

乳脂肪球膜对人体健康影响的研究进展

寇春雨，时 阳，王 帅，粘靖祺，车佳玲

（北大荒完达山乳业股份有限公司，黑龙江哈尔滨 150036）

摘 要：乳脂肪球膜（MFGM）是天然存在于人乳和牛乳中的保护性膜结构，可通过抑制脂肪团聚和氧化以维持乳液的稳定。MFGM的核心成分由多种极性脂质与功能蛋白组成，具体组成受奶牛日粮组成、品种和健康状态等内源生理因素和外源生产加工因素的影响，导致不同来源的MFGM成分间存在显著差异。近年来，随着研究者对MFGM生理功能与人体健康益处方面的深入研究，尤其是在生命早期脑发育、认知功能、骨骼肌和心脏代谢方面的健康作用被逐步揭示，使MFGM成为营养与食品科学领域的研究热点。本文深入探讨了MFGM的营养与功能特性，重点阐述了最新临床证据，并对MFGM作为功能性食品核心配料的开发前景与发展方向进行展望。

关键词：乳脂肪球膜（MFGM）；人体健康；生理功能；结构；分离纯化

文章编号：1671-4393（2026）05-0111-09

DOI:10.12377/1671-4393.26.05.16

Advances in Research on the Impacts of Milk Fat Globule Membrane on Human Health

KOU Chunyu, SHI Yang, WANG Shuai, NIAN Jingqi, CHE Jialing
（Beidahuang Wondersun Dairy Company Limited, Harbin Heilongjiang 150036）

Abstract: Milk Fat Globule Membrane (MFGM) is a naturally occurring protective membrane structure present in both human and bovine milk, which maintains the stability of milk emulsions by inhibiting fat aggregation and oxidation. The core components of MFGM are composed of a diverse array of polar lipids and functional proteins. Its specific composition is modulated by both endogenous physiological factors (including the dietary composition, breed, and health status of dairy cows) and exogenous production and processing factors, resulting in significant compositional heterogeneity among MFGM preparations from different sources. In recent years, with

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：寇春雨（1986-），男，黑龙江双城人，硕士，高级农艺师，研究方向为农产品生产加工与营销；
时 阳（1976-），女，黑龙江五常人，硕士，高级工程师，研究方向为乳品研发及工艺；
王 帅（1990-），男，黑龙江哈尔滨人，硕士，高级工程师，研究方向为乳品及特殊食品开发；
粘靖祺（1987-），女，吉林敦化人，硕士，高级工程师，研究方向为乳品及特殊食品开发；
车佳玲（1996-），女，黑龙江绥化人，硕士，工程师，研究方向为食品加工与安全。

in-depth research on the physiological functions of MFGM and its benefits to human health, especially the gradual elucidation of its health-promoting effects on early-life brain development, cognitive function, skeletal muscle and cardiac metabolism, MFGM has emerged as a prominent research hotspot in the field of nutrition and food science. This review provided an in-depth discussion of the nutritional and functional properties of MFGM, highlighted the latest supporting clinical evidence, and offered an outlook on the development prospects and future application directions of MFGM as a core functional ingredient in functional foods.

Keywords: milk fat globule membrane (MFGM) ; human health; physiological functions; structure; separation and purification

牛乳中脂肪含量通常为3.5%~5.0%，其中绝大部分以脂肪球形态分散于乳相体系中；乳脂肪球内部的非极性脂质核心由甘油三酯构成，其外层被乳脂肪球膜（Milk Fat Globule Membrane, MFGM）结构包裹。MFGM作为牛乳中天然存在的内源性乳化剂，能有效抑制乳脂肪球的絮凝、聚结及酶促水解反应的发生^[1]。从MFGM的组成特征来看，其核心成分为多种极性脂质与功能蛋白，因此具备多种生物学功能与营养活性。MFGM对人体健康有多重有益作用，包括促进生命早期脑发育、提升认知功能、增强骨骼肌健康和改善心脏代谢健康等。尽管MFGM的营养与功能价值已得到广泛关注，但其相关基础研究与产业化应用仍面临诸多挑战，如原料来源与加工工艺差异造成的组分异质性、全组分精准表征技术与产品标准化体系的缺失，以及MFGM组分定义与专业术语的行业共识尚未形成等问题^[2, 3]。上述问题不仅限制了MFGM研究结果的准确性与科学阐释，还降低了不同研究结果间的可重复性；同时，对临床研究结论的可靠性影响也尤为显著。本文系统梳理了牛乳源MFGM在组分解析与功能验证方面的最新研究进展，重点阐述了MFGM在人体健康方面的相关研究结果。同时，本文对MFGM作为功能性食品核心活性配料的开发前景与未来发展方向进行了系统分析与展望。

1 MFGM的来源、组成与结构

MFGM的组成特征与精细结构，近年来已成为

乳品科学与营养健康领域的研究热点。尽管MFGM在牛乳中含量较低，但其活性组分可在乳品加工链条的多类副产物与原料中实现高效富集。目前研究与产业化应用中常用的富集来源主要包括酪乳、稀奶油及乳清蛋白磷脂浓缩物^[1]。从结构特征来看，MFGM为厚度10~50 nm的三层膜状结构，包裹于乳脂肪液滴外部；其内侧为单层磷脂膜，外侧为双层生物膜^[3, 4]。MFGM的化学组成复杂，涵盖多种功能组分，主要包括极性脂质（如甘油磷脂、鞘脂等）、中性脂质和固醇类物质，以及多种膜特异性蛋白^[5, 6]。分离制备MFGM的脂质组成情况请见表1。MFGM蛋白质组具有高度复杂性，多项研究证实，在人乳与牛乳的MFGM中，鉴定出所含蛋白质种类已逾百种^[2, 7, 8]。其中，占主导地位的蛋白包括：黏蛋白1（MUC1）、分化簇36（CD36）、嗜

表 1 乳脂肪球膜脂质组成表^[9]

Table 1 Composition of Lipid Components of MFGM^[9]

序号	脂质成分类别	相对含量（%）
1	甘油三酯	62
2	卵磷脂	36
3	磷脂	26~31
4	PE	27
5	神经鞘磷脂	22
6	PI	11
7	甘油二酯	9
8	PS	4
9	溶血 PC	2
10	游离脂肪酸	0.6~6.0
11	甾醇类	0.2~2.0

乳脂蛋白（BTN）、黄嘌呤氧化酶/黄嘌呤脱氢酶（XO/XDH）、脂肪分化相关蛋白（ADPH），以及脂肪酸结合蛋白（FABP）等^[3]。

牛乳中MFGM组成受奶牛内源生理因素的显著调控，主要包括日粮组成、健康状态、品种及泌乳阶段等。此外，乳品加工环节的外源因素也会进一步影响MFGM原料的组分构成与回收率，其中，起始原料（全脂牛乳或稀奶油）的选择与加工工艺条件差异是最关键的影响因素^[10]。

2 MFGM的分离制备、安全性评价及特性应用

2.1 MFGM 的分离制备

MFGM可从生牛乳中分离提取。步骤为先将乳脂肪球分离、洗涤，再通过机械搅拌或化学处理释放脂肪球中的MFGM，随后通过超速离心或微滤进行浓缩。在商业化生产中，黄油加工的副产物酪乳（BM）因天然富集MFGM片段，常被用作规模化提取MFGM的起始原料。但BM体系中存在大量水溶性物质（如乳清蛋白、乳糖等），且BM中的MFGM通过钙离子易与酪蛋白相互结合，由此为后续纯化工艺带来技术挑战。微滤技术也可用于分离MFGM，其常用膜孔径通常为0.1~0.2 μm，但由于酪蛋白胶束与MFGM碎片粒径尺寸相近，导致难以通过微滤实现二者的有效分离。研究表明，BM添加柠檬酸盐处理后经0.1 μm滤膜过滤，可制备MFGM浓缩物，该浓缩物约含60%蛋白质和35%脂类^[11]。此外，通过超临界二氧化碳流体萃取工艺处理微滤所得富含MFGM的浓缩物后，去除其中非极性脂类物质，可获得较高浓度的MFGM蛋白，但该法不能分离蛋白质与磷脂^[12]。因此，通常采取酶解法降解酪蛋白，或添加柠檬酸钠等螯合剂破坏酪蛋白质结构，以实现MFGM的高效分离。相比之下，乳清中的MFGM含量较低，但不含酪蛋白，也可直接通过膜分离技术进行回收，再通过喷雾干燥制得富含MFGM的粉状产品^[13]。目前，在工业化规模下实现高纯度MFGM分离物的连续稳定生产仍存在诸多技术瓶颈，针对MFGM单一组分的规模化分离纯化难度更

高。尽管已有多款市售MFGM强化配料，但其核心功能组分的相对含量存在显著差异^[14]。从牛乳中分离MFGM及其主要组分的工艺流程如图1所示。

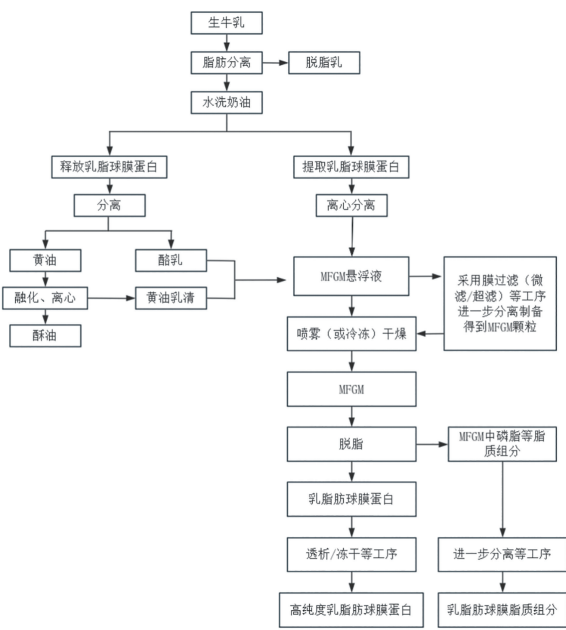


图1 牛乳中分离MFGM及其主要组分的工艺流程图^[13]
Figure 1 Process Flow Diagram for Isolating MFGM and Its Major Components from Bovine Milk^[13]

2.2 MFGM 的安全性评价

大量临床研究与毒理学评价证实，牛乳源MFGM具有良好的食用安全性与人体耐受性^[15]。多项随机对照试验显示，婴幼儿、儿童和成人长期补充MFGM均未出现明显不良反应，血常规、肝肾功能等关键安全性指标均在正常范围，无剂量依赖性毒性表现^[16-18]。在致敏性方面，MFGM目前未发现其存在特有致敏原，整体致敏的可能性较低，但牛乳过敏高风险人群建议在临床评估下谨慎使用^[19]。

MFGM已获得全球主要权威机构的安全性认可。欧盟已确认商品化MFGM原料可安全用于婴幼儿配方食品及普通食品，无需新食品原料审批；美国FDA将多款MFGM原料认定为GRAS物质，允许其应用于婴儿配方粉等各类食品；我国于2021年批准乳脂肪球膜蛋白为新食品原料并明确其使用范围^[20]，为其安全应用提供了法规支撑。由此可见，MFGM在推荐使用剂量内具有安全性良好、耐受性

高,致敏风险低的特点,且已获得国际主要国家监管机构和中国法规的认可,具备在乳品等健康食品中广泛应用的安全基础。

2.3 MFGM 的特性应用

MFGM中富含高丰度磷脂成分,该组分可显著降低乳液体系的界面张力,从而赋予MFGM优异的乳化特性。基于其良好的界面活性,MFGM的应用研究主要集中于两大应用方向:一是乳液体系的稳定调控,二是脂质体递送载体的构建。MFGM可以作为乳化剂与 β -胡萝卜素形成乳状液,改善 β -胡萝卜素在水中的分散性和稳定性差的问题,从而提高生物利用度^[21]。采用微流化、超声处理、膜技术等可制备基于MFGM的脂质体,该载体体系可为包埋的生物活性物质提供良好的保护屏障,实现在胃肠道消化过程中的可控释放^[22]。Liu等^[23]通过体外模拟消化试验证实,MFGM脂质体的包埋作用可有效抑制乳铁蛋白在胃部的降解,同时减缓其在肠道环境中的水解速率,该研究为新型膳食铁强化递送体系的开发提供了重要理论支撑与技术参考。

MFGM的生物活性与健康效应与其特征性极性脂质、功能蛋白质的含量和组成息息相关。不同的生产工艺会对MFGM的组成和精细结构产生影响。关键工艺条件,如分离、热处理、均质及非热处理等,主要是在加工过程中涉及温度变化的环节,均会影响MFGM的结构和功能特性^[24]。例如,在膜分离工艺中,利用不同孔径(30、50、100 kDa)的膜从黄油血清中富集MFGM蛋白,相较于30 kDa和50 kDa孔径的膜,100 kDa孔径的膜对MFGM蛋白的富集效果更显著^[25]。此外,超巴氏灭菌和超高温灭菌处理可降低MFGM的蛋白质含量,而喷雾干燥对MFGM的蛋白质含量和丰度影响较小^[26]。

目前,不同研究中所使用的MFGM原料,因生产工艺不同,其磷脂组成、功能蛋白等核心组分存在差异,导致研究结果缺乏横向可比性。与此同时,行业内对MFGM组分的术语定义存在模糊性,同时缺乏针对MFGM原料及产品的标准化组成规范。MFGM产品的组分异质性与行业共识的缺失,

已成为阐明MFGM健康效应机制、推动相关临床研究进展的重要制约因素。

3 乳脂肪球膜在生命周期中的预期健康益处

早期关于MFGM健康益处的研究主要聚焦于对婴儿大脑发育的促进作用,尽管相关研究范围已扩展至生命早期的其他健康结局,如免疫功能调控与胃肠道健康维护等方面^[3, 27]。在传统婴儿配方食品生产过程中,多以植物油替代牛乳乳脂,乳脂分离环节会将包裹于乳脂肪球外层的MFGM同步去除。因此,母乳喂养的婴幼儿可摄入足量的内源性MFGM组分,这被认为是导致配方奶喂养与母乳喂养婴幼儿健康结局差异的重要因素之一^[3, 27]。近年来,研究发现,MFGM及其特征性磷脂组分能为老年人群带来多维度的健康益处。当前全球多数国家和地区的人均预期寿命持续延长,但健康寿命并未实现同步增加,进而导致老年人群带病生存、失能生存的年限显著增加。随着“营养大于治疗”的观念日益普及,基于营养补充的生活方式调控策略,及其在延长人群健康预期寿命方面的潜在价值,已促使MFGM成为研究者广泛关注的焦点。

3.1 生命早期脑发育

目前,在婴儿配方食品中强化MFGM已成为行业关注的研发方向。MFGM及其功能组分(尤其是鞘脂与磷脂)在调控大脑发育中的作用,已通过大量动物实验与体外试验得到充分验证^[27]。尽管近年来相关临床研究论文的发表数量显著增长,但目前可支撑结论的高质量临床证据仍相对有限。

在一项关于婴儿早期营养的临床研究中,研究者将0~2月龄的健康足月婴儿随机分为标准配方喂养组与试验配方喂养组,持续营养干预至18月龄;其中试验组额外强化了MFGM、长链多不饱和脂肪酸(PUFAs)等营养成分^[28]。研究表明,经多因素线性回归校正家庭社会经济地位、母亲年龄、儿童性别、孕期吸烟情况等预设混杂因素后,试验组儿童6岁时采用K-BIT量表测得的总IQ评分(95% CI: 1.41~11.83, $P=0.013$)、词汇维度评分(95% CI:

1.79~12.45, $P=0.009$), 显著高于纯母乳组; 两组儿童执行功能、记忆力等其余认知维度得分无统计学显著差异^[28]。这说明MFGM强化配方对婴幼儿的生长发育可能存在长期的有益影响; 同时, 磁共振成像研究结果显示, 试验配方组受试者6岁时的脑结构也发生了有益改变。Cerdó等^[29]研究进一步证实, 采用强化MFGM的配方奶粉对婴儿进行生命早期营养干预, 可有效提升其肠道菌群丰度, 并通过菌群-肠-脑轴调控婴儿生命早期脑神经的发育。近年来, 生命早期MFGM补充与肠道微生物的协同关系, 已成为研究者关注的热点问题^[30]。

尽管现有循证医学证据已充分证实, 婴幼儿期补充MFGM具有良好的人群安全性, 并可对婴幼儿大脑发育产生明确的短期获益效应, 但截至目前, 该研究领域仍存在诸多尚未解决的科学问题与研究设计局限性, 亟待后续进一步完善与突破。一方面, 现有多数临床研究未完整、明确披露干预所用配方食品的详细组分信息, 尤其是MFGM原料的来源、具体组成特征与干预添加剂量等核心关键信息, 导致研究结果的可重复性与可验证性不足; 另一方面, 绝大多数研究中所采用的试验配方, 除MFGM外还同步强化了乳铁蛋白、PUFAs、益生元等多种其他功能性营养组分, 无法单独剥离并明确MFGM的独立健康效应, 这一缺陷也进一步降低了不同研究之间结果的可比性与循证整合分析价值。此外, 现有大部分研究未对可能影响目标健康结局的各类混杂因素进行充分校正与控制, 尤其是脑神经发育相关的结局指标, 其本身极易受到生命早期其他营养因素与各类非营养因素的联合干扰, 若混杂因素控制不当, 将直接影响研究结论的内部真实性与可靠性。

3.2 认知功能

磷脂是构成哺乳动物脑组织细胞膜的核心成分, 既是调控生命早期大脑正常发育的关键功能性营养物质, 也在机体全生命周期的脑功能稳态维持过程中发挥着无可替代的生物学作用。研究证实, 随着年龄增长出现的脑组织内源性磷脂水平耗竭,

与机体认知功能的进行性衰退存在显著相关性; 磷脂缺失介导的认知损伤表型, 既包括生理性脑老化伴随的认知功能改变, 也涵盖轻度认知障碍、痴呆等病理性神经退行性疾病的核心病变特征^[31]。正是基于这一关键作用机制, 天然富集特征性磷脂组分的MFGM, 逐渐成为预防和延缓年龄相关性认知衰退的潜在营养干预靶点, 受到营养学界与神经科学界研究者的广泛关注。多项基于啮齿类动物模型的研究证实, MFGM可发挥多维度神经保护生物学功效: 包括改善模型动物海马区胰岛素抵抗状态与突触信号传导功能^[32], 提升其空间工作记忆能力^[33]; 同时可调控海马组织的微小RNA表达谱^[34], 减弱情境恐惧条件反射介导的负性情绪记忆巩固^[35], 重塑突触小体膜的脂质组成特征^[33], 并对突触发生、认知功能调控相关信号通路的关键蛋白表达发挥靶向调控作用^[36]。

一项针对65岁以上老年人群的研究显示, 受试者每日摄入200 mL富含乳脂肪球的乳饮料, 持续干预14周后, 试验组的言语情景记忆能力得到显著改善^[37]。除老年人群外, MFGM对中青年人群的认知功能与情绪调控也存在潜在有益作用。一项随机双盲安慰剂对照试验结果显示, 对25~60岁存在中度压力的健康成年人, 连续12周补充MFGM, 其试验组知觉压力量表(PSS-10)评分为14.55分(高、低剂量组合计), 显著低于安慰剂组的16.4分($P=0.002$), 表明600 mg/d和1 200 mg/d的MFGM补充剂量均可达到有效的应激调控作用^[38]。而另一项针对健康成年男性的随机对照试验发现, 在连续6周摄入乳磷脂饮料后可轻度改善受试者在心理社会压力下的反应, 但对工作记忆未观察到显著改善^[39]。

3.3 骨骼肌健康与肌少症

肌少症是一种以骨骼肌质量进行性流失、肌肉力量显著下降、躯体功能减退为核心特征的进行性、全身性骨骼肌疾病, 会显著升高跌倒、骨折等不良健康结局的发生风险^[40]。研究发现, 肌肉力量下降是引发肌少症不良结局的核心因素^[40]。因此, 研究者从单纯关注肌肉量流失, 逐步转向肌肉品

质、神经控制功能衰退等方面。换言之,即使肌肉量未发生显著改变,上述因素也可直接导致肌肉功能下降^[41]。有研究认为,膳食补充MFGM来源的鞘脂与磷脂,或可延缓衰老进程中的神经肌肉退变,尤其与运动干预联合应用时,其保护效应更为显著^[10, 42]。已有多项研究为该理论提供了实验支撑,在衰老小鼠模型中,MFGM补充联合运动干预可显著抑制年龄相关性神经肌肉结构与功能衰退^[43];后续研究也进一步证实,该干预方式可改善老年小鼠的运动协调能力与体能表现^[44]。

一项在日本开展、针对步行能力下降的高龄女性(年龄 ≥ 79 岁)的随机对照试验表明,在为期3个月的干预中,每日补充1 g MFGM并未为受试者参与的阶梯训练带来显著的额外益处,这一结果显示,对于老年人群的步行功能改善,试验剂量下的MFGM补充未实现提升的效果^[45]。Suzukamo等^[46]研究探讨了联合补充方案的效果。试验以60~74岁、伴有轻度膝关节或腰痛症状的成年人为对象,在为期8周的干预期间,让受试者每日联合补充1.0 g MFGM与1.5 g氨基葡萄糖,结果表明,干预组受试者的关节活动度、障碍行走速度以及爬楼梯速度等多项身体机能指标均获得显著改善,分析是由于MFGM对神经肌肉功能的改善作用以及氨基葡萄糖对关节健康的促进作用。Ota等^[47]开展的随机双盲安慰剂对照试验,纳入98名20~49岁健康成人,予以4周每日MFGM补充联合标准化抗阻训练,结果显示,补充MFGM可显著提升受试者下肢肌肉力量、爆发力与核心耐力,两组间肌肉量无统计学差异,证实MFGM可通过非肌肥大途径改善人体神经肌肉功能。

综合现有研究证据发现,膳食补充MFGM对机体运动能力的提升作用,主要通过改善神经与肌肉的功能适应性实现,而非通过增加骨骼肌量或提升机体最大肌力发挥作用。基于这一特征,未来开展的临床试验研究,可将肌肉发力速率以及基于表面肌电图测定的运动单位募集模式等指标作为主要结局指标,从而更为精准地揭示MFGM对神经与肌肉功能的内在调控效应。此外,鉴于乳源蛋白已被证

实,无论在运动干预状态还是静息状态下,均具有促进骨骼肌量增长、提升肌肉力量的明确作用,因此开发天然富集MFGM的高蛋白全乳品,或可为延缓年龄相关性骨骼肌量流失、肌力下降与神经肌肉控制功能衰退,提供多靶点的综合性营养干预方案。

3.4 心脏代谢健康

MFGM及其功能组分对心脏代谢具有潜在健康调控作用,这使其成为乳品营养与慢性代谢性疾病防控领域新的研究热点。MFGM中的特征性鞘磷脂可通过两条核心途径抑制胆固醇的肠道吸收,一方面是降低肠腔胶束相中胆固醇的溶解度,减少胆固醇的跨肠上皮吸收^[48];另一方面是可与胰脂肪酶结合并抑制其酶活性,减少膳食中脂质的消化分解,进一步降低胆固醇与脂质的吸收效率^[48]。动物模型试验证实,牛乳源鞘磷脂可显著提升肠道中双歧杆菌属的相对丰度,进而调控肠道菌群结构,而双歧杆菌属与改善人体代谢密切相关^[49]。

近期,一项针对6项人体随机对照试验的系统性综述和荟萃分析研究了膳食补充MFGM磷脂对成人血脂的影响^[50]。该荟萃分析结果显示,不同来源的MFGM磷脂干预,均可显著降低受试者的血清总胆固醇与低密度脂蛋白胆固醇水平^[50]。另一项纳入10项随机对照试验的荟萃分析也证实,外源性补充分离纯化的鞘磷脂,对成年人群的代谢相关指标具有显著改善作用。该研究明确提出,鞘磷脂补充干预不仅能显著降低人群的总胆固醇与低密度脂蛋白胆固醇水平,还可同时提升高密度脂蛋白胆固醇水平^[51]。其中Meta分析结果显示,总胆固醇降低0.25 mmol/L (95%CI: -0.42~-0.08, $P=0.004$)、低密度脂蛋白胆固醇降低0.2 mmol/L (95%CI: -0.35~-0.05, $P=0.008$)、高密度脂蛋白胆固醇提升0.02 mmol/L (95%CI: -0.05~0.09, $P=0.55$)^[51]。尽管上述研究结果均显示,MFGM及其活性成分对人体心脏代谢相关健康指标存在积极调控作用,但所纳入试验人群以健康个体为主,因此研究结果无法外推至慢性心脏代谢疾病治疗患者群体。MFGM及其成分可能具有一定的预防效应,但多数随机对

照试验周期较短。

4 乳脂肪球膜在乳品中的产业化进展

截至2026年，全球MFGM终端产品市场规模超4.8 亿美元，年复合增长率约12.5%，已形成以婴幼儿配方食品为重点应用领域，中老年营养食品和运动营养品为新兴增长赛道的全生命周期产业化格局^[52]。婴幼儿配方食品是MFGM商业化最成熟的领域，欧美高端市场渗透率超65%，美赞臣、雀巢等国际品牌早已推出相应产品，全球上市相关产品超550 款^[2]。2021年，中国MFGM获批新食品原料^[20]；2024年，中国首个关于MFGM原料的行业标准正式实施^[53]。在中老年营养食品方面，雀巢、雅培等国际品牌率先布局，MFGM在欧美医用营养市场也达到较高的市场渗透率；中国也陆续上市相关产品，成为高端中老年营养重要的创新方向之一。虽然多项研究表明，MFGM对人体运动健康具有积极影响，但在运动营养品方面，MFGM仍处于产业化阶段早期，尚未形成规模化的市场布局。基于当前发展趋势研判，MFGM的应用将逐渐从高端婴配产品向中老年、运动营养和大众乳品等全品类渗透。同时，其市场覆盖将从高端市场向中端市场下沉，市场规模有望将持续增长。

5 结语

近年来，MFGM成为食品科学、营养学、老年医学与运动科学等多领域交叉研究的焦点。对MFGM进行高值化开发与商业化应用，不仅能充分发挥其营养与功能价值，也有助于推动乳品产业链升级与副产物的增值利用。当前MFGM的研究与产业化推广主要面临两大瓶颈问题，一是MFGM组分易受奶牛生理、原料及加工工艺等多种因素影响，且调控机制尚不明确；二是行业内在术语定义、组分表征与质量标准方面缺乏统一共识。上述问题制约了关于MFGM健康效应机制的深入研究，也导致部分研究结果难以重复，循证证据质量参差不齐。现有临床试验研究在MFGM的配料来源、补充剂

量、干预周期及健康结局指标等方面存在显著差异，直接影响了研究结果的可比性。

未来亟需开展基于中国人群的大样本、长期随访、设计严谨的随机对照试验研究，系统揭示MFGM在全生命周期的健康效应，并确定不同年龄段MFGM的最适补充剂量；同时，需明确并规范研究中所用MFGM的来源、组分特征与干预剂量，为后续研究提供可重复、可对比的良好试验参考。此外，需推动建立MFGM组分的国家标准或行业共识。而关于MFGM对人体健康效应的作用机理、标准化制备技术开发与功能性产品创制等方面的深度研究，仍将是未来乳品营养与功能性食品领域极具价值的研究方向。

参考文献

[1] Oliveira D, O’ Mahony J A M S, Paul L H, et al.Composition, fractionation, technofunctional properties and applications of milk fat globule membrane-derived material.Advanced Dairy Chemistry, 2020 (2) : 169-195.

[2] France T C, Kennedy E, O’ Regan J, et al.Current perspectives on the use of milk fat globule membrane in infant milk formula[J].Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2025, 65 (28) : 5534-5549.

[3] Wilmot L, Miller C, Patil I, et al.The relevance of a potential bioactive ingredient: the milk fat globule membrane[J].Journal of Dairy Science, 2025, 108 (4) : 3109-3134.

[4] 杨柳, 陈庆学, 马新明, 等.乳脂肪球膜的结构特性及其体内代谢研究进展[J].食品科学, 2024, 45 (8) : 292-302.

[5] 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.

[6] Lopez C, McSweeney P L H, Fox P F, et al.Intracellular origin of milk fat globules, composition and structure of the milk fat globule membrane highlighting the specific role of sphingomyelin[J].Advanced Dairy Chemistry, 2020 (2) : 107-131.

[7] 胡亚卓, 王玉树, 刘成龙, 等.乳脂肪球膜与婴幼儿健康研究进展[J].现代食品, 2023, 29 (19) : 53-56.

[8] 齐彪, 段晓然, 张谊, 等.乳脂肪球膜的结构,功能及其影响因素[J].中国奶牛, 2023 (2) : 52-55.

[9] MacGibbon A K H, McSweeney P L H, Fox P F, et al.Composition and structure of bovine milk lipids[J].Advanced

- dairy chemistry, 2020 (2) : 1-32.
- [10] Abd El-Salam M H, El-Shibiny S. Milk fat globule membrane: an overview with particular emphasis on its nutritional and health benefits[J]. International Journal of Dairy Technology, 2020, 73 (4) : 639-655.
- [11] Corredig M, Roesch R R, Dalgleish D G. Production of a novel ingredient from buttermilk[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86 (9) : 2744-2750.
- [12] Astaire J C, Ward R, German J B, et al. Concentration of polar MFGM lipids from buttermilk by microfiltration and supercritical fluid extraction[J]. Journal of Dairy Research, 2003, 86 (7) : 2297-2307.
- [13] 王聪, 费旭, 王秀英, 等. 牛乳脂肪球膜组分分离鉴定及其功能性研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44 (3) : 385-392.
- [14] Brink L R, Herren A W, McMillen S, et al. Omics analysis reveals variations among commercial sources of bovine milk fat globule membrane[J]. Journal of Dairy Science, 2020, 103 (3) : 3002-3016.
- [15] 中国食品科学技术学会, 乳脂肪球膜及其配料的科学共识[J]. 中国食品学报, 2022 (4) : 471-476.
- [16] Billeaud C, Puccio G, Saliba E, et al. Safety and tolerance evaluation of milk fat globule membrane-enriched infant formulas: A randomized controlled multicenter non-inferiority trial in healthy term infants[J]. Clinical Medicine Insights: Pediatrics, 2014 (8) : 51-60.
- [17] Veereman-Wauters G, Staelens S, Rombaut R, et al. Milk fat globule membrane (INPULSE) enriched formula milk decreases febrile episodes and may improve behavioral regulation in young children[J]. Nutrition, 2012, 28 (7) : 749-752.
- [18] Norris T, Souza R, Xia Y Y, et al. Effect of supplementation of complex milk lipids in pregnancy on fetal growth: Results from the complex lipids in mothers and babies (CLIMB) randomized controlled trial[J]. The Journal of Maternal-fetal & Neonatal Medicine: the Official Journal of the European Association of Perinatal Medicine, the Federation of Asia and Oceania Perinatal Societies, the International Society of Perinatal Obstetricians, 2019: 1-10.
- [19] Billeaud C, Puccio G, Saliba E, et al. Safety and Tolerance Evaluation of Milk Fat Globule Membrane-Enriched Infant Formulas: A Randomized Controlled Multicenter Non-Inferiority Trial in Healthy Term Infants[J]. Clin Med Insights Pediatr, 2014 (8) : 51-60.
- [20] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 关于蝉花子实体(人工培植)等15种“三新食品”的公告[EB/OL]. <https://www.nhc.gov.cn/sps/c100088/202101/a677d9fc167241d4a49d4a22329d774e.shtml>, 2021-01-07.
- [21] 李琦. 以MFGMP为乳化剂的富含 β -CE稳定乳状液的形成及其体外消化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [22] Arranz E, Corredig M. Invited review: milk phospholipid vesicles, their colloidal properties, and potential as delivery vehicles for bioactive molecules[J]. Journal of Dairy Science, 2017, 100 (6) : 4213-4222.
- [23] Liu W, Ye A, Liu W, et al. Singh H: Stability during in vitro digestion of lactoferrin-loaded liposomes prepared from milk fat globule membrane-derived phospholipids[J]. Journal of Dairy Science, 2013, 96 (4) : 2061-2070.
- [24] 时佳, 张海娇, 赵锋, 等. 乳脂肪球膜结构、功能特性及其应用研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2025, 48 (1) : 46-52.
- [25] Wang M, Cao C, Wang Y, et al. Comparison of bovine milk fat globule membrane protein retention by different ultrafiltration membranes using a label-free proteomic approach[J]. Food Science and Technology, 2021 (144) : 111219.
- [26] Yan D, Zhang L, Zhu Y, et al. Changes in caprine milk fat globule membrane proteins after heat treatment using a label-free proteomics technique[J]. Foods, 2022, 11 (17) : 2705.
- [27] Brink L R, Lönnerdal B. Milk fat globule membrane: the role of its various components in infant health and development[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2020, 85 (5) : 108465.
- [28] Nieto-Ruiz A, García-Santos J A, Verdejo-Román J, et al. Bermúdez MG: Infant formula supplemented with milk fat globule membrane, long-chain polyunsaturated fatty acids, and synbiotics is associated with neurocognitive function and brain structure of healthy children aged 6 years: the COGNIS study[J]. Frontiers in Nutrition (Lausanne), 2022 (9) : 820224.
- [29] Cerdó T, Ruíz A, Acuña I, et al. A synbiotics, long chain polyunsaturated fatty acids, and milk fat globule membranes supplemented formula modulates microbiota maturation and neurodevelopment[J]. Clinical Nutrition, 2022, 41: 1697-1711.
- [30] 王芳, 王庆琳, 于童童, 等. 乳脂肪球膜改善肠道微生物的研究进展[J]. 中国乳品工业, 2024, 52 (5) : 32-36.
- [31] Schverer M, O' mahony S M, O' Riordan K J, et al. Dietary phospholipids: role in cognitive processes across the lifespan[J]. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 2020 (111) : 183-193.
- [32] Tomé-Carneiro J, Carmen Crespo M, Burgos-Ramos E, et al. Buttermilk and krill oil phospholipids improve hippocampal insulin resistance and synaptic signaling in aged rats[J]. Molecular Neurobiology, 2018, 55 (9) : 7285-7296.
- [33] Baliyan S, Calvo MV, Piquera D, et al. Milk fat globule membrane concentrate as a nutritional supplement prevents

- age-related cognitive decline in old rats: a lipidomic study of synaptosomes[J].Food Research International, 2023 (163) : 112163.
- [34] Crespo M C, Tomé-Carneiro J, Gómez-Coronado D, et al.Modulation of miRNA expression in aged rat hippocampus by buttermilk and krill oil[J].Scientific Reports, 2018, 8 (1) : 3993-12.
- [35] García-Serrano A, Tomé-Carneiro J, Carmen Crespo M, et al.Concentrates of buttermilk and krill oil improve cognition in aged rats[J].Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids, 2020 (155) : 102077.
- [36] Zhou Y, Zou X, Feng R, et al.Improvement of spatial memory and cognitive function in mice via the intervention of milk fat globule membrane[J].Nutrients, 2023, 15 (3) : 534.
- [37] V. Calvo M, Loria Kohen V, Díaz-Mardomingo C, et al.Milk fat globule membrane-enriched milk improves episodic memory: a randomized, parallel, double-blind, placebo-controlled trial in older adults[J].Journal of Functional Foods, 2023 (111) : 105849.
- [38] Davies N, Frampton C, Fuad M, et al.The effect of supplementation with milk fat globule membranes on psychological health: a randomized clinical trial in healthy adults with moderate stress[J].Journal of Functional Foods, 2023 (105) : 105585.
- [39] Boyle N B, Dye L, Arkbåge K, et al.Effects of milk-based phospholipids on cognitive performance and subjective responses to psychosocial stress: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial in highperfectionist men[J].Nutrition, 2019 (57) : 183-193.
- [40] Cruz-Jentoft A J, Bahat G, Bauer J, et al.Sarcopenia: revised European consensus on definition and diagnosis[J].Age and Ageing, 2019, 48 (4) : 601.
- [41] Arnold W, Clark B.Neuromuscular junction transmission failure in aging and sarcopenia: the nexus of the neurological and muscular systems[J].Ageing Research Reviews, 2023, 89: 101966.
- [42] Pan J, Chen M, Li N, et al.Bioactive functions of lipids in the milk fat globule membrane: a comprehensive review[J].Foods, 2023, 12 (20) : 3755.
- [43] Sugita S, Tamura K, Yano M, et al.The impact of milk fat globule membrane with exercise on age-related degeneration of neuromuscular junctions[J].Nutrients, 2021, 13 (7) : 2310.
- [44] Yano M, Haramizu S, Ota N, et al.Continuous supplementation of milk fat globule membrane with habitual exercise from a young age improves motor coordination and skeletal muscle function in aged mice[J].Journal of Nutritional Science and Vitaminology, 2019, 65 (5) : 405-413.
- [45] Kim H, Won C W, Kim M, et al.The effects of exercise and milk-fat globule membrane (MFGM) on walking parameters in communitydwelling elderly Japanese women with declines in walking ability: a randomized placebo controlled trial[J].Archives of Gerontology and Geriatrics, 2019, 83: 106-113.
- [46] Suzukamo C, Ishimaru K, Ochiai R, et al.Milk-fat globule membrane plus glucosamine improves joint function and physical performance: a randomized, double-blind, placebo-controlled, parallel-group study[J].Journal of Nutritional Science and Vitaminology, 2019, 65 (3) : 242-250.
- [47] Ota N, Soga S, Hase T, et al.Effects of milk fat globule membrane ingestion with exercise on physical strength in healthy young adults: a randomized double-blind, placebo-controlled trial[J].Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2025, 22 (1) : 2535372.
- [48] Torres-Gonzalez M, Bradley B H R.Whole-milk dairy foods: biological mechanisms underlying beneficial effects on risk markers for cardiometabolic health[J].Advances in Nutrition, 2023, 14 (6) : 1523-1537.
- [49] Anto L, Warykas S W, Torres-Gonzalez M, et al.Milk polar lipids: underappreciated lipids with emerging health benefits[J].Nutrients, 2020, 12 (4) : 1001.
- [50] Kanon A P, Spies S J, MacGibbon A K H, et al.Milk fat globule membrane is associated with lower blood lipid levels in adults: a meta-analysis of randomized controlled trials[J].Foods, 2024, 13 (17) : 2725.
- [51] Li C Z, Wu L M, Zhu C X, et al.The impacts of dietary sphingomyelin supplementation on metabolic parameters of healthy adults: a systematic review and metaanalysis of randomized controlled trials[J].Frontiers in Nutrition (Lausanne) , 2024, 11: 1363077.
- [52] Market Research Intellect.Global Milk Fat Globule Membrane (MFGM) Market Size, Share & Trends Analysis Report[R].New York: Market Research Intellect, 2026.
- [53] 中华人民共和国工业和信息化部.QB/T 5805-2023乳脂肪球膜乳(清)蛋白粉[S].