

婴幼儿配方奶粉研究进展*

王颂萍¹ 任发政² 罗洁² 彭海鑫² 王宇涵²

(1. 河北工程大学科信学院, 邯郸 056038; 2. 中国农业大学教育部功能乳品重点实验室, 北京 100083)

摘要: 婴幼儿配方奶粉是非母乳喂养婴儿最重要的营养来源,我国婴幼儿配方奶粉市场需求巨大,但基础营养与加工技术研究起步较晚。本文从母乳营养需求、配方奶粉标准和奶粉基料研发等方面,详细介绍了婴幼儿配方奶粉的营养学研究进展;从干法与湿法等生产工艺对配方奶粉特性的影响方面论述了婴幼儿配方奶粉加工技术的研究进展;同时也讨论了婴幼儿奶粉中存在的危害风险,为我国婴幼儿配方奶粉在基料选择、生产技术和产业发展方面提供参考。

关键词: 婴幼儿配方奶粉 母乳化 营养基础 干法 湿法
中图分类号: TS252.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0200-11

Progress in Infant Formula Milk Powder

Wang Songping¹ Ren Fazheng² Luo Jie² Peng Haixin² Wang Yuhan²

(1. Kexin College, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

2. Key Laboratory of Functional Dairy, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Infant formula milk powder is very important for infants whose mother cannot or does not want to breastfeed. There is a growing need for infant formula milk powder market in China, however, the research of basic nutrition and process technology is relative backwardness. The domestic and abroad research progresses about nutrition of infant formula milk powder were introduced by analyzing the breast milk nutrient profile, standard of formula and the development of powder composition. By comparing the dry process and wet process with their effects on powder functionality, the progresses on the process technology of infant formula milk powder were discussed. The hazard analysis was also discussed to better control the quality of infant formula milk powder. A general overview of the selection of formula composition, process technology and the direction of industrial development was provided. Strengthening the basic research on breast milk nutrition, improving the differentiation among products and developing the infant formula which was mostly close to the Chinese breast milk were the key to the future development of China's infant milk powder.

Key words: Infant formula milk powder Humanized milk Nutritional basic Dry mix process Wet mix process

引言

近年来,全球婴幼儿配方奶粉的市场需求不断增大^[1],婴幼儿配方奶粉的世界产量在2007年至2010年间平均每年以8.2%的速度增长,从2010年

到2014年平均同比增长达到11%,并且随着中国市场的极速增长,这个数字将超过20%^[1-2]。根据第四次国家卫生服务调查,我国每年新生儿婴幼儿约2000万,且自2002年以来人口出生率以1.24%增长,庞大的婴幼儿消费群体孕育了我国

收稿日期: 2014-11-12 修回日期: 2014-12-12
* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD12B08)
作者简介: 王颂萍,讲师,主要从事食品科学研究,E-mail: xiaomeisan@126.com
通讯作者: 任发政,教授,博士生导师,主要从事乳品科学与加工研究,E-mail: renfazheng@263.net

巨大的婴幼儿奶粉市场^[3-4]。同时,随着收入水平的提高,消费者对孩子的健康成长有着更高的消费意愿,有更多的需求并有能力购买更高品质的婴幼儿奶粉。我国婴幼儿配方奶粉的市场前景极好。

目前我国共有婴幼儿配方乳粉生产企业 92 家,婴幼儿配方乳粉经营企业 54.5 万家^[5]。但是自“三鹿奶粉事件”之后,我国很多国产品牌奶粉卷入食品安全事件,使消费者对国产奶粉失去信心。而外资品牌以其优质的产品质量、较高的品牌价值、独到的营销战略,迅速夺取我国大部分的市场份额,主导着中国婴幼儿配方奶粉的消费市场。据海关总署统计,自 2008 年起我国进口奶粉数量急剧上升,市场占有率由 20% 上升至 80%。我国进口奶粉的主要来源国家为美国、新西兰和澳大利亚,其产品拥有强大的品牌忠诚度。特别在高端市场,雀巢、惠氏、多美滋、雅培等国外品牌占据市场份额高达 80% ~ 90%。据中国国际乳制品交易协会公布的数据,2012 年中国市场的婴幼儿奶粉销售额为 385.18 亿元,其中美赞臣、多美滋、惠氏、雅培四大“洋品牌”的销售额占 1/2。除了直接进口国外奶粉,国内乳业也在奶源上采用“进口奶源”,如蒙牛、圣元、贝因美等企业。但国内并非没有好的奶牛饲养地,雀巢在中国有 3 个奶源区,且雀巢在华销售的产品中超过 90% 是在中国生产。飞鹤在齐齐哈尔市也有 4 个“万头牧场”,但每个牧场的近万头奶牛,全部是从澳大利亚和乌拉圭进口的。

2010 年我国卫生部颁布了一套新的国家乳品标准,其中包括《婴儿配方食品》和《较大婴儿和幼儿配方食品》,覆盖了适用于 0 ~ 36 个月龄婴幼儿的产品。该标准从宏量营养素到微量营养素都与国际食品法典委员会的标准或美国、欧盟、澳新标准基本相同。同时,标准中对微生物、黄曲霉毒素、重金属等安全指标也进行了严格规定。2013 年起,我国陆续出台、修改了一系列法律、法规、规章,加强了对婴幼儿配方奶粉以及进口婴幼儿配方奶粉的监管,把保障婴幼儿配方乳粉质量安全放在更加突出的位置^[6]。通过“十五”和“十一五”科技攻关,我国奶业包括婴幼儿乳粉的生产和质量安全控制技术水平有了很大提高。研究也证明,国产奶粉和进口奶粉在实验动物上引起的营养生物效应是相同的,没有优劣之分^[7]。但我国婴幼儿配方奶粉在研制上起步比较晚,产品自主研发能力较弱,与世界平均水平仍然有较大差距。本文通过对婴幼儿奶粉的母乳化营养学需求、功能基料开发、生产技术和质量控制

的国内外研究进展的比较分析,找出我国婴幼儿配方奶粉未来发展的突破口,以期为我国奶粉生产技术革新提供参考。

1 营养学研究

如果不能母乳喂养,婴幼儿配方奶粉无疑是最好的替代品。但母乳才是婴儿最好的营养来源,自婴儿奶粉发明以来,所有的奶粉科技与研发都是围绕模拟母乳开展的。婴幼儿配方奶粉的研发也从过去的只关注在婴幼儿期的摄入对短期健康和成长的影响,到后续的健康发展,包括成人疾病的研究^[8-10]。

1.1 母乳成分特征

不同地区、相同地区的不同泌乳期及不同饮食习惯的母乳成分含量如表 1 所示,母乳的成分受种族、饮食文化、生活习惯、地域、不同泌乳阶段等因素的影响。个体母乳的组成也并不总是维持不变的,特别是蛋白质和碳水化合物的含量^[14-17]。母乳在哺乳期不断变化以满足不断增长的婴幼儿需要,尤其是中枢神经系统的发展和免疫系统成熟的需要。因此,实际上婴幼儿奶粉并没有绝对母乳化的产品,需要开发的是“趋势母乳化”、“认知母乳化”的婴幼儿配方奶粉,必须精细生产、分阶段配置以模拟不同时期、不同地域母乳的成分而满足不同婴幼儿的需要。因此,采集分析中国各地区母乳、建立中国人母乳库,根据国人母乳营养成分设计适合中国婴幼儿的配方奶粉显得尤为重要。

从母乳的成分组成分析(表 1、2),牛乳中蛋白质含量是母乳的 2 ~ 3 倍,这也许是牛犊两个月内体重增长能翻倍、而婴幼儿通常需要 5 至 6 个月才能体重翻倍的原因之一^[2]。母乳不含 β -乳球蛋白,但免疫球蛋白是牛乳的 3 倍。此外,母乳中乳清蛋白占总蛋白的 60%,而牛乳中仅占 20%。因此,牛乳所含丰富的酪蛋白可能会在婴幼儿胃里出现“硬块”(即使经过巴氏消毒和均质)而导致消化不良。相反,母乳在婴幼儿胃部形成“软块”而易于消化和吸收^[18]。与牛乳相比,母乳的碳水化合物几乎是牛乳的 2 倍,长链不饱和脂肪酸是牛乳含量的 3 倍多,其中亚油酸(C_{18-2} , n - 6)、 α -亚麻酸(C_{18-3} , n - 3)和二十二碳六烯酸(C_{22-6} , n - 3, DHA)对婴幼儿中枢神经系统和视网膜发育起重要作用^[19]。此外母乳中矿物的含量低于牛乳,这可以减少婴幼儿的肾脏的负荷。母乳的维生素 E、C 和 B_5 含量比牛乳大约多 2 倍,但钙、磷、维生素 B_1 、 B_2 和 B_6 的含量少得多。

表 1 不同地区和泌乳阶段母乳成分的比较

Tab.1 Comparison of composition of human milk from different areas and lactation periods

成分	牛乳 ^{〔11〕}	河北城市 1 月	河北城市 3 月	河北农村 3 月	上海市区前段	法国母乳 ^{〔11〕}
		母乳 ^{〔12〕}	母乳 ^{〔12〕}	母乳 ^{〔12〕}	母乳 ^{〔13〕}	
干物质质量浓度/(g·(100 mL) ⁻¹)	12.5	—	—	—	—	12.0
能量值/(kJ·(100 mL) ⁻¹)	280	264	218	205	—	280
蛋白质质量浓度/(g·(100 mL) ⁻¹)	3.5	1.52	1.06	1.31	1.74	1.55
碳水化合物质量浓度/(g·(100 mL) ⁻¹)	4.5	7.0	7.1	7.0	7.8	7.5
脂肪质量浓度/(g·(100 mL) ⁻¹)	3.6	3.1	2.1	2.0	2.8	3.5
钙质量浓度/(mg·(100 mL) ⁻¹)	125	19.2	22.2	23.0	28.3	30
磷质量浓度/(mg·(100 mL) ⁻¹)	100	—	—	—	15.3	20
镁质量浓度/(mg·(100 mL) ⁻¹)	12	2.14	2.5	2.2	—	5
钠质量浓度/(mg·(100 mL) ⁻¹)	50	19.8	13.8	18.0	23.2	10
钾质量浓度/(mg·(100 mL) ⁻¹)	125	58.2	47.8	53.4	58.0	45
铁质量浓度/(mg·(100 mL) ⁻¹)	0.03	0.04	0.02	0.03	0.06	0.1

表 2 母乳与牛乳的成分比较

Tab.2 Comparison of composition of human milk and bovine milk

蛋白质质量浓度/ (g·(100 mL) ⁻¹) ^{〔20〕}			脂肪酸 质量分数/% ^{〔21〕}			低聚糖质量浓度/ (g·L ⁻¹) ^{〔22〕}			维生素质量浓度 ^{〔1〕}		
种类	母乳	牛乳	种类	母乳	牛乳	种类	母乳	牛乳	种类	母乳	牛乳
酪蛋白	0.31	2.60	C18:1	31.7	28.4	乳糖	55~70	40~50	维生素 A/(UI·(100 mL) ⁻¹)	170	150
乳清蛋白	0.57	0.70	C18:2	19.6	5.3	乳-N-四一型 ^b	0.5~1.5	微量	胡萝卜素/(μg·(100 mL) ⁻¹)	50	25
α-乳白蛋白	0.15	0.12	C18:3	0.9	2.1	乳-N-海藻五糖一型	1.2~1.7	—	维生素 D/(UI·(100 mL) ⁻¹)	2	4
β-乳球蛋白	0	0.30	C20:1	0.4	—	乳-N-海藻五糖二型	0.3~1.0	—	维生素 E/(mg·(100 mL) ⁻¹)	0.5	0.15
免疫球蛋白	0.10	0.10	C20:3	0.4	—	乳-N-海藻五糖三型	0.01~0.2	—	维生素 C/(mg·(100 mL) ⁻¹)	4	2
乳铁蛋白	0.15	痕量	C20:5	0.1	—	乳-N-海藻六糖一型	0.1~0.2	—	维生素 B ₁ /(mg·(100 mL) ⁻¹)	15	40
血清白蛋白	0.05	0.03	C22:1	1.4	0.2	6'-唾液酸乳糖	0.3~0.5	0.05	维生素 B ₂ /(mg·(100 mL) ⁻¹)	40	175
溶解酵素	痕量	0.05	C22:6	0.21	—	3'-唾液酸乳糖	0.1~0.3	—	维生素 B ₅ /(mg·(100 mL) ⁻¹)	160	90
其他	0.15	0.07	饱和脂肪酸	42.2	52.6	唾液酸乳-N-四糖 a	0.03~0.2	微量	维生素 B ₆ /(mg·(100 mL) ⁻¹)	5	60
			单不饱和脂肪酸	37.1	36.3	唾液酸乳-N-四糖 c	0.1~0.6	微量	叶酸/(μg·(100 mL) ⁻¹)	0.2	0.2
			多不饱和脂肪酸	21.21	7.4	双唾液酸乳-N-四糖	0.2~0.6	微量	维生素 B ₁₂ /(mg·(100 mL) ⁻¹)	0.03	0.6

1.2 婴幼儿配方奶粉的基础需求标准

国内奶粉配方设计主要参照 GB 10765—2010《食品安全国家标准 婴儿配方食品》、GB 10767—2010《食品安全国家标准 较大婴儿和幼儿配方食品》以及 GB 14880—2012《食品安全国家标准 食品营养强化剂使用标准》等。GB 10765—2010 和欧洲小儿胃肠学会 (ESPGHAN) 规定的婴幼儿配方奶粉营养素的标准如表 3 所示。最大值和最小值是基于可得到的关于婴儿营养需求量和是否出现副作用的大量研究数据而制定的,在没有充足数据进行科学评估的成分方面,其限值根据现存的直观安全摄入量而制定^{〔23〕}。由表 3 可以看出,我国配方乳粉的标准考虑了中国人母乳中的营养成分,力求符合中国婴幼儿的营养需求,锰、硒等成分还高于国际标准,更适合中国婴儿的生理需要。

绝大多数婴幼儿配方奶粉是基于牛乳配置的,其他特殊医疗功效的产品,包括低敏感性配方,用游离氨基酸或多肽替代蛋白质的配方,无乳糖配方等,这

部分将在下面详细讨论。此外,为了逐渐适应婴儿增长的需要,婴儿配方粉的组成必须根据婴儿的年龄做出相应调整。根据婴儿的年龄,婴儿配方奶粉主要分成 3 个阶段:第 1 阶段从出生到 6 个月,后续配方即第 2 阶段为 6 至 18 个月,成长配方即第 3 阶段为 1 至 3 年^{〔18,26〕}。

1.3 母乳化基料研究

从量上看,婴幼儿配方奶粉的主要营养成分在过去的几十年间变化很小。但是,秉着尽可能模拟母乳的原则,某些营养成分及非营养成分方面有一些质的发展。

1.3.1 蛋白质

蛋白质含量决定婴儿的增长率,目前婴幼儿配方奶粉中的主要蛋白质来源为牛乳蛋白质、大豆分离蛋白和羊奶蛋白质。以牛乳蛋白质为主的配方奶粉配置中,牛乳中的蛋白质含量应降至每 100 mL 中 1 g 蛋白质,以提供人和母乳喂养婴儿相同的增长率。对于低出生体重婴儿的配方,蛋白质含量可以

表 3 婴幼儿配方奶粉成分标准
Tab.3 Standard of essential composition of infant formula

参数		国标 ^[24]		欧洲小儿胃肠学会 ^[25]	
		最小值	最大值	最小值	最大值
蛋白质	热量/(kJ·(100 mL) ⁻¹)	251.0	292.9	251.0	292.9
	牛乳蛋白质/(g·(100 kJ) ⁻¹)	7.9	12.3	7.5	12.6
	大豆分离蛋白/(g·(100 kJ) ⁻¹)	8.7	12.3	9.4	12.6
	水解牛乳蛋白质/(g·(100 kJ) ⁻¹)	0	0	7.5	12.6
	总量/(g·(100 kJ) ⁻¹)	18.4	24.9	18.4	25.1
脂肪	亚油酸/(g·(100 kJ) ⁻¹)	1.2	5.8	1.3	5.0
	α-亚油酸/(g·(100 kJ) ⁻¹)	0.2	—	0.2	—
	亚油酸/α-亚油酸比例	0.9	2.6	0.9	2.6
碳水化合物	DHA/(mg·(100 mL) ⁻¹)	0	0	41.8	50.2
	总量/(g·(100 kJ) ⁻¹)	38.5	57.7	37.7	58.6
维生素	A/(mg·(100 kJ) ⁻¹)	0.2	0.8	0.3	0.8
	D ₃ /(μg·(100 kJ) ⁻¹)	4.4	10.5	4.2	10.5
	E/(mg·(100 kJ) ⁻¹)	2.1	21.0	2.1	20.9
	K/(μg·(100 kJ) ⁻¹)	17.6	113.8	16.7	104.6
	B ₁ /(mg·(100 kJ) ⁻¹)	0.2	1.6	0.3	1.3
	B ₂ /(mg·(100 kJ) ⁻¹)	0.3	2.1	0.3	1.7
	烟酸/(mg·(100 kJ) ⁻¹)	1.2	6.3	1.2	6.3
	B ₆ /(mg·(100 kJ) ⁻¹)	0.1	0.8	0.1	0.7
	B ₁₂ /(μg·(100 kJ) ⁻¹)	0.4	6.3	0.4	2.1
	泛酸/(mg·(100 kJ) ⁻¹)	1.7	8.4	1.7	8.4
	叶酸/(μg·(100 kJ) ⁻¹)	43.9	210.0	41.8	209.2
	C/(μg·(100 kJ) ⁻¹)	43.9	297.5	41.8	125.5
	生物素/(μg·(100 kJ) ⁻¹)	6.3	41.8	6.3	31.4
矿物质和微量元素	铁/(mg·(100 kJ) ⁻¹)	1.8	6.3	1.3	5.4
	钙/(g·(100 kJ) ⁻¹)	0.2	0.6	0.2	0.6
	磷/(g·(100 kJ) ⁻¹)	0.1	—	0.1	0.4
	钙磷比例	0.2	0.4	0.2	0.4
	镁/(mg·(100 kJ) ⁻¹)	20.9	—	20.9	62.8
	钠/(mg·(100 kJ) ⁻¹)	87.9	246.9	83.7	251.0
	氯化物/(g·(100 kJ) ⁻¹)	0.2	0.6	0.2	0.7
	锰/(μg·(100 kJ) ⁻¹)	20.9	420.1	4.2	209.2
	氟化物/(μg·(100 kJ) ⁻¹)	—	—	—	251.0
	碘/(μg·(100 kJ) ⁻¹)	43.9	245.2	41.8	209.2
	硒/(μg·(100 kJ) ⁻¹)	8.4	33.3	4.2	37.7
	铜/(mg·(100 kJ) ⁻¹)	0.1	0.5	0.1	0.3
	锌/(μg·(100 kJ) ⁻¹)	2.1	6.3	2.1	6.3

* 仅适用于乳基婴儿配方食品。

达到 2 g/(100 mL)^[2]。

目前,基于牛乳蛋白质的婴儿配方奶粉以乳清蛋白为主,而非过去的酪蛋白为主,乳清蛋白质与酪蛋白的质量浓度比例为 60:40^[27]。为防止牛乳过敏,婴幼儿配方奶粉中还常将牛乳酪蛋白或乳清蛋白预先消化成多肽和氨基酸的混合物,如利用 β-环状糊精作为包埋剂的胰蛋白酶水解牛乳蛋白质^[28-30]。30 年前,市场上可能只有一种以乳清蛋白为主的婴幼儿配方奶粉,然而现在至少 50% 以上配方奶粉的蛋白质主要都是乳清蛋白。尽管从营养的角度,牛乳酪蛋白和乳清蛋白的差异很小,但以乳清蛋白为主的配方更接近母乳蛋白,即使牛乳的酪蛋白和乳清蛋白组分与母乳也存在较大的差异^[31]。

大豆分离蛋白是无乳糖婴幼儿配方奶粉中常用的蛋白质来源,可用于乳糖不耐症或半乳糖血症及素食家庭。然而,10% ~ 14% 对牛乳蛋白过敏的婴儿也对大豆蛋白过敏,所以最好仍然使用水解后的大豆蛋白作为原料^[32]。此外,大豆植物雌激素对婴儿的影响仍未完全阐明^[33]。

在中国、澳大利亚和新西兰,某些婴幼儿配方奶粉还采用羊奶蛋白作为蛋白质来源。2013 年欧盟也批准羊奶蛋白质作为婴儿配方食品和较大婴儿配方食品的蛋白质来源^[34]。

1.3.2 脂质

脂质不仅为婴儿提供每日 50% 的能量,也为婴儿提供着必需脂肪酸(亚油酸和 α-亚麻酸)和脂溶

性维生素(维生素 A、维生素 D、维生素 E、维生素 K)。目前大多数的婴幼儿配方奶粉中将混合的植物油作为脂质来源,如棕榈油、豆油、椰子油等。

在婴儿的生长发育中,多不饱和脂肪有着重要的结构和功能,如花生四烯酸(C_{20-4} , $n-6$, ARA)和 DHA,它们在母乳中以磷脂的形式天然存在^[35-36]。ARA 和 DHA 对大脑的发展和新生儿视网膜膜有积极影响^[36-39]。在成人中,ARA 和 DHA 可以由亚油酸和 α -亚麻酸合成,但婴儿的合成能力有限^[40]。

近来关于婴幼儿奶粉中脂质添加的研究重点是甘油三酸酯结构的重排,尤其是棕榈酸的位置^[41-44]、磷脂和鞘糖脂的含量^[45-46]和共轭亚油酸对婴儿功能益处的开发^[47-48]。棕榈酸在母乳脂肪酸中占 17%~25%,并有约 70%的棕榈酸酯位于甘油三酯的 sn-2 位上(β -棕榈酸酯)。这类棕榈酸因未被水解能够被有效吸收;而普遍被用于婴儿配方奶粉中棕榈油中的棕榈酸,桐酸酯化位置在 sn-1 和 sn-3 上,其多数被水解并且不易被吸收。OPO (1, 3-二油酸2-棕榈酸甘油三酯)结构脂肪就是通过酶法酯交换或酸解反应改变配方奶粉中油脂原料中棕榈酸的位置,使之被酯化到甘油主链上的 sn-2 位置上,油酸主要酯化在 sn-1, 3 位,生成 OPO 母乳模拟脂肪。研究表明,当配方奶粉含有高含量的 α -棕榈酸酯,婴儿的排泄物中乳酸菌和双歧杆菌数量显著增加,且其骨骼强度也得到加强^[49]。

1.3.3 碳水化合物

母乳中的主要碳水化合物是乳糖(约 65 g/L)和低聚糖(大约 10 g/L)。母乳中 40% 的能量由乳糖供给,乳糖是婴儿出生后 6 个月内的主要能量来源。以牛乳为基本成分的婴幼儿配方奶粉为更好地模拟母乳,需要补充乳糖。乳糖可以水解为葡萄糖和半乳糖,前者是一个重要的能量来源,后者是婴儿大脑发育必需的物质。未消化的乳糖在肠道内也有重要作用,它能刺激肠道菌群如双歧杆菌和乳酸杆菌产生益生作用^[50-51]。肠道菌群分解乳糖通过增加结肠中的矿物溶解度和/或增加渗透压能促进钙和镁的吸收^[18, 52-53]。乳糖也可以作为结肠中膳食纤维,增加管道水分,从而缓解便秘。然而,对于乳糖不耐受或半乳糖血症,乳糖也可能造成胃肠道功能紊乱(腹痛、腹胀、肠胃胀气和腹泻)。婴儿的乳糖不耐症可能是由于先天性或临时乳糖酶缺乏,有乳糖不耐受或半乳糖血症的婴儿应喂食无乳糖配方或低乳糖配方。

低聚糖是一种复杂的混合物,约含有 130 种化合物。低聚糖不能在上消化道消化^[54],但它们是双

歧杆菌的益生元,且具有抑制特定病原体的功能^[33, 55]。目前研究学者们已成功从母乳中分离出近 90 种主要的低聚糖,并对结构进行了鉴定^[56]。由于母乳中的低聚糖成分和结构无法复制,目前被添加到婴儿配方中的低聚糖为动物和植物源低聚糖,包括低聚半乳糖、低聚果糖和菊粉。关于肠道菌群的最新研究表明,母乳喂养的婴儿中双歧杆菌是肠道最主要的菌群。母乳低聚糖能增加食用母乳的婴儿结肠中双歧杆菌的数量,而益生菌的活力能显著降低致病菌的含量^[57]。在婴幼儿配方奶粉中添加 0.4 或 0.8 g/(100 mL)的低聚糖可以显著增加粪便中双歧杆菌菌群的数量,从而达到母乳喂养婴儿肠道菌群的水平。

此外,麦芽糊精和淀粉等其他碳水化合物也可被添加至婴儿配方奶粉中以实现特殊的医疗用途,如配置低过敏性配方和防吐防打嗝配方奶粉^[58]。

1.3.4 矿物质和维生素

微量元素(钙、铁、锌、铜、锰、碘、硒和维生素 A、D、K 和 B₉)也必须在婴儿奶粉中强化至接近母乳水平,同时维持正常的渗透压。维生素的生理功能主要有辅助胶原蛋白的生物合成,促进婴儿期肌腱、韧带及骨骼的发育;参与肾上腺激素及肉毒碱的合成,活化多种肽类激素;促进机体对铁的吸收等,是体内良好的自由基清除剂^[23]。

矿物质的化学形式对生物利用度有重大影响。例如,硫酸亚铁作为铁的来源广泛用于婴儿奶粉中,主要就是因为其较高的铁生物利用度。铁强化的配方奶粉由于能显著降低婴幼儿缺铁性贫血的症状,在过去几十年间大幅增长^[27]。此外,为了确保骨钙的高保留率,钙/磷比率必须维持在 1:1~2:1 之间^[59]。氟化物不是必须的,但对牙齿和骨骼的发育有益,其添加量不应超过 1 mg/d。

1.3.5 特殊生物活性成分

由于牛乳蛋白分离技术的发展,一些功能性蛋白质也被添加到婴幼儿配方奶粉,如 α -乳白蛋白和乳铁蛋白。 α -乳白蛋白富含色氨酸和半胱氨酸,由于母乳中 α -乳白蛋白和乳铁蛋白的浓度要高于牛乳,增加婴儿奶粉中 α -乳白蛋白浓度需要减少蛋白质总量以满足婴儿的所有必需氨基酸和蛋白质需求。因此 α -乳白蛋白强化配方粉可以降低婴儿奶粉中总蛋白质含量,减轻婴儿肾脏负担^[60]。与母乳或低蛋白质配方相比,高蛋白质配方被认为是导致晚年体重更高的因素之一^[61]。研究结果表明,与喂养标准配方奶粉的婴儿相比喂养 α -乳白蛋白强化配方粉的婴儿,与母乳喂养的婴儿的胃肠道耐受性更为相似,便秘或返流问题的发生率也随之降

低^[62]。

乳铁蛋白是母乳中另一丰富的功能性乳清蛋白,广泛应用于婴幼儿配方奶粉中。乳铁蛋白具有特定抗感染的活性,教育部功能乳品实验室的多项研究也从体内外验证了乳铁蛋白具有促进成骨细胞分化的功能^[63-64]。乳铁蛋白的添加可以抑制迟发型败血症早产婴儿的受感染程度^[65],可以促进肠道乳酸菌如双歧杆菌、乳酸杆菌的增殖,进而保护宿主免受有害微生物的侵染^[65]。喂养普通配方奶粉的婴幼儿肠道铁吸收的程度比母乳喂养的要差^[66],当乳铁蛋白加入普通婴儿配方奶粉后,6 个月大的婴儿的体重显著增加、呼吸道感染病的患病降低、血液指标有所改善,但其是否可以加强铁的吸收仍未被阐明^[67]。

除了完整蛋白质外,近年来向婴幼儿配方奶粉中添加特定的功能性多肽和氨基酸也成为研究热点。生物活性多肽类物质是由母乳和牛乳中蛋白水解得到的(编码多肽类),这些多肽对于婴儿营养十分有利,是优化婴幼儿配方奶粉的发展方向。不同的生物活性多肽可提供不同的生理学作用,例如抗高血压作用、抗血栓形成作用、降胆固醇作用、免疫调节作用、细胞毒素的作用、抗氧化作用、抗菌作用、抗原作用,但它们的功能鉴定和其与特殊生物功能的关系仍在研究中^[68-70]。

此外,大部分的婴幼儿配方奶粉还添加了硫氨基酸代谢的终产物牛磺酸^[71]。尽管低牛磺酸浓度的生理学后果尚未明确,长期使用不含牛磺酸的肠外营养治疗方案已被证实与视网膜异常有关^[72]。母乳中还检出了腐胺、亚精胺和精胺等多胺物质。目前的动物模型实验表明这些物质可能在婴儿的健康中扮演重要的角色,但其加入剂量和各种多胺之

间的加入比例需要进一步确定^[73]。

有些国家也将核苷酸添加到婴儿奶粉中^[74],核苷酸能加强对免疫的反应并降低腹泻的发生。虽然足月婴儿的临床实验显示这样的补充对婴儿增长没有明显益处^[75],但对于低出生体重婴儿,关于补充核苷酸后的体重、身高、头围的改进已有报道^[76]。此外,也有婴儿配方奶粉通过强化益生菌增加婴儿肠道的双歧杆菌含量,来模拟母乳中由某些物质引起的益生元效应^[1]。婴幼儿奶粉中也常添加肉毒碱等微量营养素^[1]。

近来有研究将我国特有的牦牛乳与普通牛乳、羊乳和母乳的各营养素含量测定比较,发现牦牛乳的蛋白质、脂肪、乳糖、矿物质和维生素含量均高于普通牛羊乳,必需氨基酸、必需脂肪酸、乳糖及矿物质含量更接近母乳^[77-79]。另外,牦牛乳含有的 DHA 脂肪酸,是普通牛羊乳所不具有的。在安全性上,牦牛乳特有的蛋白质比普通牛乳蛋白质更不易引起过敏且容易消化吸收,所含共轭亚油酸的安全性评价实验与人群研究表明其无任何毒副作用。因此,牦牛乳以其特有的营养性和安全性,可望为我国婴儿配方奶粉领域增加新品种^[80]。

2 加工技术研究

工业化生产婴幼儿配方奶粉主要分为干法、湿法和干湿法复合工艺 3 种工艺。如何保证奶粉在储藏过程中的稳定性,改善奶粉颗粒的溶解性是加工方面的研究重点。

2.1 奶粉加工工艺

干法与湿法生产的比较如表 4 所示^[81],干法与湿法生产的流程图如图 1 所示。

表 4 干法与湿法生产的比较

Tab.4 Comparison of dry process and wet process		
项目	干法	湿法
成本和生产周期	设备投资少,生产周期短,节省能耗,降低成本	生产周期长,能耗大,成本高
营养价值	减少热敏性维生素、不饱和脂肪酸的损失,营养价值较高	热敏性维生素、不饱和脂肪酸易在加工中损失,营养价值较低
理化指标	产品理化指标容易控制	产品理化指标较难控制
生产工艺	生产工艺简单,生产原料可以委托加工,适合奶源较少或奶源质量存在问题的地区	生产工艺复杂,只有部分生产原料可以委托加工

湿法是将粉状婴幼儿配方食品的配料成分在液体状态下进行处理与混合的生产工艺,该工艺通常包括配料、热处理、浓缩、干燥等工序^[82]。液体基料混合并经过巴氏杀菌、均质和蒸发后,得到浓缩的乳液,再通过喷雾干燥脱水生产出粉末状婴幼儿配方奶粉。湿混过程能使营养成分均匀地分布在产品

中,巴氏杀菌能确保任何在原料中存在或在湿混合中感染的致病菌被消灭,良好控制喷雾干燥过程能保证其良好的粉末溶解度。但是,湿法工艺需要更大的投资和更高的能源消耗,因而生产成本更高^[83]。此外,均质工艺所需的高压会产生较大的剪切力,快速破坏包裹在油脂外层的膜状结构,增加油

脂与氧气以及其他微量活性成分的接触而导致奶粉成分变化。

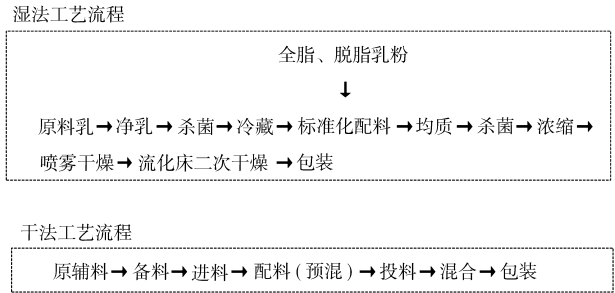


图 1 婴儿配方奶粉的湿法和干法工艺

Fig. 1 Wet process and dry process of powdered infant formula

干法加工工艺是以特殊的混合机械将各种原料干法混合,同时添加营养强化剂。干法的特点:一是去掉了将乳清粉重溶再喷雾干燥的过程,节省了能耗,降低了成本,同时也使生产速度加快;二是避免了对营养强化剂的加热,防止了对热敏感性维生素(如维生素 B、维生素 C、叶酸、泛酸等)的破坏,从而保证了产品的全价营养效能。此外,由于原料中的高脂乳粉可以委托加工,因此,干法的奶粉生产尤其适合于奶源较少的南方地区^[84]。然而,由于混合物中没有经过热处理灭菌,在进一步处理步骤后可能发生污染^[85]。因此,干法生产中对原料微生物的控制至关重要。此外,由于不同的成分有不同的密度,在长期储存和运输中可能导致奶粉成分不均匀^[1]。

中高端婴幼儿配方奶粉一般都添加了具有功能性的生物活性物质,这些生物活性物质多数具有热敏性或使用局限性,不适合湿法添加,如 DHA 和 ARA 直接接触空气和水分极易氧化变质,工业上使用的 DHA 和 ARA 粉剂都经过微胶囊化包埋处理,如果湿法添加势必造成包埋层被破坏而引起 DHA 和 ARA 损失^[86-87]。免疫球蛋白经湿法杀菌后其活性损失大半。鉴于上述原因,中高端婴幼儿配方奶粉的生产多数采用湿法和干法相结合的工艺,即先生产含有基本成分的基料粉,然后将热敏性的微量成分与基料粉混合均匀,最后包装、出厂。也有个别加工企业采用单纯的干法工艺生产中高端婴幼儿配方奶粉,但此法对各种原辅料的颗粒度和比重有较高的要求,而且产品在运输和搬运过程中易造成颗粒分级,致使产品中营养成分的含量不均匀,所以此法使用较少。从生产成本方面考虑,单纯的干法生产适于无奶源的、依赖进口全脂奶粉为原料生产婴幼儿配方奶粉的企业^[88]。

2.2 加工工艺对奶粉特性的影响

2.2.1 配方奶粉的稳定性

在储藏过程奶粉中的基料易发生自身变化及相

互作用,其中乳糖结晶、美拉德反应或非酶褐变、氧化及微量元素间的相互作用是影响奶粉稳定性最关键的因素,但关于婴幼儿配方奶粉在储藏过程中基料变化的研究报道很少。

乳糖结晶会增加游离油脂的含量,改变风味,并促进非酶褐变的发生,使得奶粉颗粒结块;Erdogdu 等研究脱脂乳和小麦粉在干燥状态下各组分间的相互关系,发现乳糖能与淀粉和谷蛋白作用,改变其凝胶温度^[89]。

美拉德反应或非酶褐变反应与奶粉的储藏温度有关,美拉德反应会影响蛋白和某些氨基酸的生物活性,降低赖氨酸的生物利用性,改变奶粉色泽等。

避免脂肪氧化最常用的方式是充氮或充二氧化碳包装^[90]。奶粉在常温下储藏 6 个月后氧化速率显著增加,但真空包装或充氮包装后奶粉氧化速率显著降低,至少可保存 12 个月以上^[91-92]。目前国产配方奶粉添加脂质主要以湿法生产为主,但湿法生产配方奶粉生产过程复杂,许多微量营养成分(如维生素、微量元素、双歧因子等)仅以搅拌混合,可能造成分布不均匀,储藏性降低。近来研究学者发现干法添加脂质的婴幼儿配方奶粉仿母乳奶油粉流动性好、颗粒及色泽与奶粉相配均匀,添加后可使配方奶粉流动性增加,便于包装储藏^[93-94]。

微量元素方面,维生素和矿物质的添加方式对奶粉稳定性的影响是研究热点。研究显示,维生素的添加方式对奶粉脂肪氧化稳定性的影响不大,维生素干法添加的脂肪氧化稳定性稍高于维生素湿法添加^[92]。其次,干法工艺生产的奶粉中维生素的保存率优于湿法工艺;在加速储存过程中,干法工艺样品中维生素 A 和 E 的稳定性优于湿法工艺样品,维生素 B2 的稳定性均较好,维生素 C 的稳定性均不佳^[95-96]。而矿物质干法添加奶粉的脂肪氧化稳定性远低于矿物质湿法添加,因此在实际的婴幼儿配方奶粉生产过程中,矿物质应该采用湿法添加的方法^[94]。

总的说来,干法湿法复合的工艺更有助于奶粉在储藏期营养物质的保存^[97]。储藏时的相对湿度、储藏温度和氧气含量是控制储藏过程中奶粉物理性质的最重要因素。

2.2.2 配方奶粉的溶解性和流动性

奶粉溶解性和流动性是奶粉品质最重要的评价指标,奶粉溶解性的高低决定了营养物质被婴儿吸收的程度。影响奶粉溶解性和流动性的因素主要包括奶粉基料组成、颗粒表面性质、奶粉的颗粒形状与分布、奶粉中的水分含量、奶粉体积密度、压缩性和多孔性等^[98]。

乳糖是乳中的主要成分,当配方奶粉中乳糖质

量分数超过 40% 时,在喷雾干燥过程就会极大地影响终产品的溶解性^[99]。高湿度、高压缩压力和较低的颗粒粒径会显著降低奶粉的流动性,使奶粉颗粒团聚发粘^[100]。

研究学者采用微胶囊技术添加脂质,使液体油脂被乳糖或脱盐乳清粉、糊精、酪蛋白等壁材包埋,赋予了产品良好流动、乳化和溶解性,也使得配方奶粉易于吸收,改善了产品的口感和风味。此外在喷雾干燥过程中喷涂卵磷脂可以改善奶粉的冲调性、进排风速度、进排风量和干燥系统阻力,从而改善奶粉颗粒结构的状态^[101]。

3 婴幼儿配方奶粉产品的质量控制

婴幼儿配方奶粉作为食品大类中一种特殊膳食食品,存在生物性危害、化学性危害和物理性危害三大危害,还有食品包装污染危害和食品过敏风险。

配方奶粉中的微生物危害主要是沙门氏菌和阪崎肠杆菌。阪崎肠杆菌和沙门氏菌可以通过生产过程、包装开启后以及奶粉冲调等途径进入配方奶粉造成污染。阪崎肠杆菌可能引起罕见的贫血病和脑膜炎的发生,对 2 个月以下的婴儿尤其危险^[102]。而在婴幼儿配方奶粉中的化学危害主要来

源于黄曲霉毒素、兽药残留、滥用食品添加剂、食品包装材料污染的危害。此外,婴幼儿及儿童的发病率高于成人,常见出现在婴儿身上的食物过敏疾病有肠胃病、肠绞痛症、小肠结肠炎症等。婴幼儿配方奶粉生产商从产品设计、原料存储运输、生产过程到产品标识等过程均需要进行过敏原控制,包括在符合奶粉标准和规范要求的前提下避免引入含过敏原的原料、专用生产设备和生产线来隔离过敏原、产品标签上标识所有添加物来使消费者识别是否含有致敏性物质。

4 结束语

婴幼儿配方奶粉营养基础研究受到广泛关注,新的生物活性物质的细微调整都是为了尽可能模拟母乳的成分,以期实现母乳喂养的婴幼儿的同等益处。奶粉干法生产和湿法生产工艺各有利弊,中高端婴幼儿配方奶粉生产多数采用湿法和干法相结合的工艺;储藏时的相对湿度、储藏温度和氧气含量是控制储藏过程中奶粉物理性质的最重要因素。加强母乳营养基础研究,提高产品差异化,开发适合我国婴幼儿食用、与母乳最为接近的婴幼儿奶粉是未来我国婴幼儿奶粉发展的关键。

参 考 文 献

1 Montagne D, van Dael P, Skanderby M, et al. Infant formulae-powders and liquids[M] // Tamime A Y. Dairy powders and concentrated products. Hoboken, NJ: 2009: 294.

2 Blanchard E, Zhu P, Schuck P, et al. Infant formula powders[M] // Bhandari B, Bansal N, Zhang M, et al. Handbook of food powders: processes and properties. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing,2013: 465 – 483.

3 周辉燕. 我国婴幼儿配方奶粉产业发展对策思考——基于“钻石理论”的视角[J]. 现代商贸工业, 2013, 25(15): 9 – 11.

4 何平, 汪志明. 婴幼儿配方奶粉的发展趋势和最新动态[J]. 中国供销商情: 乳业导刊, 2005(8): 25 – 27.

5 和静钧. 乳业兼并做大勿蹈恒天然覆辙[J]. 农产品市场周刊, 2013(39): 1.

6 张连潮, 王雪飞, 张永久. GMP 在奶粉加工过程中贯彻实施的必要性[J]. 养殖技术顾问, 2014(6): 264 – 265.

7 许崇辉, 潘芳, 易蓉, 等. 国产和进口奶源婴儿配方奶营养效应的比较[J]. 食品科学, 2014, 35(9): 269 – 273.

Xu C H, Pan F, Yi R, et al. Infant formula milk powders nutrient effect comparison between domestic milk source and imported milk source[J]. Food Science, 2014, 35(9): 269 – 273. (in Chinese)

8 Barker D J, Osmond C, Winter P, et al. Weight in infancy and death from ischaemic heart disease[J]. The Lancet, 1989, 334(8663): 577 – 580.

9 Eriksson J G, Forsen T, Tuomilehto J, et al. Early growth and coronary heart disease in later life: longitudinal study[J]. BMJ, 2001, 322(7292): 949 – 953.

10 Toschke A M, Grote V, Koletzko B, et al. Identifying children at high risk for overweight at school entry by weight gain during the first 2 years[J]. Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine, 2004, 158(5): 449 – 452.

11 Bernier J J. Les aliments dans le tube digestif[M]. Paris: Doin Paris, 1988.

12 刘建. 石家庄市乳母的乳成分动态变化与婴儿生长发育的影响因素研究[D]. 石家庄:河北医科大学, 2013.

13 钱继红, 吴圣楣. 上海地区母乳成分调查[J]. 上海医学, 2002, 25(7): 396 – 398.

Qian J H, Wu S M. An investigation of nutrients of human milk in Shanghai area[J]. Shanghai Medicine Journal, 2002, 25(7): 396 – 398. (in Chinese)

14 Lönnerdal B, Forsum E, Hambræus L. A longitudinal study of the protein, nitrogen, and lactose contents of human milk from Swedish well-nourished mothers[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1976, 29(10): 1127 – 1133.

15 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.

16 Shi Y D, Sun G Q, Zhang Z G, et al. The chemical composition of human milk from Inner Mongolia of China[J]. Food

- Chemistry, 2011, 127(3): 1193–1198.
- 17 Koletzko B, Ashwell M, Beck B, et al. Characterisation of infant food modifications in the European Union[J]. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 2002, 46(6): 231–242.
- 18 Maldonado J, Gil A, Narbona E, et al. Special formulas in infant nutrition: a review[J]. *Early Human Development*, 1998, 53(Supp. 1): S23–S32.
- 19 Massol M, La nutriterapia. Gli alimenti e il nutrimento medicamentoso[M]. Roma: Armando Editore, 2001.
- 20 Gurr M I. Review of the progress of dairy science—human and artificial milks for infant-feeding[J]. *Journal of Dairy Research*, 1981, 48(3): 519–554.
- 21 He S, Ma Y, Wang J, et al. Milk fat chemical composition of yak breeds in China[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2011, 24(2): 223–230.
- 22 吕玉泉, 王鹏, 肖敏, 等. 人乳低聚糖的生物学功能[J]. *食品科学*, 2002(9): 144–147.
- 23 Koletzko B, Baker S, Cleghorn G, et al. Global standard for the composition of infant formula: recommendations of an ESPGHAN coordinated international expert group[J]. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 2005, 41(5): 584–599.
- 24 GB 10765—2010 食品安全国家标准 婴儿配方食品[S]. 2010.
- 25 Arango O, Trujillo A, Castillo M. Influence of fat replacement by inulin on rheological properties, kinetics of rennet milk coagulation, and syneresis of milk gels[J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(4): 1984–1996.
- 26 Benson J, Masor M. Infant formula development: past, present and future[J]. *Endocrine Regulations*, 1994, 28(1): 9–16.
- 27 Fomon S J. Nutrition of normal infants[M]. St. Louis, MO: Mosby-Year Book, Inc., 1993.
- 28 Isolauri E, Sütas Y, Mäkinen-Kiljunen S, et al. Efficacy and safety of hydrolyzed cow milk and amino acid-derived formulas in infants with cow milk allergy[J]. *The Journal of Pediatrics*, 1995, 127(4): 550–557.
- 29 陈辉. 应用酶法水解牛乳蛋白研制婴儿配方乳[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2003.
- 30 赵红霞. 水解蛋白婴儿配方奶粉的研究[J]. *乳业科学与技术*, 2011, 34(3): 112–113, 117.
- 31 Mueller A J, Cox W M, Barton R W, et al. Comparative nutritive value of casein and lactalbumin for man one figure[J]. *The Journal of Nutrition*, 1947, 34(3): 285–294.
- 32 Bhatia J, Greer F. Use of soy protein-based formulas in infant feeding[J]. *Pediatrics*, 2008, 121(5): 1062–1068.
- 33 Alles M S, Scholtens P A, Bindels J G. Current trends in the composition of infant milk formulas[J]. *Current Paediatrics*, 2004, 14(1): 51–63.
- 34 Union E. COMMISSION DIRECTIVE 2013/46/EU of 28 August 2013 amending Directive 2006/141/EC with regard to protein requirements for infant formulae and follow on formulae[J]. *Official Journal of the European Union L*, 2013, 230.
- 35 Agostoni C. Role of long-chain polyunsaturated fatty acids in the first year of life[J]. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 2008, 47: S41–S44.
- 36 Morrow A L. What's new in infant formulas? [J]. *Journal of Pediatric Health Care*, 2003, 17(5): 271–272.
- 37 Hoffman D R, Birch E E, Birch D G, et al. Impact of early dietary intake and blood lipid composition of long-chain polyunsaturated fatty acids on later visual development[J]. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 2000, 31(5): 540–553.
- 38 Neumann M A, Simmer K, Gibson R A. A critical appraisal of the role of dietary long-chain polyunsaturated fatty acids on neural indices of term infants: a randomized, controlled trial[J]. *Pediatrics*, 2000, 105(1): 32–38.
- 39 Willatts P, Forsyth J, Dimodugno M, 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(9129): 688–691.
- 40 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.
- 41 Innis S M, Dyer R. Dietary triacylglycerols with palmitic acid (16:0) in the 2-position increase 16:0 in the 2-position of plasma and chylomicron triacylglycerols, but reduce phospholipid arachidonic and docosahexaenoic acids, and alter cholesteryl ester metabolism in formula-fed piglets[J]. *The Journal of Nutrition*, 1997, 127(7): 1311–1319.
- 42 Koo W W, Hockman E M, Dow M. Palm olein in the fat blend of infant formulas: effect on the intestinal absorption of calcium and fat, and bone mineralization[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 2006, 25(2): 117–122.
- 43 Nelson C M, Innis S M. Plasma lipoprotein fatty acids are altered by the positional distribution of fatty acids in infant formula triacylglycerols and human milk[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1999, 70(1): 62–69.
- 44 Yu Z, Han S, Zhu C, et al. Effects of infant formula containing palm oil on the nutrient absorption and defecation in infants: a meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Pediatrics*, 2009, 47(12): 904–910.
- 45 Gurnida D A, Rowan A M, Idjradinata P, et al. Association of complex lipids containing gangliosides with cognitive development of 6-month-old infants[J]. *Early Human Development*, 2012, 88(8): 595–601.
- 46 Mcjarrow P, Schnell N, Jumpsen J, et al. Influence of dietary gangliosides on neonatal brain development[J]. *Nutrition Reviews*, 2009, 67(8): 451–463.
- 47 Corl B A, Oliver S A M, Lin X, et al. Conjugated linoleic acid reduces body fat accretion and lipogenic gene expression in neonatal pigs fed low-or high-fat formulas[J]. *The Journal of Nutrition*, 2008, 138(3): 449–454.

- 48 Lin X, Bo J, Oliver S A M, et al. Dietary conjugated linoleic acid alters long chain polyunsaturated fatty acid metabolism in brain and liver of neonatal pigs[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2011, 22(11): 1047 – 1054.
- 49 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]. Calcified Tissue International, 2013, 92(1): 35 – 41.
- 50 Schaafsma G. Nutritional significance of lactose and lactose derivatives[M] // Roginski H, Fuquai J W, Fox P F. Encyclopedia of dairy sciences. New York: Academic Press, 2003: 1529 – 1533.
- 51 Szilagyi A. Redefining lactose as a conditional prebiotic[J]. Canadian Journal of Gastroenterology, 2004, 18(3): 163 – 167.
- 52 Bindels J G. Artificial feeds for infants—human milk substitutes: current composition and future trends[J]. Current Paediatrics, 1992, 2(3): 163 – 167.
- 53 Schaafsma G. Lactose and lactose derivatives as bioactive ingredients in human nutrition[J]. International Dairy Journal, 2008, 18(5): 458 – 465.
- 54 Engfer M B, Stahl B, Finke B, et al. Human milk oligosaccharides are resistant to enzymatic hydrolysis in the upper gastrointestinal tract[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2000, 71(6): 1589 – 1596.
- 55 Rao S, Srinivasjois R, Patole S. Prebiotic supplementation in full-term neonates: a systematic review of randomized controlled trials[J]. Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine, 2009, 163(8): 755 – 764.
- 56 Newburg D S. Do the binding properties of oligosaccharides in milk protect human infants from gastrointestinal bacteria? [J]. The Journal of Nutrition, 1997, 127(5): 980S – 984S.
- 57 Crittenden R, Playne M J. Production, properties and applications of food-grade oligosaccharides[J]. Trends in Food Science & Technology, 1996, 7(11): 353 – 361.
- 58 Blanchard E, Zhu P, Schuck P, et al. Infant formula powders[M] // Handbook of food powders: process and properties. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013: 474.
- 59 CODEX STAN 72 – 1981. Standards for infant formulas and formulas for special medical purposes intended for infants (revised 2007)[S]. 2007.
- 60 Lien E L, Davis A M, Euler A R, et al. Growth and safety in term infants fed reduced-protein formula with added bovine alpha-lactalbumin[J]. Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition, 2004, 38(2): 170 – 176.
- 61 Koletzko B, Von Kries R, Monasterolo R C, et al. Infant feeding and later obesity risk[M] // Berthold Koletzko, Tomas Decsi, Denes Molnar, et al. Early nutrition programming and health outcomes in later life. New York: Springer, 2009: 15 – 29.
- 62 Davis A, Harris B, Lien E, et al. α -Lactalbumin-rich infant formula fed to healthy term infants in a multicenter study: plasma essential amino acids and gastrointestinal tolerance[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2007, 62(11): 1294 – 1301.
- 63 Guo H Y, Jiang L, Ibrahim S A, et al. Orally administered lactoferrin preserves bone mass and microarchitecture in ovariectomized rats[J]. The Journal of Nutrition, 2009, 139(5): 958 – 964.
- 64 Wang X, Guo H, Zhang W, et al. Effect of iron saturation level of lactoferrin on osteogenic activity in vitro and in vivo[J]. Journal of Dairy Science, 2013, 96(1): 33 – 39.
- 65 Manzoni P, Rinaldi M, Cattani S, et al. Bovine lactoferrin supplementation for prevention of late-onset sepsis in very low-birth-weight neonates: a randomized trial[J]. JAMA, 2009, 302(13): 1421 – 1428.
- 66 Siimes M A, Salmenperä L, Perheentupa J. Exclusive breast-feeding for 9 months: risk of iron deficiency[J]. The Journal of Pediatrics, 1984, 104(2): 196 – 199.
- 67 King Jr J C, Cummings G E, Guo N, et al. A double-blind, placebo-controlled, pilot study of bovine lactoferrin supplementation in bottle-fed infants[J]. Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition, 2007, 44(2): 245 – 251.
- 68 吕建敏, 储小军, 何光华, 等. 乳清小肽及添加乳清小肽婴儿配方奶粉免疫功能评价[J]. 中国食品学报, 2012, 12(11): 136 – 141.
- Lü J M, Chu X J, He G H, et al. Immunomodulatory effects of small whey peptide and its infant formula milk powder[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(11): 136 – 141. (in Chinese)
- 69 程莹, 梁彩艳. 深度水解配方奶粉治疗婴儿湿疹的临床研究[J]. 吉林医学, 2011, 32(11): 2121 – 2122.
- 70 洪滨. 仿早产儿母乳配方奶粉的研究及其消化率的评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.
- 71 Järvenpää A-L, Räihä N C, Rassin D K, et al. Feeding the low-birth-weight infant: I. taurine and cholesterol supplementation of formula does not affect growth and metabolism[J]. Pediatrics, 1983, 71(2): 171 – 178.
- 72 Sturman J A, Wen G Y, Wisniewski H M, et al. Retinal degeneration in primates raised on a synthetic human infant formula[J]. International Journal of Developmental Neuroscience, 1984, 2(2): 121 – 129.
- 73 Ruiz-Cano D, Pérez-Llamas F, Zamora S. Polyamines, implications for infant health[J]. Archivos Argentinos de Pediatría, 2011, 110(3): 244 – 250.
- 74 Cosgrove M. Nucleotides[J]. Nutrition, 1998, 14(10): 748 – 751.
- 75 Uauy R. Dietary nucleotides and requirements in early life[M] // Lebethal E. Textbook of gastroenterology and nutrition in infancy. New York: Raven Press, Ltda, 1989: 265 – 280.
- 76 Cosgrove M, Davies D, Jenkins H. Nucleotide supplementation and the growth of term small for gestational age infants[J]. Archives of Disease in Childhood-Fetal and Neonatal Edition, 1996, 74(2): F122 – F125.

77 Nikkhah A. Equidae, camel, and yak milks as functional foods: a review[J]. Journal of Nutrition & Food Sciences, 2011(5): 1-7.

78 杨月欣,王光亚,潘兴昌. 中国食物成分表 2002[M]. 北京:北京医科大学出版社, 2002.

79 樊宝良,赵志辉,李宁,等. 牦牛 α -乳清蛋白基因的克隆与序列分析[J]. 动物学报, 2001, 47(6): 691-698.
Fan B L, Zhao Z H, Li N, et al. Cloning and sequence analysis of yak (*Poephagens grunnieus*) α -lactalbumin gene[J]. Acta Zoologica Sinica, 2001, 47(6): 691-698. (in Chinese)

80 周让,王秀英,吕晓华. 牦牛乳作为婴儿配方奶粉奶源的营养性与安全性[J]. 中国奶牛, 2014(10): 43-46.

81 韩露露. 婴儿配方奶粉用微胶囊化营养油的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2009.

82 GB 23790—2010 粉状婴幼儿配方食品良好生产规范

83 Schuck P. Spray drying of dairy products: state of the art[J]. Le Lait, 2002, 82(4): 375-382.

84 陈辉,霍贵成. 干法生产婴儿配方乳粉[J]. 中国乳品工业, 2002, 30(5): 103-105.
Chen H, Huo G C. Production of infant formula with the method of dry mixing[J]. China Dairy Industry, 2002, 30(5): 103-105. (in Chinese)

85 Cordier J-L, Farber J, Forsythe S. Production of powdered infant formulae and microbiological control measures[J]. Enterobacter Sakazakii, 2008: 145-185.

86 赵红霞,高昕. DHA、AA 在婴儿配方奶粉中稳定性的研究[J]. 乳业科学与技术, 2011, 34(1): 18-20.
Zhao H X, Gao X. Study on the stability research of DHA, AA in infant milk powder[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2011, 34(1): 18-20. (in Chinese)

87 胡博韬,韩建春. 干法生产工艺对婴幼儿配方奶粉中花生四烯酸的影响[J]. 中国乳品工业, 2012, 40(10): 30-32.
Hu B T, Han J C. Dry process for the production of arachidonic acid in infant formula milk powder[J]. China Dairy Industry, 2012, 40(10): 30-32. (in Chinese)

88 王利,马景友,杨晓波. 我国中高端婴幼儿配方奶粉加工技术的现状和发展趋势[J]. 中国乳业, 2008(8): 34-36.

89 Erdogdu N, Czuchajowska Z, Pomeranz Y. Wheat flour and defatted milk fractions characterized by differential scanning calorimetry. II. DSC of interaction products[J]. Cereal Chemistry, 1995, 72(1): 76-79.

90 van Mil P J J M, Jans J. Storage stability of whole milk powder: effects of process and storage conditions on product properties [J]. Nederlands melk en Zuiveltijdschrift, 1991, 45(3): 145-167.

91 Anon M. Dairy handbook[M]. Lund; Alfa-Laval, 1989: 218-242.

92 Keiseker F, Aitken B. Recombined full-cream milk powder[J]. Australian Journal of Dairy Technology (Australia), 1993, 48(1):33-37.

93 熊华,汤惠民,熊小青,等. 仿母乳奶油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.
Xiong H, Tang H M, Xiong X Q, et al. Nutritional and functional properties of cream powder of imitation mother's dairy[J]. China Dairy Industry, 2004, 32(8): 15-18. (in Chinese)

94 黄兴旺. 婴幼儿配方奶粉加工与贮藏过程中脂肪的氧化稳定性研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2011.

95 杨月,毛兆祥,张连龙,等. 不同工艺对全营养粉剂中维生素稳定性的影响[J]. 食品与营养科学, 2013(2): 38-42.
Yang Y, Mao Z X, Zhang L L, et al. Influence of different processes on the stability of vitamins in full nutrition powder[J]. Hans Journal of Food and Nutrition Science, 2013(2): 38-42. (in Chinese)

96 刘奕博. 婴幼儿配方奶粉中维生素 C 稳定性研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2013.

97 胡君荣,冯玉红,薛玉清,等. 乳基婴幼儿配方食品货架期中营养素变化[J]. 乳业科学与技术, 2013, 36(6): 27-29.
Hu J R, Feng Y H, Xue Y Q, et al. Changes in nutrient contents in milk-based food products for infants and young children during shelf-life storage[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2013, 36(6): 27-29. (in Chinese)

98 Peleg M. Flow ability of food powders and methods for its evaluation—a review[J]. Journal of Food Process Engineering, 1977, 1(4): 303-328.

99 Hujoel P P, Zina L G, Moimaz S A, et al. Infant formula and enamel fluorosis: a systematic review[J]. Journal of the American Dental Association, 2009, 140(7): 841-854.

100 Peleg M, Mannheim C, Passy N. Flow properties of some food powders[J]. Journal of Food Science, 1973, 38(6): 959-964.

101 林弘通,郁蕴华. 喷雾干燥条件对脱脂奶粉颗粒大小及其分布的影响[J]. 中国乳品工业, 1990(2): 77-83.

102 Agostoni C, Axelsson I, Goulet O, et al. Preparation and handling of powdered infant formula: a commentary by the ESPGHAN Committee on Nutrition[J]. Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition, 2004, 39(4): 320-322.