

黄淑婷, 李宏新, 于越, 等. DHA 藻油的生理功能及在食品中复配协同应用的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 468–476.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050329

HUANG Shuting, LI Hongxin, YU Yue, et al. Research Progress on Physiological Functions of DHA Algal Oil and Its Synergistic Application in Food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 468–476. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050329

· 专题综述 ·

DHA 藻油的生理功能及在食品中复配协同应用的研究进展

黄淑婷^{1,2}, 李宏新³, 于越⁴, 袁彪^{1,2}, 曹崇江^{1,2}, 程抒劼^{1,2,*}

(1. 中国药科大学工学院, 江苏南京 211198;

2. 国家中药材加工技术研发专业中心, 江苏南京 211198;

3. 广州信天然医药科技有限公司, 广东广州 510000;

4. 中国药科大学生命科学与技术学院, 江苏南京 211198)

摘要: 二十二碳六烯酸 (docosahexaenoic, DHA) 是一种人体必需的多不饱和脂肪酸, 属于 omega-3 家族, 主要来源为鱼油和藻油。与鱼油相比, 藻油因为含有较高的 DHA 纯度和更高的安全性而备受青睐, 因此被大量应用在食品和保健品中, 与食品中的成分相互影响、协同增效。本文综述了 DHA 藻油的生理功能, 包括促进大脑和眼部神经发育、增强免疫力、抗氧化和抗癌等。总结了 DHA 藻油在牛奶、酸奶、奶粉中的应用, 探讨了它与益生菌、益生元、磷脂酰丝氨酸、卵磷脂等食品成分相互作用的效果与机制, 为食品、保健品行业更广泛、深入地使用 DHA 藻油提供理论依据。

关键词: 二十二碳六烯酸, 藻油, 生理功能, 复配, 协同增效

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)06-0468-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050329



本文网刊:

Research Progress on Physiological Functions of DHA Algal Oil and Its Synergistic Application in Food

HUANG Shuting^{1,2}, LI Hongxin³, YU Yue⁴, YUAN Biao^{1,2}, CAO Chongjiang^{1,2}, CHENG Shujie^{1,2,*}

(1. College of Engineering, China Pharmaceutical University, Nanjing 211198, China;

2. National Research and Development Center of Traditional Chinese Medicine Processing Technology, Nanjing 211198, China;

3. Guangzhou Sun-Nature Medical Technology Co., LTD, Guangzhou 510000, China;

4. College of Life Science and Technology, China Pharmaceutical University, Nanjing 211198, China)

Abstract: Docosahexaenoic acid (DHA), mainly derived from fish oil and algae oil, is an essential polyunsaturated fatty acid of the omega-3 family. Algal oil, compared with fish oil, is preferred for its higher purity of DHA and also safety. Therefore, algal oil is widely used in food and health care products. It interacts and synergies with the ingredients in food. This article reviews the physiological functions of DHA algal oil, including promoting brain and eye nerve development, enhancing immunity, anti-oxidation and anti-cancer effects. Besides, the article also summarizes the application of DHA algal oil in milk, yoghurt and milk powder, and explores the effects and mechanism of its interaction with food ingredients, like probiotics, prebiotics, phosphatidylserine and lecithin. This would provide a theoretical basis for wider and deeper use of DHA algal oil in food and health products industry.

Key words: docosahexaenoic acid; algal oil; physiological function; compound; synergies

收稿日期: 2022-05-27

基金项目: 国家重点研发计划蓝色粮仓科技创新专项 (2018YFD0901106); 大学生创新创业训练计划项目 (202210316077Y)。

作者简介: 黄淑婷 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 药食同源生物活性物质的健康功能, E-mail: 1289814288@qq.com。

* 通信作者: 程抒劼 (1984-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 药食同源营养成分的发掘与功效评价, E-mail: scheng@cgu.edu.cn。

人体的生长发育需要各种营养素,二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)是人体必需的一种多不饱和脂肪酸,属于 ω -3 多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)类,分子量为 328.49。DHA 具有促进大脑神经发育、改善视力、缓解脑疾病、抗炎、抗癌、提高免疫力、增强脂代谢、维持肠道和心血管健康的作用。DHA 对健康具有的重要作用体现在生命的不同阶段,2010 年世界粮农组织建议怀孕和哺乳期间每天摄入 300 mg 的二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)和 DHA^[1],2013 年中国营养学会推荐婴幼儿每日 DHA 摄入量为 100 mg,成年人每日 DHA 和 EPA 摄入量为 250~2000 mg^[2]。然而,世界上大部分国家每日平均 DHA 和 EPA 的摄入量远远没有达标。西方饮食中鱼的摄入量较低,DHA 的摄入量也较低。由于 DHA 大多存在于动物源性食物中,因此素食者往往摄入较低 DHA,有研究调查了上海市的素食人群 ω -3 脂肪酸的摄入量,发现其 DHA 和 EPA 摄入量显著低于正常饮食人群^[3]。

DHA 的来源主要有母乳,富含 DHA 的食物如海鲜、动物的肉、蛋、奶,DHA 补充剂如鱼油、磷虾油、藻油等。随着人们对健康的追求提高,DHA 补充剂越来越受欢迎。高品质的鱼油需要经过蒸馏、提纯和脱臭,这会导致成本增加。由于一系列对海洋资源的保护,鱼油的价格也逐步上涨,这导致人们将目光转向其他 DHA 产品。磷虾油是鱼油的替代品,被认为比鱼油具有更高的功效,这可能是因为其 30%~65% 的脂肪酸以磷脂形式存在^[4]。与鱼油类似,海洋资源的可持续性发展和海洋污染是磷虾油的限制因素。微藻是鱼和磷虾的食物之一,富含 DHA。虽然藻油的发酵和精炼成本较高,但来自人工培育的微藻的藻油因为其生物化学污染的风险较小和良好的可持续性,是目前 DHA 的主要可靠来源。中国国家粮食局颁布的《LS/T 3243-2015》中对 DHA 藻油作出定义,DHA 藻油是以裂壶藻(*Schizochytrium* sp.)或者吾肯氏壶藻(*Ulkeniaamoeboida*)或者寇氏隐甲藻(*Cryptocodiniumcohnii*)等藻种为原料,经生物发酵、分离、提纯等工艺生产的一种可供食用的富含 DHA 的油脂^[5]。

DHA 仅存在于某些食物中,如鱼类、动物内脏和蛋黄等,将 DHA 作为功能型食品原料加入到不含脂肪酸的食品中引起了生产者和消费者极大的兴趣。因此,将 DHA 藻油添加到食品、保健品中成为目前流行的趋势,并且消费者对含有 ω -3 PUFA 的食品及保健品的需求逐步增长。本综述将对 DHA 藻油的生理作用进行概述,并阐述 DHA 藻油与其他食物基质和营养素的复配协同作用,筛选出能与 DHA 藻油协同增效的营养素,作为理论依据为 DHA 藻油在食品领域更广泛的应用奠定基础。

1 DHA 藻油的生理功能

1.1 促进大脑和眼部神经发育

DHA 高度集中在大脑和包括视网膜在内的其他神经元组织中,较短链的 ω -3 PUFA 如 EPA 几乎不存在^[6]。中枢神经系统中 DHA 的积累从胎儿时期开始,而大脑的生长发育不仅限于生命的最初几个月,大脑额叶髓鞘的形成将持续到成年^[7]。所以,DHA 对于人类大脑和神经(主要为眼部神经)的发育至关重要。袁传勋等^[8]给小鼠灌胃含有 30~90 g/kg DHA 藻油的茶油后发现小鼠脑组织中细胞结构完整,细胞核及细胞质分布均匀,视网膜血管分层清晰,且小鼠的空间和学习记忆能力提高。研究表明,儿童增加长链 ω -3 PUFA 的膳食摄入可能会提高注意力、减少破坏性行为并获得更好的阅读和拼写能力^[9-10]。对 7~9 岁的健康儿童进行每日 DHA 藻油的营养干预,虽然干预组 and 对照组在阅读水平和工作记忆方面没有显著性差异,但干预组在父母的行为评分这一指标上表现出微小的变化^[11]。DHA 不仅对婴儿出生后的生长发育起到重要作用,在受孕期间,母体的 DHA 补充也十分重要。Khandelwal 等^[12]对印度孕妇的研究表明,孕期及产后补充藻类 DHA,可以促进婴儿的眼部神经发育,还可以加强婴儿的早期认知和运动发育。

光氧化损伤期间,视网膜细胞中产生的大量活性氧(reactive oxygen species, ROS)会造成老年性黄斑病变(age-related macular degeneration, AMD)^[13]。多项研究表明, ω -3PUFA 与患 AMD 的风险降低相关^[14-16],这可能是因为其在视网膜组织中浓度较高^[17]。而在视网膜中,最普遍的 ω -3 PUFA 是 DHA,在视网膜中的脂肪酸构成中约占 50%^[18]。Deng 等^[19]研究了不同的富含 ω -3 PUFA 的油对兔子光诱导的视网膜损伤的影响,结果表明,DHA 藻油的补充显著减弱了光诱导的视网膜细胞凋亡和血管生成,保护了视网膜的结构与功能,主要通过激活 Nrf2-HO-1 信号传导和下调 NF- κ B p65 表达。

所以,DHA 藻油不仅促进了从胎儿时期开始的大脑和眼部神经发育,对视网膜的结构与功能也具有一定保护作用。

1.2 对免疫和炎症的影响

DHA 对机体免疫具有调节作用。姚壮民等^[20]研究了脂质体对 DHA 在肠上皮细胞中转运、吸收特性的影响及其对小鼠免疫的作用,结果表明,与空白对照组相比,DHA 藻油和 DHA 藻油脂质体组都能够显著增加溶血素水平、吞噬指数、免疫器官系数,小鼠单核巨噬细胞的吞噬能力显著增强,自然杀伤细胞(natural killer cell, NK)活性增强,且 DHA 藻油脂质体对小鼠免疫功能的增强最显著。同样的,薛云浩等^[21]给小鼠灌胃 DHA 藻油鳕鱼甘油软胶囊后也发现了类似的结果,虽然小鼠巨噬细胞吞噬指数和 NK 细胞活性无显著差异,但小鼠的脾淋巴细胞增殖能力显著提高,这说明 DHA 藻油鳕鱼肝油胶囊对小鼠的细胞免疫、体液免疫均有增强作用。

据报道, ω -3PUFA对关节炎、银屑病、克罗恩病等各种慢性炎症具有保护作用^[22-24]。在脂多糖诱导的小鼠结肠炎中观察到了 ω -3PUFA对肠道黏膜结构和溃疡的修复^[25],可能是由于 ω -3PUFA对肠道中有益菌的调节作用^[26]。Yang等^[27]评估了DHA藻油对头孢曲松钠引起的肠道菌群失调和黏膜损伤的影响,结果显示DHA藻油处理后显著降低了促炎细胞因子白介素-6(interleukin-6, IL-6)、白介素-1 β (interleukin1 β , IL-1 β)和肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)的水平,减轻炎症浸润和隐窝损伤,其机制是DHA藻油通过提升一些产生短链脂肪酸的细菌,如瘤胃球菌(*Ruminococcus*)和布劳氏菌属(*Blautia*)来恢复肠道菌群失调,同时调节色氨酸代谢、磷脂代谢和胆汁酸代谢。

1.3 抗氧化作用

机体新陈代谢会产生自由基,过多的自由基积累会导致疾病、衰老。DHA具有抗氧化作用,使细胞产生较低的ROS水平。其抗氧化机制主要有两种,一种是DHA通过对NADH和NADPH氧化酶的抑制来降低体内ROS水平,另一种是由于DHA能捕获自由基,通过自身被氧化从而达到抗氧化效果^[28]。吕军伟^[29]对DHA藻油进行体外及胃肠道模拟后测定抗氧化能力,发现DHA藻油具有较强的DPPH自由基清除率、ABTS⁺自由基清除率和还原力。郑操等^[30]给大鼠灌胃含有250~750 mg/kg DHA藻油的大豆调和油后发现大鼠大脑皮层组织丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量降低,总抗氧化能力增强,过氧化氢酶活性增强,说明DHA藻油在清除自由基和降低脂质过氧化损伤等方面具有积极的作用。徐晨晨等^[31]在柴达木福牛的基础饲料中添加微藻粉后发现,该饲料可显著提高血清超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶的活性,提高血清中的总抗氧化能力,显著降低MDA含量,表明饲料转化率和血清抗氧化能力提高。

1.4 抗癌作用

多项研究表明, ω -3 PUFA,尤其是EPA和DHA,可以防止肿瘤和癌症的发生和进展,如结直肠癌^[32]、乳腺癌^[33]等。Tan等^[34]建立小鼠黑色素瘤肺转移模型,在给予DHA藻油后发现小鼠肺转移组织中DHA显著增加,DHA藻油通过灭活雷帕霉素靶蛋白和p38丝裂原活化蛋白激酶以及激活c-Jun氨基末端激酶引发自噬,导致p62蛋白减少和促炎细胞因子IL-1 β 表达降低,从而显著抑制了黑色素瘤细胞的生长和肺转移。Molfini等^[35]研究了口服DHA藻油对乳腺癌患者的血清环氧二十二碳五烯酸(epoxydocosapentaenoic acids, EDPs)水平的影响,发现补充DHA藻油与乳腺癌患者的血清EDPs提高相关。EDPs是DHA的代谢产物,两者被认为可以抑制炎症,对患者的预后产生积极影响^[36]。

2 DHA藻油和食品成分的复配协同

食物中除了六大营养素外,还存在着一些其他具有活性功能的物质,如牛初乳中的免疫球蛋白G(immunoglobulin G, IgG),酸奶中的乳酸菌等。来自微藻的DHA藻油,不含重金属和其他类型的污染物,因此,越来越多的食品、保健品中加入藻油,并且受到大众的广泛喜爱。DHA藻油的加入可能与食物基质和食物中的营养素产生协同作用,增强对健康的益处。

2.1 DHA藻油与牛初乳和其他奶制品的复配

2.1.1 DHA藻油与牛初乳的复配 牛初乳为母牛产犊后3 d内的乳汁,比牛奶营养价值更高。除了蛋白质、脂肪、维生素和矿物质等必需营养素,它还含有大量生物活性成分,包括低聚糖、免疫球蛋白、乳铁蛋白和溶菌酶^[37]。由于小牛出生后自身没有获得性免疫,因此牛初乳中高浓度的IgG对启动小牛的免疫系统有重大作用^[38]。在母乳缺乏的情况下,牛初乳也被广泛用作母乳的替代来源^[39],可增强人类的免疫防御和胃肠道健康^[40]。牛初乳中丰富的IgG可提升免疫力和抵抗疾病,口服牛初乳可增强NK细胞、淋巴细胞浓度^[41],超免疫牛的IgG可以直接与病毒结合并阻碍其与肠道上皮细胞结合^[42]。DHA藻油也具有免疫促进作用,与牛初乳的复配使用可协同增效。

文献[43]制备了一种牛初乳复合营养粉,其中包含DHA藻油粉,小鼠灌胃后建立了记忆获得性障碍模型,发现牛初乳复合营养粉能改善模型小鼠学习记忆能力,提高小鼠脑胆碱乙酰转移酶活性,抑制乙酰胆碱酯酶活性,增加乙酰胆碱含量,增强益智作用,显著提高巨噬细胞碳廓清指数和吞噬指数,营养粉对儿童消化不良有显著改善效果,改善了肠道功能。文献[44]发明了一种复合肽粉,将牛初乳粉、纯米粉和DHA藻油粉等原料配伍,具有调理肠胃、改善肠道吸收、提高免疫力的功能。文献[45]发明了一种含有牛初乳的复合咀嚼片,其中含有DHA海藻油,各成分协同作用,可增强免疫力、促进智力发育。文献[46]发明了一种对中老年人具有保健功能的液态乳制品,以牛奶、牛初乳、DHA藻油为主要原料,可提高中老年人的机体免疫力并预防心血管疾病,产品中丁基羟基茴香醚与维生素E组成的抗氧化系统可以减缓DHA藻油在产品生产、运输、储藏中的氧化损失,增加系统的稳定性。

2.1.2 DHA藻油与牛奶和酸奶的复配 DHA藻油不仅被大量应用于与牛初乳复配,与普通的牛奶、酸奶复配也可以达到协同增效的作用。 ω -3 PUFA极易被氧化,添加到产品后会导致酸败甚至产生有毒化合物^[47],使用乳化 ω -3 PUFA及基于乳液的微胶囊是将其添加到酸奶等产品中的新方法^[48]。Lane等^[49]利用超声辅助乳化开发了稳定的藻油纳米乳液,使DHA的吸收和利用度改善。使用辛烯基琥珀酸酐疏水改性的淀粉为乳化剂与玉米糖浆一起可以使

DHA 藻油形成稳定的乳液,该藻油乳液添加到牛奶中后可以延长牛奶的保质期,储存温度为 4、20 和 40 ℃ 时,在 11 周的储藏期内保持稳定,40 ℃ 的高储存温度也不会显著增加氧化过程^[50]。Mccowen 等^[51]对十二名以色列人进行含 DHA 藻油的酸奶的饮食干预,3 周后发现血浆磷脂 DHA 显著增加,血浆脂质中的花生四烯酸水平降低。Lane 等^[52]发现食用添加藻油纳米乳液的酸奶后血液中二十碳四烯酸(arachidonic acid, ARA)与 EPA 的比率降低,在摄入酸奶 2 h 后 DHA 吸收量增加^[53],持续摄入后 ω -3 PUFA 生物利用度提高^[54],血液脂肪酸含量提高^[49]。酸奶等乳制品饮料是添加藻油的合适基质,藻油不会改变酸奶中天然的脂肪酸分布,只会增加 DHA 含量,添加了 DHA 藻油的酸奶不仅符合微生物标准和理化标准,通过测定 ABTS⁺自由基,在酸奶中还观察到抗氧化潜力^[55],这能够保护 DHA 不被氧化,增强其稳定性。酸奶具有较高的氧化稳定性可能是由于乳酸菌在发酵过程中产生的肽类是抗氧化剂,也有可能是因为酸奶本身的含氧量低于牛奶,从而减少了氧化应激^[56]。但是在酸奶中添加鱼油纳米脂质体,储存 21 d 后,与初始含量相比,酸奶中 DHA 含量下降了 50%^[57],这表明 DHA 藻油比鱼油更适合添加到酸奶中。DHA 藻油乳液可以延长牛奶的保质期,酸奶可以保护 DHA 不被氧化,所以 DHA 藻油和奶制品的复配可以达到增益效果。

2.1.3 DHA 藻油与奶粉的复配 Turck 等^[58]提议在婴儿配方奶粉和后续配方奶粉中添加富含 DHA 的藻油,用于帮助婴儿和儿童的神经系统和视网膜发育,满足营养需求。研究表明,添加了 DHA 藻油的新配方奶粉与婴儿的正常生长和总红细胞中 DHA 浓度有关,与改善认知和视觉呈正相关^[59]。熊旺^[60]用喷雾干燥法制备 DHA 藻油微胶囊,并以干法工艺和湿法工艺制备中老年配方乳粉,发现油脂微胶囊的加入降低了乳粉稳定性,DHA 藻油的氧化导致乳粉甜味不断降低。

综上,DHA 藻油与奶制品的协同主要应用有牛初乳、牛奶、酸奶、奶粉。与牛初乳协同可增强免疫力,牛奶中微囊化的 DHA 藻油可提高生物利用度,奶粉中添加 DHA 藻油可满足婴幼儿生产过程中的营养需求。适量 DHA 藻油的加入可以增强食品营养,过量的加入则会导致令人不悦的味道和油腻的口感,可以使用微胶囊化或添加调味剂等方法改善感官特性^[61]。

2.2 DHA 藻油与益生元和益生菌的复配

益生菌指定殖在人体中且对机体有益的微生物,包括乳酸菌、双歧杆菌等。与益生菌相比,益生元的范围更广,根据国际益生菌和益生元科学协会对益生元定义的最新描述,益生元是一种被宿主微生物选择利用的底物,具有健康作用,如低聚糖、多糖、蛋白质水解产物等。这说明益生元的作用不仅仅局限

于促进双歧杆菌和乳酸杆菌等有益菌的增殖,还有一些和肠道菌群有关的其他健康作用有待挖掘。DHA 藻油对改变肠道微生物群的结构和提高有益菌的比例有一定作用^[25],表现出益生元的特性。

现已有大量 DHA 藻油与益生菌、益生元联合使用的报道,其功效主要是调节胃肠功能。文献^[62]发明了一种含有复合肽和益生菌的营养固体组合物,含有 DHA 藻油粉、益生元和益生菌,该组合物具有良好的耐高温性能,在对肠道的保护作用测试中发现该组合物能够迅速被胃肠细胞壁吸收,可有效调节肠道菌群、增进食欲、改善腹泻、激活肠胃功能,对肠道健康有促进作用。文献^[63]发明了一种含有 DHA 藻油的复合益生菌固体饮料,该产品具有两种功效,其一是直接促进肠道益生菌的增殖,其二,复合饮料中的 DHA 藻油粉可以促进大脑发育,并与益生菌产生协同作用,给高脂饮食的妊娠母鼠灌胃后发现该复合饮料可有效预防肥胖及肥胖带来的并发症。文献^[64]发明了一种益生菌滴剂,包括罗伊氏乳杆菌、鼠李糖乳杆菌和 DHA 藻油,小鼠注射环磷酸酯造模成功后给药并观察墨汁推进率,发现该益生菌滴剂可以显著增强胃肠动力、调节胃肠胀气、缓解胃肠不适。文献^[65]发明了一种婴幼儿配方奶粉,包含 DHA 藻油和益生菌,与传统牛羊奶粉相比,该配方奶粉中脂肪酸含量比例更贴近母乳,易被婴幼儿吸收利用,对小鼠进行饮食干预后发现,与单一成分奶粉相比,食用配方奶粉的小鼠粪便中双歧杆菌和乳杆菌含量显著增加,非益生菌如梭状杆菌、肠杆菌属、肠球菌含量降低,粪便中免疫球蛋白 A 增加,同时小鼠回肠组织中总抗氧化能力增加,抗氧化应激能力增强,表明配方奶粉中各成分协同增效,增强小鼠免疫力、促进肠道健康。

2.3 DHA 藻油与磷脂酰丝氨酸的复配

磷脂酰丝氨酸(phosphatidylserine, PS)是一种普遍存在的磷脂,是细胞膜的组成成分之一,影响细胞膜的流动性和通透性。PS 也存在于食物中,如母乳、鱼类、动物内脏等,蔬菜和奶类中含量较少。研究表明,外源性 PS 也能被人体有效吸收,并穿过血脑屏障,增强大脑认知功能,改善记忆障碍^[66]。PS 在 2010 年 10 月被中国国家卫生和计划生育委员会列为新型食品资源。由于其具有较高的营养价值,现在已经被广泛应用于各类食品、保健品。DHA 作为细胞膜磷脂的重要组成成分,研究表明,单纯增加 DHA 的浓度不能保护脑神经瘤细胞,只有当 PS 与其结合后才能发挥保护作用^[67]。当细胞中含有大量 DHA 但缺乏 PS 时,细胞仍会发生程序性死亡^[68]。DHA 可以促进大脑对 PS 的吸收与积累,酯化的 DHA 更易穿过血脑屏障^[69],是其作用于大脑的有效形式,这说明 PS 与 DHA 在改善大脑功能方面具有协同作用。

DHA 藻油与 PS 的联合使用,形式以固体饮料、

软胶囊为主。文献[70]发明了一种益智健脑的固体饮料,主要原料为核桃粉、PS和DHA藻油,对樟柳碱导致记忆障碍的小鼠给药后发现该固体饮料可以明显改善小鼠的大脑记忆功能,促进学习记忆。文献[71]发明了一种具有防治老年痴呆的保健食品,以纳豆粉、PS、DHA藻油为主要原料,在大鼠 β 淀粉样蛋白25-35诱导的细胞损伤模型中添加该复合制剂后发现细胞存活率显著提高,表明三种原料在人体中可能有协同作用,纳豆可抑制血管堵塞,与DHA藻油和PS协同可活化血栓、修复受损脑细胞。文献[72]发明了一种DHA藻油软胶囊,并与鱼油、PS复配,经过动物试验和人体试食后发现,该软胶囊有确切的改善记忆的功能,指向记忆、联想学习、图像自由回忆等方面均有显著提高。

2.4 DHA藻油与油脂的复配

亚麻籽油富含 α -亚麻酸(α -linolenic acid, ALA),也是一种 ω -3 PUFA。文献[73]发明了一种烹调组合油,包括DHA藻油、亚麻籽油和大豆油,对服用该组合油的小鼠进行记忆力测验,发现小鼠的空间记忆能力提升,表明组合油中DHA和ALA可能通过发挥各自功能并协同促进,保证大脑中枢神经系统营养的供给,加速信息传导,增强记忆力。文献[74]发明了一种适用于婴幼儿的油茶籽调和油,在油茶籽油、大豆油、玉米油和核桃油的基础上,添加维生素和DHA藻油,经检测,该调和油不饱和脂肪酸含量多、脂肪酸组成合理,适合婴幼儿神经、血管、大脑的发育生长。

卵磷脂是一种存在于动植物组织和蛋黄中的油脂性物质。DHA藻油与卵磷脂联合摄入可以增加膳食DHA的生物利用度,而单独摄入卵磷脂不会影响体内脂肪酸水平,这可能是因为卵磷脂促进了肠道对 ω -3 PUFA的吸收,主要通过促进肠道内脂肪的乳化和形成乳糜微粒来增加肠细胞对DHA的吸收^[75]。所以,DHA藻油与油脂类成分的复配不仅可以增强营养,还能增加生物利用度。

2.5 DHA藻油与其他食品成分的复配

为了掩盖DHA藻油难闻的气味并提高生物利用度,微胶囊化是一项很有前途的技术,壁材的选择会影响微胶囊化的DHA粉末在胃肠道消化过程中的释放,以100%乳清蛋白为壁材的DHA藻油在胃肠道消化过程中表现出可持续性释放,具有更高的消化率^[76]。Sun等^[77]制备了一种由豌豆蛋白和亚麻籽胶包裹的藻油液滴,发现涂层的存在抑制了DHA藻油的氧化,减少了DHA藻油的鱼腥味。Jiang等^[78]在DHA藻油水包油乳液中加入6wt%的柠檬油,发现它不仅掩盖了DHA藻油的异味,也不会影响乳液的稳定性。

3 总结与展望

综上所述,本文围绕DHA藻油的生理作用及其与不同食物基质、营养素的复配协同展开讨论。

DHA藻油是一种营养价值非常高的原料,它的生理功能有促进大脑发育、促进视觉神经发育、增强免疫力、抗炎、抗氧化、抗癌等方面。DHA藻油在食品、保健品行业有大量应用,添加到牛初乳、牛奶、酸奶、奶粉中可以增强它们的营养功能,促进DHA本身的生物利用度。与益生菌、益生元、PS等营养素复配,多种成分相互影响,可以达到协同增效的作用。

虽然DHA藻油具有高营养价值,但由于含有较高的PUFA含量,DHA藻油容易被氧化,导致其和加工后的产品稳定性较差、不易储存、货架期短,而且在氧化过程中会产生不良风味和一些有害化合物,使营养降低甚至不利于人体健康。所以在将DHA藻油应用于制备强化食品时,提高其稳定性、防止油类氧化是一个需要重点考虑的问题。不同的食物基质造成不同的环境,对DHA藻油的稳定性是一个巨大的挑战。目前提高DHA藻油稳定性的方法有加入抗氧化剂和封装等,需要根据最终产品的形式选择合适的抗氧化方法。此外,不同的食物基质,对DHA的生物利用度也有一定影响。所以,DHA藻油应用于食品工业需要多方面的考虑。

DHA藻油可以制备成油、粉末或乳液后应用于食品,如在食用油中直接以油的形式添加,在奶粉中以粉末形式添加。目前市面上已经存在一些含有DHA藻油的产品,其中大部分是保健食品,目标群体为孕妇和婴幼儿,形式主要为海藻油软胶囊和凝胶糖果,在普通食品中几乎没有应用。当前的科学研究主要集中在DHA藻油的生理功能和提高DHA藻油的稳定性等方面,而它在食品中与基质成分和其他营养素的协同增效仍是一个值得深入研究的热点。

参考文献

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Fats and fatty acids in human nutrition[J]. FAO Food and Nutrition Paper, 2010, 91: 1-166.
- [2] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 649. [Chinese Nutrition Society. Chinese dietary reference intakes[M]. Beijing: Science Press, 2013: 649.]
- [3] 陈嘉韵, 李若谷, 李安娜, 等. 上海地区素食人群 ω -3脂肪酸摄入情况[J]. 卫生研究, 2021, 50(4): 558-563. [CHEN J Y, LI R G, LI A N, et al. ω -3 fatty acids intake level of vegetarians in Shanghai[J]. Journal of Hygiene Research, 2021, 50(4): 558-563.]
- [4] ULVEN S M, KIRKHUS B, LAMGLAIT A, et al. Metabolic effects of krill oil are essentially similar to those of fish oil but at lower dose of EPA and DHA, in healthy volunteers[J]. Lipids, 2011, 46(1): 37-46.
- [5] 国家粮食局. LS/T 3243-2015 DHA藻油[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. [National Food and Strategic Reserves Administration. LS/T 3243-2015 DHA algal oil [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.]
- [6] SALEM N, LITMAN B, KIM H Y, et al. Mechanisms of ac-

- tion of docosahexaenoic acid in the nervous system[J]. *Lipids*, 2001, 36(9): 945–959.
- [7] BROWN T T, JERNIGAN T L. Brain development during the preschool years[J]. *Neuropsychology Review*, 2012, 22(4): 313–333.
- [8] 袁传勋, 王成成, 吴月, 等. 含 DHA 藻油的茶油对初断乳小鼠脑部和视网膜发育的影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(3): 80–87.
- [YUAN C X, WANG C C, WU Y, et al. Effect of camellia oil containing DHA algae oil on the development of brain and retina in weaned mice[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(3): 80–87.]
- [9] MILTE C M, PARLETTA N, BUCKLEY J D, et al. Eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids, cognition, and behavior in children with attention-deficit/hyperactivity disorder: A randomized controlled trial[J]. *Nutrition*, 2012, 28(6): 670–677.
- [10] BLOCH M H, QAWASMI A. Omega-3 fatty acid supplementation for the treatment of children with attention-deficit/hyperactivity disorder symptomatology: Systematic review and meta-analysis[J]. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 2011, 50(10): 991–1000.
- [11] MONTGOMERY P, SPRECKELSEN T F, BURTON A, et al. Docosahexaenoic acid for reading, working memory and behavior in UK children aged 79: A randomized controlled trial for replication (the DOLAB II study)[J]. *PLoS One*, 2018, 13(2): e0192909.
- [12] KHANDELWAL S, SWAMY M K, PATIL K, et al. The impact of docosahexaenoic acid supplementation during pregnancy and lactation on neurodevelopment of the offspring in India (DHANI): Trial protocol[J]. *Bmc Pediatrics*, 2018, 18(1): 261.
- [13] BENSHABAT S, ITAGAKI Y, JOCKUSCH S, et al. Formation of a nonaioxirane from A2E, a lipofuscin fluorophore related to macular degeneration, and evidence of singlet oxygen involvement[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2002, 41(5): 814–817.
- [14] SANGIOVANNI J P, CHEW E Y, AGRON E, et al. The relationship of dietary omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acid intake with incident age-related macular degeneration[J]. *Archives of Ophthalmology*, 2008, 126(9): 1274–1279.
- [15] SANGIOVANNI J P, AGRON E, MELETH A D, et al. Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acid intake and 12-y incidence of neovascular age-related macular degeneration and central geographic atrophy: AREDS report 30, a prospective cohort study from the age-related eye disease study[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2009, 90(6): 1601–1607.
- [16] GORUSUPUDI A, LIU A H, HAGEMAN G S, et al. Associations of human retinal very long-chain polyunsaturated fatty acids with dietary lipid biomarkers[J]. *Journal of Lipid Research*, 2016, 57(3): 499–508.
- [17] SANGIOVANNI J P, CHEW E Y. The role of omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids in health and disease of the retina[J]. *Progress in Retinal and Eye Research*, 2005, 24(1): 87–138.
- [18] FLIESLER S J, ANDERSON R E. Chemistry and metabolism of lipids in the vertebrate retina[J]. *Progress in Lipid Research*, 1983, 22(2): 79–131.
- [19] DENG Q, WANG Y, WANG C, et al. Dietary supplementation with omega-3 polyunsaturated fatty acid-rich oils protects against visible-light-induced retinal damage *in vivo*[J]. *Food & Function*, 2018, 9(4): 2469–2479.
- [20] 姚壮民, 陈琼, 王万里, 等. DHA 藻油脂质体对小鼠免疫功能调节作用研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(15): 6200–6207.
- [YAO Z M, CHEN Q, WANG W L, et al. Effect of DHA algae oil liposomes on mouse immune function[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(15): 6200–6207.]
- [21] 薛云浩, 李娜娜, 王雯颖. DHA 藻油鳕鱼肝油软胶囊对小鼠免疫调节功能的影响[J]. *中国卫生检验杂志*, 2018, 28(12): 1416–1418, 1425.
- [XUE Y H, LI N N, WANG W Y, et al. Effect of DHA algal oil and cod liver oil capsule on immunoregulatory function in mice[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2018, 28(12): 1416–1418, 1425.]
- [22] OLIVER E, MCGILLICUDDY F, PHILLIPS C, et al. The role of inflammation and macrophage accumulation in the development of obesity-induced type 2 diabetes mellitus and the possible therapeutic effects of long-chain n-3 PUFA[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2010, 69(2): 232–243.
- [23] MARGINA D, UNGURIANU A, PURDEL C, et al. Analysis of the intricate effects of polyunsaturated fatty acids and polyphenols on inflammatory pathways in health and disease[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2020, 143: 111558.
- [24] HAN L R, LEI H N, TIAN Z W, et al. The immunomodulatory activity and mechanism of docosahexaenoic acid (DHA) on immunosuppressive mice models[J]. *Food & Function*, 2018, 9(6): 3254–3263.
- [25] GOBBETTI T, DALLI J, COLAS R A, et al. Protectin D1(n-3 DPA) and resolvin D5 (n-3 DPA) are effectors of intestinal protection[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(15): 3963–3968.
- [26] XU Z, TANG H, HUANG F, et al. Algal oil rich in n-3 PUFA alleviates DSS-induced colitis via regulation of gut microbiota and restoration of intestinal barrier[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 615404.
- [27] YANG C, QIAO Z X, XU Z X, et al. Algal oil rich in docosahexaenoic acid alleviates intestinal inflammation induced by antibiotics associated with the modulation of the gut microbiome and metabolome[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(32): 9124–9136.
- [28] RICHARD D, KEFI K, BARBE U, et al. Polyunsaturated fatty acids as antioxidants[J]. *Pharmacological Research*, 2008, 57(6): 451–455.
- [29] 吕军伟. DHA 藻油抗氧化特性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- [LÜ J W. Research of antioxidant properties of DHA algae oil[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.]
- [30] 郑操, 陈涛, 田华, 等. 含 DHA 藻油的大豆调和油对 SD 大鼠大脑皮层组织抗氧化能力和过氧化反应的影响[J]. *中国油脂*, 2017, 42(10): 84–86.
- [ZHENG C, CHEN T, TIAN H, et al. Effect of soybean blend oil containing DHA algae oil on antioxidant capacity

- ity and peroxidation of cerebral cortex of SD rat[J]. *China Oils and Fats*, 2017, 42(10): 84–86.]
- [31] 徐晨晨, 李慧, 张寿, 等. 富含 DHA 微藻对柴达木福牛生长性能和血清抗氧化指标的影响[J]. *中国畜牧兽医*, 2021, 48(6): 2074–2081. [XU C C, LI H, ZHANG S, et al. Effect of dietary DHA-rich microalgae on growth performance and serum antioxidant indices of Qaidamford cattle[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2021, 48(6): 2074–2081.]
- [32] YANG T, FANG S, ZHANG H X, et al. N-3 PUFAs have antiproliferative and apoptotic effects on human colorectal cancer stem-like cells *in vitro*[J]. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 2013, 24(5): 744–753.
- [33] AI-JAWADI A, MOUSSA H, RAMALINGAM L, et al. Protective properties of n-3 fatty acids and implications in obesity-associated breast cancer[J]. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 2018, 53: 1–8.
- [34] TAN R H, WANG F, FAN C L, et al. Algal oil rich in n-3 polyunsaturated fatty acids suppresses B16F10 melanoma lung metastasis by autophagy induction[J]. *Food & Function*, 2018, 9(12): 6180–6187.
- [35] MOLFINO A, AMABILE M I, LIONETTO L, et al. DHA oral supplementation modulates serum epoxydocosapentaenoic acid (EDP) levels in breast cancer patients[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2019, 2019: 1280987.
- [36] MOLFINO A, AMABILE M I, MONTI M, et al. Omega-3 polyunsaturated fatty acids in critical illness: Anti-inflammatory, proresolving, or both?[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2017, 2017: 5987082.
- [37] KEHOE S I, JAYARAO B M, HEINRICHS A J. A survey of bovine colostrum composition and colostrum management practices on Pennsylvania dairy farms[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(9): 4108–4116.
- [38] KAPLAN M, ARSLAN A, DUMAN H, et al. Production of bovine colostrum for human consumption to improve health[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 12: 796824.
- [39] LI Y, JUHL S M, YE X, et al. A stepwise, pilot study of bovine colostrum to supplement the first enteral feeding in preterm infants (precolos): Study protocol and initial results[J]. *Frontiers in Pediatrics*, 2017, 5: 42.
- [40] ARSLAN A, KAPLAN M, DUMAN H, et al. Bovine colostrum and its potential for human health and nutrition[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 651721.
- [41] WONG E B, MALLET J F, DUARTE J, et al. Bovine colostrum enhances natural killer cell activity and immune response in a mouse model of influenza infection and mediates intestinal immunity through toll-like receptors 2 and 4[J]. *Nutrition Research*, 2014, 34(4): 318–325.
- [42] JAWHARA S. Can drinking microfiltered raw immune milk from cows immunized against SARS-CoV-2 provide short-term protection against COVID-19?[J]. *Frontiers in Immunology*, 2020, 11: 1888.
- [43] 海南国健高科技乳业有限公司. 一种牛初乳复合营养粉及其制备方法: 中国, 201711204351.4[P]. 2018-06-08[2022-05-20]. [Hainan GovKing High-tech Dairy Co., Ltd. The invention and preparation method of multiply nutrition powder of bovine colostrum: China, 201711204351.4 [P]. 2018-06-08[2022-05-20].]
- [44] 汕头市培芝食品有限公司. 一种利用肽分子应用婴幼儿营养补充品的制备方法: 中国, 202011229872.7[P]. 2021-01-26[2022-05-20]. [Shantou Peizhi Food Co., Ltd. The invention and preparation method of infant nutritional supplements using peptide molecule: China, 202011229872.7[P]. 2021-01-26[2022-05-20].]
- [45] 芜湖市好亦快食品有限公司三山分公司. 一种含牛初乳的加钙复合咀嚼片及其制备方法: 中国, 201811131591.0[P]. 2019-01-18[2022-05-20]. [Wuhu Good & Fast Food Co., Ltd. Sanshan Branch. The invention and preparation method of a calcium-added composite chewable tablet containing bovine colostrum: China, 201811131591.0[P]. 2019-01-18[2022-05-20].]
- [46] 内蒙古伊利实业集团股份有限公司. 一种对中老年人具有保健功能的液态乳制品及其生产方法: 中国, 201110453599.0[P]. 2013-04-10[2022-05-20]. [Inner Mongolia Yili Industrial Group Limited by Share Ltd. The invention and production method of liquid dairy products with health care functions for middle and old people: China, 201110453599.0[P]. 2013-04-10[2022-05-20].]
- [47] GUMUS C E, GHARIBZAHEDI S M T. Yogurts supplemented with lipid emulsions rich in omega-3 fatty acids: New insights into the fortification, microencapsulation, quality properties, and health-promoting effects[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110: 267–279.
- [48] SENGUPTA S, KOLEY H, DUTTA S, et al. Antioxidant and hypocholesterolemic properties of functional soy yogurts fortified with omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids in Balb/c mice[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2019, 121(5): 1800397.
- [49] LANE K E, LI W L, SMITH C, et al. The bioavailability of an omega-3-rich algal oil is improved by nanoemulsion technology using yogurt as a food vehicle[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2014, 49(5): 1264–1271.
- [50] XING H, LI L, GUI S, et al. Formation, stability, and properties of an algae oil emulsion for application in UHT milk[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(2): 567–574.
- [51] MCCOWEN K C, LING P R, DECKER E, et al. A simple method of supplementation of omega-3 polyunsaturated fatty acids: Use of fortified yogurt in healthy volunteers[J]. *Nutrition in Clinical Practice*, 2010, 25(6): 641–645.
- [52] LANE K E, DERBYSHIRE E J. Functional foods enriched with an omega-3 nanoemulsion-potential to improve the long-term health of vegetarians?[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2013, 72(OCE4): E239.
- [53] LANE K E, LI W, SMITH C, et al. Nanoemulsion of high DHA vegetarian algal oil enhances DHA bioavailability—a randomised crossover trial[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2014, 73(OCE2): E87.

- [54] LANE K E, DERBYSHIRE E J, SMITH C J, et al. Sensory evaluation of a yogurt drink containing an omega-3 nanoemulsion with enhanced bioavailability[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2013, 72(OCE2): E99.
- [55] GÓMEZ RAMÍREZ B D, SEPÚLVEDA VALENCIA J U, ALZATE ARBELAEZ A F, et al. Oxidative, sensory and fatty acid profile evaluation of a yogurt with docosahexaenoic acid (DHA) extracted from microalgae oil[J]. *Revista Chilena de Nutrición*, 2020, 47(4): 568–579.
- [56] NAJGEBAUER-LEJKO D, SADY M. Estimation of the antioxidant activity of the commercially available fermented milks[J]. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 2015, 14: 387–396.
- [57] 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.
- [58] TURCK D, BOHN T, CASTENMILLER J, et al. Safety of oil from *Schizochytrium* sp. (strain ATCC 20889) for use in infant and follow-on formula as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283[J]. *EFSA Journal*, 2022, 20(1): e07083.
- [59] YEISER M, HARRIS C L, KIRCHOFF A L, et al. Growth and tolerance of infants fed formula with a new algal source of docosahexaenoic acid: Double-blind, randomized, controlled trial[J]. *Prostaglandins Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 2016, 115: 89–96.
- [60] 熊旺. 复配 n-3/n-6 PUFAs 和 PS 微胶囊表征及在中老年配方奶粉的应用[D]. 杭州: 浙江科技学院, 2021. [XIONG W. Characterization of compound n-3/n-6 PUFAs and PS microcapsules and their application in middle-aged formula milk powder[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2021.]
- [61] RUAIRI C R, MARIA R G M, MICHAEL N, et al. An assessment of the techno-functional and sensory properties of yoghurt fortified with a lipid extract from the microalga *Pavlova lutheri*[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 37: 237–246.
- [62] 广州市金龟寿药品有限公司. 一种含有复合肽和益生菌的营养固体组合物及其制备方法: 中国, 202011493603.1[P]. 2021-04-27[2022-05-20]. [Guangzhou Jinguishou Medicine Co., Ltd. The invention and preparation method of a nutritive solid composition containing compound peptide and probiotics: China, 202011493603.1[P]. 2021-04-27[2022-05-20].]
- [63] 杭州相生相成科技有限公司. 一种含 DHA 藻油的复合益生菌固体饮料: 中国, 201810707929.6[P]. 2018-11-16[2022-05-20]. [Hangzhou Xiangsheng Xiangcheng Technology Co., Ltd. A compound probiotic solid drink containing DHA algal oil: China, 201810707929.6[P]. 2018-11-16[2022-05-20].]
- [64] 拉格比(广东)健康科技有限公司, 乐比(广州)健康产业有限公司. 一种用于改善肠绞痛、胀气的益生菌滴剂及其制备方法: 中国, 202011503488.1[P]. 2021-03-16[2022-05-20]. [Rugby (Guangdong) Health Technology Co., Ltd, Lebi (Guangzhou) Health Industry Co., Ltd. The invention and preparation method of a probiotic drop for improving colic and flatulence: China, 202011503488.1[P]. 2021-03-16[2022-05-20].]
- [65] 石家庄君乐宝乳业有限公司. 促进智力发育和肠道健康的母乳化婴幼儿配方奶粉及其制备方法和应用: 中国, 202011442722.4[P]. 2021-03-23[2022-05-20]. [Shijiazhuang Junlebao Dairy Co., Ltd. The preparation method and application of breastfed infant formula milk powder for promoting intelligence development and intestinal health: China, 202011442722.4[P]. 2021-03-23[2022-05-20].]
- [66] BURSTYN-COHEN T, MAIMON A. TAM receptors, phosphatidylserine, inflammation, and cancer[J]. *Cell Communication and Signaling*, 2019, 17(1): 156.
- [67] 李闯兵, 刘承初, 谢晶, 等. ω -3 脂肪酸及磷脂酰丝氨酸的益智作用研究进展[J]. *中国油脂*, 2011, 36(9): 51–55. [LI Y B, LIU C C, XIE J, et al. Research advance in the function on intelligence of ω -3 fatty acid and phosphatidylserine[J]. *China Oils and Fats*, 2011, 36(9): 51–55.]
- [68] KIM H Y, AKBAR M, LAU A. Effects of docosapentaenoic acid on neuronal apoptosis[J]. *Lipids*, 2003, 38(4): 453–457.
- [69] LAGARDE M, BERNOUD N, THIES F, et al. Lysophosphatidylcholine as a carrier of docosahexaenoic acid to target tissues[J]. *World Review of Nutrition and Dietetics*, 2001, 88: 173–177.
- [70] 山西振东五和健康科技股份有限公司. 一种益智健脑的固体饮料及其制备方法: 中国, 202110871382.5[P]. 2021-10-29[2022-05-20]. [Shanxi Zhendong Wuhe Health Technology Co., Ltd. The invention and preparation method of a solid beverage for intelligence and brain health: China, 202110871382.5[P]. 2021-10-29[2022-05-20].]
- [71] 江西邦泰绿色生物合成生态产业园发展有限公司. 防治老年痴呆复合制剂及其制备方法: 中国, 202110317645.8[P]. 2021-06-15[2022-05-20]. [Jiangxi Bangtai Green Biosynthesis Ecological Industrial Park Development Co., Ltd. The invention and preparation method of compound for prevention and treatment of senile dementia: China, 202110317645.8[P]. 2021-06-15[2022-05-20].]
- [72] 广东同德药业有限公司, 湛江市明德医药科技有限公司. 一种 DHA 藻油软胶囊及其制备方法: 中国, 201910788359.2[P]. 2021-05-04[2022-05-20]. [Guangdong Tongde Pharmaceutical Co., Ltd. Zhanjiang Mingde Pharmaceutical Technology Co., Ltd. The invention and preparation method of DHA algal oil soft capsule: China, 201910788359.2[P]. 2021-05-04[2022-05-20].]
- [73] 湖南清云志贸易有限公司. 一种增强记忆力的烹调组合油及其制备方法: 中国, 202111314177.5[P]. 2022-01-28[2022-05-20]. [Hunan Qingyunzhi Trading Co., Ltd. The invention and preparation method of a cooking combination oil for enhancing memory: China, 202111314177.5[P]. 2022-01-28[2022-05-20].]
- [74] 湖北香芝源农业科技有限公司, 武汉轻工大学. 一种适用于婴幼儿的油茶籽调和油及其制备方法: 中国, 202111574968.1[P]. 2022-03-15[2022-05-20]. [Hubei Xiangzhizhuan Agricultural Science and Technology Co., Ltd, Wuhan Polytechnic University. The invention and preparation method of a blending oil of camellia seed suitable for infants: China, 202111574968.1[P]. 2022-03-15[2022-05-20].]
- [75] VAN W N, BALVERS M, CANSEV M, et al. Dietary crude

lecithin increases systemic availability of dietary docosahexaenoic acid with combined intake in rats[J]. [Lipids](#), 2016, 51(7): 833–846.

[76] HU Z J, WU P, WANG L P, et al. Exploring *in vitro* release and digestion of commercial DHA microcapsules from algae oil and tuna oil with whey protein and casein as wall materials[J]. [Food & Function](#), 2022, 13(2): 978–989.

[77] SUN M J, LI X Y, MCCLEMENTS D J, et al. Reducing off-flavors in plant-based omega-3 oil emulsions using interfacial engi-

neering: Coating algae oil droplets with pea protein/flaxseed gum [J]. [Food Hydrocolloids](#), 2022, 122: 107069.

[78] JIANG W, ZHANG Y F, MCCLEMENTS, et al. Impact of pea protein-inulin conjugates prepared via the Maillard reaction using a combination of ultrasound and pH-shift treatments on physical and oxidative stability of algae oil emulsions[J]. [Food Research International](#), 2022, 156: 111161.