

母乳及婴幼儿配方奶粉中脂肪酸的组成及分布特点

杜芳芳¹, 李建平¹, 郑晓辉¹, 姜悦¹, 陈竞男^{2,*}

(1.润科生物工程(福建)有限公司, 福建 漳州 363500; 2.河南工业大学粮油食品学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 母乳是婴幼儿成长最自然、最安全、最理想的食物, 是婴幼儿营养的最佳来源。近年来, 国内外对母乳脂肪酸的研究逐渐增多, 不仅关注其中的长链多不饱和脂肪酸对婴幼儿生长发育的功能性质, 并逐渐意识到母乳中甘油三酯独特的组成特点, 尤其是母乳脂肪酸在甘油三酯中的位置分布对婴幼儿消化吸收具有重要影响。本文对母乳及婴幼儿配方奶粉中乳脂的组成特点进行综述并提出一些参考建议, 旨在为婴幼儿配方奶粉生产企业提供一定的指导。

关键词: 母乳; 婴幼儿配方奶粉; 乳脂; 甘油三酯; *sn*-2脂肪酸

Characteristics of Fatty Acid Composition and Distribution in Human Milk and Infant Formulas

DU Fangfang¹, LI Jianping¹, ZHENG Xiaohui¹, JIANG Yue¹, CHEN Jingnan^{2,*}

(1. Runke Bioengineering (Fujian) Co. Ltd., Zhangzhou 363500, China;

2. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Human milk is the most natural, safe and ideal food for infants, as well as the best source of infant nutrition. More studies were focused on the composition of human milk fat in recent years. People are not only concerned about the functions of long-chain polyunsaturated fatty acids, but also come to realize the special composition of human milk fat, especially the significant effect of human milk triglyceride structure on infant's digestion and absorption. In this paper, we summarize the fat composition features of human milk and infant formulas and give some recommendations which might lead to improvement in infant formula processing to enhance nutritional levels.

Key words: human milk; infant formulas; milk fat; triglyceride; *sn*-2 fatty acid

中图分类号: TS22; TS252

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2015) 11-0245-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201511046

母乳被誉为人类的“白色血液”, 其成分达2 000多种, 其中含有大量婴幼儿生长发育必不可少的组成成分, 如脂肪、蛋白质、碳水化合物、维生素、矿物质、多种促生长因子以及易于消化吸收的酶类和活性细胞等^[1]。随着社会的发展, 越来越多的母亲由于工作或身体原因而不能进行母乳喂养, 因此选择以母乳为黄金标准的合适婴儿配方奶粉成为母乳的最佳替代品。其中婴幼儿配方奶粉是以类似母乳组成的营养元素为目标, 通过添加或提取牛乳中的某些成分, 使其组成不但在数量上、质量上而且在生物学功能上都无限接近于母乳的, 经过配制和乳粉干燥技术制成的调制乳粉, 使其具有和母乳相同或相似生理功能的婴幼儿配方奶粉。其中母乳中脂肪酸一直是研究的热点, 国内外研究不仅需要聚焦于母乳脂肪酸组成含量以及其中的长链多不饱和脂肪酸对婴幼儿健

康的影响, 更要关注母乳脂肪酸在甘油三酯中的位置分布对婴幼儿消化吸收的影响^[2]。

1 母乳脂肪酸的基本组成特点

1.1 母乳中脂肪酸的组成特点及影响

母乳脂肪的消化吸收是婴幼儿营养的重要方面, 人类母乳中含3%~5%的脂肪, 其中的甘油酯占98%以上, 这些脂肪提供给婴儿生长发育45%~60%的能量和必需脂肪酸, 脂肪酸合成甘油三酯的形式使其熔点低于38℃, 比较容易吸收^[3-4]。母乳喂养时, 婴幼儿一般能够从母乳脂肪中摄取50%的热量, 但常见的牛乳中能够被消化吸收的脂肪只有66%, 仍有大量脂肪不能被消化吸收, 这样既损失了牛乳中脂肪的利用率, 还降低了钙、镁等矿物质及脂溶性维生素的吸收利用^[5]。

收稿日期: 2014-10-22

基金项目: 国家科技部创新基金项目(12C26214405406); 福建省科技厅“区域科技重大项目”(2011N3016);

河南工业大学高层次人才基金项目(2013BS038)

作者简介: 杜芳芳(1988—), 女, 硕士, 研究方向为脂质化学与品质。E-mail: rkbj@gdrunke.com

*通信作者: 陈竞男(1982—), 女, 讲师, 博士, 研究方向为天然产物、功能性食品。E-mail: chenjingnan813@126.com

很多研究者在不同国家地区对不同母乳脂肪酸进行了较为详细的研究发现^[4-10]：不同地区母乳的脂肪酸组成和分布类似，不同饮食习惯的人群其含量略有差异，其中的饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸以及多不饱和脂肪酸均具有高度特异性的位置分布，而母乳中脂肪酸的组成、含量及其在甘油三酯中的位置分布也影响其功能的发挥，如神经系统的发育和信号分子类二十烷酸类物质的合成。

脂肪酸在天然油脂甘油三酯上的分布具有一定的规律性。随着分析技术的发展，科学界积累了大量的分析数据，认识到脂肪酸在甘油3个羟基位置上的分布是有选择性的，*sn*-1、*sn*-2、*sn*-3位是有区别的，一般来说，植物种子油中的油酸、亚油酸选择性地与甘油的*sn*-2位羟基结合，其余的脂肪酸包括多余的油酸与亚油酸，分布在甘油的*sn*-1位和*sn*-3位^[11]。

母乳脂肪酸具有特殊的组成和结构形式，其中油酸含量最高，其次是棕榈酸和亚油酸，还含有少量的长链多不饱和脂肪酸（long-chain polyunsaturated acid, LC-PUFA），其特别的结构形式也影响其功能的发挥，即70%左右的棕榈酸分布于甘油三酯的*sn*-2位，硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸等主要分布在*sn*-1,3位，这种位置分布有利于脂肪、矿物质的吸收和利用。研究表明，棕榈酸分布在*sn*-2位对婴幼儿的发育至关重要，*sn*-2位上的棕榈酸比*sn*-1,3位上的棕榈酸吸收率高。其机理是乳脂在婴儿体内分解为游离脂肪酸和2-甘一酯形式进行吸收，2-甘一酯是大多数脂肪酸中一种较易被黏膜吸收的形式，容易与胆汁酸形成混合胶束，且不与二价阳离子形成不溶性皂，如果在肠中长链游离饱和脂肪酸过多，易与矿物离子结合形成不溶性皂化物，从而增加大便硬度，造成婴儿便秘甚至肠堵塞，因此棕榈酸分布在乳脂甘油三酯的*sn*-2位，不仅易于婴儿对棕榈酸的吸收，而且可以避免婴儿便秘的发生，与此同时促进婴儿对钙等矿物质和脂溶性维生素等的吸收^[12-13]。

1.2 乳脂中*sn*-2位LC-PUFA及其可能生物利用性

研究者们通过采集大量母乳和婴幼儿配方奶粉样品进行分析发现^[6-7]：母乳中除了棕榈酸大部分结合在甘油三酯的*sn*-2位，油酸和亚油酸大部分酯化在*sn*-1,3位外，另一个显著特点是对婴幼儿成长发育至关重要的LC-PUFA，如二十碳四烯酸（arachidonic acid, $C_{20:4\ n-6}$, ARA）、二十二碳六烯酸（docosahexaenoic acid, $C_{22:6\ n-3}$, DHA）也大多位于甘油三酯的*sn*-2位（表1）。

表1 母乳及牛乳脂肪中部分脂肪酸在*sn*-2位分布的相对百分含量^[6,14]
Table 1 Relative contents of partial fatty acid in *sn*-2 position in human milk and cow milk^[6,14]

脂肪酸	初乳脂肪	过渡乳脂肪	成熟乳脂肪	牛乳脂肪	%
$C_{16:0}$	80.30±4.63	86.25±7.73	87.86±6.67	28.79±3.34	
$C_{20:4}$	47.85±7.93	43.66±5.81	43.27±7.67	0.18±0.04	
$C_{22:6}$	52.63±7.18	56.80±7.18	61.39±7.76	—	

注：—，文献中未提及。

研究表明^[4,15]与随机结构的甘油三酯相比，DHA和ARA在*sn*-2位的特殊结构甘油三酯更利于人体吸收，淋巴对特殊结构甘油三酯M-*n*-3-M（*n*-3 PUFA位于*sn*-2位，其中主要是DHA）中PUFA以及淋巴脂质的转运率显著升高，*sn*-2位的PUFA更利于淋巴和肠内的吸收。另有研究指出进食特殊结构油脂会使DHA在大脑中含量最高，而喂养随机结构的油脂，DHA则在肝脏中含量最高，这表明进食不同结构的甘油三酯会导致脂肪酸代谢的差异^[16-17]，即脂肪酸在*sn*-2位比在*sn*-1,3位的吸收利用更有效。此外Straarup等^[18]也研究认为特殊结构油脂有助于提高正常和吸收不良大鼠体内的水解和吸收速率。

来自不同国家和地区的大量研究数据显示^[4-7,19]，尽管不同地区母乳中DHA和ARA含量可能会有差异，但整体而言母乳甘油三酯中大约一半的ARA和DHA位于*sn*-2位（图1）。从这种特有分布可知婴儿在摄入母乳甘油三酯后，ARA和DHA是以2-酰基-*sn*-甘油和游离脂肪酸的形式同比例被吸收，也就是在母乳喂养的婴儿中，不能被胰脂肪酶水解的外部位置的ARA和DHA可以被胃脂肪酶和胆盐诱导脂肪酶水解。而与母乳不同的是，婴儿奶粉中缺乏诱导胆盐脂肪酶的活性因子，因而导致婴儿体内对甘油三酯*sn*-1和*sn*-3位酯键水解能力降低^[6-7,15]。而这个问题可以通过选择长链多不饱和脂肪酸，如DHA在*sn*-2位的甘油三酯强化配方奶粉来解决，因为特殊结构的甘油三酯（*sn*-2主要是DHA）更利于人体吸收DHA。

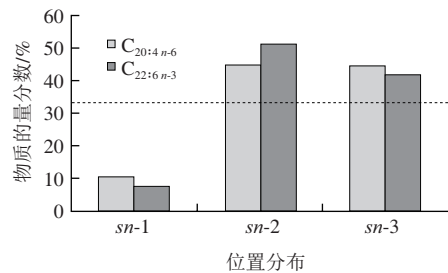


图1 母乳甘油三酯中长链多不饱和脂肪酸ARA和DHA的位置分布^[7]
Fig.1 Positional distribution of polyunsaturated fatty acids (ARA and DHA) in colostrum triglycerides^[7]

此外，Wijesundera等^[20-21]对含DHA的特殊结构甘油三酯位置异构体的氧化稳定性研究结果显示：DHA在*sn*-2位的甘油三酯随着加热时间的增长损耗更低，二级氧化产物丙醛和反,反-二烯醛更少，说明DHA在甘油三酯*sn*-2位的氧化稳定性更高。

1.3 母乳脂肪中PUFA的功效作用

母乳中不仅含有牛奶中含有的亚油酸、亚麻酸等对婴儿成长发育至关重要的PUFA,还含有有益于大脑、眼睛和心脏健康的重要物质DHA和ARA,二者均是膜磷脂的主要组成物质,尤其对视网膜、大脑(以DHA为主)和血小板(以ARA为主)的发育至关重要^[22]。DHA是大脑和眼部中的一种主要结构性脂肪酸,在大脑中占 $n-3$ 脂肪酸的比例高达97%,在眼部中的比例达93%。

DHA有利于中枢神经系统,视网膜,智力、认知能力和解决问题能力以及脉管系统和免疫系统的发育^[23-24]。医学研究^[25]显示,新生儿在出生后的前几个月脑部发育尚未完成,脑细胞数量还在迅速增加、细胞体积还在增大,是脑部发育的关键时期,为满足这一时期生长发育的需要,必须供给丰富的DHA,以促使其智力潜能得到最大程度的提升。研究发现DHA对细胞膜兴奋性的改变、视蛋白的激活、酶的活性及视网膜神经递质的代谢均有重要的影响,DHA还会影响发育过程中特定基因的转录^[26],且大量临床研究指出,DHA与婴幼儿神经细胞发育过程中的反应灵敏程度和视觉灵敏度有很大关系^[27-31],DHA是视网膜光受体中最丰富的LC-PUFA,是视网膜的重要构成成分,占视网膜脂肪总量的50%,为维持视紫红质的正常功能所必需。美国科学家对18月龄的婴幼儿进行随机临床研究显示,与用非强化DHA配方奶粉喂养的婴幼儿相比,强化DHA的配方奶粉喂养婴幼儿17周后,其12月龄时的视敏度有明显提高,18月龄时的智商分数显著提高,智力发展指数平均高出7分,DHA补充组的儿童记忆力、解决简单问题的能力以及语言能力都明显高于对照组儿童^[32]。美国《临床营养学杂志》报道,婴儿从出生开始食用添加了ARA(0.42 g/L)和DHA(0.21 g/L)的配方奶粉至1岁左右,会提高婴儿在6、17、52周时的视觉灵敏度^[27]。

DHA能显著提高儿童智力发育水平,Willatts等^[28]对44个随机分配的新生儿从出生开始到4月龄,分别补充与不补充LC-PUFA(主要是ARA和DHA)在10月龄时的认知能力进行评估,结果表明补充LC-PUFA的婴儿有更高的解决问题能力和智商指数。尤其在早产儿的体内DHA的浓度偏低,需要特别补充DHA,才能使其体内DHA浓度回升到正常水平^[33-34]。已有研究^[12,35]指出:早产儿的身体质量和出生长度与体内的DHA呈正相关。与足月的婴儿相比,早产儿的DHA贮存是不足的,因为他们在孕期的后3个月缺乏对DHA吸收(因为胎儿在妊娠晚期对DHA的吸收速率最高),如果出生后在膳食中不能提供足够的DHA,就会导致早产儿体内DHA含量的急剧下滑,会对婴儿的生长发育带来极为不利的影响。为了让非母乳喂养的婴幼儿的食品更接近母乳,目前婴幼儿配方奶粉中不仅需要注重对这些成分的强化,而且更应

该注重产品中脂肪的结构,研究者建议母乳和早产儿配方奶粉中应该含有约1.5 g DHA/100 g总脂肪酸来预防和补充DHA的缺乏^[36]。

ARA属 $n-6$ 族长链多不饱和脂肪酸,作为一种人体必需的结构脂类(磷脂)的重要脂肪酸广泛存在于哺乳动物的器官、肌肉和血液组织中,另外还是许多具有特殊活性的二十碳酸衍生物(如前列腺素、前列环素、血栓素、白三烯等)的直接前体。缺乏ARA对于婴幼儿组织器官的发育,尤其是大脑、神经系统及视力发育可能产生严重不良影响,因此许多国家已批准婴幼儿配方奶粉中需要添加ARA。在成人体内ARA可由亚油酸少量转化而成,但对于婴幼儿来说,其体内合成ARA的能力较低,主要依靠从食物中摄取以利于发育。

2 婴幼儿配方奶粉中的脂肪酸

配方奶粉专用粉末油脂即仿母乳奶油粉,是依照母乳营养成分经科学配方、利用微胶囊技术加工而成,与奶粉有相同物理结构与感官性能的水包油型制品,主要成分为乳糖、酪蛋白、脂肪(往往富含不饱和脂肪酸)、维生素与微量元素以及益肠道功能的双歧杆菌、乳酸菌。其中选择性地将玉米油、大豆油、椰子油、葵花油或棕榈油等油脂进行调配,再添加含有婴幼儿成长发育需要的DHA、ARA油脂及牛乳脂,使其脂肪酸组成与母乳中脂肪酸含量类似^[37](表2)。

表2 母乳与仿母乳奶油粉的脂肪酸组成^[37-38]
Table 2 Fatty acid composition of human milk and mimic human milk cream powder^[37-38]

脂肪酸	仿母乳奶油粉脂肪酸组成/%	母乳脂肪酸组成/%
C _{8:0}	0.25~0.29	0.07~0.19
C _{10:0}	1.10~1.42	0.77~1.38
C _{12:0}	3.41~3.62	5.31~5.37
C _{14:0}	2.62~2.84	6.81~4.56
C _{16:0}	16.82~19.85	19.64~17.62
C _{18:0}	4.05~4.21	4.08~4.11
C _{20:0}	0.10~0.21	0.19~0.24
SFA	28.35~32.44	33.44~36.84
C _{14:1}	0.14~0.16	0.15~0.14
C _{16:1}	0.98~2.02	1.59~2.04
C _{18:1}	30.85~34.62	32.61~34.35
MUFA	31.97~36.80	34.35~36.53
C _{18:2}	28.43~29.54	24.71~26.21
C _{18:3}	3.53~4.12	2.64~2.70
C _{18:4}	0.18~0.24	—
C _{20:4}	0.82~1.34	0.95~0.71
C _{20:5}	0.28~0.34	—
C _{22:6}	1.24~1.38	0.52~0.41
PUFA	34.48~36.96	28.81~30.03

注: SFA. saturated fatty acids, 饱和脂肪酸; MUFA. monounsaturated fatty acids, 单不饱和脂肪酸。

婴儿配方奶粉中乳脂的脂肪酸组成如果既符合总脂肪酸组成特点,也能符合 sn -2位脂肪酸分布特点,则婴儿能够很好地吸收其营养成分满足生长发育需要。然而仿母乳奶油粉中甘油三酯的结构不一定与母乳类似,目前牛乳以及绝大多数市场上销售的婴幼儿配方奶粉中,大约有80%的棕榈酸在甘油三酯的1位和3位上,这对婴幼儿的消化吸收是不利的。

为使婴幼儿配方奶粉中脂肪酸的含量和位置分布接近于人乳脂肪,近些年来很多研究集中于母乳脂肪类似物的研究,如母乳化结构油脂是一种模仿母乳中脂肪酸组成和位置分布,添加于婴儿配方奶粉的甘油三酯混合物,是采用现代酶技术对油脂进行改性,改变普通婴幼儿配方奶粉植物油中棕榈酸的位置,使之大量被酯化到甘油主链的 sn -2位,并将其与富含不饱和脂肪酸的植物油混合,生产出棕榈酸结构与含量接近母乳的新型婴幼儿配方奶粉。已有规模化生产的脂肪酸结构母乳化的植物脂肪混合物,也是模仿人乳脂肪的结构和在 sn -2位棕榈酸的含量,运用选择性脂肪酶合成富含 sn -2棕榈酸的甘油三酯。且研究表明,食用富含 sn -2棕榈酸甘油三酯的婴幼儿均提高了对 Ca^{2+} 和棕榈酸的吸收,并且血管中钙皂的沉积较少。而目前针对一些对婴儿成长至关重要的LC-PUFA的位置研究则较少,大部分配方奶粉甘油三酯的 sn -2位中LC-PUFA含量与母乳相差较大,这极大地影响了婴幼儿对这些重要LC-PUFA的利用^[39]。

3 婴幼儿配方奶粉中DHA和ARA的主要来源及差异

目前而言,PUFA的来源主要有海洋鱼类、海藻和真菌3类,还有少量来自蛋黄衍生脂质。而直接添加于婴幼儿奶粉或者作为婴幼儿奶粉中补充剂的DHA主要来源于鱼油和微藻油,其中鱼油主要来源于脂肪含量较高的海鱼中,微藻油则是通过生物工程的方法进行微藻培养后,进行提取精制得到,ARA主要来源于真菌发酵,此外,人体也可以从其他脂肪酸转化合成一些DHA和ARA,不过转化效率很低,直接从饮食中摄取还是DHA和ARA的主要来源。

鱼油在过去因为价格便宜,在食品工业中已经广泛地用作婴幼儿和孕妇的食品原料和强化DHA的来源。随着海洋环境污染问题的突出,鱼油的安全性也正在受到挑战^[40],英国科学家Jacobs等^[41]和德国科学家Vetter等^[42]研究指出,在海洋环境中持续性有机污染物可通过食物链在不同级别的生物中进行积累,而鱼在海洋食物链中占有较高的地位,其体内可积累不同种类的有机污染物,而鱼油中所含有的持续性有机污染物及其危害一直被人们忽视。科学家通过研究来自不同国家的鱼油产品表明其中均含有显著量的持续性有机氯污染

物,同时还含有二噁英(dioxin)和毒杀芬(toxaphene)等,这意味着若天天进食含此类鱼油的食物,相当于逐步在体内积累持续性的有机污染物^[43],这些对于婴幼儿来讲是极为不利的。

鱼油中不可避免含有一定量的二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, $C_{20:5\ n-3}$, EPA),而DHA和EPA均属于 n -3 PUFA, DHA和EPA通过代谢进入磷脂结构过程中都利用相同的酶进行脂肪酸延伸和去饱和,在一定程度上会产生竞争,为避免EPA对婴幼儿生长发育所造成的抑制作用,联合国粮食及农业组织/世界卫生组织专家委员会的报告指出,添加于奶粉中的鱼油,其DHA与EPA的比例最低应该为10:1^[22,44]。此外,EPA还是ARA的竞争性抑制剂,当EPA在体内的浓度较高(非正常生理浓度)时,它优先进入细胞磷脂合成途径,抑制由ARA开始的磷脂合成,且减少ARA合成活性二十烷类物质的机会,这种现象会对新生儿的生长产生阻滞作用^[45-46]。

目前各国孕妇、哺乳期妇女和儿童食品中的DHA主要来源于微藻油,ARA主要来源于真菌(高山被孢霉)发酵油^[47]。微藻油属于植物来源的油脂,整个生产过程由始至终都完全按照现代优良生产操作规程(Current Good Manufacture Practices, cGMP)进行生产,不影响生态可持续发展,从微藻纯种培养到精炼都需严格消毒、无菌操作,并可采用国际认可的食品安全生产及控制管理技术,所生产的微藻油纯度高、无污染,而且微藻油DHA稳定,具有独特的海藻味,不含鱼腥味,而且还含有甾醇等有益成分,具有鱼油所不可相比的健康优势,在国际食品尤其是高端食品及保健品市场上供不应求。而真菌发酵生产ARA油脂也具有相似的优势,因此微生物油脂的安全性远远高于其他来源的PUFA产品,得到国际社会广泛认可,美国食品药品监督管理局批准其为“一般认为安全”(Generally Recognized as Safe, GRAS)的产品,可用于美国市场的婴幼儿配方奶粉和食品中,同时欧盟、加拿大、德国、澳大利亚、新西兰、日本、中国等也批准其用于食品中。

4 含DHA的微藻油和ARA油脂

很多婴幼儿配方奶粉中添加富含DHA的鱼油进行营养强化,有关鱼油甘油三酯中脂肪酸位置分布的大量研究显示不同种类鱼油的脂肪酸组成有较大差异,尤其DHA含量根据鱼油来源的不同更是大有不同,0.4%~29.3%不等,而大部分鱼油中ARA含量则相对较少(0.1%~3%),只有部分淡水鱼会较高(14%左右)^[48-49],这一含量远低于发酵生产的油脂。

其中大部分鱼油中DHA和ARA在甘油三酯 sn -2位的含量略高于 sn -3位, sn -1位一般含量很少,说明LC-PUFA

在天然鱼油中更倾向存在于 sn -2位^[50-51]。有关含DHA微藻油中甘油三酯的组成研究也有很多^[52-54]，且不同种类微藻油中DHA含量更是不同，0.1%~60%不等，有的甚至通过优化筛选可以更高，进而得到较优的脂肪酸组成与DHA含量，而涉及微藻油甘油三酯中DHA位置分布的研究则很少。表3中列举了国内某知名DHA供应商生产的一种DHA微藻油中DHA在 sn -2位的分布情况，可知该品牌微藻油中超过50%的DHA位于甘油三酯 sn -2位上，这一结构特点与母乳脂肪很相似，这对应用于婴幼儿配方奶粉来讲是极为有利的。但并不是所有市售微藻油的甘油三酯都具有类似的结构，这与微藻的产品特性及发酵工艺等均具有极大的关系，如表3中列举的国外某DHA微藻油产品，其DHA在甘油三酯 sn -2位的含量则没有类似母乳的这一特点， sn -2位DHA含量占其总量约1/3。而对于婴幼儿配方奶粉来讲，若能选择一种类似母乳脂肪酸组成的微藻油产品进行DHA营养的强化，则可以更利于婴幼儿的消化吸收。

表3 部分市售微藻油主要脂肪酸组成
Table 3 Fatty acid profiles of commercial microalgal oils

脂肪酸	国内某DHA微藻油			国外某DHA微藻油		
	占总脂肪酸含量/%	占 sn -2位脂肪酸含量/%	sn -2位脂肪酸相对含量/%	占总脂肪酸含量/%	占 sn -2位脂肪酸含量/%	sn -2位脂肪酸相对含量/%
C _{22:6}	37.81±0.57	62.45±1.80	55.09±2.42	39.27±1.09	43.18±0.21	36.67±0.83

注： sn -2位脂肪酸相对含量表示某脂肪酸在 sn -2位酯化的百分比[11]，计算公式如下：

$$sn\text{-}2\text{位脂肪酸相对含量}/\% = \frac{sn\text{-}2\text{位脂肪酸含量}}{3 \times \text{总脂肪酸含量}} \times 100$$

发酵法生产的ARA油脂中ARA含量可达50%以上，是婴幼儿配方奶粉中ARA的最主要来源，文献报道显示发酵法生产的油脂其 sn -2位ARA含量与鱼油相比无显著优势^[50-51,55]，且目前国内市场各品牌ARA油脂中ARA在 sn -2位相对百分含量主要在30%~40%之间，并无显著差异，因此，针对结构特异性的ARA油脂有待继续研究。

5 结 语

母乳作为婴幼儿成长最自然、最安全、最理想的唯一天然食物，是婴幼儿营养的最佳来源。因此，婴幼儿配方奶粉中脂肪酸的组成也应以母乳为黄金标准，参照其甘油三酯独特的脂肪酸组成、含量及位置分布进行设计，选择更安全、更有益的油脂进行配制，使之更接近母乳组成，从而使婴幼儿能更好地消化和吸收营养。

参考文献：

[1] 李静, 邓泽元. 不同母乳营养成分的比较[J]. 中国乳品工业, 2005, 33(8): 45-47.

[2] 常桂芳, 王兴国. 我国母乳脂肪和婴儿配方奶粉油脂研究现状[J]. 中国油脂, 2010, 35(4): 1-6.

[3] 韩瑞丽, 马健, 张佳程, 等. 棕榈酸在甘油三酯中的位置分布对婴儿营养吸收的影响[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(5): 80-83.

[4] JENSEN R G. Lipids in human milk[J]. Lipids, 1999, 34(12): 1243-1271.

[5] 戴智勇, 张岩春, 刘跃辉, 等. 婴幼儿配方乳粉中蛋白质、脂肪及碳水化合物化合物的调整[J]. 中国乳业, 2011(4): 58-61.

[6] LÓPEZ-LÓPEZ A, LÓPEZ-SABATER M C, CAMPOY-FOLGOSO C, et al. Fatty acid and sn -2 fatty acid composition in human milk from Granada (Spain) and in infant formulas[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2002, 56(12): 1242-1254.

[7] MARTIN J C, BOUGNOUX P, ANTOINE J M, et al. Triacylglycerol structure of human colostrum and mature milk[J]. Lipids, 1993, 28(7): 637-643.

[8] FIDLER N, KOLETZKO B. The fatty acid composition of human colostrum[J]. European Journal of Nutrition, 2000, 39(1): 31-37.

[9] 覃小丽, 杨博, 王永华. 人初乳脂肪酸组成及 sn -2位脂肪酸分布的研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(5): 81-85.

[10] KOLETZKO B, RODRIGUEZ-PALMERO M. Polyunsaturated fatty acids in human milk and their role in early infant development[J]. Journal of Mammary Gland Biology and Neoplasia, 1999, 4(3): 269-284.

[11] 毕艳兰. 油脂化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 23-24; 116.

[12] JANDACEK R J, WHITESIDE J A, HOLCOMBE B N, et al. The rapid hydrolysis and efficient absorption of triglycerides with octanoic acid in the 1 and 3 positions and long-chain fatty acids in the 2 position[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1987, 45(5): 940-945.

[13] BRACCO U. Effect of triglyceride structure on fat absorption[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1994, 60(Suppl 6): 1002-1009.

[14] 戚秋芬, 吴圣楣. 人乳、牛乳及婴儿配方中脂肪酸组成比较[J]. 中华儿童保健杂志, 1997, 5(2): 88-91.

[15] 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]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1995, 61(1): 56-61.

[16] KOLETZKO B, THIEL I, ABIODUN P O. Fatty acid composition of mature human milk in Nigeria[J]. Zeitschrift für Ernährungswissenschaft, 1991, 30(4): 289-297.

[17] CHRISTENSEN M M, LUND S P, SIMONSEN L, et al. Dietary structured triacylglycerols containing docosahexaenoic acid given from birth affect visual and auditory performance and tissue fatty acid profiles of rats[J]. The Journal of Nutrition, 1998, 128(6): 1011-1017.

[18] STRAARUP E M, HØY C E. Structured lipids improve fat absorption in normal and malabsorbing rats[J]. The Journal of Nutrition, 2000, 130(11): 2802-2808.

[19] YUHAS R, PRAMUK K, LIEN E L. Human milk fatty acid composition from nine countries varies most in DHA[J]. Lipids, 2006, 41(9): 851-858.

[20] 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]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2008, 85(6): 543-548.

[21] WIJESUNDERA C. The influence of triacylglycerol structure on the oxidative stability of polyunsaturated oils[J]. Lipid Technology, 2008, 20(9): 199-202.

[22] LUNN J, THEOBALD H E. The health effects of dietary unsaturated fatty acids[J]. Nutrition Bulletin, 2006, 31(3): 178-224.

- [23] SCHUCHARDT J P, HUSS M, STAUSS G M, et al. Significance of long-chain polyunsaturated fatty acids (PUFAs) for the development and behaviour of children[J]. *European Journal of Pediatrics*, 2010, 169(2): 149-164.
- [24] DAVIS-BRUNO K, TASSINARI M S. Essential fatty acid supplementation of DHA and ARA and effects on neurodevelopment across animal species: a review of the literature[J]. *Birth Defects Research Part B: Developmental and Reproductive Toxicology*, 2011, 92(3): 240-250.
- [25] 侯文华, 张文青. 二十二碳六烯酸水平与婴幼儿智力发育和视力发育的关系[J]. *临床医药实践*, 2010, 19(4): 247-248.
- [26] UAUY R, MENA P, ROJAS C. Essential fatty acids in early life: structural and functional role[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2000, 59(1): 3-15.
- [27] BIRCH E E, HOFFMAN D R, UAUY R, et al. Visual acuity and the essentiality of docosahexaenoic acid and arachidonic acid in the diet of term infants[J]. *Pediatric Research*, 1998, 44(2): 201-209.
- [28] WILLATTS P, FORSYTH J S, DIMODUGNO M K, et al. Effect of long-chain polyunsaturated fatty acids in infant formula on problem solving at 10 months of age[J]. *The Lancet*, 1998, 352: 688-691.
- [29] 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.
- [30] BRADBURY J. Docosahexaenoic acid (DHA): an ancient nutrient for the modern human brain[J]. *Nutrients*, 2011, 3(12): 529-554.
- [31] 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]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2010, 91(4): 848-859.
- [32] BIRCH E E, GARFIELD S, HOFFMAN D R, et al. A randomized controlled trial of early dietary supply of long-chain polyunsaturated fatty acids and mental development in term infants[J]. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 2000, 42(3): 174-181.
- [33] RAPOPORT S I, IGARASHI M, GAO Fei. Quantitative contributions of diet and liver synthesis to docosahexaenoic acid homeostasis[J]. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 2010, 82(4/6): 273-276.
- [34] SMIT E N, OELEN E A, SEERAT E, et al. Breast milk docosahexaenoic acid (DHA) correlates with DHA status of malnourished infants[J]. *Archives of Disease in Childhood*, 2000, 82(6): 493-494.
- [35] LAGEMAAT M, ROTTEVEEL J, MUSKIET F, 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(6): 311-316.
- [36] LAPILLONNE A, JENSEN C L. Reevaluation of the DHA requirement for the premature infant[J]. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 2009, 81(2/3): 143-150.
- [37] 熊华, 汤惠民, 熊小青. 仿母乳奶粉的营养功能特性和婴儿配方奶粉干法生产[J]. *中国乳品工业*, 2004, 32(8): 15-18.
- [38] 戚秋芬, 吴圣楣. 母乳中脂肪酸含量的动态变化[J]. *营养学报*, 1997, 19(3): 325-333.
- [39] MARIE S E, LAURITZEN L, FAERK J, et al. The stereospecific triacylglycerol structures and fatty acid profiles of human milk and infant formulas[J]. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 2006, 42(3): 293-299.
- [40] RAWN D F K, BREAKELL K, VERIGIN V, et al. Persistent organic pollutants in fish oil supplements on the Canadian market: polychlorinated biphenyls and organochlorine insecticides[J]. *Journal of Food Science*, 2009, 74(1): 14-19.
- [41] JACOBS M N, COVACI A, SCHEPENS P. Investigation of selected persistent organic pollutants in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*), salmon aquaculture feed, and fish oil components of the feed[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(13): 2797-2805.
- [42] VETTER W, STOLL E. Qualitative determination of bioaccumulative halogenated natural products in food and novel food[J]. *European Food Research and Technology*, 2002, 215(6): 523-528.
- [43] JACOBS M, SANTILLO D, JOHNSTON P, et al. Organochlorine residues in fish oil dietary supplements: comparison with industrial grade oils[J]. *Chemosphere*, 1998, 37(9): 1709-1721.
- [44] 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.
- [45] SANDERS T, EMERY P. *Molecular basis of human nutrition*[M]. London: CRC Press, 2003: 58-93.
- [46] 陈殊贤, 郑晓辉. 微藻油和鱼油中DHA的特性及应用研究进展[J]. *食品科学*, 2013, 34(21): 439-444. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201321085.
- [47] 金青哲, 王兴国. 几种重要微生物油脂在食品及饲料工业中的应用[J]. *中国油脂*, 2011, 36(2): 48-52.
- [48] RAHNAN S A, HUAH T S, NASSAN O, et al. Fatty acid composition of some Malaysian freshwater fish[J]. *Food Chemistry*, 1995, 54(1): 45-49.
- [49] ÖZOGUL Y, ÖZOGUL F, ALAGOZ S. Fatty acid profiles and fat contents of commercially important seawater and freshwater fish species of Turkey: a comparative study[J]. *Food Chemistry*, 2007, 103(1): 217-223.
- [50] ANDO Y, SATAKE M, TAKAHASHI Y. Reinvestigation of positional distribution of fatty acids in docosahexaenoic acid-rich fish oil triacyl-*sn*-glycerols[J]. *Lipids*, 2000, 35(5): 579-582.
- [51] MYHER J, KUKSIS A, GEHER K, et al. Stereospecific analysis of triacylglycerols rich in long-chain polyunsaturated fatty acids[J]. *Lipids*, 1996, 31(2): 207-215.
- [52] CHEN Guanqun, XIANG Wenzhou, LAU C C, et al. A comparative analysis of lipid and carotenoid composition of the gonads of *anthodiaris crassispina*, *diadema setosum* and *salmacis sphaeroides*[J]. *Food Chemistry*, 2010, 120(4): 973-977.
- [53] CHEN Jingnan, JIANG Yue, MA Kaying, et al. Microalga decreases plasma cholesterol by down-regulation of intestinal NPC1L1, hepatic LDL receptor, and HMG-CoA reductase[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(12): 6790-6797.
- [54] JIANG Yue, FAN K W, WONG R T, et al. Fatty acid composition and squalene content of the marine microalga *Schizochytrium mangrovei*[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(5): 1196-1200.
- [55] AMATEA L, RAMÍREZA M, GIL A. Positional analysis of triglycerides and phospholipids rich in long-chain polyunsaturated fatty acids[J]. *Lipids*, 1999, 34(8): 865-871.