# 母乳化活性蛋白在婴幼儿配方奶粉中的应用进展

粘靖祺，赵　臻*，孙　健，王　利*，杨晓波

北大荒完达山乳业股份有限公司，黑龙江哈尔滨　150078

摘　要：作为生命物质的基础，蛋白质在婴幼儿的生长发育中发挥着关键作用。母乳中含有的蛋白质具备多种生物学功能，然而当前婴幼儿配方奶粉在蛋白质组成方面与母乳仍存在明显的差异。本文对近年来的研究热点，如A2型β-酪蛋白、乳白蛋白、骨桥蛋白等对婴幼儿健康的影响，以及其在婴幼儿配方奶粉中的应用进展和未来发展趋势进行了详细的综述，旨在阐述深度母乳化活性蛋白组成和含量的婴幼儿配方奶粉设计开发的必要性和方法。

关键词：婴幼儿配方奶粉；母乳化；活性蛋白质

文章编号：1671-4393（2025）01-0092-07　　DOI:10.12377/1671-4393.25.01.15

中国乳业线上阅读

## 0 序言

母乳以其全面均衡的营养成分，被公认为新生儿最佳的营养来源。此外，母乳中含有的微量活性成分，具有抵抗感染性疾病的功能，能有效降低婴儿过敏性疾病的发生。然而，对于母乳供应不足或无法提供母乳的情况，婴幼儿配方奶粉则成为母乳的优质替代品。这种产品在牛乳的基础上，通过科学调整营养元素的种类和比例，力求接近母乳的成分，以满足婴幼儿的日常营养需求和消化吸收能力。

蛋白质是生命的物质基础，作为其他微量营养素的吸收和转运载体，蛋白质在营养素的吸收和利用中发挥着关键作用。对于婴幼儿而言，充足的蛋白质摄入不仅支持其生长发育，还对免疫系统的健康至关重要[1]。母乳中的蛋白质，尤其是乳蛋白，因其独特的组成和生物活性，成为研究的重点。母

基金项目：“国家重点研发计划资助”专项“基于中国母乳研究的新一代婴配粉创制及产业化示范”（2022YFD2101505）

作者简介：粘靖祺（1987-），女，吉林敦化人，硕士，高级工程师，研究方向为乳制品及婴幼儿食品；
孙　健（1983-），男，吉林扶余人，硕士，正高级工程师，研究方向为乳制品及婴幼儿食品；
杨晓波（1976-），女，黑龙江牡丹江人，硕士，正高级工程师，研究方向为乳制品及保健食品研究。

*通信作者：赵　臻（1986-），女，黑龙江哈尔滨人，硕士，高级工程师，研究方向为标准法规及乳制品开发；
王　利（1968-），男，黑龙江哈尔滨人，博士，正高级工程师，研究方向为乳制品、婴幼儿食品及保健食品。

乳中的蛋白质主要由乳清蛋白和酪蛋白组成，其中乳清蛋白富含免疫活性成分，能够增强婴儿的免疫力，而酪蛋白则提供持久的营养支持。尽管目前大多数婴儿配方奶粉已遵循《GB 10765—2021 食品安全国家标准婴儿配方食品》的要求，确保乳清蛋白与酪蛋白的比例大于60:40，或在某些蛋白质组成上接近母乳，但与母乳蛋白质的组成仍存在显著差距。

在婴儿配方食品领域，母乳化的研究仍有许多空白。为了更好地满足婴幼儿的营养需求，设计和开发具有母乳化蛋白成分的婴幼儿配方奶粉显得尤为重要。通过参照中国母乳的蛋白质组成和含量研究数据，可以更精准地调整配方奶粉的蛋白质组成，使其更接近母乳的特性。这种调整不仅有助于提高婴幼儿的营养吸收率，还有助于增强其免疫系统，降低过敏反应的风险。

综上所述，蛋白质在婴幼儿的生长发育中发挥着不可或缺的作用。通过深入研究母乳中蛋白质的组成与功能，并在婴幼儿配方食品中实现更深层的母乳化，可以为婴幼儿提供更为全面和科学的营养支持，促进其健康成长。

## 1 母乳中的活性蛋白质

母乳中的蛋白质、肽以及游离氨基酸的种类超过千种。其主要的蛋白质包括乳清蛋白和酪蛋白，其比例从初乳时期的约80:20逐步转变至过渡乳和成熟乳的大约60:40，到最后哺乳后期稳定在50:50的比例[2]。母乳中的蛋白质主要可以分为四大类别：酪蛋白、乳清蛋白、脂肪球膜蛋白以及细胞蛋白，其中酪蛋白和乳清蛋白为主要的组成部分[3]。乳清蛋白的溶解性良好，易于在溶液中分散，酪蛋白则主要存在于酪蛋白胶束内，悬浮在溶液之中。而脂肪球膜蛋白主要存在于脂肪球膜内，占据母乳蛋白质总量的1%～4%[4]。这些蛋白质中都含有多种功能性活性物质，例如β-酪蛋白、α-乳白蛋白、骨桥蛋白、乳铁蛋白、脂肪球膜蛋白以及分解形成的功能性多肽等，它们都具有明确且多样的生理功能。

### 1.1 酪蛋白

在人乳中，酪蛋白主要由β-酪蛋白和κ-酪蛋白这两种亚型构成。这些酪蛋白亚型为婴幼儿提供了必需的肽、氨基酸以及氮元素。在成熟乳中，κ-酪蛋白的含量较为丰富，其为一种经过糖基化处理的酪蛋白亚型，已被证实能够促进双歧杆菌的增长[5]。β-酪蛋白作为酪蛋白中的主要组分，其含量大约占到总酪蛋白的70%[6]。这种蛋白质分子具备多种磷酸化形态，通过磷酸化区域与钙离子的结合作用，进而促进钙以及其他二价阳离子，如铁、锌、铜、锰等的吸收过程[7, 8]。考虑到β-酪蛋白的氨基酸组成及其结构特征，该蛋白质更加适合婴幼儿消化系统的吸收与利用[9]。

β-酪蛋白经人体消化分解后，能产生多种具备生理功能的多肽，这些功能包含了抗菌、抗氧化、免疫调节以及促进矿物质吸收等[10, 11]。并且，β-酪蛋白及其水解生成的活性多肽，也被发现能够提升新生儿的抗过敏能力，并对其睡眠状态产生影响[12]。

### 1.2 乳清蛋白

#### 1.2.1 α-乳白蛋白

人乳的乳清蛋白的组成主要包括α-乳白蛋白、乳球蛋白[包括β-乳球蛋白、免疫球蛋白、乳铁蛋白（Lactoferrin，Lf）等]、骨桥蛋白（Osteopontin，OPN），以及血清白蛋白等[13]。乳清蛋白展现出显著的水合作用，常在乳汁中以高度分散的形态存在[13]。特别是，α-乳白蛋白作为人类乳汁中含量颇为丰富的蛋白质之一，其所占乳清蛋白总量的比例约为36%，在人乳蛋白质总量中的比例达到22%[14]。α-乳白蛋白是生物活性肽及必需氨基酸的关键来源，为婴幼儿所必需，包括色氨酸、赖氨酸、支链氨基酸及含硫氨基酸等。色氨酸，作为一种神经递质的前体物质，多次与中枢神经系统功能有关，如食欲、睡眠、记忆和学习、温度调节、情绪、行为、神经元成熟和突触连接等。在母

中国乳业线上阅读

乳中，乳白蛋白作为一种重要的载体蛋白，通过与二价阳离子[如钙（$Ca^{2+}$）、锌（$Zn^{2+}$）等]形成复合物的方式，促进了矿物质离子的有效吸收[15，16]。α－乳白蛋白在婴儿的消化过程中能够分解释放出具有生物活性的肽段，这些肽段表现出包括抗菌、抗氧化、免疫调节以及促进矿物质吸收等多方面的潜在健康益处[14，17]。

1.2.2 乳铁蛋白

Lf又名乳转铁蛋白，其分子质量大约为80 kDa，属于一种能与铁离子形成络合的糖蛋白，由单一的多肽链构成，包含约700 个氨基酸残基[18，19]。Lf在人类和各种哺乳动物的乳汁中都含有相对较高的浓度，并在哺乳期间发挥着关键的生理功能，尤其是在初乳中含量最高，有效地防止了病原体对新生儿的侵害[20]。作为母乳中的重要免疫因子，Lf被视为一种天然的免疫调节剂，其独特的结构和生物学特性对婴儿早期免疫系统的建立发挥着至关重要的作用[21]。Lf通过剥夺微生物所需的铁源，发挥其广谱抗菌作用，有效抑制微生物生长[22]。此外，Lf能够促进婴儿肠道内有益菌群，例如双歧杆菌和乳酸菌的增殖，同时防护肠道免受有害菌株的侵害，优化婴儿肠道的微生物菌群组成，进而保持肠道微生物平衡[23]。通过提升铁元素的生物利用率，Lf对防治婴幼儿贫血展现出积极的效果[24，25]。此外，Lf还具备抗炎活性，能有效减轻炎症反应[26~28]。

1.2.3 骨桥蛋白（OPN）

OPN是一种特异性磷酸化糖蛋白，常见于母乳中的乳清蛋白质组成部分。该蛋白质具有多元化的生物功能，广泛参与免疫调控、炎症响应、细胞信号转导以及骨组织代谢等生物过程。

在免疫系统中，OPN发挥了至关重要的作用。它能够激发T细胞的活化和增殖，同时对树突状细胞的功能亦有调控作用[29]。多种炎症性疾病背景下，OPN的表达均表现为上调趋势，这包括自身免疫性疾病以及慢性炎症。OPN通过与各类细胞的相应受体进行相互作用，能够促进炎症反应的产生[30]。此外，OPN能够与细胞表面的整合素受体结合，进而影响细胞信号传导过程，进一步对细胞的迁移、增殖以及分化产生影响[31]。OPN在骨质吸收和矿化过程中发挥了重要的角色，并对骨密度及骨质强度产生了显著影响[32]。乳源性OPN对婴幼儿健康产生了显著影响，包括对免疫平衡、肠道健康以及神经系统发育的影响[33]。通过体外小肠模拟试验结果证明，OPN与Lf之间具有高亲和性，可以通过静电力互作发生凝聚生成复合物，这些复合物具有多种生物活性功能[34，35]。OPN的水平在多种疾病中发生变化，使其成为一种潜在的生物标志物，可用于疾病诊断和治疗反应的监测[36]。鉴于OPN在多种病理过程中的关键作用，它被视为一个潜在的治疗靶点，针对OPN的治疗策略正在逐步开发中。同时，OPN在婴幼儿免疫方面发挥着积极作用，也逐渐被应用于婴幼儿配方奶粉中。

## 1.3 脂肪球膜蛋白

脂肪球膜（Milk Fat Globule Membrane，MFGM）蛋白，作为母乳中一种复杂的生物组分，对于婴幼儿的健康成长扮演着至关重要的角色。该蛋白质复合体主要包括乳脂球膜蛋白、酪蛋白、乳清蛋白及多种酶等成分，它们与磷脂和胆固醇共同构筑了MFGM的结构框架[37]。MFGM含有丰富的磷脂类[如磷脂酰胆碱（PC）、磷脂酰乙醇胺（PE）、磷脂酰肌醇（PI）和磷脂酰丝氨酸（PS）和鞘脂（尤其是鞘磷脂SM）]，SM有助于婴幼儿神经发育[38]。众多研究揭示，MFGM成分对婴幼儿认知发展产生积极的促进作用，其潜在机制可能涉及促进神经细胞的生长与分化过程[39]。MFGM蛋白中的特定成分具备免疫调控功能，能有效提升婴幼儿的免疫反应，从而增强其对感染的防御能力[40]。MFGM蛋白贡献于肠道屏障功能的维持，促进肠道的健康状况，可能通过对肠道菌群的调控和黏膜免疫的增强实现这一效果[41，42]。MFGM蛋白中的多种蛋白，通过干扰病原体识别和附着，抑制病原体活性等方式，抑制病原体的生长，从而降低婴幼儿感染的风险[43，44]。MFGM蛋白在消化过程中能够释放具有生物活性的

中国乳业线上阅读

肽，这些肽具备抗氧化、抗菌以及免疫调控等多重生物活性[45]。

## 2 功能活性蛋白质在婴幼儿配方奶粉中的应用

随着科学家们对母乳中生物活性蛋白质组分、含量和功能的深入探究，婴幼儿配方奶粉的研发理念亦随之革新。尽管当前市场上的婴幼儿配方奶粉在蛋白质的比例上已较为接近母乳，但在蛋白质的多样性及其生物活性方面，仍与母乳存在一定的差异。为缩小此类差异，研究团队正专注于向配方奶粉中引入更多类似母乳的生物活性蛋白质成分。

通常，婴幼儿配方奶粉以牛乳作为基本成分，但牛乳中乳清蛋白与酪蛋白的比例约为20:80。为使配方奶粉中的蛋白质比例更加贴近母乳的标准，必须通过添加乳清蛋白原料或富集或改变乳原料的方式改进产品配方组分。

### 2.1 A2 型 β－酪蛋白的应用

A2型β-酪蛋白在分子结构上与母乳中的β-酪蛋白之间具有相似性，这一发现引起了其对婴幼儿潜在益处的广泛关注。刘铭等[46]研究发现，相较于A1型β-酪蛋白，A2型具有更优的消化吸收能力，即A1型β-酪蛋白在消化过程中可能生成β-酪啡肽-7（BCM-7），此物质可能易于1型糖尿病、心血管疾病、精神障碍、胃肠道不适等疾病的发生，而A2型β-酪蛋白不会产生该物质[47]。因此，A2型β-酪蛋白添加至婴幼儿配方奶粉中食用有助于降低婴幼儿体内产生的BCM-7的几率[48]。Ying等[49]通过一项随机对照试验，比较了只含A2 β-酪蛋白的牛奶与含A1和A2β-酪蛋白的牛奶在幼儿消化舒适度方面的效果，结果显示，与常规奶相比，只含A2β-酪蛋白的乳制品在改善幼儿胃肠舒适度和胃肠症状方面具有明显效果。Sheng等[50]以0~4月龄的婴儿为研究对象，这些婴儿被喂养含有酪蛋白磷酸肽（CPP）和高sn-2棕榈酸酯（sn-2占总棕榈酸酯的54%）的A2β-酪蛋白牛奶婴儿配方奶粉；研究同时进行了对未添加该配方和母乳的对照，以探究对婴儿生长、粪便稠度和骨骼强度的影响，结果显示，与对照组相较，喂养含有高sn-2棕榈酸酯和CPP的A2β-酪蛋白配方奶粉能有效支持婴儿的生长，且具有良好的耐受性。此外，该配方对粪便稠度、胃肠舒适度、哭闹持续时间和骨密度也可能产生积极影响。需要强调的是，A2型β-酪蛋白的相关研究工作仍在持续展开中，其对于婴幼儿的具体益处可能因个体间的差异性而呈现出不同，这就需要更多的临床研究来进行进一步验证。

通过科学研究的深入，已经初步认识到A2型β-酪蛋白在维护婴幼儿肠道健康、预防乳糖不耐症等方面的独特价值。因此，这种含有益影响A2型β-酪蛋白的配方奶粉，为婴幼儿的健康成长提供了一个全面而优质的营养解决方案，值得在婴幼儿的日常饮食中得到广泛的应用和推广。

自新版国家婴幼儿配方食品标准生效起，众多国内企业已逐步提升产品配方，通过利用自有牧场的奶源，进行奶牛基因的测序和鉴定，以确保婴幼儿配方奶粉中的牛乳及乳粉含有A2β-酪蛋白，并且也建立了一套监管流程，以确保这一目标的实现。通过这些努力，这些企业成功地实现了产业化应用，进而提高了配方奶粉的母乳化水平。

### 2.2 功能性乳清蛋白原料的应用

α-乳白蛋白作为一种优质婴幼儿配方食品的关键成分，其在婴幼儿配方食品中的应用越来越广泛。选择性沉淀法、色谱法、$scCO_2$分馏技术、HHP分馏技术、SMB技术、膜过滤、膜色谱等分离技术[51]具备将功能性蛋白商业化的生产条件。商业化一般通过膜过滤技术对牛奶进行分离和纯化，以获得含有高量α-乳白蛋白的乳清蛋白原料，然后有进一步通过精确的产品配方设计，实现婴幼儿配方奶粉中α-乳白蛋白含量的提升。由于这类原料的稳定性以及易溶解特性，湿法工艺成为其在婴幼儿配方奶粉中添加的优选方式。婴幼儿配方奶粉也通常

中国乳业线上阅读

以母乳喂养婴儿的生长发育为基准进行设计，α-乳白蛋白可调节睡眠觉醒节律、改善婴儿睡眠并影响神经行为发育等，也可以促进对铁和锌等微量元素的吸收[6]。因此有必要在婴幼儿配方奶粉中加入含有必需氨基酸的α-乳白蛋白作为乳清蛋白来源。

乳铁蛋白作为营养强化剂被广泛应用于婴幼儿配方食品中。其主要通过乳及乳制品为基础，经过分离、杀菌提取、精炼和干燥等工艺步骤制得[52]。通常，乳铁蛋白是以干法工艺形式添加到婴幼儿配方奶粉中，以便维持其生物活性。众多临床研究已经证实，乳铁蛋白能够预防和辅助治疗婴幼儿腹泻、新生儿坏死性小肠结肠炎、呼吸道疾病和新生儿败血症等疾病，同时对于改善婴幼儿贫血症状和促进其生长发育也有显著的效果[27]。

随着蛋白质组学研究逐渐走向成熟，以及蛋白质分离鉴定技术的不断优化与升级，可以看到OPN在婴幼儿配方奶粉中的应用得到了广泛的推广和实践。OPN作为重要的蛋白质元素，尽管在常规的牛乳中含量并不算高，但由于其显著的免疫效果，使得通过补充OPN或者对婴幼儿配方奶粉进行改进，使得这些奶粉产品在免疫力方面更接近母乳，更符合婴幼儿生长发育的实际需求。在实际的生产过程中，通常会选择采用乳清中的膜分离法来提纯OPN，这样可以获得纯度较高的乳清蛋白原料，进而保证婴幼儿配方奶粉的高品质。在此基础上，将OPN添加至婴幼儿配方奶粉中，具有可能对提升婴幼儿的整体健康状况发挥积极影响，这一点已经在多项研究中得到了验证。

MFGM蛋白作为母乳中不可或缺的组成部分，富含多种对神经系统发育极为关键的营养成分。通过对乳清的加工处理，包括膜过滤、分离、浓缩及干燥等一系列工艺，得以生产出一种高含量MFGM复合磷脂和蛋白质的乳清蛋白粉[53]，其中富含MFGM及其他多种功能性活性成分。众多研究结果显示，MFGM的补充能在神经发育表现出更好的效果，也表现出抗病毒活性和降低腹泻发病率[54]。这些益处为婴幼儿配方奶粉的创新研发指明了方向。

随着对乳清蛋白母乳化功能的深入研究以及应用技术的不断进步，为提升婴幼儿配方奶粉的母乳化程度提供了坚实的科学支撑，从而更有效地满足婴幼儿的营养需求。

## 3 未来发展趋势

随着母乳成分的研究逐渐深入，大量母乳中的生物活性蛋白质已被引入婴幼儿配方奶粉中，这一切都显著提高了配方奶粉的营养价值和生物活性，使其更为接近母乳，从而更好地满足婴幼儿的生长和发育需求。未来的研究方向可以概括为三个主要方面：首先，应持续深化对母乳中生物活性蛋白质成分的功能及其作用机制的理解和研究，以及如何在配方奶粉中有效模拟母乳的蛋白质构成和生物活性。其次，需要开展更多的临床试验，以评估母乳化配方奶粉对婴幼儿生长发育的影响。最后，应考虑婴幼儿的个体差异，开发个性化的母乳化配方奶粉，以满足过敏、早产等特殊情况下婴幼儿的需求。

通过持续的研究与创新努力，未来期望能够开发出更加接近母乳成分、更能充分满足婴幼儿营养需求的配方奶粉，为婴幼儿的健康成长提供更为全面的营养支持。

**参考文献**

[1] 中国营养学会.中国居民膳食营养素参考摄入量（2023版）[M].北京：中国轻工业出版社，2023.
[2] 荫士安.人乳成分-存在形式、含量、功能、检测方法[M].北京：化学工业出版社，2016.
[3] 顾瑞霞，骆承庠.乳与乳制品的生理功能特性[M].北京：中国轻工业出版社，2000.
[4] 许亚君.母乳营养与代谢[M].北京：北京大学医学出版社，2023.
[5] 吴圣楣，蔡威.新生儿营养学[M].北京：人民卫生出版社，2016.
[6] 张玉梅，石羽杰，张健，等.母乳α-乳清蛋白、β-酪蛋白与婴幼儿健康的研究进展[J].营养学报，2020，42（1）：78-82.
[7] Lei C，Wu X，Wang S，et al.Mechanism analysis of promoting calcium absorption and bone formation of peptides from different casein fractions[J].Food Bioscience，2024，58.DOI:10.1016/j.fbio.2024.103728.

[8] 陈文亮，苏米亚，贾宏信，等.β-酪蛋白的功能特性及其在婴儿配方乳粉中的应用研究进展[J].乳业科学与技术，2020，43（2）：38-43.

[9] J.Sadler M，Smith N .β-酪蛋白与婴幼儿生长和发育[J].临床儿科杂志，2014，32（2）：198-200.

[10] Raikos V，Dassios T.Health-promoting properties of bioactive peptides derived from milk proteins in infant food：A review.[J].Dairy science & technology，2013，94（2）：191-101.

[11] Enjapoori A K, Kukuljan S, Dwyer K M，et al. In vivo endogenous proteolysis yielding beta-casein derived bioactive beta-casomorphin peptides in human breast milk for infant nutrition. Nutrition[J]. 2019，57：259-267.

[12] 荫士安.人乳成分-存在形式、含量、功能、检测方法（第二版）[M].北京：化学工业出版社，2021.

[13] 王妍，陈雨春，王畅，等.乳清蛋白的功能特性及其在乳制品生产中的应用[J].食品安全导刊，2021（18）：40-42.

[14] Layman D K，Bo L，Fernstrom J D.Applications for α-lactalbumin in human nutrition[J].Nutrition Reviews，2018（6）：444-460.

[15] Lönnerdal B，Lien E L.Nutritional and physiologic significance of alpha-lactalbumin in infants[J].Nutrition Reviews，2003，61（9）：295-305.

[16] Lönnerdal B.Bioactive proteins in human milk: Health，nutrition, and implications forinfant formulas.[J].The Journal of Pediatrics，2016，173：S4-S9.

[17] Kamau S M，Cheison S C，Chen W，et al. Alpha-lactalbumin：Its production technologies and bioactive peptides[J].Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety，2010，9（2）：197-212.

[18] Steijns J M，Van Hooijdonk A C M.Occurrence，structure，biochemical properties and technological characteristics of lactoferrin.[J].British Journal of Nutrition，2000，84（S1）：11-17.

[19] Kanyshkova T G，Buneva V N，Nevinsky G A.Lactoferrin and Its biological functions[J].Biochemistry，2001，66（1）：1-7.

[20] S é verin，Sindayikengera，Wenshui X.Milk biologically active components as nutraceuticals：Review[J].Critical Reviews in Food Science & Nutrition，2005，45（7-8）：645-656.

[21] 张捷，葛欣羽，谢渊，等.乳铁蛋白与婴儿早期免疫力构建[J].食品科技，2024，49（6）：71-78.

[22] 张彩霞，苏宜香，杨玉凤.乳铁蛋白与婴幼儿健康研究进展[J].中国儿童保健杂志，2016，24（4）：377-380.

[23] Oda H，Wakabayashi H，Yamauchi K，et al.Lactoferrin and bifidobacteria[J].Biometals，2014，27（5）：915-922.

[24] Xiya Z，Xu Z，Teng X，et al.Comparative effects between oral lactoferrin and ferrous sulfate supplementation on iron-deficiency anemia：A comprehensive review and meta-analysis of clinical trials[J].Nutrients，2022，14（3）：543-543.

[25] Ke C，Lan Z，Hua L，et al. Iron metabolism in infants：infuence of bovine lactoferrin from iron-fortifed formula [J]. Nutrition，2015，31（2）：304-309.

[26] Conneely，Orla M .Antiinflammatory activities of lactoferrin[J]. Journal of the American College of Nutrition，2001，20（sup5）：389S-395S.

[27] 中国营养学会妇幼营养分会.乳铁蛋白婴幼儿健康效应专家共识[J].临床儿科杂志，2018，36（11）：82-86.

[28] 闫晓斌，高瑞雄，袁凯，等.乳铁蛋白功能及作用效果[J].食品工业，2024，45（9）：223-229.

[29] O'Regan A，Berman J S .Osteopontin：A key cytokine in cell-mediated and granulomatous inflammation[J].International Journal of Experimental Pathology，2000，81（6）：373-390.

[30] Wang K X，Denhardt D T .Osteopontin：Role in immune regulation and stress responses[J].Cytokine & Growth Factor Reviews，2008，19（5-6）：333-345.

[31] Zhao H，Chen Q，Alam A，et al.The role of osteopontin in the progression of solid organ tumour[J].Cell Death & Disease，2018，9（3）：356.

[32] Wang X K，Denhardt T D.Osteopontin：Role in immune regulation and stress responses[J].Cytokine and Growth Factor Reviews，2008，19（5）：333-345.

[33] 中国食品科学技术学会.乳源性骨桥蛋白的科学证据（2024年版）[J/OL].中国食品学报,1-6[2025-01-06].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4528.TS.20241024.1633.006.html.

[34] Liu L，Jiang R，Lnnerdal B.Assessment of bioactivities of the human milk lactoferrin-osteopontin complex in vitro[J].The Journal of Nutritional Biochemistry，2019，69：10-18.

[35] 刘兰. 乳铁蛋白与骨桥蛋白互作及其复合物的生物活性功能研究[D]. 杭州：浙江大学，2019.

[36] Rittling S R，Chambers A F .Role of osteopontin in tumour progression[J].The British journal of cancer，2004（10）：90.

[37] Nie C, Zhao Y, Wang X, et al. Structure, biological functions, separation，properties，and potential applications of milk fat globule membrane (MFGM): A review[J]. Nutrients，2024，16（5）：587.

[38] Fontecha J，Brink L，Wu S，et al.Sources，production，and clinical treatments of milk fat globule membrane for infant nutrition and well-being[J].Nutrients，2020，12（6）：1607-1631.

[39] Moukarzel S，Dyer R，Garcia C，et al. Milk fat globule membrane supplementation in formula-fed rat pups improves

中国乳业线上阅读

reflex development and may alter brain lipid composition[J]. Scientific Reports，2018：15277–15285.

[40] Maria C，Annalisa G，Chiara C.The Immunological role of milk fat globule membrane[J].Nutrients，2022，14（21）：4574–4574.

[41] Erica K，Diana R，Joana O，et al.Improving human health with milk fat globule membrane, lactic acid bacteria, and bifidobacteria[J].Microorganisms，2021，9（2）：341–341.

[42] Li T ,Gao J ,Du M , et al.Milk fat globule membrane supplementation modulates the gut microbiota and attenuates metabolic endotoxemia in high–fat diet–fed mice[J].Journal of Functional Foods，2018：56–65.

[43] 王煜林，吉日木图，何静.乳脂球膜中的营养成分在婴儿健康和发育中的作用[J].中国食品学报，2023，23（6）：402–410.

[44] 郭洪萍，石羽杰，刘彪，等.乳脂球膜蛋白的研究进展[J].中国食物与营养，2020，26（3）：14–18.

[45] Li H，Guan K， Liu M，et al.Identification and anti–oxidative potential of milk fat globule membrane （MFGM）–derived bioactive peptides released through in vitro gastrointestinal digestion[J].Bioorganic Chemistry， 2024，145.DOI:10.1016/j.bioorg.2024.107232.

[46] 刘铭，鲁杏茹，李笑，等.A1型和A2型β–酪蛋白分离纯化及其消化特性[J].中国食品学报，2024，24（11）：107–117.

[47] 陈龙，付王艳，方琼燕，等.牛乳中β–酪蛋白基因分型及β–酪啡肽–7的研究进展[J].中国乳品工业，2019，47（8）：29–34.

[48] Duarte–V á zquez Miguel，Garc í a–Ugalde Carlos，Villegas–Guti é rrez Laura，et al.Production of Cow's Milk Free from Beta–Casein A1 and Its Application in the Manufacturing of Specialized Foods for Early Infant Nutrition[J].Foods，2017，6（7）：50.

[49] Ying M，Yubo Z，Hongtian L， et al. Effectiveness of growing–up milk containing only A2 β–casein on digestive comfort in toddlers：A randomized controlled trial in China[J]. Nutrients，2023，15（6）：1313.

[50] Sheng X Y，Mi W，Yuan Q B，et al.An A2 β–casein infant formula with high sn–2 palmitate and casein phosphopeptides supports adequate growth，improved stool consistency，and bone strength in healthy，term Chinese infants：A randomized，double–blind，controlled clinical trial[J]. Frontiers in Nutrition，2024.DOI:10.3389/fnut.2024.1442584.

[51] 张丽博，张乐，梁雨馨，等.乳中功能性蛋白质分离技术研究进展[J].乳业科学与技术，2022，45（3）：44–50.

[52] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会，国家食品药品监督管理总局. GB 1903.17–2016 食品安全国家标准 食品营养强化剂 乳铁蛋白[S].

[53] 中国营养保健食品协会.中国特殊食品常用原料与应用[M].北京：中国工商出版社，2024.

[54] Nelly Z ,Staudt A K ,Gitte G , et al.Efficacy of an MFGM–enriched complementary food in diarrhea, anemia, and micronutrient status in infants.[J].Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition，2011，53（5）：561–568.

# Application Progress of Breast Milk Active Protein in Infant Formula Milk Powder

NIAN Jingqi，ZHAO Zhen*，SUN Jian，WANG Li*，YANG Xiaobo
Beidahuang Wondersun Dairy Co.，Ltd.，Harbin Heilongjiang 150078

**Abstract**：As the basis of life material，protein plays a key role in the growth and development of infants and young children. The proteins contained in human milk have a variety of biological functions. However， there are still significant differences in protein composition between infant formula and human milk. In this paper，the research hotspots in recent years such as the impact of A2 type β - casein，lactalbumin， osteopontin on the health of infants and young children，as well as its application progress and future development trend in infant formula milk powder were reviewed in detail，in order to elaborate the necessity and methods of the design and development of infant formula milk powder with deep breast milk protein composition and content.

**Keywords**：infant formula milk powder；breast feeding；active protein

中国乳业编辑部