits by applying ultrasound energy[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 36(1): 226-235.
- [8] ZHANG Z S, WANG L J, LI D. Ultrasound-assisted extraction of oil from flaxseed[J]. *Separation and Purification Technology*, 2008, 62(1): 192-198.
- [9] MAI T T H, CHOI Y, PARK H, et al. Green ultrasound-assisted extraction of fish oil from rainbow trout intestines and purification with adsorbents[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2023, 66(1): 80.
- [10] ARIAS L, MARQUEZ D M, ZAPATA J E. Quality of red tilapia viscera oil (*Oreochromis* sp.) as a function of extraction methods[J]. *Heliyon*, 2022, 8(5): 1596-1608.
- [11] 晏小霞, 王祝年, 王茂媛, 等. 五种不同提取方法益智果实挥发油化学成分分析[J]. 亚太传统医药, 2023, 19(8): 28-35. [YAN X X, WANG Z N, WANG M Y, et al. Composition analysis of volatile oils from *Alpinia oxyphylla* fruits extracted by different methods[J]. *Asia-Pacific Traditional Medicine*, 2023, 19(8): 28-35.]
- [12] 赵玉欣, 韩丽娟, 葛世鹏, 等. 基于 GC-IMS 分析不同提取方法对藏羊油脂挥发性风味的影响[J/OL]. 中国油脂, 1-15. [2025-01-02]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230517>.
- [13] ZHAO Y X, HAN L J, GE S P, et al. Analysis of the influence of different extraction methods on the volatile flavor of Tibetan sheep oil based on GC-IMS[J/OL]. *China Oils and Fats*, 2024, 1-15 [2025-01-02]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230517>.
- [14] 徐咏菁, 陈文字初, 田方, 等. 不同提取方式下小黄鱼下脚料粗鱼油脂肪酸组成及挥发性风味成分的变化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(11): 253-262. [XU Y Q, CHEN W Y C, TIAN F, et al. Changes of fatty acid composition and volatile flavor components of crude fish oil from *Larimichthys polyactis* scraps under different extraction methods[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(11): 253-262.]
- [15] 张权, 吴思纷, 宁舒娟, 等. 3 种淡水鱼内脏粗鱼油品质及挥发性风味成分分析比较[J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 342-351. [ZHANG Q, WU S F, NING S X, et al. Analysis and comparison on the quality and volatile flavor components of crude fish oil from the viscera of three freshwater fishes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(2): 342-351.]
- [16] 张权, 王为, 吴思纷, 等. 黑鱼油精制过程中品质及风味成分变化[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 208-216. [ZHANG Q, WANG W, WU S F, et al. Changes in the quality and flavor components of snakehead fish oil during refining process[J]. *Food Science*, 2023, 44(12): 208-216.]
- [17] 付雪媛, 钟宏, 宋文山, 等. 章鱼内脏鱼油的提取及品质分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(5): 17-22. [FU X Y, ZHONG H, SONG W S, et al. Extraction and quality analysis of octopus viscera fish oil[J]. *China Oils and Fats*, 2020, 45(5): 17-22.]
- [18] 江鑫, 陈倩媛, 俞文韬, 等. LCMS-IT-TOF 测定不同脂肪酸结构食用油中的羰基化合物[J]. 食品工业科技, 2019, 40(21): 231-238, 244. [JIANG X, CHEN Q Y, YU W T, et al. Determination of carbonyl compounds in edible oils with different fatty acid compositions by LCMS-IT-TOF[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(21): 231-238, 244.]
- [19] 王正云, 李婷, 刘子潇, 等. 不同贮藏温度下草鱼内脏鱼油品质变化[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 362-368. [WANG Z Y, LI T, LIU Z X, et al. Quality changes of grasscarp visceral fish oil under different storage temperatures[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(1): 362-368.]
- [20] 洪晴悦, 张玉. 超声波辅助提取牡丹籽毛油的工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(3): 159-164. [HONG Q Y, ZHANG Y. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of peony seed oil and its fatty acid composition[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(3): 159-164.]
- [21] 权煜, 刘学强, 赵丹丹, 等. 超声辅助提取油莎豆油的工艺优化及品质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 207-216. [QUAN Y, LIU X Q, ZHAO D D, et al. Process optimization and quality research of oil extraction from tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) using ultrasonic-assisted extraction[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(10): 207-216.]
- [22] POKHREL N, VVABBINA P K, PALA N. Sonochemistry: science and engineering[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 29: 104-128.
- [23] CHEN R Z, LI S Z, LIU C M, et al. Ultrasound complex enzymes assisted extraction and biochemical activities of polysaccharides from *Epimedium* leaves[J]. *Process Biochemistry*, 2012, 47(12): 2040-2050.
- [24] 王新宇, 王欣欣, 位正鹏, 等. 超声波辅助提取金枪鱼蒸煮液鱼油工艺研究及品质分析[J]. 水产科技情报, 2022, 49(2): 82-90. [WANG X Y, WANG X X, WEI Z P, et al. Research on ultrason-

- ic-assisted extraction technology and quality analysis of fish oil from Zhoushan tuna cooking liquor[J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2022, 49(2): 82–90.]
- [24] 汪学荣, 周玲, 吴青. 三文鱼油超声波辅助提取工艺及脂肪酸组成分析[J]. *中国油脂*, 2019, 44(2): 23–26. [WANG X R, ZHOU L, WU Q. Ultrasound-assisted extraction of salmon oil and its fatty acid composition[J]. *China Oils and Fats*, 2019, 44(2): 23–26.]
- [25] 严小平, 童建颖, 胡文浪, 等. 超声波辅助提取枇杷仁油最佳工艺的研究[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(2): 94–97. [YAN X P, TONG J Y, HU W L, et al. Optimal process of extracting loquat seed oil assisted by ultrasonic wave[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2017, 32(2): 94–97.]
- [26] 赵保堂, 孙栋, 刘东, 等. 虹鳟鱼油的超声波辅助法提取及其脂肪酸组成分析[J]. *中国油脂*, 2019, 44(3): 20–24. [ZHAO B T, SUN D, LIU D, et al. Ultrasound-assisted extraction of rainbow trout oil and its fatty acid composition[J]. *China Oils and Fats*, 2019, 44(3): 20–24.]
- [27] 侯化国, 王玉民. 正交试验法[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1985. [HOU H G, WANG Y M. Orthogonal experiment method[M]. Changchun: Jilin People's Press. 1985.]
- [28] 李笑, 余信, 余兆硕, 等. 鳙鱼内脏油超声辅助提取及其理化特性[J]. *吉首大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(1): 49–55. [LI X, YU J, YU Z S, et al. Ultrasound-assisted extraction of bighead carp viscera oil and its physiochemical properties[J]. *Journal of Jishou University (Natural Science Edition)*, 2017, 38(1): 49–55.]
- [29] 高娟, 楼乔明, 杨文鸽, 等. 超声辅助提取鲑鱼肝脏油脂及其脂肪酸组成分析[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(2): 53–56, 61. [GAO J, LOU Q M, YANG W G, et al. Ultrasonic-assisted extraction of oil from squid liver and analysis of fatty acid composition[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2014, 29(2): 53–56, 61.]
- [30] 单钱艺. 中华鳖加工副产物中油脂加工精炼及抗氧化的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023. [SHAN Q Y. Research on oil refining and anti-oxidation in by-products of Chinese Softshell Turtle[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.]
- [31] 朱晋莹. 茶叶籽制油过程中油的品质变化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013. [ZHU J X. Research on the quality change of tea seed oil in oil extraction process[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.]
- [32] 宋恭帅, 张蒙娜, 彭茜, 等. 不同贮藏温度下鱼油品质的变化[J]. *食品科学*, 2018, 39(21): 237–244. [SONG G R, ZHANG M N, PENG Q, et al. Quality changes in crude and refined fish oil at different storage temperatures[J]. *Food Science*, 2018, 39(21): 237–244.]
- [33] 栾霞, 祖丽亚, 樊铁. 食用油脂中 p-茴香胺值的测定[J]. *中国油脂*, 2006, 31(11): 38–40. [LUAN X, ZU Y L, FAN T. Determination of p-anisidine value for edible oils and fats[J]. *China Oils and Fats*, 2006, 31(11): 38–40.]
- [34] 张廷秀, 张建全, 臧秀瑞, 等. 鱼油多不饱和脂肪酸的制备及降脂功能研究[J]. *食品工业*, 2023, 44(5): 96–99. [ZHANG Y X, ZHANG J Q, ZANG X R, et al. Study on the preparation of polyunsaturated fatty acids from fish oil and their blood lipid reducing function[J]. *Food Industry*, 2023, 44(5): 96–99.]
- [35] BAKER J E, MILES A E, BURDGE C G, et al. Metabolism and functional effects of plant-derived omega-3 fatty acids in humans[J]. *Progress in Lipid Research*, 2016, 64: 30–56.]
- [36] BHARDWAJ S, PASSI J S, MISRA A. Overview of trans fatty acids; Biochemistry and health effects[J]. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 2011, 5(3): 161–164.]
- [37] TAN J, XU J. Applications of electronic nose (E-nose) and electronic tongue (E-tongue) in food quality-related properties determination: A review[J]. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2020, 4(1): 104–115.]
- [38] CHEN H, HUO D X, ZHANG J L, et al. Gas recognition in E-nose system: A review[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2022, 16(2): 169–184.]