

【第二十七届中国科协年会学术论文】

南极磷虾油开发利用技术综述

阴法文，裴雪晨，王鑫森，郭超，王茜，潘伟聪，徐杰，孙鑫，周大勇^{*}，朱蓓薇
(大连工业大学食品学院 海洋食品加工与安全控制重点实验室 国家海洋食品工程技术研究中心
辽宁省海洋食品科学与技术重点实验室 辽宁大连 116034)

摘要 南极磷虾油功能性产品是南极磷虾精深加工的主要方向,其富含磷脂、ω-3 长链多不饱和脂肪酸(ω-3 LC-PUFA)、虾青素、维生素等功效成分,其中,以磷脂型存在的二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)等 ω-3 LC-PUFA 生物利用度更高,营养及健康效应更好。然而,在南极磷虾油的产业化过程中仍面临一些挑战,如提取工艺的绿色化、产品稳定性的进一步提升、质量检测标准体系的完善等。本文基于最新研究动态,在南极磷虾油的提取分离、深加工、分析技术及生物活性等方面进行综述。在这些成果的基础上,未来需进一步加强基础研究和技术创新,提高南极磷虾油的生产效率和品质,同时深入探索其在不同领域的应用,开发更多具有高附加值的产品,以推动南极磷虾油产业的可持续发展。

关键词 南极磷虾油；提取；精制；稳定化；磷脂富集；酶法改性；分析；生物活性

文章编号 1009-7848(2025)05-0047-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2025.05.005

党的二十大报告中明确指出,要全面稳固粮食安全的基石,树立大食物观,并着手构建多元化的食物供应系统。地球表面积的 71% 被海洋覆盖,且海洋生物的种类占据全球物种总数的八成以上,因此向海洋要食物是践行大食物观的重要举措。南极磷虾作为全球单一物种生物量最大的海洋资源(储量约 10 亿 t),富含优质蛋白、磷脂及虾青素等营养及功能因子,被誉为“海上金矿”。在南极磷虾的相关产品中,南极磷虾油凭借卓越的营养价值和较高的附加值而深受关注,其主要营养及功能因子是磷脂、虾青素、二十二碳六烯酸(Docosahexaenoic acid, DHA) 和二十碳五烯酸(Eicosapentaenoic acid, EPA) 等^[1]。研究显示,南极磷虾油在预防心血管疾病,抗炎,神经保护,改善大脑功能,提高学习记忆力,减少脂质堆积等多个领域展现出显著作用^[2-3]。因此,南极磷虾油在食品制造、保健产品、生物医药等诸多行业中具备广泛的应用潜力和深入的研发价值。本文综述近年来南极磷虾油在提取、分析、精制、稳定化、磷脂富

集、酶法改性、分析、生物活性及其机制等方面的研究进展,以期为进一步开发利用提供参考。

1 南极磷虾油提取技术

南极磷虾油中磷脂含量约为 20.6%~39.2%^[4]。磷脂是强极性油脂,具有亲水性,遇水膨胀^[1],而虾青素对热比较敏感,这些特性使传统的鱼(肝)油加工的蒸煮法和淡碱消化法不适于南极磷虾油的提取。目前,南极磷虾油提取最常用的方法为溶剂浸提法,也有酶解法的报道。

1.1 有机溶剂浸提法

采用有机溶剂浸提技术,可以向南极磷虾粉喷洒有机溶剂,进行搅拌并浸泡,让油脂从中析出,随后去除溶剂,最终制得南极磷虾油。鉴于有机溶剂在油脂溶解方面的高效性,对油脂化学结构影响轻微,对设备的腐蚀性较弱,以及沸点适中,便于后续的分离和回收利用,该技术已成为南极磷虾油大规模工业化生产的主要方案^[2]。另外,虽然混合溶剂的油脂回收率显著高于单一溶剂^[5],但是考虑到实际生产中的可操作性以及溶剂对磷脂的浸提效率,南极磷虾油工业化生产中多以乙醇作为单一浸提溶剂^[6],且多采用多级逆流提取工艺。多级逆流提取是一种高效的溶剂浸出技术,通过多个串联的提取阶段,使南极磷虾粉与乙醇以逆流方向接触,逐步提高南极磷虾油的提取效率。

收稿日期: 2025-05-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(32230080); 大连市科技创新基金计划项目(2022JJ11CG008)

第一作者: 阴法文,男,博士,副教授

通信作者: 周大勇 E-mail: zdyzf1@163.com

其核心原理是利用乙醇的梯度浓度差，在每一级提取中最大化乙醇对虾油的携带能力，最终实现高提取率并降低溶剂消耗^[7-8]。

1.2 酶解法

酶解法主要是利用酶的生物催化作用，将南极磷虾中的蛋白质进行水解，使油脂更容易从原料中分离出来^[9]。以蛋白酶的来源分类，南极磷虾油的酶解法生产包括外源蛋白酶处理工艺^[10]、内源蛋白酶处理工艺^[11]和内外源蛋白酶结合处理工艺^[12]。以原料性状分类，南极磷虾油的酶解法生产则包括以冻虾^[13]或虾粉^[10]为原料的工艺；以油脂回收工艺分类，南极磷虾油的酶解法生产包括机械分离法^[14]和有机溶剂提取法^[10]。然而，酶解法制取工艺仍存在酶解工艺过程欠佳，酶解后的油相和水相存在乳化^[15]以及酶制剂价格相对较高等问题，因此酶解法提取南极磷虾油仍处于实验室基础研究阶段。

1.3 绿色提取技法

随着环保意识的增强，亚临界萃取、超声辅助提取等绿色方法将成为南极磷虾油提取技术的创新发展方向^[16-17]。未来将更加注重减少溶剂的使用，降低能耗，减少废弃物排放等，采用更加环保的生产工艺和设备，实现南极磷虾油的绿色、低碳生产。同时，还可以引入先进的自动化设备和智能控制系统，实现南极磷虾油提取过程的自动化、智能化操作。

2 南极磷虾油精制技术

南极磷虾油中富含磷脂和虾青素等特色功能性成分，为了保留这些功能性成分，传统工业的油脂精制除杂步骤并不适用于南极磷虾油的精制。基于此，研究人员建立了针对性的精制除杂方法。

2.1 游离脂肪酸脱除

在南极磷虾加工成油过程中，磷脂和甘油三酯会发生水解释放游离脂肪酸，高游离脂肪酸会降低食用品质，缩短保质期^[18]。研究显示，南极磷虾油中的游离脂肪酸含量介于2%至13%之间^[19]。食用油脂常用碱炼法及分子蒸馏法脱酸。然而，碱炼法在处理时会生成皂角吸附磷脂，从而导致磷脂的大量流失^[20]。蒸馏脱酸温度较高，容易引发油脂的热聚合^[21]。近年来，油脂的吸附法和酶法脱酸

以其条件温和、绿色环保、可再生等特点广受关注^[22-23]。Teng 等^[22]以羧甲基壳聚糖为吸附材料，在12.5%添加量、30℃条件下搅拌吸附15 min，南极磷虾油的酸值降低了78%。Liu 等^[23]将水凝胶微球固定化脂肪酶用于南极磷虾油脱酸，将酸值从10.14 mg KOH/g降至2.18 mg KOH/g。

2.2 胆固醇脱除

胆固醇是维持机体生理机能所不可缺少的重要物质，而过量的胆固醇摄入会堵塞血管，导致心血管病疾病的发病率升高^[24]。南极磷虾油中胆固醇含量较高，介于2.3%至3.9%之间^[25]，影响南极磷虾油的营养品质。孙甜甜^[26]以β-环糊精为吸附原料，在10%添加量、40℃条件下搅拌吸附30 min，胆固醇脱除率为47.63%。马普等^[27]利用壳聚糖和活性氧化铝制备吸附材料，将其用于南极磷虾油的胆固醇脱除，其脱除率超90%，含量降至0.21%~0.35%。

2.3 金属离子脱除

南极磷虾油中含有铁(Fe)、铜(Cu)、镁(Mg)、锰(Mn)、(Cr)、锌(Zn)、砷(As)、镉(Cd)、铅(Pb)等金属离子，这可能来源于加工过程中的生产机械及原料本身^[28-29]。南极磷虾油中残留的金属离子是重要的促氧化物，会加速油脂氧化，引起品质劣化。吸附法是利用吸附剂表面活性位点去除金属离子，该法操作简单，实用有效，广泛应用于吸附油脂中的金属离子^[30]。Zhang 等^[31]以硅胶、硅藻土、凹凸棒土等为吸附剂脱除南极磷虾油中的金属离子，铁离子的脱除率最高可达92.46%。

2.4 不良气味脱除

由于南极磷虾油化学组成的复杂性，其在贮藏过程中容易发生氧化产生氨臭味，因此限制了南极磷虾油的应用^[32]。南极磷虾油中的气味物质包括三甲胺、1-戊烯-3-醇、1-戊烯-3-酮等，其中三甲胺的含量较高^[33]。冯迪娜等^[34]通过改性纳滤膜处理和精制工艺对南极磷虾油进行脱腥处理，将棕榈酸乙酯的含量降至1 mg/g。目前关于南极磷虾油脱腥的研究较少，需进一步探索。

3 南极磷虾油稳定化技术

南极磷虾油中EPA和DHA含量高，这些多不饱和脂肪酸易受光照、高温、氧气暴露以及金属

离子等多种外界因素的影响而发生氧化反应^[35]。在氧化过程中会产生氢过氧化物(初级氧化产物)^[18]以及一系列短碳链的醛、酮、醇、酸等小分子化合物(次级氧化产物)^[36],释放出强烈的刺激性气味,降低产品的感官可接受度。目前,主要通过添加抗氧化剂、软胶囊、微囊化等稳定化技术提高磷虾油的氧化稳定性。

3.1 添加抗氧化剂

添加抗氧化剂是防止油脂氧化酸败的最经济、有效的方式。通常情况下,食用油脂是高纯度的甘油三酯,而残存的微量磷脂、甘油一酯、甘油二酯、游离脂肪酸等表面活性物质和水分可形成“反胶束”等缔合胶体^[37],其中心区域形成亲水微环境,能捕获金属离子、自由基成为诱发油脂氧化链反应的中心^[38-39],其结构、数量及分布影响油脂的氧化及抗氧化^[40]。目前南极磷虾油的生产过程不经过精炼,形成的“反胶束”等缔合胶体的表面活性物质和水分含量远远高于普通油脂^[41]。针对南极磷虾油这一独特的氧化及抗氧化规律,研究人员建立了基于金属离子脱除和复合抗氧化剂(如茶多酚+茶多酚棕榈酸酯)添加的南极磷虾油抗氧化新方法^[31,42]。此外,在提取阶段添加抗氧化剂的效果优于在成品油阶段添加,并且使用更少的抗氧化剂就可达到较好的抗氧化效果^[42]。

3.2 软胶囊包封

软胶囊的制作主要是以压制、滴塑等工艺为核心,可以将液态功能性成分包裹于柔软的胶囊壳内进行保存^[43]。这种密封式填充不仅能够有效遮蔽内容物的不良气息,还有利于封装化合物抵御氧气与光照的不利影响,是油脂类保健品领域最为常见的剂型之一^[44]。然而,南极磷虾油中磷脂所展现出的亲水性特质,会使其吸收软胶囊外壳中的水分,导致胶囊质地变硬、外壳老化,甚至引发漏油问题^[45]。目前,一些专利技术被成功开发,以改进南极磷虾油软胶囊的外壳材料及加工流程,力求进一步提升南极磷虾油软胶囊的稳定性,并赋予产品更高的附加价值^[46-47]。

3.3 微囊化包封

微囊化技术在封装具有生物活性的物质方面应用广泛,特别是对于含有 EPA/DHA 的功能性脂质成分。经微囊化处理后,能有效提升南极磷虾油

的抗氧化能力,延长其保质期限^[48]。在加速氧化的试验模型中,南极磷虾油微囊粉的 EPA/DHA 保留率、色泽等品质指标显著优于散装南极磷虾油^[49]。此外,微囊化有助于改善南极磷虾油在食品添加中的水溶性问题,从而扩大其应用范围^[50]。然而,由于磷脂比较黏稠,容易造成南极磷虾油微囊粉的流动性和溶解度差,较大程度地提升了南极磷虾油微囊粉的加工技术难度。研究表明,通过多种壁材(如酪蛋白酸钠、明胶、麦芽糊精)组合^[51-52],并优化芯壁质量比、壁材比例等参数,才能实现较高的包埋率^[53]。此外,虾青素的抗氧化性虽可保护 EPA/DHA,但在包埋工艺中需避免高温破坏其结构,这对喷雾干燥等技术的工艺参数控制提出更高的要求^[54]。在向工业生产转化时,仍需解决壁材成本、设备适应性等问题。

4 南极磷虾磷脂富集技术

南极磷虾磷脂富集技术是南极磷虾高值化利用的核心环节,其目标是从磷虾中高效提取并浓缩磷脂(尤其是磷脂酰胆碱),同时保留 EPA、DHA 等多不饱和脂肪酸及虾青素等活性成分^[55]。目前,南极磷虾磷脂的富集方法主要包括溶剂萃取、超临界 CO₂ 萃取与乙醇提取相结合、层析分离、水化法等。

4.1 溶剂萃取法

南极磷虾磷脂(如磷脂酰胆碱)具有两亲性结构,其极性头部(磷酸基团)与非极性尾部(脂肪酸链)使其在溶剂体系中呈现选择性溶解特性^[56]。例如,采用丙酮萃取法从南极磷虾油中富集磷脂,主要基于磷脂与非极性脂质(甘油三酯、甘油二酯、固醇酯等)在丙酮中的溶解度差异。丙酮对非极性脂质的溶解度高,而对磷脂的溶解度较低^[35],因此可以通过多级萃取实现南极磷虾磷脂的选择性富集。因丙酮存在一定毒性,故该方法一般只适用于实验室的基础研究阶段。鉴于此,研究人员开发了由极性溶剂和非极性溶剂混合物作为萃取溶剂的双相溶剂萃取法。郭向融等^[57]使用正己烷、乙醇和水按照体积比 0.275:0.600:0.125 构建的三元双相溶剂体系,从乙醇提取的南极磷虾油里富集了南极磷虾磷脂。经检测,所得磷脂含量高达 85.46%,其中磷脂酰胆碱是主要成分,且磷脂中的 EPA 和

DHA 总量占到总脂肪酸含量的 53.39%。

4.2 超临界 CO₂萃取结合乙醇提取法

超临界 CO₂ 对非极性脂质(例如甘油三酯、甘油二酯等)的提取尤为高效,回收率可达 99%,而在萃取极性油脂即磷脂时,却难以实现有效萃取^[58]。因此,以南极磷虾粉为原料,采用超临界 CO₂ 萃取其中的非极性脂质,然后以乙醇提取粕中的极性脂质,极性脂质中磷脂含量可达 80%^[6]。

4.3 层析分离

层析分离技术是通过固定相与流动相的差异分配实现磷脂的高效富集^[59],尤其适用于从南极磷虾油等复杂脂质混合物中分离得到高纯度磷脂。可以采用前述的丙酮萃取法去除甘油三酯等非极性脂质,对于剩余沉淀物可以采用硅胶柱进行磷脂的分离纯化^[60]。采用该方法得到的南极磷虾磷脂纯度可达 95%~99%,远高于溶剂萃取法(85%~95%)^[61]。

4.4 水化法

磷脂分子具有极性头部(磷酸基团)和非极性尾部(脂肪酸链),在水中可形成胶束或双层结构。通过调节温度、pH 值及电解质浓度,促使磷脂与水结合形成水合物沉淀,而甘油三酯等非极性脂质因疏水性保留在油相中而实现分离^[62]。例如:张千等^[63]在南极磷虾油中添加 4 倍于其磷脂含量的 2% 柠檬酸溶液,于 60 ℃下以 60 r/min 速度搅拌 30 min。在此条件下,磷脂富集效果显著,分离出的磷脂溶液经冷冻干燥后,磷脂含量可达 70.78%,其中 EPA 和 DHA 含量分别为 151.93 mg/g 和 113.70 mg/g。

5 南极磷虾油的酶法改性技术

相较于甘油三酯型和乙酯型的 EPA/DHA,磷脂型 EPA/DHA 在氧化稳定性、生物利用度和营养价值上更具优势,因而越来越受到关注^[64]。以南极磷虾油或南极磷虾磷脂为原料,通过特定酶催化技术可以制备具有更高经济价值的医用型高 EPA/DHA 功能性磷脂。

5.1 高 EPA/DHA 磷脂酰胆碱的酶促制备

以大豆卵磷脂为代表的常规磷脂,能够借助酶催化转酯法转变为富含 EPA/DHA 的磷脂,达到从无到有的转变^[65~66]。对于南极磷虾磷脂这类本身

含有较多 EPA/DHA 的磷脂,使用该方法可以提升 EPA/DHA 的含量,实现从有到多的升级。Xi 等^[67]从南极磷虾中提取的磷脂,DHA 含量为 14.8%,且主要处于磷脂酰胆碱的 sn-2 位。借助磷脂酶 A1 将 sn-1 位脂肪酸替换为 DHA 后,所得磷脂产品 DHA 含量可升至 59.0%。

5.2 富含 EPA/DHA 磷脂酰丝氨酸的酶促制备

磷脂酰丝氨酸是一种新食品原料,富含 EPA/DHA 的磷脂酰丝氨酸在改善脂质代谢,保护神经系统,缓解和改善神经退行性疾病方面具有突出功效^[68~69]。以富含 EPA/DHA 的南极磷虾磷脂为原料,采用酶催化可以合成富含 EPA/DHA 的磷脂酰丝氨酸^[70]。张芹^[71]选择高纯度南极磷虾磷脂和 L-丝氨酸为原料,研究在磷脂酶 D 的磷脂酰基转移作用下催化合成磷脂酰丝氨酸的工艺条件。在最优条件下,可以得到 30.90% 的富含 EPA/DHA 的南极磷虾磷脂酰丝氨酸。

6 南极磷虾油分析技术

南极磷虾油作为一种高附加值的海洋功能性油脂,其分析技术涉及脂质组成、磷脂分子种鉴定、危害物监测等多个方面。

6.1 脂质组成分析技术

采用薄层层析(TLC)^[72]、棒状薄层色谱-氢火焰离子检测(TLC-FID)^[6]、钼蓝比色法^[73]、磷核磁共振波谱(³¹P NMR)^[74]、高效液相色谱-电喷雾式检测(HPLC-CAD)^[75]、高效液相色谱-蒸发光散射检测(HPLC-ELSD)^[76]等方法可以对南极磷虾油中的一种或几种脂质进行定性和定量分析。相比较,HPLC-CAD 和 HPLC-ELSD 是南极磷虾油磷脂定量分析的核心方法,兼具高效分离与广谱检测能力。结合固相萃取(SPE)的样品前处理方式或样品直接溶解进样检测,可同时准确测定南极磷虾油中磷脂酰胆碱(PC)、磷脂酰乙醇胺(PE)、溶血磷脂(LPC)、磷脂酰甘油(PG)、鞘磷脂(SM)等亚类的含量^[77~78]。

6.2 磷脂分子种分析技术

南极磷虾油磷脂分子种的分析主要采用亲水作用色谱-质谱联用(HILIC-MS/MS)^[25]和快速蒸气离子化质谱(REIMS)^[79]2 种方法,而 REIMS 的灵敏度低于 HILIC-MS/MS 技术,主要用于生产线

实时监控。在采用 HILIC-MS/MS 检测时,根据质谱图中的质荷比(m/z)值和碎片离子信息,可以对南极磷虾油中的磷脂分子种进行结构解析^[80],而对磷脂的定量分析较困难。此外,利用磷脂酶 A₁或磷脂酶 A₂对磷脂的选择性水解作用,释放出具有特定结构的极性头基和脂肪酸链,基于 HILIC-MS/MS 或气相-质谱(GC-MS)分析可以实现磷脂分子中 2 个脂肪酸的准确定位,相关研究表明 EPA 和 DHA 等多不饱和脂肪酸多存在于磷脂的 Sn-2 位置^[1]。

6.3 危害物分析技术

由于南极磷虾粉的原料特性以及南极磷虾油特殊的浸提加工方式,制得的虾油中还存在一些潜在的危害物,如砷、氟、浸提溶剂等。通常,采用原子荧光光谱法、电感耦合等离子体质谱法或电感耦合等离子体质谱法检测虾油中的总砷^[16],而虾油中的无机砷则采用液相色谱-原子荧光光谱联用法或液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用法检测^[81]。采用热消解-离子选择电极法(或离子色谱法)可以实现南极磷虾油中氟含量的准确定量^[22]。基于不同溶剂及杂质在气液色谱柱中的吸附或溶解-脱附能力的不同,可以采用顶空气相色谱法(HS-GC)或顶空气相色谱-质谱联用法(HS-GC-MS)实现南极磷虾油中溶剂残留的准确定量^[82-83]。

7 南极磷虾油的生物活性及其机制

南极磷虾油蕴含对人体健康有益的磷脂、虾青素、DHA 和 EPA 等营养及功能因子^[84]。现有基于细胞模型、动物模型和临床试验的研究表明,南极磷虾油具有良好的预防心血管疾病,抗炎,神经保护,改善大脑功能,提高学习记忆力,减少脂质堆积等多种生物活性^[25]。

7.1 预防心血管疾病

南极磷虾油对心血管疾病具有良好预防作用,鉴于磷脂型 EPA/DHA 具有更好的吸收和生物利用度,机体摄入较低剂量的虾油就能实现心血管保护效果^[85-86]。磷脂型 EPA/DHA 通过下调脂肪合成关键酶脂肪酸合成酶(FAS)和乙酰辅酶 A 羧化酶(ACC)的表达,抑制内源性甘油三酯和胆固醇的合成^[87]。此外,通过抑制固醇调节元件结合蛋

白-2(SREBP-2)的活性,磷脂型 EPA/DHA 可以减少 3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶 A 还原酶(HMGR,胆固醇合成的限速酶)基因的转录和蛋白表达,达到减少胆固醇生成的效果^[88]。同时,磷脂型 EPA/DHA 可以激活过氧化物酶体增殖物激活受体- α (PPAR- α),进而增强脂肪酸 β 氧化,加速脂质的分解^[89]。

7.2 抗炎作用

南极磷虾油能改善骨关节炎^[90]和结肠炎^[91]等多种炎症,这与磷虾油减少机体促炎因子产生密切相关。首先,磷虾油经肠道消化后释放的游离 EPA/DHA,通过竞争性置换花生四烯酸(促炎因子前体),减少前列腺素 E₂ (PGE₂) 和白三烯 B₄ (LTB₄) 等促炎因子的生成^[92]。EPA/DHA 作为天然配体,也可以阻断 I κ B 激酶(IKK)活性,激活过氧化物酶体增殖物激活受体(PPAR γ),进而达到抑制核因子 κ B (Nuclear factor kappa-B, NF- κ B) 通路的转录活性,同样能够减少促炎因子的生成^[93]。同时,当 EPA/DHA 在细胞外环境中时,它们能够与脂肪酸转位酶(FAT/CD36)转运体结合,有利于 EPA/DHA 从细胞外转运到细胞内,促进抗炎因子白细胞介素-10(IL-10)的合成^[94]。此外,作为南极磷虾油的特色功能性成分,磷虾油中的虾青素通过清除自由基、中和活性氧(ROS)等方式,能够减少氧化应激引发的炎症级联反应^[95]。

7.3 神经保护作用

南极磷虾油通过多种机制发挥神经保护作用,包括促进神经细胞生长与分化,抗氧化、抗炎,调节神经递质水平等^[96]。首先,磷脂型 EPA/DHA 可以通过衍生化生成神经保护素 D1(NPD1),NPD1 能够抑制小胶质细胞过度激活,减少细胞因子分泌和抑制环氧化酶-2(COX-2)的表达,缓解神经炎症介导的神经元损伤。同时,磷脂型 EPA/DHA 和虾青素还可以中和活性氧(ROS)和活性氮(RNS),减少脂质过氧化产物的积累。或通过 Keap1-Nrf2-ARE 信号轴上调谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)和超氧化物歧化酶(SOD)等抗氧化酶的表达,增强神经细胞对氧化的防御能力^[97]。在提升神经递质水平方面,磷虾油通过激活 cAMP/PKA/CREB 通路,增加脑源性神经营养因子(BDNF)的合成,改善突触可塑性和学习记忆^[98]。

8 结语

南极磷虾作为一种战略性海洋生物资源,对于培育海洋生物新兴产业和提高我国粮食安全保障能力具有重要意义。作为南极磷虾的主要深加工产品之一,虽然关于南极磷虾油已开展了大量研究,但是关于其绿色提取工艺,产品稳定性调控,标准化检测体系构建等研究还不够系统和深入。未来,随着基础研究的深入,生产工艺的不断创新以及技术的不断进步,可以有效促进南极磷虾油产业的良性及可持续发展。

参 考 文 献

- [1] LUO J R, YANG Y Y, WANG T W, et al. Factors influencing the oxidative stability of Antarctic krill oil and improvement measures: A review with current knowledge[J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(5): 4081–4100.
- [2] GAO Y H, DING Z S, LIU Y F, et al. Advances in encapsulation systems of Antarctic krill oil: From extraction to encapsulation, and future direction[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(3): e13332.
- [3] 马心宇,王西西,苗钧魁,等. 南极磷虾油生物活性及高值化利用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(2): 1–5, 29.
MA X Y, WANG X X, MIAO J K, et al. Research progress on biological activity and high value utilization of Antarctic krill oil[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(2): 1–5, 29.
- [4] 余俊文,朱雪洋,胡娇娇,等. 南极磷虾油氧化稳定性研究进展[J]. 中国油脂, 2022, 47(9): 84–89, 135.
YU J W, ZHU X Y, HU J J, et al. Research progress on biological activity and high value utilization of Antarctic krill oil[J]. Cereals & Oils, 2022, 47(9): 84–89, 135.
- [5] 卜俊芝,薛静. 不同溶剂提取南极磷虾油的品质分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(23): 234–241.
PIAO J Z, XUE J. Quality analysis of Antarctic krill oil extracted with different solvents[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(23): 234–241.
- [6] 罗静茹,杨云云,王太伟,等. 南极磷虾油不同极性脂质的提取工艺优化[J]. 中国油脂, 2025, 50(5): 1–18.
LUO J Y, YANG Y Y, WANG T W, et al. Process optimisation for the extraction of different polar lipids from Antarctic krill oils[J]. China Oils and Fats, 2025, 50(5): 1–18.
- [7] 徐文思. 南极磷虾油的提取及精制工艺研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2015.
XU W S. Research on the extraction and purification process of Antarctic krill oil[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2015.
- [8] 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): 306–310.
XU X B, FAN N N, ZONG J. Research progress on extraction of Antarctic krill oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(18): 306–310.
- [9] 谢丹,李磊磊,谢亮亮. 酶解技术在南极磷虾油提取中的应用研究进展[J]. 中国油脂, 2021, 46(4): 133–138.
XIE D, LI L L, XIE L L. Research progress on the application of enzymatic hydrolysis technology in the extraction of Antarctic krill oil[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(4): 133–138.
- [10] TENG X N, WANG S C, ZEB L, et al. Two-step enzymolysis of Antarctic krill for simultaneous preparation of value-added oil and enzymolysate[J]. Marine Drugs, 2023, 21(1): 47.
- [11] WANG L Z, SHEN Y, DU Y J, et al. Recovery of functional ingredients from Antarctic krill (*Euphausia superba*) using an improved aqueous enzymatic extraction method with soybean oil as co-solvent[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2018, 120(8): 1800144.
- [12] 于海宁,陶艳红,冯莹超,等. 蛋白酶结合自溶酶提取南极磷虾油工艺研究[J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43(2): 143–147, 153.
YU H N, TAO Y H, FENG Y C, et al. Research on the process of extracting Antarctic krill oil by protease combined with autolytic enzyme[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2015, 43(2): 143–147, 153.
- [13] ZHOU L, YANG F, ZHANG M H, et al. A green enzymatic extraction optimization and oxidative stability of krill oil from *Euphausia superba*[J]. Marine Drugs, 2020, 18(2): 82.
- [14] 周大勇,徐文思,宋泽宇,等. 水酶法制备南极磷虾油及其微胶囊和低氟南极磷虾肽的方法: CN201410629513.9[P]. 2017-01-25[2025-04-05].

- ZHOU D Y, XU W S, SONG Z Y, et al. Method for preparing Antarctic krill oil, its microcapsules and low-fluoride Antarctic krill peptides by water enzyme method: CN201410629513.9[P]. 2017-01-25 [2025-04-05].
- [15] 高玉航, 牛瑞浩, 姚飞, 等. 水酶法提油过程中破乳方法研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(14): 172-177.
- GAO Y H, NIU R H, YAO F, et al. Research progress on demulsification methods in oil extraction by water enzyme method[J]. Food Research and Development, 2021, 42(14): 172-177.
- [16] 季云云, 余晓薇, 张海燕, 等. 基于响应面方法的南极磷虾油提取工艺及其脱砷效果研究[J]. 渔业研究, 2024, 46(5): 448-457.
- JI Y Y, YU X W, ZHANG H Y, et al. Antarctic krill oil extraction process and arsenic removal effect based on response surface method [J]. Journal of Fisheries Research, 2024, 46(5): 448-457.
- [17] 孙德伟, 谢强, 李进伟, 等. 南极磷虾油亚临界萃取工艺优化及挥发性成分分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 144-149.
- SUN D W, XIE Q, LI J W, et al. Optimization of sub-critical extraction of krill oil and the volatile components[J]. Food and Machinery, 2021, 37(10): 144-149.
- [18] SONG G S, WANG H X, ZHANG M N, et al. Real-time monitoring of the oxidation characteristics of Antarctic krill oil (*Euphausia superba*) during storage by electric soldering iron ionization mass spectrometry-based lipidomics[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(5): 1457-1467.
- [19] FULLER L D, CUMMING A H, CARD A, et al. Free fatty acids in commercial krill oils: Concentrations, compositions, and implications for oxidative stability[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2020, 97(8): 889-900.
- [20] KUMAR P K P, KRISHNA A G G. Effect of different deacidification methods on phytonutrients retention in deacidified fractionated palm oil[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2015, 92(5): 645-658.
- [21] 陈好, 杨丹, 陈晨, 等. 桑葚籽毛油超声辅助乙醇脱酸工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(2): 93-96, 111.
- CHEN H, YANG D, CHEN C, et al. Research on the ultrasonic-assisted ethanol deacidification process of mulberry seed crude oil [J]. Grains and Oils, 2025, 38(2): 93-96, 111.
- [22] TENG X N, WANG S C, ZEB L, et al. Effects of carboxymethyl chitosan adsorption on bioactive components of Antarctic krill oil [J]. Food Chemistry, 2022, 388: 132995.
- [23] LIU X L, LI Y, JI X, et al. Hydrogel microspheres immobilized lipase inspired by golf ball surfaces for the deacidification of Antarctic krill oil[J]. Food Chemistry, 2025, 475: 143348.
- [24] JING Y S, MA Y F, PAN F B, et al. An insight into antihyperlipidemic effects of polysaccharides from natural resources[J]. Molecules, 2022, 27(6): 1903.
- [25] XIE D, GONG M Y, WEI W, et al. Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil: A comprehensive review of chemical composition, extraction technologies, health benefits, and current applications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(2): 514-534.
- [26] 孙甜甜. 高品质南极磷虾油工业化生产技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- SUN T T. Studies on the industrialization technology of high quality Antarctic krill oil[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [27] 马普, 冯迪娜, 苏学锋, 等. 一种南极磷虾油中胆固醇的脱除方法: CN202310866149.7[P]. 2023-08-15[2025-04-05].
- MA P, FENG D N, SU X F, et al. A method for removing cholesterol from Antarctic krill oil: CN202310866149.7[P]. 2023-08-15[2025-04-05].
- [28] GIGLIOTTI J C, DAVENPORT M P, BEAMER S K, et al. Extraction and characterisation of lipids from Antarctic krill (*Euphausia superba*) [J]. Food Chemistry, 2011, 125(3): 1028-1036.
- [29] WANG Y L, LIU Y Z, MA L, et al. The oxidation mechanism of phospholipids in Antarctic krill oil promoted by metal ions [J]. Food Chemistry, 2020, 333: 127448.
- [30] 刘玉兰, 鄂旭, 王璐阳, 等. 专用硅胶在油脂精炼生产中的应用研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(9): 16-20.
- LIU Y L, E X, WANG L Y, et al. Research on the application of specialized silica gel in oil refining production[J]. Chinese Oils and Fats, 2019,

- 44(9): 16–20.
- [31] ZHANG H W, ZENG X B, XU S J, et al. Effects of metal ion removal from Antarctic krill oil on its qualities and stabilities of colour and oxidation [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(9): 6007–6016.
- [32] ZHAO J W, JIANG K N, CHEN Y X, et al. Preparation and characterization of microemulsions based on Antarctic krill oil [J]. Marine Drugs, 2020, 18(10): 492.
- [33] DONG G M, WANG R Y, YIN F W, et al. Sensory characteristics and key odor-active compounds of oxidized Antarctic krill oil: A comparative study with oxidized fish oil [J]. Food Chemistry, 2025, 485: 144475.
- [34] 冯迪娜, 马普, 苏学锋, 等. 一种脱腥南极磷虾油及其提取方法: CN202510345061.X[P]. 2025-04-22[2025-05-05].
- FENG D N, MA P, SU X F, et al. A deodorizing Antarctic krill oil and its extraction method: CN202510345061.X[P]. 2025-04-22[2025-05-05].
- [35] LIN L, CAO Z H, TAO X Y, et al. Effects of extraction solvents on Antarctic krill oil quality characteristics and some insights into the oxidation stability of Antarctic krill oil [J]. LWT –Food Science and Technology, 2024, 204: 116429.
- [36] ZENG X B, PEI X C, LI D Y, et al. Mechanism of discoloration of Antarctic krill oil upon storage: A study based on model systems [J]. Food Chemistry, 2024, 459: 140376.
- [37] WANG X M, ZHOU D Y, LIU F J, et al. Distribution of different forms of metal ions in Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil: A mechanism of their pro-oxidant effects relating to association colloids [J]. Food Chemistry, 2025, 472: 142944.
- [38] SU D, WANG X X, LIU X F, et al. A comprehensive study of the colloidal properties, biocompatibility, and synergistic antioxidant actions of Antarctic krill phospholipids [J]. Food Chemistry, 2024, 451: 139469.
- [39] WANG X T, CHEN Y S, MCCLEMENTS D J, et al. Recent advances in understanding the interfacial activity of antioxidants in association colloids in bulk oil [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2024, 325: 103117.
- [40] OH W Y, KIM M J, LEE J H. Approaches of lipid oxidation mechanisms in oil matrices using association colloids and analysis methods for the lipid oxidation [J]. Food Science and Biotechnology, 2023, 32(13): 1805–1819.
- [41] PEI X C, ZENG X B, LI D Y, et al. The change rule of lipid oxidation and hydrolysis driven via water in Antarctic krill oil: Based on association colloid formation [J]. Food Chemistry, 2025, 463: 4.
- [42] WANG Z W, LIU F J, LUO Y, et al. Effects of tea polyphenol and its combination with other antioxidants added during the extraction process on oxidative stability of Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil [J]. Foods, 2022, 11(23): 3768.
- [43] 米彩霞, 张静. 复方葡萄籽油软胶囊制备工艺研究 [J]. 农产品加工, 2024(7): 52–55, 59.
- MI C X, ZHANG J. Reaching the preparation of the soft capsule of compound grape seed oil [J]. Farm Products Processing, 2024(7): 52–55, 59.
- [44] 陈琼, 郑奕锐, 汤新, 等. 基于胃肠动态消化系统分析两种不同藻油剂型的消化特性和生物可及性 [J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 127–134.
- CHEN Q, ZHENG Y R, TANG X, et al. Digestive characteristics and bioaccessibility of two different types of algal oil based on an *in vitro* dynamic digestive system [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 127–134.
- [45] 林柳, 曹振海, 陶宁萍, 等. 南极磷虾油氧化稳定性及调控方法研究进展 [J]. 食品科学, 2023, 44(15): 310–320.
- LIN L, CAO Z H, TAO N P, et al. Research progress in oxidation stability of Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil and review of methods for its control [J]. Food Science, 2023, 44(15): 310–320.
- [46] 冯迪娜, 马普, 苏学锋, 等. 南极磷虾油软胶囊、胶囊皮及其制备方法: 202410801038.2[P]. 2024-09-03[2025-04-05].
- FENG D N, MA P, SU X F, et al. Antarctic krill oil soft capsules, capsule skins and their preparation methods: 202410801038.2[P]. 2024-09-03[2025-04-05].
- [47] 张燕燕, 何玉莲, 袁小茜, 等. 一种磷虾油普利醇软胶囊的制备方法: 202311010551.1[P]. 2024-07-16[2025-04-05].
- ZHANG Y Y, HE Y L, YUAN X Q, et al. A preparation method of krill oil priol soft capsules: 202311010551.1[P]. 2024-07-16[2025-04-05].

- [48] LI Y J, LIU G Q. Encapsulation of Antarctic krill oil and kaempferol co-loaded nano-liposomes in alginate-chitosan hydrogel beads: Improved stability and modified digestive behaviour [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(5): 3198–3211.
- [49] TANG L, LIU Y, LIANG Z Y, et al. Enhancing the stability of krill oil through microencapsulation with endogenous krill protein and chitosan and application in senior milk powder[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 293: 139224.
- [50] 柳新荣, 俞乐, 张建文, 等. 一种复合n3脂肪酸微胶囊及其制备方法和应用: 202211708508.8[P]. 2024-08-16[2025-04-05].
- LIU X R, YU L, ZHANG J W, et al. A complex n3 fatty acid microcapsule and its preparation method and application: 202211708508.8[P]. 2024-08-16[2025-04-05].
- [51] LI X, WU J D, LIU M Y. Improved colloidal and oxidative stability of krill oil using natural biopolymers via spray drying microencapsulation [J]. Food Bioengineering, 2023, 2(3): 242–250.
- [52] 王帝, 张海娇, 冯晓梅, 等. 南极磷虾油纳米复合微胶囊制备、表征及其性质研究[J]. 食品科技, 2022, 47(7): 236–242.
- WANG D, ZHANG H J, FENG X M, et al. Preparation, characterization and properties of Antarctic krill oil nanocomposite microcapsules [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(7): 236–242.
- [53] 何兵, 余建军, 何文, 等. 一种高含量高载油量低表面油率磷虾油微胶囊的制备方法: 202411265616.1[P]. 2024-12-03[2025-04-05].
- HE B, YU J J, HE W, et al. A preparation method of krill oil microcapsules with high content, high oil loading capacity and low surface oil rate: 202411265616.1[P]. 2024-12-03[2025-04-05].
- [54] ATTRI N, ARORA D, SAINI R, et al. Health promoting benefits of krill oil: Mechanisms, bioactive combinations, and advanced encapsulation technologies[J]. Food Science and Biotechnology, 2025, 34(6): 1285–1308.
- [55] LIANG Y X, JIANG K Y, TU J C, et al. Efficient separation and quantitative sleep evaluation of phospholipids and glycerides of Antarctic krill[J]. Food Chemistry, 2025, 486: 144529.
- [56] SU D, MIAO J K, LIU X F, et al. Separation and concentration of phospholipids and glycerides from ethanol extraction of krill by hydration and solvent partitioning[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 317: 123900.
- [57] 郭向融, 刘小芳, 姜维, 等. 正己烷-乙醇-水三元双相溶剂浸提法富集南极磷虾磷脂[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(9): 96–103.
- GUO X R, LIU X F, JIANG W, et al. Extraction and enrichment of phospholipids from Antarctic krill (*Euphausia superba*) with two-liquid-phase system of hexane-ethanol-water[J]. Food Research and Development, 2024, 45(9): 96–103.
- [58] 罗静茹. 不同脂质组成南极磷虾油的制备及其氧化行为差异研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2024.
- LUO J R. Study on the preparation of Antarctic krill oil with different lipid compositions and their differences in oxidative behavior[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2024.
- [59] 汪瑾. 高纯多烯磷脂酰胆碱分离纯化方法研究进展[J]. 农产品加工, 2021(17): 78–79, 83.
- WANG J. Research progress of the high-purity PC separation and purification process[J]. Farm Products Processing, 2021(17): 78–79, 83.
- [60] 魏山山, 刘代成. 一种制备南极磷虾油磷脂酰胆碱标准品的工艺: CN102911201A[P]. 2013-02-06[2025-04-05].
- WEI S S, LIU D C. A process for preparing phosphatidylcholine standard substance of Antarctic krill oil: CN102911201A[P]. 2013-02-06[2025-04-05].
- [61] 魏山山. 南极磷虾油中磷脂酰胆碱的提取、分离与分析[D]. 济南: 山东师范大学, 2014.
- WEI S S. The extraction, separation and analysis of phosphatidylcholine in Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2014.
- [62] SHOWMAN C, BARNES K, JACZYNSKI J, et al. Separation and concentration of ω -3 PUFA-rich phospholipids by hydration of krill oil[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 126: 109284.
- [63] 张千, 俞存兵, 余奕珂, 等. 南极磷虾油磷脂富集工艺的优化[J]. 中国油脂, 2021, 46(9): 11–14.
- ZHANG Q, YU C B, YU Y K, et al. Optimization of enrichment process of phospholipids in Antarctic krill oil[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(9): 11–14.

- [64] ZHANG H Y, SECUNDO F, SUN J N, et al. Advances in enzyme biocatalysis for the preparation of functional lipids[J]. Biotechnology Advances, 2022, 61: 108036.
- [65] ZHANG T T, WANG J, ZHAO Y K, et al. Green biosynthesis of DHA-phospholipids in tailor-made supersaturated DHA aqueous solution and catalytic mechanism study[J]. Food Chemistry, 2024, 431: 137164.
- [66] SHU L W, ZHENG X, QI S H, et al. Transesterification of phosphatidylcholine with DHA-rich algal oil using immobilized *Candida antarctica* lipase B to produce DHA-phosphatidylcholine [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2023, 169: 110266.
- [67] XI X, FENG X M, SHI N R, et al. Immobilized phospholipase A₁-catalyzed acidolysis of phosphatidylcholine from Antarctic krill (*Euphausia superba*) for docosahexaenoic acid enrichment under supercritical conditions[J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2016, 126: 46–55.
- [68] DUAN H L, XU N, YANG T, et al. Effects of a food supplement containing phosphatidylserine on cognitive function in Chinese older adults with mild cognitive impairment: A randomized double-blind, placebo-controlled trial[J]. Journal of Affective Disorders, 2025, 369: 35–42.
- [69] ZHANG L Y, SHI H H, WANG C C, et al. Targeted lipidomics reveal the effects of different phospholipids on the phospholipid profiles of hepatic mitochondria and endoplasmic reticulum in high-fat/high-fructose-diet-induced nonalcoholic fatty liver disease mice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(11): 3529–3540.
- [70] 秦鑫鑫, 王晓琳, 冯晓梅, 等. 超临界CO₂体系制备富含DHA南极磷虾磷脂酰丝氨酸工艺研究[J]. 中国海洋药物, 2018, 37(2): 57–62.
- QIN X X, WANG X L, FENG X M, et al. Study on the synthesis of phosphatidylserine with high DHA contents in supercritical carbon dioxide system [J]. Chinese Journal of Marine Drugs, 2018, 37(2): 57–62.
- [71] 张芹. 酶法合成富含n-3 PUFA的磷脂酰丝氨酸的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- ZHANG Q. Study on enzymatic synthesis of phosphatidylserine enriched in n-3 PUFA[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [72] ROSE A, SHOWMAN C, SHEN C L, et al. Effect of organic solvent on the extraction of lipids from krill powders using a one-step extraction process[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 16: 101072.
- [73] 刘小芳, 郭向融, 李爽, 等. 南极磷虾磷脂的组成及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(3): 16–21.
- LIU X F, GUO X R, LI S, et al. Composition and antioxidant activity of phospholipids from Antarctic krill (*Euphausia superba*) [J]. Food Research and Development, 2024, 45(3): 16–21.
- [74] BURRI L, HOEM N, MONAKHOVA Y B, et al. Fingerprinting krill oil by ³¹P, ¹H and ¹³C NMR spectroscopies [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2016, 93: 1037–1049.
- [75] ZHAO G H, HU Y Y, ZENG X, et al. A direct and facile simultaneous quantification of non-polar and polar lipids in different species of marine samples using normal-phase HPLC-CAD[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 114: 104813.
- [76] 赵新楠, 彭吉星, 吴海燕, 等. 水产品中5种磷脂含量的HPLC-ELSD检测分析[J]. 中国渔业质量与标准, 2022, 12(4): 10–17.
- ZHAO X L, PENG J X, WU H Y, et al. Determination and analysis for contents of five phospholipids in aquatic products by HPLC-ELSD method[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2022, 12(4): 10–17.
- [77] 文艺晓, 彭吉星, 郭莹莹, 等. HPLC-ELSD检测南极磷虾油中磷脂含量[J]. 南方农业学报, 2019, 50(10): 2293–2299.
- WEN Y X, PENG J X, GUO Y Y, et al. Determination of phospholipids in Antarctic krill oil by HPLC-ELSD [J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(10): 2293–2299.
- [78] YU H Y, PARK S E, CHUN H S, et al. Phospholipid composition analysis of krill oil through HPLC with ELSD: Development, validation, and comparison with ³¹P NMR spectroscopy[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 107: 104408.
- [79] 张燕平, 王海星, 陈康, 等. 实时质谱新技术分析南极磷虾油的脂质组学轮廓[J]. 中国食品学报, 2020, 20(9): 226–231.
- ZHANG Y P, WANG H X, CHEN K, et al. Novel

- real -time mass spectrometry for detecting the lipidomics profile of Antarctic krill oil[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(9): 226–231.
- [80] MENG N, WANG X C, SONG Y, et al. Characterization of oxylipins in Antarctic krill oil (*Euphausia superba*) during storage based on RPLC–MS/MS analysis[J]. Food Chemistry, 2024, 445: 138702.
- [81] 李建荣, 张学玲, 陈兵兵, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法研究标准曲线质量浓度范围对虾油中无机砷测量不确定度评定的影响[J]. 中国油脂, 2020, 45(4): 138–144.
- LI J R, ZHANG X L, CHEN B B, et al. Bingbing Influence of mass concentration range of standard curve on uncertainty of determination of inorganic arsenic in krill oil by HPLC–ICP–MS[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(4): 138–144.
- [82] 郝兰, 俞存兵, 郭忠, 等. 顶空-气相色谱法测定南极磷虾油中有机溶剂残留量[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(2): 105–111.
- HAO L, YU C B, GUO Z, et al. Determination of residual levels of organic solvents in Antarctic krill oil by headspace–gas chromatography[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2024, 15(2): 105–111.
- [83] 胡劼, 俞博凯, 吕飞, 等. 水相体系中磷脂酶 A₁酶解南极磷虾磷脂制备溶血磷脂的分析[J]. 食品科学, 2019, 40(12): 92–97.
- HU J, YU B K, LÜ F, et al. Preparation of lysophospholipids by phospholipase A₁-catalyzed hydrolysis of Antarctic krill phospholipids in aqueous phase[J]. Food Science, 2019, 40(12): 92–97.
- [84] PHAM T P T, HOANG T V, CAO P T N, et al. Comparison of omega-3 polyunsaturated fatty acids bioavailability in fish oil and krill oil: Network Meta-analyses [J]. Food Chemistry, 2024, 24: 101880.
- [85] PAN J P, WANG H, LI Y, et al. Comparative proteomic analysis reveals the effects of different fatty acid forms on high-fat diet mice[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(2): 316–322.
- [86] XIANG X W, ZHOU X L, WANG W J, et al. Effect of Antarctic krill phospholipid (KOPL) on high fat diet-induced obesity in mice[J]. Food Research International, 2021, 148: 110456.
- [87] ZHANG L Y, MU J Q, MENG J, et al. Dietary phospholipids alleviate diet-induced obesity in mice: Which fatty acids and which polar head[J]. Marine Drugs, 2023, 21(11): 555.
- [88] CHANG M R, ZHANG T T, HAN X Q, et al. Comparative analysis of EPA/DHA-PL forage and liposomes in orotic acid-induced nonalcoholic fatty liver rats and their related mechanisms[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66 (6): 1408–1418.
- [89] DING L, ZHANG T T, CHE H X, et al. DHA-enriched phosphatidylcholine and dha-enriched phosphatidylserine improve age-related lipid metabolic disorder through different metabolism in the senescence-accelerated mouse[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2018, 120 (6): 1700490.
- [90] STONEHOUSE W, BENASSI-EVANS B, BEDNARZ J, et al. Krill oil improved osteoarthritic knee pain in adults with mild to moderate knee osteoarthritis: A 6-month multicenter, randomized, double-blind, placebo-controlled trial [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2022, 116(3): 672–685.
- [91] ZHOU X L, XIANG X W, ZHOU Y F, et al. Protective effects of Antarctic krill oil in dextran sulfate sodium-induced ulcerative colitis mice [J]. Journal of Functional Foods, 2021, 79: 104394.
- [92] XIE D, HE F Y, WANG X S, et al. Diverse krill lipid fractions differentially reduce LPS-Induced inflammatory markers in RAW264.7 macrophages *in vitro*[J]. Foods, 2021, 10(11): 2887.
- [93] COLLETTI A, CRAVOTTO G, CITI V, et al. Advances in technologies for highly active omega-3 fatty acids from krill oil: Clinical applications [J]. Marine Drugs, 2021, 19(6): 306.
- [94] ZHANG N, JIN L, LIU C H, et al. An Antarctic krill oil-based diet elicits neuroprotective effects by inhibiting oxidative stress and rebalancing the M1/M2 microglia phenotype in a cuprizone model for demyelination[J]. Journal of Functional Foods, 2021, 76: 104309.
- [95] 王佳粮. 南极磷虾油的抗氧化及其降血脂活性研究与固体饮料研发[D]. 大连: 大连工业大学, 2022.
- WANG J L. Study on antioxidant and hypolipidemic activities of Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil and development of solid beverages [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2022.

- [96] AHMED M K, AHMED F, TIAN H S, et al. Marine omega-3 (n-3) phospholipids: A comprehensive review of their properties, sources, bioavailability, and relation to brain health[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(1): 64–123.
- [97] CHOI J Y, JANG J S, SON D J, et al. Antarctic krill oil diet protects against lipopolysaccharide-induced oxidative stress, neuroinflammation and cognitive impairment[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(12): 2554.
- [98] RU Q, TIAN X, XIONG Q, et al. Krill oil alleviated methamphetamine-induced memory impairment via the MAPK signaling pathway and dopaminergic synapse pathway [J]. Frontiers in Pharmacology, 2021, 12: 756822.

The Development and Utilization Technology of Antarctic Krill (*Euphausia superba*) Oil

YIN Fawen, PEI Xuechen, WANG Xinmiao, GUO Chao, WANG Qian, PAN Weicong, XU Jie, SUN Xin, ZHOU Dayong*, ZHU Beiwei

(SKL of Marine Food Processing & Safety Control, National Engineering Research Center of Seafood, Liaoning Province Key Laboratory for Marine Food Science and Technology, School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, Liaoning)

Abstract Antarctic krill oil functional products are the main direction of deep processing of Antarctic krill. It is rich in phospholipids, omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids (omega-3 LC-PUFA), astaxanthin, vitamins and other functional ingredients. Among them, omega-3 LC-PUFA such as eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA), which exist in phospholipid form, have higher bioavailability, better nutrition and health effects. However, there are still some challenges in the industrialization process of Antarctic krill oil, such as the greening of the extraction process, further improvement of product stability, and improvement of the quality testing standard system. This article provided a review of the extraction, separation, deep processing, analysis techniques, and biological activity of Antarctic krill oil based on the latest research trends. On the basis of these achievements, it was necessary to further strengthen basic research and technological innovation in the future, improved the production efficiency and quality of Antarctic krill oil, and explored its applications in different fields to develop more high value-added products, in order to promote the sustainable development of the Antarctic krill oil industry.

Keywords Antarctic krill oil; extraction; refining; stabilization; phospholipid enrichment; enzymatic modification; analysis; biological activities