

磷脂结构、膳食来源及营养学研究进展

冉世前¹, 朱云芬², 徐淑玲¹, 陈潇飞², 谢亚¹, 吕昕¹, 向极钎², 魏芳¹, 陈洪¹

(1. 中国农业科学院油料作物研究所 油料油脂加工技术国家地方联合工程实验室, 农业农村部油料加工重点实验室, 湖北省油料脂质化学与营养重点实验室, 武汉 430062; 2. 恩施土家族苗族自治州农科院 湖北省富硒产业技术研究院, 湖北 恩施 445002)

摘要:磷脂是一类复合极性脂质, 拥有独特的生理活性, 对维持机体正常生命活动以及营养健康起着至关重要的作用。为了对膳食磷脂的营养学研究以及相关代谢疾病的预防提供参考, 对磷脂的结构组成与生理活性、膳食来源及其营养学特性进行了综述。根据分子结构, 磷脂可以分为不同的类型, 也具有不同的生理功能以及营养特性; 此外, 磷脂的膳食来源丰富, 但不同膳食来源的磷脂组成及含量存在差异。不同类型磷脂在改善记忆、提高免疫力以及预防心脑血管等代谢性疾病方面都发挥着很大的作用。

关键词:磷脂; 结构性质; 膳食来源; 营养特性

中图分类号: TQ645.9; R151 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2022)01-0068-08

Progress on structure, dietary source and nutrition of phospholipid

RAN Shiqian¹, ZHU Yunfen², XU Shuling¹, CHEN Xiaofei², XIE Ya¹,
LYU Xin¹, XIANG Jixuan², WEI Fang¹, CHEN Hong¹

(1. Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Key Laboratory of Oilseeds Processing of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Oil Crops and Lipids Process Technology National & Local Joint Engineering Laboratory, Oil Crops Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China; 2. Hubei Selenium-Enriched Industry Technology Research Institute, Enshi Autonomous Prefecture Academy of Agricultural Sciences, Enshi 445002, Hubei, China)

Abstract: Phospholipids are a kind of complex polar lipid, which has unique biological activity and play an important role in maintaining normal life activity and health. The structure composition, physiological activity, dietary sources and nutritional characteristics of phospholipids were reviewed, so as to provide reference for the nutritional research of dietary phospholipids and the prevention of related metabolic diseases. According to the molecular structure, phospholipids can be divided into different types, each with different physiological activities and nutritional characteristics. In addition, the dietary sources of phospholipids are abundant, but the composition and content of phospholipids from different dietary sources are also different. Different phospholipid also plays a vital role in improving memory and immunity, and preventing metabolic diseases such as cardiovascular and cerebrovascular diseases.

Key words: phospholipid; structural property; dietary source; nutritional characteristics

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571926); 湖北省技术创新项目(2018AHB014); 武汉市科技计划项目(2019020701011468); 中国农业科学院创新工程项目(CAAS-ASTIP-2013-OCRI)

作者简介: 冉世前(1995), 男, 硕士研究生, 主要从事脂质化学与营养研究(E-mail)306147154@qq.com。

通信作者: 陈洪, 研究员, 博士(E-mail)chenhong@oilcrops.cn。

脂质(Lipid)也被称为脂类或类脂, 是难溶于水易溶于非极性溶剂的生物有机分子, 对大多数脂质而言, 其化学本质是脂肪酸和醇所形成的酯类及其衍生物。脂质对维持机体生命活动具有诸多生理功能, 包括细胞膜结构组成、能量储存、信号传导以及各种细胞之间的代谢调节等。脂质化合物, 如生活

中的食用油和脂肪,它们能够为人体提供必需营养物质、代谢能量和细胞调节因子;但脂质的过量摄入也会引起脂质代谢异常,体内脂质代谢异常与各种疾病密切相关,如癌症、阿尔茨海默病、炎症、神经退行性疾病和心血管疾病等^[1-2]。根据分子结构不同,Lipid mAPS(Lipid mAPS <http://www.lipidmaps.org>)把脂质化合物分为脂肪酰类(fatty acyls,FA)、甘油脂类(glycerolipids, GL)、甘油磷脂类(glycerophospholipids, GP)、鞘脂类(sphingolipids, SP)、固醇脂类(sterol lipids, ST)、孕烯醇酮脂类(prenol lipids, PR)、糖脂类(saccharolipids, SL)和聚酮类(polyketides, PK)。

磷脂是指含有磷酸基团的脂质化合物,是脂质的重要组成部分,拥有独特的生物活性,对维持机体正常生命活动有至关重要的作用。磷脂不仅是所有生物细胞膜的重要结构组成成分,参与脂质的消化、吸收和运输过程,同时也作为生命活动的基础物质之一,是生命体新陈代谢和信号传递的重要物质^[3]。磷脂可以通过调节人体的内分泌或神经系统而起到调节人体代谢的作用,其与人体诸多代谢性疾病密切相关,甚至被认为是某些疾病的潜在生物标志物^[4]。因此,对膳食磷脂的营养特性进行深层次研究是很有必要的。

脂质组学是研究生物体脂质组成、脂质代谢以及脂质相互作用的科学^[5]。对于食品科学研究,脂质组学主要用于不同生物资源的脂类成分筛选、食品安全和质量保证、脂质种类的生物功能和营养水平的评价,以及对未知功能性脂类的探索^[6]。磷脂组学是脂质组学的一个分支,主要是对生物体中的磷脂分子进行全方位的定性与定量分析研究^[4],它能够反映磷脂在生物体内的整体变化过程,通过研究生物体中磷脂代谢的差异,从而筛选出潜在的生物标志物,发现疾病机制,最终对代谢性疾病做出针对性的诊断与治疗^[4]。

当今,随着人们生活质量的提高,与脂质相关的代谢性疾病也逐年递增,人们对于营养、保健方面的要求也随之提高。膳食磷脂的营养特性与人体神经系统、免疫系统、代谢调节等都存在着密切联系,因此在医药和保健等领域都有很高的应用价值。但是由于不同类型的结构骨架、连接的磷酸基团以及不同位置上连接的脂肪酸类型和不饱和度等之间的差异,导致了磷脂结构的复杂多样性。不同的结构组成决定不同类型磷脂之间的功能差异,从而也使不同类型磷脂在生理活性以及营养特性方面发挥不同作用。因此,本文对磷脂的结构组成及生理活性、膳

食来源及营养学特性进行了综述,以期对膳食磷脂的营养学研究以及相关的代谢性疾病的预防提供参考。

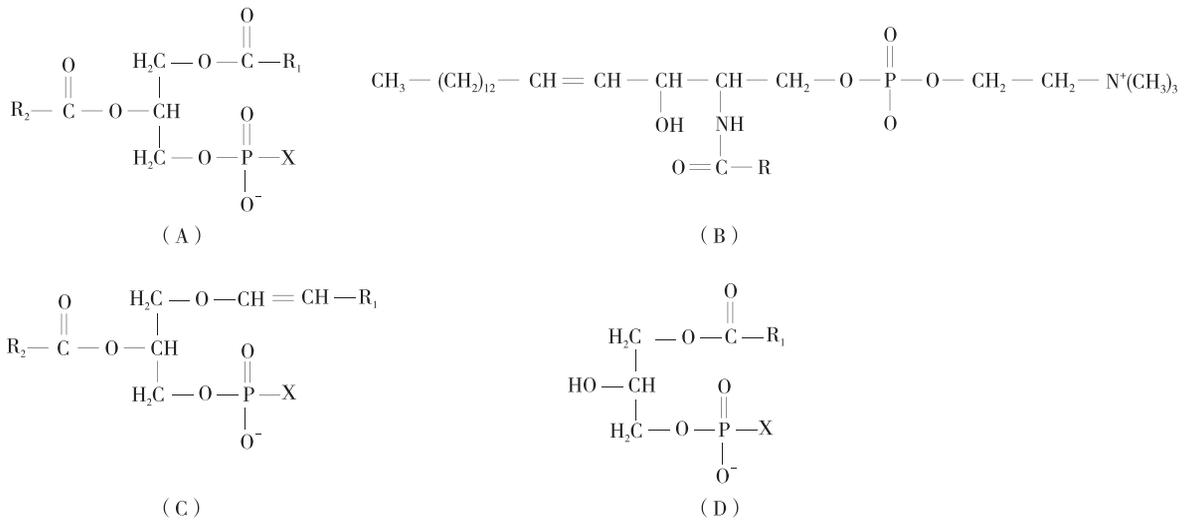
1 磷脂结构组成及生理活性

根据结构骨架的不同,磷脂可以分为甘油磷脂和鞘磷脂(SM)^[7]。甘油磷脂是以三酰甘油为骨架,在三酰甘油 sn-1 和 sn-2 位的羟基与不同的脂肪酸酯化,而磷酸根头部基团则是连接在甘油 sn-3 位(图 1A)。SM 以鞘氨醇为骨架,直接与磷酸盐基团连接,如神经鞘磷脂(图 1B)。

在甘油磷脂中,由于 sn-3 位上磷酸盐所连接的碱基基团(X)不同,可将磷脂分为多个种类,主要包括磷脂酰胆碱(PC)、磷脂酰乙醇胺(PE)、磷脂酰肌醇(PI)、磷脂酰丝氨酸(PS)、磷脂酰甘油(PG)和磷脂酸(PA)。此外,根据某一位置连接方式或独特的结构特征,磷脂可分几种亚类,如缩醛磷脂(PLAS)(图 1C)和溶血磷脂(图 1D)。缩醛磷脂是在甘油骨架的 sn-1 位上连有一个乙烯基醚的特征结构,并且 sn-2 位上通常连有多不饱和脂肪酸(PUFA)^[8],如常见的乙醇胺缩醛磷脂(pPE)和胆碱缩醛磷脂(pPC)等。溶血磷脂是磷脂分子被水解去掉一个酰基链^[9],按照结构骨架的不同,主要有溶血甘油磷脂(lysoglycerophospholipids)和溶血鞘磷脂(lysosphingolipids),如溶血磷脂酰胆碱(LPC)、溶血磷脂酰乙醇胺(LPE)等。

每类磷脂在结构、性质、功能上都有差异。磷脂中的脂肪酰基链的组成以及连接的磷酸基团差异,都对其生理功能有很大的影响^[10],如 PC 能够提高啮齿动物的学习记忆能力,以及对肝病治疗也有一定的效果,并且可以通过改善其长链 n-3 多不饱和脂肪酸的组成起到抗衰老和抗氧化的作用^[11-12]。也有研究通过小鼠实验证明 PE 以及 PI 能够起到降低人体胆固醇的作用^[7,13]。PS 作为大脑中主要磷脂之一,对大脑中枢神经系统起到很重要的保护作用,且能通过膳食补充来改善认知功能障碍综合征(CDS)或阿尔茨海默病^[14]。而 SM 能够参与炎症反应,同时对胆固醇具有很高的亲和力,能减少肠道对胆固醇的吸收^[15-16]。PLAS 也被证明在多种生物功能中发挥关键作用,如在细胞膜组成、抗氧化、脂质代谢等方面都有涉及,在临床研究中也发现其与帕金森病和唐氏综合征^[17]、阿尔茨海默病^[18]、酒精性脂肪肝(NASH)^[8]、哮喘^[19]等疾病有密切的联系。溶血磷脂通常可以作为一类信号分子,如溶血磷脂酸(LPA)和鞘氨醇-1-磷酸(SIP)是近年来研究最广泛的信号溶血磷脂,LPA 对于多种细胞的增

殖、迁移、免疫调节等都具有促进作用,溶血磷脂酰胆碱(LPC)也被作为神经元膜生物合成的重要来源^[9]。



注: A.甘油磷脂; B.鞘磷脂; C.缩醛磷脂; D.溶血磷脂。

图1 常见磷脂及其亚类的分子结构

2 磷脂的膳食来源

磷脂膳食来源广泛,主要集中在植物种子和动物肉、蛋、奶中,并且在同一机体不同组织中磷脂分布及含量也有差异。按照来源不同,膳食磷脂可以分为植物型磷脂、动物型磷脂以及其他来源磷脂(如藻类磷脂、结构磷脂等)^[20]。表1总结了膳食中磷脂的主要来源和各类磷脂的分布情况。

表1 不同膳食来源的磷脂组分与含量

来源	磷脂组分及含量/%						参考文献
	PC	PE	PS	PI	PA	SM	
大豆	20~22	16~22	-	13~16	5~10	-	[21]
葵花籽	20~26	4~10	-	15~19	2~5	-	[21]
油菜籽	23~31	9~15	-	15~18	5~10	-	[21]
鸡蛋	77	16	-	-	-	2.4	[22]
鸭蛋	75.4	16.0	-	-	-	2.4	[22]
鹅蛋	74.0	18.8	-	-	-	3.3	[22]
火鸡蛋	81.5	12.9	-	-	-	2.1	[22]
鹌鹑蛋	80.7	12.0	-	-	-	1.9	[22]
牛乳	29.6	30.3	10.4	3.7	-	22.6	[23]
骆驼乳	19.9	31.8	12.7	5.1	0.8	29.9	[23]
羊乳	26.3	29.2	7.7	5.6	-	23.4	[24]
马乳	22.2	19.7	7.5	7.5	2.3	23.1	[23]
人乳	24.1	16.6	4.4	4.4	-	31.3	[23]
南极磷虾油	80.4	14.9	-	0.7	-	-	[25]
红藻类	61.6~77.8	<1	-	-	2.2~6.4	-	[26]

2.1 植物来源

常见的植物种子,如大豆、葵花籽、油菜籽、亚麻籽、玉米、棉籽等都含有丰富的磷脂。大豆磷脂是目前市场上植物型磷脂的主要来源,大豆毛油中磷脂

占总脂质的1.1%~3.5%^[27],大豆磷脂主要含20%~22% PC、16%~22% PE、13%~16% PI^[21],其脂肪酸组成主要是亚油酸(C18:2 55%)、油酸(C18:1 17%)和棕榈酸(C16:0 16%)^[28]。相比于动物型磷脂,大豆磷脂不含胆固醇,因此在市场上吸引了很多消费者的青睐。但是,随着转基因技术的发展,转基因大豆在市场上逐渐占据主导,限制了大豆磷脂在市场上进一步拓展^[29]。葵花籽磷脂在磷脂及脂肪酸组成与含量上(20%~26% PC、4%~10% PE、15%~19% PI; C18:2 63%、C18:1 18%、C16:0 11%)^[21,28]与大豆磷脂相似,并且很少涉及转基因方面的问题,被认为是大豆磷脂理想的替代品。此外,葵花籽磷脂中富含对健康有益的不饱和脂肪酸,如油酸和亚油酸等,因此葵花籽磷脂被认为是高质量的膳食磷脂补充来源。相对于大豆磷脂和葵花籽磷脂,油菜籽磷脂中PC的含量更高,Jenkins等^[30]将其归因于磷脂酶D(PLD)的存在,因为PLD对于PC有很高的活性,从而使部分PA与胆碱结合,转化为PC,使得PC的含量提高,但PLD对其他类型的磷脂活性较低。

2.2 动物来源

相对于植物来源的磷脂(含量0.3%~2.5%),动物来源的磷脂含量更为丰富(2%~14%)^[29]。尤其是禽类蛋黄,其含有丰富的磷脂,是动物型磷脂的主要来源。蛋黄磷脂含量约为总脂质的33%^[31],鸡蛋黄磷脂中PC的含量高达77%,其次是PE(16%),棕榈酸(C16:0)、硬脂酸(C18:0)、油酸(C18:1)、亚油酸(C18:2)和花生四烯酸(C20:4)为其主要的脂肪酸,合计约占92%,而且在蛋黄磷脂中含有一定

量的磷脂型 DHA (C22:6) 等功能性脂肪酸^[22]。此外, 蛋黄磷脂相对于大豆磷脂含有更加丰富的饱和脂肪酸, 这也使蛋黄磷脂的氧化稳定性更高^[29]。

动物乳中也含有一定量的磷脂。动物乳中的磷脂也被称为乳磷脂, 乳磷脂的含量通常占总脂肪含量的 1% ~ 2%^[32]。乳磷脂主要存在于乳脂肪球膜 (MFGM) 上, 占乳脂总磷脂含量的 60% ~ 70%^[33]。不同哺乳动物乳中的磷脂组成大体相似, 但也存在一定的差异, 而不同种类磷脂的含量存在显著的差异, 导致不同动物来源的乳在营养价值方面的差异。这种差异可能是受到品种、生活方式、气候、提取及分析过程的影响^[34]。研究发现, PC、PE、SM 是动物乳中含量最丰富的磷脂, 而 PS、PI 的含量相对较低^[23-24]; 在乳磷脂中, C14:0、C16:0、C18:0、C18:1 和 C18:2 是其主要的脂肪酸组成^[35]。

除禽蛋以及动物乳之外, 许多动物型磷脂还来自海洋动物。海洋磷脂是指来源于海洋动物的磷脂, 其 sn-2 位上的脂肪酸主要由多不饱和脂肪酸组成, 尤其是 DHA、EPA 等长链多不饱和脂肪酸, 具有促进婴儿大脑发育和预防多种疾病等功能^[36]。也有研究证明以磷脂型提供的 DHA (PLs-DHA) 的生物吸收率要显著高于甘油酯型 (TAGs-DHA) 和乙酯型 (EE-DHA)^[37-38], 因为磷脂型的 $n-3$ PUFA 能有效穿过血脑屏障, 且富含 EPA/DHA 的磷脂也更容易进入细胞膜中, 从而促进肠壁的吸收。海洋磷脂主要来自深海鱼油 (如鲑鱼、鲱鱼、鲭鱼等)、南极磷虾油以及相关的鱼虾肉类产品中。鱼类中的磷脂主要是 PC, 占总磷脂含量的 30% ~ 77%, 其次是 PE, 占 12% ~ 40%, PI、PS 和 SM 也在鱼的肌肉中存在, 但含量较少^[37]。南极磷虾油磷脂中 PC、PE、PI 含量分别为 80.4%、14.9%、0.7%, PC 中主要含有 C18:1 和 C20:4, $n-3$ PUFA 主要存在于 PE 中, 且主要是 EPA 和 DHA, 含量分别为 26.3% 和 10.8%^[25]。

2.3 其他来源

除上述常见的动、植物型磷脂来源外, 也存在少部分其他来源的磷脂, 如藻类磷脂以及结构磷脂等。

藻类是许多复杂脂质的主要来源, 在食品、化妆品和制药行业等都有很好的应用潜力。藻类脂质含量通常在 0.09% ~ 2.35%, 其中磷脂占总脂质的 3.08% ~ 8.8%^[39]。Dembitsky 等^[26]对 14 种红藻类磷脂进行了研究, 发现主要的磷脂是 PC (61.6% ~ 77.8%), 而 PE 的含量 (<1%) 很少。Baky 等^[39]对 5 种大型藻类磷脂进行了分析, 发现主要磷脂是 PC、PE, 主要脂肪酸组成有 C16:0、C20:3、C17:0、

C22:5、C18:1, 而 C14:0、C18:0、C22:4 含量较少。总体而言, 藻类磷脂的含量因物种类别、气候和地理等条件不同而存在差异。

目前, 人们已经从大豆和蛋黄中分离提取出相应的磷脂, 并应用于食品和医药等行业。但市场需求增加, 使提取天然磷脂已不能满足需求, 结构磷脂应运而生^[40]。结构磷脂是指通过特定的改性技术对磷脂进行结构及位置的改性, 使其中的脂肪酸组成及位置分布被某些功能性脂肪酸 (DHA、EPA、ARA 等) 取代, 从而使磷脂分子具有特殊的营养特性与价值^[41]。酶法合成是利用现代酶技术对磷脂结构组成与位置进行改性, 最终得到特异性的功能性磷脂。与有机合成比较, 酶法合成具有反应条件温和、高度专一性等特点, 在磷脂合成领域应用更加广泛^[42]。王湘等^[43]以脂肪酶 Lipozyme RM IM 催化花生四烯酸乙酯与大豆粉末磷脂进行酯交换反应, 制备富含花生四烯酸 (ARA) 的结构磷脂, 在最优条件下, 富含 ARA 的结构磷脂产率为 13.26%, ARA 的结合率达 15.42%。

3 磷脂营养学特性

近年来, 大量的研究表明磷脂在生物营养特性方面有很高的营养价值, 从而引起了该领域研究者的极大兴趣, 比如磷脂可以降低人体胆固醇水平, 加快体内的脂质代谢, 并且在预防阿尔茨海默病、高血压、高血脂、心脑血管疾病以及癌症等代谢性疾病方面有很好的效果^[39]。以磷脂形式存在的功能性脂肪酸同时具有磷脂和功能性脂肪酸的生理作用, 且其结构更加稳定, 抗氧化性更强, 更容易被机体吸收。Yalagala 等^[38]研究证实, 在婴幼儿大脑中, 以磷脂形式提供的脂肪酸在人体中的转化速率比甘油酯型的高效许多。因此, 对磷脂的营养学特性进行更深层次探究以及功能性磷脂产品的开发与创制尤为重要。磷脂的营养学特性主要表现在以下几个方面。

3.1 降低血脂、胆固醇水平, 预防脂肪肝和心脑血管疾病等

磷脂的脂肪酸组成通常有活性较高的亚油酸和亚麻酸等脂肪酸, 它们作为细胞膜结构的主要组成成分, 参与人体内脂质吸收、运输以及代谢过程, 从而调节脂质的吸收与利用, 能够阻止血脂和胆固醇在血管壁的沉积, 同时清除血管壁沉积物, 促进粥样硬化斑的消散, 防止胆固醇引起的血管内膜损伤, 从而起到预防心脑血管疾病的作用^[44-45]。

Norris 等^[46]研究了 SM 补充剂对喂食高脂肪饮食诱导的 C57BL/6J 小鼠的脂质代谢的影响, 结果表明, 在喂食 SM 补充剂后, 小鼠体内的血脂和肝脏

甘油三酯水平有所降低。Yang 等^[47]评估了蛋黄磷脂对人结肠癌细胞(Caco-2 细胞)胆固醇吸收和转运的影响,最终得出蛋黄鞘磷脂和卵磷脂可以显著降低与胆固醇吸收相关的蛋白质的表达,剂量依赖性地抑制胆固醇在 Caco-2 细胞中的摄取和转运,从而调节胆固醇水平。温江涛^[48]结合中医研究的启发探讨多烯磷脂酰胆碱结合苓桂术甘汤用于非酒精性脂肪肝(NAFLD)的临床疗效,结果显示,该方案对 NAFLD 的临床疗效显著,能够有效改善人体血脂水平以及提高肝功能。

3.2 促进大脑、神经系统的发育,预防神经性疾病

磷脂本身就是神经细胞膜的主要结构组成成分,它对于人体大脑神经的生长发育至关重要。大脑磷脂中,PC 的含量最丰富,占磷脂总量的 17%~20%^[49],PC 和 SM 是乙酰胆碱最基本的合成源,乙酰胆碱是人体大脑神经中重要的信号传递物质,负责大脑神经元之间的联络与传导^[50],乙酰胆碱的增加可使神经细胞信息传递速度加快,从而改善记忆。安红^[51]的研究也表明卵磷脂能够提高大脑中乙酰胆碱的浓度。而 PE 能够为婴儿提供 ARA、DHA、EPA 等多不饱和脂肪酸,有效提高婴儿的大脑和视力发育^[52]。

陈頔等^[53]研究表明,PS 复合胶囊对于改善小鼠以及人体学习记忆功能具有很好的辅助作用。唐勇等^[54]在探究强化 PS 纯牛奶对改善人体记忆力的研究中发现,在牛奶中按 0.08% 的比例添加 PS(纯度为 50%)原料,高中生在饮用该奶品之后,其记忆力得到了显著的提高。苏玉芳等^[55]研究了大豆 PC 对小鼠记忆力的影响,结果显示,添加 PC 的奶粉可以改善小鼠的记忆。Tanaka 等^[56]针对性研究了 SM 对早产婴儿的精神、活动和行为发育的作用,证明了采用 SM 强化乳进行干预,能够对早产儿的神经行为起到积极有效的作用。此外,磷脂还与全身炎症和神经退行性疾病的发病机制密切相关。Tan 等^[57]研究证实了 PC 膳食补充剂可改善大脑认知记忆功能、突触功能以及肠道微生物群和代谢物结构,得出 PC 补充剂可以作为一种预防全身炎症的营养策略。

3.3 改善膜功能,调节体内激素代谢,预防抑郁症等心理疾病

磷脂两性分子结构使其具有很好的乳化功能,人体补充卵磷脂可以修补被损伤的细胞膜,增加细胞膜脂肪酸的不饱和度,改善膜功能,使其软化和年轻化^[58]。另外,膳食功能性磷脂在提供营养物质的同时,也能够促进脑细胞的活性,调节体内激素代

谢,使机体处于一个健康的平衡状态。

崔洁等^[59]研究了磷脂型 DHA 对肥胖小鼠脂质代谢的调节作用与机制,证实磷脂型 DHA 能够通过抑制肝脏脂质合成、促进脂质分解,从而起到良好的减肥作用。Koutoku 等^[60]根据小鸡的群居性特性,在被隔离后会由于紧张出现发声和自发性活动的行为,通过注射 PS 来探究其在缓解压抑方面的作用,结果表明,与空白组相比,注射 PS 的试验组小鸡的发声次数和自发性活动的次数都得到了降低,因此推测 PS 对紧张压抑的状态有一定的改善作用。Maggioni 等^[61]以女抑郁症患者为研究对象,血浆中去甲肾上腺素和 5-羟色胺的变化为监测指标,探究了服用 PS 对于改善人体抑郁症的影响,结果发现,与空白组相比,服用 PS 后的患者体内两类单胺类指标浓度呈上升的趋势,抑郁度降低了 70%,而空白组的患者相关症状并没有得到改善。

3.4 介导病毒膜融合过程,调节及控制病毒感染,提高免疫力

以脂质为靶点阻断病毒融合,是治疗病毒感染,提高免疫的一个新策略。当体外病毒入侵宿主细胞时,首先要作用于细胞受体,与细胞膜融合将其遗传物质传递到细胞内;而细胞的膜结构和脂质组成是炎症信号通路的调节组成部分。磷脂在免疫学中可以作为抗原载体,含有 B 细胞和 T 细胞抗原决定部位的蛋白质结合到一个分子上,从而提高抗体效价^[62];不同的病毒需要特定的磷脂成分才能形成最适合其复制的细胞器,从而协助病毒感染细胞,如 PC 是免疫细胞的必需膜磷脂,同时也是一种病毒抑制剂,可以抑制由多种病毒融合肽介导的合胞体的形成,进而阻碍病毒融合肽与宿主细胞的膜融合作用^[63];PG 及其相关复合物也是炎症反应的重要介质及重要的免疫调节物^[64]。

张慧杰等^[63]系统论述了磷脂及相关调节酶在冠状病毒感染中的作用,提出脂质代谢途径可能是治疗冠状病毒感染的一个有价值的靶点。马琴等^[65]探讨磷脂型 DHA(DHA-PLs)的抗肿瘤和免疫调节作用,结果证明 DHA-PLs 能全面调节机体的特异性和非特异性免疫功能,抑制肿瘤细胞的生长,并且认为机体的免疫力和抗肿瘤作用的提高主要是通过磷脂和 DHA 两种活性物质来实现的,克服了 DHA 单独存在时易被氧化的缺点。

4 结束语

磷脂特有的生理活性以及营养特性,使得磷脂相关的膳食产品具有广阔的应用前景。随着人们生活品质的提升以及生产技术的快速发展,人们对膳

食磷脂产品的需求也与日俱增。各种不同类型的膳食磷脂源被逐渐开发出来,包括植物型磷脂、动物型磷脂、结构磷脂等。磷脂的生理活性以及营养特性与其自身的结构有着直接联系,如连接的脂肪酸类型以及长度、不饱和度,极性头基的类型等,都会影响磷脂的生理活性。虽然功能性磷脂已经展现出很高的营养价值,但对磷脂结构与其功能性的关系、磷脂在体内的吸收代谢途径和生物利用率进行更深层次的阐明,将有助于进一步提高膳食磷脂产品的开发及应用。

参考文献:

- [1] RÖHRIG F, SCHULZE A. The multifaceted roles of fatty acid synthesis in cancer [J]. *Nat Rev Cancer*, 2016, 16(11):732-749.
- [2] WU B F, WEI F, XU S L, et al. Mass spectrometry-based lipidomics as a powerful platform in foodomics research [J]. *Trends Food Sci Tech*, 2021, 107:358-376.
- [3] FAVÉ G, COSTE T C, ARMAND M. Physicochemical properties of lipids: new strategies to manage fatty acid bioavailability [J]. *Cell Mol Biol*, 2004, 50(7):815-831.
- [4] ZHU C, LIANG Q L, WANG Y M, et al. Advance in analysis and detection technologies for phospholipidomics [J]. *Chin J Anal Chem*, 2016, 44(6):984-993.
- [5] 马会芳,魏芳,陈洪,等.基于衍生化技术的甘油磷脂分析方法研究进展[J].*分析测试学报*, 2018, 37(11):1396-1404.
- [6] CHEN H, WEI F, DONG X Y, et al. Lipidomics in food science [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2017, 16:80-87.
- [7] KÜLLENBERG D, TAYLOR L A, SCHNEIDER M, et al. Health effects of dietary phospholipids [J/OL]. *Lipids Health Dis*, 2012, 11(1):3[2021-04-25]. <https://doi.org/10.1186/1476-511X-11-3>.
- [8] IKUTA A, SAKURAI T, NISHIMUKAI M, et al. Composition of plasmalogens in serum lipoproteins from patients with non-alcoholic steatohepatitis and their susceptibility to oxidation [J]. *Clin Chim Acta*, 2019, 493:1-7.
- [9] TING T S, TEJASVENE R, RU T X, et al. Emerging roles of lysophospholipids in health and disease [J/OL]. *Prog Lipid Res*, 2020, 80:101068 [2021-04-25]. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2020.101068>.
- [10] NAKAMURA Y. Plant phospholipid diversity: emerging functions in metabolism and protein-lipid interactions [J]. *Trends Plant Sci*, 2017, 22(12):1027-1040.
- [11] ZHOU M M, XUE Y, SUN S H, et al. Effects of different fatty acids composition of phosphatidylcholine on brain function of dementia mice induced by scopolamine [J/OL]. *Lipids Health Dis*, 2016, 15(1):135 [2021-04-25]. <https://doi.org/10.1186/s12944-016-0305-5>.
- [12] COHN J S, WAT E, KAMILI A, et al. Dietary phospholipids, hepatic lipid metabolism and cardiovascular disease [J]. *Curr Opin Lipidol*, 2008, 19(3):257-262.
- [13] SHIROUCHI B, NAGAO K, FURUYA K, et al. Effect of dietary phosphatidylinositol on cholesterol metabolism in Zucker (fa/fa) rats [J]. *J Oleo Sci*, 2009, 58(3):111-115.
- [14] OSELLA M C, RE G, BADINO P, et al. Phosphatidylserine (PS) as a potential nutraceutical for canine brain aging: a review [J]. *J Vet Behav Clin Appl Res*, 2007, 3(2):41-51.
- [15] CHAURIO R, JANKO C, MUÑOZ L, et al. Phospholipids: key players in apoptosis and immune regulation [J]. *Molecules*, 2009, 14(12):4892-4914.
- [16] ECKHARDT E R M, WANG D Q H, DONOVAN J M, et al. Dietary sphingomyelin suppresses intestinal cholesterol absorption by decreasing thermodynamic activity of cholesterol monomers [J]. *Gastroenterology*, 2002, 122(4):948-956.
- [17] PAUL S, LANCASTER G I, MEIKLE P J. Plasmalogens: a potential therapeutic target for neurodegenerative and cardiometabolic disease [J]. *Prog Lipid Res*, 2019, 74:186-195.
- [18] GOODENOWE D B, COOK L L, LIU J, et al. Peripheral ethanolamine plasmalogen deficiency: a logical causative factor in Alzheimer's disease and dementia [J]. *J Lipid Res*, 2007, 48(11):2485-2498.
- [19] SORDILLO J E, LUTZ S M, KELLY R S, et al. Plasmalogens mediate the effect of age on bronchodilator response in individuals with asthma [J/OL]. *Front Med*, 2020, 7:38 [2021-05-08]. <https://doi.org/10.3389/fmed.2020.00038>.
- [20] 孟思,肇立春,王佳佳,等.大豆磷脂酰胆碱提取工艺优化 [J]. *农业工程*, 2016, 6(3):52-53, 9.
- [21] VAN HOOGEVEST P, WENDEL A. The use of natural and synthetic phospholipids as pharmaceutical excipients [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2014, 116(9):1088-1107.
- [22] ALI A H, ZOU X, ABED S M, et al. Natural phospholipids: occurrence, biosynthesis, separation, identification, and beneficial health aspects [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2019, 59(2):253-275.
- [23] GARCIA C, LUTZ N W, CONFORT-GOUNY S, et al. Phospholipid fingerprints of milk from different mammals determined by ³¹P NMR: towards specific interest in human health [J]. *Food Chem*, 2012, 135(3):1777-1783.

- [24] RODRÍGUEZ – ALCALÁ L M, FONTECHA J. Major lipid classes separation of buttermilk, and cows, goats and ewes milk by high performance liquid chromatography with an evaporative light scattering detector focused on the phospholipid fraction [J]. *J Chromatogr A*, 2010, 1217 (18): 3063 – 3066.
- [25] ALI – NEHARI A, CHUN B S. Characterization of purified phospholipids from krill (*Euphausia superba*) residues deoiled by supercritical carbon dioxide [J]. *Korean J Chem Eng*, 2012, 29(7): 918 – 924.
- [26] DEMBITSKY V M, ROZENTSVEIT O A. Phospholipid composition of some marine red algae [J]. *Pergamon*, 1990, 29(10): 3149 – 3152.
- [27] 俞乐, 黄健花, 王兴国, 等. 大豆毛油磷脂组成对磷脂酶 A₁ 深度脱胶的影响 [J]. *中国油脂*, 2018, 43 (12): 18 – 21.
- [28] NIEUWENHUYZEN W V, TOMÁS M C. Update on vegetable lecithin and phospholipid technologies [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2008, 110(5): 472 – 486.
- [29] SUN N, CHEN J, WANG D, et al. Advance in food – derived phospholipids: sources, molecular species and structure as well as their biological activities [J]. *Trends Food Sci Tech*, 2018, 80: 199 – 211.
- [30] JENKINS G M, FROHMAN M A. Phospholipase D: a lipid centric review [J]. *Cell Mol Life Sci*, 2005, 62(19/20): 2305 – 2316.
- [31] ZHOU L, YANG F, ZHAO M, et al. Determination and comparison of phospholipid profiles in eggs from seven different species using UHPLC – ESI – Triple TOF – MS [J/OL]. *Food Chem*, 2021, 339: 127856 [2021 – 04 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127856>.
- [32] DEMMELMAIR H, KOLETZKO B. Lipids in human milk [J]. *Best Pract Res Clin Endocrinol Metab*, 2018, 32 (1): 57 – 68.
- [33] GALLIER S, GRAGSON D, JIMÉNEZ – FLORES R, et al. Using confocal laser scanning microscopy to probe the milk fat globule membrane and associated proteins [J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(7): 4250 – 4257.
- [34] LOPEZ C, BRIARD – BION V, MENARD O, et al. Phospholipid, sphingolipid, and fatty acid compositions of the milk fat globule membrane are modified by diet [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(13): 5226 – 5236.
- [35] ALI A H, ZOU X Q, HUANG J H, et al. Profiling of phospholipids molecular species from different mammalian milk powders by using ultra – performance liquid chromatography – electrospray ionization – quadrupole – time of flight – mass spectrometry [J]. *J Food Compos Anal*, 2017, 62: 143 – 154.
- [36] 尤海琳, 姜璐, 刘锴锴, 等. 海洋磷脂氧化及其对食品风味的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45 (11): 268 – 273.
- [37] AHMMED M K, AHMMED 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]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2020, 19(1): 64 – 123.
- [38] YALAGALA P C R, SUGASINI D, DASARATHI S, et al. Dietary lysophosphatidylcholine – EPA enriches both EPA and DHA in the brain: potential treatment for depression [J]. *J Lipid Res*, 2019, 60(3): 566 – 578.
- [39] BAKY H H A E, BAZ F K E, BAROTY G S E, et al. Phospholipids of some marine macroalgae: identification, antiviral, anticancer and antimicrobial bioactivities [J]. *Der Pharm Chem*, 2014, 6(5): 370 – 382.
- [40] 高正松, 王保成, 徐松泉, 等. 磷脂的合成研究进展 [J]. *广州化工*, 2020, 48(19): 1 – 6.
- [41] CANG X, CHEN H, WEI F, et al. Preparation and functionality of lipase – catalysed structured phospholipid: a review [J]. *Trends Food Sci Tech*, 2019, 88: 373 – 383.
- [42] 肖志刚, 杨国强, 杨舒, 等. 功能性磷脂的酶法合成及其生理功能研究进展 [J]. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(3): 238 – 244.
- [43] 王湘, 魏芳, 陈洪, 等. 酶法合成富含花生四烯酸结构磷脂 [J]. *中国油料作物学报*, 2015, 37(6): 889 – 896.
- [44] 殷涌光, 陈玉江, 刘瑜, 等. 磷脂功能性质及其生产应用的研究进展 [J]. *食品与机械*, 2009, 25(3): 120 – 124.
- [45] 凌沛学, 荣晓花. 磷脂在保健食品和药品中的应用 [J]. *山东食品科技*, 2004(2): 6 – 7.
- [46] NORRIS G H, JIANG C, RYAN J, et al. Milk sphingomyelin improves lipid metabolism and alters gut microbiota in high fat diet – fed mice [J]. *J Nutr Biochem*, 2016, 30: 93 – 101.
- [47] YANG F, CHEN G, MA M, et al. Egg – yolk sphingomyelin and phosphatidylcholine attenuate cholesterol absorption in Caco – 2 cells [J]. *Lipids*, 2018, 53(2): 217 – 233.
- [48] 温江涛. 多烯磷脂酰胆碱联合苓桂术甘汤治疗非酒精性脂肪性肝病的临床效果 [J]. *河南医学研究*, 2020, 29(10): 1848 – 1849.
- [49] 和和小明. 磷脂的营养作用及生理调控功能 [J]. *饲料博览*, 2006(6): 37 – 40.
- [50] 筱葵, 莉莲. 老年性痴呆与乙酰胆碱——纪念脑内乙酰胆碱发现 70 周年 [J]. *世界科学*, 2002(5): 45.
- [51] 安红. 粉状及高卵磷脂含量的大豆磷脂的制备及表面物性研究 [D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2002.

(4) 油酸甲酯基琥珀酸单甲酯在两种加氢柴油中的加剂量为 200 ~ 1 500 $\mu\text{g/g}$ 时,可使试验用空白柴油的润滑性能分别提高 35.4% ~ 59.6%、33.9% ~ 54.9%。

参考文献:

- [1] GELLER D P, GOODRUM J W. Effects of specific fatty acid methyl esters on diesel fuel lubricity[J]. Fuel, 2004, 83(17): 2351 - 2356.
- [2] LIU Z S, LI J, KNOTHE G, et al. Improvement of diesel lubricity by chemically modified tung - oil - based fatty acid esters as additives[J]. Energ Fuel, 2019, 33(6): 5110 - 5115.
- [3] 梅德清,罗演强,沈学峰,等. 脂肪酸甲酯生物柴油改善低硫柴油的润滑性能[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 193 - 197.
- [4] 张雁玲,凌凤香,雒亚东,等. 甲酯型生物柴油对超低硫柴油润滑性能的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(9): 71 - 75.
- [5] 蔺建民,黄燕民,张永光,等. 改性生物柴油作为低硫柴油抗磨剂的应用:CN100448960C [P]. 2009 - 01 - 07.
- [6] KUMAR D. Ti/SiO₂ as a nanosized solid catalyst for the epoxidation of fatty acid methyl esters and triglycerides [J]. Energ Fuel, 2012, 26(5):2953 - 2961.
- [7] ROSS A R, IKONOMOU M G, ORIANI K J. Electro spray ionization of alkali and alkaline earth metal species. Electrochemical oxidation and pH effects [J]. J Mass Spectrom, 2000, 35(8): 981 - 989.
- [8] 刘涛,付学俊,王国成,等. 马来酸酐熔融接枝 EPDM 的研究[J]. 弹性体, 2008, 18(2): 21 - 25.
- [9] 赵路军,胡望明. 甲基乙基醚/马来酸酐共聚物的合成及表征[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(7): 1082 - 1085.
- [10] 冯浩杰,孙平,刘军恒,等. 聚甲氧基二甲醚 - 柴油混合燃料对柴油机燃烧与排放的影响[J]. 石油学报(石油加工), 2016, 32(4): 816 - 822.
- [11] 李力成,王磊,赵学娟,等. 聚丙烯酸酯褐煤阻化剂的热分析[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(11): 54 - 58.
- [12] 纪小峰. 油酸酯型柴油抗磨剂的合成与应用[D]. 西安:西安石油大学, 2019.
- [13] 胡泽祥,陶志平,李进,等. 直链脂肪酸酯类抗磨剂对超低硫柴油润滑性能的影响[J]. 润滑与密封, 2017, 42(3):129 - 133,136.
- [14] 张霄英,甘礼华,徐子颀,等. 润滑油抗磨机理及边界膜模型的研究进展[J]. 润滑与密封, 2006(1): 147 - 153.
- [15] 赵迎秋,黄占凯,董广前,等. 单油酸丙二醇酯型抗磨剂的制备及性能研究[J]. 材料保护, 2018, 51(10): 96 - 100.
- (上接第 74 页)
- [52] 张雪,杨洁,王兴国,等. 乳脂肪球膜的组成、营养及制备研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(1):292 - 302.
- [53] 陈岷,朴玮,黄建. 磷脂酰丝氨酸复合胶囊辅助改善记忆功能研究[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(2): 69 - 74.
- [54] 唐勇,张乾勇,糜漫天,等. 强化磷脂酰丝氨酸纯牛奶改善记忆力人群试食研究[J]. 重庆医学, 2011, 40(30): 3022 - 3023,3026.
- [55] 苏玉芳,梅连杰,刘彪,等. 添加大豆磷脂酰胆碱的奶粉对小鼠记忆力的影响[J]. 中国乳品工业, 2010, 38(1):29 - 30,34.
- [56] TANAKA K, HOSUZAWA M, KUDO N, et al. The pilot study: sphingomyelin - fortified milk has a positive association with the neurobehavioural development of very low birth weight infants during infancy, randomized control trial[J]. Brain Dev, 2013, 35(1): 45 - 52.
- [57] TAN W, ZHANG Q, DONG Z, et al. Phosphatidylcholine ameliorates LPS - induced systemic inflammation and cognitive impairments via mediating the gut - brain axis balance[J]. J Agric Food Chem, 2020, 68(50): 14884 - 14895.
- [58] 黄萍萍. 大豆磷脂的酶法改性研究[D]. 广州:暨南大学, 2007.
- [59] 崔洁,刘小芳,薛长湖,等. DHA - 磷脂对肥胖小鼠脂质代谢的影响[J]. 中国油脂, 2014, 39(1):27 - 31.
- [60] KOUTOKU T, TAKAHASHI H, TOMONAGA S, et al. Central administration of phosphatidylserine attenuates isolation stress - induced behavior in chicks [J]. Neurochem Int, 2005, 47(3): 183 - 189.
- [61] MAGGIONI M, PICOTTI G B, BONDILOTTI G P, et al. Effects of phosphatidylserine therapy in geriatric patients with depressive disorders [J]. Acta Psychiat Scand, 1990, 81(3): 265 - 270.
- [62] 翟光喜,娄红祥,邹立家,等. 药物磷脂复合物的研究进展[J]. 中国药学杂志, 2001(12):10 - 13.
- [63] 张慧杰,董海荣. 脂质在人冠状病毒感染中的作用[J]. 检验医学, 2021, 36(3):347 - 351.
- [64] 代荣阳. DHA 和 EPA 的抗炎及免疫调节功能[J]. 泸州医学院学报, 2004(1):83 - 84.
- [65] 马琴,王静凤,薛长湖,等. 二十二碳六烯酸 - 磷脂脂质体对 S₁₈₀ 荷瘤小鼠肿瘤抑制和免疫调节作用[J]. 中国药科大学学报, 2008(2):159 - 163.