

# 微藻油和鱼油中DHA的特性及应用研究进展

陈殊贤<sup>1</sup>, 郑晓辉<sup>2</sup>

(1.润科生物工程(福建)有限公司北京研发中心, 北京 101300; 2.润科生物工程(福建)有限公司, 福建 漳州 363500)

**摘要:** 二十二碳六稀酸(DHA)属于 $\omega$ -3多不饱和脂肪酸, 对人类健康有特殊的作用和影响。目前, DHA的主要来源是鱼油和微藻油。在鱼油中DHA以乙酯型式存在, 而微藻油中则是以甘油三酯的型式存在。甘油三酯型DHA相对于乙酯型而言, 在人体内的代谢吸收率和生物利用率、稳定性、安全性等方面都有很大的优势; 同时, 鱼油和藻油在气味、EPA及胆固醇含量、重金属汞和持续性有机污染物等问题上也存在差别。在水资源和鱼类资源日趋紧缺的今天, 发展可持续稳定生产的富含DHA的藻油将是未来食品行业一个重要的发展趋势。

**关键词:** DHA; 鱼油; 微藻油; 安全性; 污染问题

## Research Progress in Characteristics and Applications of DHA in Microalga Oil and Fish Oil

CHEN Shu-xian<sup>1</sup>, ZHENG Xiao-hui<sup>2</sup>

(1. Research Centre of Runke Biological Engineering (Fujian) Co. Ltd., Beijing 101300, China;

2. Runke Biological Engineering (Fujian) Co. Ltd., Zhangzhou 363500, China)

**Abstract:** Docosahexaenoic acid (DHA) belongs to  $\omega$ -3 polyunsaturated fatty acid family and is beneficial for human health. The main sources of DHA currently include fish oil and microalgal oil. In fish oil, DHA exists as ethyl ester form in microalgal oil, and DHA exists as triglyceride form. DHA in triglyceride form is advantageous when compared with its ethyl ester form in term of metabolic absorption efficiency, bioavailability, stability and safety in human body. Moreover, fish oil and microalgal oil are also different in several aspects such as smell, EPA and cholesterol contents, and the contamination of heavy metals and persistent organic pollutants. Therefore, the sustainable production and supply of DHA by microalgae will be the future trend in food industry due to the limited availability of water and fish resources.

**Key words:** docosahexaenoic acid (DHA); fish oil; microalgal oil; safety; pollution

中图分类号: TS221

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2013)21-0439-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201321085

二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)系 $\omega$ -3多不饱和脂肪酸( $\omega$ -3 polyunsaturated fatty acid,  $\omega$ -3PUFA)。由于具有6个不饱和键的特有结构, 使它对人类健康有特殊的作用和影响。目前, DHA的主要来源是鱼油和微藻油。而对鱼油和微藻油安全性的思考是一直以来备受争议的问题。

## 1 DHA的功能

DHA是人体必需的多不饱和脂肪酸, 对人体有重要的生理调节功能。是大脑、神经、视觉细胞中重要的脂肪酸成分, 能促进婴幼儿的脑部和视力的机能发育, 有利于智力、学习和记忆能力的提高。Boucher等<sup>[1]</sup>的研究进一步证实了DHA对儿童的记忆力有积极的作用。DHA还能够提高婴幼儿视觉的敏锐度<sup>[2-4]</sup>、促进婴幼儿的生长发

育<sup>[5-6]</sup>、提高婴幼儿认知能力的发展。可是Smithers等<sup>[7]</sup>的研究却发现, 给早产儿补充一定的DHA, 并不能提高所有婴儿的认知能力的发展, 对男孩几乎没有作用。研究表明这主要是由于所提供的DHA的量没有使男婴的红细胞达到饱和。所以, 对于早产男婴来说, 应该适当的提高其DHA的摄入量。同时, DHA还影响婴幼儿的行为能力<sup>[8]</sup>、可以降低婴幼儿患过敏症的危险<sup>[9]</sup>, 给孕妇补充一定量的DHA, 能显著降低婴幼儿感冒的发生率<sup>[10]</sup>及减少婴幼儿肥胖症的发生<sup>[11]</sup>, 同时, 在幼年补充一定的DHA对其日后的健康起着非常重要的作用, 如: 预防代谢紊乱, 提高免疫功能和生殖健康<sup>[12]</sup>。

此外, DHA对成年人也具有重要的保健作用。它能够降低血压、降血脂、降胆固醇。澳大利亚科学家Morit等<sup>[13]</sup>曾在《美国高血压杂志》上发表论文指出, DHA有降血压的功能, 并且可以调节人体内血脂和脂蛋白的正常代谢,

收稿日期: 2012-12-06

作者简介: 陈殊贤(1986—), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为功能性食品添加剂。E-mail: chenshuxian882000@163.com

降低血液黏稠度和血液中胆固醇水平,增加高密度脂蛋白含量。DHA还能够减少血栓形成,日本科学家在《血栓形成研究》杂志中指出,DHA可有效抑制血栓的形成,起到防止心血管疾病发生的作用<sup>[14]</sup>。同时,DHA在延缓衰老<sup>[15]</sup>、预防神经性疾病(如预防老年痴呆<sup>[16-17]</sup>、减缓躁郁症病情<sup>[18]</sup>等)、抗癌、抑制肿瘤<sup>[19-20]</sup>、预防骨质疏松<sup>[21]</sup>、预防糖尿病<sup>[22]</sup>、抗炎<sup>[23-35]</sup>等方面也有明显的作用。对于孕妇,还可以降低孕妇产后忧郁症的发生<sup>[26]</sup>等。

## 2 DHA的主要来源和区别

目前,市场DHA的供给来源主要是鱼油和微藻油。但这两种来源的DHA存在着很大差别。

### 2.1 DHA在鱼油和微藻油中的含量及存在形式

鱼油中DHA的存在形式主要分两种:即乙酯型(EE)和甘油三酯型(TG)。天然鱼油中DHA以甘油三酯形式存在,但一般含量偏低,约12%左右(大部分人认为鱼就是DHA的主要来源,而事实是,鱼类之所以含有DHA,是因为鱼在海洋中食用了富含DHA的微藻和相关浮游生物,其DHA通过食物链传递从而在鱼类体内累积下来。因此直接服用藻类DHA不仅更直接,而且也不会有鱼油独特的腥味)。但作为保健品和药物的开发利用,鱼油的纯度往往不能满足人们的要求。因此需要采用转酯化的方法将鱼油转酯化成鱼油乙酯以丰富鱼油中DHA的含量<sup>[27]</sup>。工业上多用蒸馏法将鱼油大部分脂肪经过分子蒸馏设备酯化,这种方法可以把DHA的含量提高到60%~65%,因此市售鱼油产品中的DHA基本上是乙酯型DHA。

天然微藻中的DHA是以甘油三酯的形式存在,由于微藻本身DHA含量高,直接对微藻粉进行萃取,即可达到35%以上的含量,故萃取所得的微藻DHA油脂不需要后续浓缩酯化等处理,DHA在微藻油脂中保持天然的甘油三酯的形式。Boswell等<sup>[28]</sup>认为对于婴儿应用上来说,甘油三酯的形式也是最适合的,因为母乳中的多不饱和脂肪酸(PUFA)是以甘油三酯的形式存在的。

### 2.2 乙酯型DHA与甘油三酯型DHA的比较

#### 2.2.1 不同酯型DHA在人体内的代谢吸收率

人体吸收实验表明,57%的DHA以甘油三酯形式被人体吸收。与之相比,只有21%的DHA以乙酯的形式被吸收<sup>[29]</sup>。甘油三酯型DHA在人体内的吸收率是乙酯型的300%。人体均以甘油三酯的形式储存和运输油脂。这主要是因为人体胰脏和肝脏的主要脂肪酶是专一性水解甘油三酯,不能有效水解乙酯来释放游离脂肪酸以被人体吸收。甘油三酯型DHA进入人体后被胆汁乳化,胰腺脂肪酸水解,甘油三酯型DHA水解产生游离DHA和甘油单酯,这些代谢产物在小肠被吸收并重新转化成甘油三酯

型,然后乳糜微粒作为载体携带这些重组的甘油三酯进入淋巴和血液<sup>[30-31]</sup>。

人体对乙酯型DHA的代谢与甘油三酯型DHA明显不同,乙酯型DHA虽然在胰腺脂肪酶的作用下会水解为游离的DHA和乙醇,但乙酯型的DHA对于消化酶的抗性是甘油三酯型的10~50倍<sup>[32-33]</sup>,故大大降低其水解率。另外,经水解产生的小部分DHA需在肠上皮细胞组合成甘油三酯型,才能进入淋巴和血液循环。甘油三酯型DHA水解后,产生的甘油单酯有助于DHA甘油三酯的重新组合,而乙酯型DHA的水解产物由于不存在甘油单酯,需要从其他途径获得甘油单酯底物,使得其游离DHA重组成甘油三酯的反应代谢延迟,游离的DHA和其他不饱和脂肪酸会逐渐富集并被氧化,给人体造成氧化压力,对健康不利。

可见,相对于甘油三酯DHA来讲,乙酯DHA在人体的吸收、代谢效率要低得多,并且在代谢过程中还会产生氧化压力,给人体带来不利影响。

#### 2.2.2 不同酯型DHA的生物利用率

大量研究表明,人体对甘油三酯型DHA的吸收和生物利用率高于乙酯型。Beckermann等<sup>[34]</sup>的研究指出:乙酯型DHA的生物利用率只为甘油三酯形式的40%。研究也表明,补充甘油三酯型DHA后,血浆和血细胞中的DHA含量更高,淋巴细胞的修复能力也更强。

人体的消化酶是造成这种情况的主要因素。一项研究测定了5种DHA的特异性脂肪酶,结果显示,所有的脂肪酶对甘油三酯型DHA的水解能力都高于乙酯型DHA。因此,消化系统紊乱的人不建议食用乙酯型DHA,该类人群食用乙酯型DHA后容易引起消化不良等反应。

#### 2.2.3 不同酯型DHA的稳定性和安全性

与甘油三酯型DHA相比,乙酯型DHA的稳定性要差得多,极易被氧化,其氧化产物对人体有害<sup>[35]</sup>。鱼油的氧化产物在人体内容易诱导程序性细胞凋亡,从而引致许多慢性疾病,如癌症和神经衰退症等<sup>[36]</sup>。FAO指出,同其他富含多不饱和脂肪酸的油脂相比,鱼油较易被氧化。Song等<sup>[37]</sup>的研究结果表明:经过10周的氧化作用,乙酯型DHA的氧化速率高出甘油三酯型DHA约33%。

因为人体只吸收甘油三酯型DHA,乙酯型DHA要通过肠上皮细胞转化成甘油三酯型DHA再被人体吸收,所产生的代谢产物是乙醇,虽然产生乙醇的含量比较低,但是对于酒精过敏或对酒精耐受性差的人群,尤其是儿童都是不宜的<sup>[38]</sup>。另外其可对机体产生毒副作用,加速对机体细胞的破坏<sup>[39]</sup>,导致胰腺溶菌酶的损伤<sup>[40]</sup>、线粒体功能障碍<sup>[41]</sup>以及对肝细胞的毒副作用<sup>[42]</sup>。鱼油DHA在乙酯化的过程中,由于有机溶剂、化学药品和酶参加反应,容易存在化学品残留和有毒副产品生成的问题,所以食用乙酯型鱼油并不安全。美国国家健康研究所建议应食用以天然甘油三酯型式存在的DHA。

从人体对DHA的代谢情况来看, 乙酯型DHA还存在着功能上的缺陷: 1)乙酯型DHA在代谢过程中作为供能的物质被氧化, 影响了DHA的保健功效。2)乙酯型DHA分解产生乙醇, 对乙醇耐受性差的人易引起一些不良反应, 如过敏症, 尤其不适宜儿童。3)长期以脂肪酸、乙醇为膳食来源, 易引起人体内甘油的缺失或不足, 从而推动人体糖代谢, 这样易造成人体内糖代谢的不平衡而产生副作用。

### 2.3 鱼油和藻油的气味比较

新鲜的海产油脂是无异味或者只存在一种特殊温和气味, 但往往购买的鱼油都会具有鱼腥味。鱼油腥味的产生除了加工过程和微生物及酶的作用外, 主要是由于其所含的多不饱和脂肪酸很容易发生自动氧化反应, 产生难闻的异味物质<sup>[43]</sup>。由于海产品(包括鱼体)能自然分泌一种叫“氧化三甲胺”的化学成分, 氧化三甲胺在细菌和自身酶的作用下可分解出三甲胺、二甲胺等具有强烈腥味的物质。鱼油DHA因有可能产生三甲胺, 有较重的鱼腥味, 这不仅影响了鱼油的感官可接受性, 并且会影响产品的应用, 再者有些异味物质会对人体产生损伤作用。

微藻DHA不含鱼腥味, 只有微藻独特的气味。微藻油富含的DHA为甘油三酯型, 且微藻油为天然油脂, 含有类胡萝卜素等多种天然抗氧化物质, 因此氧化稳定性较高。据报道, DHA含量为10%的微藻油氧化稳定性是鱼油的10倍, 而且DHA含量为25%和42%的微藻油也比DHA含量仅12%的同为甘油三酯的天然鱼油稳定<sup>[44]</sup>。因此藻油DHA具有较好的感官品质, 特别适合于对口味敏感的婴幼儿人群。另外, 由于微藻DHA不存在鱼腥味, 在作为食品营养强化剂添加到食品中时, 不会对原食品载体的风味产生不良的影响。

### 2.4 鱼油和藻油中二十碳五烯酸(EPA)含量

鱼油主要从脂肪含量较高的海鱼中提取, 除了含有DHA, 还含有大量其他长链多不饱和脂肪酸, 如EPA。尽管EPA和DHA均为对一般成年人有益的 $\omega$ -3多不饱和脂肪酸, 它们的作用有较大差别。以健脑、增强记忆力和提高视力为目的的婴幼儿、青少年、孕妇等群体应用以DHA为主、不含或少含EPA的产品, 因为EPA是花生四烯酸(AA)(AA是除DHA外, WHO/FAO认可的另外一种对新生儿神经及视觉系统发育及身体生长发育过程中对细胞调节起很重要作用的多不饱和脂肪酸)的竞争抑制剂<sup>[45]</sup>, 它可以置换细胞膜中的AA, 从而降低婴幼儿对花生四烯酸的吸收量, 阻碍新生儿的生长发育, 故对婴幼儿的生长发育有阻滞作用。相关的研究也表明EPA不利于儿童的生长发育。FAO/WHO专家委员会指出, 婴儿、儿童、成人的总脂和脂肪酸推荐摄入量不同, 不同年龄阶段对DHA和EPA的需要量是不同的, 婴儿则不需要EPA<sup>[46]</sup>。同时, DHA和EPA之间也存在着一定的代谢

竞争, DHA和EPA结合进入磷脂结构中时, 都利用相同的酶进行脂肪酸的酯化, 因此产生竞争<sup>[47]</sup>。FAO/WHO专家委员会报告指出, 为避免鱼油中EPA对婴幼儿生长发育所造成的抑制作用, 添加奶粉中的鱼油, 其DHA:EPA的比例应该不低于10:1。另外, 血小板少或凝血机制有问题的有出血倾向的人及患自身免疫疾患的患者必须慎用含有EPA的产品<sup>[48]</sup>。而从深海鱼油提取DHA则不可避免地带有EPA等对婴幼儿及孕产妇不宜的成分, 且现有工艺很难将它们与DHA彻底分离。基于各项分析、调查和研究结果, 专家及世界卫生组织如世界卫生组织(WHO)、联合国粮农组织(FAO)、欧洲儿童肠胃病及营养学会(ESPGN)、英国营养学会(BNF)、国际脂肪酸和脂质研究协会(ISSFAL)、美国联邦实验生物学会、美国健康研究所、美国健康和社会服务部等建议, EPA含量高的鱼油不应该作为婴幼儿的营养添加剂, 孕期及哺乳期妇女应补充非鱼油来源或低EPA含量的DHA<sup>[49]</sup>。

微藻DHA是通过培养藻种萃取精炼而得, DHA含量高, EPA含量低(DHA:EPA的含量比远大于10:1), 不会对新生儿生长起阻滞作用, 适合不同人群长期服用<sup>[50]</sup>。目前在发达国家, 孕妇、哺乳期妇女和儿童食品中添加的DHA主要来源于微藻油。在美国, 微藻DHA已成为唯一得到FDA认可的儿童DHA补充来源。

### 2.5 鱼油和藻油中的胆固醇含量

虽然, 鱼油中的DHA有降胆固醇的作用, 但是鱼油是动物油, 含有胆固醇。美国农业部国家营养数据库的数据表明: 100g天然鳕鱼油中含有570mg的胆固醇, 鱼油的膳食摄入量每天是1~2g, 相当于每天摄入了6~12mg的胆固醇; 鲑鱼油中的胆固醇含量稍微低一些, 100g鲑鱼中含有485mg的胆固醇, 相当于每天摄入了5~10mg的胆固醇。胆固醇(人体每天从饮食中摄入的胆固醇)的推荐摄入量通常低于300mg<sup>[51]</sup>, 而鱼油提供的胆固醇含量就占了1.6%~3.6%。与之相比, 微藻DHA是纯天然植物性油脂, 其中的胆固醇含量仅占0.19%。

### 2.6 外源污染问题

#### 2.6.1 重金属汞污染

海洋污染是鱼油之患。海洋中汞及其他重金属的污染已成为一个世界性环境问题, 海水中的汞被浮游生物吸收后转变成有机汞, 再通过食物链作用在海水鱼体内积累, 到达人体时其毒性是原来的几十倍, 对人体神经系统特别是对儿童产生破坏作用。美国FDA和美国环保署曾发出通知, 根据美国科学家的多年监测, 海洋鱼类含有大量的甲基汞<sup>[52]</sup>。并且美国FDA警告国民深海鱼的水银(汞)污染问题, 特别是针对育龄、怀孕、哺乳期的妇女和婴幼儿<sup>[53]</sup>。FDA建议这些特别人群每星期只应进食少于340g深海鱼来补充DHA。进食受重金属污染的鱼可能造成孕妇流产或对婴幼儿造成不可逆转的神经缺陷。

而以深海鱼类为原料生产的鱼油,汞的污染自然是无法避免的。最初,人们往往会因为一味追求其保健功效而忽视其中的危害,对于深海鱼油类产品中的汞污染没有引起人们足够的重视。虽然食品法典委员会、欧盟等都对鱼和鱼制品中汞的含量设定了标准,但是针对鱼油产品,对重金属汞的污染的限量标准仍是空白,在鱼油重金属污染监管方面仍缺少相应的依据。

### 2.6.2 有机物污染

持续有机物污染(POPs)是指需要几十年或更长时间才能降解消失的污染物。其包括滴滴涕(DDT)、化学杀虫剂、多氯联苯类物质(PCBs)、二噁英(dioxin)和六氯苯(HCB)等,这些物质可以干扰人体内分泌系统、损害神经系统、影响成年人的生育能力以及诱发和促进癌细胞的生长发育。近年来,海洋环境的污染在加重。研究表明,海洋中的持续性有机物已通过不同的途径累积在深海鱼的脂肪组织中,从而存在鱼油中。如常用作补充 $\omega$ -3不饱和脂肪酸来源的金枪鱼和三文鱼,最容易积累这些毒素。鱼油DHA主要从金枪鱼和鲑等大型鱼的头部和眼窝脂肪中提取,这些毒素最终转化到鱼油中。2003年3月,挪威食品控制局针对持续有机污染物对人体的伤害,建议所有孕妇、儿童停止食用鲑鱼肝脏(鲑鱼也是生产鱼油的主要原料鱼之一)及相关的商业产品<sup>[54]</sup>。

英国Surrey大学在美国《环境科学技术》杂志,德国Jena大学在《欧洲食品科学技术》杂志中均指出鱼油中所含有的POPs及其危害多年来一直被人们所忽视<sup>[55-56]</sup>。孕妇和哺乳期妇女如食用受有机物污染的食物(包括深海鱼),有机物可通过胎盘或母乳,100%累积在胎儿或婴儿体内<sup>[57]</sup>。二噁英可引起孕妇流产、胎儿生殖系统缺陷及降低初生婴儿成活率。六氯苯可引致畸胎或胎儿器官发育不完全,诞生的婴儿有95%的几率患多毛症和皮肤色素沉积。即使是微量污染物,胎儿正在发育的神经系统对其都是非常敏感的,而成人长期摄入这些污染物在体内积累也会产生危害。2002年英国环境科学杂志《光化层》的研究报告指出,英国科学家Jacobs从15个国家随机收集44种不同品牌的鱼油,发现这44个样品中全部含有显著量的持续性有机氯污染物,同时还含有显著量的二噁英和毒杀芬(toxaphene)等有机污染物<sup>[58]</sup>。加拿大科学家发现鱼油中多氯联苯的含量为0.8~793ng/g,很容易超出人体对多氯联苯的耐受值(人体耐受值为20ng/(kg·d))<sup>[59]</sup>。每天进食鱼油或以鱼油为添加剂的食品等于天天在体内累积持续性有机污染物(如DDT)故等同慢性自杀。专家建议:孕妇、哺乳期妇女和儿童、特别是小于5岁的儿童,应该尽量避免食用鱼油及添加有鱼油的食物。按照美国加州第65号法案,鱼油生产厂家必须向消费者说明产品内多氯联苯的含量比例<sup>[60]</sup>。英国的研究报道,5岁以下的儿童如经常性食

用海鱼和鱼油,将很容易就超过WHO所规定的最高有机污染物摄入量<sup>[61]</sup>。并且,这些污染物在体内的半衰期很长,如PCBs在血液中的半衰期为4~12个月,汞的半衰期为70~90d<sup>[62]</sup>。因此,应避免从鱼类或鱼油产品中摄入污染物,特别是儿童和孕妇这类人群<sup>[63]</sup>。目前,对于重金属汞和有机物污染的问题备受大家的重视,尤其是对婴幼儿产品和乳制品的监督和管理的上,各国都采取了相应的措施。针对重金属汞的污染,海湾合作委员会、奥地利、瑞典等国的标准在婴幼儿食品中对汞的含量设定了限量值;针对对多氯联苯和二噁英等有机物污染,欧盟、国际食品法典委员会(CAC)、美国、日本等标准在婴幼儿食品和乳制品中都对其设定了限量值<sup>[64]</sup>。目前婴幼儿食品中的DHA仍来自鱼油和微藻油两种,而鱼油(常带有重金属汞和有机污染物)被认为是主要的污染物来源。

### 2.7 鱼油和藻油DHA的供给量

从鱼体提取的鱼油大约为5%~14%左右。换句话说,20kg的鱼才能提取出1kg的鱼油。鱼油的供给量将远远小于需求量,未来鱼油市场面临资源短缺的风险<sup>[60]</sup>。联合国粮食及农业组织(FAO, 2002)发表的中立研究报告表明:在2010—2015年之内全球鱼油就会紧缺。仅在2010年水产业鱼油需求量便超过鱼油总供给量。

鱼油DHA从深海鱼类中提取,过度捕杀也使全球鱼类数量大大下降,濒临绝种,影响海洋生物的多样化。同时,生物多样性的降低也造成沿岸生态系统的破坏,导致海洋植物的过滤和解毒作用减弱,海洋水质降低,藻类过度增殖。随着人口的增长,人们对DHA的需求量日益增大,长期开发鱼油DHA产品势必会破坏生态环境,影响生态平衡与人类生活环境。

而微藻DHA是从海洋藻类筛选纯化得出优质的藻种,利用生物技术于密闭的系统中进行规模化培养,能进行可持续性生产,不会破坏生态环境,也有效避免了外界污染,是纯天然,安全的植物性DHA。

## 3 微藻油的优势及应用

总而言之,相对于鱼油DHA,微藻DHA更容易被人体吸收及代谢,生物利用度高,且更安全、稳定,属纯天然植物性来源,不含鱼腥味、无海洋污染、不破坏生态环境。在食品安全、营养、健康备受关注的今天,选择可靠的DHA补充来源显得尤为重要。目前,市场上多选择微藻油作为DHA的来源和载体应用于食品行业。

随着生活水平的提高和消费习惯的改变,人们越来越重视自身和家人的健康,微藻DHA功能性食品在推动人类健康的同时也带来理想的经济效益和社会效益。目前,欧美国家对微藻DHA的应用较为广泛,主要应用于食品和保健品中,消费者对于DHA的认知度和认可度较

高。在食品领域的应用主要是在婴幼儿配方食品(婴幼儿配方奶粉和婴幼儿辅助食品)方面。消费者较为熟知的添加DHA的婴幼儿配方奶粉在很多国家已经上市。同时,添加DHA的婴幼儿辅助食品也大量涌现,形成了DHA在婴幼儿配方食品中的应用热潮。与此同时,在国际市场上还出现了DHA鱼类罐头, DHA乳酸饮料,此外还推出了含有DHA的鱼肉香肠、DHA火腿肠、汉堡包、即食酱菜、豆腐、蛋黄酱、面包、糖果、香口胶及DHA鸡蛋等DHA强化食品<sup>[65]</sup>。

我国DHA在食品中的应用还处于起步阶段,某些理论需求依据和一些关键技术点还不成熟。微藻DHA在国内的应用主要集中在婴幼儿配方奶粉中,国内一些著名企业陆续推出添加DHA的产品。同时,微藻DHA在食用油、液态奶、果汁、糖果、饼干、面粉等领域的应用也迅速铺开。微藻DHA在国内的应用市场不断扩大。此外,许多畜牧业、水产养殖业专家和学者也在对DHA的生物学效应进行研究,微藻DHA在饲料(水产饲料、动物饲料等)行业的应用也有着潜在的发展空间。可见,微藻DHA的应用已经成为未来一个重要的发展趋势,发展可持续稳定生产的富含DHA的藻油具有极为广阔的市场应用前景。

#### 参考文献:

- [1] BOUCHER O, BURDEN M J, MUCKLE G, et al. Neurophysiologic and neurobehavioral evidence of beneficial effects of prenatal omega-3 fatty acid intake on memory function at school age[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2011, 93(5): 1025-1037.
- [2] BRADBURY J. Docosahexaenoic acid (DHA): an ancient nutrient for the modern human brain[J]. Nutrients, 2011, 3: 529-554.
- [3] GUESNET P, ALESSANDRI J M. Docosahexaenoic acid (DHA) and the developing central nervous system (CNS): implications for dietary recommendations[J]. Biochimie, 2011, 93(1): 7-12.
- [4] BIRCH E E, CARLSON S E, HOFFMAN D R, et al. The diamond (DHA intake and measurement of neural development) study: a double-masked, randomized controlled clinical trial of the maturation of infant visual acuity as a function of the dietary level of docosahexaenoic acid[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2010, 91(4): 848-859.
- [5] LAGEMAAT M, ROTTEVEEL J, MUSKIET F A J, et al. Post term dietary-induced changes in DHA and AA status relate to gains in weight, length, and head circumference in preterm infants[J]. Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids, 2011, 85: 311-316.
- [6] HUFFMAN S L, HARIKA R K, EILANDER A, et al. Essential fats: how do they affect growth and development of infants and young children in developing countries? A literature review[J]. Maternal and Child Nutrition, 2011, 7(3): 44-65.
- [7] SMITHERS L G, GIBSON R A, MAKRIDES M. Are the DHA requirements of preterm infants higher than previously thought? [J]. Agro Food Industry HI-TECH, 2009, 20(4): 4-6.
- [8] BAKKER E C, HORNSTRA G, BLANCO C E, et al. Relationship between long-chain polyunsaturated fatty acids at birth and motor function at 7 years of age[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2009, 63(4): 499-504.
- [9] FURUHJELM C, WARSTEDT K, FAGERAS M, et al. Allergic disease in infants up to 2 years of age in relation to plasma omega-3 fatty acids and maternal fish oil supplementation in pregnancy and lactation[J]. Pediatric Allergy and Immunology, 2011, 22: 505-514.
- [10] IMHOFF-KUNSCH B, STEIN A D, MARTORELL R, et al. Prenatal docosahexaenoic acid supplementation and infant morbidity: randomized controlled trial[J]. Pediatrics, 2011, 128(3): e505-e512.
- [11] DONAHUE S M, RIFAS-SHIMAN S L, GOLD D R, et al. Prenatal fatty acid status and child adiposity at age 3 y: results from a US pregnancy cohort[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2011, 93(4): 780-788.
- [12] KOLETZKO B, UAUY R, PALOU A, et al. Dietary intake of eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA) in children: a workshop report[J]. British Journal of Nutrition, 2010, 103(6): 923-928.
- [13] MORIT A, BAO D Q, BURKE V, et al. Docosahexaenoic acid but not eicosapentaenoic acid lowers ambulatory blood pressure and heart rate in humans[J]. Hypertension, 1999, 34: 253-260.
- [14] UMEMURA K, TOSHIMA Y, ASAI F, et al. Effect of dietary docosahexaenoic acid in the rat middle cerebral artery thrombosis model[J]. Thrombosis Research, 1995, 78(5): 379-387.
- [15] KIM Y J, CHUNG H Y. Antioxidative and anti-inflammatory action of docosahexaenoic acid and eicosapentaenoic acid in renal epithelial cells and macrophages[J]. Journal of Medicinal Food, 2007, 10(2): 225-231.
- [16] NEURINGER M, CONNOR W E, LIU D S. Biotechnical and functional effects of parental and postnatal  $\omega$ -3 fatty acid efficiency on retina and brain in rhesus monkeys[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1986, 83: 4021-4023.
- [17] MORLEY R. Nutrition and cognition development[J]. Nutrition, 1998, 14(10): 752-754.
- [18] CLAYTON E H, HANSTOCK T L, HIMETH S J, et al. Reduced mania and depression in juvenile bipolar disorder associated with long-chain omega-3 polyunsaturated fatty acid supplementation[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2009, 63(8): 1037-1040.
- [19] TIMMER-BOSSCHA H, HOSPERS G A P, MEIJER C, et al. Influence of docosahexaenoic acid on cisplatin resistance in a human small cell lung carcinoma cell line[J]. Natl Cancer Inst, 1989, 81(14): 1069-1075.
- [20] HILLARY L W, SARAH J M, JONATHAN C. DHA exacerbates experimentally induced colitis in SMAD3-mice[J]. The FASEB Journal, 2010, 4(24): 728.
- [21] KRUGER M C, COETZEE M, HAAG M, et al. Long-chain polyunsaturated fatty acid: selected mechanisms of action on bone[J]. Progress in Lipid Research, 2010, 49: 438-449.
- [22] POPP-SNIJDERS C, SCHOUTEN J A, HEINE R J, et al. Dietary supplementation of omega-3 polyunsaturated fatty acids improves insulin sensitivity in non-insulin dependent diabetes[J]. Diabetes Res, 1987, 4(3): 141-147.
- [23] ENDRES S, GHORBANI R, KELLY V E, et al. The effect of dietary supplementation with  $\omega$ -3 polyunsaturated acids on the synthesis of interleukin-1 and tumor necrosis factor by mononuclear cells[J]. New England Journal of Medicine, 1989, 320(5): 265-271.
- [24] YIN H, LIU Y, GOLENIIEWSKA K, et al. Dietary supplementation of  $\omega$ -3 fatty acid-containing fish oil suppresses  $F_2$ -isoprostanes but enhances inflammatory cytokine response in a mouse model of ovalbumin-induced allergic lung inflammation[J]. Free Radical Biology

- and Medicine, 2009, 47 (5): 622-628.
- [25] 扶志敏, 王正.  $\omega$ -3多不饱和脂肪酸抗炎机制研究进展[J]. 医药导报, 2009 (9): 1174-1176.
- [26] MAKRIDES M. Is there a dietary requirement for DHA in pregnancy?[J]. Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids, 2009, 81: 171-174.
- [27] MOGELSON S, PIEPER S J, LANGE L G. Thermodynamic bases for fatty acid ethyl ester synthase catalyzed esterification of free fatty acid with ethanol and accumulation of fatty acid ethyl esters[J]. Biochemistry, 1984, 23(18): 4082-4087.
- [28] BOSWELL K, KOSKELO E K, CARL L, et al. Preclinical evaluation of single-cell oils that are highly enriched with arachidonic acid and docosahexaenoic acid[J]. Food Chemistry Toxicol, 1996, 34(7): 585-593.
- [29] LAWSON L D, HUGHES B G. Human absorption of fish oil fatty acids as triacylglycerols, free acids, or ethyl esters[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 1988, 152(1): 328-335.
- [30] CARLIER H, BERNARD A, CASELI A. Digestion and absorption of polyunsaturated fatty acids[J]. Reprod Nutr Dev, 1991, 31(5): 475-500.
- [31] LULEY C, WIELAND H, GRUWALD J. Bioavailability of omega-3 fatty acids: ethyl ester preparations are as suitable as triglyceride preparations[J]. Akt Ernähr Med, 1990, 15: 122-125.
- [32] YANG L Y, KUKSIS A, MYHER J, et al. Lipolysis of menhaden oil triacylglycerols and the corresponding fatty acid alkyl esters by pancreatic lipase *in vitro*: a reexamination[J]. Journal of Lipid Research, 1990, 31(1): 137-147.
- [33] ACKMAN R G. The absorption of fish oils and concentrates[J]. Lipids, 1992, 27 (11): 858-862.
- [34] BECKERMANN B, BENEKE M, SEITZ I. Comparative bioavailability of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid from triglycerides, free fatty acids and ethyl esters in volunteers[J]. Arzneimittelforschung, 1990, 40(6): 700-704.
- [35] YOSHII H, FURUTA T, SIGA H, et al. Autoxidation kinetic analysis of docosahexaenoic acid ethyl ester and docosahexaenoic triglyceride with oxygen sensor[J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2002, 66: 749-753.
- [36] TANG D G. Fatty acid oxidation and signaling in apoptosis[J]. Biol Chem, 2002, 383(3/4): 425-442.
- [37] 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.
- [38] SAGHIR M, WERNER J, LAPOSTA M. Rapid *in vivo* hydrolysis of fatty acid ethyl esters, toxic nonoxidative ethanol metabolites[J]. American Journal of Physiology-gastrointestinal and Liver Physiology, 1997, 273(1): G184-G190.
- [39] LAPOSTA M. Fatty acid ethyl esters: nonoxidative metabolites of ethanol[J]. Addiction Biology, 1998, 3: 5-14.
- [40] HABER P S, WILSON J S, APTE M V, et al. Fatty acid ethyl esters increase rat pancreatic lysosomal fragility[J]. Journal of Laboratory and Clinical Medicine, 1993, 121(6): 759-764.
- [41] LANGE L G, SOBEL B E. Mitochondrial dysfunction induced by fatty acid ethyl esters, myocardial metabolites of ethanol[J]. J Clin Invest, 1983, 72: 724-731.
- [42] SZCZEPKOWSKI Z M, DICKERSIN G R, LAPOSTA M. Fatty acid ethyl esters decrease human hepatoblastoma cell proliferation and protein synthesis[J]. Gastroenterology, 1995, 108(2): 515-522.
- [43] 欧阳昌荣, 林洪, 薛长湖, 等. 鱼油异味成分分析与脱出方法研究进展[J]. 海洋科学, 2000, 24(1): 29-32.
- [44] 吴克刚, 曹建华. 海藻油的氧化稳定性及其微胶囊化研究[J]. 中国海洋药物, 2004(4): 35-37.
- [45] JENSEN C L, MAUDE M, ANDERSON R E, et al. Effect of docosahexaenoic acid supplementation of lactating women on the fatty acid composition of breast milk lipids and infant plasma phospholipids[J]. American Society for Clinical Nutrition, 2000, 71: 292S-298S.
- [46] World Health Organization. Interim summary of conclusion and dietary recommendations on total fat & fatty acids[R]. Geneva: WHO, 2008.
- [47] SARGENT J, BELL G, MCEVOY L, et al. Recent developments in the essential fatty acid nutrition of fish[J]. Aquaculture, 1999, 177: 191-199.
- [48] 森田育男. 化学と生物[M]. 日本: 科学技术振兴机构, 1983: 168.
- [49] 姜悦. 乳制品中的DHA: 微藻油还是鱼油?[J]. 食品工业科技, 2006, 27(12): 191-192.
- [50] 温雪馨, 李建平, 侯文伟, 等. 微藻DHA的营养保健功能及在食品工业中的应用[J]. 食品科学, 2010, 31(21): 446-450.
- [51] 中国营养学会第六届六次常务理事会议. 中国食品标签营养素参考值[S]. 2007.
- [52] 郝颖, 汪之和. EPA、DHA的营养功能及其产品安全性分析[J]. 现代食品科技, 2006, 22(3): 180-182.
- [53] 美国卫生及公共服务部/农业部. 2005年美国饮食指南委员会报告[R]. 美国: 美国卫生及公共服务部/农业部, 2005.
- [54] BRUSTAD M, SANDANGER T M, NIEBOER E. 10<sup>th</sup> anniversary review: when healthy food becomes polluted-implications for public healthy and dietary advice[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2008, 10: 422-427.
- [55] JACOBS M N, COVACI A, SCHEPENS P. Investigation of selected persistent organic pollutants in farmed Atlantic salmon, salmon aquaculture feed, and fish oil components of the feed[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(13): 2797-2805.
- [56] VETTER W, STOLL E. Qualitative determination of bioaccumulative halogenated natural products in food and novel food[J]. European Food Research and Technology, 2002, 215: 523-528.
- [57] SOLOMON G M, WEISS P M. Chemical contaminants in breast milk: time trends and regional variability[J]. Environmental Health Perspectives, 2002, 110(6): A339-A347.
- [58] JACOBS M N, SANTILLO D, JOHNSTON P A, et al. Organochlorine residues in fish oil dietary supplements: comparison with industrial grade oils[J]. Chemosphere, 1998, 37: 1709-1721.
- [59] BOURDON J A, BAZIN T M, ARNASON T T, et al. Polychlorinated biphenyls (PCBs) contamination and aryl hydrocarbon receptor(AhR) agonist activity of omega-3 polyunsaturated fatty acid supplements: implications for daily intake of dioxins and PCBs[J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48: 3093-3097.
- [60] The State of California. The safe drinking water and toxic enforcement act of 1986[S]. 1986.
- [61] JACOBS M, FERRARIO J, BYRNE C, et al. Investigation of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, dibenzo-*p*-furans and selected coplanar biphenyls in Scottish farmed Atlantic salmon[J]. Chemosphere, 2002, 47(2): 183-191.
- [62] CANNON D. From fish oil to microalgae oil a win-win shift for humans and our habitat[J]. Diet and Nutrition, 2009, 5(5): 229-303.
- [63] MAYCOCK B J, BENFORD D J. Risk assessment of dietary exposure to methylmercury in fish in the UK[J]. Hum Exp Toxicol, 2007, 26: 185-190.
- [64] 李延辉. 世界各国食品中化学污染物限量规定[M]. 北京: 中国标准化出版社, 2009: 69-77.
- [65] 钟耀光. 功能食品[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 121-128.