

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

曹璇, 申铨日*

(海南大学食品学院, 海南 海口 570228)

摘要:以金鲳鱼骨为原料,在对金鲳鱼骨中主要营养成分(水分、粗蛋白、粗脂肪和粗灰分)进行分析检测的基础上,利用单因素与正交试验相结合的方法优化金鲳鱼骨油稀碱水解(超声波辅助)法的提取工艺,并采用气相色谱-质谱法对最佳提取工艺所得的金鲳鱼骨油的脂肪酸组成进行测定分析,评价其营养价值。结果表明,金鲳鱼骨中水分、粗脂肪、粗蛋白和粗灰分质量分数分别为50.20%、29.97%、12.00%和7.63%。影响金鲳鱼骨油提取率的4个主要因素为液料比、pH值、提取温度和提取时间。当液料比为4:1(mL/g)、pH 9、提取温度60℃、提取时间30 min、超声功率500 W时,金鲳鱼骨油的提取率为80.51%,该条件为稀碱水解(超声波辅助)法提取金鲳鱼骨油的最佳工艺参数。采用气相色谱-质谱联用技术对金鲳鱼骨油的脂肪酸进行定性、定量分析可知:金鲳鱼骨油中不饱和脂肪酸含量(68.44%)显著高于饱和脂肪酸含量(31.56%);单不饱和脂肪酸总量(37.99%)高于多不饱和脂肪酸总量(30.45%);其中油酸(27.86%)和棕榈酸(21.46%)含量最高,富含亚油酸、二十二碳六烯酸和二十碳五烯酸。金鲳鱼骨作为鱼类下脚料营养丰富,具有良好保健作用和经济价值,颇具开发利用前景。

关键词:金鲳鱼骨;超声波辅助提取;脂肪酸;气相色谱-质谱联用分析;稀碱水解

Optimization of Ultrasonic-Assisted Dilute Alkali Extraction of *Trachinotus ovatus* Bone Oil and Analysis of Its Fatty Acid Composition

CAO Xuan, SHEN Xuanri*

(College of Food, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: In this study, the main nutritional components (moisture, crude protein, crude fat and ash contents) of *Trachinotus ovatus* bone was firstly determined, and then the optimization of the ultrasonic-assisted extraction of *T. ovatus* bone oil using dilute alkali as the extraction solvent was investigated using one-factor-at-a-time and orthogonal array design methods. The fatty acid composition of the fish bone oil was analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) in order to evaluate its nutritional value. The results indicated that the moisture, crude fat, crude protein and ash contents of *T. ovatus* bone were 50.20%, 29.97%, 12.00% and 7.63%, respectively. Solvent-to-solid ratio, pH, hydrolysis temperature and hydrolysis time were identified as important factors that affected the extraction efficiency. The maximum oil yield of 80.51% was achieved after 30 min extraction at 60 °C and pH 9 with a solvent-to-solid ratio of 4:1 (mL/g) under the condition of 500 W power. The qualitative and quantitative analysis indicated that the content of unsaturated fatty acids in the oil was 68.44%, which was much higher than the content of saturated fatty acids (31.56%). Moreover, the content of monounsaturated fatty acids (37.99%) was higher than the content of polyunsaturated fatty acids (30.45%). Oleic acid (27.86%) and cetylic acid (21.46%) were the most dominant among the identified fatty acids. Additionally, the oil was rich in oleic acid, eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA). It was indicated that *T. ovatus* bone as a fish processing waste was rich in nutrients, and had health benefits and economic value, thereby being worthy of exploitation and utilization.

Key words: *Trachinotus ovatus* bone; ultrasonic-assisted extraction; fatty acid; GC-MS; dilute alkaline hydrolysis

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201718043

中图分类号: TS254.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2017)18-0280-06

收稿日期: 2016-06-12

作者简介: 曹璇(1994—),女,本科,研究方向为水产品加工。E-mail: 452353248@qq.com

*通信作者: 申铨日(1968—),男,教授,博士,研究方向为海洋生物资源利用、食品科学。E-mail: shenxuanri2009@163.com

引文格式:

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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201718043. <http://www.spkx.net.cn>

CAO Xuan, SHEN Xuanri. Optimization of ultrasonic-assisted dilute alkali extraction of *Trachinotus ovatus* bone oil and analysis of its fatty acid composition[J]. Food Science, 2017, 38(18): 280-285. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201718043. <http://www.spkx.net.cn>

金鲳鱼 (*Trachinotus ovatus*), 学名卵形鲳鲹, 地方名称黄腊鲳^[1], 是一种重要的海洋鱼类, 金鲳鱼主要在东南亚、澳大利亚、日本、东非以及大西洋分布较为广泛。自从二十世纪九十年代起, 金鲳鱼已经成为了一种重要的海洋经济鱼类, 尤其在新加坡、香港、台湾、中国大陆有很大的需求量^[2-3], 现被大量人工养殖于广东、广西、海南、福建南部沿海等地, 养殖周期为半年左右^[4-6]。金鲳鱼通体只有一根长刺, 肉质细嫩, 口感细滑鲜美, 多油脂而不腻, 深受消费者喜爱^[7]。

金鲳鱼中不饱和脂肪酸 (unsaturated fatty acids, UFA) 含量显著高于饱和脂肪酸 (saturated fatty acids, SFA) 含量; 单不饱和脂肪酸 (monounsaturated fatty acid, MUFA) 总量高于多不饱和脂肪酸 (polyunsaturated fatty acid, PUFA) 总量, 其中棕榈酸和油酸含量最高; 富含亚油酸、4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸 (docosahexaenoic acid, DHA) 和5,8,11,14,17-二十碳五烯酸 (eicosapentaenoic acid, EPA)^[8]。 ω -3系列多不饱和脂肪酸DHA与EPA能够降低胆固醇、防止血管凝固、预防高血压、降低血黏度、促进血液循环, 对疲劳综合症、痛风、风湿亦有疗效^[9], 还有促进大脑发育、抗炎抗肿瘤等生理作用, 对心脑血管系统的健康和神经系统的发育具有重要的意义^[10-13]。此外DHA与EPA也是水产类动物的必需脂肪酸, 并能改善畜禽类动物的免疫功能^[14], 有较好的食用价值、保健作用和综合开发利用价值^[15]。

自2003年来我国华南地区金鲳鱼养殖量逐渐上升, 2016年产量约15万 t^[16], 随着对金鲳鱼需求量的增加, 其鱼肉主要加工成生鲜或鱼糜制品, 加工过程中有大量下脚料产生, 尤其鱼骨被大量丢弃。这不仅对海洋渔业资源造成了巨大的浪费而且还造成了非常严重的环境污染^[17]。充分利用金鲳鱼加工废弃物对深度开发金鲳鱼的营养价值和保护环境有着重要的意义, 同时还可带来更大的经济效益。

目前有关金鲳鱼的已有研究较少, 主要集中于王娜^[18]、曹湛会等^[19]金鲳鱼鱼糜制品凝胶特性及有关鱼糜蛋白抗冻性能方面的研究, 以及谭小红^[20]、Hoang^[21]等关于金鲳鱼血清免疫学方面的研究, 暂未出现有关金鲳鱼骨加工利用及其营养探索方面的研究。鉴于此, 本实验着重研究金鲳鱼鱼骨的营养成分以及其骨油的提取工艺, 从而为金鲳鱼的营养学研究及其下脚料的开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

金鲳鱼 (*Trachinotus ovatus*) 购于海口市三西路农贸市场, 选取大小相对一致, 质量约1 kg/尾。石油醚、氯化钠、氢氧化钠、甲醇、氯仿、三氟化硼 (均为分析纯) 广州化学试剂厂。

1.2 仪器与设备

DK-8D型电热恒温水槽 金坛市科兴仪器厂; 远红外快速恒温干燥箱 上海跃进医疗器械厂; EL303型电子天平 上海精密仪器科学有限公司; 7890B-7000B型气相色谱-质谱 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 联用仪 (配有电子电离源及Mast Hunter Nist11数据处理系统) 美国安捷伦公司; Vortex Maximix II型涡旋仪 美国热电公司; 飞鸽牌Anke TDL-60B型高速离心机 上海安亭科学仪器厂; RE52-99型旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂; 超声波清洗仪 南京先欧仪器制造有限公司; FDU-2100型冷冻干燥机 艾朗科技国际贸易有限公司。

1.3 样品制备

将金鲳鱼宰杀后把鱼皮、鱼肉、内脏剔除干净, 取得包括头骨、脊椎骨、鱼刺在内的所有硬质骨, 反复用水清洗至完全无肉, 剪碎混匀, 真空冷冻干燥约16 h, 粉碎并放入-20℃冰箱备用。

提取工艺流程: 金鲳鱼骨样品→称质量→氢氧化钠溶液水解 (超声波辅助)→离心→静置→吸取油层→金鲳鱼骨油。

1.4 基本成分测定

金鲳鱼骨水分的测定参照GB 5009.3—2010《食品中水分的测定》恒温烘干法^[22]; 粗蛋白的测定参照GB 5009.5—2010《食品中蛋白质的测定》微量凯氏定氮法^[23]; 粗脂肪的测定参照GB/T 14772—2008《食品中粗脂肪的测定》索氏抽提法^[24]; 粗灰分的测定参照GB 5009.4—2010《食品中灰分的测定》马弗炉灼烧法^[25]。

1.5 骨油超声波辅助提取工艺

1.5.1 骨油提取率的测定

取冻干金鲳鱼骨粉末2.00 g, 加入适量氢氧化钠溶液 (一定液料比), 在适宜温度下加热一段时间水解, 超声波辅助提取, 随后趁热用离心机5 000 r/min离心10 min, 静置片刻, 趁热分离上层油脂, 得到粗鱼骨油, 计算金鲳鱼骨油提取率。

$$\text{金鲳鱼骨油提取率/\%} = \frac{\text{提取的鱼骨油质量}}{\text{原料中鱼骨油的质量}} \times 100$$

1.5.2 单因素试验

1.5.2.1 液料比的选择

pH 9.0、水解温度80 ℃、水解时间40 min、超声波功率600 W，液料比分别为2:1、4:1、6:1、8:1、10:1 (mL/g) 条件下提取鱼骨油。

1.5.2.2 pH值的选择

液料比6:1 (mL/g)、水解温度80 ℃、水解时间40 min、超声波功率600 W，pH值分别为7.0、8.0、9.0、10.0、11.0条件下提取鱼骨油。

1.5.2.3 水解温度的选择

液料比6:1 (mL/g)、pH 9.0、水解时间40 min、超声波功率600 W，水解温度分别为60、70、80、90、100 ℃条件下提取鱼骨油。

1.5.2.4 水解时间的选择

液料比6:1 (mL/g)、pH 9.0、水解温度80 ℃、超声波功率600 W，水解时间分别为10、20、30、40、50 min条件下提取鱼骨油。

1.5.2.5 超声波功率的选择

液料比6:1 (mL/g)、pH 9.0、水解温度80 ℃、水解时间40 min、超声波功率分别为400、500、600、700、800 W条件下提取鱼骨油。

1.5.3 正交优化试验设计

根据单因素试验，以鱼骨油提取率为考察指标，选择液料比、pH值、水解温度、水解时间4个因素，每个因素3个水平进行 $L_9(3^4)$ 正交试验，其他实验条件为超声波功率600 W、离心转速5 000 r/min、离心时间10 min。因素与水平设计见表1。

表1 $L_9(3^4)$ 正交试验因素与水平设计
Table 1 Factors and their levels used for orthogonal array design

水平	A液料比 (mL/g)	B pH	C水解温度/℃	D水解时间/min
1	2:1	8	60	20
2	4:1	9	70	30
3	6:1	10	80	40

1.6 骨油的脂肪酸组成的测定

参照GB/T 22223—2008《食品中总脂肪、饱和脂肪(酸)、不饱和脂肪(酸)的测定》^[26]，采用GC-MS联用法对样品进行脂肪酸组成分析。首先将金鲳鱼骨油样品进行甲酯化前处理，随后使用GC-MS联用仪对甲酯化后的鱼骨油进行分析。

1.6.1 甲酯化方法

称取15~40 mg粗脂质置于30 mL离心管内，添加15 mL的混合溶剂氯仿-甲醇-水(8:4:3, V/V)，涡旋混合5 min，25 ℃、4 000 r/min离心10 min，静置1 min，吸取下层有机相，操作2次，合并下层有机相，加入

0.2 倍体积的氯化钠盐溶液(质量分数为0.9%)，涡旋混合1 min，25 ℃ 4 000 r/min离心5 min；吸取下层有机相至螺口瓶中，放入通风橱中挥发干溶剂；加入3 mL的2 g/100 mL的氢氧化钾-甲醇溶液混合，拧紧瓶盖，在65 ℃水浴锅中加热1 h；加入3 mL的14 g/100 mL三氟化硼-甲醇溶液混合，拧紧瓶盖，65 ℃水浴锅加热1 h；取出冷却后，加入200 μL的饱和氯化钠溶液和2 mL的环己烷，涡旋混合1 min后，25 ℃、4 000 r/min离心5 min，静置1 min，收集上层有机相至气相样品瓶内^[27]。

1.6.2 色谱条件

HP-5MS毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)；升温程序：60 ℃保持2 min，以6 ℃/min上升至300 ℃，保持10 min；进样量1 μL；脉冲不分流进样；载气为氦气(He)；进样口温度250 ℃；检测器温度280 ℃。

1.6.3 质谱条件

电子电离源；电子能量70 eV；离子源温度250 ℃；接口温度250 ℃；传输线温度280 ℃；全扫描模式，质量扫描范围 m/z 20~450。脂肪酸的种类根据Mast Hunter Nist11数据库所提供的保留时间和质谱数据确定，对于每种脂肪酸的相对百分比含量采用峰面积归一化方法测定。

2 结果与分析

2.1 金鲳鱼骨主要营养成分

从表2可以看出，金鲳鱼骨中水分、粗脂肪、粗蛋白质、粗灰分的质量分数分别为50.20%、29.97%、12.00%、7.63%，与市场常见的鲑鳕鱼、鲱鱼、大西洋真鳕、虹鳟鱼及罗非鱼相比，脂肪含量最高，总蛋白含量和粗灰分含量偏低^[28]，这可能与金鲳鱼骨中骨刺少，中骨占的比例大有关，通常中骨内部含有较多的脂肪。由此可见，金鲳鱼骨是一种富含海洋鱼类油脂的加工副产品，有待于开发利用。

表2 金鲳鱼骨的基本成分
Table 2 Basic components of *Trachinotus ovatus* bone

成分	水分	粗脂肪	粗蛋白	粗灰分
质量分数/%	50.20±1.49	29.97±0.10	12.00±0.08	7.63±0.12

2.2 骨油提取单因素试验结果

2.2.1 液料比对骨油提取率的影响

由图1可知，当液料比在2:1~4:1 (mL/g)时，金鲳鱼骨油的提取率逐渐上升，对于一定质量的原料来说，溶剂用量的增加，会降低溶剂中金鲳鱼骨油的浓度，增加了金鲳鱼骨原料与溶剂接触界面处的浓度差，从而提高了传质速率，在一定时间内骨油提取率增大。液料比为4:1 (mL/g)时，骨油提取率增长最大；当液料比大于

4:1 (mL/g) 时, 溶剂用量增大到一定程度, 由于鱼骨中的油大部分已被提取出来, 继续增加溶剂用量, 提取率没有明显提高。当液料比大于8:1 (mL/g) 时, 提取率略微降低, 这可能是由于油水乳化导致。因此, 从经济角度考虑, 提取液料比以8:1 (mL/g) 为宜。

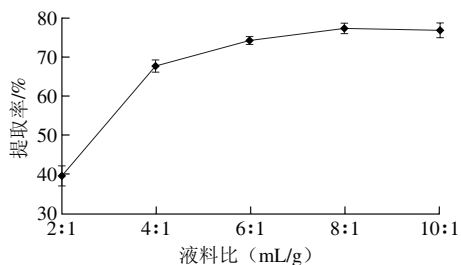


图1 液料比对骨油提取率的影响

Fig. 1 Effect of solvent-to-solid ratio on the extraction of bone oil

2.2.2 pH值对骨油提取率的影响

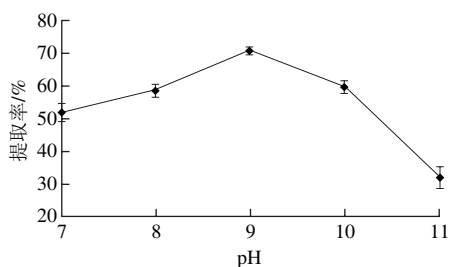


图2 pH值对骨油提取率的影响

Fig. 2 Effect of pH on the extraction of bone oil

由图2可知, 随着pH值的增高, 金鲳鱼骨油的提取率逐渐上升, 表明提高pH值可促进脂肪组织水解, 将更多的油脂释放出来。当pH值达到9.0时, 骨油提取率达到最高, 为70.80%。然而随着pH值的进一步提高, 鱼骨油的提取率反而降低, 这可能是由于碱性过强使鱼骨油发生水解生成游离的脂肪酸所致。因此, 鱼骨油提取pH值以9.0为宜。

2.2.3 水解温度对骨油提取率的影响

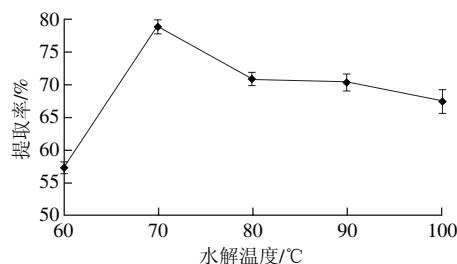


图3 水解温度对骨油提取率的影响

Fig. 3 Effect of hydrolysis temperature on the extraction of bone oil

由图3可知, 当水解温度为60~70 °C时, 高的反应温度能够提高蛋白质和脂肪的分离速度, 因此随着温度

的升高金鲳鱼骨油的提取率迅速增加, 温度为70 °C时提取率达到最大值为78.93%。但是水解温度过高会加快鱼油氧化, 降低其品质, 增加不必要的能耗。所以当温度大于70 °C时, 随着温度的升高鱼骨油的提取率逐渐降低。故水解温度以70 °C为宜。

2.2.4 水解时间对骨油提取率的影响

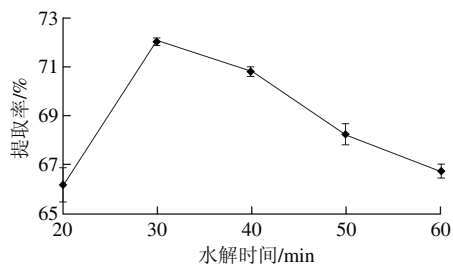


图4 水解时间对骨油提取率的影响

Fig. 4 Effect of hydrolysis time on the extraction of bone oil

由图4可知, 随着水解时间的延长鱼骨油的提取率迅速升高, 当水解时间为30 min时提取率达到最大值。而随着水解时间的继续增加, 鱼骨油的提取率有所降低。水解时间的延长可以使鱼骨油充分分离, 从而提高鱼油的提取率, 但水解时间过长可能使鱼骨油发生氧化和水解反应, 从而造成鱼油的损失。故水解时间以30 min为宜。

2.2.5 超声波功率对骨油提取率的影响

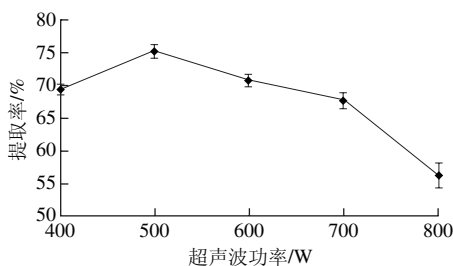


图5 超声波功率对骨油提取率的影响

Fig. 5 Effect of ultrasonic power on the extraction of bone oil

由图5可知, 当超声波功率为400~500 W之间时, 随着超声波功率的提高, 超声波对鱼骨的破碎程度增强, 金鲳鱼骨油提取率逐渐上升, 当超声波功率达到500 W时达到最大值。然而当超声波功率继续上升时骨油提取率反而减小。这可能是由于超声波具有无选择性的破坏作用, 高功率条件下, 空化作用不仅破碎细胞, 也破坏欲提取物质的分子结构, 对于特定的物质, 超声波作用的效果取决于超声波巩固率和提取物的结构与性质, 不同的提取物有不同的超声功率^[29], 同时也与超声声波产生的空化效应, 界面效应以及湍动效应有关^[30]。因此, 本实验条件下最佳超声波功率为500 W。

2.3 骨油提取正交优化试验结果

从表3可知, 就金鲳鱼骨油提取率而言, 各因素的

影响顺序为 $C>B>A>D$ ，即水解温度 $>$ pH值 $>$ 液料比 $>$ 水解时间。根据正交试验结果，由于因素 A 的1、2水平差异不大，因此从经济节约方面考虑，金鲳鱼骨油的最佳提取工艺为 $A_2B_2C_1D_2$ ，即液料比为4:1（mL/g）、pH 9.0、提取温度60℃、提取时间30 min。

表3 正交试验设计及结果

Table 3 Orthogonal array design with experimental results

编号	A液料比	B pH	C水解温度	D水解时间	提取率/%
1	1	1	1	1	69.97±0.98
2	1	2	2	2	71.71±1.92
3	1	3	3	3	65.27±2.13
4	2	1	2	3	67.87±1.49
5	2	2	3	1	76.28±1.53
6	2	3	1	2	78.01±0.89
7	3	1	3	2	71.24±1.35
8	3	2	1	3	79.75±1.17
9	3	3	2	1	71.20±1.89
k_1	68.983	69.693	75.910	72.483	
k_2	74.053	75.913	70.260	73.653	
k_3	74.063	71.493	70.930	70.963	
R	5.080	6.220	6.560	2.690	

注： K_i （ $i=1\sim3$ ）为各因素同一水平正交试验指标之和； R 为 K 值极差。

2.4 验证实验

在超时功率500 W条件下，采用2.3节中所得最佳工艺条件进行平行验证实验，结果见表4。

表4 验证实验结果

Table 4 Results of verification experiments

项目	实验1	实验2	实验3	平均值
提取率/%	80.23±0.87	79.98±1.05	81.32±1.52	80.51±1.01

由表4可知，验证实验中金鲳鱼骨油的提取率为（80.51±1.34）%，与正交试验中的最佳结果相近，因此液料比4:1（mL/g）、pH 9.0，提取温度60℃，提取时间30 min，超声波功率500 W为金鲳鱼骨油提取的最佳工艺，且该工艺具有良好的重复性和稳定性。

2.5 金鲳鱼骨油的脂肪酸组成及营养评价

2.5.1 金鲳鱼骨油的脂肪酸组成

表5 金鲳鱼骨油脂肪酸的组成及含量

Table 5 Fatty acid composition of *Trachinotus ovatus* bone oil

序号	脂肪酸种类	脂肪酸质量分数/%
1	庚酸（SFA）	0.01
2	十一碳酸（SFA）	0.04
3	十三碳酸（SFA）	2.64
4	十四碳酸（SFA）	0.26
5	7,10,13-十六碳三烯酸（PUFA）	0.14
6	9-十六碳一烯酸（MUFA）	5.71
7	十六碳酸（SFA）	21.46
8	顺-6-十六碳一烯酸（MUFA）	0.09
9	8-十七碳一烯酸（MUFA）	0.23
10	6,9,12,15-十八碳四烯酸（PUFA）	0.31
11	9,12-十八碳二烯酸（PUFA）	17.78

续表5

序号	脂肪酸种类	脂肪酸质量分数/%
12	顺-9-十八碳一烯酸（MUFA）	27.86
13	十七碳酸（SFA）	6.72
14	十八碳酸（SFA）	0.38
15	十九碳酸（SFA）	0.05
16	顺,顺,顺,顺-5,8,11,14-二十碳四烯酸（PUFA）	0.33
17	5,8,11,14,17-二十碳五烯酸（PUFA）	1.13
18	8,11,14-二十碳三烯酸（PUFA）	0.07
19	8,11,14,17-二十碳四烯酸（PUFA）	0.51
20	11,14-二十碳二烯酸（PUFA）	1.55
21	11-二十碳一烯酸（MUFA）	2.45
22	6,9,12,15,18-二十一碳五烯酸（PUFA）	0.08
23	4,7,10,13,16-二十二碳五烯酸（PUFA）	0.14
24	4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸（PUFA）	6.35
25	7,10,13,16,19-二十二碳五烯酸（PUFA）	2.06
26	13-二十二碳一烯酸（MUFA）	0.57
27	顺-13-二十二碳一烯酸（MUFA）	0.50
28	顺-15-二十四碳一烯酸（MUFA）	0.62

注：SFA.饱和脂肪酸；PUFA.多不饱和脂肪酸；MUFA.单不饱和脂肪酸。

如表5所示，金鲳鱼骨油经过GC-MS检测共测出28种脂肪酸。其中，UFA占脂肪酸总量的68.44%，显著高于SFA占脂肪酸总量的31.56%；MUFA占脂肪酸总量的37.99%，高于PUFA占脂肪酸总量的30.45%。

2.5.2 金鲳鱼骨油脂肪酸的营养评价

如表6所示，将检测所得的金鲳鱼骨油脂肪酸成分数据与戴梓茹等^[15]的实验中金鲳鱼肌肉脂肪酸成分数据和关子烽等^[31]所做的鲛鱼骨脂肪酸组分数据进行比较，可以得出：金鲳鱼骨油中饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸组分中含量高的分别为棕榈酸（十六碳酸）和油酸（顺-9-十八碳一烯酸）。棕榈酸占脂肪酸总量的21.46%，略低于金鲳鱼肌肉（27.50%）和鲛鱼骨（29.97%）；油酸占脂肪酸总量的27.86%，远高于鲛鱼骨（1.20%）；金鲳鱼中花生四烯酸（顺,顺,顺,顺-5,8,11,14-二十碳四烯酸）含量较少，亚油酸（顺,顺-9,12-十八碳二烯酸）含量相对较高，占脂肪酸总量的17.78%，高于金鲳鱼肌肉（14.20%）和鲛鱼骨（0.86%）；亚麻酸（顺,顺,顺-9,12,15-十八碳三烯酸）未被检出；棕榈油酸（9-十六碳一烯酸）占脂肪酸总量的5.71%，高于金鲳鱼肌肉（4.30%），而鲛鱼骨中并未检测出该脂肪酸；EPA（5,8,11,14,17-二十碳五烯酸）占脂肪酸总量的1.13%，与金鲳鱼肌肉（1.1%）相当，低于鲛鱼骨（36.85%）；DHA（4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸）占脂肪酸总量的6.35%，比金鲳鱼肌肉高出了2.05%。可见，金鲳鱼骨油中脂肪酸种类较多，不饱和脂肪酸含量较高，加工过程中将其回收利用，具有较好的食用价值和应用价值。

表6 金鲳鱼骨与金鲳鱼肌肉、鲛鱼骨的脂肪酸组分比较
Table 6 Comparison of fatty acid compositions of *Trachinotus ovatus* bone, *Trachinotus ovatus* muscle and Spanish mackerel bone

脂肪酸种类	金鲳鱼骨	金鲳鱼肌肉	鲛鱼骨
豆蔻酸 (C _{14:0})	0.26	1.70	5.54
棕榈酸 (C _{16:0})	21.46	27.50	29.97
棕榈油酸 (C _{16:1})	5.80	4.30	—
硬脂酸 (C _{18:0})	0.38	5.50	2.04
油酸 (C _{18:1})	27.86	33.60	1.20
亚油酸 (C _{18:2})	17.78	14.20	0.86
花生四烯酸 (C _{20:4})	0.51	0.20	3.81
EPA (C _{20:5})	1.13	1.10	36.85
DHA (C _{22:6})	6.35	4.30	6.67

注：表中数据以质量分数计。—未检出。

3 结 论

金鲳鱼骨中水分、粗脂肪、粗蛋白和粗灰分的质量分数分别为50.20%、29.97%、12.00%和7.63%。经过单因素试验和正交试验的结果分析，得出当液料比4:1 (mL/g)、pH 9、提取温度60℃、提取时间30 min、超声功率500 W时，为稀碱水解（超声波辅助）法提取金鲳鱼骨油的最佳工艺参数。在该条件下，金鲳鱼骨油的提取率为80.51%。该工艺操作简单，有利于水产加工厂对金鲳鱼骨的大规模加工利用。金鲳鱼骨油富含28种脂肪酸，其中UFA含量占脂肪酸总量的68.44%，显著高于SFA含量（31.56%）；MUFA含量占脂肪酸总量的37.99%，高于PUFA含量（30.45%）。其中含量最高的为油酸和棕榈酸，分别占脂肪酸总量的27.86%和21.46%。此外，亚油酸、DHA和EPA分别占脂肪酸总量的17.78%、6.35%和1.13%。因此，从鱼骨中提取骨油，应用于保健食品的开发当中，具有良好的市场前景。

参考文献：

- [1] 王卫平, 杨继元. 金鲳鱼北方池塘养殖实验[J]. 河北渔业, 2008(8): 25.
- [2] 肖鑫鑫. 金鲳鱼内脏酸性蛋白酶的分离及部分酶学性质和应用研究[D]. 海口: 海南大学, 2016: 10-11.
- [3] RANSANGAN J, MANIN B O, ABDULLAH A, et al. Betanodavirus infection in golden pompano, *Trachinotus blochii*, fingerlings cultured in deep-sea cage culture facility in Langkawi, Malaysia[J]. Aquaculture, 2010, 315(3): 327-334. DOI:10.1016/j.aquaculture.2011.02.040.
- [4] 刘锡强, 马学坤, 刘康, 等. 华南地区金鲳鱼养殖报告[J]. 当代水产, 2014(2): 26-29. DOI:10.3969/j.issn.1674-9049.2014.02.002.
- [5] 孙立元, 郭华阳, 朱彩艳, 等. 卵形鲳鲹育种群体遗传多样性分析[J]. 南方水产科学, 2014, 10(2): 67-71. DOI:10.3969/j.issn.2095-0780.2014.02.010.
- [6] MA Zhenhua, GUO Huayang, ZHENG Panlong, et al. Ontogenetic development of digestive functionality in golden pompano *Trachinotus ovatus* (Linnaeus 1758)[J]. Fish Physiology & Biochemistry, 2014, 40(4): 1157-1167. DOI:10.1007/s10695-014-9912-0.
- [7] 黄晓华, 徐文华. 海南检验检疫局力促金鲳鱼扩大出口[N]. 中国国门时报, 2010-06-24(002).
- [8] 徐天宇. 利用生物技术生产二十碳五烯酸和二十二碳六烯酸[J]. 食品与发酵工业, 1996, 22(1): 56-65. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2005.08.135.
- [9] 肖玫, 欧志强. 深海鱼油中两种脂肪酸(EPA和DHA)的生理功效及机理的研究进展[J]. 食品科学, 2005, 26(8): 522-526. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2005.08.135.
- [10] ECKERT G P, FRANKE C, NOLDNER M, et al. Plant derived omega-3 fatty acids protect mitochondrial function in the brain[J]. Pharmacological Research, 2010, 61(3): 234-241. DOI:10.1016/j.phrs.2010.01.005.
- [11] MICALLEF M A, GARG M L. Beyond blood lipids: phytosterols, statins and omega-3 polyunsaturated fatty acid therapy for hyperlipidemia[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2009, 20(12): 927-939. DOI:10.1016/j.jnutbio.2009.06.009.
- [12] BENAIS-PONT G, DUPERTUIS Y M, KOSSOVSKY M P, et al. Omega-3 polyunsaturated fatty acids and ionizing radiation: combined cytotoxicity on human colorectal adenocarcinoma cells[J]. Nutrition, 2006, 22(9): 931-939. DOI:10.1016/j.nut.2006.05.012.
- [13] 周东群, 崔波, 胡敏. 鱼油的保健功能与开发前景[J]. 山东轻工业学院学报(自然科学版), 1998(3): 58-62.
- [14] 江洲, 李卢峰, 吴成业, 等. 鱼油的提取与精制技术探讨[J]. 福建水产, 2008(3): 60-64. DOI:10.3969/j.issn.1006-5601.2008.03.015.
- [15] 戴梓茹, 钟秋平, 林美芳, 等. 金鲳鱼营养成分分析与评价[J]. 食品工业科技, 2013, 34(1): 347-350.
- [16] 程纯明. 淡水鱼料老大通威能否玩转海水鱼, 15万吨金鲳鱼料市场再起风云[J]. 当代水产, 2016(12): 46.
- [17] 尹青春, 岑燕钊, 许纯绚, 等. 鲈鱼内脏蛋白酶的提取工艺研究[J]. 现代食品科技, 2012, 28(3): 304-308. DOI:10.3969/j.issn.1673-9078.2012.03.016.
- [18] 王娜. 加工工艺对金鲳鱼鱼糜凝胶特性及鱼糜蛋白冷冻变性影响的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015: 19-53.
- [19] 曹湛慧, 黄和, 陈良, 等. 金鲳鱼冷冻鱼糜抗冻剂筛选的研究[J]. 食品工程, 2015(1): 42-45. DOI:10.3969/j.issn.1673-6044.2015.01.014.
- [20] 谭小红. 卵形鲳鲹幼鱼对饲料中精氨酸和亮氨酸需求量的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015: 23-44.
- [21] HOANG D H, HUYNH M S, NGUYEN T T T. Dietary β -glucan improved growth performance, vibrio counts, haematological parameters and stress resistance of pompano fish, *Trachinotus ovatus* Linnaeus, 1758[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2016, 54: 402-410. DOI:10.1016/j.fsi.2016.03.161.
- [22] 卫生部. 食品中水分的测定: GB 5009.3—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1-2.
- [23] 卫生部. 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 2-3.
- [24] 卫生部. 食品中粗脂肪的测定: GB/T 14772—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-2.
- [25] 卫生部. 食品中灰分的测定: GB 5009.4—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1-3.
- [26] 卫生部. 食品中总脂肪、饱和脂肪(酸)、不饱和脂肪(酸)的测定: GB/T 22223—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-6.
- [27] 刘传富, 董海洲, 李向阳, 等. 超声波辅助提取葡萄籽油工艺条件的优化[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(3): 54-57.
- [28] 赵楠, 李学科, 张春晖, 等. 虹鳟鱼骨营养成分分析[J]. 中国食品添加剂, 2016(1): 141-146. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2016.01.018.
- [29] 贾俊强, 吴琼英, 杜金娟, 等. 超声波辅助水酶法提取蚕蛹油工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. 食品科学, 2014, 35(16): 52-57. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201416010.
- [30] 罗登林, 丘泰球, 卢群. 超声波技术在油脂工业中的研究进展[J]. 粮油加工与食品机械, 2005(3): 48-50.
- [31] 关紫烽, 姜波, 王兰. 鱼肉、鱼骨中脂肪酸组成的比较研究[J]. 大连民族学院学报, 2003, 5(1): 44-46. DOI:10.3969/j.issn.1009-315X.2003.01.016.