

鱼油提取、多不饱和脂肪酸富集及 EPA 和 DHA 的应用研究进展

Research progress on extraction of fish oil, enrichment of polyunsaturated fatty acids and application progress of EPA and DHA

陈彦婕¹

唐嘉诚¹

官 萱¹

CHEN Yan-jie¹

TANG Jia-cheng¹

GONG Xuan¹

黄可承¹

单钱艺²

包建强^{1,3,4}

HUANG Ke-cheng¹

SHAN Qian-yi²

BAO Jian-qiang^{1,3,4}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海市质量监督检验技术研究院国家

食品质量监督检验中心, 上海 200233; 3. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心,

上海 201306; 4. 农业部水产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室[上海], 上海 201306)

(1. College of Food Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Institute of Quality Supervision and Inspection Technology, National Food Quality Supervision and Inspection Center, Shanghai 200233, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China; 4. Ministry of Agriculture Laboratory for Quality, Safety and Risk Assessment of Storage and Preservation of Aquatic Products [Shanghai], Shanghai 201306, China)

摘要: 文章对鱼油的提取工艺、多不饱和脂肪酸聚集方法、二十二碳六烯酸(DHA)和二十碳五烯酸(EPA)的保健功能进行了阐述,并对未来鱼油行业的发展进行了展望。

关键词: 鱼油; 提取方法; 多不饱和脂肪酸; DHA; EPA

Abstract: This paper summarized the extraction process of fish oil, the method of non-stick oil sites, the health functions of docosahexaenoic acid (DHA) and eicosapentaenoic acid (EPA), and the development of the oil industry in the future.

Keywords: fish oil; extraction method; polyunsaturated fatty acids; DHA; EPA

油脂是人类生命活动不可缺少的组成部分,是能量和脂肪酸的重要来源,也是多种维生素的载体和保护剂^[1]。鱼油作为一种从海洋或淡水鱼类中提取的油脂,

由于具有较好的营养保健等功能,近年来备受关注。脂肪酸作为鱼油中的主要营养物质,根据碳氢链饱和程度,通常划分为饱和脂肪酸(SFA)和不饱和脂肪酸(UFA),不饱和脂肪酸中的多不饱和脂肪酸(PUFA)^[2],尤其是二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)为代表的Omega-3系列脂肪酸由于具有保健价值,被大众广泛认同。

研究表明,Omega-3脂肪酸对脂代谢和骨代谢有促进作用^[3]、对神经元有强化作用^[4]、可改善脂肪肝^[5]等。鱼油中富含用于营养补充的Omega-3脂肪酸,是EPA和DHA的天然来源,其多不饱和脂肪酸含量高于其他陆生动物,且鱼油的有效成分越高,其保健作用越好。文章拟对鱼油的提取工艺、多不饱和脂肪酸富集方法、DHA和EPA的保健功能进行阐述,并对未来鱼油行业的发展进行展望,旨在为鱼油的大规模工业化生产提供依据。

1 鱼油的提取方法

鱼油的提取方法主要有物理法(压榨法、蒸煮法、超临界流体萃取法)、化学法(淡碱水解法、溶剂法)和生物法(酶解法)。

1.1 压榨法

压榨法是一种较为传统的提取方法,通过将原料进

基金项目: 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心项目(编号:ZF1206);上海市科委工程中心建设项目(编号:11DZ2280300)

作者简介: 陈彦婕,女,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者: 包建强(1963—),男,上海海洋大学教授,硕士。

E-mail: baojq@shou.edu.cn

收稿日期: 2021-05-24

行挤压来提取油脂,但其提油率低,浪费严重,现已不再采用。

1.2 蒸煮法

蒸煮法是一种以加热的方式破坏细胞结构,从而提取鱼油的传统提取方法,可分为直接蒸煮法和间接蒸煮法两种。其原理简单、操作方便,但由于提取率低,生产成本较高,现已很少采用。杨明等^[6]从鲫鱼内脏中提取粗鱼油,通过使用钾盐蒸煮法,得出优化后的提取条件为水解温度 70~80 °C,水解时间 55 min、加盐量为 KNO₃ 36 g/dL、盐析 10 min。王学文等^[7]使用蒸煮法提取鲢鱼头部鱼油,获得的鱼油腥味适中,室温下呈液态、淡黄色。鲍丹等^[8]采用隔水蒸煮法提取宝石鱼油,当蒸煮温度为 85 °C,蒸煮时间为 40 min 时,出油率为 74.52%,过氧化值为 3.10 meq/kg,酸值为 1.82 mg/g。

1.3 淡碱水解法

淡碱水解法通过稀碱水溶液,分解蛋白质组织,打破蛋白质和油脂的结合提取鱼油,通常使用的碱为氢氧化钠和氢氧化钾,并用 NaCl 进行盐析。其具有操作简单、价格低廉、提油率较好等优点,但水解后的废弃物会对环境造成污染。杨琦等^[9]使用碱解法提取鲑鱼肝脏鱼油,最优得率为 25%~26%,最佳工艺条件为水解 30 min,盐析 15 min,加盐量为 4%。谭汝成等^[10]研究表明,白鲢鱼油的最优提油率为 60.5%,鱼油中的 DHA 和 EPA 含量分别为 15.0% 和 10.1%,最优工艺条件为 45 °C 下水解 5 min,pH 为 9.0,80 °C 下于质量分数为 1.0% 的 NaCl 溶液中盐析 5 min。王海军等^[11]发现,稀碱水解法提取鱼骨油的最优条件为 85 °C 下水解 40 min,pH 固定为 10.0,料液比为 1:2 (g/mL),此时鱼骨油提取率为 39.83%。

1.4 溶剂法

溶剂法是油脂提取的传统方法之一,其原理是根据油脂在不同溶剂中的溶解度来进行提取,常用的有机溶剂有氯仿、乙醇、石油醚等。该方法操作简便、价格低廉,但提取率不高,鱼油易被氧化。张雅婷等^[12]采用溶剂法从草鱼内脏中提油,氯仿—甲醇混合液($V_{\text{氯仿}}:V_{\text{甲醇}}$ 为 2:1)中震荡 1 h,3 °C 下离心 10 min,取氯仿层于旋蒸仪中旋蒸,此时提油率为 (38.06±1.39)%。薛山等^[13]用乙醇浸提法提取三文鱼鱼骨油,经优化后的最佳得率为 (22.62±0.22)%,最优提取条件为液料比 15:1 (mL/g),60 °C 下水浴 1.63 h。

1.5 超声波辅助法

超声波是一种高频机械振荡波,超声波辅助提取通过机械效应、空化作用和热效应快速地溶解在试剂中,具有提取效率高、节约能耗、环保等优点。汪学荣等^[14]利用超声波辅助提取三文鱼油,在液料比 3:1 (mL/g),温度 65 °C,超声功率 250 W、超声时间 10 min 下,提油率达

92.6%。赵保堂等^[15]采用超声波辅助法提取虹鳟内脏鱼油,最佳工艺条件下的提油率为 95.10%,其中 EPA 含量为 1.12%,DHA 含量为 4.45%,最优提取工艺为液料比 12:1 (mL/g)、55 °C 下超声 58 min、超声功率 200 W。

1.6 酶解法

酶解法采用蛋白酶将蛋白质和脂肪结合处切断,是目前普遍采用的一种鱼油提取方式,具有反应条件温和、提取效率高、环保等特点。薛山等^[13]研究发现,马鲛鱼油的最优提取率为 75.38%,其 EPA 含量为 8.40%,DHA 含量为 7.06%,最优工艺条件为固液比 3:1 (g/mL)、中性蛋白酶添加量 1.5%、52 °C 下酶解 3 h。何定芬等^[16]采用碱性蛋白酶提取鲢鱼内脏鱼油,其最佳工艺条件为液固比 1:1 (mL/g),55 °C 下酶解 5.5 h,酶添加量 2.0%,pH 为 8.40,鱼油提取率为 (58.49±0.45)%。于淑池等^[17]使用木瓜蛋白酶从金鲳鱼骨中提油,最优工艺条件为 pH 6.0、料液比 1.00:1.75 (g/mL)、55 °C 下酶解 4 h、酶添加量 1.5×10^3 U/g,该条件下鱼油提取率为 24.85%;金鲳鱼骨油色泽呈淡黄色,澄清透明,稍有鱼油特有的腥味,无酸败味。顾盼祺等^[18]使用中性蛋白酶酶解法提取鱼油,在 60 °C 下酶解 40 min,料液比 1.0:1.5 (g/mL),pH 为 7,酶添加量 0.50%,鱼油得率可达 35.67%。

1.7 超临界流体萃取法

超临界流体萃取法(SFE)是将流体作为萃取剂在超临界状态下萃取油脂的分离技术,其具有提取率高、品质优良、无溶剂残留、萃取精确易控、快速简便和不改变萃取物性质等优点,但对设备要求高,前期投入较大^[19]。陶宁萍等^[20]使用 SC-CO₂ 萃取法提取的鱼油不饱和脂肪酸含量高达 74.29%,最优工艺条件为 57.8 °C 下萃取 3.1 h、压力为 35.8 MPa。Sahena 等^[21]使用超临界流体萃取技术于 20~35 MPa 和 45~75 °C 下提取印度鲭鱼油,与索氏提取法相比,油品得率随压力和温度的升高而升高,考虑到可提取性及 DHA、EPA 的回收率,采取变压提取的工艺,得率为 52.3 g/100 g 样品(干基)。

1.8 复合提取法

复合提取法是将几种方法结合到一起的提取方法,该方法可以集中单一提取方法的优势。常见的几种复合提取法类型举例如表 1 所示。

2 鱼油中多不饱和脂肪酸的富集方法

目前人类摄取鱼油中的主要营养成分为 EPA 和 DHA,常用的多不饱和脂肪酸的富集方法主要有尿素包合法、低温结晶法、脂肪酶富集法、分子蒸馏法和 CO₂ 超临界萃取法等。

2.1 尿素包合法

尿素包合法的原理主要是直链脂肪酸易与尿素分子形成尿素包合物,饱和脂肪酸易被包合的特性,从而可以

表 1 复合提取法的种类举例

Table 1 Examples of types of composite extraction methods

提取方法	提取工艺条件	提取率/%	文献
双酶法	52 ℃ 酶解 2 h, pH 7.5, 料液比 1 : 2 (g/mL), 加酶量 0.25 %, $m_{\text{动物蛋白酶}} : m_{\text{胰蛋白酶}}$ 为 1.0 : 1.5	79.85	[22]
双酶分步提取法	45 ℃ 酶解 4.2 h, 1.6 % 胰蛋白酶, pH 8; 再加 1.0 g 胃蛋白酶, 酶解温度 40 ℃, pH 2.5, 酶解 3.1 h	24.44	[23]
超声辅助溶剂提取法	50 ℃ 提取 57 min, 超声波功率 400 W, 提取溶剂为环己烷, 液料比 4 : 1 (mL/g)	94.82	[24]
微波辅助酶法提取	45 ℃ 下酶解 2.5 h, 微波功率 400 W、中性蛋白酶 2 %, 微波时间 15 min	26.26	[25]
超高压结合酶解法	65 ℃ 酶解 60 min、压强 200 MPa、时间 10 min、加酶量 1.125 %、液料比 1 : 1 (g/mL)	99.51	[26]

用过滤的方法除去尿素与包合脂肪酸形成的络合结晶体^[27]。该法具备高效、易操作、成本低廉等优点,但需要低温设备。Zheng 等^[28]使用尿素包合法富集海豹油中的 n -3 PUFA,在 15 ℃,2.5 h,尿酯比为 2.38 : 1.00 下,得到 n -3 PUFA 浓度为 71.35 %,得率为 82.31 %。张南海等^[29]采用尿素包合法富集鲑鱼鱼油中多不饱和脂肪酸,得到 EPA 和 DHA 总含量为 73.67 %。最优条件为醇脲液固比 6 : 1 (mL/g),酯脲比为 0.3 : 1.0,10 ℃ 下包合 3 h,该方法极大地提高了富集率。朱世云等^[30]以甲醇作溶剂、鱼油甲酯为脲包客体,用尿素包合法对鱼油中 EPA 和 DHA 进行富集,最优条件为温度 0 ℃,脲酯比 13 : 1,富集 EPA 和 DHA 浓度为 60 %。

2.2 低温结晶法

低温结晶法是根据物质在不同温度下的溶解度不同,从而将需要的物质进行提取的方法,在低温环境下,不饱和脂肪酸不易被氧化,具有操作简单、安全的特点。罗庆华等^[31]采用低温结晶法对鲑鱼内脏油中多不饱和脂肪酸的富集工艺进行优化,−30 ℃ 下结晶 5 h、料液比 1 : 6 (g/mL),PUFA 的产品回收率为 72.82 %。Morales-medina 等^[32]对沙丁鱼油进行多不饱和脂肪酸的富集,得到最高的 PUFA 浓缩物超过 80 %。最优提取工艺为以己烷为提取溶剂,85 ℃ 下结晶 24 h。

2.3 脂肪酶富集法

脂肪酶法提取具有反应条件温和,单一选择性强的特点,而且能减少对环境的污染,是一种绿色的富集方式。陈莹等^[33]研究了皱褶假丝酵母脂肪酶(*Candida Rugosa*)富集金枪鱼油二十二碳六烯酸甘油酯的工艺条件,最佳条件为添加脂肪酶 1 %,50 ℃ 下反应 3 h,水油质量比 1.0 : 1.7,此时甘油酯中 DHA 含量为 35.55 %。Valverde 等^[34]使用异丁醇和 1-丁醇作为酰基受体,分别通过金枪鱼和沙丁鱼油的醇解来生产富含 DHA 和 EPA 的酰基甘油。醇解反应由 lipases Lipozyme® TL IM 和 lipase QLG 催化,因为这些脂肪酶分别显示出对 DHA 和 EPA 的选择性。在分别由 Lipozyme® TL IM 和脂肪酶 QLG 催化的金枪鱼和沙丁鱼油醇解的最佳条件下,DHA

和 EPA 含量增加了两倍(DHA 含量从 22 % 增至 69 %,EPA 含量从 19 % 增至 61 %)。Kahvec 等^[35]通过皱纹念珠菌脂肪酶(CRL)催化水解,在鲑鱼油的甘油酯级分中富集了 Omega-3 多不饱和脂肪酸(PUFA)。产品中 Omega-3 PUFA 总含量为 38.71 %,是初始水平的两倍多。杨博等^[36]研究固定化脂肪酶 Lipozyme RM IM 催化鱼油部分醇解反应,得到鱼油中 EPA 和 DHA 总含量为 43.0 %。

2.4 分子蒸馏法

分子蒸馏法是根据物料在真空条件下沸点不同来进行所需物质的收集,也是目前工业生产常用的一种方法。其具有操作所需时间短、温度低、高效的优点,但花费成本较高。为提高富集效率,通常会进行多级分子蒸馏。王亚男等^[37]研究表明,鱼油总 Omega-3 脂肪酸含量为 70.78 %,乙酯得率为 10.1 %,最优条件为料流量 4 mL/min、110 ℃,5 Pa 下进行 3 级分子蒸馏。曹少谦等^[38]采用尿素包合和分子蒸馏相结合的方法对 EPA 和 DHA 进行富集,尿素包合条件为 $m_{\text{尿素}} : m_{\text{鱼油}}$ 为 1.5 : 1.0、 $V_{\text{溶剂}} : m_{\text{鱼油}}$ 为 6 : 1、0 ℃ 下结晶 15 h、1 次包合;分子蒸馏条件为转速 250 r/min、压力 5 Pa、温度 110 ℃、进料速率 3 mL/min。联合采用尿素包合和二级分子蒸馏可使精炼鱼油中 EPA 和 DHA 含量由 22.68 % 提高到 87.50 %,且 EPA/DHA 约为 0.58。Solaesa 等^[39]通过对沙丁鱼油和甘油进行酶促甘油酸分解制得酰基甘油混合物(单酰基甘油 67 %),再采用短程蒸馏可获得富含 Omega-3 多不饱和脂肪酸(n -3 PUFA)的单酰基甘油。在 UIC KDL 5 系统中进行逐步短程蒸馏处理(真空 0.1 Pa,进料流量 1.0 mL/min):第一次蒸馏于 110 ℃ 的蒸发器温度下进行,在优化的温度 155 ℃ 下进行第二次蒸馏;得到的馏出液纯度为 91 %,单酰基甘油总回收率为 94 %。

2.5 CO₂超临界萃取法

CO₂超临界萃取法是一种去除游离脂肪酸和改善鱼油质量的方法。CO₂超临界萃取法的二氧化碳气体无毒,不易燃,价格低廉,易于去除,该产品环保,要求相对温和

的温度和压力^[40]。该提取过程是在密闭室中进行,避免了氧气与样品和产品接触,因此适合提取如脂肪酸这类易氧化、耐热性差的物质。刘畅等^[41]采用二氧化碳超临界流体萃取设备对裂殖壶菌 OUC168 菌粉进行油脂萃取,最优萃取条件为 CO₂ 流速 14 L/h,萃取温度 30 °C,萃取压力 30 MPa,分离温度 55 °C,分离压力 8~10 MPa,DHA 萃取率为 22.16%。杨小斌等^[42]采用 CO₂ 超临界萃取技术提取蓝圆鲹鱼油,得到不饱和脂肪酸含量为 55.70%;最佳萃取工艺为压力 20 MPa、温度 49 °C 下萃取 140 min,其中 EPA 和 DHA 总含量为 16.64%。Bubio-Rodriguez 等^[43]用二氧化碳进行超临界流体提取,在 5 MPa、313 K 条件下,与常规鱼油提取工艺相比,采用 CO₂ 超临界萃取法有助于减少鱼油的氧化。

3 多不饱和脂肪酸 EPA 和 DHA 在医药保健领域的应用

EPA 和 DHA 作为 Omega-3 系脂肪酸的代表,具有提高免疫力、抗炎症、降低血脂、预防心脑血管疾病抑制肿瘤等功效^[44]。

3.1 降低血脂、胆固醇

刘晓丽等^[45]研究表明,鱼油和鱼油微胶囊喂食组的总胆固醇(TC)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL)均显著低于对照组,说明鱼油微胶囊和鱼油能够显著降低血脂胆固醇。Wei 等^[46]发现,DHA 和 EPA 可改善代谢紊乱,还可以抑制脂肪生成。

3.2 预防心脏病

Adenike 等^[47]为了探究 DHA 和 EPA(每日 800 mg)对心血管疾病的影响,选定 30 例心血管疾病患者进行 180 d 血脂水平的监测,发现 DHA 和 EPA 可显著改善所选研究对象的血流速度和血脂水平,并降低了发生心血管事件的风险。

3.3 促进婴儿生长发育

EPA 和 DHA 是长链脂肪酸,对胎儿具有健康益处。Yan 等^[48]为了探究 EPA 和 DHA 对孕妇胎儿肌肉发育和能量平衡的影响,在整个妊娠和哺乳期间将两组雌性小鼠喂食不同的饮食:第一组喂食 EPA 和 DHA 丰富的饮食(FA);而另一组则饲喂不含 *n*-3 PUFA 的饮食,对小鼠胚胎和后代进行样品采集和处理。结果表明 EPA 和 DHA 未来可能被建议作为治疗多种病理生理疾病(主要是儿童肥胖)并为后代提供长期代谢益处的治疗选择。Von 等^[49]认为 EPA 和 DHA 的血液水平反映了饮食摄入量和其他变量,并且最好通过有据可查的标准化分析方法(HS-Omega-3 Index[®])评估为红细胞中的百分比。每个人的 Omega-3 指数介于 2%~20%,最佳值为 8%~11%。与最佳 Omega-3 指数相比,较低的 Omega-3 指数与总死亡率和缺血性卒中风险增加、脑容量减少、认知障碍,并加速发展为痴呆症、精神病、复杂的脑功能受损以

及其他相关因素相关流行病学研究中的大脑问题相关。

3.4 抗炎作用

Zhang 等^[50]发现 EPA 和 DHA 在溃疡性结肠炎(UC)中可能具有抑制作用,且 EPA 更适合用于 UC 治疗。So 等^[51]研究表明,EPA 和 DHA 对单核细胞炎症反应具有不同的作用,而 DHA 在减弱促炎性细胞因子方面具有更广泛的作用。

4 展望

目前鱼油的提取工艺已经较为成熟,可以为大规模生产提供理论依据和技术支撑。随着生活水平及认知水平的逐步提高,鱼油作为一种保健食品也越来越受到青睐。目前对于鱼油中多不饱和脂肪酸的富集工艺以提高收集率为目标逐渐趋向于复合工艺方法,复合方法可以集中优势、补足短板,获得高品质的鱼油。鱼油具有易氧化的特性,如何增强鱼油的抗氧化特性也成为了一种新的研究趋势,相信未来鱼油会在食品行业有更好的应用前景。

参考文献

- [1] 安承熙. 鱼油中所含 EPA 和 DHA 的营养价值[J]. 青海医学院学报, 1997(4): 255-256.
- [2] AN Cheng-xi. Nutritional value of EPA and DHA in fish oil[J]. Journal of Qinghai Medical College, 1997(4): 255-256.
- [3] 刘元林, 龙鸣, 李儒, 等. 脂肪酸检测在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 217-222.
- [4] LIU Yuan-lin, LONG Ming, LI Ru, et al. Application of fatty acid detection in food industry[J]. Food & Machinery, 2019, 35(11): 217-222.
- [5] JOHNSON A W, ISHOLA 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.
- [6] DUNLAP S, HEINRICH S C. Neuronal depletion of omega-3 fatty acids induces flax seed dietary self-selection in the rat[J]. Brain Research, 2008, 1 250: 113-119.
- [7] DEREK T, MERETHE B, YAN Q, et al. Evaluation of a high concentrate omega-3 for correcting the omega-3 fatty acid nutritional deficiency in non-alcoholic fatty liver disease (CONDIN)[J]. Nutrients, 2018, 10(8): 1 126.
- [8] 杨明, 张年凤, 徐菊. 鱼油提取及抗氧化性能研究[J]. 扬州大学烹饪学报, 2005(2): 53-56.
- [9] YANG Ming, ZHANG Nian-feng, XU Ju. A study of fish oil extraction and its autioxidization [J]. Culinary Science Journal of Yangzhou University, 2005(2): 53-56.
- [10] 王学文, 张秀杰, 冯朝阳, 等. 蒸煮温度和时间对鲢头部油脂提取率的影响[J]. 水利渔业, 1999(3): 47.
- [11] WANG Xue-wen, ZHANG Xiu-jie, FENG Chao-yang, et al. Effects of cooking temperature and time on the extraction rate of silver carp head oil[J]. Journal of Hydroecology, 1999(3): 47.

- [8] 鲍丹, 陶宁萍, 刘茗柯. 宝石鱼油的提取、精制及其脂肪酸组成的分析[J]. 食品科学, 2006(7): 169-173.
- BAO Dan, TAO Ning-ping, LIU Ming-ke. Extraction and refinement of fish oil from scortum barcoas well as analysis of its fatty acids[J]. Food Science, 2006(7): 169-173.
- [9] 杨琦, 赵建滨, 刘志贞, 等. 传统淡碱水解法提取鱼油工艺的改进研究[J]. 山西医科大学学报, 2000(6): 560-561.
- YANG Qi, ZHAO Jian-bin, LIU Zhi-zhen, et al. Research on the improvement of traditional light alkali hydrolysis method for extracting fish oil[J]. Journal of Shanxi Medical University, 2000(6): 560-561.
- [10] 谭汝成, 熊善柏, 刘敬科, 等. 提取条件对白鲢鱼油性质的影响及鱼油脂肪酸组成分析[J]. 食品科学, 2008(2): 72-75.
- TAN Ru-cheng, XIONG Shan-bai, LIU Jing-ke, et al. Effects of extraction conditions on properties of oil from silver carp and analysis of fatty acids composition[J]. Food Science, 2008(2): 72-75.
- [11] 王海军, 李升福, 许继敏, 等. 鲢鱼骨中油脂提取方法的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(20): 6 876-6 880.
- WANG Hai-jun, LI Sheng-fu, XU Ji-min, et al. Study on extraction method of silver carp bone oil[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(20): 6 876-6 880.
- [12] 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 Ya-ting, WANG Fang, CAO Zhen-zhen, et al. Extraction methods and storage properties of fish oil from viscera of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(6): 121-125.
- [13] 薛山, 陈慧芳, 黄艺婷, 等. 三文鱼鱼骨油粗提工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(1): 77-85.
- XUE Shan, CHEN Hui-fang, HUANG Yi-ting, et al. Optimization of crude extraction and fatty acid composition analysis from salmon bone oil[J]. China Food Additives, 2019, 30(1): 77-85.
- [14] 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 Xue-rong, ZHOU Ling, WU Qing. Ultrasonic-assisted extraction of Salmon oil and its fatty acid composition[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(2): 23-26.
- [15] 赵保堂, 牛源, 刘倩霞, 等. 虹鳟鱼油的酶法提取工艺及其脂肪酸组成分析[J]. 中国油脂, 2019, 44(4): 1-5.
- ZHAO Bao-tang, NIU Yuan, LIU Qian-xia, et al. Enzymatic extraction of rainbow trout oil and its fatty acid composition[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(4): 1-5.
- [16] 何定芬, 谢超, 李桂芬, 等. 响应面法优化鳀鱼(*Katsuwonus pelamis*)内脏鱼油酶法提取工艺[J]. 食品工业科技, 2019, 40(7): 179-184.
- HE Ding-fen, XIE Chao, LI Gui-fen, et al. Optimization of enzymatic extraction technology of fish oil from *katsuwonus pelamis* viscera by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(7): 179-184.
- [17] 于淑池, 李晨晨, 徐云升, 等. 金鲳鱼骨中鱼油的提取工艺及脂肪酸成分分析[J]. 食品工业, 2021, 42(3): 147-152.
- YU Shu-chi, LI Chen-chen, XU Yun-sheng, et al. Extraction technology of oil from *trachinotus ovatus* bone and analysis on its fatty acids composition[J]. The Food Industry, 2021, 42(3): 147-152.
- [18] 顾盼祺, 魏晓倩, 赵利, 等. 酶法提取淡水鱼内脏鱼油的工艺优化[J]. 中国调味品, 2021, 46(3): 95-99.
- GU Pan-qi, WEI Xiao-qian, ZHAO Li, et al. Optimization of enzymatic extraction of offal oil from fresh water fish[J]. China Condi-ment, 2021, 46(3): 95-99.
- [19] 张丽娟, 张欣, 胡巧云. 鲑鱼内脏油提取最新进展的研究[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(6): 23-26.
- ZHANG Li-juan, ZHANG Xin, HU Qiao-yun. The Latest progress of squid visceral oil extraction[J]. Cereal & Food Industry, 2017, 24(6): 23-26.
- [20] 陶宁萍, 周敏, 王锡昌. 提取黄鳍金枪鱼眼窝肉鱼油的方法比较研究[J]. 中国油脂, 2011, 36(1): 41-44.
- TAO Ning-ping, ZHOU Min, WANG Xi-chang. Comparison of different methods of fish oil extraction from yellow fin tuna orbital meat[J]. China Oils and Fats, 2011, 36(1): 41-44.
- [21] SAHENA F, ZAIDUL I S M, JINAP S, et al. Extraction of fish oil from the skin of Indian mackerel using supercritical fluids [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(1): 63-69.
- [22] 衣美艳, 郭红, 毛毛. 庸鲮鱼油提取工艺研究及其品质分析[J]. 中国油脂, 2018, 43(9): 8-13.
- YI Mei-yan, GUO Hong, MAO Mao. Extraction process and quality of hippoglossus oil[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(9): 8-13.
- [23] 薛宇航, 刘峰, 方旭波, 等. 双酶法提取星鳎鱼油的工艺研究[J]. 食品工业, 2018, 39(9): 35-39.
- XUE Yu-hang, LIU Feng, FANG Xu-bo, et al. Study on the process of extracting conger eel fish oil by double enzyme method[J]. The Food Industry, 2018, 39(9): 35-39.
- [24] 李笑, 余佳, 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 Xiao, YU Ji, YU Zhao-shuo, et al. Ultrasound-assisted extraction of big head crap viscera oil and its physiochemical properties[J]. Journal of Jishou University(Natural Sciences Edition), 2017, 38(1): 49-55.
- [25] 王正云, 蒋慧亮, 周洁, 等. 微波辅助酶法提取青鱼内脏鱼油工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 182-187.
- WANG Zheng-yun, JIANG Hui-liang, ZHOU Jie, et al. Technological optimization of microwave-assisted enzymatic extraction of fish oil from black carp viscera and analysis of fatty acid composition[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(3): 182-187.
- [26] 张渊超, 孙钦秀, 魏帅, 等. 超高压结合酶解法提取鱼油工艺优化[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(2): 71-76.
- ZHANG Yuan-chao, SUN Qin-xiu, WEI Shuai, et al. Optimization of extraction parameter of fish oil by ultra-high pressure combined with enzymatic hydrolysis[J]. Journal of Guangdong Ocean Uni-

- versity, 2020, 40(2): 71-76.
- [27] 路光辉, 刘伟. 尿素包合法制备高纯度油酸甲酯的研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(6): 45-49.
- LU Guang-hui, LIU Wei. Study on preparation of high purity methyl oleate by urea adduction fractionation[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(6): 45-49.
- [28] ZHENG Z, DAI Z, SHEN Q. Enrichment of polyunsaturated fatty acids from seal oil through urea adduction and the fatty acids change rules during the process[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(5): e13593.
- [29] 张南海, 涂宗财, 何娜, 等. 尿素包合法富集鲢鱼油中多不饱和脂肪酸工艺优化[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(6): 152-156.
- ZHANG Nan-hai, TU Zong-cai, HE Na, et al. Enrichment of polyunsaturated fatty acids extraction in fish oil from Silver Carp by urea inclusion method[J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(6): 152-156.
- [30] 朱世云, 包宗宏, 云志, 等. 尿素包合法富集鱼油中的 EPA 和 DHA 的研究[J]. 中国油脂, 1997(5): 54-56.
- ZHU Shi-yun, BAO Zong-hong, YUN Zhi, et al. Concentration of EPA and DHA from fish oil by urea inclusion[J]. China Oils and Fats, 1997(5): 54-56.
- [31] 罗庆华, 宋英杰, 王海磊, 等. 低温结晶法富集鳊鱼内脏油中多不饱和脂肪酸[J]. 中国油脂, 2015, 40(10): 36-39.
- LUO Qing-hua, SONG Ying-jie, WANG Hai-lei, et al. Enrichment of polyunsaturated fatty acids from Yellow cheek carp (*Elopichthys bambusa*) viscera oil by low temperature crystallization[J]. China Oils and Fats, 2015, 40(10): 36-39.
- [32] MORALES-MEDINA R, DE LEÓN G, MUNIO M, et al. Mass transfer modeling of sardine oil polyunsaturated fatty acid (PUFA) concentration by low temperature crystallization[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 183: 16-23.
- [33] 陈莹, CHEONG Ling-zhi, 赵家和, 等. 响应面法的脂肪酶富集金枪鱼油中二十二碳六烯酸甘油酯工艺优化的研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(9): 72-79.
- CHEN Ying, CHEONG Ling-zhi, ZHAO Jia-he, et al. Optimization of lipase-catalyzed enrichment of docosahexaenoic acid in tuna fish oil by response surface methodology[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(9): 72-79.
- [34] VALVERDE L M, MORENO P A G, CERDÁN L E, et al. Concentration of docosahexaenoic and eicosapentaenoic acids by enzymatic alcoholysis with different acyl-acceptors[J]. Biochemical Engineering Journal, 2015, 120: 165-172.
- [35] KAHVECI D, XU X. Repeated hydrolysis process is effective for enrichment of omega 3 polyunsaturated fatty acids in salmon oil by *Candida rugosa* lipase[J]. Food Chemistry, 2011, 129(4): 1 552-1 558.
- [36] 杨博, 杨继国, 吕扬效, 等. 脂肪酶催化鱼油醇解富集 EPA 和 DHA 的研究[J]. 中国油脂, 2005(8): 65-68.
- YANG Bo, YANG Ji-guo, LU Yang-xiao, et al. Enrichment of EPA and DHA by lipase-catalyzed ethanolysis of fish oil[J]. China Oils and Fats, 2005(8): 65-68.
- [37] 王亚男, 徐茂琴, 季晓敏, 等. 分子蒸馏富集金枪鱼油 ω -3 脂肪酸的研究[J]. 中国食品学报, 2014, 14(7): 52-58.
- WANG Ya-nan, XU Mao-qin, JI Xiao-min, et al. Study on ω -3 fatty acids enrichment of tuna oil with molecular distillation[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(7): 52-58.
- [38] 曹少谦, 孙程, 秦伟力, 等. 鱼粉加工压榨液中 EPA 和 DHA 富集工艺优化及其特性分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(2): 154-160.
- CAO Shao-qian, SUN Cheng, QIN Wei-li, et al. Enrichment and Characteristic Analysis of EPA and DHA in the squeezed liquid of fish meal processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(2): 154-160.
- [39] SOLAESA Á G, SANZ M T, FALKEBORG M, et al. Production and concentration of monoacylglycerols rich in omega-3 polyunsaturated fatty acids by enzymatic glycerolysis and molecular distillation[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 960-967.
- [40] 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.
- [41] 刘畅, 臧晓南, 刘柱, 等. 二氧化碳超临界流体萃取在裂殖壶菌 DHA 提取中的应用[J]. 海洋湖沼通报, 2019(5): 135-142.
- LIU Chang, ZANG Xiao-nan, LIU Zhu, et al. Application of supercritical- CO_2 fluid extraction in DHA extraction of *Aurantiochytrium limacinum*[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2019(5): 135-142.
- [42] 杨小斌, 周爱梅, 王爽, 等. 响应面法优化超临界二氧化碳萃取蓝圆鲐鱼油工艺研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(4): 7-10.
- YANG Xiao-bin, ZHOU Ai-mei, WANG Shuang, et al. Optimization of supercritical carbondioxide extraction of decapterus maruadsi fish oil by response surface methodology[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(4): 7-10.
- [43] RUBIO-RODRÍGUEZ N, DE DIEGO S M, BELTRÁN S, et al. Supercritical fluid extraction of fish oil from fish by-products: A comparison with other extraction methods[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(2): 238-248.
- [44] 马永钧, 杨博. 世界海洋鱼油资源利用现状与发展趋势[J]. 中国油脂, 2010, 35(11): 1-3.
- MA Yong-jun, YANG Bo. Utilization status and development trend of world marine fish oil resources[J]. China Oils and Fats, 2010, 35(11): 1-3.
- [45] 刘晓丽, 魏长庆, 詹晓北, 等. 超声辅助制备草鱼鱼油微胶囊及其贮藏稳定性和降血脂作用研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(9): 163-168.
- LIU Xiao-li, WEI Chang-qing, ZHAN Xiao-bei, et al. Ultrasound-assisted preparation of grass carp fish oil microcapsules and their storage stability and lipid-lowering effects[J]. Food & Machinery, 2019, 35(9): 163-168.

(下转第 220 页)

- 1 919-1 920.
- [84] 关乔中, 张海滨, 毛帅, 等. 鄂西竹节参野生品与栽培品的比较研究[J]. 中药材, 2013(2): 171-175.
- GUAN Qiao-zhong, ZHANG Hai-bin, MAO Shuai, et al. Comparative study of wild and cultivated product of *Panax japonicus* from the west of hubei province[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2013(2): 171-175.
- [85] 伍红年, 谭诗涵, 雷雅婷, 等. 白三七及近源种药材指纹图谱与识别模式的构建及其应用研究[J]. 中草药, 2019, 50(1): 217-224.
- WU Hong-nian, TAN Shi-han, LEI Ya-ting, et al. Establishment and application of chemical fingerprint and pattern recognition for *Panacis Japonici Rhizoma* [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2019, 50(1): 217-224.
- [86] 谭诗涵, 伍红年, 雷雅婷, 等. 一测多评法测定竹节参中 7 种皂苷类成分的含量[J]. 中草药, 2019, 50(17): 4 164-4 169.
- TAN Shi-han, WU Hong-nian, LEI Ya-ting, et al. Determination of seven saponins components in *Panacis Japonici Rhizoma* with quantitative analysis of multi-components by single marker [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2019, 50(17): 4 164-4 169.
- [87] 伍红年, 谭诗涵, 雷雅婷, 等. 竹节参 HPLC 指纹图谱及 7 种核苷类成分测定研究[J]. 中成药, 2019, 41(5): 1 083-1 089.
- WU Hong-nian, TAN Shi-han, LEI Ya-ting, et al. Establishment of HPLC fingerprints of *Panax japonicus* and determination of seven constituents[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2019, 41(5): 1 083-1 089.
- [88] 张杰, 李春艳, 李劲平, 等. 蒽酮硫酸法与苯酚硫酸法测定竹节参多糖含量的比较研究[J]. 中南药学, 2012(6): 421-424.
- ZHANG Jie, LI Chun-yan, LI Jin-ping, et al. Determination of polysaccharide in rhizome of *Panax japonicus* by anthrone sulfuric acid method and phenol sulfuric method[J]. Central South Pharmacy, 2012(6): 421-424.
- [89] 陈永波, 饶斌, 沈艳芬, 等. 竹节人参中氨基酸的皂苷特征组分的分析鉴别[J]. 色谱, 2003, 21(3): 248-250.
- CHEN Yong-bo, RAO Bin, SHEN Yan-fen, et al. Analysis and identification of characteristic components of amino acids and pmanxaponins in *Panax japonicus* C.A.Mey.[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2003, 21(3): 248-250.

(上接第 204 页)

- [60] LU Xu-cong, LI Yan, QIU Wan-wei, et al. Development of propidium monoazide combined with real-time quantitative PCR (PMA-qPCR) assays to quantify viable dominant microorganisms responsible for the traditional brewing of Hong Qu glutinous rice wine[J]. Food Control, 2016, 66: 69-78.
- [61] 段亮杰, 沙雨婷, 罗意, 等. 叠氮溴化丙锭-荧光定量 PCR 法实时快速检测 5 种乳杆菌活菌数方法的建立与应用[J]. 微生物学通报, 2020, 47(12): 4 317-4 327.
- DUAN Liang-jie, SHA Yu-ting, LUO Yi, et al. Quantitative PCR combined with propidium monoazide treatment for real-time and rapid determination of five viable *Lactobacillus* [J]. Microbiology China, 2020, 47(12): 4 317-4 327.
- [62] SHAO Yu-yu, WANG Zhao-xia, BAO Qiu-hua, et al. Application of propidium monoazide quantitative real-time PCR to quantify the viability of *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* [J]. Journal of Dairy Science, 2016, 99(12): 9 570-9 580.
- [63] GOBERT G, COTILLARD A, FOURMESTRAUX C, et al. Droplet digital PCR improves absolute quantification of viable lactic acid bacteria in faecal samples[J]. Journal of Microbiological Methods, 2018, 148: 64-73.
- [64] ZHANG Jia-zhen, CHEN Jian-cheng, WEI Shi-zhong, et al. Diagnostic devices for isothermal nucleic acid amplification[J]. Sensors, 2012, 12(6): 8 319-8 337.
- [65] 范一灵, 杨美成. 环介导等温扩增技术快速检测双歧杆菌属细菌[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(3): 20-28.
- FAN Yi-ling, YANG Mei-cheng. Rapid detection of *Bifidobacterium* spp. by loop-mediated isothermal amplification[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016, 7(3): 20-28.
- [66] LEE S, JANG H, KIM H Y, et al. Three-way junction-induced isothermal amplification for nucleic acid detection[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2019, 147: 111762.

(上接第 210 页)

- [46] WEI Wen-ting, HU Man-jiang, HUANG Jie, et al. Anti-obesity effects of DHA and EPA in high fat-induced insulin resistant mice[J]. Food & Function, 2021, 12(4): 1 614-1 625.
- [47] ADENIKE G, AMR N, OLA A, et al. Effects of DHA and EPA on Cardiovascular Indices [J]. The FASEB Journal, 2021, 35(S1): 01815.
- [48] YAN H, SAEED G, YONGJIE W, et al. The physiological and metabolic effects of maternal intake of EPA and DHA during pregnancy and lactation on off spring's muscle development and energy homeostasis[J]. The FASEB Journal, 2021, 35(S1): 04788.
- [49] VON Schacky Clemens. Importance of EPA and DHA blood levels in brain structure and function[J]. Nutrients, 2021, 13(4): 1 074.
- [50] ZHANG Zhuang-wei, XUE Zhe, YANG Hai-tao, et al. Differential effects of EPA and DHA on DSS-induced colitis in mice and possible mechanisms involved [J]. Food & Function, 2021, 12(4): 1 803-1 817.
- [51] SO Ji-sun, WU Da-yong, LICHTENSTEIN A H, et al. EPA and DHA differentially modulate monocyte inflammatory response in subjects with chronic inflammation in part via plasma specialized pro-resolving lipid mediators: A randomized, double-blind, cross-over study[J]. Atherosclerosis, 2021, 316: 90-98.