

超声波辅助酶法提取草鱼内脏鱼油工艺优化 及脂肪酸组成分析

Study on ultrasonic assisted enzymatic extraction of grass carp
visceral oil and analysis of its fatty acid composition

王正云 刘子潇 展跃平

WANG Zhengyun LIU Zixiao ZHAN Yueping

(江苏农牧科技职业学院, 江苏 泰州 225300)

(*Jiangsu Agri-animal Husbandry Vocational College, Taizhou, Jiangsu 225300, China*)

摘要:目的:优化草鱼内脏鱼油提取工艺。方法:以草鱼内脏为原料,采用超声波辅助酶法提取鱼油,考察酶的种类、酶添加量、酶解时间、酶解温度、超声波处理时间以及超声波处理功率对鱼油提取率的影响。结果:超声波辅助酶法提取鱼油的最佳工艺条件为采用中性蛋白酶水解,酶添加量 2.5%、酶解时间 2 h、酶解温度 45 ℃、超声波处理功率 50 W、超声波处理时间 30 min,此时鱼油提取率为 68.4%。采用气质联用法共检测出 27 种脂肪酸,其中饱和脂肪酸 10 种,占总脂肪酸含量的 21.12%,主要为棕榈酸和硬脂酸;单不饱和脂肪酸 7 种,占总脂肪酸含量的 54.68%,主要为油酸、棕榈油酸和二十碳一烯酸;多不饱和脂肪酸 10 种,占总脂肪酸含量的 24.20%,主要为亚油酸。结论:与单独酶法提取相比,超声波辅助酶提取草鱼内脏鱼油,鱼油提取得率有明显提高。

关键词:草鱼内脏;鱼油;超声波辅助酶解;提取率;脂肪酸组成

Abstract: Objective: This study aimed to optimize the extraction process of visceral fish oil from grass carp. **Methods:** Using grass carp viscera as raw material, fish oil was extracted by using ultrasonic assisted enzyme method. The effects of enzyme type, enzyme addition amount, enzymatic hydrolysis time, enzymatic hydrolysis temperature, ultrasonic treatment time, and ultrasonic treatment power on the extraction rate of fish oil were investigated. **Results:** The optimal process conditions for ultrasonic assisted enzymatic extraction of fish oil were neutral protease hydrolysis, enzyme addition of 2.5%, enzymatic hydrolysis time of 2 hours, enzymatic hydrolysis temperature of

45 ℃, ultrasonic treatment power of 50 W, and ultrasonic treatment time of 30 minutes. At this time, the extraction rate of fish oil was 68.4%. A total of 27 fatty acids were detected by GC-MS, including 10 saturated fatty acids, accounting for 21.12% of the total fatty acid content, mainly palmitic acid and stearic acid; There were 7 kinds of monounsaturated fatty acids, accounting for 54.68% of the total fatty acids, mainly oleic acid, palmitoleic acid and eicosanoic acid; There were 10 kinds of polyunsaturated fatty acids, accounting for 24.20% of the total fatty acids, mainly linoleic acid. **Conclusion:** Compared with individual enzymatic extraction, ultrasonic assisted enzymatic extraction of grass carp visceral fish oil significantly improved the yield of fish oil extraction.

Keywords: grass carp visceral; fish oil; ultrasonic assisted enzymatic hydrolysis; fish oil extraction rate; fatty acid composition

2021 年,全国淡水产品产量 3 303.05 万 t,同比增长 2.11%,其中淡水鱼占绝大多数,在淡水鱼加工过程中鱼头、鱼皮、鱼骨及鱼内脏常常被丢弃,造成资源浪费和环境污染^[1-2]。草鱼是最常见的淡水鱼之一,据统计,每加工 100 t 草鱼大约会产生 30~50 t 副产物,其内脏含有丰富的油脂,含油率可达 20% 以上。鱼油中富含多种对人体健康有利的功能性成分,包括二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)等多不饱和脂肪酸,具有非常高的营养价值,可调节血脂、预防老年痴呆、提高记忆力、提高机体免疫力等^[3-5]。

目前,鱼油的提取方法主要包括蒸煮法、隔水蒸煮法、热水提取法、低温提油法、酶法等。酶解法提取鱼油是在鱼或鱼的加工副产物水解过程中加入蛋白酶,破坏蛋白质与脂肪之间关系,使脂肪游离出来,从而实现对鱼

基金项目:泰州市农业科技支撑计划项目(编号:TN202004)

作者简介:王正云(1976—),女,江苏农牧科技职业学院教授,硕士。E-mail:603703304@qq.com

收稿日期:2022-10-17 改回日期:2023-05-08

油的提取,相对于蒸煮法、热水提取法等传统水解法,酶解法不仅提取效率较高,而且酶解反应条件温和、对鱼油中的功能性成分破坏小,可大大提高鱼制品的附加值^[6-7]。

赵保堂等^[8]以虹鳟鱼内脏为原料,采用超声波辅助法提取虹鳟鱼油,提取率可达 95.10%;汪学荣等^[9]利用超声波辅助提取三文鱼油,提取率达 92.60%;曹璇等^[10]以金鲳鱼骨为原料,采用超声波辅助稀碱水解法提取金鲳鱼骨油,提取率为 80.51%。而利用超声波辅助酶法提取草鱼内脏中鱼油的研究尚未见报道。研究拟采用超声波辅助酶法对草鱼内脏鱼油提取工艺进行优化,并通过气相色谱-质谱联用法测定草鱼内脏鱼油中的脂肪酸组成,以期为提高草鱼下脚料的高值化利用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 主要材料与试剂

草鱼:市售;

中性蛋白酶、胰蛋白酶、木瓜蛋白酶、碱性蛋白酶:

1 000 U/g,上海伯奥生物科技有限公司;

37 种脂肪酸混合标准品:美国 Sigma 公司;

其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

恒温水浴锅:SSW-420-2S 型,苏州江东精密仪器有限公司;

组织捣碎机:DS-1 型,上海精密仪器仪表有限公司;

酸度计:EL20K 型,梅特勒-托利多仪器有限公司;

电子天平:AL204 型,梅特勒-托利多仪器有限公司;

超声波设备:KQ-300VSM 型,昆山超声仪器有限公司;

旋转蒸发仪:RE-52D 型,苏州江东精密仪器有限公司;

高速大容量离心机:Centrifuge 5810R 型,德国艾本德公司;

气相色谱-质谱联用仪:Trace1310 ISQ 型,德国 Thermo 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 鱼内脏处理 刚宰杀的草鱼内脏,去除鱼胆、鱼肠等残留物,使用蒸馏水清洗干净,并用纱布将水分沥干,捣碎,搅拌均匀后放置于保鲜袋内,于 0~4 ℃ 冷藏备用^[7-9]。

1.3.2 草鱼内脏鱼油提取工艺 称取 50 g 草鱼内脏样品于 200 mL 耐高温密封袋中,按固液比($m_{\text{样品}} : m_{\text{蒸馏水}}$)为 1 : 1 加入无 CO₂ 蒸馏水,使用缓冲溶液将 pH 调至 7.0,加入 2.5% 蛋白酶,混匀,酶解温度为 45 ℃,超声处理功率为 50 W,超声处理时间为 30 min^[10-11]。超声处理后,将样品取出并于 45 ℃ 保温酶解 2 h(每 10 min 摇匀一次)。100 ℃ 水浴灭酶处理,4 000 r/min 离心 15 min,用

胶头滴管吸取离心管内上层油脂相,得到草鱼内脏粗制鱼油^[12]。

1.3.3 草鱼内脏精制鱼油制备 参照文献^[12-13]并修改。

(1) 脱胶:将草鱼内脏粗制鱼油于 80 ℃ 水浴并不断搅拌,按鱼油质量的 1% 加入 80% 磷酸,搅拌 1 min,5 000 r/min 离心 10 min,用胶头滴管吸取漂浮在上层的油状液体,即脱胶鱼油。

(2) 脱酸:50 ℃ 水浴加热脱胶鱼油,按鱼油质量的 0.5% 加入 12% KOH 溶液,搅拌均匀,70 ℃ 水浴 20 min,离心,去除固体沉淀后用适量热去离子水除去残留皂,重复 1 次,4 000 r/min 离心 10 min,用胶头滴管吸出上层淡黄色油状液体,得脱酸鱼油。

(3) 脱色:将脱酸鱼油于 70 ℃ 水浴,按鱼油质量的 2% 加入活性炭,用玻璃棒搅拌 0.5 h,抽滤,重复 3 次,直至活性炭完全滤出,得脱色鱼油。

(4) 脱臭:脱色鱼油于 50 ℃ 真空干燥箱,真空脱臭 30 min。

1.3.4 鱼油提取率计算 根据文献^[14],按式(1)计算鱼油得率。

$$X = m_2 / m_1 \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

X——草鱼内脏鱼油提取率,%;

m_1 ——草鱼内脏质量,g;

m_2 ——提取的草鱼内脏鱼油质量,g。

1.3.5 蛋白酶的筛选 选用 4 种蛋白酶(中性蛋白酶、木瓜蛋白酶、胰蛋白酶和碱性蛋白酶)、酶添加量占鱼油质量的 2%、酶解时间 2.0 h、按表 1 进行酶解,筛选出最合适的蛋白酶。

表 1 蛋白酶的酶解温度和 pH 值

Table 1 Enzymatic hydrolysis temperature and pH value of different proteases

酶种类	最适 pH 值	最适温度/℃
胰蛋白酶	8.0	50
木瓜蛋白酶	7.0	50
碱性蛋白酶	8.0	55
中性蛋白酶	7.0	45

1.3.6 单因素试验

(1) 酶添加量:固定酶解温度 45 ℃,超声波处理功率 100 W,超声波处理时间 30 min,酶解时间 2 h,考察酶添加量(0.5%,1.0%,1.5%,2.0%,2.5%,3.0%)对鱼油提取率的影响。

(2) 酶解时间:固定酶添加量 2%,酶解温度 45 ℃,超声波处理功率 100 W,超声波处理时间 30 min,考察酶

解时间(0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 h)对鱼油提取率的影响。

(3) 酶解温度: 固定酶添加量 2%, 超声波处理功率 100 W, 超声波处理时间 30 min, 酶解时间 2 h, 考察酶解温度(35, 40, 45, 50, 55, 60 ℃)对鱼油提取率的影响。

(4) 超声波处理时间: 固定酶添加量 2%, 酶解温度 45 ℃, 超声波处理功率 100 W, 酶解时间 2 h, 考察超声波处理时间(10, 20, 30, 40, 50, 60 min)对鱼油提取率的影响。

(5) 超声波处理功率: 固定酶添加量 2%, 酶解温度 45 ℃, 超声波处理时间 30 min, 酶解时间 2 h, 考察超声波处理功率(50, 100, 150, 200, 250, 300 W)对鱼油提取率的影响。

1.3.7 正交试验设计 根据单因素试验结果, 选取酶添加量、酶解温度、酶解时间、超声波处理功率进行 $L_9(3^4)$ 正交试验设计。

1.3.8 脂肪酸组成分析 向草鱼内脏鱼油中加入 2 mL 2% 的氢氧化钠—甲醇溶液, 85 ℃ 水浴 0.5 h, 加入 3 mL 14% 的三氟化硼甲醇溶液, 85 ℃ 水浴 0.5 h, 向离心管中加入 1 mL 正己烷, 震荡萃取 2 min, 静置 1 h。从分层后的离心管中吸取 100 μ L 上层清液, 用正己烷定容至 1 mL, 用 0.45 μ m 滤膜过滤, 供气相色谱—质谱测定。

1.3.9 脂肪酸的气相色谱—质谱分析

(1) 气相色谱条件: HP-88 色谱柱(100 m \times 0.25 mm \times 0.20 μ m); 进样口温度 240 ℃; 程序升温为 100 ℃ 保持 15 min, 以 15 ℃/min 升温至 190 ℃ 保持 25 min, 以 2.5 ℃/min 升温至 235 ℃ 保持 4 min; 载气流速 1.0 mL/min, 不分流, 进样量 1 μ L。

(2) 质谱条件: 电离方式 EI, 电子能量 70 eV; 离子源温度 280 ℃; 传输线温度 280 ℃; 溶剂延迟时间 5.00 min。

1.4 数据处理

所有试验均平行 3 次, 以平均值 \pm 标准差表示, 运用 SPSS 17.0 软件对数据进行显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 酶种类的选择

由图 1 可知, 4 种蛋白酶中草鱼内脏粗鱼油提取率最高的是中性蛋白酶, 其次为胰蛋白酶和碱性蛋白酶, 木瓜蛋白酶的提取效果最差, 因此选择中性蛋白酶提取草鱼内脏鱼油。

2.2 单因素试验

2.2.1 酶添加量 由图 2 可知, 鱼油提取率随酶添加量的增加呈先高后低的变化趋势, 当酶添加量为 0.5% ~ 2.0% 时, 鱼油提取率逐渐升高, 可能是随着酶添加量的增加, 与底物的接触越来越充分, 释放出的鱼油也越来越多, 酶解一定时间后, 两者之间完全结合, 鱼油提取率达

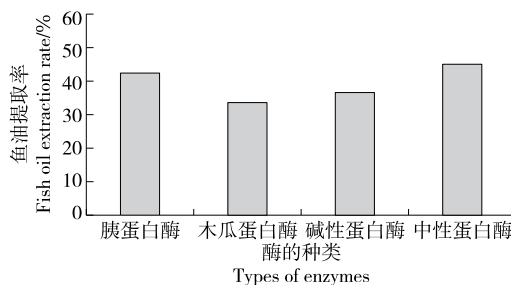


图 1 酶种类对内脏鱼油提取率的影响

Figure 1 Effects of different enzymes on visceral fish oil extraction rate

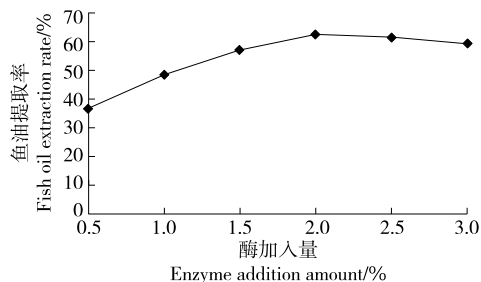


图 2 酶添加量对内脏鱼油提取率的影响

Figure 2 Effects of enzyme addition on visceral fish oil extraction rate

到最高。当酶添加量 > 2% 时, 鱼油提取率随酶添加量的增加略有下降, 可能是因为酶添加量过多, 对酶解本身具有负面影响, 导致蛋白酶活性下降。综合考虑, 选择酶添加量为 2%。

2.2.2 酶解时间 由图 3 可知, 草鱼内脏粗鱼油提取率随酶解时间的延长不断升高, 当酶解时间为 2~3 h 时, 草鱼内脏粗鱼油的提取率变化较小。这主要是酶与底物的结合程度随酶解时间的延长越来越充分, 使得蛋白质和脂肪之间的结合被打破得越来越彻底, 脂肪进入游离状态^[15-16]。但随着酶解时间的延长, 鱼油颜色逐渐加深, 可能是过长的酶解时间会加剧鱼油中多不饱和脂肪酸的氧化, 导致草鱼内脏鱼油品质下降, 结合实际确定最佳酶解时间为 2 h。

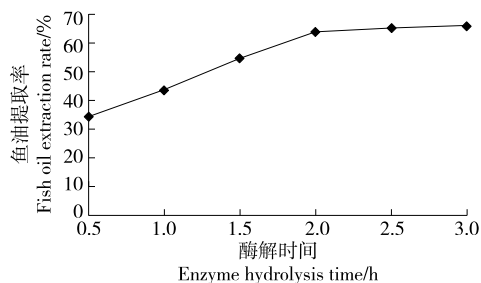


图 3 酶解时间对内脏鱼油提取率的影响

Figure 3 Effects of enzymatic hydrolysis time on extraction rate of visceral fish oil

2.2.3 酶解温度 由图4可知,酶解温度较低时,草鱼内脏粗鱼油提取率较低,酶解温度升高后,蛋白酶能更有效地分解蛋白质,大量的鱼油开始释放出来,鱼油提取率整体呈先上升后下降的趋势,当酶解温度为45℃时,鱼油提取率最高。这是因为酶解温度对草鱼内脏鱼油提取率具有双方面的影响,酶解温度的升高普遍加速了分子热运动,对提高草鱼内脏粗鱼油提取率有积极作用,但一旦温度超过酶解所能承受的范围,酶蛋白就会发生变性,从而使酶活性大大降低,甚至失去活性。因此,较佳酶解温度为45℃。

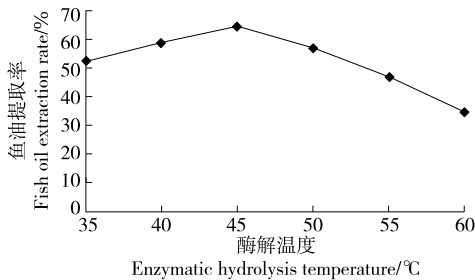


图4 酶解温度对内脏鱼油提取率的影响

Figure 4 Effects of hydrolysis temperature of enzyme on visceral fish oil extraction rate

2.2.4 超声波处理时间 由图5可知,当超声波处理时间为10~30 min时,鱼油提取率随超声波处理时间的延长不断上升,当超声波处理时间为30 min时,鱼油提取率达到最大值。继续进行超声波处理,鱼油得率则随处理时间的增加不断下降,可能是因为超声波处理时间过短,不能使酶与底物充分接触,导致酶解不充分,鱼油提取率低;随着超声波处理时间的延长,酶与底物充分接触,越来越有利于蛋白酶的酶解反应,鱼油提取率逐步升高。但超声波处理时间过长可能会导致蛋白酶的酶活性降低,使鱼油提取率下降^[17-18]。综上,超声波处理时间取30 min。

2.2.5 超声波处理功率 由图6可知,当超声波处理功率为50~100 W时,鱼油提取率随超声波处理功率的增大而升高,当超声波处理功率为100 W时,草鱼内脏鱼油

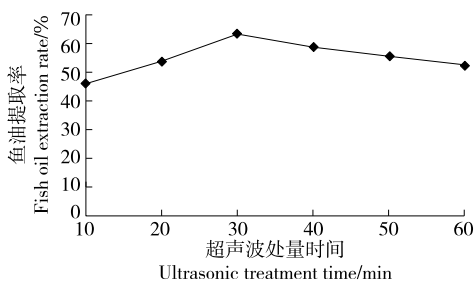


图5 超声波处理时间对内脏鱼油提取率的影响

Figure 5 Effects of ultrasonic treatment time on visceral fish oil extraction rate

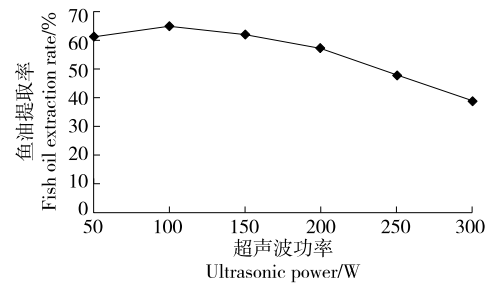


图6 超声波处理功率对内脏鱼油提取率的影响

Figure 6 Effects of ultrasonic power on visceral fish oil extraction rate

提取率可达64.8%,可能是因为超声波能加强细胞的空化作用,同时还可促进鱼油的扩散,从而增加鱼油的提取率。当超声波处理功率>100 W时,草鱼内脏鱼油提取率则随超声波处理功率的增加呈下降趋势,可能是因为超声波处理功率为100 W时,溶剂与产物的运动速度加快,浓度差发生变化,传质动力增强,而超声波处理功率过高会改变酶的空间构象而降低酶活性或使其失活,从而导致鱼油提取率下降,因此最佳超声功率为100 W。

2.3 正交试验优化

根据单因素试验结果,选择酶添加量、酶解时间、酶解温度、超声波处理功率进行四因素三水平正交试验优化草鱼内脏鱼油提取工艺,试验因素水平见表2,试验设计及结果见表3。

由表3可知,各因素对鱼油提取率的影响依次为酶解温度>酶添加量>超声波处理功率>酶解时间,最佳提取工艺为A₃B₂C₂D₁,即酶添加量2.5%、酶解时间2 h、酶解温度45℃、超声波处理功率50 W。根据确定的最佳内脏鱼油提取工艺进行验证实验,得到鱼油提取率为68.4%(n=3)。

由表4可知,酶解温度和酶加入量对草鱼内脏鱼油提取率影响显著(P<0.05),酶解时间和超声波处理功率对草鱼内脏鱼油提取率影响不显著,与极差分析的结果基本相符。

2.4 草鱼内脏鱼油脂肪酸组成分析

由表5可知,草鱼内脏鱼油中共有27种脂肪酸,主要为C₁₂~C₂₄脂肪酸,在草鱼内脏鱼油中含量最多的依

表2 正交试验因素水平表

Table 2 Four factor three level orthogonal experimental design table

水平	A 酶添加量/%	B 酶解时间/h	C 酶解温度/℃	D 超声波处理功率/W
1	1.5	1.5	40	50
2	2.0	2.0	45	100
3	2.5	2.5	50	150

表 3 正交分析设计及结果

Table 3 Results of orthogonal analysis

试验号	A	B	C	D	鱼油提取率/%
1	1	1	1	1	59.0
2	1	2	2	2	62.9
3	1	3	3	3	56.4
4	2	1	2	3	63.6
5	2	2	3	1	60.0
6	2	3	1	2	57.1
7	3	1	3	2	57.8
8	3	2	1	3	65.5
9	3	3	2	1	67.4
k_1	59.5	60.1	60.5	62.2	
k_2	60.2	62.8	64.6	59.3	
k_3	63.6	60.3	58.1	61.9	
R	4.1	2.7	6.5	2.9	

表 4 正交试验方差分析[†]

Table 4 Analysis of variance results of orthogonal test

变异来源	偏差平方和	自由度	均方	F 值	F 临界值	显著性
A	29.34	2	14.67	24.05	99($\alpha=0.01$)	*
B	1.17	2	0.59	0.96	19($\alpha=0.05$)	
C	65.91	2	32.96	54.03		*
D	15.11	2	7.56	12.39		
误差	0.61	2	0.31			
总变异	110.92	8				

[†] “* *”表示在 $\alpha=0.01$ 时差异极显著;“*”表示在 $\alpha=0.05$ 时差异显著。

次为油酸、亚油酸和棕榈酸,其中有 10 种是饱和脂肪酸,在总脂肪酸中含量占比为 21.12%,主要为棕榈酸和硬脂酸,而棕榈酸含量最高,在总脂肪酸中含量占比为 15.28%;单不饱和脂肪酸有 7 种,在总脂肪酸中含量占比为 54.68%,主要为油酸、棕榈油酸和二十碳一烯酸,而油酸含量最高,达到总脂肪酸含量的 50.11%;多不饱和脂肪酸有 10 种,在总脂肪酸中含量占比为 24.20%,主要为亚油酸,在总脂肪酸中含量占比为 19.71%。这与郭休玉等^[19]的结果相比,多了 3 种微量的二十二碳以上的长链脂肪酸,如二十三碳酸、二十二碳二烯酸和二十四碳一烯酸,原因可能是乙醇是极性较强的有机溶剂,而鱼油极性较弱,提取不完全,同时试验环境、试验条件和脂肪酸混标也不一样。

3 结论

试验表明,超声波辅助酶提取草鱼内脏鱼油的最优

表 5 草鱼内脏鱼油脂肪酸组成及相对含量

Table 5 Fatty acid composition and relative content of visceral fish oil of grass carp

脂肪酸名称	脂肪酸代号	相对含量/%	出峰时间/min
月桂酸	C _{12:0}	0.008 3	24.92
肉豆蔻酸	C _{14:0}	0.579 0	27.63
肉豆蔻油酸	C _{14:1}	0.008 9	28.65
十五碳酸	C _{15:0}	0.077 0	28.97
棕榈酸	C _{16:0}	15.284 2	30.45
棕榈油酸	C _{16:1}	2.718 0	31.53
十七碳酸	C _{17:0}	0.148 8	32.10
硬脂酸	C _{18:0}	4.771 1	34.12
反式油酸	C _{18:1n9t}	0.156 5	35.03
油酸	C _{18:1n9c}	50.110 8	35.57
亚油酸	C _{18:2n6c}	19.708 0	37.93
花生酸	C _{20:0}	0.139 9	39.58
γ -亚麻酸	C _{18:3n6}	0.189 2	39.91
α -亚麻酸	C _{18:3n3}	1.121 5	41.28
二十碳一烯酸	C _{20:1}	1.574 9	41.73
二十碳二烯酸	C _{20:2}	0.659 3	45.48
二十二碳酸	C _{22:0}	0.053 0	48.07
二十碳三烯酸	C _{20:3n6}	0.251 0	48.38
二十碳三烯酸	C _{20:3n3}	0.045 8	50.06
芥酸	C _{22:1n9}	0.089 8	50.62
花生四烯酸	C _{20:4n6}	0.873 7	50.37
二十三碳酸	C _{23:0}	0.023 3	52.37
二十二碳二烯酸	C _{22:2}	0.030 8	54.17
二十碳五烯酸	C _{20:5n3}	0.266 0	54.54
二十四碳酸	C _{24:0}	0.030 8	56.22
二十四碳一烯酸	C _{24:1}	0.024 2	58.23
二十二碳六烯酸	C _{22:6n3}	1.056 1	63.02

提取条件为采用中性蛋白酶,酶添加量为 2.5%、酶解时间为 2 h、酶解温度为 45 ℃、超声波处理功率为 50 W,超声波处理时间为 30 min,此条件下鱼油提取率可达 68.4%。草鱼内脏鱼油中共含有 27 种脂肪酸,其中饱和脂肪酸 10 种,占总脂肪酸含量的 21.12%,主要为棕榈酸和硬脂酸;单不饱和脂肪酸 7 种,占总脂肪酸含量的 54.68%,主要为油酸、棕榈油酸和二十碳一烯酸;不饱和脂肪酸 10 种,占总脂肪酸含量的 24.20%,主要为亚油酸。后续可对草鱼内脏鱼油脱腥、保藏性能及新型内脏鱼油制品等进行研究。

参考文献

[1] 王文婷, 苏博, 杜丹丹, 等. 酶解法提取鲫鱼下脚料中鱼油的工

- 艺研究[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2019, 33(3): 48-52.
- WANG W T, SU B, DU D D, et al. Study on the enzymatic extraction of fish oil from crucian carp waste[J]. Journal of Lanzhou University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2019, 33(3): 48-52.
- [2] VERMA P. Enzymes in valorization of waste: Enzymatic hydrolysis of waste for development of value-added products[M]. Boca Raton: CRC Press, 2022: 268.
- [3] GUI L, CHEN S, WANG H, et al. ω -3 PUFAs alleviate high-fat diet-induced circadian intestinal microbes dysbiosis[J]. Mol Nutr Food Res, 2019, 63(22): e1900492.
- [4] CHEN R, ZUO Z, LI Q, et al. DHA substitution overcomes high-fat diet-induced disturbance in the circadian rhythm of lipid metabolism[J]. Food Funct, 2020, 11(4): 3 621-3 631.
- [5] GHASEMI F S, WANG F L, SINCLAIR A J, et al. How does high DHA fish oil affect health? A systematic review of evidence[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2019, 59(11): 1 684-1 727.
- [6] 张雅婷, 王芳, 曹珍珍, 等. 草鱼内脏油脂的提取方法及贮藏特性研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 121-125.
- ZHANG Y T, WANG F, CAO Z Z, et al. Study on the extraction method and storage characteristics of visceral oil of grass carp[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(6): 121-125.
- [7] JOHNSON A W, I SHOLA L S, BOLUWATIFE O D, et al. Omega 3 fatty acids favour lipid and bone metabolism in orchidectomised rats[J]. Clinical Nutrition Open Science, 2021, 35: 67-76.
- [8] 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. Ultrasonic assisted extraction of rainbow trout oil and analysis of its fatty acid composition[J]. China Oil and Fat, 2019, 44(3): 20-24.
- [9] 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. Ultrasonic assisted extraction process and fatty acid composition analysis of salmon oil[J]. China Oil and Fat, 2019, 44(2): 23-26.
- [10] 曹璇, 申铨日. 超声波辅助稀碱水解法提取金鲳鱼骨油的工艺优化与脂肪酸组成分析[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 280-285.
- CAO X, SHEN X R. Optimization of ultrasonic assisted extraction of golden pomfret bone oil by dilute alkali hydrolysis and analysis of fatty acid composition[J]. Food Science, 2017, 38(18): 280-285.
- [11] 刘昊, 张涛铄, 张彤瑶, 等. 超声波辅助水酶法提取鹿油的工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. 经济动物学报, 2020, 24(1): 36-41.
- LIU H, ZHANG T S, ZHANG T Y, et al. Optimization of ultrasonic assisted aqueous enzymatic extraction of deer oil and analysis of fatty acid composition [J]. Journal of Economic Zoology, 2020, 24(1): 36-41.
- [12] 刘闪, 刘良忠, 翟路, 等. 白鲢鱼头中鱼油的提取、精炼及 EPA、DHA 测定[J]. 食品与机械, 2013, 29(6): 158-161, 170.
- LIU S, LIU L Z, ZHAI L, et al. Extraction and refining of fish oil from silver carp head and determination of EPA and DHA[J]. Food & Machinery, 2013, 29(6): 158-161, 170.
- [13] MONJURUL H, SHARMIN S, SHAFI A, et al. Phospholipids from marine source: Extractions and forthcoming industrial applications [J]. Journal of Functional Foods, 2021, 80: 104448.
- [14] 陈军, 赵立, 朱红波, 等. 响应面法优化草鱼内脏油脂的工艺及品质评价[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(11): 147-152.
- CHEN J, ZHAO L, ZHU H B, et al. Optimization of technology and quality evaluation of visceral oil of grass carp by response surface methodology[J]. Food and Fermentation Industry, 2013, 39(11): 147-152.
- [15] 刘俭, 蔡永国, 张兵, 等. 超声波辅助酶法提取沙棘果油及其体外抗氧化能力分析[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(10): 87-94.
- LIU J, CAI Y G, ZHANG B, et al. Ultrasonic assisted enzymatic extraction of seabuckthorn fruit oil and its antioxidant capacity in vitro[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2019, 34(10): 87-94.
- [16] 彭常梅, 方锐琳, 赖敏, 等. 不同提取方法对牡丹籽油品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(3): 104-111.
- PENG C M, FANG R L, LAI M, et al. Effects of different extraction methods on the quality of peony seed oil [J]. Food Science, 2021, 42(3): 104-111.
- [17] 刘雅谦, 李琳, 孙万成, 等. 藜麦甾醇提取工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(15): 145-151.
- LIU Y Q, LI L, SUN W C, et al. Optimization of the extraction process of veratrol and analysis of fatty acid composition[J]. Food Research and Development, 2021, 42(15): 145-151.
- [18] CHANIOTI S, TZIA C. Optimization of ultrasound-assisted extraction of oil from olive pomace using response surface technology: Oil recovery, unsaponifiable matter, total phenol content and antioxidant activity [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 79: 178-179.
- [19] 郭休玉, 何兰. 草鱼内脏油乙醇提取及其脂肪酸组成分析[J]. 水产科技情报, 2020, 47(2): 116-120.
- GUO X Y, HE L. Ethanol extraction and fatty acid composition analysis of grass carp viscera oil [J]. Aquatic Science and Technology Information, 2020, 47(2): 116-120.