

## 水产油脂的加工及营养、安全研究进展

马路凯<sup>1,2</sup>, 廖梓瑜<sup>1</sup>, 张倩玮<sup>1</sup>, 刘祎帆<sup>1,2</sup>, 肖更生<sup>1</sup>, 刘国琴<sup>3</sup>, 程威威<sup>4</sup>, 张 宾<sup>5</sup>

(1. 仲恺农业工程学院 轻工食品学院, 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 广州 510225; 2. 仲恺农业工程学院 现代农业创新研究院, 广州 510225; 3. 华南理工大学 食品科学与工程学院, 广州 510641; 4. 深圳大学 高等研究院, 广东 深圳 518060; 5. 浙江海洋大学 食品与医药学院, 浙江 舟山 316022)

**摘要:** 随着我国“蓝色粮仓”战略的提出, 水产品的营养及相关研究日益得到人们关注。除了作为优质蛋白质来源, 许多水产品还富含油脂, 特别是其油脂中含有对人体生理与健康有重要作用的二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)等长链多不饱和脂肪酸。水产油脂具有较高的营养价值, 如磷虾油和微藻油开发前景广阔。但水产油脂极易氧化, 其提取和生产加工工艺对其品质均有重要影响。重点围绕水产油脂的提取、精炼和DHA、EPA富集工艺进行综述, 分析了不同方法的优缺点以及工业化生产的可行性。介绍了水产油脂的营养、安全, 以及提高其氧化稳定性的方法。水产油脂资源的开发利用已成为必然趋势, 水产油脂类产品将会更加多元化。

**关键词:** 水产油脂; 多不饱和脂肪酸; 营养; 提取方法; 抗氧化

**中图分类号:** TS225.2; TS254.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7969(2022)11-0009-07

### Progress on processing, nutrition and safety of aquatic oil

MA Lukai<sup>1,2</sup>, LIAO Ziyu<sup>1</sup>, ZHANG Qianwei<sup>1</sup>, LIU Huifan<sup>1,2</sup>, XIAO Gengsheng<sup>1</sup>,  
LIU Guoqin<sup>3</sup>, CHENG Weiwei<sup>4</sup>, ZHANG Bin<sup>5</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology, College of Light Industry and Food Science, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Academy of Contemporary Agricultural Engineering Innovations, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 3. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 4. Institute for Advanced Study, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 5. College of Food and Medicine, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, Zhejiang, China)

**Abstract:** With the proposal of the "blue granary" strategy in China, the nutrition and related research of aquatic products have attracted more and more attention. In addition to being a source of high-quality protein, many aquatic products are also rich in oil, especially long-chain polyunsaturated fatty acids such as eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA), which play an important role

in human physiology and health. Aquatic oil has high nutritional value, for example krill oil and microalgae oil have broad prospects for development. However, aquatic oil is easy to be oxidized, and its extraction and processing technology have an important impact on its quality. The extraction and refining of aquatic oil and the enrichment of DHA and EPA were reviewed, the advantages and disadvantages of different methods and the feasibility of applying them to industrial production were also analyzed.

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2022-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(32001622, 32072291); 广东省自然科学基金面上项目(2021A1515011060); 广东省区域联合基金青年基金项目(2019A1515110823); 广州市科技特派员项目(GZKTP201937); 广东省普通高校青年创新人才项目(KA2001957); 河源市科技计划项目(2019003); 2021年广东省科技创新专项“攀登计划”项目(pdjh2021b0251)

作者简介: 马路凯(1991), 男, 副教授, 博士, 研究方向为粮油加工特性及安全(E-mail) malukai@zhku.edu.cn.

通信作者: 肖更生, 研究员(E-mail) Gshxiao@aliyun.com; 张 宾, 教授(E-mail) zhangbin@zjou.edu.cn.

The nutrition and safety of aquatic oil, as well as the methods to improve the oxidative stability of aquatic oil were introduced. The development and utilization of aquatic oil resources has become an inevitable trend, and aquatic oil products will be more diversified.

**Key words:** aquatic oil; polyunsaturated fatty acid; nutrition; extraction method; antioxidation

水产品种类繁多,分为海水产品和淡水产品两大类,主要包括鱼类、贝类、虾类、藻类等。水产品中富含多种优质蛋白质,是日常膳食蛋白质的重要来源。一些水产品中还富含油脂,尤其是油脂中对人体生理和营养有重要作用的长链多不饱和脂肪酸,如二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)。DHA和EPA与人类健康密切相关。DHA和EPA能促进人体神经元的发育和信息传递,进一步提高大脑学习、记忆能力,并且对免疫功能障碍、心脑血管疾病和炎症疾病也有积极的影响<sup>[1-2]</sup>。除此之外,水产油脂中丰富的类胡萝卜素对人体同样具有良好的功效。虾青素是一种抗氧化能力极强的类胡萝卜素,广泛存在于磷虾油和微藻油中。研究发现,虾青素的抗氧化活性是 $\beta$ -胡萝卜素等其他类胡萝卜素的7倍,具有较好的抗氧化能力和抗肿瘤等功效,已在医药、保健品等行业得到广泛应用<sup>[3-4]</sup>。

我国水产油脂加工起步晚,产品开发仍较为粗放。随着人们健康意识的增强,水产油脂的食用比例逐年上升,近五年内增长近一倍<sup>[5]</sup>,诞生了以磷虾油、微藻油为代表的新型水产油脂,南极磷虾也早在我国“十二五”规划中被列入新型资源开发战略。随着消费者对水产油脂需求的不断增加,在“蓝色粮仓”和“可持续发展”战略的背景下,进一步推动水产油脂深加工,提高水产类副产物的利用,是实现水产业绿色高质量发展的关键抓手。本文围绕水产油脂的加工、营养、安全等方面进行综述,以期为未来水产油脂的技术发展提供强有力的支撑。

## 1 水产油脂的加工

### 1.1 水产油脂的提取方法

表1所示为目前应用于水产油脂提取的方法。对比各种提取方法,其中压榨法工艺简单,无溶剂污染,但提取的脂类物质含量较低。传统的溶剂提取法

需根据油脂特性选择与其性质相似的溶剂,虽操作简单,但较易有溶剂残留。尤其是磷虾油脂类组成较为复杂,单一溶剂难以一次提取完全,需选用混合试剂多次提取。谢丹<sup>[6]</sup>采用Folch法即氯仿和甲醇混合溶液提取,南极磷虾油得率为19.61%,磷脂含量高达47.83%。此外,提取过程结合物理场处理,可有效提高油脂得率,如微藻细胞壁结构坚硬、多层,需通过破壁技术破坏细胞结构使其内容物溶出。常用预处理方法有挤压膨化法、高压均质法、珠磨法等。超声波提取法是采用超声波对微藻进行预处理,破碎细胞壁进而使油脂溶出,但该法工艺较复杂,在工业化规模生产中推广难度大。超临界流体萃取法条件温和,可有效避免不饱和脂肪酸受热分解,且无溶剂残留,所得油脂品质较好。同时,在提取过程中适当添加一定量的绿色助剂,可有效提高油脂得率。李佩雷等<sup>[7]</sup>采用超临界CO<sub>2</sub>夹带乙醇萃取裂殖壶藻中油脂,提油率可达88.2%,高于单一超临界CO<sub>2</sub>流体萃取法(71.9%)。因超临界流体难以有效提取磷虾油中的磷脂,可通过添加一定量乙醇使磷脂有效分离<sup>[8]</sup>。亚临界流体萃取法也是近年来快速发展的一种绿色提油工艺,相较于超临界流体萃取法,亚临界流体萃取法可在更低的临界压力和温度下进行,但超临界和亚临界萃取法成本均较高,且需高压设备,较难在实际工业生产中大规模推广。酶解法是一种温和、绿色、高效的提取方法,通过破坏脂质和蛋白质的结合使油脂释放,但提取过程受酶活性的影响。目前酶解法提取成本较高,多数用于实验室研究,较少投入于工业化生产。

综上所述,水产油脂提取方法各有优缺点。采用不同的提取方法得到的油脂,其成分和含量也有所差异,可根据水产油脂自身的特性选择合适的提取方法。未来对于水产油脂的提取仍需不断的探索和优化。

表1 水产油脂的提取方法

提取方法	相关原理	优点	缺点
压榨法 <sup>[9-11]</sup>	原料经压榨后,过滤和离心即得油脂	无溶剂污染,能耗和成本较低,避免物料过度加热	有效成分易流失,设备投入大,提取效率低
溶剂提取法 <sup>[12-14]</sup>	利用乙醇、丙酮、己烷等溶剂浸泡使油脂溶解其中	操作简单,油脂品质好	溶剂残留,工艺复杂,提取率低,对环境有一定污染
超声波提取法 <sup>[15-18]</sup>	借助空化效应、耦合热能及机械效应提高油脂萃取效率	耗时少,提取温度低,提油率高	有机溶剂残留,工艺复杂,成本高

续表 1

提取方法	相关原理	优点	缺点
超临界流体萃取法 <sup>[19-21]</sup>	在特定的压力和温度下,超临界流体与原料接触萃取油脂	分离效果好,油脂品质高,安全绿色	工艺复杂,成本高,推广应用难度大
亚临界流体萃取法 <sup>[22-23]</sup>	在密闭的容器中,一定压力下,以亚临界状态低温萃取	条件温和,油脂品质高	设备投入大,成本高,工业化难度高
酶解法 <sup>[24-25]</sup>	通过酶催化水解导致细胞被破坏,油脂从细胞中释放	条件温和,油脂品质高,提取率高	成本高,耗时长,工业化难度高

## 1.2 水产油脂的精炼工艺

经提取得到的粗油脂颜色较深且黏稠,部分还伴有一定腥臭味,其中还有一些对人体健康具有危害作用的物质<sup>[26]</sup>。因此,需根据不同种类水产油脂的性质,通过脱胶、脱酸、脱色和脱臭等工艺除去杂质,得到成品油。传统精炼工艺虽可得到品质达标的水产油脂,但脱臭时的高温环境易产生反式脂肪酸,摄入后对人体健康造成一定威胁<sup>[27]</sup>。而分子蒸馏、超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取等现代精炼技术能更好地保留油脂中的有效成分。

### 1.2.1 脱胶工艺

油脂脱胶应根据水产油脂中磷脂的含量选择合适的方法。目前常规的方法是水化脱胶(辅助脱胶剂柠檬酸、磷酸)和酸炼脱胶。酸炼脱胶适用于含有大量蛋白质、黏液质的原油,如劣质鱼油。近年来,还出现了膜法脱胶和酶法脱胶等新型脱胶技术。

与鱼油中的磷脂结构不同,磷虾油中富含水溶性功效成分磷脂,与其中的蛋白质、游离脂肪酸等其他水溶性杂质不易分离,提纯难度大,采用水化脱胶会降低磷虾油中的功效成分。磷虾油可采用分子蒸馏、超临界流体萃取等新型精炼方式进行脱胶<sup>[28]</sup>,或在提取前对磷虾进行预处理,提高磷虾油中磷脂含量,如为了保留磷虾油中高含量的水溶性磷脂成分,胥亚夫等<sup>[29]</sup>采用柠檬酸钠溶液对磷虾进行预处理,提取的磷虾油磷脂含量高、酸值低、品质稳定。微藻油脂成分复杂,且磷脂、糖脂含量高,常规脱胶技术效果不佳。贺瑶<sup>[13]</sup>在微藻油脂脱胶的研究中发现,常规的方法不适于微藻油脂脱胶,稀碱法脱胶的脱胶率仅为 39.5%,EPA 保留率为 83.6%,而膜法脱胶技术脱胶率高达 76.4%,EPA 保留率可达 91.5%。因此,膜法脱胶更适合用于微藻油脱胶,可较好保留油脂中的 EPA。

### 1.2.2 脱酸工艺

脱酸可去除粗油脂中的游离脂肪酸以及残留的磷脂、色素等物质,常用碱炼脱酸法。贺瑶<sup>[13]</sup>对微藻油脂采用碱炼脱酸,在优化工艺下油脂脱酸率可

达 95.37%,油脂回收率为 93.96%,说明碱炼脱酸效果好。但碱炼脱酸容易导致中性脂水解,造成大量损耗。另外,磷虾油不适用于碱炼脱酸,因为碱炼脱酸易产生皂脚使磷虾油变浑浊,功能性成分损失。磷虾油可采用物理吸附、超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取法进行脱酸。

### 1.2.3 脱色工艺

未经精炼的水产油脂,其颜色一般较植物油深,一方面是由于水产油脂中富含类胡萝卜素等色素成分,另一方面是由于水产油脂较易氧化,生成有色氧化产物。脱色工艺不仅可以满足消费者对水产油脂的感官要求,还能提高其稳定性。目前常用活性白土和活性炭等吸附剂进行吸附脱色。陈转霞等<sup>[30]</sup>添加 20% 的活性白土对粗鱼油进行吸附脱色,鱼油由原本的红棕色变为亮青黄色,且油脂回收率达 72.62%。此外,粗藻油色素含量过高,颜色一般呈黑褐色,会影响脱酸工艺中滴定终点的判断。因此,微藻油精炼可采用先脱色后脱酸的工艺路线。

### 1.2.4 脱臭工艺

鱼油等部分水产油脂本身带有一定的腥臭味,并且在储存过程中油脂中的蛋白质等成分容易氧化分解产生一些刺鼻的气味,因此粗油脂需要通过脱臭工艺将其去除。脱臭的常用方法有真空脱臭法、气体吹入法、物理吸附法和减压蒸馏脱臭法等。脱臭工艺中的高温、高压环境容易导致油脂氧化,EPA、DHA 等有效成分流失,因此在脱臭工艺中需要严格控制温度和压力。孙乐等<sup>[31]</sup>对精炼真空系统进行优化,可在较低温度下脱除鱼油中的不良气味,保证了鱼油的品质。

## 1.3 DHA、EPA 富集工艺

水产油脂中富含  $\omega-3$  不饱和脂肪酸。但是通常粗油脂中 DHA 和 EPA 含量无法满足食品工业和医疗中的需求。因此,需要对提取的油脂进行 DHA 和 EPA 的富集。常见的 DHA 和 EPA 分离纯化方法如表 2 所示。

表 2 常见的 EPA 和 DHA 分离纯化方法

方法	相关原理	优点	缺点
低温结晶法 <sup>[32]</sup>	利用不同物质在有机溶剂中溶解度的差异进行分离纯化	设备简单,操作方便,成本低	使用较多有机溶剂,分离效率较低
尿素包合法 <sup>[5]</sup>	根据脂肪酸的不饱和度分离富集脂肪酸	操作简单,成本低,耗能少	冷却时间较长,易污染环境
银离子络合法 <sup>[5]</sup>	利用银离子与不饱和脂肪酸中的碳碳双键发生络合反应形成亲水极性络合物进行分离	选择性强,效率高	成本较高,反应废液难处理
分子蒸馏法 <sup>[32]</sup>	利用不同脂肪酸分子高真空下挥发度的差异进行分离	油脂品质好,分离效率高	需高真空设备,能耗大
超临界流体萃取法 <sup>[5]</sup>	利用各组分在超临界流体中溶解度的不同而进行分离	效率高,耗时短,条件温和,产品品质好	设备昂贵,能耗大,操作烦琐
脂肪酶水解法 <sup>[5]</sup>	利用脂肪酶水解甘油三酯水解速度的不同浓缩分离	条件温和,油脂品质较高,酶可以连续使用	酶制剂昂贵,稳定性较差

低温结晶法在低温环境下使部分溶解度较低的脂肪酸结晶析出,可减少结晶过程中对双键的破坏,较好地保持油脂中有效成分的天然形式。该法既适用于乙酯型油脂的富集,也适用于甘油酯型油脂的富集。低温结晶法优点在于操作简单、成本低,且低温环境可减少产物的氧化。溶剂分步结晶法是最常用的方法之一,可较好地控制油脂成分、结晶温度、冷却速度和油溶比等因素<sup>[5]</sup>。但低温结晶法对于冷却温度有较高的要求。

尿素包合法是一种常用的富集不饱和脂肪酸的方法。研究发现,用该法富集鱼油中的 DHA 和 EPA,可除去乙酯型鱼油中的低不饱和和短碳链脂肪酸,提高鱼油中 EPA 乙酯和 DHA 乙酯纯度<sup>[33]</sup>。尿素包合法与溶剂分步结晶法一样,都存在对脂肪酸的选择性较低,有机溶剂消耗量大,容易导致溶剂残留的问题。

银离子络合法是一种提取、分离和浓缩不饱和脂肪酸的方法。但由于 AgNO<sub>3</sub> 价格较高,且 Ag<sup>+</sup> 回收率低,该法不适合大规模工业化生产。

分子蒸馏法也称短程蒸馏法,目前已经在油脂生产中广泛应用,其优点在于无需加入有机溶剂进行分离,有效避免了溶剂污染,同时,在真空环境下脂肪酸分离的温度较低,可避免热敏性物质的破坏。分子蒸馏法也可引入油脂精炼工艺中,有效避免传统脱臭的高温环境对 DHA 等不饱和脂肪酸的破坏<sup>[12]</sup>。但分子蒸馏法的设备投资成本大,能耗高。

超临界流体萃取法常用的萃取剂有 CO<sub>2</sub>、丙烷等。CO<sub>2</sub> 无毒、易得、成本低,常用于萃取水产油脂中的有效成分。超临界流体萃取法反应条件温和,有利于热敏性物质和易氧化物质的分离,可使油脂中的 DHA、EPA 不受破坏,但该法设备昂贵,能耗

大,多用于加工高附加值的产品。

脂肪酶水解法主要利用脂肪酶对底物的特异性,优先水解饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸,最后水解多不饱和脂肪酸,使 DHA、EPA 能在甘油酯中富集。该法主要针对甘油酯型的不饱和脂肪酸,反应条件温和,油脂品质较高。Yang 等<sup>[34]</sup> 在商业化脂肪酶中优选出柱状假丝酵母中的脂肪酶 AY “Amano” 400SD 为最佳脂肪酶富集金枪鱼油中的  $\omega$ -3 不饱和脂肪酸甘油酯,在最佳条件下对鱼油进行酶促水解,得到甘油酯部分的  $\omega$ -3 不饱和脂肪酸含量可达 57.7%,以藻油为底物时,甘油酯部分的总不饱和脂肪酸含量为 89.9%。Akanbi 等<sup>[35]</sup> 采用南极假丝酵母脂肪酶 A 水解藻油,最终富集的 DHA 含量从 40% 提高至 82%。但由于酶制剂价格昂贵,稳定性较差,难以广泛应用于实际生产中。米曲霉脂肪酶价格低廉,傅新媛等<sup>[36]</sup> 采用米曲霉脂肪酶对裂殖壶藻油脂中的 DHA 进行富集,DHA 含量达 55.43%。未来,可进一步筛选出高效、低廉的脂肪酶,增加固定化脂肪酶的重复利用次数,降低脂肪酶水解法的生产成本。

## 2 水产油脂的营养

水产油脂中含有多种不饱和脂肪酸。其中,EPA 具有促进人体生长发育、增强免疫调节等作用。DHA 可以通过影响哺乳动物的特异性免疫和非特异性免疫,促进机体的免疫调节功能,减少炎症基因表达<sup>[36]</sup>。

基于提取方法和原材料的不同,磷虾油中的磷脂含量在 39.89% ~ 80.69% 之间<sup>[6]</sup>。磷虾油中脂肪酸主要与磷脂骨架相连,磷脂型的不饱和脂肪酸在磷虾油中含量较高,其更易溶于水,能在消化后被小肠细胞充分吸收,有效提高了生物利用度<sup>[3]</sup>。磷

虾油中不仅富含磷脂型的EPA和DHA,还富含虾青素、生育酚等多种生理活性物质。虾青素是一种天然强抗氧化剂,具有抗氧化、抗炎、抗癌等多种生理活性<sup>[3]</sup>。此外,虾青素附着在磷脂上使得磷虾油的氧化稳定性更好。因此,磷虾油在未来功能性食品的开发方面潜力巨大,具有良好的市场前景。

随着水产油脂的发展,从鱼类中提取不饱和脂肪酸已无法满足市场需求。鱼油中DHA含量较低,仅为10%左右,而微藻脂质中DHA含量最高可达40%<sup>[36]</sup>。微藻被认为是最有前途和可持续生产EPA和DHA的替代原料之一,且具有出脂率高、无污染等特点,微藻油已被广泛应用于婴幼儿配方食品中。叶黄素和玉米黄质等是一类仅存在于植物或藻类中的类胡萝卜素。微藻油中的叶黄素和玉米黄质是在视网膜和晶状体中发现的唯一类胡萝卜素,其可与微藻油中的DHA共同维护视网膜健康,保护视力。研究发现,绿球藻、小球藻和雨生红球藻中富含虾青素,已成为虾青素的新型来源<sup>[4, 37]</sup>。

此外,一些水产油脂中还富含维生素A和D等脂溶性维生素,可预防夜盲症、佝偻病等疾病的发生。

### 3 水产油脂的安全

海洋污染已成为影响水产油脂品质和安全的重要因素,严重威胁着人类健康。目前海洋污染主要包括难降解有机物、重金属离子等,这些物质可通过食物链在水产动物体内积累,从而导致水产油脂存在被污染的风险。当人类摄入受污染的水产油脂,就存在对人体健康造成危害的风险。

难降解有机物是指一类能在海水中长期残留且难以降解的污染物,如多环芳烃、多氯联苯类物质、化学杀虫剂等。这类化合物容易在人体中积累,长期摄入会破坏人体免疫机能,诱发癌症等疾病<sup>[4, 37]</sup>。

重金属元素主要包括镉、砷、铅和汞等,可对人体神经系统、血液系统以及肝肾等器官产生不同程度的伤害。重金属离子对于婴幼儿发育的危害更为严重,进食受重金属污染的鱼类可导致孕妇流产或对婴幼儿造成不可逆转的神经缺陷<sup>[38]</sup>。研究发现,铅离子对人体的危害最大,过量摄入铅离子对人体大脑发育产生极大的影响,易造成神经发育迟缓、记忆力衰退等症状<sup>[39]</sup>。对此,国际上已对水产油脂中重金属等污染物的含量作出了相关规定,以确保其产品的安全性。目前,水产油脂中的重金属离子可通过沉淀吸附法、膜分离法、离子交换法等方法脱

除。秦富等<sup>[40]</sup>对国内外不同品牌的鱼油胶囊进行检测,均未检出重金属超标的情况。

为避免海洋污染对水产油脂品质的影响,近年来利用生物工程技术于密闭的系统中对筛选后的藻种进行培养,能得到安全、无毒的DHA藻油<sup>[38]</sup>。而且生物工程技术可实现藻油的可持续发展,减少过度捕杀海洋生物对环境的破坏。在许多发达国家,DHA藻油已成为补充DHA的主要来源,适合不同人群长期食用。

此外,油脂的氧化也同样严重威胁着水产油脂的安全。水产油脂在生产加工及储存过程中,由于受到氧气、金属元素等因素的影响,其不饱和脂肪酸易发生氧化酸败,生成醛、酮、醇等有毒有害物,出现回味臭、酸败臭及回色等变化。氧化的油脂不仅口感和颜色会变差,其功能性营养成分也会流失。

为保证水产油脂的安全,通过添加抗氧化剂能在一定程度上延缓油脂的氧化。油脂的抗氧化剂分为人工合成抗氧化剂和天然抗氧化剂。人工合成抗氧化剂,如叔丁基对苯二酚(TBHQ)等具有较强的抗氧化能力,可在国家标准规定范围内应用于油脂中。近年来,维生素E、茶多酚和迷迭香提取物等天然抗氧化剂已被越来越多地应用到鱼油等水产油脂中。天然抗氧化剂多从动植物体内提取,因其毒性低、稳定性高等特点受到消费者的青睐。复合抗氧化剂能更好地起到抗氧化作用。刘小莉等<sup>[41]</sup>将维生素E与增效剂柠檬酸复合加入南极磷虾油中,其抗氧化效果优于使用单一抗氧化剂TBHQ,预测货架期可由2.09个月延长至12.21个月。此外,研究发现,在油脂提取阶段添加抗氧化剂的效果优于在成品油阶段添加抗氧化剂的效果。胥亚夫等<sup>[42]</sup>通过在不同阶段添加不同作用原理的抗氧化剂等方式,可有效减少南极磷虾油在生产和储存过程中的氧化和营养成分的损失。

增强包封条件可以有效保护油脂免受自由基、金属离子和氧气的影响。微胶囊技术是一类较好的包封技术,可将油脂包埋在微米大小的胶囊中,掩蔽水产油脂的不良气味,避免环境因素对其有效成分的破坏,延长产品的储存时间。在微胶囊制备过程中,可通过控制乳化剂种类、pH和金属离子等因素提高乳状液稳定性,从而获得高品质的微胶囊产品。喷雾干燥法<sup>[43]</sup>、冷冻干燥法<sup>[44]</sup>等是较为常用的微胶囊制备方法。喷雾干燥法的操作灵活度高,成本较低,在食品加工中应用广泛。冷冻干燥法相较于喷雾干燥法,其加工温

度较低,油脂的氧化稳定性更好。胥亚夫等<sup>[45]</sup>采用喷雾干燥法制备南极磷虾油微囊粉,最终包埋率可达95%以上。但目前微胶囊技术同样面临着许多的问题和挑战,如生产成本较高、合适壁材的选择等。

未来,水产油脂的安全研究仍需不断探索,可通过进一步的技术升级促进水产油脂的产业化发展。

#### 4 结束语

近年来,EPA和DHA的功能特性得到了广泛的关注与认可,富含EPA和DHA的水产油脂需求显示出强劲增长趋势。水产油脂中丰富的活性成分在促进大脑发育、防治慢性心血管疾病、增强机体免疫调节等方面表现出积极的生理作用,值得进一步探索和研究。

对于水产油脂的加工、安全等问题仍有待进一步优化。如何提高、利用好水产油脂的营养功能是今后研究的重点。目前鱼油仍是多不饱和脂肪酸的主要来源,但鱼油存在一定的腥臭味且氧化稳定性差,使其作为营养补充剂受到一定的限制。磷虾油、微藻油等新兴油脂,可作为传统水产油脂的重要补充。磷虾油中富含磷脂、虾青素等物质,其自乳化能力和氧化稳定性较好。利用微藻油中的不饱和脂肪酸生产功能性产品,具有良好的市场前景。但微藻油的发展历史较短,市场的认知度还有待进一步提高。随着微胶囊技术的逐步成熟,水产油脂将能更好地应用于功能性食品、医学药品等领域。

水产油脂的开发利用已成为必然趋势,水产油脂类产品将更加多元化。相信今后水产油脂将拥有更广阔的发展前景。

#### 参考文献:

[1] 白冬. 深海鳕鱼鱼油提取、精制与抗氧化活性研究[D]. 浙江 舟山:浙江海洋大学, 2018.

[2] 贾宏信, 苏米亚, 陈文亮, 等. 鱼油补充对中老年人炎症性衰老及相关疾病有益作用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 443-450.

[3] 林云伟. 南极磷虾油基纳米结构脂质载体的制备及性质研究[D]. 广州:华南理工大学, 2020.

[4] NETHRAVATHY M U, MEHAR J G, MUDLIAR S N, et al. Recent advances in microalgal bioactives for food, feed, and healthcare products: commercial potential, market space, and sustainability[J]. Compr Rev Food Sci F, 2019, 18(6): 1882-1897.

[5] 张渊超. 超高压辅助提取鱼油和富集  $n-3$  PUFA 的研究[D]. 广东 湛江:广东海洋大学, 2020.

[6] 谢丹. 南极磷虾油的分级制备及功能评价[D]. 江苏 无

锡:江南大学, 2019.

[7] 李佩雷, 李红娜, 敬科举, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 夹带乙醇萃取裂殖壶藻油脂的工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(11): 45-50, 56.

[8] 徐文思, 妥丰艳, 周大勇. 超临界二氧化碳法萃取南极磷虾油的研究[C]//中国食品科学技术学会第十一届年会论文摘要集. 北京:中国食品科学技术学会, 2014.

[9] 刘超. 鳕鱼肝油的提取工艺优化及品质评价[D]. 山东青岛:青岛大学, 2015.

[10] 刘志东, 陈雪忠, 李斌, 等. 制备方法对南极磷虾油品质的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(1): 191-196.

[11] 徐晓斌, 范宁宁, 宗俊. 南极磷虾油提取工艺的研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(18): 312-316.

[12] 唐佳芮, 杜宣利, 张羽霄, 等. 微藻油加工技术研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2019, 26(1): 10-12.

[13] 贺瑶. 微拟球藻油脂提取、精炼及 EPA 富集工艺的研究[D]. 武汉:武汉轻工大学, 2020.

[14] 赵腾飞, 应晓国, 张宾, 等. 大黄鱼鱼油的制备及其理化性质研究[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 6-10, 17.

[15] 石帅. 高产 DHA 微藻的筛选、藻油萃取工艺优化及抗肥胖活性研究[D]. 济南:山东师范大学, 2017.

[16] HAO X, SUO H, PENG H, et al. Simulation and exploration of cavitation process during microalgae oil extracting with ultrasonic-assisted for hydrogen production[J]. Int J Hydrogen Energ, 2020, 46(3): 2890-2898.

[17] 郑学超. 章鱼副产物中鱼油的提取方法研究[D]. 河北保定:河北农业大学, 2018.

[18] CHEN C Y, BAI M D, CHANG J S. Improving microalgal oil collecting efficiency by pretreating the microalgal cell wall with destructive bacteria[J]. Biochem Eng J, 2013, 81: 170-176.

[19] 翁婷. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取南极磷虾油及虾青素工艺研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2013.

[20] 杨彩莉. 超临界 CO<sub>2</sub> 提取金枪鱼鱼油的工艺与品质分析[D]. 广东 湛江:广东海洋大学, 2019.

[21] 赵泓博. 南极磷虾油分级制备及其品质分析[D]. 辽宁 大连:大连工业大学, 2019.

[22] 李崧雪. 微藻油脂原料制备与乙醇亚临界流体萃取藻油方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.

[23] 郭婷婷, 万楚筠, 黄凤洪, 等. 亚临界流体萃取油脂及微量成分研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(1): 154-160.

[24] 万方. 微藻食用油脂湿法提取工艺及其品质研究[D]. 天津:天津大学, 2019.

[25] 王元好, 马岩, 袁起新, 等. 南极磷虾油制备技术及其生理功能的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(21): 220-224.

[26] MA L, HE Q, QIU Y, et al. Food matrixes play a key

- role in the distribution of contaminants of lipid origin: a case study of malondialdehyde formation in vegetable oils during deep - frying [ J/OL ]. Food Chem, 2021, 347 ( 7 ): 129080 [ 2021 - 09 - 01 ]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129080>.
- [ 27 ] 张建友, 费晓文, 刘建华, 等. 鱼油精制过程中的品质变化规律及评价 [ J ]. 现代食品科技, 2016, 32 ( 6 ): 194 - 199.
- [ 28 ] 刘坤. 湿基南极磷虾中磷虾油的超临界 CO<sub>2</sub> 萃取工艺研究 [ D ]. 山东 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [ 29 ] 胥亚夫, 韩雨哲, 赵月. 富含磷脂的南极磷虾油提取工艺研究 [ J ]. 渔业研究, 2020, 42 ( 1 ): 65 - 71.
- [ 30 ] 陈转霞, 陶宁萍. 深海粗鱼油的精炼工艺研究 [ J ]. 中国油脂, 2018, 43 ( 2 ): 5 - 9.
- [ 31 ] 孙乐, 赵宇. 深海鱼油精炼真空系统的应用实践 [ J ]. 粮食与食品工业, 2020, 27 ( 2 ): 4 - 6.
- [ 32 ] 陈娜. 金枪鱼油精制及鱼油挥发性成分分析研究 [ D ]. 浙江 舟山: 浙江海洋大学, 2016.
- [ 33 ] 刘汝萃, 王彩华, 肖晶, 等. 鱼油的提取、富集与应用研究进展 [ J ]. 粮食与食品工业, 2017, 24 ( 5 ): 5 - 8.
- [ 34 ] YANG Z Z, JIN W H, CHENG X Y, et al. Enzymatic enrichment of *n* - 3 polyunsaturated fatty acid glycerides by selective hydrolysis [ J/OL ]. Food Chem, 2020, 346 ( 15 ): 128743 [ 2021 - 09 - 01 ]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128743>.
- [ 35 ] AKANBI T O, BARROW C J. *Candida antarctica* lipase A effectively concentrates DHA from fish and *Thraustochytrid* oils [ J ]. Food Chem, 2017, 229: 509 - 516.
- [ 36 ] 傅新媛, 黄林洁, 刘思彤, 等. 米曲霉脂肪酶富集浓缩裂殖壶藻油脂中 DHA 的机理研究 [ J ]. 中国粮油学报, 2021, 36 ( 10 ): 90 - 95.
- [ 37 ] 王志钢, 刘彬, 于春媛, 等. 藻类保健功能及保健食品应用与开发 [ J ]. 中国食物与营养, 2020, 26 ( 12 ): 27 - 30.
- [ 38 ] 陈殊贤, 郑晓辉. 微藻油和鱼油中 DHA 的特性及应用研究进展 [ J ]. 食品科学, 2013, 34 ( 21 ): 439 - 444.
- [ 39 ] 孔丹丹, 李歆悦, 孟莹, 等. 我国药用海洋生物中重金属污染现状及检测、脱除技术研究进展 [ J ]. 中国中药杂志, 2019, 44 ( 23 ): 5022 - 5030.
- [ 40 ] 秦富, 司露露, 苏华, 等. 国产与进口鱼油胶囊质量安全指标比较研究 [ J ]. 分析仪器, 2021 ( 4 ): 177 - 183.
- [ 41 ] 刘小莉, 胡彦新, 贾洋洋, 等. 南极磷虾油脂脂肪酸组成及氧化稳定性 [ J ]. 江苏农业科学, 2016, 44 ( 10 ): 357 - 360.
- [ 42 ] 胥亚夫, 俞存兵, 余奕珂, 等. 抗氧化剂对南极磷虾油氧化稳定性的影响研究 [ J ]. 食品研究与开发, 2021, 42 ( 6 ): 1 - 5.
- [ 43 ] LOUGHRILL E, THOMPSON S, OWUSU - WARE S, et al. Controlled release of microencapsulated docosahexaenoic acid ( DHA ) by spray - drying processing [ J ]. Food Chem, 2019, 286: 368 - 375.
- [ 44 ] 崔婷婷, 贾爱荣, 白新峰, 等. 不同制备方式的鱼油微胶囊挥发性成分及贮藏稳定性的比较 [ J ]. 现代食品科技, 2020, 36 ( 11 ): 236 - 243.
- [ 45 ] 胥亚夫, 俞存兵, 郭忠, 等. 南极磷虾油微囊粉的制备及其性能研究 [ J ]. 中国油脂, 2022, 47 ( 2 ): 70 - 73.

(上接第3页)

法制得接骨木籽油不饱和脂肪酸含量高达 82.08%, 维生素 E、多酚、总黄酮的含量分别为 23.8、32.7、38.3 mg/kg。接骨木籽油不饱和脂肪酸含量高, 且富含亚油酸和亚麻酸, 可作为一种优质植物油进行开发。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 高晓旭, 戚继忠. 接骨木果油的超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取及其微胶囊技术研究 [ J ]. 中国油脂, 2005, 30 ( 11 ): 68 - 70.
- [ 2 ] 王启珍. 接骨木食用药用价值及开发利用 [ J ]. 中国林副特产, 2002 ( 2 ): 59 - 60.
- [ 3 ] 徐亮, 陈功锡, 张代贵, 等. 接骨木属植物研究进展 [ J ]. 中国野生植物资源, 2010, 29 ( 5 ): 1 - 5, 10.
- [ 4 ] 沈植国, 朱云宝, 刘天锋, 等. 优良木本油料树种接骨木栽培技术 [ J ]. 江苏农业科学, 2012, 40 ( 8 ): 163 - 165.
- [ 5 ] 娄桂艳, 赵青, 迟松江, 等. 富含  $\alpha$  - 亚麻酸的新油源: 接骨木籽油的研究 [ J ]. 中国油脂, 1998, 23 ( 3 ): 59.
- [ 6 ] 杨红梅. 接骨木的化学成分、药理活性和食用价值研究进展 [ J ]. 人参研究, 2006 ( 4 ): 23 - 26.
- [ 7 ] 李铨万, 沈刚哲, 张善玉, 等. 接骨木果油抗癌作用的实验研究 [ J ]. 中国中医药科技, 2000, 7 ( 2 ): 103.
- [ 8 ] 鲁柏辰, 赵敏, 杨晓宇, 等. 接骨木油对小鼠急性肝损伤的预防保护作用 [ J ]. 卫生研究, 2018, 47 ( 3 ): 437 - 439, 464.
- [ 9 ] 胡伟, 李辉, 刘克武. 接骨木籽油抗氧化、降血糖和降血脂生物活性的研究 [ J ]. 中国林副特产, 2018 ( 1 ): 1 - 7.
- [ 10 ] 胡荣, 姜炳文, 胡英明, 等. 接骨木在日化领域中的应用 [ J ]. 精细化工, 1996 ( 3 ): 5 - 8.
- [ 11 ] 刘克武, 吕慧, 陈舜胜, 等. 接骨木果油的超临界 CO<sub>2</sub> 萃取及其生物活性的研究进展 [ J ]. 中国林副特产, 2014 ( 2 ): 82 - 86.
- [ 12 ] 谭传波, 田华, 赖琼玮, 等. 不同工艺山茶油中生物活性物质含量的比较 [ J ]. 中国油脂, 2018, 43 ( 12 ): 41 - 44, 49.
- [ 13 ] 朱敏敏, 魏长庆. 响应面法优化压榨制备番茄籽油工艺的研究 [ J ]. 食品工业, 2017, 38 ( 6 ): 137 - 139.
- [ 14 ] 周鸿翔, 黄小焕, 王广莉, 等. 响应面法优化火麻仁油压榨制取工艺 [ J ]. 食品科学, 2012, 33 ( 18 ): 67 - 72.
- [ 15 ] 肖小年, 桂静芬, 刘唤, 等. 压榨法制备紫苏子油及其脂肪酸组分分析 [ J ]. 中国食品学报, 2018, 18 ( 2 ): 183 - 190.