

母乳中 1,3-二不饱和脂肪酸-2-棕榈酸甘油三酯的组成及其功能特性研究进展

张星河¹, 韦伟¹, 李菊芳², 叶兴旺^{2,3}, 刘正冬^{2,3}, 闫志远^{2,3}, 王兴国¹

(1. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122; 2. 内蒙古蒙牛乳业(集团)股份有限公司, 江南大学-蒙牛集团功能脂质协同创新实验室, 呼和浩特 011500;
3. 雅士利国际集团有限公司, 广州 510335)

摘要: 1,3-二不饱和脂肪酸-2-棕榈酸甘油三酯(UPU)是指甘油骨架的 sn-1、sn-3 位连接不饱和脂肪酸、sn-2 位连接棕榈酸的一类甘油三酯的总称,其在母乳脂肪中含量最高,可为婴儿提供更加均衡的脂肪酸和甘油三酯,对婴儿生长发育有特殊的生理功能。为对开发新型母乳结构脂肪提供理论支持,系统介绍了不同国家、地区母乳脂肪中 3 种 sn-2 棕榈酸甘油三酯 UPU、UPS、SPS 的含量,我国成熟期母乳中 UPU 的组成和含量,从降低婴儿粪便硬度、促进脂肪和矿物质吸收、保护肠道健康,提供更多种类、比例更稳定均衡的脂肪酸等方面,论述了 UPU 的功能作用及其消化和吸收特性,另外对比了市售营养强化剂 OPO 与母乳中 UPU 组成的差异,通过分析提出 LC-MS 方法更适合婴儿配方奶粉中 OPO 含量的测定。

关键词: 棕榈酸; 母乳脂肪; 甘油三酯; 婴儿; 不饱和脂肪酸

中图分类号: TS201.4; TS252.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2022)09-0114-08

Composition of 1,3-diunsaturated fatty acid-2-palmitin triacylglycerols in human milk and their functions: a review

ZHANG Xinghe¹, WEI Wei¹, LI Jufang², YE Xingwang^{2,3}, LIU Zhengdong^{2,3},
YAN Zhiyuan^{2,3}, WANG Xingguo¹

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. Functional Lipid Collaborative Innovation Laboratory of Jiangnan University - Mengniu Group, Inner Mongolia Mengniu Dairy (Group) Ltd., Hohhot 011500, China; 3. Yashili International Group Ltd., Guangzhou 510335, China)

Abstract: 1,3-Diunsaturated fatty acid-2-palmitin triacylglycerols (UPU) are the triacylglycerols that unsaturated fatty acids combined at sn-1 or 3 position, and palmitic acid located at the sn-2 position. UPU has the highest content in human milk fat, providing infant balanced fatty acids and triacylglycerols which are important for infant growth. In order to provide the scientific basis for the development of novel human milk fat substitutes, the contents of three sn-2 palmitate triglycerides UPU, UPS and SPS in human milk fat in different countries and regions, and the composition and contents of UPU in maturing human milk in China were systematically introduced, the function of UPU in terms of reducing fecal hardness, promoting fat and mineral absorption, protecting intestinal health of infants, providing a wider variety of fatty acids in a more stable and balanced ratio, and its digestive and

收稿日期: 2022-01-14; 修回日期: 2022-04-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2100700); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX21-2041)

作者简介: 张星河(1993), 女, 在读博士, 研究方向为母乳甘油三酯分析及营养(E-mail) zhangxinghe_wx@163.com。

通信作者: 王兴国, 教授(E-mail) xingguow@jiangnan.edu.cn。

absorption properties were discussed, and the differences in the composition of commercially available nutritional fortifier OPO and UPU in human milk were compared. The LC-MS method was proposed to be more suitable for the determination of OPO content in infant formula.

Key words: palmitic acid; human milk fat; triacylglycerol; infant; unsaturated fatty acid

母乳脂肪占乳汁质量的3%~5%,为婴儿提供50%左右的能量,以及全部的必需脂肪酸和脂溶性维生素等^[1-3]。母乳脂肪98%以上为一分子甘油和三分子脂肪酸酯化形成的甘油三酯(triacylglycerols, TAGs)^[4]。脂肪酸在甘油骨架上的位置一般采用“立体定向编号”系统(stereospecific numbering, sn)来描述^[5],甘油骨架的sn-1、sn-2、sn-3位各酯化一个脂肪酸。其中棕榈酸(16:0, P)是母乳脂肪中含量最高的饱和脂肪酸,占总脂肪酸含量的20%~30%,根据最新母乳脂肪分析结果,有30种甘油三酯分子含有棕榈酸,总含量达60%^[6]。母乳中棕榈酸在甘油骨架的位置分布有很强的特异性,其60%以上分布在甘油骨架的sn-2位,而不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, U)更倾向于分布在甘油骨架的sn-1、sn-3位。这种甘油骨架的sn-1、sn-3位连接不饱和脂肪酸、sn-2位连接棕榈酸的一类甘油三酯称为1,3-二不饱和脂肪酸-2-棕榈酸甘油三酯(1,3-diunsaturated fatty acid-2-palmitin triacylglycerols, UPU),在母乳脂肪中的含量达30%以上^[6]。此外,其他两类棕榈酸在sn-2位的甘油三酯分别是含一个不饱和脂肪酸和一个饱和脂肪酸(saturated fatty acid, S)的1(3)-不饱和脂肪酸-2-棕榈酸-3(1)饱和脂肪酸甘油三酯(UPS),在母乳脂肪中约占20%,以及含两个饱和脂肪酸的1,3-饱和脂肪酸-2-棕榈酸甘油三酯(SPS),在母乳脂肪中含量约为5%。

母乳中含量较高的UPU主要是1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯(1,3-olein-2-palmitin

triacylglycerols, OPO)、1-油酸-2-棕榈酸-3-亚油酸甘油三酯(1-olein-2-palmitin-3-linolein triacylglycerols, OPL)、1,3-二亚油酸-2-棕榈酸甘油三酯(1,3-linolein-2-palmitin triacylglycerols, LPL),其他微量的UPU还包括OPPo(18:1-16:0-16:1)、LPPo(18:2-16:0-16:1)、OPDha(18:1-16:0-22:6)、LPDha(18:2-16:0-22:6)等^[7-8]。其中,OPO是欧美国家母乳中含量最高的甘油三酯,而中国母乳中含量最高的是OPL。临床试验表明,喂食母乳和含猪油的奶粉的婴儿,比喂食配方奶粉的婴儿表现出更高的脂肪、钙的吸收和更低的粪便硬度^[9],以往仅强调了OPO对婴幼儿的生理功能,实际上对婴幼儿脂肪吸收、粪便硬度有益的是一类UPU的综合作用,包括OPL、LPL及其他微量UPU,因此仅研究OPO是不完整的,母乳中UPU的含量分布及生理功能应得到进一步重视和研究。本文从母乳中UPU的组成及含量、功能特性、市售营养强化剂OPO与母乳中UPU组成的差异等角度进行综述,以期开发新型母乳结构脂肪,提高婴儿配方奶粉脂肪与母乳脂肪相似度提供新的思路。

1 母乳中UPU的组成及含量

1.1 母乳脂肪中UPU、UPS、SPS的含量

目前关于母乳中甘油三酯的分析较少,本文对母乳中甘油三酯的组成进行了系统性的检索,并对其中的三种sn-2位含有棕榈酸的甘油三酯,即UPU、UPS、SPS的含量进行计算,结果如表1所示。

表1 母乳脂肪中UPU、UPS、SPS的含量

国家/地区	母乳	含量/%			检测方法	参考文献
		UPU	UPS	SPS		
中国无锡	初乳	34.40	26.44	3.44	UPSFC-Q-TOF-MS (ESI)	[6]
	过渡乳	35.87	22.42	1.97		
	成熟乳	29.81	23.46	1.89		
中国无锡	成熟乳	31.84	24.28	5.04	UPSFC-Q-TOF-MS (ESI)	[10]
中国无锡	初乳	52.75	25.05	0.68	HPLC-ELSD	[11]
	过渡乳	41.48	27.53	0.38		
	成熟乳	44.59	25.70	0.74		
中国无锡	成熟乳	38.83	17.99	1.43	UPSFC-Q-TOF-MS (ESI)	[7]
	成熟乳	43.58	15.17	1.34		
	成熟乳	34.95	17.43	0.73		
中国北京	初乳	34.00	19.45	4.48	UPLC-MS (ESI)	[8]
	成熟乳	33.46	18.46	4.97		
中国湖北	过渡乳	24.38	26.61	4.95	UPSFC-Q-TOF-MS (ESI)	[12]
	成熟乳	13.96	25.53	4.86		
中国四川	过渡乳	19.91	25.89	4.50	UPSFC-Q-TOF-MS (ESI)	[12]
	成熟乳	18.21	28.65	4.93		

续表 1

国家/地区	母乳	含量/%			检测方法	参考文献
		UPU	UPS	SPS		
中国北京	过渡乳	24.51	30.49	6.76	UPSFC - Q - TOF - MS (ESI)	[12]
	成熟乳	21.20	30.83	6.04		
中国北京	成熟乳	27.22	20.75	4.07	UPLC - MS/MS (ESI)	[13]
芬兰	成熟乳	21.58	23.60	7.40	UPLC - MS/MS (ESI)	[13]
西班牙	成熟乳	36.78	32.09	6.12	HPLC - ELSD	[14]
丹麦	初乳	46.87	23.09	2.65	HPLC - ELSD	[15]
	过渡乳	31.73	33.35	6.63		
	成熟乳	37.32	27.71	3.99		
意大利	-	27.67	21.20	12.19*	HPLC - MS (APCI)	[16]
意大利	-	25.37	48.14	6.01	GC	[17]
西班牙	初乳	56.59	16.54	0.87	HPLC - ELSD	[18]
	过渡乳	43.21	15.75	0.88		
	成熟乳	51.76	14.39	0.60		
平均		33.93	24.41	3.81		

注：-表示未注明母乳类型，*表示可能含有甘油三酯的异构体

由表 1 可看出：母乳脂肪中 UPU 含量比 UPS、SPS 高，三者的平均含量分别为 33.93%、24.41% 和 3.81%；母乳脂肪的 UPU 含量在不同文献中差异较大，范围在 13.96% ~ 56.59%，UPS 含量为 14.39% ~ 48.14%，SPS 含量为 0.38% ~ 12.19%，不同文献中

这三种类型甘油三酯含量的差异主要是由检测方法和母亲的个体差异造成的。

本文在三种类型甘油三酯含量分析的基础上，进一步分析了母乳脂肪中 UPU、UPS 和 SPS 甘油三酯碳骨架上结合脂肪酸的规律，如图 1 所示。

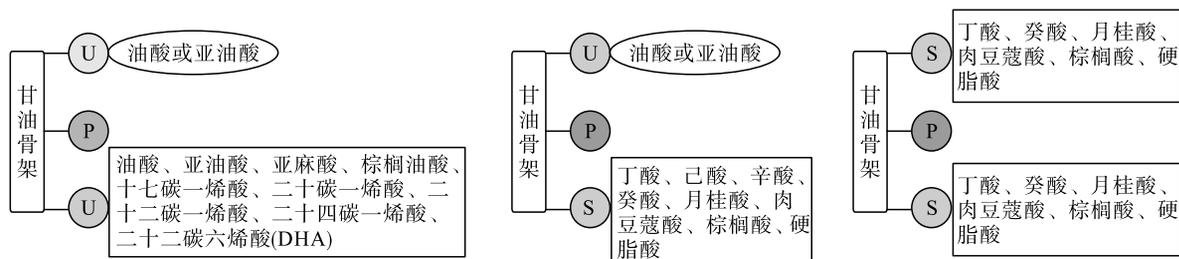


图 1 母乳脂肪中 UPU、UPS 和 SPS 甘油三酯碳骨架上结合脂肪酸的类型

由图 1 可看出：从甘油三酯的分子结构看，母乳脂肪中的 UPU 主要是甘油骨架上结合棕榈酸和油酸/亚油酸外，再结合一分子的其他不饱和脂肪酸；UPS 是甘油骨架上结合棕榈酸和油酸/亚油酸外，再结合一分子饱和脂肪酸。结合在 UPU 上的不饱和脂肪酸包括油酸、亚油酸、亚麻酸、棕榈油酸、十七碳一烯酸、二十碳一烯酸、二十二碳一烯酸、二十四碳一烯酸和二十二碳六烯酸(DHA)等，而结合在 UPS、SPS 上的饱和脂肪酸主要是碳数在 4 ~ 18 的，如丁酸、己酸、辛酸、癸酸、月桂酸、肉豆蔻酸、棕榈酸、硬脂酸等。

1.2 母乳中 UPU 的组成和含量

表 2 列举了近几年鉴定比较全面的我国成熟期母乳中 UPU 的组成和含量。由表 2 可看出，我国成熟期母乳中有 13 种 UPU。其中 OPL 和 OPO 含量较高，最高可达 19.15% 和 17.45%，其次是 LPL，最高为

8.21%^[7]。OPO 是过去十几年研究最多的一种母乳甘油三酯，原因是 OPO 在欧美国家母乳甘油三酯中含量最高。而最近几年中国母乳脂肪的研究结果表明，OPO 并不是唯一高含量的 UPU，在中国母乳脂肪中 OPL 含量普遍超过了 OPO^[6-7,10-13]，因此国内对 OPL 的相关研究逐渐增多，母乳脂肪替代脂产品也根据中国母乳脂肪的特点进行了升级。近些年用 UPLC - MS 和 UPSFC - MS 分析鉴定出更多种类的 UPU^[6-8,10,12]，包括连接微量脂肪酸的 OPDha、LPDha 等十多种，尽管含量较低 (< 1%)，却具有重要的生理功能。

受饮食习惯和哺乳期等因素的影响，不同国家、不同地区和不同民族的母乳甘油三酯组成有一定的差异，同时也存在个体差异，但是总体来说，UPU 含量较高是普遍规律。并且，不同国家、地区的母乳中

UPU的种类和比例有特定的范围,这是母乳甘油三酯的重要特点。这与天然动植物油脂不同,牛乳和羊乳中UPU含量分别只有7.01%和3.83%^[6],而植物油中只有少量的UPU,其棕榈酸大部分位于sn-1,3位,不饱和脂肪酸位于sn-2位^[6,19]。猪油中含有相对较多的UPU,但是由于不同民族饮食禁忌等原因,一般不被应用于婴儿配方奶粉的生产中^[20]。随着sn-2棕榈酸甘油三酯对婴幼儿有益作用的证明,人们逐渐开始对这类甘油三酯进行产

品开发与商业化,如通过生物酶法催化反应合成富含OPO的母乳脂肪替代脂。

到目前为止,还没有一种天然脂肪或替代脂肪能够完全和母乳脂肪一致。现有的婴儿配方奶粉在脂肪酸组成上已经极大程度地模拟了母乳脂肪,sn-2位脂肪酸的组成与母乳脂肪的相似度也在逐渐提高,但是目前的婴儿配方奶粉中没有与母乳脂肪类似的UPU,在甘油三酯的组成与结构上还与母乳脂肪相差甚远^[6,21]。

表2 我国成熟期母乳中UPU的组成和含量

UPU	无锡 ^[7]	无锡 ^[7]	无锡 ^[7]	无锡 ^[10]	无锡 ^[6]	湖北 ^[12]	四川 ^[12]	北京 ^[12]	北京 ^[8]
OPL	18.08	19.15	13.11	11.92	10.79	3.18	5.13	6.12	14.58
OPO	15.24	17.45	11.25	9.82	9.33	5.84	7.63	9.27	11.13
LPL	4.11	4.34	8.21	4.74	6.46	4.08	4.25	5.09	5.37
OPPo	0.74	0.86	0.40	1.28	1.87	-	-	-	1.15
LPPo	0.55	0.47	0.46	1.08	1.05	-	-	-	0.52
OPHe	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07
OPLn	-	-	0.70	1.19	-	-	-	-	-
LPLn	-	0.43	0.71	1.14	-	-	-	-	0.33
OPEo	0.11	0.17	0.11	0.56	0.13	-	-	-	0.31
OPDa	-	-	-	-	-	0.45	0.37	0.30	-
OPT	-	-	-	-	-	0.23	0.72	0.18	-
OPDha	-	0.47	-	0.07	0.13	-	-	-	-
LPDha	-	0.24	-	0.04	0.05	0.18	0.11	0.24	-
合计	38.83	43.58	34.95	31.84	29.81	13.96	18.21	21.20	33.46

注: -表示未检出。P. 棕榈酸;Po. 棕榈油酸;He. 十七碳一烯酸;O. 油酸;L. 亚油酸;Ln. 亚麻酸;Eo. 二十碳一烯酸;Da. 二十二碳一烯酸;T. 二十四碳一烯酸;Dha. 二十二碳六烯酸。下同

2 UPU的功能作用及消化、吸收特性

2.1 可降低婴儿粪便硬度,促进脂肪和矿物质吸收,保护肠道健康

越来越多证据表明,棕榈酸在母乳脂肪甘油三酯中sn-2位的特殊定位促进了足月和早产婴儿体内脂肪和矿物质钙、镁的吸收^[8,22]。少量的甘油三酯在婴儿的胃部消化(10%~30%),sn-3位脂肪酸被胃脂酶水解,形成sn-1,2甘油二酯;超过70%的甘油三酯在小肠中消化吸收,胰脂酶特异性水解sn-1,3位脂肪酸,生成最终产物sn-2单甘油酯和游离脂肪酸^[23]。随后,sn-2单甘油酯和游离脂肪酸直接通过小肠黏膜被吸收,重新形成甘油三酯,与其他组分胆固醇、磷脂、脂蛋白等组合成为乳糜微粒经淋巴系统转运。当甘油三酯被水解下来的游离脂肪酸是长链饱和脂肪酸(肉豆蔻酸、棕榈酸和硬脂酸等)时,非常容易与小肠中的矿物质离子Ca²⁺、Mg²⁺发生皂化反应,形成溶解度很低的钙皂和镁皂,使Ca²⁺、Mg²⁺随粪便排出体外,造成能量

和矿物质的丢失,同时使粪便变硬,引起婴儿便秘、肠道堵塞和全身不适等^[8,22]。特别是早产儿,其消化系统发育不完善,体质量较低,需要提高能量和营养素的利用率^[24]。而不饱和脂肪酸位于sn-1,3位、棕榈酸位于sn-2位的UPU,被水解成为游离脂肪酸的主要是不饱和脂肪酸,不易与矿物质结合,即使形成不饱和脂肪酸钙皂也是软的。临床试验表明,此时婴儿的粪便较软,啼哭次数降低,可避免脂肪和矿物质营养的浪费,对婴幼儿的骨骼生长和骨骼强度有促进作用^[25]。图2为UPU和SPS与Ca²⁺在小肠内的消化吸收示意图^[24]。

还有研究表明,以UPU为主的棕榈酸位于sn-2位的甘油三酯与肠道发育和健康相关,能够增加肠道益生菌的数量,帮助双歧杆菌和乳酸杆菌的定植^[26-27]。乳酸杆菌和双歧杆菌能够促进婴幼儿肠道发育,在对抗病原体和免疫调节等方面具有有益作用^[28],此外,还可以减少肠道侵蚀和组织形态损伤程度,保护肠道健康。

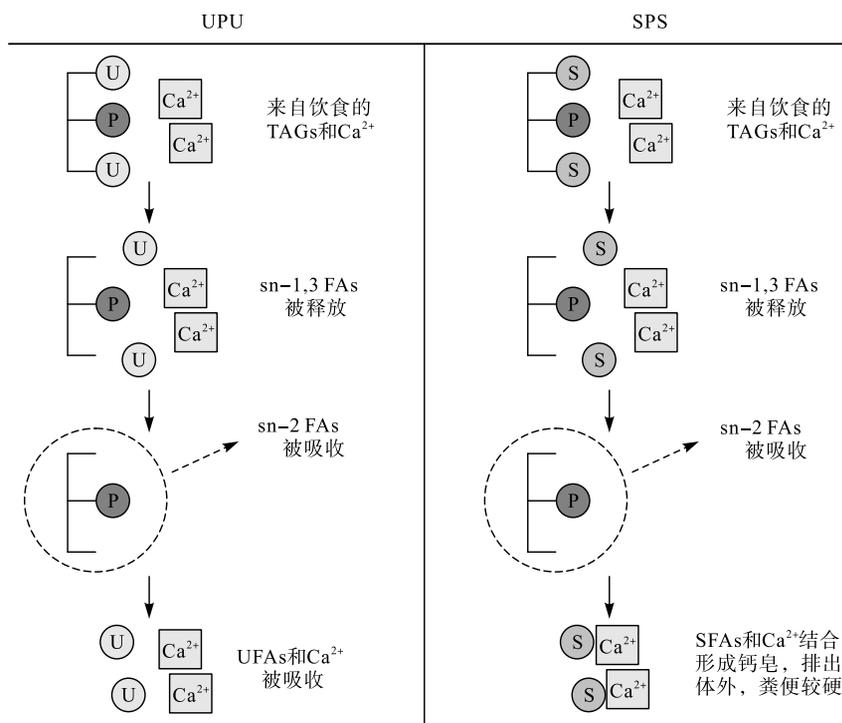


图2 UPU和SPS与Ca²⁺在小肠内的消化吸收示意图

2.2 UPU提供更多种类、比例更稳定均衡的脂肪酸

母乳中更多种类甘油三酯的发现得益于分析手段的发展。与早些年研究结果相比,本文所列举的UPU不仅包括以往研究中的OPO、OPL,还包括含有其他长链多不饱和脂肪酸(LC-PUFAs)的甘油三酯分子,如含有油酸、亚油酸、亚麻酸、棕榈油酸、十七碳一烯酸、二十碳一烯酸、二十二碳一烯酸、二十四碳一烯酸和二十二碳六烯酸(DHA)等的甘油三酯。这些甘油三酯在不同地区、不同哺乳期的样本中均存在,并且其比例基本是稳定的,并为婴幼儿提供更丰富、更全面的均衡营养。

此外,这些长链多不饱和脂肪酸对婴儿的生长发育也起着重要的作用,通过参与神经系统和免疫系统的发育过程,在细胞信号传导和基因表达调控中起到重要作用,还会影响肠道微生物。DHA是大脑中含量最丰富的 $n-3$ 型脂肪酸(占10%~15%),也是视觉系统中最丰富的脂肪酸(约占50%)^[29],而 α -亚麻酸是其前体物质(母乳脂肪中的亚麻酸主要为 α -亚麻酸)。DHA可以改变神经元膜的流动性和物理结构,参与产生神经递质,影响突触传递和底物与膜受体的结合,增强海马神经元的生长,从而改善婴儿的学习和记忆能力^[30]。二十四碳一烯酸也称神经酸,在人体中通过酰胺键与鞘氨醇结合,形成神经鞘磷脂,具有促进婴儿大脑髓鞘发育的功能^[31],婴儿如果缺乏神经酸,会导致脑生长发育落后,生长发育迟缓,以及视觉功能、神经系统发育障碍^[32]。尽管长链多不饱和脂肪酸在母乳

脂肪中是微量的,但是鉴于其重要的生理功能,UPU结构的甘油三酯也值得进一步开发和应用。

2.3 UPU的消化和吸收特性

UPU在小肠中消化率和吸收率的研究还不是很,尚处于发展阶段。Zhang等^[33]对比了OPO、OPL和LPL在体外模拟婴儿消化系统中的消化率和在Caco-2细胞的吸收率,结果发现,OPO组比OPL组和LPL组的消化率高,而OPL组和LPL组在Caco-2细胞中的合成和运输能力更强。另外,在OPL含量高的Caco-2细胞吸收试验组别中,脂肪酸结合蛋白1、过氧化物酶体增殖物激活受体 α 和微粒体甘油三酯转移蛋白的表达显著高于OPO含量高的组别,这些蛋白与促进脂肪酸运输和合成相关,也是OPL组吸收率更高的原因。Wu等^[34]对LO2细胞脂质代谢研究的结果也显示,OPL含量高的组别,脂质积累量更高,乙酰辅酶A羧化酶1和长链酰基辅酶A合成酶1的表达水平也更高,这种特性是否更有利于婴儿的生长发育还需要进一步验证,其结果对开发符合中国母乳脂肪特点的婴儿配方奶粉十分重要。

3 营养强化剂OPO与母乳中UPU的差异

天然植物油的棕榈酸大多位于甘油三酯的sn-1,3位,而油酸、亚油酸等不饱和脂肪酸位于sn-2位^[19,21]。这种结构的甘油三酯不利于婴儿的成长,会造成婴儿矿物质流失,还容易造成婴儿便秘、腹痛和肠道堵塞等情况^[35],而添加OPO可以改善这些状况。2015年我国批准的食品营养强化剂

OPO是为模拟母乳脂肪中棕榈酸位于sn-2位的甘油三酯而设计开发的结构甘油三酯产品。目前许多婴儿、幼儿及较大幼儿食品中,营养强化剂都添加了OPO。近年来随着对母乳甘油三酯研究的深入,越来越多的研究表明,营养强化剂OPO与母乳中UPU存在一定的差异。

GB 30604—2015《食品安全国家标准 食品营养

强化剂 1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯》对OPO组成品质指标规定为:①气相色谱中碳数为52的甘油三酯占总甘油三酯的质量分数不小于40%;②sn-2位棕榈酸占有所有棕榈酸含量超过52%;③棕榈酸甘油三酯的质量分数小于10%。表3为本实验室采用国标和LC-MS两种方法测定的4种市售营养强化剂OPO的甘油三酯组成。

表3 4种营养强化剂OPO的甘油三酯组成

标准	分析方法	含量/%			
		样品1	样品2	样品3	样品4
sn-2位棕榈酸占总棕榈酸	国标法	58	61	52	70
OPO(C ₅₂ 计)		43	42	48	46
PPP		4.5	7.7	6.4	4.4
OPO	LC-MS	21.6	22.1	24.2	23.4
OPL		9.2	11.2	11.3	9.3
三饱和脂肪酸甘油三酯		10.5	14.4	12.4	9.9

从表3可以看出,两种方法的结果有比较大的差异。造成差异的原因是,国标采用的是气相色谱法,根据气相色谱分离原理,相同碳原子数甘油三酯基团在程序控温条件下几乎同时出峰^[36],碳数为52的甘油三酯,不仅包括OPO、OPL,还包括LPL、OPS、LPS、SPS等棕榈酸在sn-2位的甘油三酯,以及由其他脂肪酸组成的总碳数为52的甘油三酯,因此国标方法测定的C₅₂甘油三酯组成是一系列甘油三酯的混合物,测定的食品营养强化剂OPO不表示其中真实的甘油三酯组成。

此外,GB 30604—2015规定的检测方法,只适

用于以食用植物油与油酸(来源于食用植物油脂)为原料,经脂肪酶催化酯交换制得的营养强化剂OPO;另外,由于OPO产品中通常添加牛/羊乳脂、植物油等,这些天然脂肪中含有一定量的碳数为52的但不是OPO的甘油三酯,国标方法无法分离。因此,国标方法不应作为衡量婴儿配方奶粉中OPO含量的标准,相对来说LC-MS方法较为准确合理。

表4为本实验室采用前期建立的LC-MS方法分析的母乳脂肪和营养强化剂OPO中含棕榈酸的甘油三酯在结构组成上的差异。

表4 母乳脂肪和营养强化剂OPO中含棕榈酸的甘油三酯的分类差异

母乳脂肪 ^[6-8,10,12]			营养强化剂OPO产品		
UPU	UPS	SPS	C ₅₂ 甘油三酯	PPP	其他甘油三酯
OPL	OPBu	LaPBu	OPO	PPP	LaPLa
OPO	OPCo	LaPCa	OPL		MPLa
LPL	OPCa	LaPLa	LPL		PPLa
OPP _o	OPLa	MPBu	OPS		PPM
LPP _o	OPM	MPCa	LPS		SPLa
OPHe	OPPa	MPLa	SPS		SPP
OPL _n	OPP	PPBu			OPLa
LPL _n	OPHa	PPCa			OPM
OPE _o	OPS	PPLa			OPP
OPDa	OPE	PPM			LPM
OPT	LPCo	SPCa			LPP
OPDha	LPCy	SPLa			PoPP
LPDha	LPCa	SPM			OPE _o
	LPLa	SPP			OPDa
	LPM				
	LPS				
	LnPP				
	PoPLa				

注:Bu. 丁酸;Co. 己酸;Cy. 辛酸;Ca. 癸酸;La. 月桂酸;M. 肉豆蔻酸;Pa. 十五碳酸;Ha. 十七碳酸;E. 二十碳酸

由表4可看出:相比母乳脂肪,市售 OPO 产品中 UPU 类型的甘油三酯种类少,脂肪酸类型单一; OPO 含量只有 20% 左右, OPL 含量 10% 左右;而且含有比较高的三饱和脂肪酸甘油三酯,主要为 PPP、SPP、SPS 等,总含量接近甚至超过 10% (表 3)。SPP 和 SPS 的熔点都比 PPP 更高,在婴儿肠道内更难水解消化。

4 结束语

母乳中 UPU 是一类含量较高且对婴儿非常重要的甘油三酯。母乳中 UPU 的组成特点是由油酸、亚油酸等不饱和脂肪酸在甘油骨架的 sn-1、sn-3 位,而棕榈酸在 sn-2 位。UPU 是母乳脂肪特有的一类甘油三酯,我国母乳中含量较高的 UPU 为 OPL、OPO、LPL 等。UPU 相比于植物油具有特殊的消化和吸收特性,可降低婴儿粪便硬度,促进脂肪和矿物质吸收,提供更多种类、比例更均衡的脂肪酸等,对于婴儿具有重要的作用。市售营养强化剂 OPO 结构甘油三酯的产品实际是碳数为 52 的甘油三酯混合物,不仅包括 OPO、OPL,还包括 OPS、LPS、SPS 等非 UPU 结构的甘油三酯。开发 UPU 替代脂,研究 UPU 在人群试验中的功效及其代谢机制将是未来的重点。

参考文献:

- [1] 王兴国. 人乳脂及人乳替代脂 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] JENNESS R G. Lipids in human milk[J]. *Lipids*, 1999, 34(12): 1243-1271.
- [3] 邹孝强. 人乳脂替代品的评价模型建立及其酶法制备 [D]: 江苏 无锡: 江南大学, 2013.
- [4] 徐俊杰. 甘油三酯的体外模拟消化水解研究 [D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2014.
- [5] WEI W, SUN C, WANG X, et al. Lipase - catalyzed synthesis of sn - 2 palmitate: a review[J]. *Engineering*, 2020, 6(4): 406-414.
- [6] ZHANG X, WEI W, TAO G, et al. Identification and quantification of triacylglycerols using ultraperformance supercritical fluid chromatography and quadrupole time - of - flight mass spectrometry: comparison of human milk, infant formula, other mammalian milk, and plant oil[J]. *J Agric Food Chem*, 2021, 69(32): 8991-9003.
- [7] ZHANG X, QI C, ZHANG Y, et al. Identification and quantification of triacylglycerols in human milk fat using ultra - performance convergence chromatography and quadrupole time - of - flight mass spectrometry with supercritical carbon dioxide as a mobile phase[J]. *Food Chem*, 2019, 275: 712-720.
- [8] ZHAO P, ZHANG S, LIU L, et al. Differences in the triacylglycerol and fatty acid compositions of human colostrum and mature milk[J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(17): 4571-4579.
- [9] FILER L J, MATTSON F H, FOMON S J. Triglyceride configuration and fat absorption by the human infant[J]. *J Nutr*, 1969, 99(3): 293-298.
- [10] DAI X, YUAN T, ZHANG X, et al. Short - chain fatty acid (SCFA) and medium - chain fatty acid (MCFA) concentrations in human milk consumed by infants born at different gestational ages and the variations in concentration during lactation stages [J]. *Food Funct*, 2020, 11(2): 1869-1880.
- [11] YUAN T, QI C, DAI X, et al. Triacylglycerol composition of breast milk during different lactation stages [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(8): 2272-2278.
- [12] 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 Chem*, 2017, 221(15): 555-567.
- [13] 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 Chem*, 2017, 233(15): 351-360.
- [14] TEN - DONÉNECH I, BELTRÁN - ITURAT E, HERRERO - MARTÍNEZ J M, et al. Triacylglycerol analysis in human milk and other mammalian species: small - scale sample preparation, characterization, and statistical classification using HPLC - ELSD profiles[J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63(24): 5761-5770.
- [15] 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]. *J Agric Food Chem*, 2013, 61(29): 7070-7080.
- [16] GASTALDI D, MEDANA C, GIANCOTTI V, et al. HPLC - APCI analysis of triacylglycerols in milk fat from different sources[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2011, 113(2): 197-207.
- [17] HADDAD I, MOZZON M, STRABBIOLI R, et al. A comparative study of the composition of triacylglycerol molecular species in equine and human milks[J]. *Dairy Sci Technol*, 2012, 92(1): 37-56.
- [18] MORERA P S, CASTELLOTE B A, CAMPOY F C, et al. Triacylglycerol composition in colostrum, transitional and mature human milk[J]. *Eur J Clin Nutr*, 2000, 54(12): 878-882.
- [19] SUN C, WEI W, SU H, et al. Evaluation of sn - 2 fatty acid composition in commercial infant formulas on the

- Chinese market: a comparative study based on fat source and stage[J]. *Food Chem*, 2017, 242(1): 29–36.
- [20] ZOU X, JIN Q, GUO Z, et al. Preparation of 1, 3 – dioleoyl – 2 – palmitoylglycerol – rich structured lipids from basa catfish oil; combination of fractionation and enzymatic acidolysis[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2016, 118(5):708–715.
- [21] FABRITIUS M, LINDERBORG K M, TARVAINEN M, et al. Direct inlet negative ion chemical ionization tandem mass spectrometric analysis of triacylglycerol regioisomers in human milk and infant formulas[J/OL]. *Food Chem*, 2020, 328: 126991 [2021 – 01 – 14]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126991>.
- [22] MU H, PORSGAARD T. The metabolism of structured triacylglycerols [J]. *Prog Lipid Res*, 2005, 44 (6): 430–448.
- [23] 腾飞, 杨林, 马莺. 乳甘油三酯的组成结构及其消化吸收和代谢特性[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10 (5): 1109–1119.
- [24] TALBOT G. Specialty oils and fats in food and nutrition [M]// HAPPE R P, GAMBELLI L. *Infant formula*. London: Woodhead Publishing, 2015:285–315.
- [25] 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.
- [26] SCHMELZLE H, WIRTH S, SKOPNIK H, et al. Randomized double – blind study of the nutritional efficacy and bifidogenicity of a new infant formula containing partially hydrolyzed protein, a high *beta* – palmitic acid level, and nondigestible oligosaccharides [J]. *J Pediatr Gastroenterol Nutr*, 2003, 36(3):343–351.
- [27] 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.
- [28] KAPLAN J L, SHI H N, WALKER W A. The role of microbes in developmental immunologic programming[J]. *Pediatr Res*, 2011, 69:465–472.
- [29] BRENNAN J T, CARLSON S E. Docosahexaenoic acid and human brain development: evidence that a dietary supply is needed for optimal development [J]. *J Hum Evol*, 2014, 77: 99–106.
- [30] HEATON A E, MELDRUM S J, FOSTER J K, et al. Doesdocosahexaenoic acid supplementation in term infants enhance neurocognitive functioning in infancy[J]. *Front Hum Neurosci*, 2013, 7(7):774–786.
- [31] LI Q, CHEN J, YU X, et al. A mini review of nervonic acid: source, production, and biological functions [J]. *Food Chem*, 2019, 301(12):52–86.
- [32] UZMAN L L, RUMLEY M. Changes in the composition of the developing mouse brain during early myelination [J]. *J Neurochem*, 2010, 3(2):170–184.
- [33] ZHANG N, ZENG J, WU Y, 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]. *J Agric Food Chem*, 2021, 69(32):9137–9146.
- [34] WU Y, ZHANG N, DENG Z Y, et al. Effects of the major structured triacylglycerols in human milk on lipid metabolism of hepatocyte cells in vitro[J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 69(2):69–76.
- [35] QUINLAN P T, LOCKTON S, IRWIN J, et al. The relationship between stool hardness and stool composition in breast – and formula – fed infants [J]. *J Pediatr Gastroenterol Nutr*, 1995, 20(1): 81–90.
- [36] 食品安全国家标准 食品营养强化剂 1, 3 – 二油酸 – 2 – 棕榈酸甘油三酯:GB 30604—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

欢迎投稿 <http://tg.chinaoils.cn>

欢迎关注中国油脂微信公众号

扫一扫

