

# 基于生物利用度分析食品中营养强化的价值——以DHA为例

姚婉婷<sup>1</sup>, 胡金庆<sup>2,3</sup>, 齐自元<sup>1,4,5</sup>, 谢庆超<sup>1,4,5</sup>, 欧杰<sup>1,4</sup>, 潘迎捷<sup>1,4,5</sup>, 赵勇<sup>1,4,5</sup>, 刘海泉<sup>1,4,5,6,7</sup>

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 长岛自然资源局, 山东烟台 265800; 3. 上海海洋大学海洋学院, 上海 201306; 4. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306; 5. 农业农村部水产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室(上海), 上海 201306; 6. 上海海洋大学食品热加工工程技术研究中心, 上海 201306; 7. 上海海洋大学食品学院, 食品产业链生态循环研究所, 上海 201306)

**摘要:**随着生活水平的提高,人们对于食品中的营养要求越来越高。DHA在人体内具有促进神经系统发育等重要作用,尤其在婴幼儿时期更为重要,而食物是人体内DHA补充的重要来源,尤其是深海鱼类和海藻类食物作用更佳。为给大食物观下的精准营养提供参考依据,基于生物利用度的角度,以DHA为例分析食品中营养强化的价值。从天然食品和人工富集食品两个方面介绍了DHA的食品来源,综述了影响DHA食品生物利用度的因素,总结了提高DHA生物利用度的方式,指出了以DHA为代表的营养强化型食品存在的问题以及未来的发展方向。微藻是DHA营养强化食品的重要来源。DHA的生物利用度与其存在形式、结合位点、氧化程度相关,可通过膳食搭配、乳化或微胶囊化处理、加工及烹饪手段选择提高食物中DHA的生物利用度。未来应进一步加强氧化后DHA的活性、DHA精准营养及丰富DHA营养强化食品种类等方面的研究。

**关键词:**DHA; 营养强化食品; 生物利用度

中图分类号:TS201.4;TS202.3 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)12-0083-07

## Analysis of the value of nutritional fortification in food based on bioavailability: taking DHA as an example

YAO Wanting<sup>1</sup>, HU Jinqing<sup>2,3</sup>, QI Ziyuan<sup>1,4,5</sup>, XIE Qingchao<sup>1,4,5</sup>, OU Jie<sup>1,4</sup>, PAN Yingjie<sup>1,4,5</sup>, ZHAO Yong<sup>1,4,5</sup>, LIU Haiquan<sup>1,4,5,6,7</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Changdao District Bureau of Natural Resources, Yantai 265800, Shandong, China; 3. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic - Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China; 5. Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Aquatic Product on Storage and Preservation (Shanghai), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 6. Engineering Research Center of Food Thermal - Processing Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 7. Food Industry Chain Ecological Recycling Research Institute of Food Science and Technology College, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

收稿日期:2022-07-27;修回日期:2023-09-03

基金项目:上海市科委上海市地方院校能力建设计划项目(22010502300)

作者简介:姚婉婷(1999),女,在读硕士,研究方向为食品营养与检测(E-mail)1215505153@qq.com;胡金庆(1977),男,工程师,硕士,研究方向为海洋生态管理(E-mail)378941719@qq.com。姚婉婷、胡金庆同为第一作者。

通信作者:刘海泉,副教授(E-mail)hqliu@shou.edu.cn;赵勇,教授(E-mail)yzhao@shou.edu.cn。

**Abstract:** With the improvement of living standards, people's requirements for nutrition in food is higher and higher. DHA plays an important role in promoting the development of nervous system in human body, especially in infants. Food is an important source of DHA supplement in human body, especially deep-sea fish and seaweed. In order to provide reference basis for precision nutrition under the big food

concept, taking DHA as an example, the value of nutritional fortification in food based on bioavailability was analyzed. The food sources of DHA from natural foods and artificially enriched foods were introduced, the factors affecting the bioavailability of DHA foods and the ways improving the bioavailability of DHA were summarized, and the problems and future development directions of nutrition fortified foods represented by DHA were pointed out. Microalgae is an important source of DHA nutrition fortified food. The bioavailability of DHA is related to its form of existence, binding sites, and degree of oxidation. Dietary pairing, emulsification or microencapsulation, selection of processing and cooking methods can be used to improve the bioavailability of DHA in food. In the future, research on the activity of oxidized DHA, precise nutrition of DHA, and enriching the types of DHA nutrition fortified foods should be further strengthened.

**Key words:** DHA; nutrition fortified food; bioavailability

随着生活水平的提高,人们对于食品中的营养要求越来越高,营养强化型食品应运而生。根据 GB 14880—2012《食品安全国家标准 食品营养强化剂使用标准》定义,食品营养强化是指在现代营养科学的指导下,根据不同地区、不同人群的营养缺乏状况和营养需要,以及为弥补食品在日常加工、储存时造成的营养素损失,在食品中选择性地加入一种或者多种微量营养素和(或)其他营养素。

二十二碳六烯酸(DHA)俗称脑黄金,是一种对人体十分重要的 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸(PUFA)。DHA是大脑和视网膜的重要组成部分之一,通过饮食摄入的DHA可以在大脑中富集<sup>[1]</sup>,具有促进婴幼儿脑部发育<sup>[2-4]</sup>,提高成年人记忆能力和缩短反应时间<sup>[5]</sup>,改善脑功能,防止脑神经退化性疾病的发生<sup>[6]</sup>等作用。DHA在不同的物质中多以游离脂肪酸(FFA-DHA)、甘油三酯(TG-DHA)、磷脂(PL-DHA)和乙酯(EE-DHA)4种结构存在。膳食中的TG-DHA和PL-DHA能更好地增加各种组织中总DHA的水平<sup>[7]</sup>,PL-DHA最易被大脑吸收利用<sup>[8]</sup>且能提高器官中的DHA含量<sup>[9]</sup>。DHA通过与卵磷脂结合形成的PC-DHA可促进脑神经的发育<sup>[10]</sup>,能有效提高记忆和学习能力<sup>[11]</sup>。

《中国居民膳食指南(2022版)》推荐居民每周至少吃2~3次鱼,孕妇每周最好食用2~3次深海鱼类以补充 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸,老年人建议多吃富含 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸的海产品。《中国居民膳食营养素推荐摄入量(2013版)》推荐0~4岁学龄前儿童每日适宜摄入100 mg DHA,推荐孕妇及哺乳期女性每日摄入200 mg DHA。有研究表明,孕妇每日摄入300 mg DHA能有效降低早产的风

险<sup>[12]</sup>;另外,膳食补充DHA还能降低后代患心脏代谢性疾病的概率<sup>[13]</sup>,减少炎症的发生<sup>[14]</sup>。孕妇和新生儿摄入的DHA不足会导致婴儿的视觉和大脑发育缺陷<sup>[15]</sup>。

DHA营养强化型食品是指通过人工方法富集或增加其中DHA含量的一类食品。自20世纪90年代开始,就有研究尝试将DHA添加在儿童营养品中,如婴幼儿配方奶粉。人体内的DHA主要来源于食物,然而并非所有进入人体的DHA都会被吸收利用,饮食搭配、烹饪手段、脂质结构等因素都会影响DHA的吸收利用,因此不仅仅要关注食品中DHA的含量,还要注重DHA的生物利用度。本文以DHA为例,从DHA生物利用度的角度,分析食品中营养强化的价值,从天然食品和人工富集食品两个方面介绍了DHA的食品来源,综述了影响DHA食品生物利用度的因素和改善方式,以期为准营养提供参考依据。

## 1 DHA的食品来源

### 1.1 纯天然食品来源

传统DHA天然来源是深海鱼油,金枪鱼油中DHA含量高达26%~37%,鲑鲈鱼油中DHA含量达18%<sup>[16]</sup>,南极磷虾油中的DHA含量也达到9.3%~14.2%<sup>[17]</sup>。由于深海鱼油腥味较大且易受到有机氯农药的影响,同时过度捕捞深海鱼类资源会影响生态可持续发展,近些年来研究者在不断寻找深海鱼油的替代品。Gupta等<sup>[18]</sup>研究发现深海鱼通过食用海洋微藻在体内积累DHA,大多数微藻中的DHA含量丰富,尤其是裂壶藻,其脂质中DHA含量高达35%,可以媲美深海鱼油的DHA含量(见表1)。目前微藻类在食品行业的应用还较少,具有较大开发前景<sup>[19]</sup>。

表 1 不同微藻中多不饱和脂肪酸和 DHA 相对含量

微藻	多不饱和脂肪酸/%	DHA/%	参考文献
红色赤潮藻	42.59	30.46	[20]
三角褐指藻	43.95	1.12	[21]
裂壶藻	-	35.09	[22]
微小原甲藻	62.30	28.10	[23]
球等鞭金藻	66.40	33.60	[23]

## 1.2 人工富集 DHA 食品

### 1.2.1 “一步式”生产 DHA 食品

“一步式”生产 DHA 食品是指通过物理、化学或生物方法使该物质本身所含有的 DHA 含量提高,其中一种是将 DHA 以“添加剂”的形式添加到食品中并保持其活性,从而达到营养强化的目的,另一种是通过生物工程的方法得到 DHA 强化产品。

婴幼儿对 DHA 的需求较大,乳品是他们的主要摄入食品,而 DHA 强化牛奶/奶粉可以较好地满足婴幼儿对 DHA 的需求量。“一步式”生产是常见的 DHA 牛奶生产方式,即直接将富含 DHA 的鱼油粉或是微藻粉添加到牛奶中。1994 年,联合国粮农组织和世界卫生组织 (FAO/WHO) 正式推荐在婴幼儿配方奶粉中添加 DHA<sup>[24]</sup>。我国乳品企业已生产多种 DHA 强化牛奶,有些产品中还额外添加花生四烯酸 (ARA)。

通过生物胁迫等方法可以提高微藻的 DHA 含量。如:Liu 等<sup>[25]</sup>采用紫外照射培育使破囊壶藻的 DHA 含量提高了 1.9 倍;冯倩等<sup>[26]</sup>通过调整培养时的碳氮源含量和盐度有效提高了黄丝藻的脂肪酸含量,在最佳条件下脂肪酸含量可达 27.03%,与最初相比提高了 3.4 倍。

除了通过人工方式增加食品中原有的 DHA 含量之外,还可通过合成生物学技术使原本不含 DHA 的食品产生 DHA。刘华梁等<sup>[27]</sup>通过构建独立表达框得到 p-DHA 植物表达载体,随后通过农杆菌介导法将该载体与“精华 2 号”水稻结合继而生产得到再生菌株,且再生菌株是符合目标的转基因菌株。由此可见,DHA 水稻生产技术是可以实现的,未来人们或许通过日常主食就可以获得 DHA 的补充。

### 1.2.2 “两步式”生产 DHA 产品

“两步式”生产 DHA 营养强化型食品是指通过在饲料中添加富含 DHA 的物质,再经由动物代谢作用产生富含 DHA 的产物,例如常见的 DHA 鸡蛋和原生 DHA 牛奶,以及市面上宣传的原生 DHA 产品。不同于“一步式”生产,“两步式”生产利用了动物的

代谢过程,可以一定程度上降低 DHA 的氧化并且减少 DHA 添加所产生的异味<sup>[28]</sup>。

鸡蛋富含蛋白质、脂质和其他营养元素,特别是含有多人体必需氨基酸,对于维持人类膳食结构平衡有着重要的作用。目前主要通过饲料中直接添加裂壶藻粉、奇亚籽、亚麻籽等富含 DHA 或  $\alpha$ -亚麻酸的物质增加鸡蛋中的 DHA 含量,得到 DHA 营养强化鸡蛋,添加的物质不同得到的鸡蛋中 DHA 含量也不同。表 2 是不同日粮添加物对鸡蛋中 DHA 相对含量的影响。

表 2 不同日粮添加物对鸡蛋中 DHA 相对含量的影响

日粮添加物	饲养时间	DHA/%	$\omega-6/\omega-3$	参考文献
2% 裂壶藻粉	25 d	4.60 ± 0.35	-	[29]
3% 鱼油	30 d	1.45 ± 0.28	-	[30]
18% 奇亚籽	8 周	1.83	2.36 ± 0.34	[31]
8% 微藻	4 周	4.30 ± 0.17	3.44 ± 0.05	[32]
8% 亚麻籽	4 周	4.02 ± 0.35	2.35 ± 0.14	[32]
10% 亚麻籽 + 1% 鱼油	1 周	0.97 ± 0.07	5.17 ± 0.36	[33]
10% 亚麻籽 + 5% 去皮双低菜籽	1 周	0.92 ± 0.05	4.51 ± 0.21	[33]
10% 未去皮双低油菜籽 + 5% 亚麻籽	1 周	0.82 ± 0.04	6.41 ± 0.31	[33]
10% 去皮双低油菜籽 + 5% 亚麻籽	1 周	0.79 ± 0.05	6.50 ± 0.14	[33]
普通鸡蛋	-	0.78 ± 0.42	-	[30]

从表 2 可以看出,日粮中添加富含 DHA 或  $\alpha$ -亚麻酸的物质后,鸡蛋中的 DHA 含量均有提高,达到了 DHA 营养强化的目的,同时由于鸡蛋中  $\omega-3$  多不饱和脂肪酸比例的升高, $\omega-6/\omega-3$  多不饱和脂肪酸的比值有所下降。“两步式”生产得到的 DHA 强化鸡蛋可以将微藻中的 TG-DHA 转化为蛋黄中的 PC-DHA,PC-DHA 更易通过血脑屏障被人体吸收利用。

“两步式”生产也是常见的 DHA 牛奶生产方式,是指将富含 DHA 的物质添加在奶牛饲料中经由奶牛的代谢产生 DHA 牛奶。反刍动物的瘤胃微生物对饲料中多不饱和脂肪酸氢化过程中产生的一些中间产物可直接积累到动物产品如肌肉和乳汁中<sup>[34]</sup>。陈世贤等<sup>[35]</sup>研究表明,直接在牛奶中添加微藻粉会影响牛奶的风味,且随着储藏时间的延长,其异味越发明显,在不影响风味的条件下 DHA 最大添加量为 20 mg/100 mL;然而在奶牛饲料中添加富含 DHA 的物质得到的天然 DHA 牛奶风味和口感与普通牛奶相差无二,不仅没有腥味,还保留了牛奶原有的奶香味,对于消费者而言更容易接受<sup>[36]</sup>。因

此,较直接添加 DHA 而言,通过在奶牛日粮中添加 DHA 再经由代谢过程得到的 DHA 牛奶风味更佳。

## 2 DHA 生物利用度的影响因素

### 2.1 存在形式和结合位点

人体内 DHA 的来源主要是食物,一是直接摄入 DHA,二是摄入  $\alpha$ -亚麻酸等物质再经由体内消化作用转化为 DHA。生物利用度是指一种营养物质可以被吸收和运输到体循环或生理活动部位的程度。DHA 的生物利用度通常被认为与其存在形式有关,不同形式 DHA 的生物利用度由高到低依次为 PL-DHA > TG-DHA > FFA-DHA > EE-DHA。微藻油和鱼油中 DHA 主要为 TG-DHA<sup>[37]</sup>, Stiefvatter 等<sup>[38]</sup>比较了微藻和鱼油中 DHA 的生物利用度,其在健康人群饮食中添加三角褐指藻,对照组饮食中添加相同 DHA 含量的鱼油,测定人体 DHA 含量,结果发现两组人体 DHA 含量有着相似的增加程度,表明三角褐指藻的脂肪酸与鱼油脂肪酸相似,可以被人体消化吸收。研究发现,磷虾油中 DHA 的生物利用度高于磷虾粉和海水鱼油,其中磷虾油和磷虾粉中多为 PL-DHA,海水鱼油中多为 TG-DHA,经过加工浓缩后的鱼油产品中则多为 EE-DHA<sup>[39]</sup>。

研究表明,DHA 在甘油三酯中的位置分布不仅影响其氧化稳定性还会影响生物利用度<sup>[40]</sup>。在 sn-2 位酯化的 LPC-DHA 很容易迁移到 sn-1 位上<sup>[41]</sup>。实验证明 sn-2 位上的 LPC-DHA 较 FFA-DHA 更易被小鼠大脑吸收<sup>[42]</sup>,sn-2 位上的 TG-DHA 在吸收度和利用率上都高于其他位置分布的<sup>[43]</sup>。

### 2.2 氧化程度

DHA 的氧化会影响 DHA 产品的风味和效果。研究显示,经过 10 周氧化,PL-DHA 损失不到 10%,EE-DHA 损失 64%,而 TG-DHA 损失 97%<sup>[44]</sup>。DHA 的不饱和双键被氧化,不仅会降低 DHA 的含量还会影响其功能活性,脂质过氧化物修饰 DHA 后极大地降低了 DHA 的生物利用度,另外 DHA 氧化产生的脂质过氧化物会对人体产生一定的危害,当脂质过氧化物积累到一定水平后甚至会导致细胞死亡。氧化过程使活性氧水平增加,大量的活性氧累积会产生氧化应激,造成细胞损伤<sup>[45]</sup>,继而诱发癌症、糖尿病和类风湿性关节炎等疾病。富含 DHA 的鱼油在氧化过程中会产生丙烯醛,具有细胞毒性<sup>[46]</sup>。

## 3 提高 DHA 生物利用度的方式

除了提高食品本身的 DHA 含量,还可以通过膳食搭配、乳化和微胶囊化、加工及烹饪手段选择等方式提高食品中 DHA 的生物利用度,从而使更多的

DHA 被人体吸收利用。

### 3.1 膳食搭配

通过体外动态胃肠道模型发现胃消化会加速脂质的氧化过程<sup>[47]</sup>。除此之外,DHA 氧化的副产物会与食物中组分结合从而形成大分子,难以被消化吸收,降低了 DHA 的生物利用度<sup>[48]</sup>。使用多酚类抗氧化剂可以保护 DHA,避免其消化过程中被氧化。因此,通过膳食搭配可以一定程度提高 DHA 的生物利用度。

### 3.2 乳化和微胶囊化

近年来,有研究通过乳化、微胶囊化等方法提高 DHA 在人体内的生物利用度<sup>[49]</sup>。Hussey 等<sup>[50]</sup>研究发现,适当的乳化可以将 EE-DHA 生物利用度提高 13 倍。Yang 等<sup>[51]</sup>将 DHA 鱼油分散在水中并添加适当的乳化剂形成微乳剂,使 DHA 的生物利用度从 9.7% 显著提高到 18.2%。微胶囊化是指将乳化剂和油脂结合再由壁材包埋的一种技术,可以一定程度上减少食品营养成分的损失<sup>[52]</sup>,被用来缓解油脂的氧化。Solomando 等<sup>[53]</sup>通过单层、多层微胶囊化处理鱼油并应用到香肠中,人工模拟胃肠消化,观察 DHA 含量变化,结果发现,与对照组相比,无论是单层微胶囊化还是多层微胶囊化都能较好地提高 DHA 的生物利用度(单层微胶囊化提高 68%,多层微胶囊化提高 78%)。通过预处理将 DHA 包埋再进行加工可以为未来开发效果更佳的 DHA 营养强化食品提供思路。

### 3.3 加工及烹饪手段选择

鸡蛋是日常饮食中常见的食品,食用鸡蛋多以煎、炒、煮的方式,然而大多数烹饪方式都会造成 DHA 的损失。张瑞<sup>[54]</sup>、王瑶瑶<sup>[55]</sup>等采用不同的方式烹饪鸡蛋继而对鸡蛋中的 DHA 进行定量检测,计算 DHA 的损失率。结果表明,对鸡蛋的处理方式越简单,鸡蛋中的 DHA 保留情况越好,同时,温度越低,对 DHA 的破坏越少,这与 DHA 的结构有关,其含有的“戊烯双键”使它易受温度、光、氧气等的影响<sup>[56]</sup>。

将采用喷雾干燥法制备的鱼油微胶囊包封在肉制品中可以有效增加其中  $\omega$ -3 多不饱和脂肪酸的含量,但将添加单层微胶囊鱼油和多层微胶囊鱼油的肉制品分别烹饪加工并模拟人体胃肠消化,发现加工手段在一定程度上降低了 DHA 的含量<sup>[57]</sup>。

## 4 结论与展望

“两步式”生产得到的 DHA 营养强化型食品虽然较“一步式”DHA 营养强化型食品有更少的异味和不易氧化的特性,但是增加了生产的流程,也造成产品生产时间的延长并且增加了生态系统中的碳循

环,这对于实现“碳中和”是不利的,因此探讨“两步式”生产 DHA 营养强化型食品的优势和劣势尤为重要,可为未来的产品研发奠定基础。DHA 极易氧化从而影响其活性,目前对于 DHA 氧化后的活性关注较少,因此后续可以关注氧化后的 DHA 分析和利用。DHA 在海产品中含量丰富的同时也容易氧化,所以未来可以将 DHA 的活性作为一种指标去评估海产品的新鲜度。DHA 氧化损失的同时会产生有害物质,烹饪手段对其氧化程度有极大影响,减少加工可以很好地保留其活性。

基于生物利用度的评估从动物模型发展到目前的体外细胞模型,主要通过模型模拟人体消化吸收从而得到 DHA 的生物利用度,但是目前对于 DHA 生物利用度的研究过于笼统,对具有差异性群体的研究较少,对于不同年龄段人群,对于 DHA 的利用目的不同所需要的 DHA 类型也不同,如:婴幼儿需要 DHA 促进神经系统的发育,因此 PL-DHA 最适合;而对于老年人来讲,DHA 可以减少动脉粥样硬化的发生,各种类型的 DHA 均适合。后续可以利用精准模型针对不同人群开展精准营养研究,从而为不同人群乃至个体的精准营养提供数据参考。同时 DHA 的吸收率与膳食结构有关,可以通过改变体外模型的培养条件模拟不同膳食结构下摄入 DHA 的情况,进一步通过调整膳食结构找到最佳的膳食搭配,从而使 DHA 被更大程度地吸收利用。

在大食物观的理念下,DHA 营养强化型食品扩大了 DHA 的食物来源,可以满足精准营养的需求,然而 DHA 也不能过度摄入,过度摄入 DHA 会抑制血小板凝聚和抗血栓作用,因此适度补充和适量摄入很重要。食品产业的高质量发展中,营养健康食品的比例会更大,尤其是功能食品会有更大的发展空间,未来 DHA 营养强化型食品将会在婴幼儿饮食中占据一定市场。未来食品的消费趋势会随着消费需求的变化和创新能力的提升,发展为以“个体”健康状态为着眼点的“精准营养”,DHA 营养强化型食品通过精准制造个性化食品发挥其功能作用,同时提高 DHA 的生物利用度。目前市场上已有少量 DHA 营养强化食品,然而种类并不丰富,未来可以从婴幼儿零食入手,丰富 DHA 营养强化型食品的种类。

#### 参考文献:

[1] KITSON A P, METHEREL A H, CHEN C T, et al. Effect of dietary docosahexaenoic acid (DHA) in phospholipids or triglycerides on brain DHA uptake and accretion [J]. J Nutr Biochem, 2016, 33: 91-102.

[2] FEWTRELL M S, MORLEY R, ABBOTT R A, et al.

Double-blind, randomized trial of long-chain polyunsaturated fatty acid supplementation in formula fed to preterm infants [J]. Pediatrics, 2002, 110: 73-82.

[3] UAUY R, ROJAS C, LLANOS A, et al. Dietary essential fatty acids in early postnatal life: long-term outcomes [J]. Nestle Nutr Workshop Ser Pediatr Program, 2005, 55: 101-133.

[4] GHARAMI K, DAS M, DAS S. Essential role of docosahexaenoic acid towards development of a smarter brain [J]. Neurochem Int, 2015, 89: 51-62.

[5] STONEHOUSE W, CONLON C A, PODD J, et al. DHA supplementation improved both memory and reaction time in healthy young adults: a randomized controlled trial [J]. Am J Clin Nutr, 2013, 97(5): 1134-1143.

[6] SUGASINI D, THOMAS R, YALAGALA P C R, et al. Dietary docosahexaenoic acid (DHA) as lysophosphatidylcholine, but not as free acid, enriches brain DHA and improves memory in adult mice [J/OL]. Sci Rep, 2017, 7(1): 11263 [2022-07-27]. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11766-0>.

[7] WANG D D, WU F, WEN M, et al. Replenishment of docosahexaenoic acid (DHA) in dietary n-3-deficient mice fed DHA in triglycerides or phosphatidylcholines after weaning [J]. J Food Sci, 2018, 83(2): 481-488.

[8] YURKO-MAURO K, KRALOVEC J, BAILEY-HALL E, et al. Similar eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid plasma levels achieved with fish oil or krill oil in a randomized double-blind four-week bioavailability study [J/OL]. Lipids Health Dis, 2015, 14: 99 [2022-07-27]. <https://doi.org/10.1186/s12944-015-0109-z>.

[9] VAN WIJK 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.

[10] INNIS S M. Dietary (n-3) fatty acids and brain development [J]. J Nutr, 2007, 137(4): 855-859.

[11] VALENZUELA A, NIETO S, SANHUEZA J, et al. Supplementing female rats with DHA-lysophosphatidylcholine increases docosahexaenoic acid and acetylcholine contents in the brain and improves the memory and learning capabilities of the pups [J]. Grasas Y Aceites, 2010, 61(1): 16-23.

[12] HARRIS M A, REECE M S, MCGREGOR J A, et al. The effect of omega-3 docosahexaenoic acid supplementation on gestational length: randomized trial of supplementation compared to nutrition education for increasing n-3 intake from foods [J/OL]. Biomed Res Int, 2015, 2015: 123078 [2022-07-27]. <https://doi.org/10.1155/2015/123078>.

- [13] PHANG M, SKILTON M R. Marine *omega*-3 fatty acids, complications of pregnancy and maternal risk factors for offspring cardio-metabolic disease[J/OL]. *Mar Drugs*, 2018, 16(5): 138[2022-07-27]. <https://doi.org/10.3390/md16050138>.
- [14] MOZURKEWICH E L, BERMAN D R, VAHRATIAN A, et al. Effect of prenatal EPA and DHA on maternal and umbilical cord blood cytokines[J/OL]. *BMC Pregnancy Childbirth*, 2018, 18(1): 261[2022-07-27]. <https://doi.org/10.1186/s12884-018-1899-6>.
- [15] MUN J G, LEGETTE L L, IKONTE C J, et al. Choline and DHA in maternal and infant nutrition: synergistic implications in brain and eye health[J/OL]. *Nutrients*, 2019, 11(5): 1125[2022-07-27]. <https://doi.org/10.3390/nu11051125>.
- [16] 付兴周, 路志芳, 申海燕, 等. 富集 DHA 鸡蛋的研究进展[J]. *中国家禽*, 2016, 38(9): 41-44.
- [17] 胥亚夫, 韩雨哲, 赵月. 富含磷脂的南极磷虾油提取工艺研究[J]. *渔业研究*, 2020, 42: 63-69.
- [18] GUPTA A, BARROW C J, PURI M. *Omega*-3 biotechnology: *Thraustochytrids* as a novel source of *omega*-3 oils[J]. *Biotechnol Adv*, 2012, 30(6): 1733-1745.
- [19] YAMAGATA K. Prevention of cardiovascular disease through modulation of endothelial cell function by dietary seaweed intake[J/OL]. *Phytomed Plus*, 2021, 1(2): 100026[2022-07-27]. <https://doi.org/10.1016/j.phyplu.2021.100026>.
- [20] 刘云, 陈田田, 宋书群, 等. 不同氮浓度条件下红色赤潮藻脂肪酸含量及组成特征[J]. *海洋与湖沼*, 2019, 50(2): 301-307.
- [21] QIAO H, CONG C, SUN C, et al. Effect of culture conditions on growth, fatty acid composition and DHA/EPA ratio of *Phaeodactylum tricornutum* [J]. *Aquaculture*, 2016, 452: 311-317.
- [22] 荣辉, 吴兵兵, 杨贤庆, 等. 响应面优化水酶法提取裂壶藻油的工艺[J]. *中国油脂*, 2018, 43(2): 98-103.
- [23] SUH S S, KIM S J, HWANG J, et al. Fatty acid methyl ester profiles and nutritive values of 20 marine microalgae in Korea[J]. *Asian Pac J Trop Med*, 2015, 8(3): 191-196.
- [24] 杨晓波. DHA 在婴幼儿奶粉中的应用技术专利分析[J]. *科技创新与应用*, 2020(21): 23-24.
- [25] LIU L, HU Z, LI S, et al. Comparative transcriptomic analysis uncovers genes responsible for the DHA enhancement in the mutant *Aurantiochytrium* sp. [J/OL]. *Microorganisms*, 2020, 8(4): 529[2022-07-27]. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8040529>.
- [26] 冯倩, 王琳, 蔡忠贞, 等. 碳氮源和盐度对异养黄丝藻脂肪酸产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(12): 98-103.
- [27] 刘华梁, 杜军霞, 付雨欣, 等. EPA 和 DHA 合成表达载体构建及对水稻的遗传转化[J/OL]. *分子植物育种*, 2021:1-17[2022-07-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20210422.1325.006.html>.
- [28] 何平, 汪志明. 婴幼儿配方奶粉的发展趋势和最新动态[J]. *中国供销商情: 乳业导刊*, 2005(8): 25-27.
- [29] 李浩洋, 班甲, 陈骏佳, 等. 日粮添加裂壶藻对鸡蛋 DHA 含量、品质及蛋鸡生产性能的影响[J]. *中国饲料*, 2015(11): 37-39, 42.
- [30] 喻礼怀, 刘颖, 李志兵, 等. 深海鱼油对花凤鸡产蛋性能和鸡蛋脂肪酸组成的影响[J]. *中国家禽*, 2014, 36(15): 29-32.
- [31] 王姿颐. 日粮添加奇亚籽及功能性添加剂对生产 DHA 营养强化鸡蛋性质研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2021.
- [32] 吴永保, 杨凌云, 闫海洁, 等. 饲料中添加微藻和亚麻籽提高鸡蛋黄中  $\omega$ -3 多不饱和脂肪酸含量对比研究[J]. *动物营养学报*, 2015, 27(10): 3188-3197.
- [33] 赵丽娜. 不同原料中的  $n$ -3 多不饱和脂肪酸在鸡蛋中富集规律及对蛋鸡生产性能和鸡蛋品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
- [34] 王雪, 闫素梅. 多不饱和脂肪酸对动物脂类代谢的调节作用与机制[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(6): 2471-2478.
- [35] 陈世贤, 安颖, 赵子夫, 等. DHA 的添加对牛奶风味的影响[J]. *农产品加工: 学刊*, 2011(12): 33-36.
- [36] 贾琳, 巴根纳, 樊启程, 等. 天然 DHA 牛奶产品开发[J]. *畜牧与饲料科学*, 2016, 37: 46-48.
- [37] SHAHIDI F, AMBIGAIPALAN P. *Omega*-3 polyunsaturated fatty acids and their health benefits[J]. *Annu Rev Food Sci Technol*, 2018, 9: 345-381.
- [38] STIEFVATTER L, LEHNERT K, FRICK K, et al. Oral bioavailability of *omega*-3 fatty acids and carotenoids from the microalgae *Phaeodactylum tricornutum* in healthy young adults[J/OL]. *Mar Drugs*, 2021, 19(12): 700[2022-07-27]. <https://doi.org/10.3390/md19120700>.
- [39] KÖHLER A, SARKKINEN E, TAPOLA N, et al. Bioavailability of fatty acids from krill oil, krill meal and fish oil in healthy subjects; a randomized, single-dose, cross-over trial[J/OL]. *Lipids Health Dis*, 2015, 14: 19[2022-07-27]. <https://doi.org/10.1186/s12944-015-0015-4>.
- [40] WIJESUNDERA C, CECCATO C, WATKINS P, et al. Docosahexaenoic acid is more stable to oxidation when located at the sn-2 position of triacylglycerol compared to sn-1(3)[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2008, 85(6): 543-548.
- [41] LO VAN A, SAKAYORI N, HACHEM M, et al. Mechanisms of DHA transport to the brain and potential

- therapy to neurodegenerative diseases [J]. *Biochimie*, 2016, 130: 163 – 167.
- [42] THIES F, PILLON C, MOLIERE P, et al. Preferential incorporation of sn - 2 lysoPC DHA over unesterified DHA in the young rat brain [J]. *Am J Physiol*, 1994, 267: R1273 – R1279.
- [43] CHRISTENSEN M S, HØY C E, BECKER C C, et al. Intestinal absorption and lymphatic transport of eicosapentaenoic (EPA), docosahexaenoic (DHA), and decanoic acids: dependence on intramolecular triacylglycerol structure [J]. *Am J Clin Nutr*, 1995, 61(1): 56 – 61.
- [44] SONG J H, INOUE Y, MIYAZAWA T. Oxidative stability of docosahexaenoic acid - containing oils in the form of phospholipids, triacylglycerols, and ethyl esters [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 1997, 61(12): 2085 – 2088.
- [45] HSU Y M, YIN M C. EPA or DHA enhanced oxidative stress and aging protein expression in brain of *d* - galactose treated mice [J/OL]. *Biomedicine*, 2016, 6(3): 17 [2022 - 07 - 27]. <https://doi.org/10.7603/s40681-016-0017-1>.
- [46] KAZUO M. Prevention of fish oil oxidation [J]. *J Oleo Sci*, 2019, 68(1): 1 – 11.
- [47] ROM O, JERIES H, HAYEK T, et al. Supplementation with linoleic acid - rich soybean oil stimulates macrophage foam cell formation via increased oxidative stress and diacylglycerol acyltransferase1 - mediated triglyceride biosynthesis [J]. *Biofactors*, 2017, 43(1): 100 – 116.
- [48] DASILVA G, BOLLER M, MEDINA I, et al. Relative levels of dietary EPA and DHA impact gastric oxidation and essential fatty acid uptake [J]. *J Nutr Biochem*, 2018, 55: 68 – 75.
- [49] HAUG I J, SAGMO L B, ZEISS D, et al. Bioavailability of EPA and DHA delivered by gelled emulsions and soft capsules [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2011, 113(2): 137 – 145.
- [50] HUSSEY E K, PORTELLI S, FOSSLER M J, et al. Relative bioavailability of an emulsion formulation for *omega* - 3 - acid ethyl esters compared to the commercially available formulation: a randomized, parallel - group, single - dose study followed by repeat dosing in healthy volunteers [J]. *Clin Pharmacol Drug Dev*, 2012, 1(1): 14 – 23.
- [51] YANG J, CIFTCI O N. In vitro bioaccessibility of fish oil - loaded hollow solid lipid micro - and nanoparticles [J]. *Food Funct*, 2020, 11(10): 8637 – 8647.
- [52] 卢艳慧, 李迎秋. 微胶囊技术的研究进展及在食品行业中的应用 [J]. *中国调味品*, 2021, 46(3): 171 – 174.
- [53] SOLOMANDO J C, ANTEQUERA T, PEREZ - PALACIOS T. Lipid digestion products in meat derivatives enriched with fish oil microcapsules [J/OL]. *J Funct Foods*, 2020, 68: 103916 [2022 - 07 - 27]. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103916>.
- [54] 张瑞, 何丽丽, 郭莹, 等.  $\omega$  - 3 脂肪酸强化鸡蛋在不同烹饪方法中的营养损失 [J]. *中国食物与营养*, 2015, 21(8): 64 – 68.
- [55] 王瑶瑶, 吴凡, 叶根军, 等. 不同加热条件对  $\omega$  - 3 鸡蛋中脂肪酸含量的影响 [J]. *食品科学技术学报*, 2021, 39(3): 111 – 121.
- [56] 李永海. 裂殖壶菌种子培养和发酵生产 DHA 工艺优化 [D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2019.
- [57] SOLOMANDO J C, ANTEQUERA T, PEREZ - PALACIOS T. Lipid digestion and oxidative stability in  $\omega$  - 3 - enriched meat model systems: effect of fish oil microcapsules and processing or culinary cooking [J/OL]. *Food Chem*, 2020, 328: 127125 [2022 - 07 - 27]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127125>.

## 更 正

发表于《中国油脂》2023 年第 48 卷第 9 期 24 ~ 29 页的“储藏条件对油莎豆及其油脂品质的影响”一文,遗漏了基金项目。现将第 24 页的脚注更正为:

收稿日期:2022 - 04 - 26;修回日期:2023 - 04 - 24

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD1002605)

作者简介:李晓丹(1997),女,硕士研究生,研究方向为油脂

加工理论与技术(E-mail)Li17852109320@163.com。

通信作者:张振山,副教授(E-mail)zzsan010@126.com。

特此更正!

中国油脂杂志社  
2023 - 11 - 29