

# 磷脂型 DHA 制备、检测及功能特性研究进展

陈广琦<sup>1</sup>, 贾敏<sup>2</sup>, 宗爱珍<sup>2</sup>, 徐同成<sup>2</sup>, 苗颖<sup>1</sup>

(1. 天津农学院 食品科学与生物工程学院, 天津 300392; 2. 山东省农业科学院 农产品加工与营养研究所/  
山东省特殊医学用途配方食品工程技术研究中心/山东省农产品精深加工技术重点实验室/  
农业农村部新食品资源加工重点实验室, 济南 250100)

**摘要:** 磷脂型 DHA 因具有较高的 DHA 吸收率, 近年来受到广泛关注。旨在为磷脂型 DHA 在功能性脂质产品中的应用提供参考, 从磷脂型 DHA 的酶法制备方法、检测方法和功能特性等方面进行综述。酶法制备磷脂型 DHA 具有条件温和、安全性高等特点, 主要分为酶催化酸解法、酶催化酯交换法和酶催化酯化法等。磷脂型 DHA 的检测方法有薄层色谱-气相色谱法、核磁共振法、高效液相色谱-串联质谱法等。磷脂型 DHA 具有抗癌、改善脂质代谢、抗炎和增强神经营养活性等功能特性。磷脂型 DHA 制备工艺的优化和检测方法的改进对于其在食品、医药等行业的应用具有重要意义。

**关键词:** 磷脂型 DHA; 制备; 检测; 功能特性

中图分类号: TQ645.9+6; TS229 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2025)02-0071-06

## Preparation, detection and functional characteristics of DHA – phospholipid

CHEN Guangqi<sup>1</sup>, JIA Min<sup>2</sup>, ZONG Aizhen<sup>2</sup>, XU Tongcheng<sup>2</sup>, MIAO Ying<sup>1</sup>

(1. College of Food Science and Biotechnology, Tianjin Agriculture University, Tianjin 300392, China;  
2. Institute of Food & Nutrition Science and Technology/Shandong Engineering Research Center for Formulated Foods for Special Medical Purposes/Key Laboratory of Advanced and Deep Processing Technology of Agricultural Products of Shandong Province/Key Laboratory of New Food Resource Processing of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

**Abstract:** DHA – phospholipid (DHA – PL) has attracted much attention in recent years because of its high absorption rate of DHA. Aiming to provide reference for the application of DHA – PL in functional lipid products, the enzymatic preparation method, detection method and functional characteristics of DHA – PL were summarized. Enzymatic preparation of DHA – PL had the advantages of mild conditions and high safety, and mainly divided into enzyme catalytic acid hydrolysis method, enzyme catalytic transesterification method and enzyme catalytic esterification method. The methods for detecting DHA – PL include thin layer chromatography – gas chromatography, nuclear magnetic resonance, high performance liquid chromatography – tandem mass spectrometry, etc. DHA – PL has the functions of anticancer, improving lipid metabolism, anti – inflammatory and enhancing neurotrophic activity. Optimization of the preparation process and improvement of detection methods for DHA – PL is of great significance for the application of DHA – PL in industries such as food and pharmaceuticals.

**Key words:** DHA – phospholipid; preparation; detection; functional characteristics

收稿日期: 2023-08-09; 修回日期: 2024-09-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1100600/  
2022YFF1100602)

作者简介: 陈广琦(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮油精深加工与特医食品(E-mail)980545045@qq.com。

通信作者: 苗颖, 副教授, 博士(E-mail)miaoying007@163.com。

二十二碳六烯酸(Docosahexaenoic acid, DHA)是一种长链  $n-3$  多不饱和脂肪酸( $n-3$  PUFA), 是人类生命活动必不可少的脂肪酸<sup>[1]</sup>。DHA 对胎儿的大脑发育、认知、视觉均具有重要作用, 被认为是

大脑中最重要的脂肪酸<sup>[2]</sup>。根据结构不同,DHA 可分为 3 种类型,即乙酯型 DHA (DHA - EE)、甘油三酯型 DHA (DHA - TAG) 和磷脂型 DHA (DHA - PL)<sup>[3]</sup>。磷脂(PL)根据骨架不同可分为两大类,即甘油磷脂和鞘磷脂,其中甘油磷脂在 sn - 1 和 sn - 2 位具有两个长链疏水性脂肪酸分子,是维持细胞内稳态的重要分子,是细胞膜的基本成分。根据极性头部基团的不同,甘油磷脂可分为磷脂酰胆碱(PC)、磷脂酰乙醇胺(PE)、磷脂酰丝氨酸(PS)、磷脂酰肌醇(PI)、磷脂酰甘油(PG)等。DHA - PL 是磷脂结构中含有 DHA 的磷脂。以往的研究主要集中在 DHA - EE 和 DHA - TAG,近年来 DHA - PL 因其较高的 DHA 吸收率而受到科学界的广泛关注,但目前极少有从制备方法、检测方法及功能特性等方面对 DHA - PL 进行系统总结的报道。因此,本文将从以上方面对 DHA - PL 进行综述,以期对特殊人群适用的功能性脂质产品的制备、评价和产业化应用提供参考。

## 1 磷脂型 DHA 的制备方法

DHA - PL 的制备方法有直接提取法、化学合成法、酶法等,其中酶法因具有反应条件温和、副产物较少、对环境友好及安全性高等优点而受到广泛关注。因此,本文仅对酶法制备 DHA - PL 进行综述。酶法制备 DHA - PL 主要是通过使用磷脂酶或脂肪酶将磷脂中 sn - 1、sn - 2 位酰基替换成 DHA,得到 DHA - PL。根据反应原理的不同,酶法又分为酶催化酸解法、酶催化酯交换法和酶催化酯化法,常用酶为磷脂酶 A<sub>1</sub> (PLA<sub>1</sub>),其 DHA 掺入率相对较高。

### 1.1 酶催化酸解法

酶催化酸解法主要以游离 DHA 和大豆磷脂为原料制备 DHA - PL。卢英华等<sup>[4]</sup>采用酶促酸解法制备 DHA - PL,首先将富含 DHA 的藻油进行皂化、酸化处理制备游离 DHA,再利用固定化南极假丝酵母脂肪酶 B(CALB)催化大豆卵磷脂与游离 DHA 发生酸解反应制备 DHA - PL,通过加入分子筛调控反应体系中的含水量,抑制水解副反应,该方法实现了 DHA - PL 的高效转化。Chen 等<sup>[5]</sup>在反胶束体系中使用 PLA<sub>1</sub> 催化大豆磷脂和藻油酸解合成富含 DHA 的磷脂酰胆碱(DHA - PC),DHA 的掺入率最高为 20.90%。该方法采用了反胶束体系,提高了 DHA 的掺入率。目前酶催化酸解法制备的 DHA - PL 的纯度依赖于原料中 DHA 的纯度,由于未反应的游离 DHA 易氧化酸败,对保存条件要求较高,导致该方法很难实现工业化,而且高纯度 DHA 价格

昂贵,进一步限制了酶催化酸解法制备 DHA - PL 的发展。

### 1.2 酶催化酯交换法

酶催化酯交换法常将乙酯型鱼油作为底物制备 DHA - PL。孙兆敏等<sup>[6]</sup>使用 PLA<sub>1</sub> 催化大豆磷脂与乙酯型鱼油酯交换制备富含 DHA 和 EPA 的 PUFA 型磷脂,在大豆磷脂与乙酯型鱼油质量比 1:8、反应温度 55℃、反应时间 12 h、加水量 55 μL 的条件下,合成的 PUFA 型磷脂中 DHA 含量为 17.8%。Li 等<sup>[7]</sup>在无溶剂体系中,采用 PLA<sub>1</sub> 催化 PC 与乙酯型二十二碳六烯酸/二十碳五烯酸(DHA/EPA - EE)酯交换合成 DHA/EPA - PC,在酶添加量 15%、PC 与 DHA/EPA - EE 质量比 1:6、反应温度 55℃、反应时间 12 h、水用量 1.25% 的优化条件下,DHA 和 EPA 总掺入率为 30.7%。Li 等<sup>[8]</sup>在无溶剂体系中,采用 PLA<sub>1</sub> 催化 PC 与富含 DHA/EPA 的乙酯酯交换合成 DHA/EPA - PC,在乙酯与 PC 质量比 6.8:1、反应时间 24 h、反应温度 55.7℃、水添加量 1.1% 的优化条件下,DHA 和 EPA 与磷脂结合率为 19.09%。另外,有研究通过藻油制备 DHA - PC。刘力<sup>[9]</sup>采用 CALB 催化 DHA 藻油与大豆磷脂进行酯交换,通过优化酶添加量、温度、正己烷与水体积比、底物质量比等反应条件,得到 DHA - PC 最高产率达 21%。Zhang 等<sup>[10]</sup>研究了以未经预处理的富含 DHA - TAG 的藻油作为 DHA 供体与 PC 进行酶催化酯交换制备 DHA - PC,结果表明,PLA<sub>1</sub> 是最适的酶,在反应温度 45℃、含水量 0.7% (不添加额外的水)、反应时间 30 min 的条件下,得到 DHA 掺入率为 39.1% 的 DHA - PC。

### 1.3 酶催化酯化法

酶催化酯化法是利用脂肪酶催化溶血磷脂酰胆碱(Lysophosphatidylcholine,LPC)与脂肪酸发生反应合成功能性磷脂。李珍珍等<sup>[11]</sup>采用乙醇浸提南极磷虾粉获得高纯度 PC,在超临界 CO<sub>2</sub> 体系中使用磷脂酶 A<sub>2</sub> (PLA<sub>2</sub>) 催化 PC sn - 2 位脂肪酸水解,然后使游离 DHA 结合至 sn - 2 位,制备高 DHA 含量的 DHA - PC,在反应温度 55℃、反应时间 6 h、酶添加量 15%、压力 12 MPa 的最优条件下,南极磷虾 PC 中 DHA 摩尔含量从 17.3% 上升到 62.3%。Tanaka 等<sup>[12]</sup>采用 PLA<sub>2</sub> 催化 DHA 和 EPA 混合脂肪酸与 LPC 酯化反应合成 EPA/DHA 型磷脂(EPA/DHA - LPC),在优化条件下 EPA/DHA - LPC 含量为 19%。Awano 等<sup>[13]</sup>将大豆卵磷脂水解制备 LPC,经硅胶柱纯化后,利用甲酰胺作为酶激活剂,结合减

压条件,通过 PLA<sub>2</sub>介导与 DHA 进行酯化反应,成功地生产了 sn - 2 DHA - PL,其摩尔产率超过 90%。DHA 在酯化过程中的掺入率取决于底物纯度,底物纯度越高掺入率越高。酶催化酯化法最常用的催化剂是 PLA<sub>2</sub>,但 PLA<sub>2</sub> 价格昂贵,不利于工业化生产。因此,酶催化酯化法在 DHA - PL 合成中应用较少。

## 2 磷脂型 DHA 检测方法

### 2.1 薄层色谱 - 气相色谱法(TLC - GC)

TLC - GC 是最传统、直观、直接的定量方法,其采用 TLC 分离磷脂,再对磷脂进行甲酯化后采用 GC 测定脂肪酸组成,进而确定 DHA - PL 的含量<sup>[14]</sup>。刘力<sup>[9]</sup>采用 TLC - GC 测定 DHA - PC 中的 DHA 含量,结果表明,该方法可以很好地分离出磷脂并检测磷脂中 DHA 的掺入率。

### 2.2 核磁共振法(NMR)

NMR 是通过特征性的子峰来判定样品中是否有目标物。NMR 预处理简单、分析时间短、分辨率高、干扰因子少、精确度高,是一种快速、灵敏的检测方法,其能在不损伤被测物的情况下深入到被测物的内部,对含磷化合物有独特的选择性,且不受其他元素的影响。但是该方法对样品纯度有很高的要求,对样品需求量也较大,而且设备价格昂贵,对操作人员要求高,因此其有待进一步被推广应用。Shu 等<sup>[15]</sup>利用 CALB 催化富含 DHA - TAG 的藻油合成 DHA - PC,并采用 NMR 对其进行了定量分析,效果较好。

### 2.3 高效液相色谱 - 串联质谱法(HPLC - MS/MS)

HPLC - MS/MS 是利用液相色谱的高效分离能力将磷脂中的混合物分离成单个组分,然后通过质谱进行定性定量分析的方法。Zhang 等<sup>[16]</sup>在前体离子扫描模式下采用 HPLC - MS/MS 对富含 EPA/DHA 的结构磷脂进行非靶向分析,采用新型锁链前驱体离子扫描技术,能够有效分析出磷脂中 DHA 含量。Yu 等<sup>[17]</sup>研究建立了一种前体离子扫描驱动的亲水相互作用液相色谱 - 质谱法(PreIs - HILIC - MS),通过锁定  $m/z$  301.6 (EPA) 和  $m/z$  327.6 (DHA) 的脂肪酰基片段,对鱼油中 EPA/DHA - PL 进行非靶向筛选,该方法检出限不超过 4.15  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,回收率不低于 78.6%,精密度(RSD)不超过 4.65%,相比于传统的全扫描模式,该方法对鱼油样品中 EPA/DHA - PL 的靶向筛选更具优势和潜力。HPLC - MS/MS 是一种普适性的分析技术,具有专一可靠、灵敏度高、操作简便、可对微量物质进行定量检测与

定性验证等优点,近年来获得了迅速的发展,受到愈来愈多的重视。

## 3 磷脂型 DHA 功能特性

### 3.1 抗癌

DHA - PL 可通过多种途径诱导肿瘤细胞凋亡,如导致线粒体膜损伤、促进细胞内活性氧产生、激活半胱天冬酶蛋白酶、调控凋亡相关基因表达等。目前,有报道 DHA - PL 主要对宫颈癌、肝癌和结肠癌等发挥作用。Hossain 等<sup>[18]</sup>研究发现,3 种人结肠癌细胞系 Caco - 2、HT - 29 和 DLD - 1 的生长受到  $n - 3$  PUFA 的抑制,DHA 和 DHA - PL 能降低 HT - 29 和 Caco - 2 细胞 Bcl - 2 水平。杜磊<sup>[19]</sup>研究发现,海星磷脂中的 EPA 和 DHA 具有良好的抗肿瘤和增强机体免疫功能活性,海星脑苷脂、磷脂复配脂质体可以改善癌症恶病质。王琦<sup>[20]</sup>将 DHA - PC 的 PLA<sub>1</sub> 酶解产物 2 - DHA - LPC 制成脂质体,灌胃于胃荷 S180 肉瘤小鼠体内,发现该脂质体可以较好地抑制 S180 肉瘤小鼠体内肿瘤生长,且对小鼠免疫功能也有一定的调节作用。Yin 等<sup>[21]</sup>研究了 DHA - PC 和 EPA - PC 对人肺癌 95D 细胞的抗肿瘤作用,并探讨了其作用机制。结果表明:DHA - PC 和 EPA - PC 对 95D 细胞的增殖和黏附具有明显的抑制作用;DHA - PC 和 EPA - PC 通过破坏细胞内驱动细胞运动的 F - 肌动蛋白来抑制 95D 细胞的迁移和侵袭,此外其抗肿瘤作用还与 PPAR $\gamma$  的激活有关。杨玉红等<sup>[22]</sup>研究发现,DHA - PC 能够抑制人肝癌 HepG - 2 细胞的增殖( $p < 0.01$ ),使细胞停滞在 G<sub>0</sub>/G<sub>1</sub>期,其中 DHA - PC 低、高剂量组的抑瘤率分别为 33.53% 和 48.35%。Liu 等<sup>[23]</sup>研究了 DHA - PC 和 EPA - PC 对 Lewis 肺癌小鼠的抗肿瘤作用,结果表明,DHA - PC 和 EPA - PC 可通过降低 NF -  $\kappa$ B 介导的抗凋亡因子 Bcl - 2 和 Bcl - XL 来促进癌细胞凋亡,从而抑制肿瘤生长。

### 3.2 改善脂质代谢

代谢综合征是以多种糖脂代谢紊乱为基础的,而糖脂代谢异常与肥胖、脂肪肝、动脉粥样硬化、糖尿病、冠心病等疾病密切相关。多项研究显示,富含 DHA/EPA 的磷脂可以显著改善葡萄糖代谢紊乱和脂质代谢紊乱。马琴等<sup>[24]</sup>研究了 DHA - PC 对正常小鼠脂质代谢的调节作用,结果发现,DHA - PC 可以有效改善小鼠血脂水平,从而预防由高血脂引发的一系列疾病。崔洁等<sup>[25]</sup>利用从鸢乌贼卵中提取的 DHA - PL 对小鼠进行饲喂,结果表明,DHA - PL 能够通过抑制肝脏脂质合成和促进脂质分解,有效调

节肥胖小鼠的脂质代谢。研究发现,DHA-PL可以有效预防高脂肪饮食小鼠的体质量增加、胰岛素抵抗、血脂异常和肝脏脂肪变性,这与全面抑制脂肪酸合成和肝脏胆固醇生物合成有关,而单纯的大豆磷脂没有作用<sup>[26]</sup>。Liu等<sup>[27]</sup>将蛋黄磷脂、大豆磷脂和海洋DHA-PL给予高脂肪饮食诱导的肥胖C57BL/6J小鼠7周,比较其对小鼠肥胖相关代谢紊乱的影响。结果发现,蛋黄磷脂、大豆磷脂和海洋DHA-PL均能显著降低小鼠附睾脂肪组织质量,降低小鼠血压和肝脏TAG水平,但只有DHA-PL能有效降低小鼠肾周脂肪组织质量以及血清葡萄糖、胰岛素、IL-6和TAG水平。Ding等<sup>[28]</sup>研究了DHA-PC和DHA-PS对SAMP8小鼠年龄相关性脂质代谢紊乱的影响,结果发现,富含DHA-PC和DHA-PS的饲料均能显著降低小鼠血清和肝脏的脂质水平,这是因为DHA-PC和DHA-PS可抑制肝脏SREBP-1c介导的脂肪生成,激活PPAR $\alpha$ 介导的肝脏脂肪酸 $\beta$ 氧化,进而降低肝脏脂质水平。非酒精性脂肪性肝病(NAFD)已成为14种疾病死亡的预测因素之一。Chang等<sup>[29]</sup>研究发现,DHA-PL具有一定的抑制肝脏脂肪生成和加速胆固醇外排的作用,对非酒精性脂肪肝具有保护作用。

### 3.3 抗炎

炎症是机体对有害物质产生的一种防御机制,会引起机体不适,是身体试图自愈的迹象,然而炎症持续发展将会导致多种疾病的发生,包括类风湿关节炎和炎症性肠病等。有研究证明,海洋活性脂质具有抗炎作用,特别是富含EPA/DHA-PL的磷虾油,其通过减少炎症因子的释放达到抗炎效果<sup>[30]</sup>。黄玉洁等<sup>[31]</sup>研究发现,从南海鸢乌贼的卵中提取的DHA-PL和从冰岛刺参的体壁中提取的EPA-PL均可有效保护脂多糖所致的急性肝损伤。Che等<sup>[32]</sup>研究发现,DHA-PL通过降低结肠组织中的疾病活度指数(DAI)、防止组织损伤、改善肠道屏障通透性、下调促炎细胞因子、上调抗炎细胞因子等改善葡聚糖硫酸钠诱导的小鼠结肠炎,此外,DHA-PL可以通过调节厚壁菌门和拟杆菌门的相对丰度来调节肠道菌群的组成,从而缓解神经炎症。

### 3.4 增强神经营养活性

DHA在神经细胞中尤为重要,是人类大脑健康发育和健康衰老所必需的<sup>[33]</sup>。在大脑发育期,DHA缺乏可引起神经再生障碍,递质代谢紊乱,学习、视觉、运动等功能障碍。以阿尔茨海默病和帕金森病为代表的神经系统退行性疾病的发生机制非常复杂,其发生、发展与中枢神经系统的炎症反应关系密

切。Wang等<sup>[34]</sup>研究发现,DHA-PC通过抑制 $\beta$ -淀粉样蛋白(A $\beta$ )生成、神经炎症和细胞凋亡,以及改善神经营养因子,达到改善记忆和认知功能障碍的作用,其作用效果强于DHA-EE与蛋黄卵磷脂的复合,表明在缓解与SAMP8小鼠年龄相关的记忆丧失和认知缺陷方面,商业鱼油与不含DHA的PC复合不能替代DHA-PC,这为神经退行性疾病的防治提供了参考。DHA-LPC被认为是DHA从血浆到大脑的主要转运体<sup>[33,35]</sup>,富含DHA和EPA的LPC在大脑发育和神经元细胞生长中发挥重要作用<sup>[36]</sup>。

## 4 结论与展望

近年来,随着人们对DHA-PL研究的不断深入,其医用价值和营养功能逐渐被发掘,研究人员也开始不断优化DHA-PL的制备工艺,改进DHA-PL的检测方法,这对其在食品、医药等行业的应用具有重要意义。但制备工艺方面,酶法制备DHA-PL仍无法实现产业化,急需寻找价廉、高效、能循环使用的酶以满足DHA-PL的大规模生产。DHA-PL的检测技术还需要不断完善,开发更加方便快捷的检测方法是未来的发展方向。DHA-PL在抗癌、改善脂质代谢、抗炎和增强神经营养活性等方面已有显著的研究成果,但还需要在临床方面对其营养特性进一步验证,并进一步研究其在食品补充剂中潜在的应用价值。

### 参考文献:

- [1] FERREIRA I, RAUTER A P, BANDARRA N M. Marine sources of DHA-rich phospholipids with anti-Alzheimer effect[J/OL]. *Mar Drugs*, 2022, 20(11): 662 [2023-08-09]. <https://doi.org/10.3390/md20110662>.
- [2] 王筱迪,高文浩,任皓威,等. 磷脂型DHA的消化、吸收与转运[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(5): 387-399.
- [3] LIU L, BARTKE N, VAN DAELE H, et al. Higher efficacy of dietary DHA provided as a phospholipid than as a triglyceride for brain DHA accretion in neonatal piglets[J]. *J Lipid Res*, 2014, 55(3): 531-539.
- [4] 卢英华,舒丽雯,凌雪萍,等. 一种酶促酸解制备磷脂型DHA的方法: CN115287309A[P]. 2022-11-04.
- [5] CHEN W, GUO W, GAO F, et al. Phospholipase A<sub>1</sub>-catalysed synthesis of docosahexaenoic acid-enriched phosphatidylcholine in reverse micelles system[J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2017, 182(3): 1037-1052.
- [6] 孙兆敏,李金章,丛海花,等. 酶法制备n-3多不饱和脂肪酸型磷脂的工艺[J]. *中国油脂*, 2010, 35(4): 33-36.
- [7] LI X, CHEN J F, YANG B, et al. Production of structured phosphatidylcholine with high content of DHA/EPA by

- immobilized phospholipase A<sub>1</sub> - catalyzed transesterification [J]. *Int J Mol Sci*, 2014, 15(9): 15244 - 15258.
- [8] LI D, QIN X, WANG W, et al. Synthesis of DHA/EPA - rich phosphatidylcholine by immobilized phospholipase A<sub>1</sub>: Effect of water addition and vacuum condition [J]. *Bioprocess Biosyst Eng*, 2016, 39(8): 1305 - 1314.
- [9] 刘力. 酶催化合成二十二碳六烯酸磷脂酰胆碱 (DHA - PC) 及磷脂酰甘油 (DHA - PG) 研究 [D]. 西安: 西北大学, 2021.
- [10] ZHANG T, LI B, WANG Z, et al. Green biosynthesis of rare DHA - phospholipids by lipase - catalyzed transesterification with edible algal oil in solvent - free system and catalytic mechanism study [J/OL]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023, 11: 1158348 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1158348>.
- [11] 李珍珍, 许飞跃, 韩玉谦, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 体系中磷脂酶 A<sub>2</sub> 催化合成高 DHA 含量 DHA - PC 的研究 [J]. *食品工业科技*, 2017, 38(18): 85 - 89, 93.
- [12] TANAKA T, ISEZAKI T, NAKANO H, et al. Synthesis of phospholipids containing polyunsaturated fatty acids by phospholipase A<sub>2</sub> - mediated esterification with food - compatible reagents [J]. *J Oleo Sci*, 2010, 59(7): 375 - 380.
- [13] AWANO S, MIYAMOTO K, HOSOKAWA M, et al. Production of docosahexaenoic acid bounded phospholipids via phospholipase A<sub>2</sub> mediated bioconversion [J]. *Fisheries Sci*, 2006, 72(4): 909 - 911.
- [14] 苏婷, 周德庆, 朱兰兰, 等. 南极磷虾油中磷脂检测方法的比较 [J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(19): 124 - 130.
- [15] SHU L, ZHENG X, QI S, et al. Transesterification of phosphatidylcholine with DHA - rich algal oil using immobilized *Candida antarctica* lipase B to produce DHA - phosphatidylcholine [J/OL]. *Enzyme Microb Technol*, 2023, 169: 110266 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2023.110266>.
- [16] ZHANG M, WANG P, JIN D, et al. Chain - locked precursor ion scanning based HPLC - MS/MS for in - depth molecular analysis of lipase - catalyzed transesterification of structured phospholipids containing  $\omega$  - 3 fatty acyl chains [J/OL]. *Food Chem*, 2023, 399: 133982 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133982>.
- [17] YU X N, WANG Q C, LU W B, et al. Fast and specific screening of EPA/DHA - enriched phospholipids in fish oil extracted from different species by HILIC - MS [J]. *J Agric Food Chem*, 2021, 69(28): 7997 - 8007.
- [18] HOSSAIN Z, HOSOKAWA M, TAKAHASHI K. Growth inhibition and induction of apoptosis of colon cancer cell lines by applying marine phospholipid [J]. *Nutr Cancer*, 2009, 61(1): 123 - 130.
- [19] 杜磊. 海参和海星脑苷脂抗肿瘤及改善癌症恶病质作用的研究 [D]. 山东 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [20] 王琦. 海产动物来源 n - 3 PUFA 磷脂的提取及生物活性研究 [D]. 山东 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [21] YIN H, LIU Y, YUE H, et al. DHA - and EPA - enriched phosphatidylcholine suppress human lung carcinoma 95D cells metastasis via activating the peroxisome proliferator - activated receptor  $\gamma$  [J/OL]. *Nutrients*, 2022, 14(21): 4675 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.3390/nu14214675>.
- [22] 杨玉红, 王静凤, 龙腾腾, 等. 磷脂型 DHA 对肿瘤细胞凋亡的影响 [J]. *中国药理学通报*, 2011, 27(2): 178 - 182.
- [23] LIU Y, TIAN Y, CAI W, et al. DHA/EPA - enriched phosphatidylcholine suppresses tumor growth and metastasis via activating peroxisome proliferator - activated receptor  $\gamma$  in Lewis lung cancer mice [J]. *J Agric Food Chem*, 2021, 69(2): 676 - 685.
- [24] 马琴, 王静凤, 王玉明, 等. 二十二碳六烯酸 - 磷脂对正常小鼠脂质代谢的影响 [J]. *中国海洋药物*, 2008, 27(6): 31 - 34.
- [25] 崔洁, 刘小芳, 董喆, 等. DHA - 磷脂对肥胖小鼠脂质代谢的影响 [J]. *中国油脂*, 2014, 39(1): 32 - 36.
- [26] ZHANG Y, WU G, ZHANG Y, et al. Advances in exogenous docosahexaenoic acid - containing phospholipids: Sources, positional isomerism, biological activities, and advantages [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2020, 19(4): 1420 - 1448.
- [27] LIU X, CUI J, LENG K, et al. Docosahexaenoic acid - enriched phospholipids exhibit superior effects on obesity - related metabolic disorders to egg yolk phospholipids and soybean phospholipids in mice [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2016, 118(11): 1712 - 1721.
- [28] DING L, ZHANG T, CHE H, et al. DHA - enriched phosphatidylcholine and DHA - enriched phosphatidylserine improve age - related lipid metabolic disorder through different metabolism in the senescence - accelerated mouse [J/OL]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2018, 120(6): 1700490 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201700490>.
- [29] CHANG M, ZHANG T, HAN X, et al. Comparative analysis of EPA/DHA - PL forage and liposomes in orotic acid - induced nonalcoholic fatty liver rats and their related mechanisms [J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(6): 1408 - 1418.

- camellia oil by using excitation - emission matrix fluorescence spectroscopy combined with chemometrics [J]. *Food Chem*, 2019, 293: 348 - 357.
- [3] DU Q, ZHU M, SHI T, et al. Adulteration detection of corn oil, rapeseed oil and sunflower oil in camellia oil by in situ diffuse reflectance near - infrared spectroscopy and chemometrics[J/OL]. *Food Contr*, 2021, 121: 107577 [2023 - 07 - 12]. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107577>.
- [4] 庞妍妍. 基于双积分球技术的掺伪及劣变植物油检测方法研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2021.
- [5] ZHU D, LU W, ZENG S, et al. Effect of light losses of sample between two integrating spheres on optical properties estimation[J/OL]. *J Biomed Opt*, 2007, 12(6): 064004 [2023 - 07 - 12]. <https://doi.org/10.1117/1.2815691>.
- [6] BEEK J F, BLOKLAND P, POSTHUMUS P, et al. *In vitro* double - integrating - sphere optical properties of tissues between 630 and 1 064 nm[J]. *Phys Med Biol*, 1997, 42 (11): 2255 - 2261.
- [7] PICKERING J W, PRAHL S A, VAN WIERINGEN N, et al. Double - integrating - sphere system for measuring the optical properties of tissue[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(4): 399 - 410.
- [8] PICKERING J W, MOES C J M, STERENBORG H J C M, et al. Two integrating spheres with an intervening scattering sample[J]. *J Opt Soc Am A*, 1992, 9(4): 621 - 631.
- [9] SARDAR D K, SALINAS F S, PEREZ J J, et al. Optical characterization of bovine retinal tissues [J]. *J Biomed Opt*, 2004, 9(3): 624 - 631.
- [10] SARDAR D K, MAYO M L, GLICKMAN R D. Optical characterization of melanin[J]. *J Biomed Opt*, 2001, 6 (4): 404 - 411.
- [11] 庞妍妍, 陈敏, 王蓓, 等. 基于吸收与散射特性的掺伪山茶油检测研究[J]. *粮食科技与经济*, 2020, 45 (11): 90 - 94, 130.
- [12] PRAHL S A, VAN GEMERT M J C, WELCH A J. Determining the optical properties of turbid media by using the adding - doubling method[J]. *Appl Opt*, 1993, 32 (4): 559 - 568.
- [13] 于智海. 基于近红外光谱的南疆红枣水分动态无损检测模型研究[D]. 新疆阿拉尔: 塔里木大学, 2022.
- [14] WANG L, JACQUES S L, ZHENG L. MCML: Monte Carlo modeling of light transport in multi - layered tissues[J]. *Comp Meth Progr Bio*, 1995, 47(2): 131 - 146.
- [15] CORTES C, VAPNIK V. Support - vector networks[J]. *Mach Learn*, 1995, 20(3): 273 - 297.
- [16] GAO Z, FANG S C, LUO J, et al. Akernel - free double well potential support vector machine with applications [J]. *Eur J Oper Res*, 2021, 290(1): 248 - 262.
- [17] DING S, ZHANG N, ZHANG X, et al. Twin support vector machine: Theory, algorithm and applications[J]. *Neural Comput Appl*, 2017, 28(11): 3119 - 3130.
- [18] LIU Y, DING H, HUANG Z, et al. Distributed and robust support vector machine[J]. *Int J Comput Geom Appl*, 2020, 30: 213 - 233.
- [19] BREIMAN L. Random forests[J]. *Mach Learn*, 2001, 45: 5 - 32.
- 
- (上接第 75 页)
- [30] ZHANG T T, XU J, WANG Y M, et al. Health benefits of dietary marine DHA/EPA - enriched glycerophospholipids [J/OL]. *Prog Lipid Res*, 2019, 75: 100997 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2019.100997>.
- [31] 黄玉洁, 郝仪铭, 周梦晴, 等. 磷脂型二十二碳六烯酸和二十碳五烯酸对脂多糖所致小鼠急性肝损伤的保护作用及机制[J]. *食品科学*, 2022, 43(19): 151 - 157.
- [32] CHE H, LI H, SONG L, et al. Orally administered DHA - enriched phospholipids and DHA - enriched triglyceride relieve oxidative stress, improve intestinal barrier, modulate inflammatory cytokine and gut microbiota, and meliorate inflammatory responses in the brain in dextran sodium sulfate induced colitis in mice[J/OL]. *Mol Nutr Food Res*, 2021, 65(15): e2000986 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.1002/mnfr.202000986>.
- [33] VAN A L, BERNOUD - HUBAC N, LAGARDE M. Esterification of docosahexaenoic acid enhances its transport to the brain and its potential therapeutic use in brain diseases[J/OL]. *Nutrients*, 2022, 14(21): 4550 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.3390/nu14214550>.
- [34] WANG C C, GUO Y, ZHOU M M, et al. Comparative studies of DHA - enriched phosphatidylcholine and recombination of DHA - ethyl ester with egg phosphatidylcholine on ameliorating memory and cognitive deficiency in SAMP8 mice [J]. *Food Funct*, 2019, 10 (2): 938 - 950.
- [35] YALAGALA P C R, SUGASINI D, ZALDUA S B, et al. Lipase treatment of dietary krill oil, but not fish oil, enables enrichment of brain eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid[J/OL]. *Mol Nutr Food Res*, 2020, 64(12): e2000059 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.1002/mnfr.202000059>.
- [36] AHMED M K, HACHEM M, AHMED F, et al. Marine fish - derived lysophosphatidylcholine: Properties, extraction, quantification, and brain health application[J/OL]. *Molecules*, 2023, 28(7): 3088 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.3390/molecules28073088>.