

鱼油 n-3 PUFA 富集、稳态化技术及生物活性研究进展

刘书源¹, 郭明珠¹, 马爱进², 桑亚新¹, 孙纪录^{1*}

(¹河北农业大学食品科技学院 河北保定 071000

²北京工商大学食品与健康学院 北京 100048)

摘要 鱼油富含人体所需的多不饱和脂肪酸,在科研与应用领域具有广泛价值。本文重点围绕其 n-3 PUFA 富集工艺、稳态化技术及生物活性进行综述,阐述不同方法的优、缺点,分析工业化生产的可行性,展望未来鱼油加工领域的发展趋势,旨在为鱼油类资源的合理、健康、可持续发展提供理论依据。

关键词 鱼油; 富集工艺; 稳态化; n-3 PUFA

文章编号 1009-7848(2024)02-0467-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.02.042

鱼油由鱼类及其加工副产物中提炼所得^[1],二十碳五烯酸(Eicosapentaenoic acid, EPA)、二十二碳六烯酸(Docosahexaenoic acid, DHA)等 n-3 多不饱和脂肪酸(n-3 Polyunsaturated fatty acids, n-3 PUFA)含量丰富^[2],同时富含维生素 A、D、E、K 等多种营养元素^[3-5],营养价值较高。鱼油中的 n-3 PUFA 是生物活性物质的良好来源^[6]。国内外针对鱼油的开发与研究热度持续不减,其抗炎抗癌,提高记忆力,改善视力等多种医学功效的证实使鱼油无论是在食用油、婴幼儿乳粉配方等食品方面,还是在软胶囊、咀嚼乳等功能性食品方面被广泛应用。根据《2021 中国渔业统计年鉴》中针对 2020 年和 2019 年全国水产加工情况的统计分析^[7],在全国水产加工品总量幅度下滑的同时,鱼油制品的总量依旧处于增长趋势,涨幅达到 8.68%,居于首位,发展空间巨大。基于此,对鱼油 n-3 PUFA 富集、稳态化技术及生物活性的研究在水产品加工领域具有重要意义。

1 鱼油 n-3 PUFA 富集方法

EPA 和 DHA 的相对含量是判断鱼油营养价值的重要标准^[8-9],表 2 列举了 14 种常见鱼类油脂

中的 EPA 和 DHA 总相对含量,金枪鱼最高,为 31.65%;草鱼最低,为 1.82%,均不能满足食品领域与医疗行业的需求。

为满足功能性食品和食品补充剂的制作需求,提取后的鱼油需经浓缩、富集来提高 n-3 PUFA 的含量^[21],可通过冷冻结晶^[22]、尿素包合^[23]、分子蒸馏^[24]、银离子络合^[25]、超临界萃取^[26]和脂肪酶^[27]等方法来实现高纯度 n-3 PUFA 的生产。

1.1 冷冻结晶法

冷冻结晶法依据低温环境下不同组分在有机溶剂中溶解度的差异进行分离^[28]。该法操作方便、成本低廉^[29],且低温可减缓脂肪酸的氧化变质,其中溶剂分步结晶法较为常用^[30]。郑飞洋等^[31]通过对金枪鱼油中 EPA 和 DHA 富集效果的研究,在溶剂为乙腈与丙酮且体积比 1:12、鱼油与复合溶剂体积比 7:40、-50℃下结晶 150 min,PUFA 含量达 51.61%,EPA 与 DHA 含量可达 (12.83±0.34)%与 (28.70±0.48)%。Zhang 等^[32]对比了丙酮、己烷等 6 种溶剂的富集效果,在最优结晶条件下,EPA 与 DHA 纯度可达 15.1%,58.4%,相应产率分别为 61.5%,61.8%。然而,该工艺过程极易造成溶剂残留,且对相关设备的要求较高,限制了该法的应用范围。

1.2 尿素包合法

尿素包合法通过低温分离不同种类的脂肪酸^[33-34],结晶时间、结晶温度、醇脲比和脲酯比为影响包合效果的主要因素^[35]。该法成本廉价、反应迅速,包合过程中可生成稳定晶体,适宜工业化生

收稿日期: 2023-02-11

基金项目: 河北省重点研发计划项目(22327310D);河北省现代农业产业技术体系淡水养殖创新团队建设项目(HBCT2018180206)

第一作者: 刘书源,男,硕士

通信作者: 孙纪录 E-mail: fm1311sun@163.com

表1 2020年全国水产加工品总量^[7]Table 1 Total amount of aquatic products processed in China in 2020^[7]

指标	2020年/t	2019年/t	2020年比2019年		
			增减量/t	增减幅度/%	
水产加工品总量	20 907 861	21 714 136	-806 275	-3.71	
淡水加工产品	4 115 121	3 953 244	161 877	4.09	
海水加工产品	16 792 740	17 760 892	-968 125	-5.45	
水产冷冻品	冷冻品	7 600 877	7 938 585	-337 708	-4.25
	冷冻加工品	7 158 262	7 384 072	-225 810	-3.06
	总计	14 759 139	15 322 657	-563 518	-3.68
鱼糜制品及干腌制品	鱼糜制品	1 267 727	1 393 957	-126 230	-9.06
	干腌制品	1 383 164	1 521 258	-138 094	-9.08
	总计	2 650 891	2 915 215	-264 324	-9.07
藻类加工品	1 048 090	1 151 716	-103 626	-9.00	
罐制品	3 29 857	354 145	-24 288	-6.86	
水产饲料(鱼粉)	707 638	699 008	8 630	1.23	
鱼油制品	53 243	48 991	4 252	8.68	
其它水产加工品	助剂和添加剂	40 848	67 845	-26 997	-39.79
	珍珠	28	167	-139	-83.23
	总计	40 876	68 012	-27 136	-39.90

表2 14种鱼类油脂中EPA和DHA总相对含量

Table 2 Total relative contents of EPA and DHA in 14 species of fish oils

类别	拉丁文学名	油脂中EPA和DHA总相对含量/%	参考文献
金枪鱼	<i>Thunnini</i>	31.65	[10]
鲑鱼	<i>Oncorhynchus keta</i>	14.59	[11]
鳕鱼	<i>Gadus</i>	23.00	[12]
大黄鱼	<i>Larimichthys crocea</i>	11.69	[13]
石斑鱼	<i>Epinepheluspp</i>	17.78	[14]
带鱼	<i>Trichiurus lepturus</i>	25.32	[15]
河鲀	<i>Tetraodontidae</i>	17.19	[16]
罗非鱼	<i>Oreochromis mossambicus</i>	2.23	[17]
泥鳅	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	4.20	[18]
巴沙鱼	<i>Pangasius bocourti</i>	2.00	[19]
草鱼	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	1.82	[20]
鲫鱼	<i>Carassius auratus</i>	18.69	[20]
鳙鱼	<i>Aristichys nobilis</i>	10.54	[20]
鲶鱼	<i>Silurus asotus</i>	13.63	[20]

产。Sathess等^[36]利用尿素络合对水产副产物中提取的n-3 PUFA进行富集,所得产物品质及理化性质良好。Zheng等^[37]使用尿素包合法,通过响应面法优化海豹油中n-3 PUFA最佳富集条件(脲酯质量比2.38:1.00、15℃下结晶2.5 h),在最优条件下,n-3 PUFA含量和回收率分别为71.35%和82.31%。

1.3 分子蒸馏法

即短程蒸馏,该法利用油脂在同一压强与温度下不同组分间挥发性的差异进行分离、纯化。此法作用时间短(1~60 s)^[38],不应用有机溶剂,避免产品的污染,可减少废物的产生,产品安全性较高。宋恭师等^[39]以大目金枪鱼油为原料进行精馏,获得EPA乙酯含量达到82.40%,得率为39.00%。

He 等^[40]利用酶解结合分子蒸馏从富含 DHA 的海藻油中分离饱和脂肪酸,150 °C 下通过分子蒸馏得到 DHA 含量为 70.27%。食品加工领域中,分子蒸馏虽多用于浓缩和纯化高黏度、高沸点、高分子质量且热稳定性差的有机化合物^[41-42],但对该法对分子质量相近组分的分离效果不佳。

1.4 银离子络合法

银离子络合法利用 Ag^+ 与 PUFA 中 $C=C$ 络合形成亲水极性化合物从而达到分析目的^[43]。郑振霄^[44]结合了尿素包合、分子蒸馏与银离子络合 3 种方法,在海豹油与 $AgNO_3$ 溶液质量比 1:2.75、8.5 °C 下反应 5 h 后,产物中 DPA 质量分数可达 37.42%,提升显著。Kirubanandan 等^[45]发现 $AgNO_3$ 水溶液在微流体反应器中 10 °C 下反应 36 s 与在连续搅拌反应器中反应 15 min 的效果差异很小,EPA 与 DHA 含量可达 38%~42%,27%~30%。银离子络合法反应条件虽温和、可获得高纯度产物,但产量较小,且 $AgNO_3$ 价格昂贵且 Ag^+ 回收率低,因此在大规模生产中不宜采用。

1.5 超临界萃取法

不同饱和度脂肪酸的溶解度在超临界流体中存在差异。Gan 等^[46]以林蛙卵为原料,根据 BBD (Box-Behnken Design) 响应面模型得到最佳超临界 CO_2 萃取条件为压力 29 MPa、流量 82 L/h、温度 50 °C、时间 132 min,得到的实际最优产率为 (13.29±0.37)%。Sara 等^[47]将超临界萃取与共溶剂

相结合从虾副产品中提取脂质和虾青素,结果表明提取物中的脂质与虾青素产率有显著提高。该法因具有萃取温度低、速度快、步骤较为简便、萃取组分不易降解等优点成为分离热敏性物质的最优法^[48-49]。然而,该工艺产品得率较低,且对相近碳链长度的脂肪酸分离效果较差。

1.6 脂肪酶法

该法包括酯化法、酯交换法和水解法。Yang 等^[50]选用茶柱假丝酵母脂肪酶 AY “Amano” 400SD 富集金枪鱼油,得到的 n-3 PUFA 含量可达 57.7%。Akanbi 等^[51]选用南极假丝酵母脂肪酶 A 富集藻油脂肪酸,DHA 含量从 40% 提高至 82%。相较于传统的富集方法,脂肪酶法反应条件温和、适用性强、选择性高,可对 EPA 与 DHA 相对产量进行人为调控^[52]。然而,脂肪酶法也面临酶种类少、价格高、失活等工艺难点。

尿素包合法和分子蒸馏法虽然是目前工业生产中使用较为普遍的富集方法,但尿素包合工艺中产生的废液废料并未得到妥善的处理;分子蒸馏工艺中的高温环境会造成有效成分的损失,影响产品产率与品质;冷冻结晶所得产品质量较差; $AgNO_3$ 增加了银离子络合法的工艺成本;超临界萃取技术与脂肪酶法反应条件温和,可避免 EPA 和 DHA 的氧化,同时无有机试剂残留,虽然二者均存在如何降低成本的工艺问题,但仍具较大的发展潜力。

表 3 鱼油 n-3 PUFA 富集方法比较

Table 3 Comparison of enrichment methods of fish oil n-3 PUFA

方法	优点	缺点
冷冻结晶法	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	操作简单,成本低,耗能少	冷却时间较长,易污染环境
分子蒸馏法	产品品质高,分离效率高	操作温度较高,能耗大
银离子络合法	选择性强,分离效率高	成本较高,反应废液难处理
超临界萃取法	分离效率高,耗时少,条件温和,产品品质高	设备昂贵,能耗大,操作繁琐
脂肪酶法	选择性强,条件温和,产品纯度稳定,能耗少	酶制剂昂贵且种类少,易失活

EPA 和 DHA 等生物活性物质易受环境因素而氧化变质,如何在富集过程中避免高温、高压对其造成的损耗是工艺优化的重点,同时仍要避免操作所造成的环境污染,并降低工艺成本。当前,复合技术被不断探索以富集鱼油 n-3 PUFA,依据原料品质、产品特性选择不同联合富集方法,有

利于在保证产品价值的同时实现生产效率的提升与成本的削减。

2 鱼油 n-3 PUFA 稳态化技术

EPA、DHA 并不稳定,易受环境因子(光、热、氧、自由基等)影响而发生氧化、变异、降解等反应

导致其生物活性降低甚至丧失,故通常采用稳态化技术,在不影响鱼油应有感官品质的基础上使其具有较强的环境应力耐受性,并保持或提高功能因子的生物活性。功能性油脂稳态化技术的作用机理分为3点^[53]:改变物料的物理形态(不造成物料化学性质特异性变化);控制环境条件(温度、pH值、离子强度等)并利用界面反应(吸附、凝聚、聚集等)形成空间网状结构(囊壳、凝胶、膜等);对有效成分进行包埋以阻断不利因素对其的破坏。

2.1 微囊化技术

微胶囊能在一定条件下对所包裹的材料进行可控释放,是油脂稳态化技术的常用手段,自1883年问世以来已得到充分的发展与认可。该技术可为物理法、化学法和物理化学法3大类,共20余种。食品加工领域中主要选用喷雾干燥法、凝聚法、包络结合法、锐孔-凝固浴法和冷冻干燥法微胶囊化鱼油。

2.1.1 喷雾干燥法 该法利用喷雾装置在高温下雾化含有芯材并加入乳化剂而形成的壁材乳液,乳液小液滴在壁材凝固后即可得到微胶囊。此过程可得到较低水分活度的粉末状微粒^[54],产品质量较好。然而,该方法存在干燥颗粒不均、挥发性物质损失等不足,对壁材的选用标准也较高等缺点。Abdul等^[55]在进气温度140℃、壁材10%、泵速4 mL/min、针速5 s条件下包埋率可达到(83.77±0.96)%。李杨等^[56]使用大豆、乳清和豌豆3种分离蛋白分别与麦芽糊精形成复合壁材,以卵磷脂为乳化剂制备鱼油微胶囊,结果表明乳清分离蛋白制备的乳液粒径最小、微胶囊的包埋率最高(95.34%)、氧化稳定性最好,且3种鱼油微胶囊在200℃以下均有良好的热稳定性。

2.1.2 凝聚法 该法以水溶性壁材包埋脂溶性材料,分为单凝聚法和复凝聚法,二者选用的壁材不同。单凝聚法壁材单一;复凝聚法壁材选用两种带相反电荷的物质,在改变体系温度、pH值和水溶液浓度后,通过凝聚析出、分离、固化最终形成微胶囊^[57]。该方法物料载量高、延缓脂溶性芯材氧化的同时可控制其释放,然而该工艺成本较高、能耗大、壁材要求高,且固定剂多为醛类,具有一定毒性,应用于食品的局限性较大。Xia等^[58]使用明胶-六偏磷酸钠复合凝聚物作为壳材料,通过复合凝

聚法对金枪鱼油中酰甘油浓缩物进行封装,结果表明微胶囊化对其氧化稳定性具有显著提升。王正云等^[59]以青鱼肝脏油脂为芯材,大豆分离蛋白(SPI)和壳聚糖(CS)为壁材,在pH 7.0、壁材总质量分数2%、SPI与CS质量比1.3:1、芯壁质量比1.3:1条件下得到的鱼油包埋率可达(71.98±0.16)%,呈现出较好的包埋特性,氧化稳定性显著提高。

2.1.3 包络结合法 包络结合法又称分子包埋法,是一种基于分子水平上的方法,一般选用 β -环糊精(β -Cyclodextrin, β -CD)作为包埋剂^[60], β -CD内部中空部位的疏水性基团可与芯材结合形成包接络合物,从而完成包埋。该方法虽操作相对简单,且成本较低,但反应条件较难控制。苏阳等^[61]在芯壁质量比1:7、乳化剂使用量0.3 g/g、45℃下搅拌2 h得到的鱼油微胶囊包埋率为90.75%,包埋效率为89.34%。张维等^[62]利用超声波辅助分子包埋法,以 β -CD为壁材制备榛子油微胶囊,当壁材浓度比(H_2O/β -CD)为16:1、壁芯材质量比为5:1时在59.3℃下包埋62 min,微胶囊包埋率为69.18%,产率为59.74%,且具有良好的热稳定性。

2.1.4 锐孔-凝固浴法 锐孔-凝固浴法主要应用于非水溶性固体粉末与疏水性液体的微囊化。该法结合了化学与物理机械学,通过可溶性聚合物壁材溶液包裹芯材使其呈球状液滴滴入凝固浴中形成微胶囊^[63]。该方法虽成本低,操作简单,但所得产品直径较大^[64]。黄美娥等^[65]以鳕鱼肝脏油脂为原料,采用锐孔-凝固浴法在鱼油添加量5.0 g、海藻酸钠质量浓度1.5 g/100 mL、乳化剂添加量0.5 g、固化剂液质量浓度1.5 g/100 mL条件下得到的微胶囊包埋率最高为97.27%。

2.1.5 冷冻干燥法 冷冻干燥是利用升华作用将乳状液在冻结中去除水分形成微胶囊的过程^[66]。该工艺虽对芯材损害小,但对设备要求高,操作相对复杂。Luciana等^[67]利用大豆蛋白将鱼油包裹在微胶囊中,通过乳化和冷冻干燥制备了不同质量比蛋白/油微粒,发现与喷雾干燥的微粒相比,冷冻干燥的微粒虽具有更好的固体回收率,但封装效率较低。车馨子等^[68]在真空压力35 Pa、冷风风量5.5 m³/min时得到粒径集中分布于117.13~200.06 μ m的微胶囊,质量较优,且EPA和DHA

相对含量分别增加了 0.037% 和 0.966%。

2.1.6 纳米微囊化技术 纳米微囊化是一种通过纳米乳化、纳米复合和纳米构造等技术使微型胶囊的大小在纳米范围内(1~1 000 nm)的新式技术^[69],主要包括乳液聚合法、界面聚合法、层层自组装技术、脂质体技术等。纳米微胶囊选用生物降解聚合物(凝胶等)作为壁材,与传统微胶囊相比,纳米微胶囊因尺寸小且缓释效果明显而具有易被人体吸收的优势^[70],纳米微胶囊在多领域应用广泛,水产加工业中常用乳液聚集法与脂质体技术对鱼油进行微囊化处理,以此保护其功能性成分不被破坏。

乳液聚合法通过加热添加了芯材与乳化剂并形成均匀稳定溶液体系的壁材乳液制得微胶囊。江连洲等^[71]选用质量分数 2% 的大豆蛋白与质量分数 0.2% 的磷脂酰胆碱为复合乳化剂,利用高压均质技术在鱼油质量分数 1.5%、均质压力 100 MPa 时制得的鱼油纳米乳液可在 4 °C 和 25 °C 下稳定储存 30 d,且对 Na⁺有一定的抗性,耐碱性高于耐酸性。Zimet 等^[72]以低甲氧基果胶和 β -乳球蛋白为载体制得的 DHA 纳米微胶囊稳定性良好,其有效成分在贮藏过程中损失较小。

纳米脂质载体技术分为 2 类:第 1 类利用固态脂质与表面活性剂在室温下将有效成分包埋于水相中,该方法稳定性、包封率和载量较高;第 2 类由固/液多种脂质经加热后结晶制备微胶囊。相

较于第 1 类脂质体,此类工艺可形成无序结晶,提高包封率和载量的同时降低了贮藏过程中有效成分的损失。Nesa 等^[73]制备出大型海藻基纳米脂质体,发现纳米脂质体技术的使用有效延缓了鱼油在 30 °C 下的氧化,经纳米脂质体处理的样品色值具有更高的稳定性。Ghorbanzade 等^[74]在酸奶中添加鱼油纳米脂质体,贮藏 21 d 后与直接补充鱼油的酸奶相比,其含有的 EPA 和 DHA 更多,表明纳米脂质体包封具有良好的抗氧化性。

2.2 乳状液技术

乳状液可将油脂以液珠的形式包埋在水相中,最终形成一种稳定均一的分散体系,有利于鱼油类液态产品的开发与应用^[75]。然而,鱼油乳液对壁材乳化性有一定的要求,长期放置易氧化,不便储存。刘汝萃等^[76]分别探讨乳化剂种类、添加量等因素对鱼油乳液稳定性的影响,在蔗糖酯质量占比 0.6%、麦芽糊精质量占比 8%、油水质量比 1:9 时可得到稳定性优良的鱼油乳液。何镇宏等^[77]研究发现选用表面活性剂制备的藻油 DHA 乳液在高温处理和常温贮存过程中的稳定性较优。Yu 等^[78]以花生分离蛋白和鱼油为原料制备乳液凝胶(PEG)并将其添加到鱼糜凝胶中,结果表明与直接添加鱼油的对照组相比,含有 4%~8% PEG 的鱼糜凝胶在硬度、黏附性和咀嚼性方面有显著改善,且 PEG 可均匀地填充蛋白质基质间空隙并形成更为牢固的网络结构。

表 4 鱼油 n-3 PUFA 稳态化技术比较

Table 4 Comparison of steady state technology of fish oil n-3 PUFA

方法	优点	缺点
喷雾干燥法	操作方便,应用范围广泛	干燥颗粒不均,挥发性物质损耗
凝聚法	物料载量高,可控性强	成本较高,能耗大,产生一定毒性
包络结合法	操作相对简单,成本较低	反应条件难控制
锐孔-凝固浴法	操作简单,成本低	所得产品直径较大,原料选择有局限性
冷冻干燥法	对有效成分损害小,不易氧化	设备要求高,工艺相对复杂
纳米微囊化技术	尺寸较小,产品有效成分利用率高、稳定性良好、包封率较高	设备要求高,成本较大,对壁材及辅材的安全性要求高
乳状液技术	原材料局限性低,有利于开发液态产品	对壁材乳化性有一定的要求

EPA 和 DHA 对人体脑部神经发育、心血管疾病预防等方面具有优良的生理功效,然而较多的双键数目导致其在加工、运输和储存过程中易氧

化变质,影响油脂品质,降低商品价值。为使 EPA 和 DHA 在食品加工领域应用更广泛,生物活性物质运载系统应具备成本小、工艺简单、稳定性强、

包封率高、损失率低、原料食品级等性质,且为避免功能因子的吸收浪费,运载系统需具备缓释作用。现阶段有关功能性油脂的固态与液态稳态化产品在一定程度上均可实现 n-3 PUFA 的高包埋率。然而,不同方法均存在其局限性,喷雾干燥稳定性差;凝聚法、冷冻干燥法成本高;包络结合法反应条件可控性差;凝固浴法产品颗粒大;纳米微囊化技术、乳状液技术对壁材要求较为苛刻等。相较于传统 n-3 PUFA 稳态化技术,纳米微囊化技术所得产品稳定性高,且壁材易降解,芯材的生物利用度高,具有较强的发展潜力。

3 鱼油 n-3 PUFA 生物活性

鱼油具有悠久的历史。从公元 8 世纪古罗马人普遍食用的从鱼类中提取的补充剂,到工业革命时期用于治疗佝偻病的鳕鱼肝油,再到 20 世纪逐渐被认可的 PUFA,水产油脂发展至今,其作用已然得到充分的证实。其中,EPA 和 DHA 因具有提高免疫力、降血脂、预防心脑血管疾病等功效而受到广泛的研究与应用^[79]。

3.1 保护心脑血管

慢性炎症会引发包含心脑血管疾病在内的诸多病症,鱼油 n-3 PUFA 中的 EPA 和 DHA 能激活单核、巨噬等炎性细胞膜上的蛋白受体,通过信号传导、酶表达等作用过程抑制炎症的产生,为心脑血管提供保护机制^[80]。Maki 等^[81]在 14 项随机对照试验的分析中发现,与对照组相比,补充 n-3 系脂肪酸可将心血管疾病死亡的风险降低 8.0%。

3.2 神经保护功能

60%的神经细胞膜磷脂脂肪酸由 DHA 组成,含量丰富。DHA 可改变神经元细胞的膜结构、修饰血-脑脊液屏障功能、阻止神经细胞凋亡并调节神经生长因子,进而保护神经元^[82]。n-3 PUFA 在提高记忆力、改善视力、治疗神经疾病方面已获认可。Maria 等^[83]通过小鼠实验探究 n-3 PUFA 对神经的作用效果,发现 n-3 PUFA 处理后的小鼠视网膜神经节细胞和轴突密度均高于相应的未处理组,且视网膜细胞凋亡较少,表明 n-3 PUFA 对小鼠的视网膜具有神经保护作用。

3.3 调节骨代谢

n-3 PUFA 可抑制破骨细胞的生长,增强成

骨细胞的活性,增加骨细胞的形成,调节骨质疏松,对骨骼发育、恢复有积极作用。Abshirini 等^[84]通过总结细胞培养和动物研究建立的不同作用机制,突出了长链多不饱和脂肪酸对骨细胞和软骨细胞的多种重要作用,表明了 n-3 PUFA 调节骨代谢与抗炎机制有关。

3.4 抗肿瘤作用

n-3 PUFA 可通过诱导细胞凋亡与自噬抑制恶性胶质细胞瘤细胞的增生^[85],DHA 和 EPA 均能通过参与调控细胞减少基因表达错误的发生,对细胞膜流动性与细胞修复速率的增加和癌细胞异常增生的抑制均能起到积极作用^[86]。

3.5 其它功能

n-3 PUFA 在调节代谢综合征、促进生长发育、改善肌细胞功能等方面的研究同样有所进展。金灿等^[87]通过干预试验发现补充 n-3 PUFA 能够降低代谢综合征高危人群血压、甘油三酯等风险因子参数,增加高密度脂蛋白,对代谢综合征具有预防作用。杨庆等^[88]发现新生儿 n-3 PUFA 的缺乏可能会导致神经发育受损,影响新生儿免疫系统并导致其疾病的发生。郭惠兰等^[89]发现大剂量补充 n-3 PUFA 能够增加老年人(尤其是女性)肌肉质量,提高肌肉力量并改善肌肉功能。

4 展望

居民物质生活水平的不断提高使大众对功能性食品的关注度也与日俱增,鱼油制品便是其一。水产 n-3 PUFA 的富集与品质优化是当前鱼油深加工领域中的工艺热点。

近年来国内外对 n-3PUFA 富集方法的研究虽已取得一定进展,但仍存在效率低、稳定性差、成本高等问题,未来针对鱼油中 n-3 PUFA 的富集将逐渐趋向于复合工艺,如何在材料与技术层面寻求关键性突破、实现工业化绿色生产仍需进一步的研究。

稳态化技术工艺亟需创新,以芯材的缓释程度及生物利用度为标准开发新型生物活性物质运载体系是鱼油 n-3 PUFA 稳态化研究趋势之一,如何在包埋和储存过程中保持功能成分长效作用仍是稳态化技术所面临的挑战。

目前鱼油产品以软胶囊等功能强化食品为

主,形式比较传统,还需进一步对诸如鱼油软糖、鱼油果冻、鱼油饼干、鱼油饮料等休闲化、时尚化食品进行研发,在保证产品功能性的同时满足消费者喜好,通过创新产品进而推动鱼油产业的发展。

随着食品工业新材料、新设备与新技术的不断更新、发展,鱼油 n-3 PUFA 的研究将更加深入、全面,必将为开发高品质水产油脂类食品带来新的发展契机。

参 考 文 献

- [1] BAKO T, UMOGBAI V I, AWULU J O. Criteria for the extraction of fish oil[J]. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2017, 19(3): 120-132.
- [2] EILEEN W, KATELYN T, ROBIN F K. Analysis of omega-3 fatty acid content in fish oil products[J]. *Journal of Pharmacy Practice*, 2021, 35(6): 1-4.
- [3] ADEOTI I A, HAWBOLDT K. A review of lipid extraction from fish processing by-product for use as a biofuel[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 63: 330-340.
- [4] 张渊超, 孙钦秀, 刘书成, 等. 超高压结合酶解法提取鱼油工艺的优化[J]. *广东海洋大学学报*, 2020, 40(2): 1-7.
ZHANG Y C, SUN Q X, LIU S C, et al. Optimization of extraction parameter of fish oil by ultra-high pressure combined with enzymatic hydrolysis[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 2020, 40(2): 1-7.
- [5] GOKHAN B, HIKMET K. Seasonal changes in proximate composition of some fish species from the Black Sea[J]. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2011, 11(1): 1-5.
- [6] MBATIA B, ADLERCREUTZ D, ADLERCREUTZ P, et al. Enzymatic oil extraction and positional analysis of omega-3 fatty acids in Nile perch and salmon heads[J]. *Process Biochem*, 2010, 45(5): 815-819.
- [7] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2021 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021: 30-92.
Fishery Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2021 China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021: 30-92.
- [8] MELGOSA R, SANZ M T, BENITO-ROMÁN Ó, et al. Supercritical CO₂ assisted synthesis and concentration of monoacylglycerides rich in omega-3 polyunsaturated fatty acids[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2019, 31: 65-74.
- [9] SOLAESA Á G, BUCIO S L, SANZ M T, et al. Characterization of triacylglycerol composition of fish oils by using chromatographic techniques[J]. *Journal of Oleo Science*, 2014, 63(5): 449-460.
- [10] 崔益玮, 赵巧灵, 俞喜娜, 等. 基于 1,2-二氯乙烷体系的金枪鱼副产物中脂质提取与组学分析[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(2): 278-288.
CUI Y W, ZHAO Q L, YU X N, et al. Extraction and lipidomics analysis of lipids from tuna by-products based on a 1,2-dichloroethane solvent system[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(2): 278-288.
- [11] 徐玉兰, 牛洪波. 三文鱼多不饱和脂肪酸分析及稳定性研究[J]. *烟台职业学院学报*, 2018, 24(3): 90-92.
XU Y L, NIU H B. Analysis and stability of polyunsaturated fatty acids in salmon[J]. *Journal of Yantai Vocational College*, 2018, 24(3): 90-92.
- [12] CHARLOTTE J, ANDREA W S, HJORTH H S, et al. Fish liver discards as a source of long-chain omega-3 polyunsaturated fatty acids[J]. *Foods*, 2022, 11(7): 905.
- [13] 赵腾飞, 应晓国, 张宾, 等. 大黄鱼鱼油的制备及其理化性质[J]. *中国油脂*, 2021, 46(10): 6-10, 17.
ZHAO T F, YING X G, ZHANG B, et al. Preparation and physicochemical properties of *Larimichthys crocea* fish oil[J]. *China Oils and Fats*, 2021, 46(10): 6-10, 17.
- [14] 吴美焕, 安文强, 董晓慧, 等. 饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼生长性能、血清生化指标及肝脏脂肪酸组成、脂肪代谢相关指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(3): 1315-1326.
WU M H, AN W Q, DONG X H, et al. Effects of dietary lipid sources on growth performances, serum biochemical indexes and liver fatty acids composi-

- tion, lipid metabolism related indexes of *Epinephelus lanceolatus* × *Epinephelus fuscoguttatus* [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(3): 1315–1326.
- [15] 吴奎元. 酶解带鱼内脏提取鱼油及防止其氧化研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- WU K Y. Study on enzymatic extraction of fish oil from hairtail viscera and preventing fish oil being oxidized[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.
- [16] 郭芮. 红鳍东方鲀营养品质分析及胶原蛋白肽初步利用的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- GUO R. Analysis of nutritional quality of *Takifugu rubripes* and research on preliminary usage of collagen peptide[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018.
- [17] 李雪, 曹君, 白新鹏, 等. 水合法提取罗非鱼鱼油及其脂肪酸组成分析[J]. 中国油脂, 2017, 42(10): 5–11.
- LI X, CAO J, BAI X P, et al. Extraction of fish oil from tilapia by hydration method and fatty acid composition analysis[J]. China Oils and Fats, 2017, 42(10): 5–11.
- [18] 周美玉, 李达, 李安东, 等. 野生和养殖大鳞副泥鳅营养成分比较分析[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(6): 134–138.
- ZHOU M Y, LI D, LI A D, et al. Comparison of nutrient composition of wild and farmed *Paramisgurnus dabryanus*[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(6): 134–138.
- [19] XUAN L T T, LAM T H, SON C T, et al. Separation and enrichment of omega 3, 6, and 9 fatty acids from the by-products of *Vietnamese basa* fish processing using deep eutectic solvent[J]. Journal of Chemistry, 2018, 2018: 1–10.
- [20] 韦霜霜, 李紫琳, 余爽. 武汉周边7种常见淡水鱼的脂肪酸含量及组成分析[J]. 广东化工, 2022, 49(4): 194–197.
- WEI S S, LI Z L, YU S. Analysis of the fatty acid contents and composition in seven common freshwater fish around Wuhan[J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(4): 194–197.
- [21] MELGOSA R, BENITO-ROMÁN Ó, SANZ M T, et al. Omega-3 encapsulation by PGSS-drying and conventional drying methods. Particle characterization and oxidative stability [J]. Food Chemistry, 2019, 270: 138–148.
- [22] EHSAN P, MILAD P, HOSSEIN K. Phase change and crystallization behavior of water in biological systems and innovative freezing processes and methods for evaluating crystallization [J]. Discover Food, 2022, 2(1): 1–24.
- [23] 张南海, 涂宗财, 何娜, 等. 尿素包合法富集鲢鱼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 N H, TU Z C, HE N, 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.
- [24] M M L, V T L, R G N, et al. Highly concentrated omega-3 fatty acid ethyl esters by urea complexation and molecular distillation [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(2): 877–884.
- [25] YILMAZ U, OZOGUL F, DURMUS M, et al. Purification of eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA) from fish oil using HPLC method and investigation of their antibacterial effects on some pathogenic bacteria[J]. Turk Denizcilik ve Deniz Bilimleri Dergisi, 2019, 5(1): 35–43.
- [26] LIU X Y, OU H, ZUO J, et al. Supercritical CO₂ extraction of total flavonoids from *Iberis amara* assisted by ultrasound[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2022, 184: 105581.
- [27] WANG X M, ZHAO X X, QIN X L, et al. Properties of immobilized MAS1-H108A lipase and its application in the efficient synthesis of n-3 PUFA-rich triacylglycerols [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2021, 44(3): 1–10.
- [28] 朱凯莉. 小分子协同超高压脉包法分离亚麻籽油中多不饱和脂肪酸研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- ZHU K L. Separation of polyunsaturated fatty acids from flaxseed oil by micromolecular joint with ultra-high pressure & urea adduction method[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [29] LI X P, LIU J P, CHEN G Y, et al. Extraction and purification of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid from microalgae: A critical review[J]. Algal Research, 2019, 43: 101619.
- [30] CARLOS L J, PABLO C, LUIS G J. Gamma-Linolenic acid enrichment from *borago officinalis* and *echium fastuosum* seed oils and fatty acids by low

- temperature crystallization[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2004, 97(5): 294–298.
- [31] 郑飞洋, 戴志远, 崔益玮, 等. 金枪鱼油精制及低温结晶法富集甘油三酯型 EPA、DHA[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(3): 147–158.
- ZHENG F Y, DAI Z Y, CUI Y W, et al. Refinement of tuna oil and enrichment of EPA and DHA as triacylglycerols by low temperature crystallization[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(3): 147–158.
- [32] ZHANG Y, WANG X, XIE D, et al. One-step concentration of highly unsaturated fatty acids from tuna oil by low-temperature crystallization[J]. *Journal of the American oil chemists' society*, 2017, 94(3): 475–483.
- [33] PANDO M E, RODRIGUEZ A, GALDAMES A, et al. Maximization of the docosahexaenoic and eicosapentaenoic acids content in concentrates obtained from a by-product of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) processing[J]. *European Food Research and Technology*, 2018, 244(5): 937–948.
- [34] DOVALE-ROSABAL G, RODRIGUEZ A, CONTRERAS E, et al. Concentration of EPA and DHA from refined salmon oil by optimizing the urea-fatty acid adduction reaction conditions using response surface methodology[J]. *Molecules*, 2019, 24(9): 1642.
- [35] ENGY M, MOHAMED F. Trends and applications of molecular distillation in pharmaceutical and food Industries[J]. *Separation Purification Reviews*, 2022, 51(3): 300–317.
- [36] SATHEES D, K V J, C H S M. Enrichment of omega 3 fatty acids using urea complexation method to enhance the nutritive value of stingray fish *Dasyatis sephen* F. liver oil[J]. *Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 2019, 3(5): 24–29.
- [37] ZHENG Z X, DAI Z Y, 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.
- [38] GABRIELA Ş N, PETRICA I, VALENTIN P, et al. Highly efficient deacidification process for *Camelina italic* sativa crude oil by molecular distillation[J]. *Sustainability*, 2021, 13(5): 2818–2818.
- [39] 宋恭帅, 张蒙娜, 马永钧, 等. 大目金枪鱼加工副产物中鱼油提取制备及 EPA 分离纯化[J]. *核农学报*, 2019, 33(6): 1122–1130.
- SONG G S, ZHANG M N, MA Y J, et al. Extraction of fish oil from the byproducts of bigeye tuna and purification of epa ethyl ester by combined techniques[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(6): 1122–1130.
- [40] HE J L, HONG B H, LU R, et al. Separation of saturated fatty acids from docosahexaenoic acid-rich algal oil by enzymatic ethanolysis in tandem with molecular distillation[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(5): 2234–2241.
- [41] CHEN F, WANG Z F, ZHAO G H, et al. Purification process of octacosanol extracts from rice bran wax by molecular distillation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(1): 63–68.
- [42] SOSA M D, MAGALLANES L M, GROSSO N R, et al. Optimisation of omega-3 concentration and sensory analysis of chia oil[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 154: 112635.
- [43] 俞喜娜, 崔益玮, 戴志远, 等. 复合银离子络合技术在脂质分离分析中的应用[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(1): 311–318.
- YU X N, CUI Y W, DAI Z Y, et al. Application of silver ion-composite complexation technology in lipidomics separation and analysis[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(1): 311–318.
- [44] 郑振霄. 海豹油中 DPA 的纯化及抗炎活性的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2019.
- ZHENG Z X. Study on the purification of DPA from seal oil and its anti-inflammatory profile[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2019.
- [45] KIRUBANANDAN S, A D A. Extraction of EPA/DHA from 18/12EE fish oil using AgNO₃ (aq): Composition, yield, and effects of solvent addition on interfacial tension and flow pattern in mini-fluidic systems[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(33): 8295–8301.
- [46] GAN Y S, XU D L, ZHANG J Q, et al. *Rana chensinensis* ovum oil based on CO₂ supercritical fluid extraction: Response surface methodology optimization and unsaturated fatty acid ingredient analysis[J]. *Molecules*, 2020, 25(18): 4170.
- [47] SARA A, KAUR C S, KELLY H. Supercritical CO₂

- extraction of lipids and astaxanthin from Atlantic shrimp by-products with static co-solvents: Process optimization and mathematical modeling studies [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2022, 58: 101938.
- [48] MU J L, WU G, CHEN Z Z, et al. Identification of the fatty acids profiles in supercritical CO₂ fluid and Soxhlet extraction of samara oil from different cultivars of *Elaeagnus mollis* Diels seeds[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 101: 103982.
- [49] ADIL M, MAGALIE C, ISABELLE B, et al. Supercritical CO₂ extraction of oil from Moroccan unroasted Argan Kernels: Effects of process parameters to produce cosmetic oil[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2022, 59: 101952.
- [50] YANG Z Z, JIN W H, CHENG X Y, et al. Enzymatic enrichment of n-3 polyunsaturated fatty acid glycerides by selective hydrolysis[J]. *Food Chemistry*, 2020, 346: 128743.
- [51] AKANBI T O, BARROW C J. Candida antarctica lipase A effectively concentrates DHA from fish and thraustochytrid oils[J]. *Food Chemistry*, 2017, 229: 509-516.
- [52] 董青, 李敏, 杨亦文, 等. EPA 和 DHA 的分离研究进展[J]. *中国油脂*, 2019, 44(1): 15-20.
DONG Q, LI M, YANG Y W, et al. Advance in separation of EPA and DHA [J]. *China Oils and Fats*, 2019, 44(1): 15-20.
- [53] 高彦祥. 食品功能因子稳态化与传递体系创新趋势 [C]. 上海: 第二届“2020 营养及功能食品开发创新交流峰会暨天然提取物应用研讨会”资料汇编, 2020: 8-34.
GAO Y X. Steady state of food functional factors and innovation trend of delivery system[C]. Shanghai: Data Collection of the Second '2020 Nutrition and Functional Food Development and Innovation Exchange Summit and Natural Extract Application Seminar', 2020: 8-34.
- [54] ZHANG Y Y, PANG X Y, ZHANG S W, et al. Buttermilk as a wall material for microencapsulation of omega-3 oils by spray drying[J]. *LWT*, 2020, 127: 109320.
- [55] ABDUL R M, MUHAMMAD I, KAMRAN K M, et al. Impact of spray drying operating conditions on encapsulation efficiency, oxidative quality, and sensorial evaluation of chia and fish oil blends[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 46(2): e16248.
- [56] 李杨, 徐静雯, 于静雯, 等. 不同蛋白微射流喷雾干燥制备鱼油微胶囊性能研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(3): 350-357.
LI Y, XU J W, YU J W, et al. Effect of protein types on structure and stability of fish oil microcapsules[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(3): 350-357.
- [57] BASTOS L P H, VICENTE J, SANTOS C H C D, et al. Encapsulation of black pepper (*Piper nigrum* L.) essential oil with gelatin and sodium alginate by complex coacervation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 102: 105605.
- [58] XIA Q Y, AKANBI T O, WANG B, et al. Investigation of enhanced oxidation stability of microencapsulated enzymatically produced tuna oil concentrates using complex coacervation[J]. *Food & Function*, 2020, 11(12): 10748-10757.
- [59] 王正云, 展跃平, 钟川, 等. 复凝聚法青鱼内脏鱼油微胶囊的制备及其性能研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(23): 155-161.
WANG Z Y, ZHAN Y P, ZHONG C, et al. Study on the preparation and properties of black carp viscera oil microcapsules with complex coacervation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(23): 155-161.
- [60] 吴少杰, 吉情, 陈进林, 等. 包络结合法制备南极磷虾油微胶囊[J]. *江苏海洋大学学报(自然科学版)*, 2020, 29(1): 17-21.
WU S J, JI Q, CHEN J L, et al. Preparation of Antarctic krill oil microcapsule by envelope-combination method[J]. *Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Science Edition)*, 2020, 29(1): 17-21.
- [61] 苏阳, 匡立学, 周金星, 等. 包络结合法制备β-环糊精鱼油微胶囊[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(10): 76-80.
SU Y, KUANG L X, ZHOU J X, et al. Encapsulation of fish oil in β-cyclodextrin[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2012, 38(10): 76-80.
- [62] 张维, 陈丽蕊, 时孟杰, 等. 榛子油微胶囊的制备及其稳定性研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(2): 206-214.
ZHANG W, CHEN L R, SHI M J, et al. Preparation and stability of hazelnut oil microcapsules[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43

- (2): 206-214.
- [63] 吴昊. EPA/DHA 浓缩分离与稳态化技术的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2010.
WU H. EPA/DHA concentration and protection technology [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2010.
- [64] 刘佳炜, 王旭, 曹雁平, 等. DHA 稳态化技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(7): 273-277.
LIU J W, WANG X, CAO Y P, et al. Research progress in technologies of DHA stabilization[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(7): 273-277.
- [65] 黄美娥, 江能文, 唐小雨, 等. 鳕鱼油微胶囊化工艺条件研究[J]. 食品工业, 2016, 37(7): 82-84.
HUANG M E, JIANG N W, TANG X Y, et al. Study on technological conditions of *Elopichthys bambusa* oil microencapsulation[J]. The Food Industry, 2016, 37(7): 82-84.
- [66] NEVES I C O, SILVA S H, OLIVEIRA N L, et al. Effect of carrier oil on α -tocopherol encapsulation in ora-pro-nobis (*Pereskia aculeata* Miller) mucilage-whey protein isolate microparticles[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105(C): 105716.
- [67] LUCIANA D G, RODRIGO S P, NOEMI M A. Fish oil encapsulated in soy protein particles by lyophilization. Effect of drying process[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 102(1): 206-213.
- [68] 车馨子, 段续, 王月月, 等. 喷雾冷冻干燥制备鱼油微胶囊[J]. 食品与机械, 2019, 35(7): 193-198, 209.
CHE X Z, DUAN X, WANG Y Y, et al. Preparation of fish oil micro-capsules by spray freeze drying[J]. Food & Machinery, 2019, 35(7): 193-198, 209.
- [69] ESFAHANI R, JAFARI S M, JAFARPOUR A, et al. Loading of fish oil into nanocarriers prepared through gelatin-gum Arabic complexation[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 291-298.
- [70] VAHID M F, REZVAN P, ALI M, et al. Use of fish oil nanoencapsulated with gum arabic carrier in low fat probiotic fermented milk[J]. Food Science of Animal Resources, 2019, 39(2): 309-323.
- [71] 江连洲, 綦玉曼, 马春芳, 等. 鱼油纳米乳液载体体系构建与稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 387-395.
- JIANG L Z, QI Y M, MA C F, et al. Formation and stability of fish oil enriched biocompatible nano-emulsion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 387-395.
- [72] ZIMET P, LIVNEY Y D. Beta-Lactoglobulin and its nanocomplexes with pectin as vehicles for ω -3 polyunsaturated fatty acids [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(4): 1120-1126.
- [73] NESA M, SEDIGHEH B, ESKANDAR M, et al. A novel perspective with characterized nanoliposomes: Limitation of lipid oxidation in fish oil [J]. LWT, 2021, 152: 112387.
- [74] GHORBANZADE T, JAFARI S M, AKHAVAN S, et al. Nano-encapsulation of fish oil in nano-liposomes and its application in fortification of yogurt[J]. Food Chemistry, 2017, 216: 146-152.
- [75] GIORGIO L D, SALGADO P R, MAURI A N. Fish oil-in-water emulsions stabilized by soy proteins and cellulose nanocrystals[J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2021, 3: 100176.
- [76] 刘汝萃, 范书琴, 张建全, 等. 鱼油乳液的制备及稳定性研究[J]. 粮食与食品工业, 2018, 25(1): 12-14, 19.
LIU R C, FAN S Q, ZHANG J Q, et al. Research on the preparation and stability[J]. Cereal & Food Industry, 2018, 25(1): 12-14, 19.
- [77] 何镇宏, 赵海珍, 陆兆新. Surfactin 作为表面活性剂对 O/W 型藻油 DHA 乳液物理和氧化稳定性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(21): 146-151.
HE Z H, ZHAO H Z, LU Z X. Effect of Surfactin as surfactant on physical and oxidation stability of O/W DHA-rich algae oil emulsion[J]. Food Science, 2017, 38(21): 146-151.
- [78] YU J, SONG L L, XIAO H, et al. Structuring emulsion gels with peanut protein isolate and fish oil and analyzing the mechanical and microstructural characteristics of surimi gel[J]. LWT, 2022, 154: 112555.
- [79] ALOK P, SAWANT D S, KELKAR M V, et al. Futuristic food fortification with a balanced ratio of dietary ω -3/ ω -6 omega fatty acids for the prevention of lifestyle diseases[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 120: 140-153.
- [80] 陈雪, 梁克红, 王靖, 等. 膳食中多不饱和脂肪酸对心血管疾病防治研究进展[J]. 中国油脂, 2020,

- 45(10): 87-94.
- CHEN X, LIANG K H, WANG J, et al. Progress in prevention and treatment of cardiovascular diseases by dietary polyunsaturated fatty acids[J]. *China Oils and Fats*, 2020, 45(10): 87-94.
- [81] MAKI K C, PALACIOS O M, BELL M, et al. Use of supplemental long-chain omega-3 fatty acids and risk for cardiac death: An updated meta-analysis and review of research gaps[J]. *Journal of Clinical Lipidology*, 2017, 11(5): 1152-1160.e2.
- [82] MARYAM B, VICTORIA B, CORDIAN B, et al. Regulation of inflammasomes by application of omega-3 polyunsaturated fatty acids in a spinal cord injury model[J]. *Cells*, 2021, 10(11): 3147.
- [83] MARIA K, SOTIRIS I, PANAGIOTIS K, et al. Omega-3 fatty acids promote neuroprotection, decreased apoptosis and reduced glial cell activation in the retina of a mouse model of OPA1-related autosomal dominant optic atrophy[J]. *Experimental Eye Research*, 2021, 215: 108901.
- [84] ABSHIRINI M, ILESANMI -OYELERE B L, KRUGER M C. Potential modulatory mechanisms of action by long-chain polyunsaturated fatty acids on bone cell and chondrocyte metabolism[J]. *Progress in Lipid Research*, 2021, 83: 101113.
- [85] JENNIFER M, DANYELLE L, AMBER H, et al. Fish oil supplementation increases expression of mammary tumor apoptosis mediators and reduces inflammation in an obesity-associated HER-2 breast cancer model[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2021, 95: 108763.
- [86] CHEN Y, QIU X, YANG J. Comparing the *in vitro* antitumor, antioxidant and anti-inflammatory activities between two new very long chain polyunsaturated fatty acids, docosadienoic acid (DDA) and docosatrienoic acid (DTA), and docosahexaenoic acid (DHA)[J]. *Nutrition and Cancer*, 2020, 73(9): 11.
- [87] 金灿, 王志翔, 贾中亨, 等. ω -3多不饱和脂肪酸对代谢综合征高危人群代谢风险因子的影响[J]. *全科医学临床与教育*, 2021, 19(9): 804-808.
- JIN C, WANG Z Y, JIA Z H, et al. Effects of ω -3 polyunsaturated fatty acids on metabolic risk factors in people at high risk of metabolic syndrome[J]. *Clinical Education of General Practice*, 2021, 19(9): 804-808.
- [88] 杨庆, 林新祝. 长链多不饱和脂肪酸对新生儿的影响研究进展[J]. *中国当代儿科杂志*, 2021, 23(7): 755-760.
- YANG Q, LIN X Z. Research advances in the effect of long-chain polyunsaturated fatty acids on neonates[J]. *Chinese Journal of Contemporary Pediatrics*, 2021, 23(7): 755-760.
- [89] 郭惠兰, 陆彦好, 黄晓旭, 等. n-3多不饱和脂肪酸对老年人肌肉衰减影响的研究进展[J]. *营养学报*, 2021, 43(3): 302-306.
- GUO H L, LU Y Y, HUANG X X, et al. Effects of n-3 polyunsaturated fatty acids on sarcopenia in the elderly: A narrative review[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2021, 43(3): 302-306.

Research Progress on n-3 PUFA Enrichment, Stabilization Technology and Biological Activity of Fish Oil

Liu Shuyuan¹, Guo Mingzhu¹, Ma Aijin², Sang Yaxin¹, Sun Jilu^{*}

¹College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei

²School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048)

Abstract Fish oil has a wide range of scientific research and application value because it is rich in polyunsaturated fatty acids needed by human body. This article focused on its n-3 PUFA enrichment process, steady state technology and biological activity, expounded the advantages and disadvantages of different methods, analyzed the feasibility of industrial production, and prospected the future development trend of fish oil industry, in order to provide a theoretical basis for the rational, healthy and sustainable development of fish oil resources.

Keywords fish oil; enrichment process; steady state; n-3 PUFA