DOI:10.12441/spyswjs.20230711001 [文章编号] 1673-1689(2025)01-0001-12

婴幼儿配方乳粉核心配料的制备与应用研究进展

蒋士龙[1] 姜楚琦[1] 张书文[2] 王筠钠[2] 逄晓阳[2] 杨 波[3] 翟齐啸[3] 陈海琴[3] 吕加平[2]

(1. 黑龙江飞鹤乳业有限公司,北京 100015; 2. 中国农业科学院农产品加工研究所,北京 100193; 3. 江南大学食品学院,江苏 无锡 214122)

摘要:母乳中的营养和功能性组分对婴幼儿健康成长有重要影响。随着对母乳研究的不断深入,越来越多的功能性组分被提取制备并作为核心配料添加至婴幼儿配方乳粉中。作者综述了母乳中功能性蛋白质、功能性脂质、母乳低聚糖(human milk oligosaccharides,HMOs)、益生菌的种类和含量对婴幼儿的健康功效,总结了婴幼儿配方乳粉核心配料的制备与应用现状。为解决婴幼儿配方乳粉核心配料生产中的“卡脖子”难题及实现我国婴幼儿配方乳粉产业健康发展具有指导意义。

关键词:母乳;婴幼儿配方乳粉;功能性蛋白质;功能性脂质;母乳低聚糖;母乳益生菌

Research Progresses on the Preparation and Application of Core Ingredients of Infant Formula Milk Powder

JIANG Shilong[1] *JIANG Chuqi*[1] *ZHANG Shuwen*[2] *WANG Junna*[2] *PANG Xiaoyang*[2] *YANG Bo*[3] *ZHAI Qixiao*[3] *CHEN Haiqin*[3] *LYU Jiaping*[2]

(1. Heilongjiang Feihe Dairy Co., Ltd., Beijing 100015, China; 2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The nutritional and functional components in human breast milk play a crucial role in the healthy growth and development of infants. As the research on human breast milk deepens, more and more functional components are extracted and added into infant formula. The author reviewed the functional proteins, functional lipids, oligosaccharides, and probiotics of human breast milk in terms of their types, content, and effects on infant health. Furthermore, the preparation and application of core ingredients of infant formula were summarized. This review has guiding significance for solving the bottleneck problems in the production of core ingredients for infant formula and achieving the healthy development of China's infant formula industry.

Keywords: human breast milk; infant formula; functional protein; functional lipid; human breast milk oligosaccharide; human breast milk probiotic

早在公元前2000年,人们已经意识到因母亲分娩意外死亡或者母亲产后患病无法提供充足母乳时,常常导致婴幼儿患病或夭折,于是人们开始用动物奶等食品替代母乳[1-2]。当前,婴幼儿配方乳粉已成为人们所熟知的母乳替代品。尽管现有婴幼儿配方乳粉和母乳之间仍存在较多差异,但是婴幼儿配方乳粉喂养已成为弥补母乳不足、保障婴幼儿健康生长至关重要的喂养方式。

婴幼儿配方乳粉起源于19世纪的欧洲和美国。在此之前,米糊、麦糊和牛乳是无母乳喂养孩子的主要食品,然而这些食品因营养不全、缺乏功能性组分等仍无法有效减少婴幼儿死亡[1]。

基金项目:国家“十四五”重点研发计划项目(2021YFD2100700)。

通信作者:蒋士龙(1969—),男,博士,正高级工程师,主要从事婴幼儿配方乳粉研究。 E-mail:jiangshilong@feihe.com

收稿日期:2023-07-11 **修回日期:**2024-01-03

19 世纪末，生物学和医学的发展使母乳替代品研发进入快速发展阶段。婴幼儿喂养的热量测定法的创立、冰箱的发明以及巴氏杀菌等技术的发展，开启了婴幼儿配方乳粉的科学设计之路，大幅提升了非母乳喂养的营养与安全性[1-4]。1911 年，美赞臣首度引入麦芽糖糊精作为婴幼儿配方乳粉的能量来源。1919 年，美国儿科医生 Gerstenberger 研发了合成奶配方，以脱脂乳为基础，添加均质的植物源脂肪和动物源脂肪，使其脂肪组成接近母乳，这标志着婴幼儿配方乳粉母乳化设计的开始[1-2]。

随着对母乳研究的深入，婴幼儿配方乳粉的配方不断优化。20 世纪初，维生素和矿物质的添加有效解决了当时普遍存在的佝偻病和坏血病等维生素缺乏症。之后研究发现，母乳中的碳水化合物几乎全为乳糖，证明乳糖为婴幼儿配方乳粉中最好的糖类物质。另外，基于母乳中存在较多的不饱和脂肪酸，婴幼儿配方乳粉中的脂肪来源也逐渐由黄油替换为植物或部分动物油脂。

我国婴幼儿配方食品的相关研究与欧美等国家相比起步较晚。1954 年，中国医学科学院卫生研究所提出了我国第一个以大豆为主要原料的婴幼儿配方食品“5410”，其原料包括大豆粉、蛋黄粉、米粉、植物油、蔗糖等。1979 年黑龙江省乳业研究所首次提出以牛乳为主要原料的婴幼儿配方乳粉，命名为“婴幼儿配方乳粉 I”，其主要原料为牛乳、豆浆、蔗糖和饴糖[5]。自此，我国婴幼儿配方乳粉的研制正式起步并逐渐追赶国际水平，婴幼儿配方乳粉核心配料的发展进程见图 1。近年来，人们开始关注活性蛋白质、功能性脂质、HMOs、益生菌等功能性组分对婴幼儿健康的影响及其在婴幼儿配方乳粉中的应用。作者针对目前婴幼儿配方乳粉中的热点功能性组分及核心配料的制备与应用研究进展进行归纳总结。

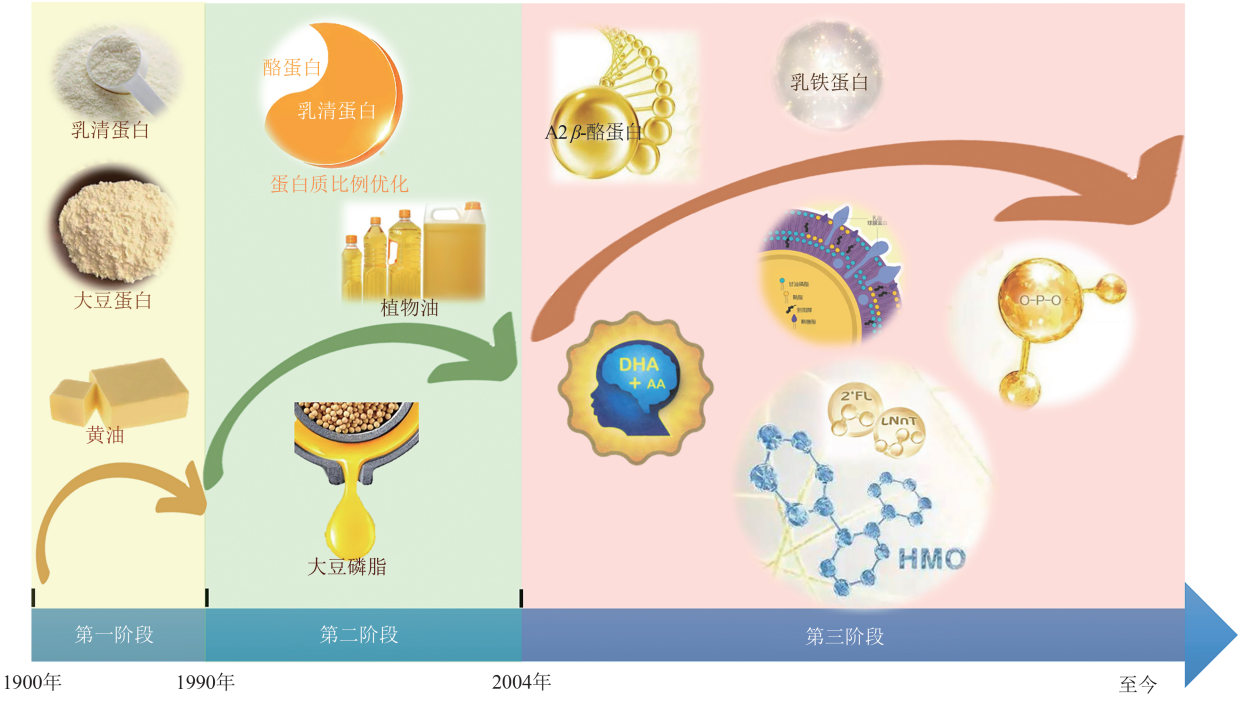


图 1　婴幼儿配方乳粉核心配料的发展进程

Fig. 1　Development of core ingredients of infant formula

1　蛋白质

1.1　母乳中的主要蛋白质

如表 1 所示，成熟母乳中蛋白质质量分数为 1.00%，而牛乳中蛋白质质量分数为 3.40%[6-7]。母乳中的蛋白质主要包括酪蛋白和乳清蛋白，两者质量比约为 4∶6。其中，酪蛋白主要由 β-酪蛋白和 κ-酪蛋白组成，几乎不含 α-酪蛋白[8]。乳清蛋白主要由 α-乳白蛋白组成[9]。另外，母乳中还含有免疫球蛋白、乳铁蛋白、骨桥蛋白、胆盐激活脂肪酶等活性蛋白质[10]。

1.1.1　β-酪蛋白

β-酪蛋白是母乳中含量最丰富的酪蛋白。β-酪蛋白可在婴幼儿胃肠道内被消化分解。研究发现，β-酪蛋白在人体内消化后生成的活性肽具有多种重要功能，例如抗病毒、抑菌以及促进金属离子吸收等[11-12]，是婴幼儿摄入的主要蛋白质之一。

1.1.2　α-乳白蛋白

α-乳白蛋白是乳清蛋白中最多的蛋白质，约占乳清蛋白质量的26%。起初认为其主要功能是提升色氨酸、赖氨酸及半胱氨酸质量分数，后经研究发现，α-乳白蛋白是一种矿物元素结合蛋白，可与钙、铁、锌离子结合，促进矿物质吸收[13-14]。另外，α-乳白蛋白在婴幼儿肠道被消化分解后也可起到与β-酪蛋白相同的抑菌、免疫激活等作用[15-16]。

1.1.3　乳铁蛋白

乳铁蛋白是母乳中重要的蛋白质之一，其具有与铁离子高度亲和的特性，能够有效促进婴幼儿对铁的吸收。乳铁蛋白与铁的结合能力比转铁蛋白高大约300倍，且结合铁离子后，乳铁蛋白能够发挥抗菌作用。另外，乳铁蛋白还具有抗病毒、抗炎、提高免疫力等功能[17]，有效降低婴幼儿患各种疾病的风险。

1.1.4　免疫球蛋白

根据重链稳定区氨基酸序列的不同，可将免疫球蛋白分为IgG、IgA、IgM、IgD和IgE。牛乳中的免疫球蛋白以IgG为主，而母乳中的免疫球蛋白主要为IgA，占免疫球蛋白质量的90%以上。免疫球蛋白是一类能够和抗原发生特异性结合的抗体，可以与母乳中的其他抗菌因子如乳铁蛋白及溶菌酶协同作用，在婴幼儿肠道中与病菌结合达到抑菌或杀菌效果。免疫球蛋白还具有提高新生儿唾液中乳过氧化酶活性的功能，增强新生儿的抗感染能力和免疫力[18]。

1.1.5　骨桥蛋白

骨桥蛋白也是母乳中较多的蛋白质之一，平均质量浓度约138 mg/L。骨桥蛋白是高度糖基化和磷酸化的酸性蛋白质，在免疫激活、创伤修复、血管再生、骨骼重塑过程中具有重要的生理作用[19]。

除上述生物活性蛋白质外，母乳中还含有κ-酪蛋白、乳脂肪球膜蛋白等其他蛋白质，但由于质量浓度较低和存在形式特殊等原因，实现产业化的分离纯化及生产仍有较大难度，不过随着蛋白质分级分离提纯技术的发展，这些蛋白质有望得到进一步应用。

表1　牛乳和母乳中蛋白质种类及质量分数对比

Table 1　Comparison of protein mass fraction in cow's milk and human breast milk

乳品种类	蛋白质质量分数/%	酪蛋白质量分数/%				乳清蛋白质量分数/%					
		α_{S1}-酪蛋白	α_{S2}-酪蛋白	β-酪蛋白	κ-酪蛋白	α-乳白蛋白	β-乳球蛋白	乳铁蛋白	免疫球蛋白	溶菌酶	血清白蛋白
母乳	1.00	—	—	64.75	23.50	26	—	26	16（IgA）	10	10
牛乳	3.40	40	8	38	12	17	43	少量	10（IgG）	少量	5

注："—"表示文献未提及。

1.2　婴幼儿配方乳粉中的蛋白质原料

由于母乳和牛乳在蛋白质质量分数、组成上存在较大差异，基于母乳蛋白质组成特点，婴幼儿配方乳粉一般以生牛乳为原料，添加脱盐乳清粉、浓缩乳清蛋白粉或分离乳清蛋白粉等乳清基料，将产品中乳清蛋白与酪蛋白质量比调整为6∶4，使蛋白质组成达到或接近母乳蛋白质。

1.2.1　脱盐乳清粉

脱盐乳清粉是生产婴幼儿配方乳粉常用的原料之一，由干酪加工副产物乳清制得，在生产干酪时，通过酶或酸把乳中的酪蛋白凝固后剩余的清液即是乳清。乳清里主要含有乳糖、乳清蛋白和乳矿物盐。将乳清经过膜分离、离子交换或电渗析处理，再经过浓缩、喷雾干燥等工艺即制得脱盐乳清粉。

1.2.2　浓缩乳清蛋白粉

浓缩乳清蛋白粉通常以干酪乳清为原料，通过超滤、纳滤技术的多次过滤，将乳清中大部分乳糖和矿物质脱去，使截留的乳清蛋白得到不同程度的浓缩，然后利用喷雾干燥制成蛋白质质量分数为35%~85%的浓缩乳清蛋白粉。浓缩乳清蛋白粉含有丰富的蛋白质和必需氨基酸，也具有良

好的口感和溶解性。浓缩乳清蛋白粉在乳粉中的用量取决于具体的配方和产品类型。

1.2.3 乳脂肪球膜蛋白和乳铁蛋白

乳脂肪球膜蛋白是母乳中的活性蛋白质，主要存在于乳脂肪球膜上，乳脂肪球膜主要包括蛋白质和脂质。乳脂肪球膜蛋白主要包括具有抗菌特性的黏蛋白、乳凝集素和乳铁蛋白，其在防止细菌和病毒性腹泻方面具有潜在效果。乳脂肪球膜脂质包括鞘磷脂、胆固醇、唾液酸和神经节苷脂，在促进脑髓鞘的形成以及大脑功能的发育中起着至关重要的作用。乳脂肪球膜蛋白粉主要从酪乳和乳清中提取，目前已经实现规模化生产。

乳铁蛋白作为一种模拟母乳活性蛋白质的营养强化剂添加到婴幼儿配方乳粉中。牛乳中乳铁蛋白质量分数极低，14 kg的牛奶中仅能提取出1 g乳铁蛋白，成本高昂。

2 脂类

母乳中脂肪质量分数为3%~5%，是婴幼儿最重要的营养和能量来源。脂肪在母乳中以脂肪球的形式存在，脂肪球中98%的成分为甘油三酯（TAG）。乳脂肪球膜由磷脂（占总脂肪质量的0.2%~2.0%）、蛋白质、胆固醇、甾醇、游离脂肪酸等构成，可结合多种脂肪酶，利于婴幼儿消化吸收[20]。

2.1 母乳中的主要脂类

2.1.1 TAG

母乳中具有不同饱和程度与不同链长的脂肪酸在甘油骨架*sn*-1、*sn*-2、*sn*-3位置上以不同方式排列组合，形成了不同结构的TAG。乳脂的多样化空间结构对营养吸收也有重要影响。母乳中的TAG有200多种，中国母乳中质量分数最高的TAG是1,3-二油酸-2-棕榈酸（OPL）和1-油酸-2-棕榈酸-3-亚油酸（OPO），占TAG质量的20%~40%[20]。

母乳结构脂主要由长链甘油三酯（LCT）和中长链甘油三酯（MLCT）组成。由于MLCT中同时包含了中链和长链脂肪酸，它能够通过混合成分的方式平衡2种脂肪酸的代谢速率，使得中链脂肪酸的消化速率不会过快，同时保留了中链脂肪酸快速供应能量的优势。在针对早产、低体质量或胃肠道吸收障碍的婴幼儿配方食品中添加MLCT，可提高脂肪和矿物质的吸收，促进婴幼儿生长发育[21]。

2.1.2 脂肪酸

不同地域、不同种族母乳中的脂肪酸组成相似，其中油酸（C18:1，质量分数25%~35%）、棕榈酸（C16:0，质量分数20%~30%）、亚油酸（C18:2，质量分数10%~20%）和α-亚麻酸（C18:3，质量分数5%~10%）为母乳中较丰富的脂肪酸。此外，母乳中还含有少量的长链多不饱和脂肪酸（LC-PUFA）和支链脂肪酸（BCFA）[20]。LC-PUFA具有促进神经递质合成和释放、促进神经元生长和抗炎的作用[22]。研究显示，哺乳期妇女补充LC-PUFA对早产儿的一些疾病具有预防作用，尤其对新生儿支气管炎、肺发育不良、过敏性鼻炎以及坏死性小肠结肠炎等疾病有预防作用[23]。此外，二十二碳六烯酸（DHA）和花生四烯酸（AA）也是母乳中脂质的重要组成部分，对婴幼儿免疫系统、视网膜、大脑和血小板的发育至关重要[24-25]。

2.1.3 磷脂

母乳磷脂中磷脂酰胆碱（PC）、磷脂酰乙醇胺（PE）、鞘磷脂（SM）质量分数较高，分别约为35%、30%、25%。磷脂酰肌醇（PI）和磷脂酰丝氨酸（PS）质量分数较低，仅为5%和3%[26]。乳脂肪球分子结构见图2。乳脂肪球膜具有3层膜结构：内层膜磷脂主要为PI和PS。外部双分子层膜的内层主要为PE；外层主要为PC和SM。母乳与牛乳的总脂肪酸质量浓度分别为3.90、4.11 g/dL，其中各种脂类组成的对比见表2[27-28]。

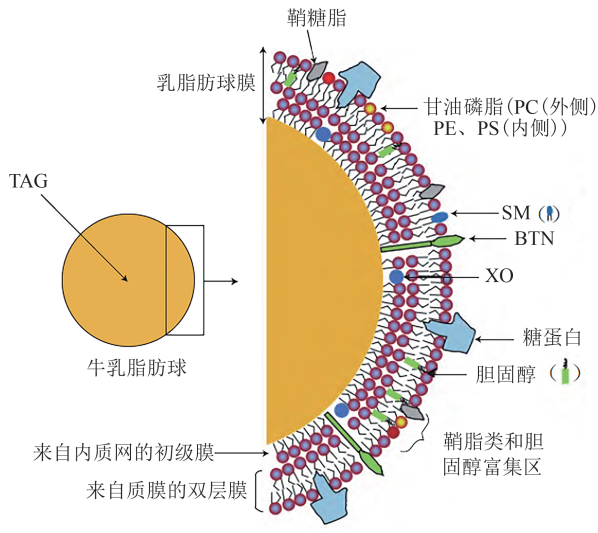


图2 乳脂肪球分子结构

Fig. 2 Molecular structure of milk fat globule

表 2　母乳和牛乳中脂类组成的对比

Table 2　Comparison of the lipid composition between human breast milk and cow's milk

乳品类别	TAG质量分数/%											
	PPM	OOO	POO	PPO	PPP	SOO	POS	PPS	OPO	OPL	OLaO	OLaL
母乳	1.35±0.56	2.04±0.98	21.52±5.39	6.41±1.38	0.45±0.22	0.59±0.24	2.28±0.58	0.14±0.06	21.52±5.39	16.93±3.27	6.54±2.21	1.99±0.61
牛乳	2.67±0.19	1.16±0.13	4.16±0.19	5.43±0.39	1.82±0.12	0.76±0.15	1.57±0.10	0.66±0.05	4.16±0.19	—	—	—

乳品类别	脂肪酸质量分数/%								磷脂浓度/(μmol/dL)					
	SFA	MUFA	PUFA	PUFAω-3	PUFAω-6	DHA	ARA	LA	总极性脂质	PC	PI	PS	SM	PE
母乳	49.29±5.74	36.90±5.95	12.65±1.32	1.70±0.43	10.95±1.34	0.51±0.23	0.45±0.13	10.57±4.96	24.45±5.80	6.98±1.81	0.81±0.32	1.09±0.36	8.54±2.08	7.02±1.76
牛乳	75.49±3.84	21.63±1.70	1.89±0.18	0.52±0.13	1.87±0.17	—	0.05±0.01	1.49±0.27	26.44±0.81	9.91±0.20	1.60±0.03	1.13±0.00	3.54±0.25	10.27±0.33

注：SFA为饱和脂肪酸；MUFA为单不饱和脂肪酸；PUFA为多不饱和脂肪酸；LA为月桂酸(C12:0)；P为棕榈酸(C16:0)；S为硬脂酸(C18:0)；O为油酸(C18:1)；L为亚油酸(C18:2)；PE为磷脂酰乙醇胺；PC为磷脂酰胆碱；SM为鞘磷脂；PI为磷脂酰肌醇；PS为磷脂酰丝氨酸；"—"表示相关文献中未提及。

2.2　婴幼儿配方乳粉中的脂质原料

基于母乳脂质的特点，一般以植物油、结构脂、磷脂、DHA/ARA等为主要原料对婴幼儿配方乳粉的脂质组成进行调整。如图1所示，婴幼儿配方乳粉中脂质原料的发展主要经历了3个阶段[29]。随着对母乳脂质组成和结构研究的不断深入，从婴幼儿配方乳粉中的脂质原料在能量层面模拟母乳(第一阶段)[30]，到脂肪酸比例层面模拟母乳(第二阶段)[31]，再到结构脂OPO、OPL的开发(第三阶段)，得到了不断发展。从20世纪90年代末至今，随着脂质组学分析技术的发展，LC-PUFA和*sn*-2棕榈酸酯(主要是OPO)的开发取得了重大突破[32]。第一个*sn*-2棕榈酸酯由IOI Loders Croklaan公司开发并商业化生产，从1995年至今，一直在婴幼儿配方乳粉中使用[30]。2008年，我国卫生部公告文件(2008年第13号)批准营养强化剂1,3-二油酸2-棕榈酸甘油三酯(OPO结构脂)可应用于婴幼儿配方食品。此外，天然乳脂中磷脂的结构和含量更接近母乳，因此，其在婴幼儿配方乳粉中的应用逐渐受到关注，成为当下婴幼儿配方乳粉核心配料的研究热点[33]。

2.2.1　植物油

婴幼儿配方乳粉的脂肪来源主要为植物油，部分产品会额外添加动物乳脂。植物油和牛乳中的棕榈酸主要在*sn*-1、*sn*-3位酯化[34]，*sn*-2位为不饱和脂肪酸。乳粉中所用植物油主要包括3类：油酸型(如高油酸葵花籽油、菜籽油等)、油酸亚油酸型(如大豆油、玉米油、葵花籽油、花生油等)和中长链脂肪酸型(如棕榈仁油、椰子油等)，可通过调配脂肪酸组成使乳粉与母乳相近。

2.2.2　磷脂

婴幼儿配方乳粉中添加的磷脂主要为大豆磷脂。婴幼儿配方乳粉中的磷脂还可来源于牛乳中提取的乳脂肪球膜或富含极性脂质的成分。工业上乳脂肪球膜的分离方法大致可分为4个步骤：脂肪球分离、乳脂洗涤、从脂肪球中释放乳脂肪球膜、收集乳脂肪球膜[35]。

2.2.3　DHA和ARA

目前婴幼儿配方乳粉中添加的LC-PUFA由鱼油/藻油DHA和AA组成[30]。藻油DHA是由裂壶藻等单细胞海藻加工而来，以TAG-DHA为主。鱼油DHA经过酯交换等处理后转变为乙酯型-DHA[36]。磷脂型-DHA主要存在于鱼卵和磷虾等海洋生物中[37-38]。此外，还可将蛋鸡作为生物转化器，用特殊配方饲料喂养，经过鸡的消化、吸收、转换得到卵磷脂-DHA[39]。通过给牛和羊饲喂微藻粉也可获得原生的高DHA牛奶和羊奶，用于制备婴幼儿配方乳粉[40]。通过薄膜分散、高压微射流、乳化包埋等技术制备DHA脂质体、微胶囊，可延长其贮藏稳定性[41]，屏蔽不良味道，改善溶解性，有效提高加工利用率[42]。

自然界中的部分丝状霉菌、微藻和少数细菌都可合成AA。目前，高山被孢霉生产的微生物油脂中AA质量分数可达50%以上，是婴幼儿配方乳粉中AA的主要来源[43]。

2.2.4 结构脂

母乳中TAG主要是由棕榈酸和UFA构成的单/双不饱和TAG。母乳棕榈酸中位于TAG主链上*sn*-2位的OPO、OPL占比为70%~80%[44-45]。通过酶促酯交换的方法可使植物油中的大部分棕榈酸位于*sn*-2位，以达到脂肪酸组成和碳链位置分布与母乳脂肪相似的目的[46]。目前，主要通过添加OPO调整婴幼儿配方乳粉脂质中*sn*-2位棕榈酸，与母乳的接近程度为70%[47]。

3 HMOs

3.1 HMOs种类及质量浓度

HMOs（12~14 g/L）是母乳中仅次于乳糖（55~70 g/L）和脂肪（15~40 g/L）的第三大营养物质[48]。目前母乳中已鉴定的HMOs达200余种，主要由5种单糖构成：*D*-葡萄糖、*D*-半乳糖、N-乙酰基-*D*-葡萄糖胺、*L*-岩藻糖、唾液酸，其结构多样化源于5种单糖的不同连接方式以及大量的岩藻糖基化和唾液酸化[49]。HMOs包括中性低聚糖和酸性低聚糖，其中中性低聚糖包括岩藻糖基和非岩藻糖基低聚糖，约占HMOs的70%[50]。母乳中含量较高的低聚糖有2’-岩藻糖基乳糖（2’-FL）、3-岩藻糖基乳糖（3-FL）、乳糖-N-四糖（LNT）、乳糖-N-新四糖（LNnT）、乳酰-N-六糖（LNH）、3’-唾液乳糖（3’-SL）和6’-唾液乳糖（6’-SL）等，见图3。

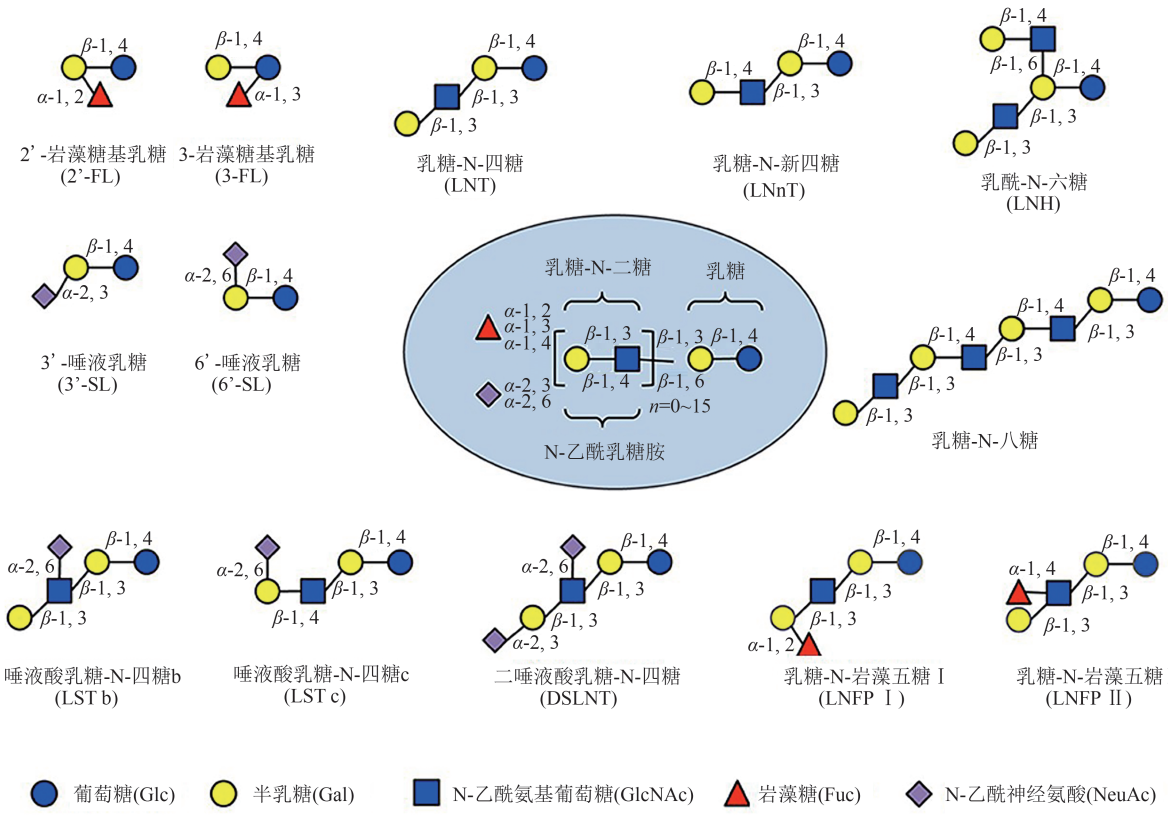


图3 母乳中主要低聚糖结构示意图

Fig. 3 Structure diagrams of main oligosaccharides in breast milk

母乳初乳中有20~25 g/L的HMOs，但成熟乳中只有12~14 g/L。图4显示了母乳中15种最丰富的HMOs变化情况[51]。最丰富的HMOs属于岩藻糖基化组，存在于成熟乳中，包括2’-FL、LNDFH-I（DF-LNT）、LNFP-I、LNFP-II、3-FL、DFL（LDFT）、LNFP-III和TF-LNH。2’-FL是哺乳期母乳中最丰富的HMOs。LNT是最丰富的中性HMOs。6’-SL是泌乳期最丰富的唾液酸HMOs。2’-FL质量浓度在初乳到过渡期以及成熟期到晚期这2个阶段有明显下降。LNFP-I和DFL在哺乳期也稳步下降。而3-FL表现出相反的情况，从初期到晚期稳定增加。

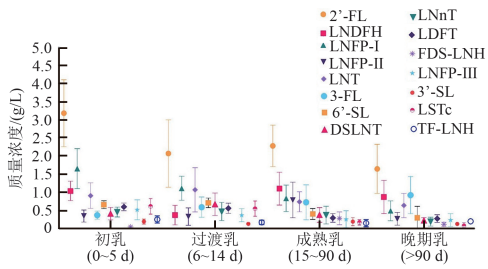


图4　哺乳期的母乳中15种最丰富的HMOs变化情况

Fig. 4　Changes in levels of the 15 most abundant HMOs in human breast milk during lactation

3.2　HMOs的健康功效

研究表明，HMOs在促进婴幼儿生长发育、调节肠道菌群、调节免疫力、预防坏死性小肠结肠炎、促进大脑发育等方面有重要作用。研究认为，HMOs通过与肠道微生物群直接或间接的相互作用发挥多种有益功能，例如支持有益菌的生长、抗病原菌和调节肠上皮细胞反应[52]。2'-FL是母乳中最丰富的低聚糖之一，可以选择性地促进双歧杆菌的生长和抑制病原微生物与人体肠道的结合[53]。3'-SL和6'-SL显示出抗炎特性，还可促进肠道有益菌生长，对大脑发育和认知功能有重要作用，并减少压力引起的类似焦虑的行为。3'-SL和6'-SL还能够抑制铜绿假单胞菌对人类肺细胞的黏附[54]。

3.3　HMOs的国内外法规进展

在美国、欧盟、澳大利亚、新西兰等地区，一些HMOs已经通过相关主管部门批准应用于婴幼儿配方食品的生产中。目前，批准使用的HMOs包括2'-FL、3-FL、LNnT、LNT、3'-SL和6'-SL等。美国允许将2'-FL和3-FL用于乳制品、饮料、谷物棒、婴幼儿配方食品、特殊医学用途配方食品和代餐食品等产品中，其中，规定2'-FL、3-FL在婴幼儿配方食品中的最大使用量分别为2.4 g/L、2.0 g/kg。欧盟批准2'-FL、3-FL作为新食品原料用于乳制品、谷物棒、婴幼儿配方食品、特殊医学用途配方食品等产品中，在婴幼儿配方食品中单独添加2'-FL的最大使用量为1.2 g/L，3-FL最大使用量为0.85 g/L。2019年12月，澳新食品标准局发布公告，批准在婴幼儿配方食品中使用2'-FL或与LNnT混合使用，并规定如果仅添加2'-FL，添加量不超过0.96 mg/kJ；如果同时添加2'-FL和LNnT，则LNnT不超过0.24 mg/kJ，并且2'-FL和LNnT的总和不超过0.96 mg/kJ。2023年10月7日，我国卫生健康委员会正式批准2种HMOs原料2'-FL和LNnT用于婴幼儿配方乳粉，两者也是母乳中主要的HMOs。

3.4　HMOs的生产技术及发展趋势

HMOs的生产技术可分为天然提取、化学合成以及微生物合成3种。HMOs在乳中含量较少，天然提取的成本极高，难以产业化。化学合成法效率低、工艺复杂，且存在食品安全隐患，因而应用局限性大，发展前景一般。基于大肠杆菌、酵母菌等生物工程菌的微生物合成技术生产成本低、环境污染小，是当今HMOs商业化过程中研究最活跃的领域[55]。目前，已批准使用的HMOs主要通过微生物合成法实现大规模生产，成本可控且更环保。大规模生产的HMOs仅限于2'-FL和LNnT，通过发酵获得并作为强化剂添加到婴幼儿配方乳粉中，其他HMOs可实现工业化合成的较少[56]。

4　益生菌

4.1　母乳微生物来源

研究证实，母乳并非无菌，而是一个复杂的微生态系统。母乳微生物主要来自2个途径，一是外源途径，母亲乳头附近皮肤上的微生物是母乳微生物的来源之一；婴幼儿口腔也可能是母乳微生物的重要来源；另外在分娩过程中，产妇阴道部位的细菌与婴幼儿口鼻接触并寄生于婴幼儿口鼻之中，当婴幼儿吮吸乳汁时，寄生于其口腔中的细菌就会回流至乳管并寄生在乳腺中。二是内源途径，母亲部分肠道微生物可以通过位于肠道内层的树突细胞（免疫细胞的一种）介导，穿过小肠上皮细胞层进入体循环并最终到达乳腺。这一过程称为“肠乳途径”[57-58]。

4.2　母乳微生物种类及功能

母乳微生物的主要功能是促进婴幼儿免疫发育、营养代谢和吸收，改善肠道屏障功能，刺激肠脑轴等[59-60]。母乳微生物是新生儿肠道初始菌群的重要来源，是促进新生儿健康生长以及抵御疾病的重要防御机制，在促进婴幼儿健康方面发挥着重要作用。研究发现，早期的微生物暴露对于婴幼儿免疫系统的正常发育至关重要[61]。出生后，母乳微生物对婴幼儿肠道中微生物的种类和多样性有显著影

响。随着母乳中的微生物进入婴幼儿肠道并开始定植，可促进婴幼儿肠道相关淋巴组织的成熟和肠道上皮内环境的稳定。母乳喂养和配方乳粉喂养婴幼儿的肠道菌群之间有明显区别，双歧杆菌是2种喂养模式下存在明显差异的主要菌群[62-63]。

随着分离和检测技术的发展，在母乳中发现越来越多的微生物，目前已从母乳中分离出590个不同属的细菌，最常见的菌属有链球菌属、葡萄球菌属、乳酸杆菌属、假单胞菌属、双歧杆菌属、棒状杆菌属、肠球菌属、不动杆菌属等[64-66]。兼性厌氧和耗氧菌是母乳中的优势细菌，链球菌和葡萄球菌是最常分离且含量丰富的母乳微生物[67]。

4.3 婴幼儿配方乳粉中益生菌使用现状

母乳微生物在促进婴幼儿生长发育、提高机体免疫力、促进早期肠道菌群建立等方面发挥了非常重要的作用，而且越来越多的母乳源益生菌被分离出来。这些益生菌通过了大量的功效研究及安全性评估，其中部分益生菌已被批准用于婴幼儿食品，比如罗伊氏粘液乳杆菌DSM17938、发酵粘液乳杆菌CECT5716。自2011年以来，国家卫生健康委员会陆续发布了2011年第25号、2014年第10号、2016年第6号、2020年第4号、2022年第2号公告，公布了可用于婴幼儿食品的14种菌株，具体名单见表4。

表4 目前可用于婴幼儿食品的菌种名单

Table 4 List of probiotic strains that can be used in infant formula

编号	菌株	拉丁学名	菌株来源及功能
1	嗜酸乳杆菌NCFM	*Lactobacillus acidophilus* NCFM	从人体粪便中分离。具有耐酸和耐胆盐能力，对肠黏膜和牙齿有良好的黏附能力。2011年首次将该菌列入《可用于婴幼儿食品的菌种名单》，限定其仅用于1岁以上幼儿食品；2021年允许该菌用于1岁以下婴幼儿食品。
2	动物双歧杆菌乳亚种Bb-12	*Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* Bb-12	分离自科汉森收集的乳品发酵剂。可促进肠道菌群平衡，并提高人体免疫力。2011年11月，我国卫生部正式批准其用于婴幼儿食品。
3	动物双歧杆菌乳亚种HN019	*Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* HN019	来源于新西兰酸奶。可改善肠道微生态平衡，提高机体免疫力。2011年11月，我国卫生部正式批准用于婴幼儿食品。
4	动物双歧杆菌乳亚种Bi-07	*Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* Bi-07	来源于人体。可耐受模拟胃肠道环境下的酸和胆汁盐，具有较好的免疫调节、缓解抗生素副作用等功能。2011年11月，我国卫生部正式批准其可用于婴幼儿食品。
5	鼠李糖乳酪杆菌GG	*Lacticaseibacillus rhamnosus* GG	来源于健康人体肠道。具有平衡肠道菌群、改善肠道健康、增强肠黏膜屏障、预防和治疗腹泻等作用。2011年11月，我国卫生部正式批准其用于婴幼儿食品。
6	鼠李糖乳酪杆菌HN001	*Lacticaseibacillus rhamnosus* HN001	从新西兰生产的切达干酪中分离。在促进婴幼儿消化健康、改善肠道菌群平衡、提高儿童免疫力等方面有积极作用。2011年11月，我国卫生部正式批准其用于婴幼儿食品。
7	鼠李糖乳酪杆菌MP108	*Lacticaseibacillus rhamnosus* MP*108*	分离自中国婴幼儿健康肠道。具有预防小儿轮状病毒肠炎、特异性皮炎、过敏性鼻炎等作用。2021年4月，我国卫健委批准该菌可用于婴幼儿食品。
8	罗伊氏粘液乳杆菌DSM17938	*Limosilactobacillus reuteri* DSM17938	罗伊氏粘液乳杆菌ATCC 55730的子代菌株。具有预防婴幼儿肠绞痛的作用。2014年6月，我国卫生和计划生育委员会批准罗伊氏粘液乳杆菌DSM17938为新食品原料，可用于婴幼儿食品。
9	发酵粘液乳杆菌CECT5716	*Limosilactobacillus fermentum* CECT5716	西班牙BiosearchLife公司从人乳汁中筛选的菌株。可有效缓解婴幼儿肠道不适，如便秘、绿便、奶瓣、肠绞痛、消化不良、吸收不好等问题。2016年6月，我国卫生和计划生育委员会批准其用于婴幼儿食品。
10	短双歧杆菌M-16V	*Bifidobacterium breve* M-16V	分离自健康婴幼儿肠道。短双歧杆菌M-16V能够促进低体质量新生儿早期肠道微生物的定植，对低体质量新生儿肠道菌群形成整体改善。2016年6月，我国卫生和计划生育委员会批准其用于婴幼儿食品。

续表

编号	菌株	拉丁学名	菌株来源及功能
11	瑞士乳杆菌R0052	*Lactobacillus helveticus* R0052	加拿大拉曼公司从乳制品中分离。具有较好的食用安全性，且耐受性良好。2020年6月，我国卫健委批准该菌作为新食品原料用于婴幼儿食品。
12	长双岐杆菌婴幼儿亚种R0033	*Bifidobacterium longum* subsp. *infantis* R0033	加拿大拉曼公司从婴幼儿肠道中分离。具有较好的食用安全性，且耐受性良好。2020年6月，我国卫健委批准该菌作为新食品原料用于婴幼儿食品。
13	两歧双歧杆菌R0071	*Bifidobacterium bifidum* R0071	加拿大拉曼公司从成人肠道中分离。具有较好的食用安全性，且耐受性良好。2020年6月，我国卫健委批准该菌作为新食品原料用于婴幼儿食品。
14	长双歧杆菌长亚种BB536	*Bifidobacterium longum* subsp. *longum* BB536	日本森永公司从婴幼儿肠道中分离。在改善肠道、免疫、代谢以及皮肤健康方面具有临床效果。2022年5月，我国卫健委批准该菌作为新食品原料用于婴幼儿食品。

我国婴幼儿益生菌市场拥有巨大的发展潜力和良好前景。尽管我国婴幼儿益生菌市场发展迅速，但相比于一些发达国家，我国婴幼儿益生菌配料产业链仍处于初期开发阶段，亟待加大科研投入，解决我国婴幼儿益生菌配料长期依赖进口的“卡脖子”问题。

5 展望

婴幼儿配方乳粉是婴幼儿成长的重要食品，关乎亿万家庭的幸福与国家民族的未来。然而长期以来，我国婴幼儿配方乳粉制备技术滞后等问题，严重制约了我国婴幼儿配方乳粉产业的健康发展，导致核心配料依赖进口且价格高昂。2021年，我国科技部的十四五重点研发计划专项项目“大宗功能性乳基料规模化绿色生产技术研究与产业化示范”，聚焦并突破婴幼儿配方乳粉核心配料制备过程中的关键技术瓶颈，为实现我国婴幼儿配方乳粉产业发展发挥积极作用。

母乳是婴幼儿的黄金食品。在开发婴幼儿配方乳粉的核心功能原料时，应与乳业发展现状相结合，比如以生鲜乳为原料分级分离制备脱盐乳清粉、乳糖、乳铁蛋白、骨桥蛋白等功能性蛋白质的技术路线值得深入研究。在功能性脂质、HMOs、益生菌等原料的开发和配方设计中，也应尽可能参照中国母乳的成分特点，使其组成更加贴近中国母乳。

参考文献

[1] BARNESS L A. History of infant feeding practices[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1987, 46(1): 168-170.

[2] DOWLING D A. Lessons from the past: a brief history of the influence of social, economic, and scientific factors on infant feeding[J]. Newborn and Infant Nursing Reviews, 2005, 5(1): 2-9.

[3] 骆庆. 19世纪后半叶英国婴儿高死亡率的原因初探[J]. 苏州科技学院学报(社会科学版), 2013, 30(4): 96-100.
LUO Q. Investigate the cause of high infant mortality in Britain in the second half of the 19th century [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Social Science), 2013, 30(4): 96-100. (in Chinese)

[4] 王芸, 王心祥, 刘冬生. 婴幼儿配方食品国内外发展历史及国际法规介绍[J]. 中国乳品工业, 1998, 26(6): 43-45.
WANG Y, WANG X X, LIU D S. Introduction to the development history and international regulations of infant formula food at home and abroad [J]. China Dairy Industry, 1998, 26(6): 43-45. (in Chinese)

[5] 危娟, 郭泽镔, 江晓丽, 等. 我国婴幼儿配方奶粉生产工艺研究现状及发展建议[J]. 中国奶牛, 2022(4): 36-39.
WEI J, GUO Z B, JIANG X L, et al. Research status and development proposal of infant formula milk powder production technology[J]. China Dairy Cattle, 2022(4): 36-39. (in Chinese)

[6] WHO. Infant and young child nutrition [R]. Geneva: WHO, 2003.

[7] LÖNNERDAL B. Infant formula and infant nutrition: bioactive proteins of human milk and implications for composition of infant formulas [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2014, 99(3): 712-717.

[8] JIANG H Y, GALLIER S, FENG L F, et al. Development of the digestive system in early infancy and nutritional management of digestive problems in breastfed and formula-fed infants[J]. Food & Function, 2022, 13(3): 1062-1077.

[9] LÖNNERDAL B, LIEN E L. Nutritional and physiologic

significance of α-lactalbumin in infants [J]. Nutrition Reviews, 2003, 61(9): 295-305.

[10] ZHANG X F, FU X M, ZHANG H, et al. Chaperone-like activity of β-casein [J]. The International Journal of Biochemistry & Cell Biology, 2005, 37(6): 1232-1240.

[11] LÖNNERDAL B. Nutritional and physiologic significance of human milk proteins [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2003, 77(6): 1537-1543.

[12] KELLEHER S L, CHATTERTON D, NIELSEN K, et al. Glycomacropeptide and α-lactalbumin supplementation of infant formula affects growth and nutritional status in infant rhesus monkeys [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2003, 77(5): 1261-1268.

[13] SEGAWA T, SUGAI S. Interactions of divalent metal ions with bovine, human, and goat α-lactalbumins [J]. Journal of Biochemistry, 1983, 93(5): 1321-1328.

[14] MIGLIORE-SAMOUR D, ROCH-ARVEILLER M, TISSOT M, et al. Effects of tripeptides derived from milk proteins on polymorphonuclear oxidative and phosphoinositide metabolisms [J]. Biochemical Pharmacology, 1992, 44(4): 673-680.

[15] JAZIRI M, MIGLIORE-SAMOUR D, CASABIANCA-PIGNÈDE M R, et al. Specific binding sites on human phagocytic blood cells for Gly-Leu-Phe and Val-Glu-Pro-Ile-Pro-Tyr, immunostimulating peptides from human milk proteins[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) -Protein Structure and Molecular Enzymology, 1992, 1160 (3): 251-261.

[16] LÖNNERDAL B. Nutritional roles of lactoferrin [J]. Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care, 2009, 12(3): 293-297.

[17] 张和平, 张列兵. 现代乳品工业手册[M]. 2版. 北京: 中国轻工业出版社, 2012.

[18] ASHKAR S, WEBER G F, PANOUTSAKOPOULOU V, et al. Eta-1 (osteopontin): an early component of type-1 (cell-mediated) immunity [J]. Science, 2000, 287 (5454): 860-864.

[19] 陈建行, 邱泉若, 刘建光, 等. 婴儿配方乳粉蛋白质的人乳化研究进展[J]. 中国乳品工业, 2016, 44(9): 31-37, 46.
CHEN J H, QIU Q R, LIU J G, et al. Research progress on humanization of infant formula proteins [J]. China Dairy Industry, 2016, 44(9): 31-37, 46. (in Chinese)

[20] 袁婷兰, 韦伟, 叶兴旺, 等. 母乳中长链甘油三酯研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(6): 41-50.
YUAN T L, WEI W, YE X W, et al. Research progresses of medium- and long-chain triacylglycerols in human milk [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(6): 41-50. (in Chinese)

[21] ŁOŚ-RYCHARSKA E, KIERASZEWICZ Z, CZERWIONKA-SZAFLARSKA M. Medium chain triglycerides (MCT) formulas in paediatric and allergological practice [J]. Przeglad Gastroenterologiczny, 2016, 11(4): 226-231.

[22] BAZINET R P, LAYÉ S. Polyunsaturated fatty acids and their metabolites in brain function and disease [J]. Nature Reviews Neuroscience, 2014, 15(12): 771-785.

[23] QAWASMI A, LANDEROS-WEISENBERGER A, LECKMAN J F, et al. Meta-analysis of long-chain polyunsaturated fatty acid supplementation of formula and infant cognition[J]. Pediatrics, 2012, 129(6): 1141-1149.

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

[25] HOFFMAN D R, BOETTCHER J A, DIERSEN-SCHADE D A. Toward optimizing vision and cognition in term infants by dietary docosahexaenoic and arachidonic acid supplementation: a review of randomized controlled trials [J]. Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids, 2009, 81(2/3): 151-158.

[26] 曹栋, 裘爱泳, 王兴国. 磷脂结构、性质、功能及研究现状(2)[J]. 粮食与油脂, 2004, 17(6): 13-16.
CAO D, QIU A Y, WANG X G. The structure, nature, function and researching situation of phospholipid(2)[J]. Cereals & Oils, 2004, 17(6): 13-16. (in Chinese)

[27] 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]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(29): 7158-7167.

[28] ZOU X Q, HUANG J H, JIN Q Z, et al. Model for human milk fat substitute evaluation based on triacylglycerol composition profile [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(1): 167-175.

[29] 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.
CHANG G F, WANG X G. Research review about human milk fat and oils & fats in infant milk formulas in China[J]. China Oils and Fats, 2010, 35(4): 1-6. (in Chinese)

[30] GASSI J Y, BLOT M, BEAUCHER E, et al. Preparation and characterisation of a milk polar lipids enriched ingredient from fresh industrial liquid butter serum: combination of physico-chemical modifications and technological treatments[J]. International Dairy Journal, 2016, 52: 26-34.

[31] NILSSON Å. Role of sphingolipids in infant gut health

and immunity[J]. The Journal of Pediatrics，2016，173：53-59.

[32] HU X C，REN L J，CHEN S L，et al. The roles of different salts and a novel osmotic pressure control strategy for improvement of DHA production by *Schizochytrium* sp.[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering，2015，38(11)：2129-2136.

[33] CHAUTON M S，REITAN K I，NORSKER N H，et al. A techno-economic analysis of industrial production of marine microalgae as a source of EPA and DHA-rich raw material for aquafeed：research challenges and possibilities[J]. Aquaculture，2015，436：95-103.

[34] CARLSON S E，FORD A J，WERKMAN S H，et al. Visual acuity and fatty acid status of term infants fed human milk and formulas with and without docosahexaenoate and arachidonate from egg yolk lecithin[J]. Pediatric Research，1996，39(5)：882-888.

[35] LI X P，LIU J P，CHEN G Y，et al. Extraction and purification of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid from microalgae：a critical review[J]. Algal Research，2019，43：101619.

[36] 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]. Food Chemistry，2020，328：126991.

[37] 张星河，韦伟，李菊芳，等. 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[J]. 中国油脂，2022，47(9)：114-121.
ZHANG X H，WEI W，LI J F，et al. Composition of 1，3-diunsaturated fatty acid-2-palmitin triacylglycerols in human milk and their functions：a review[J]. China Oils and Fats，2022，47(9)：114-121.(in Chinese)

[38] ESTEBAN L，JIMÉNEZ M J，HITA E，et al. Production of structured triacylglycerols rich in palmitic acid at *sn*-2 position and oleic acid at *sn*-1，3 positions as human milk fat substitutes by enzymatic acidolysis[J]. Biochemical Engineering Journal，2011，54(1)：62-69.

[39] 刘汝慧，孙博涵，陈玉洁，等. 母乳化结构脂制备研究进展[J]. 食品安全质量检测学报，2022，13(15)：4759-4765.
LIU R H，SUN B H，CHEN Y J，et al. Research progress in the preparation of human milk fat substitutes[J]. Journal of Food Safety & Quality，2022，13(15)：4759-4765.(in Chinese)

[40] WANG Y F，ZHOU X H，GONG P M，et al. Comparative major oligosaccharides and lactose between Chinese human and animal milk[J]. International Dairy Journal，2020，108：104727.

[41] KULINICH A，LIU L. Human milk oligosaccharides：the role in the fine-tuning of innate immune responses[J]. Carbohydrate Research，2016，432：62-70.

[42] ANDREAS N J，KAMPMANN B，MEHRING L K. Human breast milk：a review on its composition and bioactivity[J]. Early Human Development，2015，91(11)：629-635.

[43] SOYYILMAZ B，MIKŠ M H，RÖHRIG C H，et al. The mean of milk：a review of human milk oligosaccharide concentrations throughout lactation[J]. Nutrients，2021，13(8)：2737.

[44] ZHANG S H，LI T L，XIE J，et al. Gold standard for nutrition：a review of human milk oligosaccharide and its effects on infant gut microbiota[J]. Microbial Cell Factories，2021，20(1)：108.

[45] YU S，LIU J J，YUN E J，et al. Production of a human milk oligosaccharide 2'-fucosyllactose by metabolically engineered *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Microbial Cell Factories，2018，17(1)：101.

[46] MAROTTA M，RYAN J T，HICKEY R M. The predominant milk oligosaccharide 6'-sialyllactose reduces the internalisation of *Pseudomonas aeruginosa* in human pneumocytes[J]. Journal of Functional Foods，2014，6：367-373.

[47] PALUR D S K，PRESSLEY S R，ATSUMI S. Microbial production of human milk oligosaccharides[J]. Molecules，2023，28(3)：1491.

[48] PÉREZ-ESCALANTE E，ALATORRE-SANTAMARÍA S，CASTAÑEDA-OVANDO A，et al. Human milk oligosaccharides as bioactive compounds in infant formula：recent advances and trends in synthetic methods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2022，62(1)：181-214.

[49] JUÁREZ-CASTELÁN C J，VÉLEZ-IXTA J M，CORONA-CERVANTES K，et al. The entero-mammary pathway and perinatal transmission of gut microbiota and SARS-CoV-2[J]. International Journal of Molecular Sciences，2022，23(18)：10306.

[50] GREINER L L，HUMPHREY D C，HOLLAND S N，et al. The validation of the existence of the entero-mammary pathway and the assessment of the differences of the pathway between first and third parity sows[J]. Translational Animal Science，2022，6(2)：txac047.

[51] HABIB A，NAUSHEEN S，NOORUDDIN S，et al. Effect of bovine lactoferrin on seroconversion following polio vaccine administration in children：protocol for a double-blinded randomised controlled trial[J]. BMJ

Open，2022，12(5)：e050849.
[52] SELMA-ROYO M，CALVO LERMA J，CORTÉS-MACÍAS E，et al. Human milk microbiome：from actual knowledge to future perspective [J]. Seminars in Perinatology，2021，45(6)：151450.
[53] OGRA P L. Immunology of human milk and lactation：historical overview [J]. Nestle Nutrition Institute Workshop Series，2020，94：11-26.
[54] DAVIS E C，CASTAGNA V P，SELA D A，et al. Gut microbiome and breast-feeding：implications for early immune development[J]. Journal of Allergy and Clinical Immunology，2022，150(3)：523-534.
[55] RODRIGUEZ-HERRERA A，TIMS S，POLMAN J，et al. Early-life fecal microbiome and metabolome dynamics in response to an intervention with infant formula containing specific prebiotics and postbiotics[J]. American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology，2022，322(6)：571-582.
[56] ZHANG K M，JIN M，YANG D，et al. Antibiotic resistance genes in gut of breast-fed neonates born by caesarean section originate from breast milk and hospital ward air[J]. BMC Microbiology，2022，22(1)：36.
[57] CHEN Z，PAN W G，XIAN W Y，et al. Identification of infantile diarrhea caused by breast milk-transmitted *Staphylococcus aureus* infection[J]. Current Microbiology，2016，73(4)：498-502.
[58] PAGLIA L. From native core micriobiome to milk-oriented microbiome[J]. European Journal of Paediatric Dentistry，2021，22(2)：89.
[59] SALA-VILA A，CASTELLOTE A I，LÓPEZ-SABATER M C. The intramolecular position of docosahexaenoic acid in the triacylglycerol sources used for pediatric nutrition has a minimal effect on its metabolic use[J]. Nutrition Research，2008，28(3)：131-136.
[60] HAPPE R P，GAMBELLI L. Specialty oils and fats in food and nutrition [M]. Cambridge：Woodhead Publishing，2015，285-315.
[61] OBLADEN M. Historic records on the commercial production of infant formula[J]. Neonatology，2014，106(3)：173-180.
[62] MU H L，HØY C E. The digestion of dietary triacylglycerols[J]. Progress in Lipid Research，2004，43(2)：105-133.
[63] KIM B H，AKOH C C. Recent research trends on the enzymatic synthesis of structured lipids[J]. Journal of Food Science，2015，80(8)：1713-1724.
[64] WEI W，JIN Q Z，WANG X G. Human milk fat substitutes：past achievements and current trends[J]. Progress in Lipid Research，2019，74：69-86.
[65] 侯建平，刘振民，郭本恒，等. 婴幼儿配方产品中的脂质及其研究状况[J]. 中国乳品工业，2014，42(7)：45-48.
HOU J P，LIU Z M，GUO B H，et al. Lipids in infant formula and its advance[J]. China Dairy Industry，2014，42(7)：45-48.(in Chinese)
[66] 朱辉权. 饲喂DHA微藻粉对山羊乳品质的影响[D]. 北京：中国农业科学院，2021.
[67] 张毓瑜. 婴幼儿配方乳粉DHA藻油微胶囊化制备与母乳化脂肪功能评价[D]. 北京：中国农业科学院，2020.

（责任编辑：史润东东）