

母乳中二位棕榈酸酯含量分析及研究现状

The overview of sn-2 palmitate content in breast milk and current research status

董 玲^{1,2,3} 周昕玥^{1,2,3} 姜毅康^{1,2,3}

DONG Ling^{1,2,3} ZHOU Xin-yue^{1,2,3} JIANG Yi-kang^{1,2,3}

李 威^{1,2,3} 潘丽娜^{1,2,3}

LI Wei^{1,2,3} PAN Li-na^{1,2,3}

(1. 澳优乳业〔中国〕有限公司, 湖南 长沙 410200; 2. 澳优食品与营养研究院, 湖南 长沙 410200; 3. 湖南省营养健康品工程技术研究中心, 湖南 长沙 410200)

(1. Ausnutria Dairy [China] Co., Ltd., Changsha, Hunan 410200, China; 2. Ausnutria Institute of Food and Nutrition, Changsha, Hunan 410200, China; 3. Hunan Engineering and Technology Research Center for Nutrition and Health Products, Changsha, Hunan 410200, China)

摘要:综述了中国及欧美等国家母乳、动物乳中 sn-2 棕榈酸酯含量对比,以及对婴幼儿生理功能的研究报道,并对 sn-2 棕榈酸酯在婴幼儿食品中的应用和潜在前景进行了展望。

关键词: sn-2 棕榈酸酯; 含量对比; 婴幼儿; 生理功能

Abstract: The comparison of sn-2 palmitate content in human milk and animal milk in China, Europe and the United States, as well as the research reports on the physiological function of infants and young children were reviewed. The application and potential prospect of sn-2 palmitate in infant food were also prospected.

Keywords: sn-2 palmitate; content comparison; infant; physiological function

母乳是婴幼儿最理想的食物来源。母乳中脂肪含量为 3%~5%, 其中 95% 以上为甘油三酯^[1]。甘油三酯由一分子甘油和三分子脂肪酸酯组成, 通常采用“立体定向编号”系统(stereospecific numbering, sn)来描述脂肪酸在甘油骨架上的 3 个结合位点, 分别被称为 sn-1、sn-2 和 sn-3 位。棕榈酸(Palmitic acid, C_{16:0})为母乳中最主要的饱和脂肪酸之一, 为婴幼儿生长发育、新陈代谢及大脑活动提供能量^[2]。

市面上常见的婴幼儿配方奶粉, 通过添加多种植物油混合以模仿母乳中脂肪酸的组成和含量。但是, 植物油中棕榈酸以 sn-1 和 sn-3 位结合为主, sn-2 位上棕榈酸含量与母乳中含量差距较大^[3]。因此, 棕榈酸酯的酯化结合位点及其对生理功能的影响引起了广泛的关注和相关研究。近年来, 越来越多的研究发现中西方母乳中 sn-2 棕榈酸酯构型比例存在差异, 中国母乳以 1-油酸-2-棕榈酸-3-亚油酸甘油三酯(OPL)为主, 而西方母乳中 1,3-二油酸 2-棕榈酸甘油三酯(OPO)含量更高^[4]。研究拟从对比中西方母乳以及不同乳源的 sn-2 棕榈酸酯含量、sn-2 棕榈酸酯的生理功能及应用, 以期开发全新婴幼儿配方奶粉提供理论依据。

1 sn-2 棕榈酸酯含量的分析

棕榈酸是母乳中含量最高的饱和脂肪酸, 约占总脂肪酸的 20%(表 1), 且含量较为稳定, 不易受日常膳食(除素食主义外)及地域等因素的影响。母乳中约 75% 的棕榈酸被酯化结合在 sn-2 位上, 是甘油三酯 sn-2 位上含量最高的脂肪酸^[5]。1,3-二油酸 2-棕榈酸甘油三酯(OPO)和 1-油酸-2-棕榈酸-3-亚油酸甘油三酯(OPL)是 sn-2 棕榈酸酯的两种最主要构型。OPO 与 OPL sn-1 和 sn-2 位结合的脂肪酸相同, 为油酸和棕榈酸。二者的区别是结合在 sn-3 位的脂肪酸有所不同, 分别为油酸(C_{18:1})和亚油酸(C_{18:2})。

为了区分母乳中 OPO 和 OPL, 通常采用液相色谱—蒸发光散射检测法(HPLC-ELSD)、液相色谱质谱联用—电喷雾离子源检测法(HPLC/ESI-MS)或液相色谱/串联

基金项目:湖南省创新平台与人才计划(编号:2019TP2066)

作者简介:董玲, 女, 澳优乳业(中国)有限公司高级工程师, 硕士。

通信作者:潘丽娜(1982—), 女, 澳优乳业(中国)有限公司高级工程师, 博士。E-mail: Lina.pan@ausnutria.com

收稿日期:2022-06-12 **改回日期:**2022-09-19

表 1 母乳及其他乳源中脂肪酸含量及 sn-2 棕榈酸酯含量^[3-6]

Table 1 The fatty acid and sn-2 palmitate content in breast milk and other mammalian species

类别	饱和脂肪酸占总脂	单不饱和脂肪酸占	多不饱和脂肪酸占	棕榈酸占总脂	sn-2 棕榈酸酯占
	脂肪的百分比/%	总脂脂肪的百分比/%	总脂脂肪的百分比/%	脂肪的百分比/%	棕榈酸的百分比/%
母乳	49.3	36.9	12.7	19.0	75.7
牛乳	75.5	21.63	1.9	30.4	32.0
羊乳	71.0	24.8	4.2	25.4	27.6
驼乳	53.7	41.0	5.2	27.1	35.5
市售婴幼儿配方奶粉	21.3~41.4	38.7~55.3	19.8~25.4	8.1~23.9	8.3~46.4

四级杆—飞行时间质谱检测法(HPLC/Q-TOF-MS)来检测其含量^[7]。目前,GB 30604—2015《食品营养强化剂 1, 3-二油酸 2-棕榈酸甘油三酯》仅对以植物油与油酸为原料,通过酯交换法制备的营养强化剂 OPO 的检测方法作出规定,即通过氢火焰离子化检测器(FID)—气相色谱法,测得碳数为 C₅₂ 甘油三酯的总量,但并未对 sn-2 棕榈酸酯不同构型进行区分^[8]。而且 GB 30604 中的检测方法并不适用于婴幼儿配方奶粉^[9]。关于婴幼儿配方奶粉中 OPO 检测方法的文献报道很多^[10],如正相液相色谱法^[11]、薄层色谱分离法、气相色谱法^[12]、气相色谱—质谱联用法^[5]、银离子交换柱液相色谱法^[13]等。但对于婴幼儿配方奶粉中 OPL 含量的检测方法研究较少,新的检测手段和技术尚待开发。

1.1 母乳与其他乳源中 sn-2 棕榈酸酯含量对比

研究^[14]表明,动物乳(牛、羊、骆驼)与母乳脂肪酸组成上表现出显著的差异,动物乳以饱和脂肪酸为主,而母乳中不饱和脂肪酸比例更高。因此市售的婴幼儿配方奶粉常通过添加多种不同来源的植物油来模拟母乳中脂肪酸的组成及含量^[9]。除此之外,母乳脂肪在结构上表现出其独特性。母乳脂肪中 sn-2 位上结合的多为长链饱和脂肪酸,如棕榈酸,而 sn-1 和 sn-3 位上多为不饱和脂肪酸,与动物乳脂肪正好相反^[1]。因此,尽管动物乳中棕榈酸含量高于母乳,但母乳中棕榈酸在 sn-2 位上的比例显著高于其他动物乳。

1.2 中西方母乳中 sn-2 棕榈酸酯含量对比

Kallio 等^[4]采用 HPLC/ESI-MS 法检测母乳中甘油三酯含量,对比研究中国与西方国家母乳发现,尽管母乳中棕榈酸总含量接近,但 sn-2 棕榈酸酯含量比例及组成存在差异(表 2)。中国母乳中 OPL 含量高于 OPO 含量,而西方母乳中 OPO 含量高于 OPL 含量,这与 Tu 等^[15]的研究一致。通过对中国不同地区和不同泌乳阶段的母乳脂肪组成分析发现,尽管不同地区母乳在泌乳期均表现出 OPL 含量逐渐降低的趋势,但中国母乳中 OPL 的含量高于 OPO。母乳的成分组成易受到饮食的影响,sn-2 棕榈酸酯组成上的差异可能源于中西方饮食结构的不同。中国日常膳食以高亚油酸的植物油为主,如菜籽

表 2 中西方母乳中棕榈酸酯平均含量及

sn-2 棕榈酸酯组成^[4]

Table 2 The content and composition of sn-2 palmitate in Chinese and Western breast milk

sn-2 棕榈酸酯	单位	中国	西方国家
棕榈酸占总脂脂肪的百分比	%	19.0	20.0
sn-2 棕榈酸酯占棕榈酸的百分比	%	75.7	71.2
OPO 占甘油三酯的百分比	%	7.1	9.4
OPL 占甘油三酯的百分比	%	10.3	5.4
LPL 占甘油三酯的百分比	%	4.5	2.4
C _{18:1} -C _{16:0} -C _{18:0} 占甘油三酯的百分比	%	2.4	3.2
C _{18:1} -C _{16:0} -C _{16:0} 占甘油三酯的百分比	%	2.4	3.0
C _{18:1} -C _{16:0} -C _{12:0} 占甘油三酯的百分比	%	2.1	3.5

油、大豆油等^[16],而西方膳食以高油酸的橄榄油为主。这种饮食差异导致了母乳中 sn-2 棕榈酸酯 OPL 与 OPO 的比例的不同^[4]。

因此,通过调节多种植物油之间的配比,弥补动物乳与母乳中不饱和脂肪酸含量的差异,以模拟母乳中脂肪酸含量及组成^[17]。目前,中国婴幼儿配方奶粉中脂肪来源主要为多种植物油或多种植物油和牛乳脂肪混合,其中高油酸葵花籽油、低芥酸菜籽油、棕榈油、椰子油、棕榈仁油及大豆油等植物油最为常见。由于目前中国相关法律仅对婴幼儿配方奶粉中脂肪总量及反式脂肪酸、肉豆蔻酸、月桂酸、 α -亚麻酸、亚油酸等含量提出要求,因此市售婴幼儿配方奶粉中饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸含量基本接近母乳中相应脂肪酸的含量。但是,婴幼儿配方奶粉中 sn-2 棕榈酸酯含量与母乳的差异较大,尤其是未添加 OPO 的婴幼儿配方奶粉^[3]。

2 sn-2 棕榈酸酯生理功能

胰脂肪酶对甘油三酯的 sn-1 和 sn-3 位有着高度的选择性。甘油三酯在胃肠道中被胰脂肪酶水解,形成两分子的游离的脂肪酸和一分子的 sn-2 单甘油酸酯,为婴儿生长发育提供所需的营养和能量^[18]。sn-2 棕榈酸酯的生理功能与其独特的构型紧密相关。当棕榈酸结合在

sn-2 位上时,能有效降低游离脂肪酸和钙之间的皂化反应^[19],且能被肠道微生物利用从而促进肠道微生物的增殖^[20],对婴幼儿的生长发育表现出多重功效。sn-2 棕榈酸酯被胰脂肪酶消化的过程及其主要功效示意图见图 1。

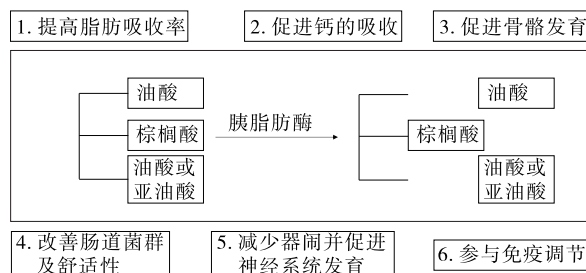


图1 sn-2 棕榈酸酯胰脂肪酶消化过程及功效示意图

Figure 1 Schematic hydrolysis process by pancreatic lipase and physiological functions of sn-2 palmitate

2.1 提高脂肪吸收率

sn-2 棕榈酸酯能促进脂肪的吸收,脂肪的吸收差异可通过分析粪便及血清中脂肪酸含量获得。Wang 等^[21]通过在大鼠膳食中添加 OPO(PA 含量占总脂肪酸的 18.4%,sn-2 位酯化率占总棕榈酸 54.3%)发现,OPO 能显著提高血清中棕榈酸的含量,并有效降低粪便中总脂肪及各主要长链脂肪酸的含量。因此,棕榈酸酯的结构型不仅对大鼠棕榈酸吸收率有影响,而且可帮助提高总脂肪吸收率。Carnielli 等^[22]发现高含量 sn-2 棕榈酸酯配方(PA 含量占总脂肪酸的 24%,sn-2 酯化率占总棕榈酸 66%)喂养的婴儿,粪便中肉豆蔻酸、棕榈酸和硬脂酸含量均降低,从而表现出更高的脂肪吸收率。

当棕榈酸结合在 sn-1 和 sn-3 位后,在小肠的酸性环境下发生水解,游离的棕榈酸易与游离的矿物质(Ca^{2+} 、 Mg^{2+})发生皂化反应,从而形成不溶性皂化物,通过粪便直接排出,造成脂肪酸和矿物质的双重流失^[19]。相反,当棕榈酸结合在 sn-2 位上时,胰脂肪酶水解产物为单棕榈酸酯,可通过淋巴系统进入血液循环参与代谢。因此,母乳中 70%以上棕榈酸结合在 sn-2 位上,能有效地被婴幼儿吸收利用。

2.2 促进钙的吸收

大量研究证明,sn-2 棕榈酸酯能有效提高婴幼儿对钙的吸收。庄佳璐等^[23]通过双盲试验,比较喂养 90 d 后 sn-2 棕榈酸酯组(HPIF,sn-2 棕榈酸酯含量占总棕榈酸的 42%)和普通配方奶粉组(IF)的婴儿粪便中钙含量。HPIF 组钙含量(31.1 mg/g 干重)显著低于 IF 组(45.9 mg/g 干重),且更加接近母乳喂养组(21.5 mg/g 干重)。因此在配方中添加 sn-2 棕榈酸酯,能有效减少因脂肪酸与游离钙发生皂化反应而导致钙的流失。由此可见,棕榈酸酯的结构差异对钙的吸收有重要的影响。除

此之外,sn-2 棕榈酸酯能促进益生菌的增殖并产生有机酸^[24]。有机酸能降低肠道 pH,将小肠中棕榈酸与钙形成的不可溶皂钙重新转化为游离的钙离子,有利于提高钙的吸收率^[25]。

2.3 促进骨骼发育

sn-2 棕榈酸酯能通过有效提高钙的吸收,促进婴儿骨骼发育^[26]。Litmanovitz 等^[27]通过一项对婴儿开展的双盲试验发现,高含量 sn-2 棕榈酸酯能有效增加骨骼密度,促进婴幼儿骨骼发育,但对婴儿身高和体重发育无显著影响。定量超声法(SOS)是一种定性分析骨骼强度的测量方法。摄入添加 sn-2 棕榈酸酯配方奶粉(PA 含量占总脂肪酸的 22%,sn-2 位酯化率占总棕榈酸的 44%)的婴儿骨骼 SOS 为 2 896 m/s,与母乳喂养的婴儿(2 875 m/s)接近,且高于普通奶粉喂养的婴儿(2 825 m/s)。Kennedy 等^[28]发现配方中添加 sn-2 棕榈酸酯能显著增加婴儿骨骼密度(X-ray 法)。

母乳喂养的婴儿在后续的生长发育过程中骨骼钙密度增长速度优于配方奶粉喂养的婴儿^[29]。Fewtrell 等^[30]通过追踪母乳、普通配方奶粉和 sn-2 棕榈酸酯配方奶粉喂养的婴儿骨骼发育情况,发现 sn-2 棕榈酸酯对骨骼生长发育仅能在短期内表现出促进作用。但由于样本量过小,该研究的结论的可靠性仍待进一步验证,且儿童的骨骼的生长发育受到多重因素的影响。目前,相关的研究仅侧重于 sn-2 棕榈酸酯对骨骼发育的短期影响,因此,关于 sn-2 棕榈酸酯对骨骼密度增长的长期影响作用尚需更深入的研究。

2.4 改善肠道菌群及舒适性

sn-2 棕榈酸酯能有效地促进双歧杆菌和乳酸杆菌的增殖^[31]。Wang 等^[21]在大鼠无脂饲料中添加 OPO(PA 含量占总脂肪酸的 18%,sn-2 酯化率占总棕榈酸的 54.31%),结果显示棕榈酸酯的结构能显著影响肠道菌群的组成。试验组和空白对照组肠道菌群均以厚壁菌门和拟杆菌门为主,但表现出不同的厚壁菌门和拟杆菌门比例。OPO 能有效改善肠道菌群的组成,提高肠道中双歧杆菌和乳杆菌的含量,并抑制有害菌的增殖。Yaron 等^[32]发现,给婴儿喂养添加 sn-2 棕榈酸酯的配方奶粉,该婴儿肠道菌群组成与母乳喂养的婴儿更相似。OPO 能被双歧杆菌和乳杆菌利用,促进肠道益生菌的增殖和乳酸的生成。乳酸的积累导致肠道 pH 降低,从而抑制有害菌的增殖^[20]。

此外,游离棕榈酸和钙形成的不溶性皂钙化合物可导致婴幼儿大便干结并造成的排便困难^[25]。双盲试验^[33]表明,富含 sn-2 棕榈酸酯的配方奶粉能有效减少粪便中皂钙的形成。余章斌等^[34]报道,配方奶粉中添加 sn-2 棕榈酸酯对提高粪便稀糊状比例、降低平均硬度、改善粪便性状具有统计学意义。因此,sn-2 棕榈酸酯可有

效缓解因大便干结造成的排便困难,从而提高肠道舒适性。

2.5 减少婴儿哭闹并促进神经系统发育

sn-2 棕榈酸酯(sn-2 棕榈酸酯含量占总棕榈酸 44%)能有效减少婴儿哭闹次数和每次哭闹持续的时长^[35]。Yoseph 等^[36]通过对比分别喂养添加 sn-2 棕榈酸酯的配方奶粉(sn-2 棕榈酸酯含量占总棕榈酸 43%)、添加植物油的配方奶粉、母乳的婴儿睡眠情况,发现 sn-2 棕榈酸酯通过改变婴儿的哭闹模式,有效增加婴儿的睡眠时长,尤其是日间的睡眠。婴儿睡眠时长的增长,可帮助其建立良好的昼夜节律,因而有利于促进婴儿神经系统的发育。

婴幼儿哭啼是一种由外源性刺激和内源性调节引起的神经化学反应。外源性刺激由分离焦虑、饥饿、肠道不适等因素引起^[37]。因此,这种减少哭闹的作用可能与降低钙皂含量从而减轻排便负担和提高肠道舒适,或调节肠道菌群而改善肠道功能等因素有关。除此之外,sn-2 棕榈酸酯通过调节脂类前体物质和同源物,如油酰乙醇胺通过内源性调节影响哭闹模式,具有潜在的促进脂类新陈代谢和大脑功能发育的作用^[38]。

2.6 参与免疫调节

sn-2 棕榈酸酯具有潜在提高免疫力和缓解肠道炎症的功效。Jeffery 等^[39]通过脾脏免疫细胞试验发现,高 OPO 组(PA 含量占总脂肪酸的 39.4%,sn-2 酯化率占总棕榈酸 78%)能够显著增强淋巴细胞的增殖作用,而淋巴细胞的增殖对免疫反应至关重要。

例如,高 sn-2 棕榈酸酯对缓解小鼠肠道炎症反应发挥着关键的作用。黏蛋白(Muc2^{-/-})是肠道上皮细胞与肠道黏膜层的重要组成部分,通过形成与微生物之间的屏障,从而保护肠道上皮细胞。Muc2^{-/-}缺陷型小鼠试验表明,sn-2 棕榈酸酯可通过诱发小鼠的免疫 T 细胞效应,并诱发抗氧化酶的表达,减少由高脂肪酸饮食导致的肠道黏膜层腐蚀及损伤程度,缓解小肠糜烂与损伤。对 sn-2 棕榈酸酯诱发免疫 T 细胞效应和抗氧化酶表达的进一步研究,将助益于 sn-2 棕榈酸酯的进一步开发利用^[40]。

3 sn-2 棕榈酸酯应用

1995 年时,欧盟(EFSA)已通过 OPO 在婴幼儿配方奶粉中使用,2008 年起中国相关法规也对 OPO 的使用范围和在婴幼儿配方奶粉中的添加量作出了明确的规定,OPO 结构酯的安全性已得到充分的论证^[41]。1995 年,Bunge Lodgers 公司推出的富含 OPO 的产品 Betapol[®],其被应用于婴幼儿配方奶粉商业化生产中。Betapol[®]通过酸解法,将三棕榈酸甘油酯(PPP)在 sn-1,3 位专一性脂肪酶的催化作用下发生酰基交换,生成 OPO 结构酯^[42]。除此之外,Advanced Lipids 公司生产的 INFAT[®],丰益公

司(Wilmar Lmt.)的 MILKOPAS[®]等,被广泛地应用于国内外各大公司的婴幼儿配方奶粉中^[43]。随着高端奶粉市场需求的增加,越来越多的市售婴幼儿配方奶粉配方的设计均考虑脂肪酸酯化结合位置^[3]。近年来,中西方母乳中 sn-2 棕榈酸酯在构型组成上的差异被广泛报道,sn-2 棕榈酸在婴儿配方奶粉原料中的占比也得到提高,同时原料中 OPO 和 OPL 两种构型的比例也得到了调整^[44]。

4 展望

各大公司在努力提高产品中棕榈酸酯 sn-2 位转化率的同时,也未停止探究更科学的模拟母乳脂肪中 sn-2 棕榈酸酯组成比例的必要性及科学性。Advanced Lipids 和 Bunge Lodgers 公司目前均推出专为中国婴幼儿设计的结构酯产品,使产品中 OPO 与 OPL 的比例更接近中国母乳。目前,关于 OPL 型结构脂的研究较少,且在配方奶粉设计时尚未引起重视。最近的一项研究,通过模拟 OPO、OPL 和 LPL 结构酯的体外消化得出,虽然富含油酸类的结构酯比富含亚油酸类的结构酯有着更高的消化率(OPO>OPL>LPL),但 OPL 和 LPL 表现出比 OPO 更高的吸收率。二者在消化和吸收率上的差异与脂肪酸的不饱和度和甘油三酯初始粒径大小、脂肪酸与胰腺酶结合的能力等因素有关^[45]。

除此之外,sn-2 棕榈酸酯也表现出与其他营养元素潜在的协同作用,如低聚果糖。研究^[33]表明,同时添加 sn-2 棕榈酸酯和低聚果糖,可以协同促进大鼠对钙的吸收,并能减少婴儿粪便中皂钙的形成。

综上所述,sn-2 棕榈酸酯独特的构型对婴幼儿生长发育有着重要的影响。对 sn-棕榈酸酯的生理功能和作用机制的进一步深入研究,有利于更好地模拟母乳脂肪组成及构型,尤其是中国母乳,为开发最适合中国婴幼儿的配方奶粉提供更科学的理论依据。

参考文献

- [1] 夏袁, 项静英, 曹晓辉, 等. 无锡地区人乳脂肪脂肪酸组成及 sn-2 位脂肪酸分布[J]. 中国油脂, 2015, 40(11): 44-47.
- XIA Y, XIANG J Y, CAO X H, et al. Fatty acid composition and the distribution in sn-2 position of human milk fat in Wuxi area[J]. China Oils and Fats, 2015, 40(11): 44-47.
- [2] 陈爱菊, 张伟利, 蒋明华, 等. 我国 5 个地区人乳中脂肪酸成分的分析[J]. 临床儿科杂志, 2014, 32(1): 48-54.
- CHEN A J, ZHANG W L, JIANG M H, et al. Analysis of fatty acid composition of human milk in 5 regions of China[J]. Journal of Clinical Pediatrics, 2014, 32(1): 48-54.
- [3] 刘彪, 叶文慧, 郭顺堂. 母乳及市售婴幼儿配方奶粉中脂肪酸结构分析[J]. 中国食品学报, 2018, 18(10): 246-251.
- LIU B, YE W H, GUO S T. Analysis of fatty acid structure in human milk and commercial infant formula[J]. Journal of China Food Science and Technology, 2018, 18(10): 246-251.

- [4] KALLIO H, NYLUND M, BOSTROM P, et al. Triacylglycerol regioisomers in human milk resolved with an algorithmic novel electrospray ionization tandem mass spectrometry method [J]. Food Chemistry, 2017, 233: 351-360.
- [5] GIUFFRIDA F, MARMET C, TAVAZZI I, et al. Quantification of 1, 3-dioleoyl-2-palmitate (OPO) and palmitic acid in sn-2 position of triacylglycerols in human milk by liquid chromatography coupled with mass spectrometry[J]. Molecules, 2018, 24(1): 22.
- [6] ZOU X, HUANG J, JIN Q, et al. Lipid composition analysis of milk fats from different mammalian species: Potential for use as human milk fat substitutes[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2013, 61(29): 7 070-7 080.
- [7] 余晓雯, 刘茜, 刘妍, 等. 母乳中 1-油酰基-2-棕榈酰基-3-亚油酰基甘油三酯的研究进展[J]. 中国油脂, 2022, 47(5): 16-22, 34.
YU X W, LIU Q, LIU Y, et al. Research progress of 1-oleoyl-2-palmitoyl-3-linoleylglyceride in human milk[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(5): 16-22, 34.
- [8] 陈盛, 陈景春, 何亚斌. 1, 3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯(OPO)检测技术综述[J]. 广州化工, 2016, 44(3): 26-27, 58.
CHEN S, CHEN J C, HE Y B. Review of 1, 3-dioleoyl-2-palmitate triglyceride (OPO) detection technology[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, 44(3): 26-27, 58.
- [9] 张星河, 王伟, 李菊芳, 等. 母乳 1, 3-二不饱和脂肪酸-2-棕榈酸甘油三酯(UPU)的组成与营养功能[J]. 中国油脂, 2022, 12(1): 1-12.
ZHANG X H, WEI W, LI J F, et al. Composition and nutritional function of 1, 3-diunsaturated fatty acid-2-palmitate triglyceride (UPU) in human milk[J]. China Oils and Fats, 2022, 12(1): 1-12.
- [10] 张雪, 张丽茹, 张筠. 婴幼儿配方乳粉中 1, 3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯的功能及检测方法研究进展[J]. 中国乳业, 2019(5): 57-60.
ZHANG X, ZHANG L R, ZHANG J. Research progress on the function and analysis method of 1, 3-dioleoyl-2-palmitate in infant formula milk powder[J]. China Dairy Industry, 2019(5): 57-60.
- [11] 何香婷, 刘玲君, 陈亮, 等. 婴幼儿配方奶粉中 1, 3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯的定量测定方法[J]. 产业与科技论坛, 2021, 20(4): 46-48.
HE X T, LIU L J, CHEN L, et al. Determination of 1, 3-dioleoyl-2-palmitate triglyceride in infant formula [J]. Industry and Technology Forum, 2021, 20(4): 46-48.
- [12] 陆雪龙, 黄芳芳, 王巧云, 等. 气相色谱法测定婴幼儿乳粉中的 1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(6): 1 973-1 977.
LU X L, HUANG F F, WANG Q Y, et al. Determination of 1,3-dioleoyl-2-palmitate triglyceride in infant formula by gas chromatography[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2020, 11(6): 1 973-1 977.
- [13] 王伟, 屠海云, 王红青, 等. Silver-ion HPLC 测定 1, 3-二油酸-2-棕榈酸三酰甘油的含量[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(1): 105-109, 115.
WEI W, TU H Y, WANG H Q, et al. Determination of 1, 3-dioleoyl-2-palmitate triacylglycerol by Silver Ion HPLC[J]. Journal of Cereals and Oils of China, 2014, 29(1): 105-109, 115.
- [14] 刘元林, 龙鸣, 李儒, 等. 脂肪酸检测在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 217-222.
LIU Y L, LONG M, LI R, et al. Application of fatty acid analysis in food industry[J]. Food & Machinery, 2019, 35(11): 217-222.
- [15] TU A, MA Q, BAI H, et al. A comparative study of triacylglycerol composition in Chinese human milk within different lactation stages and imported infant formula by SFC coupled with Q-TOF-MS[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 555-567.
- [16] 宋长虹, 唐生, 郝克非, 等. 中国居民日常食物中脂肪酸含量的分析[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 61-63.
SONG C H, TANG S, HAO K F, et al. Analysis of fatty acid content in daily intake of Chinese residents[J]. Food & Machinery, 2014, 30(5): 61-63.
- [17] 陈玉洁, 张鑫, 张兰威, 等. 中国市场主流婴幼儿配方奶粉中甘油三酯种类与结构特征[C]// 中国食品科学技术学会第十五届年会论文摘要集. 青岛: [出版者不详], 2018: 615.
CHEN Y J, ZHANG X, ZHANG L W, et al. Type and structure characteristics of triglycerides in mainstream infant formula in China market[C]// Abstract Collection of the 15th Annual Meeting of Chinese Society of Food Science and Technology. Qingdao: [s.n.], 2018: 615.
- [18] 杨普煜, 张虹, 刘浚辰, 等. Sn-2 棕榈酸酯对婴幼儿健康的促进作用[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(4): 41-45, 68.
YANG P Y, ZHANG H, LIU J C, et al. Promotion effect of SN-2 palmitate on infant health[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 36(4): 41-45, 68.
- [19] MILES E A, CALDER P C. The influence of the position of palmitate in infant formula triacylglycerols on health outcomes[J]. Nutrition Research, 2017, 44: 1-8.
- [20] JIANG T, LIU B, LI J, et al. Association between sn-2 fatty acid profiles of breast milk and development of the infant intestinal microbiome[J]. Food & Function, 2018, 9(7): 1 028-1 037.
- [21] WANG J, LIU L H, LIU L B, et al. Absorption of 1, 3-dioleoyl-2-palmitoylglycerol and intestinal flora profiles changes in mice[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2020, 71(3): 296-306.
- [22] CARNIELLI V, LUIJENDIJK I, GOUDOEVER J V, et al. Structural position and amount of palmitic acid in infant formulas: Effects on fat, fatty acid, and mineral balance[J]. Journal of Pediatric Gastroenterology & Nutrition, 1996, 23(5): 553-560.
- [23] 庄佳璐, 贝斐, 秦逸诗, 等. 高 sn-2 位棕榈酸配方乳对婴儿粪便脂肪酸及钙镁排泄的影响[J]. 中华临床营养杂志, 2018, 26(4): 214-220.
ZHUANG J L, BEI F, QIN Y S, et al. Effects of highsn-2 palmitate formula on fecal fatty acid and calcium and magnesium excretion in infants[J]. Journal of China Clinical Nutrition, 2018, 26(4): 214-220.

- [24] HOU A, XIAO Y, LI Z. Effects of 1, 3-dioleoyl-2-palmitoylglycerol and its plant-oil formula on the toddler fecal microbiota during in vitro fermentation[J]. *CYTA Journal of Food*, 2019, 17(1): 850-863.
- [25] BRONSKY J, CAMPOY C, EMBLETON N, et al. Palm oil and beta-palmitate in infant formula: A position paper by the European society for pediatric gastroenterology, hepatology, and nutrition (ESPGHAN) committee on nutrition[J]. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 2019, 68(5): 742-760.
- [26] LAURENT B, XAVIER M, ERIC L, et al. Growth, stool consistency and bone mineral content in healthy term infants fed sn-2 palmitate-enriched starter infant formula: A randomized, double-blind, multicentre clinical trial[J]. *Clinical Nutrition*, 2019, 38(3): 1 023-1 030.
- [27] LITMANOVITZ I, DAVIDSON K, ELIAKIM A, et al. High beta-palmitate formula and bone strength in term infants: A randomized, double-blind, controlled trial[J]. *Calcif Tissue Int*, 2013, 92(1): 35-41.
- [28] KENNEDY K, FEWTRELL M S, MORLEY R, et al. Double-blind, randomized trial of a synthetic triacylglycerol in formula-fed term infants: effects on stool biochemistry, stool characteristics, and bone mineralization[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1999, 70(5): 920-927.
- [29] SCHANLER R J, BURNSP A, ABRAMS S A, et al. Bone Mineralization outcomes in human milk-fed preterm infants[J]. *Pediatric Research*, 1992, 31(6): 583-586.
- [30] FEWTRELL M S, KENNEDY K, MURGATROYD P R, et al. Breast-feeding and formula feeding in healthy term infants and bone health at age 10 years[J]. *British Journal of Nutrition*, 2013, 110(6): 1 061-1 067.
- [31] WANG L, RUISECO B G, HAPPE R, et al. The effect of calcium palmitate on bacteria associated with infant gut microbiota[J]. *Microbiologyopen*, 2021, 10(3): e1187.
- [32] YARON S, SHACHAR D, ABRAMAS L, et al. Effect of high β -palmitate content in infant formula on the intestinal microbiota of term infants[J]. *J Pediatr Gastroenterol Nutr*, 2013, 56(4): 376-381.
- [33] NOWACKIJ, LEE H C, LIEN R, et al. Stool fatty acid soaps, stool consistency and gastrointestinal tolerance in term infants fed infant formulas containing high sn-2 palmitate with or without oligofructose: A double-blind, randomized clinical trial [J]. *Nutrition Journal*, 2014, 13(1): 1-11.
- [34] 余章斌, 韩树萍, 朱春, 等. 配方奶添加棕榈油对婴儿营养吸收和排便影响的 Meta 分析[J]. *中华儿科杂志*, 2009, 47(12): 904-910.
- YU Z B, HAN S P, ZHU C, et al. Effects of palm oil supplementation in formula milk on nutrient absorption and defecation in infants: A meta-analysis[J]. *Journal of China Pediatrics*, 2009, 47(12): 904-910.
- [35] LITMANOVITZ I, YOSEPH F B, LIFSHITZ Y, et al. Reduced crying in term infants fed high beta-palmitate formula: A double-blind randomized clinical trial[J]. *Bmc Pediatrics*, 2014, 14(1): 1-6.
- [36] YOSEPH F B, LIFSHITZ Y, COHEN T, et al. Sn2-palmitate improves crying and sleep in infants fed formula with prebiotics: A double-blind randomized clinical trial[J]. *Clinics in Mother & Child Health*, 2017, 14(263): 2.
- [37] 贝斐. 人乳甘油三酯 sn-2 棕榈酸结构的生理作用[J]. *国际儿科学杂志*, 2014, 41(1): 58-60.
- BEI F. Physiological role of human milk triglyceride sn-2 palmitate structure[J]. *International Journal of Pediatrics*, 2014, 41(1): 58-60.
- [38] CARTA G, MURRU E, LISAI S, et al. Dietary triacylglycerols with palmitic acid in the sn-2 position modulate levels of N-acyl-ethanolamides in rat tissues[J]. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0120424.
- [39] JEFFERY N M, SANDERSON P, NEWSHOLME E A, et al. Effects of varying the type of saturated fatty acid in the rat diet upon serum lipid levels and spleen lymphocyte functions[J]. *Biochimica Et Biophysica Acta*, 1997, 1 345(3): 223-236.
- [40] PENG L, BAR-YOSEPH F, LEVI L, et al. High beta-palmitate fat controls the intestinal inflammatory response and limits intestinal damage in mucin muc2^{-/-} deficient mice[J]. *PLoS One*, 2013, 8(6): e65878.
- [41] WEI W, JIN Q, WANG X. Human milk fat substitutes: Past achievements and current trends[J]. *Progress in Lipid Research*, 2019, 74: 69-86.
- [42] WEI W A, CONG S, WANG X S, et al. Lipase-catalyzed synthesis of sn-2 palmitate: A review[J]. *Engineering*, 2020, 6(4): 406-414.
- [43] CONG S, WEI W, ZOU X, et al. Evaluation of triacylglycerol composition in commercial infant formulas on the Chinese market: A comparative study based on fat source and stage[J]. *Food Chemistry*, 2018, 252: 154-162.
- [44] GAO L, CHENG X, YU X, et al. Lipase-mediated production of 1-oleoyl-2-palmitoyl-3-linoleoylglycerol by a two-step method [J]. *Food Bioscience*, 2020, 36: 100678.
- [45] ZHANG N, ZENG J P, WU Y P, et al. Human milk sn-2 palmitate triglyceride rich in linoleic acid had lower digestibility but higher absorptivity compared with the sn-2 palmitate triglyceride rich in oleic acid in vitro[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 69(32): 9 137-9 146.