婴幼儿新型配方活性成分的结构功能、检测方法与加工技术研究进展

朱红康，周新诺，饶胜其，杨振泉*

（扬州大学食品科学与工程学院，江苏扬州 225127）

摘要：随着对母乳活性组分研究的日益深入及婴幼儿精准营养需求的持续升级，婴幼儿配方乳粉已成为保障无法母乳喂养婴幼儿的核心食物基质，对生长发育、未来健康意义深远。近年来，新型配方活性成分被逐步发掘，基于混合喂养方式的婴幼儿营养支持理论经历了从宏量营养素匹配向活性功能模拟的范式转变，我国相关产业也从原料依赖型格局迈向精准靶向与产业自主升级的关键阶段。本文系统梳理了乳蛋白类、生物活性肽、天然乳脂类、母乳低聚糖以及益生菌/益生元等五大新型活性成分的结构特征与功能机制，总结了基于高分辨色谱-质谱联用、核磁共振波谱、基因分型和微流控芯片技术等高灵敏、高通量检测方法的最新进展，并着重讨论了以低矿化体系构建，低糖基化、低致敏性工艺控制及超高压、脉冲电场等非热加工为代表的新兴乳品加工技术的发展现状与技术瓶颈。最后，探讨了婴幼儿新型活性成分在混合喂养中的意义，未来仍需深度挖掘母乳中尚未解析的关键活性成分，突破检测靶向性与加工稳态化等核心技术瓶颈，加强产学研协同攻关，推动我国婴幼儿配方乳品产业向精准营养、功能适配与自主创新驱动的高质量方向发展。

关键词：婴幼儿精准营养；新型配方活性成分；结构功能；检测方法；加工技术

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.9.1135

Research Progress on the Structural Functions, Detection Methods and Processing Technology of Novel Active Ingredients in Infant Formula

ZHU Hongkang, ZHOU Xinnuo, RAO Shengqi, YANG Zhenquan*

(Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: With the growth of investigations into the active components of breast milk and the continuous upgrading of the precise nutritional needs, infant formula milk powder has become the essential food matrix for meeting the nutritional needs of infants who cannot be breastfed, with profound implications for growth and development and future health. In recent years, novel active ingredients have been gradually discovered. The paradigm of infant nutrition support in mixed feeding has undergone a paradigm shift from macronutrient matching to active functional simulation. The related industries in China have also moved from a raw material-dependent pattern to a critical stage of precise targeting and industrial self-upgrade. This article systematically reviews the structural characteristics and functional mechanisms of five categories of novel active ingredients, including milk proteins, bioactive peptides, natural milk fats, breast milk oligosaccharides, and prebiotics. It summarizes the latest progress, based on high-sensitivity and high-throughput detection methods such as high-resolution chromatography-mass spectrometry, nuclear magnetic resonance spectroscopy, genotyping and microfluidic chip technology. It further discusses the development status and technical bottlenecks of emerging dairy processing technologies such as low-mineralization system construction, low-sugar glycosylation and low-allergenicity process control, and ultra-high pressure, pulsed electric field, etc. Finally, the significance of novel active ingredients for infants in mixed feeding is discussed. In the future, it is still necessary to deeply explore the key active ingredients in breast milk that remain uncharacterized, overcome technical bottlenecks in detection targeting and processing stability, strengthen collaborative research and development among industry, academia, and research institutions, and promote the development of China's infant formula dairy industry towards high-quality directions of precise nutrition, functional adaptation, and independent innovation.

Key words: Precise nutrition for infants; Novel active ingredients; Structural functions; Detection methods; Processing technology

收稿日期：2026-07-30；修回日期：2026-10-12；接受日期：2026-10-12

基金项目：国家重点研发计划项目（2025YFE0111000）；江苏省自然科学基金青年项目（BK20250939）

作者简介：朱红康（1995-），男，博士，讲师，研究方向：食品营养与健康、药食同源产业化研究，E-mail：zhuhk@yzu.edu.cn

通讯作者：杨振泉（1975-），男，博士，教授，研究方向：食品营养与健康、餐饮食品安全检测与有害因子控制，E-mail：yangzq@yzu.edu.cn

母乳被认为是对婴幼儿生长、发育和生存最有价值的营养形式，被业内作为婴幼儿营养的“黄金标准”[1]。《中国母乳喂养现状调查报告（2025）》显示，由于生活节奏的加快，以及工作压力、母乳不足、疾病因素等，我国 6 个月内婴儿纯母乳喂养率仅为 34.7%，远低于 42%的世界平均水平。作为母乳的重要营养补充，婴幼儿配方乳粉中的蛋白质组成、脂质结构、低聚糖构成及益生菌种类，与婴幼儿的营养适应性、肠道微生态构建及整体健康状况密切相关。因此，近十年来涌现出低矿化酪蛋白、乳蛋白肽、1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯（1,3-dioleoyl-2-palmitoyl triglyceride，OPO）结构脂、母乳低聚糖（Human milk oligosaccharides，HMOs）、益生菌和益生元等一系列不同类型的新型活性成分，为生命早期提供精准的营养支持（图 1）[2]。如今，母乳结合配方奶粉的混合喂养模式也已成为母乳喂养的主流替代方案，如何利用新兴食品科学技术，挖掘与母乳相当或符合婴幼儿营养需求的新型配方活性成分及其检测、加工技术，已成为当下婴幼儿配方食品工业研究领域的核心问题与挑战。

近年来，全球乳品行业就已陆续开展婴幼儿配方奶粉“母乳化”和“有机化”的相关研究[3]，涉及了多种常微量营养素和活性营养组分，使其更加接近天然母乳的配方和组成，并力求保障国家婴幼儿“口粮安全”、营养全面和均衡[4]。部分营养素和活性成分如维生素、矿物质、牛磺酸、骨桥蛋白、乳铁蛋白等，已作为营养强化剂广泛应用于婴幼儿配方食品之中，促进婴幼儿的健康生长发育[5]。然而，随着精准营养的理论和技术不断发展，消费者对婴幼儿配方食品的需求已从基础的“营养补充/支持”逐渐转向“功能细分”和“精准营养喂养”，从而不断驱动着国内外乳业的革新[6]。因此，原先单纯追求增速的“量增”发展目标，已逐渐不适用于当下婴幼儿配方乳品工业以多元化、精细化需求为导向的“质升”的发展新阶段。未来，行业的发展目标将超越对母乳营养组成的单纯模拟，重点聚焦于支撑混合喂养模式下的消化适应性及肠道微生态稳态。因此，通过食品技术创新，不断挖掘婴幼儿新型配方活性成分，契合国民精准营养的健康需求，是我国乳业提档升级的关键。

在国家一系列战略部署和重大科技项目的有力推动下，我国婴幼儿配方食品活性成分的研究开发与产业化已取得关键性进展[7]。在政策支持、消费升级和技术创新等多重驱动下，婴幼儿配方食品成分行业正步入高质量增长周期。因此，本文系统梳理了乳蛋白类、生物活性肽、天然乳脂类、母乳低聚糖以及益生菌/益生元这 5 大类婴幼儿新型配方活性成分的结构功能、检测方法、加工技术与未来发展趋势，旨在为促进我国在该领域的科技引领、产业升级和政策优化提供参考依据，助力婴幼儿配方奶粉产业实现精准化与高品质发展。



图 1 五大婴幼儿配方新型活性成分

Fig.1 Five novel active ingredients in infant formula

1 婴幼儿配方新型活性成分

1.1 牛乳蛋白类

牛乳是婴幼儿配方奶粉的核心基料，含有丰富的酪蛋白、乳清蛋白、乳铁蛋白、α-乳白蛋白等，是不可或缺的关键成分。其中，酪蛋白约占总蛋白含量的 80 wt.%，主要由 α_{s1}-、α_{s2}-、β-和 κ-酪蛋白四种组分构成，并以酪蛋白胶束的纳米级聚集体形态存在[8]。高度磷酸化的 α_{s1}-、α_{s2}-和 β-酪蛋白通过疏水作用相互结合，并借助磷酸钙交联进一步聚集形成直径为 50~500 nm 的复杂纳米簇（图 2）[9-11]。κ-酪蛋白则定位于胶束表层，通过空间位阻与静电斥力维持整体结构的稳定。因此，与乳清蛋白相比，酪蛋白在胃内更倾向于形成凝块，从而延长胃内滞留时间并降低水解程度。大量研究表明，酪蛋白胶束的胃肠消化行为受多重因素调控，其中酪蛋白胶束矿化水平尤为关

键[12]，即，钙敏感酪蛋白（α_{s1}-、α_{s2}-和β-酪蛋白）的部分磷酸基团与钙离子结合，在胶束内部形成胶束磷酸钙[13]。不同来源牛乳的酪蛋白矿化水平各异，通常以每 10 克酪蛋白中蛋白质相关钙的毫摩尔数表示[14]，且物种间差异显著，这主要取决于各物种的特定生理需求[15]。例如，荷斯坦-弗里西亚奶牛（产奶天数 23~309 天，胎次 1~8，荷兰）每 10 g 牛乳酪蛋白约含 8.4 mmol 胶束钙，而人乳酪蛋白仅约含 3.2 mmol[16]。因此，通过脱除牛乳中的胶体磷酸钙，精准开发低矿化酪蛋白有望实现对牛乳蛋白质消化特性的定向调控，将更加顺应混合喂养模式下婴幼儿胃肠道发育的阶段性生理特性[17]。

通过膜分离、喷雾干燥等工序，可将牛乳清蛋白粉中大部分的乳糖、矿物质进行分离，形成高蛋白质含量的浓缩乳清蛋白（Whey protein concentrate，WPC）[18]，而根据蛋白含量高低可进一步划分为 WPC34、WPC50、WPC60、WPC75、WPC80 等不同等级[19]。此外，也有部分研究通过生物复合酶水解技术定向切断大分子乳清蛋白片段，降低致敏性，具有较强的抗炎和抗氧化作用，也更易被消化吸收[20]。

其他功能性蛋白如乳铁蛋白，自 60 年代发现以来，已被广泛应用于婴幼儿配方奶粉中用以增强免疫力、促进铁吸收等[21]。随着乳铁蛋白提炼技术的发展，经离子交换、微滤、冷冻干燥等工艺，第二代高活性乳铁蛋白含量可高达 97 wt.%，具有更高的铁结合能力、抑制微生物活性、抗氧化活性以及益生元活性[22]。

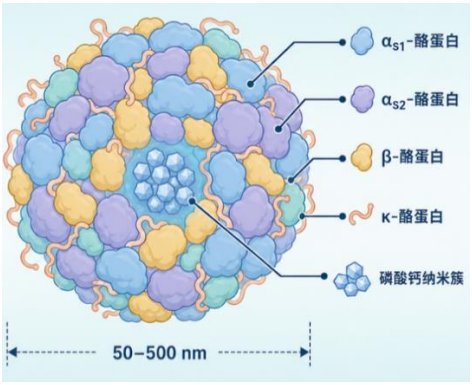


图 2 酪蛋白胶束结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of casein micelle structure

1.2 生物活性肽

乳蛋白经酶解或发酵所释放的生物活性肽，如酪蛋白肽（如酪蛋白磷酸肽、酪蛋白水解肽等）、乳清蛋白肽（水解乳清蛋白），凭借其优异的吸收特性和独特的生理调节功能，已成为婴幼儿配方食品中重要的功能性配料[23]。这类肽段不仅具有更高的生物利用度，还兼具免疫调节、抗菌、降血压等多种生物活性。例如，源自人乳β-酪蛋白的 β-酪啡肽（β-casomorphin），其序列对应于 Val-Glu-Pro-Ile-Pro-Tyr，已被证实具有免疫刺激活性[24]。牛乳同样是多种生物活性肽的重要来源，其酪蛋白经胃蛋白酶水解后所得的 YFYPEL 肽被证明具有抗氧化活性[25]。此外，多种牛乳β-酪蛋白衍生肽已在小鼠体内表现出对肺炎克雷伯菌（Klebsiella pneumoniae）的吞噬增强作用[26]。类似地，经凝乳酶消化产生的 Casecidin αs1 亦被报道具有抗菌活性[27]。借助生物信息学与计算工具如酶水解、超滤、离子交换色谱、高效液相色谱（High performance liquid chromatography，HPLC）和分子对接，开展肽段筛选及功能预测，进行更高纯度和活性的识别和纯化[28]。如今，乳源肽的工业生产、规模化、稳定性和生物利用度亟待提升，但在功能性食品与药物开发领域，仍然展现出广阔的应用前景。

1.3 天然乳脂类

脂肪为婴幼儿提供约 50%的能量和必需脂肪酸，其分子结构对营养吸收效率及健康效应具有决定性影响[29]。天然乳脂是天然存在于动物乳汁中的脂类物质，通常指从牛乳中分离获得、含水量低于 1%的乳脂组分。母乳脂质作为组成最为复杂的天然乳脂，不仅具有独特的脂肪酸组成与分布，还含有甘油磷脂、鞘脂等复杂脂质及中短链脂肪酸，并呈现其特有的分子构型[30]。母乳脂肪最突出的结构特征在于，约 75%的棕榈酸酯化于甘油三酯的 sn-2 位，形成典型的 OPO 结构脂，是母乳脂肪的重要结构特点之一[31]。OPO 通常是通过使用固定化的 n-1,3 区域特异性脂肪酶催化富含棕榈酸的脂肪与油酸或富含油酸的植物油进行转酯化反应合成[32]。与常规奶粉相比，OPO 这一

类独特的分子构型更接近母乳脂质结构与消化特性，能有效减少肠道内不溶性钙皂的生成，从而显著提高脂肪和钙的生物利用度，并有助于改善骨密度（图 3）[33]。研究表明，OPO 结构脂在婴儿发育阶段具有多种肠道益生效果，包括促进有益肠道细菌的生长、抑制肠道炎症反应、改善婴儿便秘以及增强免疫系统功能等，已成为婴儿配方奶粉中的重要人乳脂肪替代品[34]。

牛奶脂肪是 sn-2-棕榈酸的天然来源，有助于减少皂钙的形成。在健康足月、配方奶喂养的 9~14 周婴幼儿群体试验中，相比于 100 wt.%植物脂肪基配方，添加 20 wt.%牛乳脂肪基配方乳粉可以降低棕榈酸皂、总脂肪酸皂和钙的排泄量，改善婴幼儿肠道舒适度和粪便特性[35]。值得注意的是，天然结构脂还可以显著下调健康中年人群单核细胞的炎症通路，具有抑制炎症的作用[36]。此外，结构脂质中所含的中短链脂肪酸可被快速吸收供能，对消化系统尚未发育完善的婴幼儿具有特殊的营养价值。

乳品工业中常采用酶法酯交换技术对乳脂进行分子改性，通过模拟母乳脂肪酸组成合成 OPO 结构脂。该技术虽使配方粉的消化吸收更契合婴幼儿生理特点，但所得结构脂在整体营养价值与生物利用度上，与母乳脂肪及鲜牛乳等天然乳脂相比仍存在一定的差距。目前，业界已达成共识，未来的发展方向是开发能够全面模拟母乳脂肪复杂体系的“全价”结构脂组合。

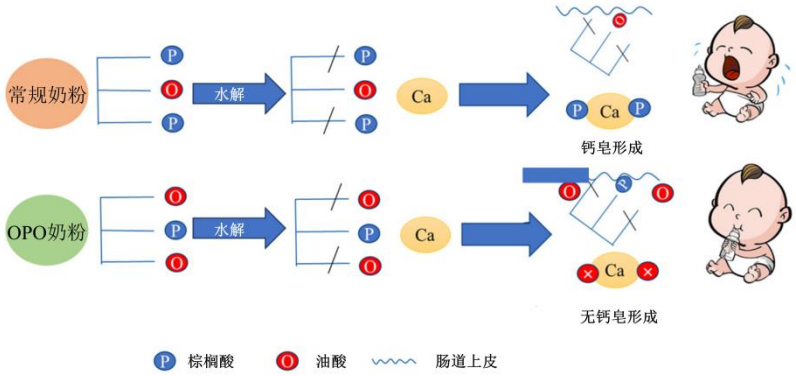


图 3 OPO 结构脂质在体内的代谢图谱

Fig.3 Metabolic map of OPO structured lipids *in vivo*.

1.4 母乳低聚糖

随着对 HMOs 等母乳活性成分结构功能的深入研究，婴幼儿配方奶粉的“母乳化”改良持续取得进展。迄今为止，已从母乳中识别出 150 多种 HMOs（图 4）[37]。HMOs 的摄入与婴幼儿的认知功能和大脑神经发育密切相关[38]。同时，作为高效的益生元和天然抗粘附剂，HMOs 可以发挥肠道益生作用，促进肠道免疫系统的发育、增强肠道屏障功能，并有助于预防感染或肠炎性疾病[39]。

其中，2'-岩藻糖基乳糖（2'-fucosyllactose，2'-FL）是母乳中含量最为丰富的低聚糖之一，约占总 HMOs 含量的 31 wt.%，具有调节婴幼儿肠道菌群、抑制病原体感染、预防食物过敏、肥胖及相关疾病等功效[40]。半乳糖基乳糖（Galactosyllactose，GL），如 3'-GL、4'-GL 和 6'-GL，属于非岩藻糖基化中性 HMOs。其在初乳中的含量高于成熟乳，已被证实与体内外抗炎特性密切相关，并能增加婴儿肠道内双歧杆菌的丰度、刺激短链脂肪酸（Short chain fatty acids，SCFAs）及其他次级代谢产物的产生[41]。此外，唾液酸化的 HMOs 同样是重要的功能组分，如 3'-唾液酸乳糖（3'-sialyllactose，3'-SL）和 6'-唾液酸乳糖（6'-SL）等，是维持肠道稳态、强化宿主健康发育的关键因素[42]。

在混合喂养期间，不同来源的营养成分对婴幼儿肠道微生态的初期构建影响深远。因此，在婴幼儿配方奶粉中合理添加 HMOs，将有助于促进维持婴幼儿肠道益生菌的定植、改善肠道菌群组成及功能发育。然而，HMOs 的产业化制备长期受限于工艺复杂和成本高昂，难以实现规模化应用。在“十四五”规划期间，我国通过微生物发酵法成功构建了高效合成菌株，在 2'-FL、乳糖-N-四糖（Lacto-N-tetraose，LNT）和乳糖-N-新四糖（Lacto-N-neotetraose，LNnT）等多种 HMOs 的产量上取得了重大突破[7]。

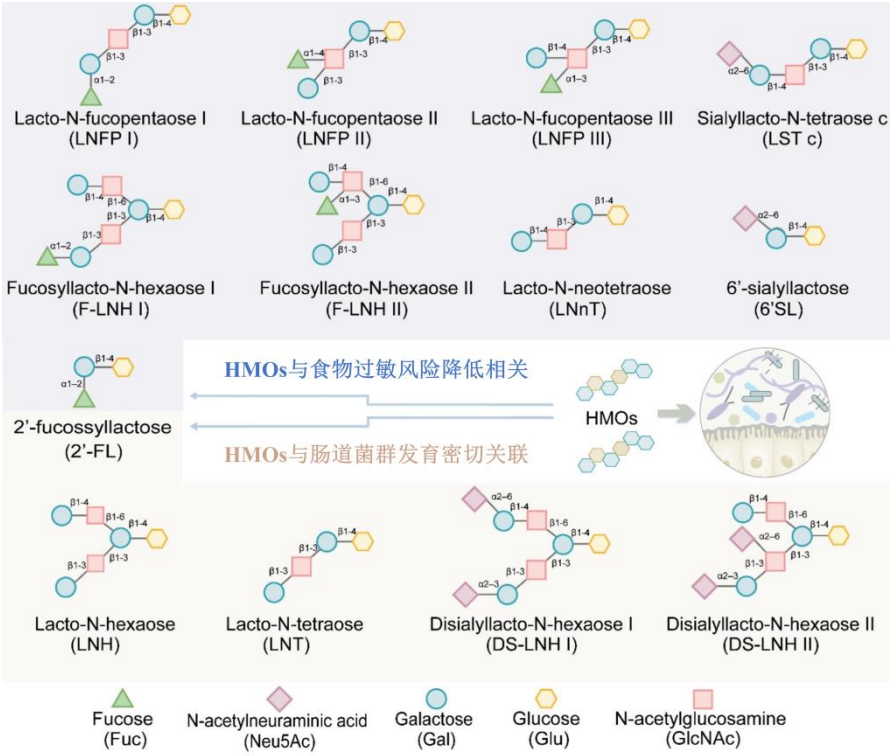


图 4 HMOs 的结构与婴幼儿健康的关联

Fig.4 The structure of HMOs and its relationship with the health of infants

1.5 益生菌和益生元

益生菌和益生元在构建婴幼儿健康的肠道微生态、调节免疫功能以及预防疾病等方面，发挥着不可或缺的作用[43]。作为人体“第二基因组”，肠道微生物在生命早期发育过程中发挥着重要的生理功能。除分娩和母乳喂养过程中的微生物垂直传递外，生命早期的营养摄入也可能经由“菌群-肠道-代谢”这一潜在途径，影响肠道菌群的结构与未来健康[4]。婴幼儿肠道菌群组成与多种新型活性成分水平显著相关（图 5）。研究表明，双歧杆菌（*Bifidobacterium*）被认为是婴幼儿肠道的关键定殖菌，尤其是动物双歧杆菌乳亚种 HN019（*Bifidobacterium animalis subsp. lactis*），它们同时也是 HMOs 最活跃的利用者之一，有助于改善肠道屏障功能、维持肠道稳态并增强宿主对病原体的免疫防御[44]。几十年来，B. *lactis* HN019™一直作为膳食补充剂、发酵和非发酵食品以及饮料的成分进行商业化应用，广泛用于改善婴幼儿、老年人等群体的神经发育、免疫系统等生理功能，成为最受欢迎的益生菌之一[45]。

此外，辅食补充 HMOs 也有助于促进新生儿肠道益生菌的定植，抑制病原微生物的侵袭，已成为生命早期防治感染性疾病的重要方式之一[46]。例如，低聚半乳糖（Galactooligosaccharides，GOS）可选择性为双歧杆菌等有益菌提供代谢底物，促进其增殖或定植；当与特定益生菌协同应用时，二者共同驱动混合喂养婴幼儿的肠道菌群向母乳喂养相关菌群特征定向演替，推动初期肠道微生态的建立。因此，在混合喂养背景下，益生元与益生菌等多种活性成分协同，干预已超越单一菌株或成分的简单补充，其核心在于构建一个支持婴幼儿肠道微生态渐进成熟的营养环境，为生命早期消化功能、肠道屏障功能及免疫系统的正常发育奠定良好的微生态基础。

由于我国益生菌产业起步较晚，加之法规审评的严格性与新菌株临床试验的周期、成本之间存在突出矛盾，产业长期面临核心菌种被国外企业垄断的困境，自主菌株的开发与应用进程严重受限。2025 年 7 月，国家卫生健康委公示了动物双歧杆菌乳亚种（*Bifidobacterium animalis subsp. lactis*）、长双歧杆菌婴儿亚种（*Bifidobacterium longum subsp. infantis*）在内的 17 株可用于婴幼儿食品的菌种名单，为婴幼儿益生菌的科学补充提供了明确的选菌依据。其中，长双歧杆菌婴儿亚种 YLGB-1496 是我国首株由乳企自主研发、源自中国母乳的婴幼儿专用益生菌菌株。未来的研发重心将聚焦于契合中国婴幼儿遗传特征、膳食模式及特定健康需求的精准化菌株开发，以提供更具靶向性的益生菌干预策略。

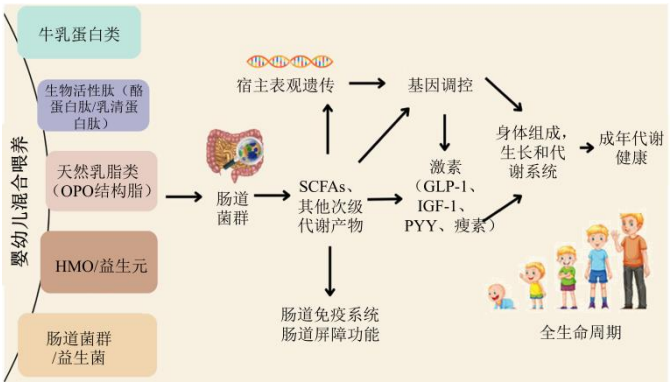


图 5 婴幼儿配方新型活性成分的混合喂养对机体肠道健康的作用

Fig.5 The impacts of mixed feeding with the novel active ingredients in infant formula

2 新型配方活性成分的检测技术

2.1 电子显微镜和散射光谱技术检测牛乳蛋白

利用电子显微镜与多种散射技术，可对酪蛋白胶束的结构进行精细表征，进而评价其矿化水平。电子显微镜方法如扫描电镜（Scanning electron microscopy，SEM）和透射电镜（Transmission electron microscopy，TEM），能够直接可视化胶束的微观形貌，通过图像解析揭示其外观特征及在外界条件改变后的结构演变[8]。例如，Serna-Hernandez 等[47]利用 SEM 技术分析了在环境温度下，经 400、500、600 MPa 高压处理 15 min 后的酪蛋白胶束体系的粒度分布、平均直径等参数，结果表明高压处理的酪蛋白胶束呈现 3 种不同的现象：破碎、聚集和形状改变。

相比于显微技术，散射技术则能深入探测大分子聚集体内部的构造信息：通过解析小角 X 射线散射（Small-angle X-ray scattering，SAXS）、小角中子散射（Small-angle neutron scattering，SANS）、静态光散射（Static light scattering，SLS）及动态光散射（Dynamic light scattering，DLS）等捕获的散射信号，可获取胶束内部结构与尺寸等细节[48]。将上述手段联用，有助于更加全面地解析酪蛋白胶束的层级结构。例如，Ossowski 等[49]结合 SANS、DLS 和 SLS 以及 cryo-TEM 技术，系统研究了酪蛋白胶束亚结构中关键组分 κ-酪蛋白与 β-酪蛋白的自缔合行为。

2.2 靶向蛋白质组学的超高效液相色谱-串联质谱技术检测生物活性肽

色谱技术广泛应用于生物活性肽的分离与定量分析，主要方法包括离子交换色谱、疏水相互作用色谱、尺寸排阻色谱、凝胶渗透色谱、亲和色谱等。Chen 等[50]建立了一种靶向蛋白质组学策略：首先利用高分辨质谱结合蛋白质组学软件对理论肽段进行定性鉴定，再通过超高效液相色谱-串联质谱，在三重四极杆质谱（Triple quadrupole mass spectrometry，TQMS）上采用多反应监测（Multiple reaction monitoring，MRM）模式，实现了乳制品中酪蛋白肽的定量检测。

2.3 薄层层析和气相色谱技术检测天然乳脂

目前对于 OPO 结构脂的常规分析策略基于胰脂酶对 sn-1 和 sn-3 位酯键的水解专一性。该方法首先将甘油三酯水解为 sn-2 单甘酯与游离脂肪酸，再借助薄层色谱（Thin-layer chromatography，TLC）或蒸发光散射高效液相色谱（HPLC-evaporative light-scattering detector，HPLC-ELSD）进行分离纯化，通过气相色谱（Gas chromatography，GC）或气相色谱-质谱联用（Gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS）直接或衍生化后测定脂肪酸组成。我国新发布的 GB/T 24894-2025 标准即采用薄层层析分离 2-单甘酯，用于测定动植物油脂中甘油三酯 sn-2 位的脂肪酸组分。例如，韩瑞丽等[51]利用胰脂酶特异性水解获得 sn-2 单甘酯和游离脂肪酸，经正己烷提取后，以 HPLC-ELSD 分析水解产物并分离 sn-2 单甘酯，再经乙酰氯-甲醇溶液衍生化，由气相色谱-质谱联用仪完成 sn-2 位脂肪酸组成的分析。与传统 TLC 法相比，该 HPLC-ELSD 法在分析时间与成本方面均具优势。

2.4 液相色谱-质谱联用技术检测 HMOs

HMOs 的分离与检测因其基质复杂、同分异构体众多且各组分含量差异悬殊而颇具挑战。目前，多种液相色谱技术均可用于 HMOs 分析，包括高效液相色谱-示差折光检测法、高效液相色谱-蒸发光散射检测法和高效液相色谱-电喷雾检测法等。其中，基于衍生化处理的亲水作用色谱-荧光检测法以及高效阴离子交换色谱-脉冲安培检测法已成为 HMOs 定量分析的重要技术手段[52]。我国团体标准《婴幼儿配方乳粉及调制乳粉中 7 种母乳低聚糖的测定（T/SAFC002-2024）》和出入境检验检疫行业标准中，也已采用荧光检测器对婴幼儿配方乳粉等基质中的多种 HMOs 进行测定。对于结构鉴定而言，液相色谱-电喷雾电离-串联质谱法不仅可实现多组分同时定量[53,54]，其最大优势更在于结构表征与未知物鉴定[55]。

2.5 基因分型和微流控芯片技术检测益生菌

随着生物技术的不断进步，益生菌的检测手段已从传统的微生物培养法逐步转向分子生物学、流式细胞术及生物传感等高效精准技术。相较于平板菌落计数法和浊度法，16S rRNA 基因测序与全基因组测序等分子生物学技术通过解析保守基因或全基因组序列，能够实现菌株的精准种属鉴定，并灵敏区分亲缘关系极近的菌株，已发展为菌株鉴定与溯源的核心技术。基于多位点序列分型策略，可进一步将鉴定分辨率提升至亚种水平，例如准确区分动物双歧杆菌乳亚种（*B. animalis subsp. lactis* ATCC 27673）与其他乳亚种菌株[56]。此外，Sun 等[57]还开发了集成微流控芯片与图像识别的便携式系统，能够快速、高效地实现活/死菌的区分与定量检测。

3 婴幼儿配方奶粉新兴加工技术与瓶颈

3.1 低矿化控制技术

由于婴幼儿味觉敏感，胃肠道消化吸收和肾脏功能等发育尚未成熟，对矿物质的代谢能力较弱。因此，通过适当的加工工艺控制配方奶粉的矿化水平，不仅有助于婴幼儿维持正常的味蕾发育与口味偏好形成，也有利于混合喂养过程中营养成分的消化、吸收和代谢。目前，我国尚未出台针对婴幼儿配方奶粉矿化水平的国标，在《婴幼儿天然包装饮用水》团体标准中规定：溶解性总固体为 30~200 mg·L^{-1}，钠含量≤20 mg·L^{-1}。而在婴幼儿配方奶粉中，牛乳酪蛋白的矿化水平、凝乳特性与乳源密切相关。例如，与娟姗牛酪蛋白相比，荷斯坦牛酪蛋白中的 A 型和 E 型 κ-酪蛋白凝乳效果较弱，矿化水平较低。此外，荷斯坦牛酪蛋白中的 α_{S1}-酪蛋白磷酸化和 κ-酪蛋白也具有更低的糖基化水平，也更容易被婴幼儿消化吸收[58]。因此，在实际生产中，尽管可通过优选牛品种或特定 κ-酪蛋白基因型从源头调控矿化水平，但受奶源供应稳定性、成本及规模化生产等因素制约，更具可操作性的路径仍是借助离子交换、螯合、酸化等加工技术对乳基料进行定向脱钙，以实现低矿化配方的稳定制备。

鉴于牛乳酪蛋白的胶束钙水平通常高于母乳，为调控其消化特性，乳制品加工业常采用促使胶体磷酸钙解离的策略降低其矿化水平，主要包括离子交换脱钙法、螯合脱钙法和酸化脱钙法[17]。离子交换脱钙法借助强酸型或弱酸型阳离子交换树脂，选择性吸附可溶相中的游离钙离子，同时以 Na^+、K^+或 H^+等平衡离子与游离 Ca^{2+}离子进行等电荷交换，从而降低体系内钙离子浓度[59]。例如，徐雨婷[60]采用强酸型阳离子交换树脂 Amberlite SR1L Na，实现了在静态条件（25 ℃，2 h，pH=6.85）下浓缩乳蛋白中钙的可控定量脱除，钙脱除率可达 37.1%，同时也具备了良好的溶解性、起泡性和乳化性。螯合脱钙法则通过添加乙二胺四乙酸（Ethylenediamine tetraacetic acid，EDTA）、柠檬酸盐、多聚磷酸盐或草酸盐等螯合剂，络合水相中的 Ca^{2+}离子，降低游离钙浓度，促使胶体磷酸钙向水相解离，进而减少酪蛋白矿化程度并增强胶束水化[61]。酸化脱钙法利用葡糖酸内酯、盐酸、乳酸或二氧化碳等酸化剂降低体系 pH 值：当 pH 值从 6.7 降至 5.8 时，胶束中的矿质元素缓慢溶出，κ-酪蛋白表面负电荷减少，胶束间静电斥力下降，导致酪蛋白溶解性逐步降低；当 pH 值进一步降至 5.0 时，胶束磷酸钙完全解离，胶束水合程度显著升高[62]。现有脱钙技术虽已得到广泛研究且工艺日趋成熟，但仍普遍存在脱钙效率偏低、工艺条件易导致终产物及超滤膜污染等局限。因此，寻求天然低矿化乳源、开发更高效清洁的脱钙方法，对新型低矿化配方乳粉的研制具有重要意义。

乳制品加工过程中热负荷可以影响蛋白质的矿化水平[63]。研究表明：直接蒸汽输注超高温（direct-steam infusion ultra-high temperature，dUHT）技术可以破坏钙桥，增加胶束内的静电排斥，导致酪蛋白团簇解离，形成更小、更松散且多孔结构的酪蛋白胶束[64]。通过膜过滤与离子交换技术，部分脱钙的胶束态酪蛋白浓缩物（Micellar casein concentrate，MCC）和牛乳无水乳脂混合，再经高压均质处理后得到模拟婴儿配方奶粉的乳液体系，具有更优的

消化特性和生物可及性[65]。

3.2 低糖基化制备技术

通常，婴幼儿配方奶粉在热处理过程中可能形成多种潜在危害物，例如晚期糖基化终产物（Advanced glycation end-products，AGEs）、甘油酯（Glycidyl esters，GEs）、2-单氯丙烷-1,3-二醇酯和 3-单氯丙烷-1,2-二醇酯（2-monochloropropane-1,3-diol esters and 3-monochloropropane-1,2-diol esters，MCPDEs）[66]。其中，AGEs 不仅参与食品风味和色泽的形成，还给婴幼儿带来了潜在的健康风险。研究表明膳食 AGEs 的摄入与食物过敏、糖尿病、心血管疾病等多种慢性疾病密切相关[67]。

配方中营养素的组成对 AGEs 的生成水平具有显著影响：生物活性肽类较完整蛋白质更易发生糖基化反应；采用麦芽糊精替代乳糖的配方中 AGEs 含量相对更低[66]。牛乳的糖基化也与矿化水平存在一定关联。使用低矿化酪蛋白的牛奶，或将牛乳蛋白作为浓缩液，可以减少蛋白质糖基化，改善产品的营养特性[63]。一项基于体外静态婴儿消化模型的研究表明：来自 5 个不同国家（中国、法国、荷兰、瑞士、新西兰）的 17 家制造商的 25 种婴幼儿配方奶粉中，低矿化与糖基化水平的奶粉形成含水量高达 82 wt.%的疏松胃凝块，更利于酶促水解，肠道消化后游离氨基浓度和脂解率分别达 5.2 mmol g^{-1} 与 46 wt.%；而高矿化与糖基化水平奶粉则产生含水量仅 68 wt.%的致密凝块，限制酶接触、延缓消化，相应指标分别仅有 4.8 mmol g^{-1} 和 38 wt.%[68]。当然，需要指出的是，体外模拟消化实验难以完全再现真实婴幼儿的消化生理条件，因此未来有必要借助依据婴幼儿生理学特征或体内数据参数化的动态模型开展研究。

为了进一步降低婴幼儿配方食品中 AGEs 的暴露风险，当前研究聚焦于通过新兴食品加工技术抑制其形成，包括热加工（空气炸锅、低温真空加热、射频加热、欧姆加热、红外加热）和非热加工（高压、脉冲电场、冷等离子体、超声波）技术[69]。同时，天然抗氧化剂或植物源化合物等外源抑制剂，也被证实可有效遏制 AGEs 的生成并提升产品的营养价值[70]。

值得指出的是，在婴配粉生产中，为模拟母乳而额外添加的 2'-FL 在原料乳预杀菌、减压浓缩及喷雾干燥等环节同样会与乳蛋白发生糖基化反应，从而改变蛋白的结构与功能特性。然而，研究显示，这种由 2'-FL 介导的糖基化修饰能够显著改善肠道微生物多样性、调节菌群平衡并促进有益菌定植，同时引起过敏相关代谢途径的显著变化[71]。这一发现也表明在加工过程中发生的糖基化反应并非仅具负面效应，也为功能性配料的应用与工艺调控提供了新的认知维度。

3.3 低致敏性加工技术

在乳品加工过程中消减过敏原，对保障婴幼儿的膳食安全至关重要[72]。目前，低致敏性加工技术策略可归为热加工、非热加工及生物化学修饰三大类。在传统热加工过程中，蒸煮、微波和烘烤等加工技术主要通过加热诱导蛋白质变性，破坏构象型过敏原表位。而高压、脉冲电场、低温等离子体、辐照及超声等非热加工技术，则借助过敏原蛋白结构修饰、肽链断裂或新化学键形成等机制，直接破坏致敏性表位。生物化学修饰方面，酶水解、酶交联、糖基化及微生物发酵等方法，可通过改变蛋白质构象或使蛋白质与糖类结合，以破坏或掩蔽过敏原表位。此外，现代育种技术亦可从源头消减甚至消除原料的致敏性。当前，基于酶法水解的部分水解和深度水解乳蛋白已实现工业化生产，但相关制备技术的原理研究大多仍停留在全蛋白水平，未来应更多聚焦于针对过敏原表位的精准消减技术。

4 婴幼儿新型活性成分在混合喂养中的意义

近年来，随着我国经济持续发展，居民生活水平不断提升，乳母的膳食结构逐步演变，营养状况得到明显改善。母乳活性成分对发育关键窗口期的表观遗传编程的调控作用，已成为生命科学与母婴健康交叉领域的研究前沿。

然而，乳母膳食营养受经济水平、风俗习惯及地域差异等多重因素影响，不同地区间存在较大差异。近期部分地区流行病学调查数据显示，我国母乳中的乳铁蛋白、部分维生素及钙的含量仍普遍处于较低水平，与发达国家相比仍存在一定的差距[73]。对于哺乳期营养不良的妇女，母乳中关键营养素水平不足是导致婴幼儿营养缺乏的重要危险因素，仍需额外补充营养素以满足正常生长发育[74]。因此，混合喂养已普遍成为 6 月龄以上婴幼儿的现

实主导的喂养模式[4]。尽管如此，但在全球范围内，非纯母乳喂养所致的健康风险如婴幼儿生长发育迟缓、过敏性疾病发病率等持续攀升，深刻揭示了活性成分在生命早期发育中的核心价值。

目前，婴幼儿配方活性成分的研发重心正集中于对母乳成分含量与精细结构的深度模拟。科学合理的配方设计，将有助于支持混合喂养婴幼儿由母乳到配方食品再到辅食添加阶段的平稳营养过渡。值得注意的是，新型活性成分在婴幼儿混合喂养体系中，通过结构互补、代谢底物供给、菌群-宿主互作及信号通路调控等机制形成的多层次功能耦合；其效果并非单一成分效应的简单叠加，而是以肠道微生态为枢纽、以消化适应与免疫成熟为核心靶点，实现了营养生物利用、肠道屏障强化和免疫调节等功能的整体增益与稳态协同。

因此，不断挖掘新型配方活性成分，并通过配方优化、温和加工等方式，改善其构效与生物活性，提高营养成分消化吸收效率、肠道微生态构建及免疫屏障成熟等，从而促进混合喂养婴幼儿的肠道健康、免疫功能与认知发育。

5 结论与展望

目前，混合喂养背景下婴幼儿配方食品设计理念的发展，已逐渐从营养素补充、模拟母乳组成逐步拓展到功能模拟和生命早期持续营养支持。围绕牛乳蛋白、生物活性肽、天然乳脂、HMOs 及益生菌等关键板块，一系列重大科技攻关取得实质性突破，特别是低矿化酪蛋白、OPO 结构脂和 2'-FL 等长期受制于人的高端配料，已初步构筑起具有自主知识产权的核心技术体系。尽管如此，在全球乳业科技竞争加剧与国内高品质消费需求持续升级的双重驱动下，我国婴配产业仍面临一系列深层次矛盾：（1）母乳活性组分互作机制及婴儿代谢编程等基础科学问题尚存认知空白；（2）核心配料的高效生物合成与规模化制备的工程化能力仍显不足，成本及活性调控瓶颈亟待突破；（3）精准化、智能化的加工工艺与全链条质量安全保障水平有待全面提升；（4）贯通基础研究、技术开发与产业转化的协同创新生态尚不健全；（5）配方注册的严格审评与新型活性成分快速迭代之间存在张力。

展望未来，必须坚持以母乳多维精准模拟的“黄金标准”为科学标杆，强化合成生物学、精准营养学、先进制造等多学科交叉融合，开展有组织、体系化的联合攻关，着力攻克微生物高效合成底盘构建、活性成分稳态化递送与保留等“卡脖子”技术，建立与国际接轨且符合中国婴幼儿生理特征的技术标准、功效评价与法律法规体系。聚焦于婴幼儿“精准营养”需求，建立基于真实喂养场景的新型活性成分评价体系，综合关注消化行为、肠道微生态及营养利用等关键指标，为婴幼儿精准营养提供新的评价框架，推动婴幼儿配方食品研发由营养组成模拟逐步向功能支持和生命早期健康导向转变。唯有系统性推进科技创新与产业升级的深度融合，方能从根本上实现我国婴幼儿配方食品产业的自主可控与高质量发展，为保障国家婴幼儿“口粮安全”、夯实国民生命早期健康根基提供坚实的科技支撑。

参考文献

[1] AHERN G J, HENNESSY A A, RYAN C A, et al. Advances in infant formula science [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2019, 10: 75-102.

[2] BAKSHI S, PASWAN V K, YADAV S P, et al. A comprehensive review on infant formula: nutritional and functional constituents, recent trends in processing and its impact on infants' gut microbiota [J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1194679.

[3] 肖凯军,高孔荣.母乳化奶粉发展概况[J].食品与机械,1993,3:14-15.

[4] 朱红康,杨调调,饶胜其,等.生命早期 1000 天的营养与安全:从早期发育到未来健康[J].现代食品科技,2025,42(12):1-11.

[5] 陆慧媛,范春婷,朱静怡,等.母乳化婴幼儿配方奶粉中活性营养成分的研究进展[J].妇儿健康导刊,2023,2(24):111-115+118.

[6] 孙文佳,陈娜,李晨,等.精准营养驱动下的乳制品创新:生物活性组分与递送体系研究进展[J].中国乳业,2026,4:92-99.

[7] 陈卫.我国婴幼儿配方乳品新型核心配料的现状与发展趋势[J].中国农业科技导报(中英文),2025,27(12):123-133.

[8] DALGLEISH D G, CORREDIG M. The structure of the casein micelle of milk and its changes during processing [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2012, 3: 449-467.

[9] FARRELL H M, MALIN E L, BROWN E M, et al. Casein micelle structure: What can be learned from milk synthesis and structural biology? [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2006, 11(2-3): 135-147.

[10] GEBHARDT R, PÜTZ T, SCHULTE J. Nearly reversible expansion and shrinkage of casein microparticles triggered by extreme pH changes [J]. Micromachines (Basel), 2023, 14(3): 678.

[11] DUERASCH A, HERRMANN P, HOGH K, et al. Study on β-casein depleted casein micelles: micellar stability, enzymatic cross-linking, and suitability as nanocarriers [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(47): 13940-13949.

[12] BITTANTE G, PENASA M, CECCHINATO A. Invited review: Genetics and modeling of milk coagulation properties [J]. Journal of Dairy Science, 2012, 95(12): 6843-6870.

[13] MALACARNE M, FRANCESCHI P, FORMAGGIONI P, et al. Influence of micellar calcium and phosphorus on rennet coagulation properties of cows milk [J]. Journal of Dairy Science, 2014, 81(2): 129-136.

[14] HUPPERTZ T, HECK J, BIJL E, et al. Variation in casein distribution and mineralisation in the milk from Holstein-Friesian cows [J]. International Dairy Journal, 2021, 119: 105064.

[15] HUPPERTZ T，TIMMER C. Salt equilibria in nutritional formulae for infants and young children [J]. International Dairy Journal，2020，110: 104805.

[16] BIJL E, VAN V H J, HUPPERTZ T, et al. Protein, casein, and micellar salts in milk: current content and historical perspectives [J]. Journal of Dairy Science, 2013, 96(9): 5455-5464.

[17] 张捷,崔梦君,孙菁笛,等.低矿化牛乳酪蛋白胶束与婴幼儿蛋白质胃肠消化的关系[J].中国乳品工业,2023,51(11):47-51.

[18] 吴士业,刘达玉.超滤浓缩乳清蛋白并分离乳糖的研究[J].食品与机械,1999,2:34-35.

[19] GB 11674-2010 食品安全国家标准 乳清粉和乳清蛋白粉[S].

[20] GAO R, KONG F, MU G, et al. Screening of enzymes for bi-functional whey protein hydrolysates: virtual enzymolysis, fragmentomics, and molecular docking in silico [J]. Food Research International, 2025, 214: 116629.

[21] 郭本恒.高活性的生物制剂——乳铁蛋白[J].食品科学,1992,12:19-20.

[22] 让-保罗 佩罗丹:生产乳转铁蛋白的方法 CN201080010953.6 [P]. 2014-12-31:1-32.

[23] UCAK I, AFREEN M, MONTESANO D, et al. Functional and bioactive properties of peptides derived from marine side streams [J]. Marine Drugs, 2021, 19(2): 71.

[24] PAVLICEVIC M, MARMIROLI N, MAESTRI E. Immunomodulatory peptides-A promising source for novel functional food production and drug discovery [J]. Peptides, 2022, 148: 170696.

[25] CHAUDHURY A, DUVOOR C, REDDY Dendi V S, et al. Clinical Review of Antidiabetic Drugs: Implications for Type 2 Diabetes Mellitus Management [J]. Frontiers in Endocrinology (Lausanne), 2017, 8: 6.

[26] LOZANO-OJALVO D, LÓPEZ-FANDIÑO R. Immunomodulating peptides for food allergy prevention and treatment [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(10): 1629-1649.

[27] JIA L, WANG L, LIU C, et al. Bioactive peptides from foods: production, function, and application [J]. Food & Function, 2021, 12(16): 7108-7125.

[28] 娄肖肖,马洪鹏,高姣姣,等.乳源生物活性肽生物学功能研究进展[J].乳业科学与技术,2024,47(4):31-37.

[29] INNIS S M. Dietary triacylglycerol structure and its role in infant nutrition [J]. Advances in Nutrition, 2011, 2(3): 275-283.

[30] 芦俊博,王行,张译,等.天然乳脂对婴幼儿肠道健康影响的定性循证研究[J].中国食物与营养,2026,32(4):27-36.

[31] WEI W, JIN Q, WANG X. Human milk fat substitutes: Past achievements and current trends [J]. Progress in Lipid Research, 2019, 74: 69-86.

[32] GHIDE M K, LI K, WANG J H, et al. Effective production of human milk fat substitutes rich in 1,3-dioleoyl-2-palmitoyl glycerol (OPO) via a new strategy [J]. Food Biophysics, 2022, 17(4): 495-507.

[33] NI X, FENG T, ZHANG Y, et al. Application progress of immobilized enzymes in the catalytic synthesis of 1,3-dioleoyl-2-palmitoyltriglyceride structured lipids [J]. Foods, 2025, 14(3): 475.

[34] WANG G, WANG M. New era to prepare human milk fat substitutes: 1,3-Dioleoyl-2-palmitoyl-glycerol [J]. Food Research International, 2025, 222: 117664.

[35] MANIOS Y, KARAGLANI E, Thijs-Verhoeven I, et al. Effect of milk fat-based infant formulae on stool fatty acid soaps and calcium excretion in healthy term infants: two double-blind randomised cross-over trials [J]. BMC Nutrition, 2020, 6: 46.

[36] DENG L, MICHIELSEN C, VRIELING F, et al. Milk fat globule membrane modulates inflammatory pathways in human monocytes: A crossover human intervention study [J]. Clinical Nutrition, 2024, 43(1): 232-245.

[37] CHEN Y, WEN Y, ZHAO R, et al. Human milk oligosaccharides in preventing food allergy: A review through gut microbiota and immune

regulation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278(Pt 2): 134868.

[38] OTTINO G J, ADISE S, MACHLE C J, et al. Consumption of different combinations of human milk oligosaccharides in the first 6 mo of infancy is positively associated with early cognition at 2 y of age in a longitudinal cohort of Latino children [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2024, 120(3): 593-601.

[39] YANG S, CAI J, SU Q, et al. Human milk oligosaccharides combine with Bifidobacterium longum to form the "golden shield" of the infant intestine: metabolic strategies, health effects, and mechanisms of action [J]. Gut Microbes, 2024, 16(1): 2430418.

[40] PAONE P, LATOUSAKIS D, TERRASI R, et al. Human milk oligosaccharide 2'-fucosyllactose protects against high-fat diet-induced obesity by changing intestinal mucus production, composition and degradation linked to changes in gut microbiota and faecal proteome profiles in mice [J]. Gut, 2024, 73(10): 1632-1649.

[41] MEEUSEN E, CAO L, DELSING D J, et al. Gram-scale chemical synthesis of galactosyllactoses and their impact on infant gut microbiota *in vitro* [J]. Organic & Biomolecular Chemistry, 2024, 22(10): 2091-2097.

[42] 张子豪,张龙林,谭碧娥,等.唾液酸乳糖对幼龄动物肠道健康的多屏障协同调控作用及机制[J].中国畜牧杂志,2026,62(6):92-99.

[43] HILL C, GUARNER F, REID G, et al. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics Consensus Statement on the scope and appropriate use of the term probiotic [J]. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 2014, 11(8): 506-514.

[44] CHENG J, LAITILA A, OUWEHAND A C. *Bifidobacterium animalis subsp. lactis* HN019 effects on gut health: A review [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 790561.

[45] SANDERS M E. Summary of probiotic activities of Bifidobacterium lactis HN019 [J]. Clinical Journal of Gastroenterology, 2006, 40(9): 776-783.

[46] 沈葱,孔晓慧,任雪云.母乳低聚糖防治新生儿感染性疾病研究进展[J].中华新生儿科杂志（中英文）,2024,39(9):564-567.

[47] SERNA-HERNANDEZ S O, ESCOBEDO-AVELLANEDA Z, GARC ÍA-GARC ÍA R, et al. Microscopical Evaluation of the Effects of High-Pressure Processing on Milk Casein Micelles [J]. Molecules, 2022, 27(21): 7179.

[48] 叶晶莹,吴帆,张兆月,等.酪蛋白胶束结构特性及其在递送领域应用的研究进展[J].食品科学, 2025,46(12):379-390.

[49] OSSOWSKI S, JACKSON A, OBIOLS-RABASA M, et al. Aggregation behavior of bovine κ- and β-casein studied with small angle neutron scattering, light scattering, and cryogenic transmission electron microscopy [J]. Langmuir, 2012, 28(38): 13577-13589.

[50] CHEN Q, LAI S, DONG L, et al. Characterization and determination of casein glycomacropeptide in dairy products by UHPLC-MS/MS based on its characteristic peptide [J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137049.

[51] 韩瑞丽,马健,张佳程,等.HPLC-ELSD 与 GC-MS 法测定牛乳甘油三酯 sn-2 位脂肪酸组成[J].分析测试技术与仪器,2009,15(1):30-34.

[52] GU F, KATE G A T, ARTS I C W, et al. Combining HPAEC-PAD, PGC-LC-MS, and 1D (1)H NMR to investigate metabolic fates of human milk oligosaccharides in 1-month-old infants: a pilot study [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(23): 6495-6509.

[53] ZHU Y, ZHANG J, ZHANG W, et al. Recent progress on health effects and biosynthesis of two key sialylated human milk oligosaccharides, 3'-sialyllactose and 6'-sialyllactose [J]. Biotechnology Advances, 2023, 62: 108058.

[54] MCCUNE S, KHWAJAZADA S, YERABANDI N, et al. The influence of oligosaccharides when measuring lactose and total carbohydrates in human milk and comparison of methods [J]. Journal of Nutrition, 2023, 153(7): 2117-2124.

[55] CSERNÁK O, RÁCZ B, ALBERTI Á, et al. Quantitative analysis of 3'- and 6'-sialyllactose in human milk samples by HPLC-MS/MS: A validated method for the comparison of two consecutive lactation periods in the same woman [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2020, 184: 113184.

[56] 陈雯雯.基因分型技术对益生菌婴幼儿配方乳粉中双歧杆菌鉴定的研究[D]上海:上海师范大学,2016.

[57] SUN X, ZHANG J, CHEN J, et al. A portable device for probiotic counting and viability assessment based on microfluidic chip and image recognition [J]. IMetaOmics, 2025, 2(3): e70045.

[58] JENSEN H B, POULSEN N A, ANDERSEN K K, et al. Distinct composition of bovine milk from Jersey and Holstein-Friesian cows with good, poor, or noncoagulation properties as reflected in protein genetic variants and isoforms [J]. Journal of Dairy Science, 2012, 95(12): 6905-6917.

[59] 刘大松.基于 pH 调控的脱钙处理对酪蛋白胶束结构及浓缩乳蛋白功能性的影响[D]无锡:江南大学,2017.

[60] 徐雨婷.离子交换脱钙对浓缩乳蛋白溶解性和功能性的影响[D]无锡:江南大学,2016.

[61] UDABAGE P, MCKINNON I R, AUGUSTIN M A. Mineral and casein equilibria in milk: effects of added salts and calcium-chelating agents [J]. Journal of Dairy Research, 2000, 67(3): 361-370.

[62] 李志宾.牛乳活性乳清蛋白及酪蛋白胶束的膜分离制备研究[D]无锡:江南大学,2021.

[63] CHEN W, YIN W, TAO X, et al. Salt equilibria and protein glycation in young child formula [J]. Foods, 2025, 14(19): 3445.

[64] GUO M, WANG Y, WANG P, et al. Multiscale structure analysis reveals changes in the structure of casein micelles treated with direct-steam-infusion UHT [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 153: 110033.

[65] WANG K, ZHAO Y, YIN W, et al. *In vitro* gastrointestinal digestibility under infant conditions of bovine milk fat emulsions stabilized using decalcified micellar casein concentrate [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 168: 111555.

[66] XIE Y, FELS-KLERX H J, LEEUWEN S P J, et al. Dietary advanced glycation end-products, 2-monochloropropane-1,3-diol esters and 3-monochloropropane-1,2-diol esters and glycidyl esters in infant formulas: Occurrence, formulation and processing effects, mitigation strategies [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(6): 5489-5515.

[67] ZHANG Q, YU G, JIANG Y, et al. Dietary advanced glycation end-products promote food allergy by disrupting intestinal barrier and enhancing Th2 immunity [J]. Nature Communication, 2025, 16(1): 4960.

[68] CHENG H, CHEN W, YIN W, et al. The effect of physicochemical variability of commercial young child formulas on *in vitro* gastric coagulation and digestive behavior [J]. Food Bioscience, 2026, 81: 109123.

[69] WANG S W，ZHENG X Y，YANG Y，et al. Emerging technologies in reducing dietary advanced glycation end products in ultra-processed foods: Formation, health risks, and innovative mitigation strategies [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24(2): e70130.

[70] 周燕琼.植物多酚抑制食品中晚期糖基化终末产物的形成的作用机理研究[D]杭州:浙江大学,2015.

[71] 陈欣彤.2'-FL 糖基化修饰对牛乳蛋白致敏性及肠道微生态的影响[D]南昌:南昌大学,2024.

[72] 李欣,胡巍,谭宏凯,等.低致敏食品制备技术及其工业化应用研究进展[J].食品科学技术学报,2022,40(3):13-20.

[73] AN Q, ZOU Y, WANG W, et al. Lactoferrin deficiency during lactation causes adult obesity-related metabolic disease through persistent adipose dysfunction driven by impaired adipocyte development [J]. Advance Science (Weinh), 2026: e75678.

[74] 张艳秋.乳母膳食状况与母乳营养素含量及婴儿生长发育水平的前瞻性观察[D]济南:山东大学,2016.