

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

孙文佳, 陈 娜, 李 晨, 黄 威*

(辽宁越秀辉山控股股份有限公司, 辽宁沈阳 110000)

摘 要: 随着消费者健康意识日益增强, 乳制品产业正迎来一场深刻变革——从传统的基础营养供给, 逐步迈向以精准营养和特定健康功能为导向的战略升级。本综述旨在系统阐述在精准营养理念推动下乳制品创新的关键进展: 首先解析了乳源中关键生物活性组分, 包括如乳蛋白活性肽、乳脂球膜 (MFGM)、母乳低聚糖 (HMOs) 类似物等; 针对多数活性物质存在稳定性差与生物利用率低等共性难题, 进一步聚焦高效递送体系的研究突破, 探讨其在保护益生菌、包埋疏水性功能因子等方面的前沿应用; 最后, 展望了该领域面临的挑战及未来方向, 旨在为研发下一代个性化、高效功能性乳制品提供坚实的理论依据。

关键词: 精准营养; 功能性乳制品; 生物活性肽; 递送体系; 生物利用率

文章编号: 1671-4393 (2026) 04-0092-08

DOI:10.12377/1671-4393.26.04.15

Innovation in Dairy Products Driven by Precision Nutrition: Research Progress on Bioactive Components and Delivery Systems

SUN Wenjia, CHEN Na, LI Chen, HUANG Wei*

(Liaoning YueXiu HuiShan Holdings Co., Ltd., Shenyang Liaoning 110000)

Abstract: With the increasing health awareness of consumers, the dairy industry is undergoing a profound transformation-moving from the traditional basic nutrition provision to a strategic upgrade that focuses on precision nutrition and specific health functions. This review aimed to systematically elaborate on the key research progress in dairy product innovation driven by the concept of precision nutrition: Firstly, it analyzed the key bioactive components in dairy sources, including bioactive peptides from milk proteins, milk fat globule membranes (MFGM), and analogues of human milk oligosaccharides (HMOs). In view of the common problems of poor

作者简介: 孙文佳 (1996-), 女, 吉林长春人, 硕士, 工程师, 研究方向为乳制品加工与研发;

陈 娜 (1977-), 女, 天津人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为乳制品加工与研发;

李 晨 (1989-), 女, 河北肃宁人, 硕士, 工程师, 研究方向为乳制品加工与研发。

***通信作者:** 黄 威 (1981-), 女, 辽宁盘锦人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为乳制品加工与研发。

stability and low bioavailability of most active substances, this study further focused on the research breakthrough of efficient delivery systems and explored their cutting-edge application in protecting probiotics and encapsulating hydrophobic functional factors. Finally, this review outlined the challenges and future directions in this field, aiming to provide a solid theoretical basis for the development of the next generation of personalized and highly functional dairy products.

Keywords: precision nutrition; functional dairy product; bioactive peptide; delivery system; bioavailability

乳制品作为优质蛋白质与钙的重要来源,在人类营养学发展进程中占据着至关重要的地位。然而,在全球健康意识觉醒与消费需求升级的背景下,乳制品产业正面临从满足基础营养供给到提供个性化健康解决方案的深刻变革^[1]。我国出台《“健康中国2030”规划纲要》和《国民营养计划(2017—2030年)》等纲领性文件,明确提出向个体化精准营养转型的目标导向。这一转变的核心驱动力源于“精准营养”理念的兴起,旨在依据个体在基因、代谢及肠道菌群等方面的差异,提供量身定制的膳食干预策略^[2]。在此趋势下,乳制品因其普适性、良好的接受度及作为功能成分理想载体的特性,成为实践精准营养的绝佳平台。实现这一目标有赖于两大支柱:一是对乳源内蕴的生物活性组分进行深度功能挖掘与机制解析;二是克服这些活性成分在加工、储存及人体消化过程中的失活难题,由此需要创新递送体系为其提供高效保护与靶向输送。因此,本综述旨在系统梳理近年来以精准营养为导向的乳制品研究进展,重点聚焦于生物活性组分的功能发现及其递送体系的技术创新,以期为开发下一代个性化、高效能乳制品提供理论参考与发展方向。

1 乳源生物活性组分的深度解析与功能再发现

1.1 乳蛋白活性肽

乳蛋白是生物活性肽的重要来源,其蛋白序列中蕴藏着多种具有潜在功能的肽段。这些活性成分

在酶解或发酵过程中被释放,成为乳源生物活性的核心载体^[3]。上述肽段凭借分子量小、吸收性好、靶向性高及安全性佳等优势,超越了蛋白质本身的营养功能,根据其氨基酸组成、大小、序列和理化性质的不同^[4],展现出抗菌^[5]、抗氧化^[6]、抗高血压、阿片样活性、免疫调节等多重生理功效^[7, 8],使其功能从提供基础营养拓展至调节机体生理活性。

近年来,相关研究显著深化了学界对上述活性肽多样性和作用机制的认知。根据蛋白质来源的不同,此类活性肽可大致分为源自酪蛋白与乳清蛋白两大类,二者均展现出独特的功能特性。在源自酪蛋白的活性肽中,乳源抗菌肽是最具代表性的一类,根据来源通常可分为哺乳动物抗菌肽、植物抗菌肽和微生物抗菌肽^[9]。这类肽具有独特的分子结构,能够渗透细胞膜并进入细胞内,破坏细胞膜通透性,干扰细胞代谢过程,进而发挥病原微生物的抑制或杀灭作用^[10]。乳清蛋白也是活性肽的重要来源,其中 β -乳球蛋白和 α -乳白蛋白的活性肽是研究热点之一。通过定向酶解技术,徐晓梦^[11]和赵肖蓉^[12]已从 β -乳球蛋白中高效释放出具有显著血管紧张素转化酶抑制活性的短肽。这类肽段通过作用于肾素-血管紧张素系统和激肽-激肽系统,发挥降血压功能,其机制已在体外和动物实验中得到验证,显示出开发抗高血压功能性乳制品的良好前景。

此外,来源于牛乳的抗血栓食源活性肽已受到科研人员广泛关注,其通过抑制凝血酶和血小板聚集实现抗血栓作用。其中,源自酪蛋白的Casoplatelin肽为典型代表,它能够特异性地与纤维

蛋白受体结合，从而抑制血小板凝集。在商业化方面，日本森永乳业推出的“Casseptide”产品即为实现商品化的酪蛋白衍生抗血栓肽，其在功能性食品中已有明确应用。值得注意的是，多效性是乳蛋白活性肽的一个突出特征。许多肽段并非仅具有单一功能。例如，一些源自酪蛋白的水解物同时展现出抗氧化和抗高血压的双重功效。这种多效性使得乳蛋白水解物在应对复杂的代谢综合征如高血压、氧化应激、胰岛素抵抗相互关联方面具有独特优势。综上所述，对乳蛋白活性肽的深度解析与功能再发现，揭示了乳源蛋白超越其营养价值的巨大生物活性潜力。未来的研究趋势将集中于利用计算机辅助模拟预测活性序列结合高效色谱-质谱联用技术进行快速筛选与鉴定，并进一步通过细胞模型和临床干预试验深入阐明其分子作用机制，为开发靶向明确、功效确凿的精准化乳制品奠定坚实的科学基础。

1.2 乳脂球膜（MFGM）

MFGM是哺乳动物乳汁中的三层磷脂蛋白膜结构，其组成复杂且生物活性显著，主要包含脂质、蛋白质和碳水化合物等组分。该结构的主要功能在于包裹脂肪并将其输送至肠道，在消化液和肠道上皮细胞的作用下，脂肪被释放并进行消化吸收过程^[13]。近年来，MFGM因其在神经系统及肠道健康方面的多重生物活性成为研究热点。在婴幼儿发育领域，MFGM的关键作用日益凸显。临床研究表明，添加MFGM的配方奶粉可显著促进婴幼儿的脑神经发育。其机制在于，MFGM富含的鞘磷脂是神经髓鞘形成的关键结构性物质，其中的唾液酸化糖蛋白可参与突触发生和神经传导。随机对照试验证实，摄入MFGM的婴幼儿在认知评分、行为执行能力及视觉敏锐度方面表现更优^[14]。在成人健康方面，MFGM展现出维持认知功能的潜力。随着年龄增长，神经髓鞘完整性下降与认知衰退相关。补充MFGM可改善老年人群的记忆力与信息处理速度，其作用机制可能涉及鞘磷脂代谢产生的神经酰胺对神经元膜稳定性的维护，及其抗炎特性对神经炎症

的抑制。此外，MFGM中的蛋白成分对免疫调节与肠道发育具有重要作用。其蛋白成分能调节人体自身免疫力，如黄嘌呤脱氢酶可通过生成过氧化氢在体外抑制大肠杆菌和肠炎沙门氏菌的生长^[15]。乳铁蛋白是MFGM复合物中的重要功能组分，其在体外研究中展现出显著的轮状病毒抑制能力^[16]，此外，该蛋白还被证实可与肠上皮细胞特异性结合，并在体外模型中有效促进伤口愈合，提示其对婴幼儿肠道发育具有积极调节作用^[17]。正因这些独特的生物活性，富含乳铁蛋白的MFGM已被应用于针对肠道健康的功能性成人营养品中，如特医食品与膳食补充剂。综上所述，MFGM作为一种天然活性成分复合体，在生命早期脑发育、成人认知维护及肠道-免疫轴调节方面均具有显著价值与应用前景。当前研究正深入探索其不同组分的具体作用通路及协同效应，以推动相关产品向更精准、高效的方向发展。

1.3 母乳低聚糖（HMOs）

HMOs是人乳中一类结构多样、功能丰富的功能性低聚糖，在婴幼儿肠道健康的调节^[18]、免疫系统发育的促进^[19]、黏膜屏障功能的增强^[20]及免疫防御机制的建立中发挥着关键作用。在功能模拟方面，添加HMOs类似物的婴幼儿配方奶粉在临床研究中显示出接近母乳的生物学效应。其核心功能体现在三个方面：一是作为益生元，选择性促进双歧杆菌等有益菌增殖，优化肠道微生态；二是作为分子“诱饵”，竞争性抑制病原体在肠黏膜的黏附，降低感染风险；三是通过直接与间接途径调节肠道免疫，促进免疫系统平衡成熟^[21]。临床证据表明，摄入添加2'-岩藻糖基乳糖（2'-FL）和乳糖-N-新四糖（LNnT）的配方奶粉的婴幼儿，其肠道菌群组成、免疫指标均显著优于摄入普通配方奶粉的婴幼儿，且其感染性疾病发生率显著低于摄入普通配方奶粉的婴幼儿。然而，由于牛乳中HMOs含量极低，通过生物技术手段合成结构及功能相似的HMOs类似物，并将其应用于牛乳基婴幼儿配方奶粉及其他乳制品，已成为当前乳制品研发的前沿焦点。

在合成路径上，酶法与微生物发酵法是两种主

要的技术手段。酶法合成依赖于糖基转移酶等工具酶，以乳糖为底物，通过酶促反应精准构建特定HMOs分子，如2'-FL。该方法条件温和、产物结构明确，但成本较高。微生物发酵法通过合成生物学技术，将HMOs合成相关基因导入工程菌株，构建能够从廉价碳源从头合成HMOs的“细胞工厂”。该路径更适于规模化生产，已成为2'-FL等简单结构HMOs商业化的主流技术。目前，针对LNnT、3-岩藻糖基乳糖等更多样化HMOs的发酵工艺优化仍是研发重点。展望未来，HMOs类似物的研发正从单一组分向复配组合方向发展，以期更全面地模拟母乳的复杂组成与协同效应。同时，其应用场景也有望从婴幼儿配方奶粉延伸至成人营养领域，特别是在维持肠道屏障功能、调节免疫及支持脑肠轴健康方面展现出潜力。然而，复杂结构HMOs的低成本生物制造、不同组分功能的系统解析以及长期健康效应的临床验证，仍是该领域面临的重要挑战与未来研究方向。

2 高效递送体系在功能性乳制品中的应用

大多数生物活性物质需保持充足的数量和活力才能充分发挥健康价值。然而，在乳制品加工、储藏或食用过程中，会受到诸多因素的限制，如温度、湿度、pH值、光照、氧气、胃酸、肠道蠕动、土著微生物拮抗等不利条件，极大影响了生物活性组分的存活率，导致乳制品实际营养价值不足，从而降低了其中生物活性物质的生物利用度^[22~28]，因此提高生物活性物质的稳定性对充分发挥其生物利用度具有重要意义。

2.1 微胶囊技术

微胶囊技术是用包埋材料包裹目标物质，形成直径为几微米至几毫米、具有半透性或封囊膜的微型胶囊。该胶囊可保护益生菌免受高氧、酸性、低温等环境因素影响，保护细胞的生长能力并激活其在肠道中的代谢，被认为是目前应用最广泛且被证明高效的益生菌包埋方法之一^[29]。目前乳制品工业中使用最多、最广泛的壁材可以分为三大类，即

蛋白质类（乳清蛋白、酪蛋白、大豆分离蛋白和玉米蛋白等）、碳水化合物类（植物胶、变形淀粉、低分子糖及衍生物微生物多糖等）及新的生物聚合体（美拉德反应产物等）^[30]。目前，常用的微胶囊技术包括喷雾干燥法、挤压法、冷冻干燥法、乳化法等^[31]。

新型微胶囊的开发为益生菌在食品工业中的应用提供了新的机遇，同时带来了相应的挑战。为提高益生菌的利用度和食品的功能效果，益生菌微胶囊已被用于多种食品开发，如乳制品、肉制品、非乳饮料及烘焙制品等^[32]。栾倩等^[33]制备富含 ω -3脂肪酸的亚麻籽油和植物乳杆菌两种功能活性物质的复合微胶囊，显著提高了植物乳杆菌的存活率及在肠壁的黏附能力。Silva等^[34]首先通过凝胶化将嗜酸乳杆菌包封在海藻酸盐-明胶和海藻酸盐-明胶-低聚果糖微胶囊中，再将包封体系添加至酸奶中。结果表明，与游离益生菌相比，微胶囊化益生菌在胃肠道储存和传代过程中具有更高稳定性。复合微胶囊技术还被证实可成功应用于鱼油包埋中以减少不良气味，保持营养活性。Fadini等^[35]以喷雾干燥的微粒子为芯材，以植物脂肪与氢化棕榈油的混合物为壁材，采用喷雾干燥法制得无味、富含多不饱和脂肪酸的微胶囊化鱼油。

综上所述，研究人员利用微胶囊技术在乳制品发酵和后续加工工艺中应用，能有效提高益生菌存活率，提升产品效能，掩蔽不良气味，增强生物活性成分的稳定性。此外，益生菌与益生元的共包封进一步改善了微胶囊和乳制品的性能，为益生菌功能性食品开发提供了新的可能性^[36]。

2.2 乳蛋白胶体递送体系

蛋白质作为性能优异的天然材料，在生物活性物质递送系统的开发中展现出广阔的应用前景^[37, 38]，其中酪蛋白和乳清蛋白因其两亲性、自组装能力、良好的乳化性及生物相容性等特点，被广泛视为构建功能性成分递送体系的理想天然载体。基于乳蛋白胶体结构包埋疏水性功能性成分，已成为提高该类成分水溶性、环境稳定性及生物利用度的前沿策

略，并已成为食品胶体领域的研究热点。目前，已有多项基于蛋白质递送体系被开发出来，如乳液凝胶^[39]、纳米颗粒^[40]、乳液^[41]等。

2.2.1 基于酪蛋白胶束的递送系统

酪蛋白在乳中天然呈现为胶束形态，该胶束结构主要由 α s1-、 α s2-、 β -和 κ -酪蛋白通过疏水相互作用、氢键以及静电相互作用彼此交联，形成稳定的胶束聚集体^[42]。其独特的“海绵状”多孔结构，为疏水性功能成分的包埋提供了理想场所。当前研究主要通过重构酪蛋白胶束技术实现包埋：将疏水性活性物与分离的酪蛋白在特定条件下，通常涉及pH循环、温和加热或透析共同孵育，使其自发整合进胶束的疏水内核。研究表明，通过合理利用酪蛋白胶束结构对pH值、温度和离子的响应特性，可实现生物活性物质的有效加载与可控释放^[43]。基于此，酪蛋白凭借其独特的结构和功能性质，已被广泛应用于构建药物与功能性食品的递送体系，并作为高效凝胶及乳液稳定剂使用。

2.2.2 基于乳清蛋白纳米体系的递送系统

目前，利用乳清蛋白纳米体系封装生物活性物质的类型主要有纳米乳液、多重乳液、乳液凝胶、自组装和纳米颗粒^[37]。乳清蛋白在特定条件下可形成多样化纳米结构，展现出卓越的递送设计灵活性。乳清蛋白纳米颗粒通过反溶剂法、乳化-蒸发法或热诱导凝胶化后再微粉化等技术，可制备粒径可控（通常 <200 nm）的乳清蛋白纳米颗粒。上述颗粒能通过疏水相互作用、氢键或二硫键将疏水性分子包裹其中。其表面可通过修饰（如糖基化）进一步改善稳定性和黏膜黏附性，实现更精准的递送。Liu等^[44]采用pH循环法制备了乳清蛋白纳米颗粒，该颗粒对大豆异黄酮的封装效率可达90%，并具有肠道靶向递送特性，显著提高了大豆异黄酮的生物可及性。纳米乳液是液滴粒径通常在20~200 nm范围内的胶体分散体系，因其具有极高的稳定性、光学透明性及可显著提高生物利用度的特性，成为包埋与递送疏水性生物活性物质（如维生素、多酚、类胡萝卜素及精油）的理想平台。Flores-Andrade等^[45]

研究表明，乳清蛋白可有效乳化辣椒油树脂（类胡萝卜素来源），获得粒径约160 nm的类胡萝卜素并改善其生物利用度，且乳清蛋白通过静电相互作用与金属离子结合，减少了乳液中的脂质氧化，从而有效提高了类胡萝卜素的储存和化学稳定性。

尽管乳清蛋白纳米体系具有显著优势，但仍面临挑战，如载量与包封率的平衡、在复杂食品基质中的长期物理化学稳定性以及大规模生产的工艺重现性。未来研究将更侧重于理性设计：通过计算机模拟预测蛋白-配体相互作用以指导载体筛选；开发复合载体以增强环境响应性；并深入探究上述蛋白载体在胃肠道内的代谢情况及其与肠道菌群的相互作用，以期实现从“递送”到“精准增效”的跨越，为开发下一代高效功能性乳制品提供关键技术支撑。

3 挑战与未来展望

尽管基于精准营养的乳制品创新在活性组分解析与递送体系构建方面取得了显著进展，但将其从实验室成果全面转化为具备商业化可行性、功效明确且合规的个性化产品，仍面临技术、政策与市场的多重挑战。清晰认识这些瓶颈问题，是规划未来发展方向的重要前提。

3.1 当前面临的主要技术挑战

3.1.1 功能性成分的规模化生产与成本控制难题

我国乳源生物活性组分的产业化进程明显滞后于基础研究进展。尽管在实验室层面已成功制备多种功能性成分，但其规模化生产仍面临效率低、纯度不高和成本高昂的瓶颈。我国部分原料依赖进口，供应链稳定性与成本可控性面临潜在风险。例如，复杂HMOs的生物合成路径长、产物得率有待提升；而MFGM的工业化分离纯化工艺复杂，导致其价格昂贵，限制其在普及型产品中的应用。推动关键功能配料的本土化研发与绿色制造，已成为提升产业链自主可控能力的迫切任务。

3.1.2 政策合规与功能性声称待完善

我国对乳制品的功能性声称实施严格监管，

要求具备扎实的科学依据和人体临床试验数据。目前部分活性成分的健康机制研究多基于体外或动物试验，缺乏符合国内法规要求的人群干预研究。此外，个体差异导致的应答多样性进一步增加了功能验证的复杂性。如何在监管框架内构建被认可的证据体系，是实现产品合规上市与精准宣称的核心挑战。

3.1.3 消费者认知与市场教育挑战

目前消费者对乳制品的认知仍主要集中在基础营养范畴，对精准营养功能的理解和接受度存在较大差异。一方面，消费者对“功能性”期望值高，追求速效；另一方面，对基于个体差异的精准营养概念认知有限。这要求企业需投入大量资源进行市场教育，同时也要避免过度宣传引发的信任风险。

3.2 未来发展方向

3.2.1 加强核心技术攻关与本土供应链建设

应重点推进合成生物学、酶工程等前沿技术在活性成分制造中的应用，提升HMOs、MFGM等关键原料的国产化能力。同时，支持产学研合作，建立从菌种构建、工艺放大到绿色分离的全链条技术体系，逐步降低对进口原料的依赖，增强产业链安全与成本竞争力。

3.2.2 构建符合中国人群特征的循证体系与数据平台

推动开展大规模、长周期的人类随机对照试验，重点积累不同人群（如特定年龄、健康状况）服用功能性乳制品后的高级别循证医学证据。同时，结合人工智能与多组学技术，整合膳食摄入、生理指标、基因组、微生物组等多维度信息，构建健康效应预测模型，为个性化产品推荐提供科学依据。

3.2.3 理念升级：从“成分添加”到“系统整合”与“精准设计”

未来产品开发不应是简单的“1+1”式成分堆砌，而应基于对乳制品基质与功能成分相互作用的深刻理解，进行系统性设计。包括利用食品组学技术全面监控产品在整个供应链中的变化，以及探索不同活性成分之间的协同效应（如益生元HMOs与益生

菌、MFGM与活性肽的协同），以开发精准营养驱动下的功效叠加创新乳制品整体解决方案。

综上所述，基于精准营养的乳制品创新正处在从概念验证迈向产业化应用的关键转折点。面对技术、政策与市场的复合挑战，需把握技术突破、监管创新、市场教育和产业链协同四大关键维度，才能克服现有挑战，真正迎来个性化、高效能乳制品的新时代，为公众健康创造价值。

参考文献

[1] 李晨, 陈娜, 艾志松, 等. 乳制品消费趋势洞察[J]. 中国乳业, 2024 (8): 88-92.

[2] 宁华, 冯任南, 吴环宇, 等. 精准营养在肥胖干预中的创新实践: 从理论到应用[J]. 四川大学学报 (医学版), 2025, 56 (4): 893-899.

[3] 高升, 唐欢宇, 张树坤, 等. 乳蛋白活性肽研究进展[J]. 江苏农业科学, 2012, 40 (10): 13-16.

[4] 李思怡, 姜雨彤, 妥彦峰, 等. 微生物发酵法制备乳源生物活性肽研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44 (21): 312-321.

[5] Zanutto-Elgui M R, Vieira J C S, Prado D Z, et al. Production of milk peptides with antimicrobial and antioxidant properties through fungal proteases[J]. Food Chemistry, 2019 (278): 823-831.

[6] Srivastava U, Nataraj B H, Kumari M, et al. Antioxidant and immunomodulatory potency of Lacticaseibacillus rhamnosus NCDC24 fermented milk-derived peptides: A computationally guided in-vitro and ex-vivo investigation[J]. Peptides, 2022 (155): 170843.

[7] 滕波, 陈成, 徐速, 等. 乳蛋白活性肽功能性的研究[J]. 中国乳品工业, 2005, 33 (2): 16-18.

[8] 苏娜. 乳蛋白中降血糖生物活性肽的制备及鉴定[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.

[9] 朱一, 武俊瑞, 纪帅奇, 等. 乳源活性肽在功能性食品中的应用[J]. 中国乳品工业, 2024, 52 (10): 47-51, 63.

[10] Aronica P G A, Reid L M, Desai N, et al. Computational methods and tools in antimicrobial peptide research[J]. Journal of Chemical Information and Modeling, 2021, 61 (7): 3172-3196.

[11] 徐晓梦. 亚硒酸化β-乳球蛋白诱导乳腺癌细胞凋亡及其机制研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020.

[12] 赵肖蓉. 牛乳酪蛋白降血压肽的制备及活性研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2011.

[13] 曾欣怡. 人工乳脂球膜的制备及对脂肪和叶黄素酯消化特性影响研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2025.

[14] Timby N, Domellöf E, Hernell O, et al. Neurodevelopment,

- nutrition, and growth until 12 mo of age in infants fed a low-energy, low-protein formula supplemented with bovine milk fat globule membranes: A randomized controlled trial[J].*The American Journal of Clinical Nutrition*, 2014, 99 (4): 860-868.
- [15] 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.
- [16] Kvistgaard A S, Pallesen L T, Arias C F, et al.Inhibitory effects of human and bovine milk constituents on rotavirus infections[J].*Journal of Dairy Science*, 2004, 87 (12): 4088-4096.
- [17] Bu H F, Zuo X L, Wang X, et al.Milk fat globule-EGF factor 8/lactadherin plays a crucial role in maintenance and repair of murine intestinal epithelium[J].*The Journal of Clinical Investigation*, 2007, 117 (12): 3673-3683.
- [18] Berger B, Porta N, Foata F, et al.Linking human milk oligosaccharides, infant fecal community types, and later risk to require antibiotics[J].*MBio*, 2020, 11 (2): 10.1128/mbio.03196-19.
- [19] Boll E J, Lopez D V, Terne M, et al.Human milk oligosaccharides differentially support gut barrier integrity and enhance Th1 and Th17 cell effector responses in vitro[J].*Frontiers in Immunology*, 2024 (15): 1359499.
- [20] Slater A S, Hickey R M, Davey G P.Interactions of human milk oligosaccharides with the immune system[J].*Frontiers in Immunology*, 2025, 15: 1523829.
- [21] 万李, 杨龙浩, 罗国聪, 等.母乳低聚糖生物合成研究进展[J].*合成生物学*, 2025 (6): 1-16.
- [22] 朱云扬.高产核黄素乳酸菌口服递送系统的构建及改善核黄素缺乏症的研究[D].合肥: 合肥工业大学, 2024.
- [23] Zhu Y Y, Thakur K, Zhang W W, et al.Double-layer mucin microencapsulation enhances the stress tolerance and oral delivery of *Lactobacillus plantarum* B2[J].*Food Hydrocolloids*, 2023 (141): 108678.
- [24] Yang X Y, Wang C, Wang Q, et al.Armored probiotics for oral delivery[J].*Smart Medicine*, 2023, 2 (4): e20230019.
- [25] Yao M, Xie J, Du H, et al.Progress in microencapsulation of probiotics: A review[J].*Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19 (2): 857-874.
- [26] Zhang C, Li X, Liu Y N, et al.Utilization of microcapsule technology in foods[J].*Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2015, 15 (12): 9330-9340.
- [27] Zhang Q, Zhou Y, Yue W, et al.Nanostructures of protein-polysaccharide complexes or conjugates for encapsulation of bioactive compounds[J].*Trends in Food Science & Technology*, 2021 (109): 169-196.
- [28] Bao C, Jiang P, Chai J, et al.The delivery of sensitive food bioactive ingredients: Absorption mechanisms, influencing factors, encapsulation techniques and evaluation models[J].*Food Research International*, 2019 (120): 130-140.
- [29] Rashidinejad A, Bahrami A, Rehman A, et al.Co-encapsulation of probiotics with prebiotics and their application in functional/synbiotic dairy products[J].*Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62 (9): 2470-2494.
- [30] 熊丽娜, 都鹏飞, 楼佳佳, 等.微胶囊技术及其在乳品行业的应用研究进展[J].*现代食品*, 2022, 28 (3): 103-106, 117.
- [31] 田缘, 闫更轩, 段文靖, 等.益生菌微胶囊技术的优缺点及在食品中的应用[J].*食品研究与开发*, 2025, 46 (1): 217-224.
- [32] 高向新, 陈永福, 乌斯嘎勒.益生菌微胶囊的制备及其在食品中应用的研究进展[J].*食品工业科技*, 2023, 44 (3): 19-28.
- [33] 栾倩, 张浩, 鲍雨萍, 等. ω -3脂肪酸与益生菌复合微胶囊的构建及性能评价[A].中国作物学会油料作物专业委员会第八次会员代表大会暨学术年会综述与摘要集[C].青岛: 中国作物学会, 2018.
- [34] Silva K C G, Cezarino E C, Michelon M, et al.Symbiotic microencapsulation to enhance *Lactobacillus acidophilus* survival[J].*Food Science & Technology*, 2018 (89): 503-509.
- [35] Fadini A L, Alvim I D, Ribeiro I P, et al.Innovative strategy based on combined microencapsulation technologies for food application and the influence of wall material composition[J].*Food Science & Technology*, 2018 (91): 345-352.
- [36] Cassani L, Gomez-Zavaglia A, Simal-Gandara J.Technological strategies ensuring the safe arrival of beneficial microorganisms to the gut: From food processing and storage to their passage through the gastrointestinal tract[J].*Food Research International*, 2020, 129: 108852.
- [37] 胡文梅, 李慧雪, 孙亚鹏, 等.乳清蛋白纳米载体递送生物活性物质研究进展[J].*中国食品学报*, 2024, 24 (11): 424-437.
- [38] Walstra P.Studying food colloids: Past, present and future[J].*Food Colloids, Biopolymers and Materials*, 2003 (284): 391-400.
- [39] Li M, Feng L, Xu Y, et al.Rheological property, β -carotene stability and 3D printing characteristic of whey protein isolate emulsion gels by adding different polysaccharides[J].*Food Chemistry*, 2023 (414): 135702.
- [40] Dai L, Li R R, Wei Y, et al.Fabrication of zein and rhamnolipid complex nanoparticles to enhance the stability and in vitro release of curcumin[J].*Food Hydrocolloids*, 2018 (77): 617-628.

- [41] Huang H, Belwal T, Aalim H, et al. Protein-polysaccharide complex coated W/O/W emulsion as secondary microcapsule for hydrophilic arbutin and hydrophobic coumaric acid[J]. Food Chemistry, 2019 (300) : 125171.
- [42] Broyard C, Gaucheron F. Modifications of structures and functions of caseins: A scientific and technological challenge[J]. Dairy Science & Technology, 2015, 95 (6) : 831-862.
- [43] 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.
- [44] Liu Q, Sun Y, Zhang J, et al. Physicochemical and in vitro digestion properties of soy isoflavones loaded whey protein nanoparticles using a pH-driven method[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022 (82) : 103209.
- [45] Flores-Andrade E, Allende-Baltazar Z, Sandoval-Gonzalez P E, et al. Carotenoid nanoemulsions stabilized by natural emulsifiers: Whey protein, gum Arabic, and soy lecithin[J]. Journal of Food Engineering, 2021 (290) : 110208.