

母乳脂化学组成的研究进展

黄卓能¹,程昕祎¹,赵昕辰¹,邹凤²,王小三¹,黄健花¹

(1. 江南大学食品学院,食品科学与技术国家重点实验室,食品安全与质量控制协同创新中心,江苏无锡214122;

2. 无锡市食品安全检验检测中心,江苏无锡214122)

摘要:母乳是一种极为精细和复杂的营养体系,是婴幼儿的最佳食物。母乳中的脂肪成分是婴幼儿的最佳脂肪来源,因其具有供能高效、易被婴幼儿消化吸收、能抵抗病原微生物等特点,对婴幼儿有着不可或缺的作用。对母乳基本化学组成进行了介绍,重点综述了母乳脂中甘油三酯和磷脂的组成、含量及脂肪酸分布特点,并简要概述了胆固醇的含量及检测方法,为进一步明确母乳脂生理功能以及开发与母乳脂高度相似的婴幼儿配方奶粉用油提供科学参考。

关键词:母乳脂;甘油三酯;磷脂;胆固醇

中图分类号:TS252.1;TQ641 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2021)05-0063-08

Advances in chemical composition of human milk fat

HUANG Zhuoneng¹, CHENG Xinyi¹, ZHAO Xinchen¹, ZOU Feng²,
WANG Xiaosan¹, HUANG Jianhua¹

(1. Collaborative Innovation Center of Food Safety and Quality Control, State Key Laboratory of Food Science and Technology, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. Wuxi Institute for Food Control, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: Human milk is an extremely delicate and complex nutritional system, and it is also the best food for infants. Its fat component is the best source of fat for infants. Because of its efficient energy supply, easy digestion and absorption by infants, and resistance to pathogenic microorganisms, human milk fat has an indispensable effect on infants. In order to provide scientific reference for further clarifying the physiological functions of human milk fat and developing a kind of oil for infant formulas highly similar to human milk fat, the basic chemical composition of human milk was introduced, the composition, content and fatty acid distribution characteristics of triglycerides and phospholipids in human milk fat were mainly reviewed, and the content and detection methods of cholesterol were briefly summarized.

Key words: human milk fat; triglycerides; phospholipids; cholesterol

母乳是婴幼儿出生后最理想的天然食物。在婴幼儿生长发育过程中,母乳不仅能为婴幼儿提供充足的能量和营养物质,还能提高婴幼儿的免疫抗病功能,促进其生长代谢^[1]。母乳的基本化学组成为蛋白质、脂肪、碳水化合物、矿物质和维生素等。母

乳脂作为新生儿膳食脂肪的唯一来源,为其提供了一半以上的能量和生长发育所必需的脂肪酸、脂溶性维生素和其他脂类成分^[2]。母乳脂是婴幼儿健康成长的重要营养成分。

当母亲由于种种原因无法保证母乳喂养时,婴幼儿配方奶粉是其最佳替代物。婴幼儿配方奶粉是通过添加各种营养物质进行调配来模仿母乳,实现各组成成分与母乳高度相似。婴幼儿配方奶粉中的脂质成分也需要全面、准确的复制和模拟母乳脂的组成。因此,除了需要不断完善母乳宏观脂质组成

收稿日期:2020-07-17;修回日期:2020-09-21

基金项目:新农科研究与改革实践项目

作者简介:黄卓能(1998),女,在读本科,专业为食品科学与工程(E-mail) huangzhuoneng9@163.com。

通信作者:王小三,副教授(E-mail) wxstongxue@163.com。

的特点,还需明确微量脂质的组成及含量。

本文就母乳、母乳脂的化学组成以及母乳脂中甘油三酯、磷脂及其脂肪酸组成等进行了综述,以期为进一步研究各脂质成分生理功能和婴幼儿配方奶粉用油提供有益参考。

1 母乳的基本化学组成

母乳能为婴幼儿提供生长发育所需的全部营养成分,例如蛋白质、脂肪、碳水化合物(母乳中主要是乳糖)、矿物质与维生素等;除此之外,母乳还含有许多生理活性成分。这些营养素和活性物质会随着婴幼儿处于不同生长发育阶段而发生变化,如表1所示。吴立芳^[3]对中国东北部城市健康母乳不同泌乳阶段的母乳成分进行了研究,发现不同阶段母乳组成相对恒定,部分营养成分含量在不同时期呈现差异性。这些成分不断相互调节、相互作用,为婴幼儿提供能量和营养,增强婴幼儿免疫系统,促进其生长代谢。

表1 不同泌乳阶段母乳基本化学组成及含量^[3]

营养素	初乳	过渡乳	成熟乳
蛋白质/(g/100 g)	2.21 ± 0.30	2.22 ± 0.66	1.19 ± 0.25
脂肪/(g/100 g)	2.66 ± 1.05	3.49 ± 0.97	4.18 ± 1.16
乳糖/(g/100 g)	4.59 ± 1.24	3.99 ± 0.75	5.56 ± 0.36
钙/(mg/100 g)	29.83 ± 6.04	34.76 ± 6.64	31.19 ± 6.46
磷/(mg/100 g)	16.09 ± 3.51	19.17 ± 4.14	16.39 ± 7.68
钾/(mg/100 g)	50.50 ± 18.84	60.01 ± 8.44	42.94 ± 7.12
钠/(mg/100 g)	33.14 ± 9.38	32.13 ± 12.21	18.74 ± 9.15
镁/(mg/100 g)	3.17 ± 0.51	3.48 ± 0.70	2.87 ± 0.60
铁/(mg/100 g)	0.10 ± 0.03	0.07 ± 0.03	0.05 ± 0.03
锌/(mg/100 g)	0.53 ± 0.15	0.44 ± 0.11	0.24 ± 0.09
铜/(μg/100 g)	54.93 ± 14.23	65.61 ± 15.77	31.88 ± 12.18
锰/(μg/100 g)	1.86 ± 1.90	2.29 ± 3.24	2.01 ± 2.19
V _A /(μg/100 g)	148.25 ± 21.05	-	30.03 ± 19.61
V _E /(μg/100 g)	1.27 ± 0.30	-	0.35 ± 0.04
V _{B1} /(μg/100 g)	6.31 ± 1.47	6.47 ± 1.93	8.67 ± 2.11
V _{B2} /(μg/100 g)	40.88 ± 7.13	47.80 ± 9.77	37.75 ± 10.24

2 母乳脂的化学组成

母乳脂含量占母乳的3%~5%,其主要组成及含量如表2所示。由表2可知,母乳脂中甘油三酯含量占98%以上,甘油磷脂和鞘磷脂含量为0.81%,胆固醇含量为0.34%,甘油二酯、单甘油酯和游离脂肪酸含量较低。甘油酯是由甘油和脂肪酸酯化形成的,而磷脂具有由磷酸相连的取代基团(胆碱、乙醇胺、丝氨酸等)构成的亲水头和由脂肪酸链构成的疏水尾。由于脂肪酸结构(链长、双键数目和位置)和位置的不同,导致母乳脂成分极其复杂。

表2 母乳脂的主要组成及含量^[4]

脂质化合物	含量/%
甘油三酯	98.76
甘油二酯	0.01
单甘油酯	ND
游离脂肪酸	0.08
甘油磷脂和鞘磷脂	0.81
胆固醇	0.34
胆固醇酯	0.02

注:ND表示未检出。下同

2.1 母乳脂的甘油三酯组成及结构

2.1.1 母乳脂的脂肪酸组成及特点

组成母乳脂的脂肪酸有200多种^[5],依照饱和程度的不同,可分为饱和脂肪酸(SFA)、单不饱和脂肪酸(MUFA)、多不饱和脂肪酸(PUFA)3类。母乳脂中常见脂肪酸组成及含量如表3所示。

表3 母乳脂中常见脂肪酸组成及含量^[4]

脂肪酸	含量/%
丁酸 C4:0	0~0.36
己酸 C6:0	0.05~0.39
辛酸 C8:0	0.09~0.67
癸酸 C10:0	0.83~2.40
月桂酸 C12:0	1.5~9.9
肉豆蔻酸 C14:0	1.8~8.3
棕榈酸 C16:0	14.6~21.4
硬脂酸 C18:0	3.4~6.7
花生酸 C20:0	0.11~0.37
油酸 C18:1	24.6~41.5
亚油酸 C18:2	10.7~36.5
α-亚麻酸 C18:3	0~3.7
花生四烯酸 C20:4	0~0.76
二十碳五烯酸 C20:5	0.03~0.14
二十二碳六烯酸 C22:6	0.5~1.0

由表3可知,母乳脂中的脂肪酸大多数为SFA和MUFA,SFA中含量最高的是棕榈酸(PA),MUFA中含量最高的是油酸(OA),除此之外,母乳脂还含有一定量的亚油酸(LA)。夏袁等^[6]对无锡地区健康母乳不同泌乳阶段母乳脂的脂肪酸组成进行了分析,以成熟乳为例,饱和脂肪酸中PA的含量最高,占17.25%,中链脂肪酸(MCFA)占总脂肪酸的9.76%,不饱和脂肪酸中OA、LA、α-亚麻酸(LNA)、花生四烯酸(AA)、二十二碳六烯酸(DHA)占比分别为26.57%、19.85%、1.48%、0.73%、0.74%。

母乳脂中的MCFA大多数直接通过门静脉转运而非淋巴转运,能在肝脏中快速氧化给婴儿提供

能量^[7]。因此,母乳脂比其他类型食物脂肪在肠道中有更快的吸收,对婴幼儿的生长发育十分有利。如果母亲摄入的饮食特点是高碳水化合物、低脂肪类型的,母乳中的 MCFA 含量会增高,为婴幼儿快速供能^[8]。LA、LNA 是人体必需脂肪酸,可转化成为长链多不饱和脂肪酸(LC-PUFA),如 AA、DHA,能改善婴幼儿视敏度和认知功能^[9]。世界各地母乳中 AA 含量比较相似,而 DHA 含量有着较大的差别,欧美和澳大利亚等地母乳的 DHA 含量较低,而日本、菲律宾等地恰恰相反^[10-11],DHA 含量比较高,中国母乳的 DHA 含量与世界平均含量相近^[12]。

此外,哺乳动物乳汁中本身就含有反式脂肪酸(TFA),母乳中也天然存在一些 TFA,其含量占总脂肪酸的 2%~7%。Chen 等^[13]研究发现母乳中的 TFA 可能与母亲摄入的部分氢化植物油或动物油脂有关。但尚无资料证明母乳中的天然 TFA 对婴幼儿健康有不利影响^[11]。

2.1.2 母乳脂 sn-2 位脂肪酸组成及分布特点

不同国家不同地区的产妇,由于其自身体质、膳食习惯等因素的影响,母乳脂 sn-2 位脂肪酸含量有一定差别,但 sn-2 位脂肪酸组成基本相似,见表 4。由表 4 可知,中国无锡^[6]、西班牙格拉纳达^[14]、

意大利^[15]不同泌乳期母乳脂 sn-2 位脂肪酸的研究结果均显示,sn-2 位 SFA 比 MUFA 多,占 64.27%~79.13%,并且母乳脂中 sn-2 位 SFA 含量随着泌乳期延长而增加。

有报道称,母乳脂中 SFA 主要成分 PA 约有 70% 位于甘油三酯(TAG)的 sn-2 位,而主要的不饱和脂肪酸 OA、LA 大多数占据 sn-1,3 位^[16],由于人体的胰脂酶优先水解 sn-1 位和 sn-3 位脂肪酸,因此这样结构的 TAG 进入小肠被胰脂酶水解后,以 sn-2 位 PA 甘油一酯和游离油酸或游离亚油酸的形式被婴幼儿吸收。相比之下,在某些哺乳动物乳脂或植物油中,PA 大多位于 TAG 的 sn-1,3 位,被胰脂酶水解后会释放出游离 PA^[17]。这些游离 PA 很容易与钙、镁反应形成不溶性皂化盐,造成婴幼儿体内能量和矿物质流失,从而导致婴幼儿便秘、腹泻等症状^[18]。Carnielli 等^[19]分别用 PA 酯化在 sn-2 位和 PA 酯化在 sn-1(3)位的配方奶粉喂食婴幼儿,发现喂食前者的婴幼儿脂肪吸收率高,且粪便中钙排泄量低。Kennedy 等^[20]也发布了相似的消息。因此,从 TAG 吸收代谢特点来看,PA 在 sn-2 位对婴幼儿的生长发育有比较重要的生理意义。

表 4 不同国家不同泌乳期母乳脂 sn-2 位脂肪酸组成及含量

脂肪酸	中国无锡 ^[6]			西班牙格拉纳达 ^[14]			意大利 ^[15]		
	初乳	过渡乳	成熟乳	初乳	过渡乳	成熟乳	初乳	过渡乳	成熟乳
C12:0	3.26	5.37	7.72	2.41	4.61	4.81	9.63	10.08	10.74
C14:0	7.48	11.14	11.41	6.69	10.74	9.66	10.33	12.98	9.52
C16:0	50.15	49.88	49.55	52.23	51.17	52.30	48.15	50.41	54.40
C18:0	2.02	1.80	1.86	1.68	1.80	1.71	1.53	0.96	0.77
SFA	64.69	70.39	72.99	64.27	69.60	69.87	71.95	77.13	79.13
C16:1	2.15	1.95	1.99	1.97	1.72	1.88	2.54	1.01	1.72
C18:1	14.28	11.53	10.61	17.43	14.41	13.97	15.97	14.08	14.82
C20:1	0.50	0.46	0.44	0.51	0.40	0.41	0.20	0.02	ND
MUFA	17.71	14.54	13.49	19.91	16.53	16.26	19.18	15.72	16.93
C18:2	10.32	8.92	8.08	11.58	10.32	10.95	8.09	4.38	3.66
C20:4	0.97	0.79	0.69	1.16	0.88	0.67	0.28	0.67	ND
C22:5	0.58	0.37	0.24	0.33	0.28	0.27	ND	ND	ND
C22:6	1.17	1.09	0.88	0.93	0.81	0.64	ND	ND	ND
PUFA	15.99	13.62	12.21	15.82	13.87	13.87	8.70	5.65	3.94

2.1.3 母乳脂甘油三酯组成及特点

2.1.3.1 短链甘油三酯组成及特点

各报道对短链脂肪酸有不同的划分方法,戴昕悦等^[21]定义短链脂肪酸为 C4~C8 的有机脂肪酸,张惠华等^[22]把碳原子数小于 6 的有机脂肪酸称为短链脂肪酸。在自然界中,动物乳的脂肪含有较多的短链脂肪酸(5%~9.1%)^[23-24],而在天然植物

油中其含量不高(约 4%)^[25]。母乳脂中短链脂肪酸倾向于分布在甘油三酯 sn-1 位和 sn-3 位^[26],易被人体内 sn-1,3 位特异性酶水解为游离脂肪酸和甘油,这样更利于婴幼儿消化吸收。

可将含有 1 个短链脂肪酸的甘油三酯称为短链甘油三酯,由于吸收短链脂肪酸的转运体大多数分布在结肠细胞或少数小肠细胞上,因此短链甘油三

酯水解后可不经过淋巴循环直接被血液吸收,快速供能^[21]。目前关于母乳脂短链甘油三酯含量的研究不多,Zhang 等^[27]的研究结果显示 PPBu、OBuP、OPCo、LPCo、OOBu、LPCy(其中 P 为 C16:0,Bu 为 C4:0,O 为 C18:1,Co 为 C6:0,Cy 为 C8:0,L 为 C18:2)是母乳脂中主要的短链甘油三酯,但含量均未超过 0.15%。

2.1.3.2 中长碳链甘油三酯组成及特点

中长碳链甘油三酯(MLCT)是甘油骨架上至少含有 1 个中碳链脂肪酸(C6~12)和 1 个长碳链脂肪酸(C12 以上)的结构脂。按照甘油骨架上带有的中碳链脂肪酸和长碳链脂肪酸(LCFA)的个数,MLCT 可分为 LLM、LML、MML、MLM 4 类。

中碳链甘油三酯(MCT)能快速被分解并产能,其消化吸收速率是长碳链甘油三酯的 4 倍,代谢速率为其 10 倍,但 MCT 不含人体必需脂肪酸,摄入过多会导致酮体中毒,从营养学角度来看不宜长期食用^[28]。长碳链甘油三酯(LCT)虽然富含人体正常生长发育所需的必需脂肪酸,但是 LCT 在血清中消化吸收速率及清除速率都相对较慢,最终会变成机体内脂肪组织引起肥胖,对人体健康不利^[29]。

母乳中大多数 MCFA 和 LCFA 会结合成 MLCT 的形式存在。MLCT 既弥补了 MCT 不含必需脂肪酸的缺点,还满足了快速供能的需求。MLCT 可同步进行门静脉吸收和淋巴循环吸收,吸收速率、水解速率都很高,避免了酮体过量中毒^[28]。除此之外,MLCT 能降低血脂、胆固醇水平,防治血管疾病^[30];还可以通过加速氧化脂肪和消耗能量来减重^[31];控制体内脂肪堆积和能量的摄入,从而预防脂肪肝和肥胖等疾病^[32]。

2.1.3.3 长碳链甘油三酯组成及特点

长碳链甘油三酯是由甘油和 3 个长碳链脂肪酸(C12 以上)组成的。众多研究表明,母乳脂甘油三酯主要为长碳链甘油三酯^[41],以 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)居多。

表 5 为国内外几个地区母乳脂主要长碳链甘油三酯的组成及含量。由表 5 可知,国外母乳脂中 POO 所占比例比 POL 高,而夏袁^[35]、Tu^[36]等的报道结果恰好相反,中国母乳脂中 POL 占比较高。这种差异可能是因为不同国家、地区的人饮食习惯不同产生的。

因母乳脂中 sn-2 位 PA 位置的特异性对婴幼儿消化吸收代谢有益处,OPO 及 OPL 的作用也很突出,有一些学者开展了合成制备 OPO 和 OPL 结构脂

的研究^[37-40],将这些结构脂加入到婴幼儿配方奶粉中,能有效减少婴幼儿钙流失和便秘。

表 5 不同国家及地区母乳脂中长碳链甘油三酯组成及含量

TAG	意大利 ^[33]	芬兰 ^[34]	中国无锡 ^[35]	中国四川 ^[36]
LLL	0.542	-	1.73	1.29
OLL	3.50	-	7.29	4.00
PLL	3.53	-	5.71	4.25
MOL	2.54	-	6.05	2.74
POL	8.58	5.4	24.92	7.63
PPL	1.46	-	3.86	3.06
MPO	2.34	-	1.78	3.46
OMO	5.28	3.2	-	2.58
OOO	6.98	2.5	1.74	2.47
POO	15.40	9.4	13.87	5.13
PPO	6.35	3.0	4.05	3.50
POS	4.75	3.2	1.44	3.27
PPS	4.01	-	0.73	0.48

2.2 母乳脂的磷脂组成及分布特点

2.2.1 母乳脂的磷脂种类及含量

母乳脂是以各种大小的脂肪球形式存在的,脂肪球的外围包裹着一层脂肪膜,脂肪膜由磷脂、蛋白质等物质组成^[41]。母乳脂中 60%~65% 的磷脂位于脂肪球膜上,母乳脂中磷脂大致由甘油磷脂和鞘磷脂两类组成,主要的甘油磷脂有磷脂酰胆碱(PC)、磷脂酰乙醇胺(PE)、磷脂酰丝氨酸(PS)、磷脂酰肌醇(PI),特点是甘油磷脂的甘油 sn-1,2 位被脂肪酸酯化,sn-3 位被带有各种基团的磷酸酯化^[42];鞘磷脂(SM)不含甘油,而含鞘氨醇或二氢鞘氨醇,是由脂肪酸和鞘氨醇的氨基通过酰胺键连接而成的^[43]。

张雪等^[44]对世界各地母乳脂中各类磷脂占总磷脂的比例进行了总结,结果发现 SM(29.0%~45.5%)、PC(19.0%~38.1%)和 PE(10.1%~36.1%)占比较高,且基本呈现 SM>PC>PE 的特点,PS(3.7%~18.4%)和 PI(0.94%~11.70%)占比相对较少。

2.2.2 母乳脂的脂肪酸组成

Kudo 等^[45]早在 1964 年最先对母乳脂的脂肪酸组成进行了研究,现有文献中母乳脂共鉴定出 40 多种脂肪酸。饱和脂肪酸占的比例最高,为 60%左右,其次是多不饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸,分别为总脂肪酸的 15%~20%、20%~25%。

母乳脂中含量最丰富的脂肪酸为棕榈酸、硬脂酸、油酸和亚油酸,这 4 种脂肪酸占总脂肪酸的 70%以上。不同国家及地区母乳脂中的脂肪酸种类及含量存在一定差异(见表 6),一方面可能是与

遗传、环境、不同地区人的饮食习惯相关,另一方面可能是由于检测技术的不同或检测技术未能精准分离测定而引起差异的。

表6 不同国家及地区母乳磷脂中脂肪酸组成及含量

脂肪酸	中国东北 ^[42]	中国无锡 ^[46]	丹麦 ^[47]	法国 ^[48]
C4:0	-	0.39	-	-
C6:0	-	0.15	0.06	-
C8:0	-	0.09	0.35	-
C10:0	-	0.31	0.47	-
C11:0	-	-	-	-
C12:0	0.78	0.21	1.38	0.79
C13:0	-	-	-	-
C14:0	1.98	1.40	8.30	2.00
C14:1	-	0.56	0.54	-
C15:0	-	0.24	-	-
C15:1	0.18	-	-	-
C16:0	14.09	31.52	39.86	14.20
C16:1	0.72	0.55	0.58	0.73
C17:0	-	0.24	-	-
C17:1	0.07	-	-	-
C18:0	30.16	23.66	13.08	30.40
C18:1 ω -9 _c	11.61	13.79	13.14	11.70
C18:1 ω -9 _t	0.48	-	-	0.48
C18:1 ω -7	1.08	-	-	1.09
C18:2	17.08	12.04	12.87	15.20

表7 不同国家及地区不同泌乳期母乳磷脂脂肪酸组成及含量

脂肪酸	西班牙 ^[49]			丹麦 ^[50]			中国无锡 ^[35]		
	初乳	过渡乳	成熟乳	初乳	过渡乳	成熟乳	初乳	过渡乳	成熟乳
C16:0	23.38	23.23	24.32	45.44	42.69	37.36	27.27	26.81	24.54
C18:0	24.00	24.04	23.49	10.59	13.43	14.84	23.14	24.75	22.98
C18:1 ω -9	13.39	13.90	14.00	14.64	11.76	13.63	17.61	15.74	16.63
C18:2 ω -6	16.16	17.98	18.57	12.54	11.32	12.32	13.61	13.12	13.21
C18:3 ω -3	0.17	0.27	0.27	0.46	0.97	1.09	0.41	0.83	1.25
C20:4 ω -6	3.66	3.97	3.95	0.99	1.36	1.70	3.29	3.02	3.74
C22:6 ω -3	1.53	1.34	0.97	0.33	0.73	1.03	0.96	1.22	1.44
SFA	57.96	56.18	56.89	67.36	69.09	63.92	57.34	59.95	56.71
MUFA	17.91	16.65	16.60	16.56	14.38	15.90	19.64	17.97	19.04

2.3 母乳中的胆固醇

胆固醇是类固醇中的一种,也是细胞膜的重要成分之一。母乳中的胆固醇对婴幼儿大脑和神经系统的发育至关重要,虽然在婴儿尚未出生时已有器官组织能够合成胆固醇^[51],但如果缺乏母体胆固醇的供给,也会对婴幼儿健康生长产生影响^[52]。目前市面上婴幼儿配方奶粉中的胆固醇含量远不及母乳中的,用较高胆固醇含量的母乳来喂养婴幼儿,能改善胆固醇化合物在其机体内的代谢状况,降低婴幼儿成年后血液的胆固醇浓度,预防高胆固醇引起的

续表6

脂肪酸	中国东北 ^[42]	中国无锡 ^[46]	丹麦 ^[47]	法国 ^[48]
C18:3 ω -3	1.39	-	0.68	0.65
C18:3 ω -6	-	0.13	0.04	-
C20:0	2.08	0.98	0.38	2.10
C20:2	0.55	0.52	0.22	-
C20:3 ω -6	0.72	0.46	0.85	0.73
C20:4	2.58	-	1.43	2.60
C20:5	0.12	-	0.32	0.12
C21:0	-	-	-	-
C22:0	4.17	0.80	0.16	4.20
C22:1	0.27	1.13	0.15	-
C22:2	-	-	0.42	-
C22:4	-	2.53	0.16	-
C23:0	-	0.52	-	-
C24:0	3.37	2.38	0.48	3.40
C24:1 ω -9	3.67	-	0.52	3.70

也有不少研究报道了母乳磷脂中脂肪酸组成及含量在不同泌乳期的变化情况,表7为不同国家及地区不同泌乳期母乳磷脂脂肪酸组成及含量。由表7可知,SFA在初乳磷脂、过渡乳磷脂、成熟乳磷脂中含量较高,但变化规律不明显,说明母乳磷脂的SFA处于无规律的动态变化中。MUFA在初乳磷脂中含量最高、PUFA在成熟乳磷脂中含量最高^[35]。

心脑血管疾病等^[53]。

由此可见,母乳中的胆固醇成分是有有效评价母乳或婴幼儿配方奶粉功效的一个重要方面。表8列举了一些母乳中胆固醇的分析方法及含量。早在1967年,Watts等^[54]对产妇10d内的母乳样品进行了甘油三酯和胆固醇含量分析,紧接着出现有别于气、液相色谱法的其他方法检测母乳胆固醇含量的报道。但基本上都是国外在研究,我国的研究集中在探究甘油三酯的组成及特点,还没有重视对不同泌乳期母乳胆固醇的定性定量分析。

表8 母乳中胆固醇的分析方法及含量

国家	样品	方法	胆固醇含量	参考文献
英国	同一产妇 10 d 内的母乳	气相-液相色谱	0.6% ~ 2.4%	[54]
美国	2 ~ 16 周泌乳期母乳	气相-液相色谱	10.3 mg/100 mL	[55]
圣卢西亚	非洲母乳初乳、过渡乳、成熟乳	气相色谱	初乳期:(360 ± 162) mg/L 过渡乳:(197 ± 70) mg/L 成熟乳:(190 ± 81) mg/L	[56]
波兰	1 ~ 3 个月、4 ~ 6 个月、 6 个月以上泌乳期母乳	傅里叶变换衰减 全反射红外光谱	4.30 ~ 21.77 mg/100 mL	[57]

3 结束语

母乳脂是一种非常复杂的天然脂类混合物,是婴儿出生后前 6 个月最佳的能量和营养来源。在过去的 20 年里,学者们对母乳脂的研究已经取得了很大的成就,在一定程度上促进了婴幼儿配方奶粉的发展。尽管目前已有更多关于母乳脂宏观组成成分的报告,但是母乳脂中一些微量的化学物质和生物活性物质的成分仍旧没有被完全探明。并且,这些成分还没有在婴幼儿配方奶粉用油中得到准确的复制和体现。

我们还需要进一步探究母乳脂的“奥秘”,为婴幼儿配方奶粉用油提供更准确、更精确的模板,使其无论是脂质的化学组成,如脂肪酸、甘油酯、磷脂、糖脂及各种复杂脂质,还是其脂肪球的结构,都与母乳脂高度相似的。母乳脂研究的最终目标是使得婴幼儿配方奶粉用油从宏观指标、微观指标最后到生长发育指标母乳化。这对于开发适合婴幼儿的配方奶粉,提高婴幼儿配方奶粉的产品质量具有重要意义。

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: 1-2.

[2] 沙丽君, 李晓南. 人乳成分与儿童生长发育[J]. 中国实用儿科杂志, 2019, 34(10): 838-841.

[3] 吴立芳. 母乳重要成分研究及其结果与婴幼儿配方粉对比研究[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2015.

[4] 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.

[5] 姚云平. 乳脂肪球的组成结构、体外消化及抗菌特性[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2017.

[6] 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.

[7] CARLOS A A, CASIMIR C A. Preparation of infant formula fat analog containing capric acid and enriched with DHA and ARA at the sn-2 position[J]. J Am Oil Chem Soc, 2016, 93(4): 531-542.

[8] 蒋文笛. 人乳脂肪球的微观结构随泌乳过程的变化规律及其对脂类消化的影响[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2019.

[9] RICHARD C, LEWIS E D, FIELD C J. Evidence for the essentiality of arachidonic and docosahexaenoic acid in the postnatal maternal and infant diet for the development of the infant's immune system early in life[J]. Appl Physiol Nutr Metab, 2016, 41(5): 461-475.

[10] THOMAS B J, BEHZAD V, ROBERT G J, et al. Docosahexaenoic and arachidonic acid concentrations in human breast milk worldwide[J]. Am J Clin Nutr, 2007, 85(6): 1457-1464.

[11] REBECCA Y, KATHRYN P, ERIC L L. Human milk fatty acid composition from nine countries varies most in DHA[J]. Lipids, 2006, 41(9): 851-858.

[12] 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.

[13] CHEN Z Y, PELLETIER G, HOLLYWOOD R, et al. Trans fatty acid isomers in Canadian human milk[J]. Lipids, 1995, 30(1): 15-21.

[14] LOPEZ-LOPEZ A, LOPEZ-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]. Eur J Clin Nutr, 2002, 56(12): 1242-1254.

[15] HADDAD I, MOZZON M, FREGA N G. Trends in fatty acids positional distribution in human colostrum, transitional, and mature milk[J]. Eur Food Res Technol, 2012, 235(2): 325-332.

[16] 冀颐之, 程艳玲, 任丽娜, 等. 人乳脂替代品 1, 3-二油酸-2-棕榈酸三甘酯的研究进展[J]. 生命的化学, 2017, 37(5): 789-796.

[17] MU H L, CARL-ERIK H. The digestion of dietary triacylglycerols[J]. Prog Lipid Res, 2004, 43(2): 105-133.

[18] LÓPEZ-LÓPEZ A, CASTELLOTE-BARGALLÓ A I, CAMPOY-FOLGOSO C, et al. The influence of dietary

- palmitic acid triacylglyceride position on the fatty acid, calcium and magnesium contents of at term newborn faces [J]. *Early Hum Dev*, 2001, 65(S): S83 – S94.
- [19] CARNIELLI V P, VANGOUDOEVER J B, SULKERS E J, et al. Structural position and amount of palmitic acid in infant formulas; effects on fat, fatty acid, and mineral balance[J]. *J Pediatr Gastr Nutr*, 1996, 23(5): 553 – 560.
- [20] 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]. *Am J Clin Nutr*, 1999, 70(5): 920 – 927.
- [21] 戴昕悦, 袁婷兰, 金青哲, 等. 人乳短链脂肪酸的组成、检测方法与消化代谢研究进展[J]. *中国油脂*, 2020, 45(1): 27 – 30.
- [22] 张惠华, 梁亚楠, 张蕾. 短链脂肪酸的检测方法、生理作用及其与疾病的相关性研究[J]. *当代医药论丛*, 2019, 17(15): 97 – 99.
- [23] POTI P, PAJOR F, BODNAR A, et al. Effect of micro – alga supplementation on goat and cow milk fatty acid composition[J]. *Chil J Agric Res*, 2015, 75(2): 259 – 263.
- [24] 任健, 张宗岩. 山羊乳与绵羊乳的物理化学性质比较 [J]. *中国乳品工业*, 2004, 32(4): 29 – 31.
- [25] 王金平. 气相色谱法分析椰子油的脂肪酸[J]. *化学世界*, 1993, 11(11): 32 – 35.
- [26] 赵亚东. 母乳脂肪类似物的制备及其功能性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.
- [27] ZHANG X H, QI C, ZHANG Y R, 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.
- [28] 周飞, 王建宇, 白雪斐, 等. 中长碳链甘油三酯的研究进展[J]. *中国油脂*, 2018, 43(7): 67 – 71, 81.
- [29] 夏秋瑜, 赵松林, 李从发, 等. 中碳链脂肪酸甘油三酯的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2007, 28(7): 150 – 153.
- [30] KISHI T, CARVAJAL O, TOMOYORI H, et al. Structured triglycerides containing medium – chain fatty acids and linoleic acid differently influence clearance rate in serum of triglycerides in rats[J]. *Nutr Res*, 2002, 22(11): 1343 – 1351.
- [31] MUMME K, STONEHOUSE W. Effects of medium – chain triglycerides on weight loss and body composition: a meta – analysis of randomized controlled trials[J]. *J Acad Nutr Diet*, 2015, 115(2): 249 – 263.
- [32] WANG B G, FU J, LI L M, et al. Medium – chain fatty acid reduces lipid accumulation by regulating expression of lipid – sensing genes in human liver cells with steatosis [J]. *Int J Food Sci Nutr*, 2016, 67(3): 288 – 297.
- [33] GASTALDI D, MEDANA C, GIANCOTTI V, et al. HPLC – APCI analysis of triacylglycerols in milk fat from different sources [J]. *Eur J Lipid Sci Tech*, 2011, 113(2): 197 – 207.
- [34] 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: 351 – 360.
- [35] 夏袁. 人乳脂化学组成及其影响因素的研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2015.
- [36] TU A Q, 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: 555 – 567.
- [37] 张辉, 严永红, 李进伟, 等. 猪油 OPO 富集与猪油分提组分物性研究[J]. *粮食与食品工业*, 2015, 22(1): 9 – 13.
- [38] WEI W, FENG Y F, ZHANG X, et al. Synthesis of structured lipid 1, 3 – dioleoyl – 2 – palmitoylglycerol in both solvent and solvent – free system [J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2015, 60(2): 1187 – 1194.
- [39] 曹江, 邹孝强, 金青哲, 等. 改性巴沙鲮鱼油制备 1, 3 – 二油酸 – 2 – 棕榈酸甘油三酯的研究 [J]. *食品工业科技*, 2015, 36(22): 216 – 220, 324.
- [40] WANG X S, JIANG C, XU W D, et al. Enzymatic synthesis of structured triacylglycerols rich in 1, 3 – dioleoyl – 2 – palmitoylglycerol and 1 – oleoyl – 2 – palmitoyl – 3 – linoleoylglycerol in a solvent – free system [J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2020, 118: 1 – 7.
- [41] 张星河. UPC² – Q – TOF – MS 检测甘油三酯技术的建立及在人乳脂研究中的应用[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2018.
- [42] 何扬波. 不同泌乳期中国汉族人乳磷脂组学及脂肪酸分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [43] 杨洁, 杨丹, 张雪, 等. 人乳的磷脂组成与脂肪球结构 [J]. *中国油脂*, 2018, 43(10): 134 – 139.
- [44] 张雪, 杨洁, 韦伟, 等. 乳脂肪球膜的组成、营养及制备研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(1): 292 – 302.
- [45] KUDO T, RYOKI T, NAGASAWA T. Studies on the phospholipid in cow's and human milks; 1. the fatty acid composition of total phospholipids [J]. *J Jpn Soc Food Nutr*, 1964(1): 212 – 216.

- [46] YAO Y P, ZHAO G Z, XIANG J Y, et al. Lipid composition and structural characteristics of bovine, caprine and human milk fat globules [J]. *Int Dairy J*, 2016, 56: 64 – 73.
- [47] ZOU X Q, HUANG J H, JIN Q Z, 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.
- [48] BENOIT B, FAUQUANT C, DAIRA P, et al. Phospholipid species and minor sterols in French human milks [J]. *Food Chem*, 2010, 120(3): 684 – 691.
- [49] SALA – VILA A, CASTELLOTE A I, RODRIGUEZ – PALMERO M, et al. Lipid composition in human breast milk from Granada (Spain): changes during lactation [J]. *Nutrition*, 2005, 21(4): 467 – 473.
- [50] ZOU X Q, GUO Z, HUANG J H, et al. Human milk fat globules from different stages of lactation: a lipid composition analysis and microstructure characterization [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60(29): 7158 – 7167.
- [51] CARR B R, SIMPSON E R. Cholesterol synthesis in human fetal tissues [J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 1982, 55(3): 447 – 452.
- [52] WOOLLETT L A. Review: transport of maternal cholesterol to the fetal circulation [J]. *Placenta*, 2011, 32(B): S218 – S221.
- [53] 曹宇彤. 不同泌乳期中国汉族人乳类固醇组学分析 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [54] WATTS R, DILS R. Human milk: quantitative gas – liquid chromatographic analysis of triglyceride and cholesterol content during lactation [J]. *Lipids*, 1968, 3(6): 471 – 476.
- [55] CLARK R M, FERRIS A M, FEY M, et al. Changes in the lipids of human milk from 2 to 16 weeks postpartum [J]. *J Pediatr Gastr Nutr*, 1982, 1(3): 311 – 315.
- [56] BOERSMA E R, OFFRINGA P J, MUSKIET F A, et al. Vitamin E, lipid fractions, and fatty acid composition of colostrum, transitional milk, and mature milk: an international comparative study [J]. *Am J Clin Nutr*, 1991, 53(5): 1197 – 1204.
- [57] KAMELSKA A M, PIETRZAK – FIECKO R, BRYL K. Determination of cholesterol concentration in human milk samples using attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy [J]. *J Appl Spectrosc*, 2013, 80(1): 148 – 152.
-
- (上接第 42 页)
- [9] 王石, 王峻, 肖志明, 等. 天然维生素 E 的检测技术研究进展 [J]. *中国饲料*, 2017(15): 28 – 33, 38.
- [10] LI C M, YAO Y P, ZHAO G Z, et al. Comparison and analysis of fatty acids, sterols, and tocopherols in eight vegetable oils [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(23): 12493 – 12498.
- [11] 蒋晓彤, 杨济泽. 气相色谱法测定保健食品中植物甾醇的含量 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(17): 5889 – 5895.
- [12] 梁艳, 张英, 吴晓琴. 植物甾醇的提取分离和分析检测方法研究进展 [J]. *中国粮油学报*, 2006, 21(3): 1 – 7.
- [13] Squalene in oils and fats titrimetric method; AOAC official method 943.04 [S]. Rockville: AOAC, 1996.
- [14] 蔡媛媛, 张晖, 王兴国, 等. 初榨葡萄籽毛油中维生素 E、植物甾醇及角鲨烯的快速同步检测 [J]. *中国油脂*, 2018, 43(9): 137 – 143.
- [15] 朱琳, 薛雅琳, 刘晓辉, 等. 气相色谱内标法测定植物油中角鲨烯含量 [J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(12): 117 – 120.
- [16] 卢克刚, 张红霞. 植物来源角鲨烯的制备与检测方法研究进展 [J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(9): 217 – 224.
- [17] 杨春英, 刘学铭, 陈智毅, 等. 气相色谱 – 质谱联用法测定 14 种食用植物油中的植物甾醇 [J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(2): 123 – 128.
- [18] 吴海艳. 棉籽油脱臭馏出物中提取维生素 E 和植物甾醇 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [19] 汪金字. 米糠油脱臭馏出物的综合利用 [D]. 北京: 北京化工大学, 2016.