张子怡, 赵艳洁, 刘璐, 等. 乳脂肪球膜磷脂的添加对婴儿配方奶粉乳液体外消化特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 451−461. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080104

ZHANG Ziyi, ZHAO Yanjie, LIU Lu, et al. Impact of Milk Fat Globule Membrane Phospholipids Addition on the *in Vitro* Digestion Characteristics of Infant Formula Emulsions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 451−461. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080104

·营养与保健·

乳脂肪球膜磷脂的添加对婴儿配方奶粉乳液体外消化特性的影响

张子怡,赵艳洁,刘　璐,李　鋆,张秀秀*,李晓东

（东北农业大学食品学院,乳品科学教育部重点实验室,黑龙江哈尔滨 150030）

摘　要:乳脂肪球膜（Milk Fat Globule Membrane，MFGM）是乳中重要活性成分，因其健康效应已被应用到婴儿配方奶粉（以下简称婴配粉）中。前期研究发现，当 MFGM 磷脂与乳清蛋白以最佳比例（MFGM 磷脂:乳清蛋白=5∶10）添加时，婴配粉乳液的物理和乳化稳定性更佳，但其消化特性尚未展开研究。因此，本研究以母乳（Human Milk，HM）、市售含 MFGM 婴配粉（IF1，MFGM 磷脂:乳清蛋白≠5∶10）和不含 MFGM 婴配粉（IF2）作为对照，旨在探讨 MFGM 磷脂与乳清蛋白最佳添加比例（MFGM 磷脂:乳清蛋白=5∶10）对婴配粉乳液体外消化特性的影响。结果表明，以此比例添加的婴儿配方奶粉乳液（Infant Formula Emulsion，FE）在体外消化过程中表现出与 HM 相似的粒径变化（平均粒径 3.28±0.24 μm，HM 平均粒径 4.24±0.31 μm）、电位变化（整体的电位值呈下降趋势）和微观结构变化（均有完整的脂肪球和磷脂环结构），且游离脂肪酸组成与含量的分布趋势与 HM 最为接近，其脂解程度（81.46%±0.75%）也更接近 HM（85.49%±1.89%），优于市售 IF1（75.35%±1.17%）和 IF2（73.47%±1.28%）。综上，以此条件制备的婴儿配方奶粉乳液展现出与母乳更为相似的体外消化特性，本研究可为婴儿配方奶粉中 MFGM 的母乳化构建提供理论依据。

关键词:乳脂肪球膜磷脂,婴儿配方奶粉,体外消化,脂解动力学,母乳化

中图分类号:TS201.2　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1002−0306(2026)15−0451−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080104

本文网刊:

Impact of Milk Fat Globule Membrane Phospholipids Addition on the *in Vitro* Digestion Characteristics of Infant Formula Emulsions

ZHANG Ziyi，ZHAO Yanjie，LIU Lu，LI He，ZHANG Xiuxiu*，LI Xiaodong

（Key Laboratory of Dairy Science, Ministry of Education, College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China）

Abstract: Milk fat globule membrane (MFGM) is a key bioactive component in milk, incorporated into infant formula due to its health benefits. Previous studies have found that adding MFGM phospholipids to whey protein at an optimal ratio (MFGM phospholipids∶whey protein=5∶10) enhances the physical and emulsifying stability of infant formula emulsions. However, its digestive characteristics remain unexplored. Consequently, this study employed human milk (HM), a commercial MFGM-containing infant formula (IF1, MFGM phospholipid∶whey protein≠5∶10), and a commercial MFGM-free infant formula (IF2) as controls. The objective was to investigate the effect of the optimal MFGM phospholipids-to-whey protein ratio (MFGM phospholipid∶whey protein=5∶10) on the *in vitro* digestive characteristics of infant formula emulsions. Results indicated that infant formula emulsion (FE) supplemented with this ratio exhibited particle size changes (mean particle size 3.28±0.24 μm; HM mean particle size 4.24±0.31 μm), potential changes (overall decreasing potential trend), and microstructural alterations (both exhibiting intact fat globules and phospholipid ring structures). Furthermore,

收稿日期: 2025−08−11

基金项目: 黑龙江省博士后面上资助项目（LBH-Z23096）。

作者简介: 张子怡（2001−）,女,硕士研究生,研究方向:乳品科学与技术,E-mail: 1264278263@qq.com。

*** 通信作者:** 张秀秀（1991−）,女,博士,讲师,研究方向:乳品科学与技术,E-mail: zhangxiuxiu4284@163.com。

the distribution trends of free fatty acid composition and content were closest to HM, and its degree of lipolysis (81.46%±0.75%) was also closer to HM (85.49%±1.89%), surpassing commercial IF1 (75.35%±1.17%) and IF2 (73.47%±1.28%). In summary, the FE prepared under these conditions exhibits *in vitro* digestive characteristics more similar to HM. This study can provide a theoretical basis for the humanization of MFGM in infant formula.

Key words: MFGM phospholipids; infant formula; *in vitro* digestion; lipolysis kinetics; humanization

母乳(Human Milk, HM)中的脂肪以乳脂肪球(Milk Fat Globule, MFG)的形式存在, 可为婴儿提供大约 50% 的能量, 是婴儿的最佳营养来源, 其内核主要是甘油三酯(Triacylglycerol, TAG), 含量占总脂质的 98% 以上, 其余主要由二酰基甘油酯、单酰基甘油酯、游离脂肪酸、磷脂和胆固醇组成[1]。MFG 外面由 10~20 nm 厚三层膜结构的乳脂肪球膜(Milk Fat Globule Membrane, MFGM)包裹, 保护 MFG 不被酶分解、氧化或发生聚集[2]。这种特殊结构不仅影响着婴儿的短期成长, 还对其生长发育、代谢健康等具有长期益处[3]。HM 喂养不能实现时, 婴儿配方奶粉(以下简称婴配粉)已经成为 HM 的最佳替代品。然而, 在婴配粉生产过程中, 由于灭菌、均质和其他加工方法, 脂肪滴可能会破裂, 脂滴表面主要被乳清蛋白和酪蛋白包裹, 导致缺乏完整的 MFGM 结构, 影响脂质消化造成婴幼儿生长和机体代谢的改变, 进而引起儿童成长后期肥胖等问题[4−5]。

近年来, 人们越来越关注 MFGM 的功能及其在模拟 HM 脂肪结构中的关键作用。有研究表明 MFGM 具有维持乳液脂肪球稳定、促进脂质消化吸收、调节免疫、支持神经发育及维护肠道健康等多重功能特性[6]。因此为精细化追求模拟 HM 的 MFGM 结构, 市面上常见的婴配粉多使用大豆卵磷脂和蛋黄卵磷脂对 MFGM 上的磷脂进行模拟, 但发现脂滴仍会被酪蛋白胶束和乳清蛋白不同程度地包裹, 阻碍婴儿对脂质的消化吸收[7]。有研究证实 MFGM 的加入提高了婴配粉中 MFG 的稳定性[8−9], 降低了婴儿的传染性发病率, 并对炎症、脂肪堆积等行为调节产生有益影响[10]。由此, 研究人员意识到将从牛乳、酪乳或酪乳粉中提取的 MFGM 添加到 IF 中是改善 MFG 结构和稳定性的新策略。

已有研究表明, 脂肪球界面上各物质的组成及相互作用等因素会影响物质的吸附顺序, 调节脂肪酶的活性及作用位点, 进而影响体系稳定性及脂质消化[11]。王鑫等[12] 研究表明, MFGM 与乳清蛋白可以通过界面吸附与分子互作形成复合膜结构, 乳清蛋白可填补 MFGM 在加工中缺失的膜蛋白位点, 通过静电引力与疏水作用增强脂肪球体系稳定性。Yu 等[13] 研究结果表明, MFGM 与蛋黄卵磷脂的比例为 1∶1 时, 乳液具有最高的包封率和物理稳定性、更大的粒径和最均匀的分布。此外, 有研究通过添加不同比例的 MFGM 和乳磷脂改善了婴配粉乳液的理化性质, 且当 MFGM 和乳磷脂比例为 1∶3 时, 婴配粉乳液的乳化活性指数和乳化稳定性指数最大[14]。Pan 等[15] 发现在均质过程中改变 MFGM 和乳蛋白的添加顺序可以调节婴配粉乳液的脂滴界面, 在均质前加入 MFGM, 均质后加入乳蛋白时, 观察到脂滴的界面磷脂载量最高, 界面组成和结构与母乳更相似。因此, 进一步考虑 MFGM 与乳蛋白的比例及其在婴配粉乳液系统中的影响也是至关重要的。团队基于模拟 HM 的 MFG 结构角度, 研究了不同比例的 MFGM 磷脂与乳清蛋白的相互作用及对模拟 HM 的 MFG 乳液结构、乳化性、稳定性等理化性质的综合影响, 发现 MFGM 磷脂与乳清蛋白的相互作用会显著改变乳清蛋白的二级结构(α-螺旋减少、β-折叠增加)和三级结构(色氨酸荧光淬灭), 而 5∶10 的比例能让二者形成致密且电荷分布均匀的界面保护层。此时乳液的粒径较小, 电位绝对值最高, 稳定性常数最小, 乳化稳定性指数最好达到 167.77±2.51 min, 表明乳液具有较好的稳定性, 与 HM 更加相似[16]。因 MFG 界面的组成、结构及脂滴大小等因素也会显著影响婴儿的消化吸收[5], 所以继续探讨最佳添加比例(MFGM 磷脂∶乳清蛋白=5∶10)婴配粉乳液的消化特性也是必要的。

因此, 本研究以 HM 和两款市售 IF(分别含有 MFGM 磷脂和大豆卵磷脂)作为对照, 以 MFGM 磷脂、乳清蛋白(MFGM 磷脂∶乳清蛋白=5∶10)、酪蛋白、乳糖及复合植物油为基础原料制备婴儿配方奶粉乳液(Infant Formula Emulsion, FE), 根据婴儿胃肠道特点建立体外消化模型, 以体外消化过程中 FE 的粒径、电位变化、絮凝情况、界面蛋白变化、脂解动力学以及游离脂肪酸组成等为考察指标评价最佳添加比例(MFGM 磷脂∶乳清蛋白=5∶10)下 FE 与 HM 的消化相似性, 为婴配粉的优化发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

成熟期母乳(Human Milk, HM, n=10) 河北省年龄 24~30 岁身体健康、无不良嗜好的哺乳期女性志愿者提供, 已签署知情同意书; 酪乳粉 新西兰恒天然集团; 棕榈油、椰子油、大豆油、玉米油、菜籽油、葵花籽油(均为食品级) 中国哈尔滨市当地超市; 乳清蛋白粉 WPC80(含 MFGM 蛋白)、酪蛋白(均为食品级) 西安国豪生物有限公司; 乳糖(食品级) 山东雷珏生物科技有限公司; 添加 MFGM 的植物油基婴儿配方奶粉(Infant Formula 1, IF1, 磷脂来源为 MFGM 磷脂; MFGM 磷脂∶乳清蛋白≠5∶10)、不添加 MFGM 的植物油基婴儿配方奶粉(Infant Formula 2, IF2, 磷脂来源为大豆卵磷脂) 国

内某品牌（均为一段 0~6 月）；氯仿、甲醇、正己烷、石油醚（均为色谱纯级）　天津星马克科技发展有限公司；快绿（Fast Green, FCF）、尼罗红染色剂（Nile Red, NR）、N-（利萨明罗丹明 B 磺酰）二油酸磷脂酰乙醇胺（Rd-DOPE）、胃脂肪酶（30 U/mg）　西格玛奥德里奇贸易有限公司；蛋白分子量标记物（PR1930）、胰蛋白酶（250 U/mg）　北京索莱宝科技有限公司；胰脂肪酶（30 U/mg）、37 种脂肪酸甲酯标准品　上海源叶生物科技有限公司；胃蛋白酶（3000 U/mg）　西安康诺化工有限公司；牛胆盐（0.67 mmol/mg）　上海研生实业有限公司；其他试剂（均为分析纯级）　国药集团化学试剂有限公司。

Nano ZS 90 粒径和电位分析仪　英国马尔文公司；Deltavision OMX SR 超高显微镜　美国 GE 公司；UV-2600 紫外可见分光光度计　岛津仪器有限公司；BX53 科研级正置显微成像系统　奥林巴斯（中国）有限公司；MARS40 旋转流变仪　美国 Thermo 公司；DYY-6C 电泳仪　北京六一生物科技有限公司；AB SCIEX TRIPIETOF 5600 四级杆飞行时间串联质谱检测器　美国 AB sciex 公司；Agilent 8890-7000D 三重四级杆气质联用仪　安捷伦公司；H1750R 台式高速冷冻离心机　湘仪离心机仪器有限公司；IKA digital T18 ULTRA-TURRAX 剪切机　艾卡仪器设备有限公司；SPCH-10 高压均质机　英国 ATS 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　MFGM 磷脂的提取　MFGM 的提取参考 Lu 等[17] 的方法并进行适当的调整，将 5 g 酪乳粉溶于 100 mL 去离子水中，磁力搅拌 1 h 以重建酪乳，并用柠檬酸钠（20 mg/mL）进行解离，在 4 ℃ 下冷藏过夜，以确保其充分水合。然后将溶液在离心力 4750×g 的条件下离心两次，每次 20 min，获取乳脂肪层。将离心得到的脂肪层与等体积磷酸盐缓冲液（0.1 mol/L, pH6.8）混合并缓慢搅拌 15 min，随后以 1500 r/min 离心 10 min 后去除水相杂质（含酪蛋白及乳清蛋白）。重复上述 PBS 洗涤程序 3 次后采用超纯水冲洗，然后继续离心 1 h（4 ℃, 12000×g），收集沉淀即得 MFGM。MFGM 磷脂的提取参考 Liu 等[18] 的方法并进行修改，取 MFGM 样品与 4 倍体积的氯仿/甲醇（2∶1, v/v）混合，并在 4750×g 下离心 10 min，经过 0.45 μm 膜过滤的氯仿层在 7100×g 的条件下离心 10 min，提取的脂质在 60 ℃ 下蒸发干燥，然后在冷丙酮中溶解，收集沉淀物并在氯仿中溶解，干燥后得到 MFGM 磷脂。

1.2.2　婴儿配方奶粉乳液（MFGM 磷脂∶乳清蛋白=5∶10）的制备　婴儿配方奶粉乳液（MFGM 磷脂∶乳清蛋白=5∶10, Infant Formula Emulsion, FE）的配方参考本团队研究成果[16] 和 Drapala 等[19] 报道的方法，使最终婴儿配方奶粉乳液中的蛋白质（乳清蛋白∶酪蛋白=6∶4）、油和碳水化合物含量分别为 1.55、3.50 和 7.00 g/100 mL。首先，在 Zhao 等[16] 的研究基础上，将 MFGM 磷脂与乳清蛋白以最佳比例（MFGM 磷脂∶乳清蛋白=5∶10）混合，加入酪蛋白（0.62 g/100 mL）和乳糖（7.00 g/100 mL）后于 25 ℃ 的条件下搅拌过夜以确保其完全水合。用 1 mol/L NaOH 调节 pH 至 6.8。将复合植物油（棕榈油（25%, w/w）、椰子油（25%, w/w）、大豆油（15%, w/w）、玉米油（15%, w/w）、菜籽油（10%, w/w）和葵花籽油（10%, w/w））按 1∶9 的比例加入以上复合溶液中。IKA 剪切机在 8000 r/min 下处理 10 min，并用高压均质机在 20 MPa 下处理 2 次，以得到 FE，并将所得乳液 pH 调节至 6.8。

1.2.3　模拟婴儿胃肠道体外消化模型的建立　为了更好地模拟婴儿胃肠道消化，建立了静态婴儿体外消化模型[20−21]，使其 pH、酶活性及浓度与婴儿的消化系统更加接近，婴儿消化参数、模拟胃液（SGF）、模拟肠液（SIF）组成见表 1。

表 1　体外消化模型中婴儿消化参数、模拟胃液（SGF）、模拟肠液（SIF）组成

Table 1　Infant digestion parameters, simulated gastric fluid, and simulated intestinal fluid composition in an *in vitro* digestion models

消化参数	胃消化期	肠消化期
消化时间（min）	60	120
pH	5.3	6.6
所需酶活性（U/mL）	胃脂肪酶（19.00） 胃蛋白酶（268.00）	胰蛋白酶（16.00） 胰脂酶（90.00）
胆盐浓度（mmol/g）		胆盐（3.10）
模拟胃液（SGF, mmol/L）	NaCl（94） KCl（13）	
模拟肠液（SIF, mmol/L）		NaCl（164） KCl（10） $NaHCO_3$（85） $CaCl_2$（3）

模拟胃消化阶段：取 25.2 mL 待消化乳液（IF1、IF2、FE、HM）于 37 ℃ 预热 10 min，然后加入 14.8 mL 已预热的 SGF，调整体系 pH 至 5.3 并在 37 ℃ 保持 10 min。加入胃脂肪酶（30 U/mg）和胃蛋白酶（3000 U/mg）于 37 ℃ 反应，用 0.1 mol/L 的 NaOH 滴定使体系的 pH 保持在 5.3。定期于体外消化前（G0）、胃消化 30 min（G30）、胃消化 60 min（G60）取出部分样品以备后期分析。消化 60 min 后，加入 1 mol/L NaOH 将 pH 提高到 7.0 终止胃消化。

模拟肠消化阶段：取 27.2 mL 上述胃消化产物与 12.8 mL SIF 混合，加入 0.1 mol/L 的 NaOH 使体系 pH 保持在 6.6。加入胰蛋白酶（250 U/mg）、胰脂肪酶（30 U/mg）、胆盐（1.33 mmol/g）于 37 ℃ 条件下反应以模拟肠消化，定期于肠消化 60 min（I60）、肠消化 120 min（I120）取出部分样品以备后期分析。消化 2 h 后沸水浴灭酶，终止反应。

1.2.4 粒径与电位测定 使用激光粒度分析仪和 Zeta 电位仪测定消化过程中乳液的粒径和电位变化。将样品稀释 100 倍后用于检测，整个检测过程在 25 ℃ 下进行。

1.2.5 微观结构观察 根据 Sun 等[22] 的方法使用超高分辨显微镜对乳液中的脂质和蛋白质进行观察，并稍作调整。使用浓度为 1 mg/mL（氯仿配制）的 Rd-DOPE 标记油水界面的磷脂，浓度为 1 mg/mL（超纯水）的 FCF 标记液滴界面的蛋白质，浓度为 42 μg/mL（乙醇配制）的 NR 标记中性脂质。将 25 μL Rd-DOPE 与 200 μL 样品混合，100 μL NR 和 250 μL FCF 与 0.5 mL 样品混合，将混合样品置于室温黑暗中保存 1 h。取 7 μL 混合物至载玻片上，盖玻片边缘涂上指甲油，以防止样品干燥，在 25 ℃ 下进行观察。以上三种染色剂对应的激发波长分别为 568、488 和 639 nm。

1.2.6 界面蛋白测定 界面蛋白的提取参考之前文献中报道的方法并稍加修改[23]。取 40 mL 样品分别放入 50 mL 离心管中，于 4 ℃ 的条件下以 9000×g 的速度离心 20 min。离心完成后，使用注射器去除下层血清相，保留上层奶油相并用超声波处理 15 min，然后使其在 45 ℃ 的热水浴中融化，再以 3500×g 离心 10 min，丢弃上层油相，同时将下层与氯仿-甲醇（2∶1，v/v）混合。最后，将混合物在 3500×g 下离心 10 min，中间层包含界面蛋白，采用十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳进行分析。

1.2.7 脂解动力学

1.2.7.1 脂解度 模拟体外消化过程中的脂解度（Lipolysis Degree，LD）测定采用先前报道的方法[24]。LD 以甘油三酯中初始酯化的总酰基部分释放的游离脂肪酸的比例计算，使用 pH-stat 滴定法测定，公式如下：

$$LD(\%) = \frac{FFA \times MM_{eq}}{FC \times V \times 2} \times 100 \quad \text{式（1）}$$

式中，MM_{eq} 表示乳液的平均甘油三酯摩尔质量（790 g/mol），FFA、FC、V 分别为游离脂肪酸（mol）、脂肪浓度（0.035 g/mL）、乳液体积（mL）。

1.2.7.2 游离脂肪酸释放量 游离脂肪酸（Free Fatty Acid，FFA）释放量通过乳液在胃肠道消化过程中维持 pH 不变所消耗的 NaOH 的体积来计算，使用 pH-stat 滴定法测定，公式如下：

$$M_{FFA} = \frac{V_{NaOH} \times C_{NaOH} \times 1000}{V} \quad \text{式（2）}$$

式中，M_{FFA} 为单位体积乳液释放的脂肪酸含量（μmol/mL），V_{NaOH} 为消耗 NaOH 溶液的体积（mL），C_{NaOH} 为 NaOH 溶液的摩尔浓度（0.1 mol/L），V 为消化乳液的体积（mL）。

1.2.8 游离脂肪酸组成测定 参考 Yu 等[20] 的方法对乳液消化后的游离脂肪酸组成进行分析。将胃肠消化后样品中的脂肪溶于氯仿（20 mg/mL），向活化后的萃取柱中加入 2 mL 脂肪-氯仿溶液，用 8 mL 的三氯甲烷-异丙醇溶液（2∶1，v/v）洗脱中性脂质，取 12 mL 甲酸-乙醚溶液（甲酸含量为 2%）洗脱游离脂肪酸，最后于氮气下吹干。提取的脂肪通过碱催化酯（氢氧化钾-甲醇溶液）交换反应制备脂肪酸甲酯，并使用 0.22 μm 有机滤膜过滤，采用 GC-MS 分析。脂肪酸定性通过与 37 种脂肪酸甲酯混合标准品对比确定，运用面积校正归一化法计算各脂肪酸的相对含量。

GC-MS 条件：进样量 1 μL，分流比为 10∶1；色谱柱：DB-5 柱（内径 60 m×0.25 mm×0.25 μm）；升温程序：150 °C 保持 2 min，然后在 5 °C 下升到 250 °C，保持 10 min；氦气作载气，流速 1.0 mL/min；电子轰击电离源为 EI；离子源温度 225 °C；SIM 扫描模式；电子能量为 70 eV，激活电压 1.5 V。

1.3 数据处理

所有数据重复 3 次，用平均值±标准差进行表示，使用 Origin 2022 进行图表绘制，并利用 IBM SPSS Statistics 25 进行方差分析，显著水平为 0.05，其中，$P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 婴儿配方奶粉乳液在体外消化过程中粒径变化

通常来说，呈单峰分布的乳液脂滴分布更为均匀，物理稳定性较好[25]。如图 1 和表 2 所示，在消化开始前，IF1 和 IF2 的粒径均呈现窄的单峰分布，表明二者体系的稳定性较高，平均粒径分别为 0.35±0.01 μm 和 0.39±0.01 μm。FE 的粒径也呈现窄的单峰分布，平均粒径为 3.28±0.24 μm。HM 呈现多峰分布，其峰值分别显示为 1.17、4.38 和 39.6 μm，这可能与在天然 HM 脂肪中观察到的宽泛粒径范围（0.3~15 μm）有关[26]。HM 平均粒径 $D_{4,3}$ 为 4.24±0.31 μm，显著高于制备的 FE 乳液（$P<0.05$）。

在模拟胃肠消化过程中，由于 pH 变化和各消化酶的作用，乳液中的蛋白质和 TAG 均发生了不同程度的聚集，导致所有样品在体外消化过程中均表现出更大的粒径分布[27]。在胃消化阶段，IF1 和 IF2 的粒径一直增加，并在 G60 时刻达到最大值（IF1：25.62±1.80 μm；IF2：33.79±2.62 μm），说明乳液在此时的蛋白聚集现象和脂滴絮凝现象最为明显，这是因为模拟婴儿胃环境的低 pH 接近酪蛋白的等电点（pH4.6），可造成蛋白质的大量聚集和沉淀[28]。且 IF1 在消化过程中的粒径始终显著小于 IF2（$P<0.05$），可能是因为 IF1 中添加的 MFGM 上所带负电荷的极性脂质（磷脂酰肌醇与磷脂酰丝氨酸）对脂肪酶具有较高的吸附能力，使脂肪酶更容易与 MFGM 的液态无序区结合，促进脂质消化，减轻了脂滴的絮凝[29]。而 FE 在 G30 和 G60 阶段均呈现双峰分布，粒径大于 HM 并显著小于 IF1 和 IF2（$P<0.05$），可能是添加的 MFGM 磷脂作为乳化剂使脂滴均一地分散在体系中，且修饰了脂滴界面，增强低 pH 下脂滴的界面稳

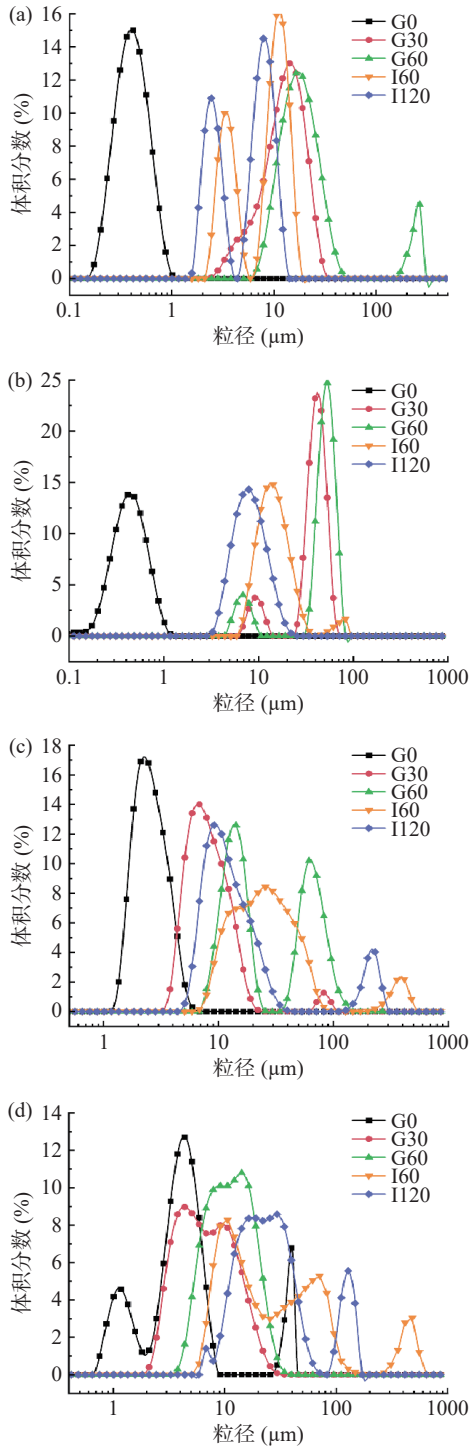


图 1　模拟体外婴儿胃肠消化过程中的粒径分布

Fig.1　Particle size distribution during *in vitro* infant gastrointestinal digestion

注：(a)(b)(c)和(d)分别表示市售 IF1、IF2、FE 和 HM 在体外消化过程中的粒径分布；G0、G30、G60、I60 和 I120 分别表示体外消化前、胃消化 30 min 和 60 min、肠消化 60 min 和 120 min。

定性，减少其大规模聚集，最终促成相对小的整体粒径。HM 中脂肪球的粒径变化程度较小，G60 时达到最大值为 13.93±0.58 μm，与前三者变化程度不同。

进入肠消化阶段后，IF1 和 IF2 的粒径不断减小且显著小于 FE 和 HM 的粒径（P<0.05），这与 Yu 等[20] 研究发现相同。FE 的粒径先显著增大，并于

表 2　模拟体外婴儿胃肠消化过程中的平均粒径

Table 2　Average particle size during *in vitro* infant gastrointestinal digestion

样品	消化阶段				
	G0	G30	G60	I60	I120
IF1（μm）	0.35±0.01^{c}	14.75±0.87^{b}	25.62±1.80^{b}	9.17±1.04^{d}	5.12±0.28^{d}
IF2（μm）	0.39±0.01^{c}	22.98±0.70^{a}	33.79±2.62^{a}	15.00±0.19^{c}	8.80±0.99^{c}
FE（μm）	3.28±0.24^{b}	11.78±0.29^{c}	20.87±1.50^{c}	26.64±1.67^{b}	11.40±1.13^{b}
HM（μm）	4.24±0.31^{a}	9.21±0.97^{d}	13.93±0.58^{d}	29.03±1.22^{a}	13.88±1.01^{a}

注：G0、G30、G60、I60和I120分别表示体外消化前、胃消化30 min和60 min、肠消化60 min和120 min；同列不同字母表示样品之间存在显著性差异（P<0.05）。

I60 阶段显示出最大的平均粒径，为 26.64±1.67 μm，到 I120 时其颗粒尺寸有所减小。颗粒尺寸的减小可能是由于消化产物的表面活性降低，脂滴的界面被表面活性高的胆汁盐包裹，进而形成小颗粒[30]。而随着肠道消化的进行，由于胆汁盐和肠道 pH 的升高，蛋白质胶束在中性 pH 下发生解离和分散，导致所有乳液的粒径最终减小到 10 μm 左右[31]。HM 与 FE 的粒径变化趋势一致，且二者均呈双峰甚至多峰分布，更大的峰面积出现在小粒径区域。

2.2　婴儿配方奶粉乳液在体外消化过程中电位变化

电位间接反映了液滴界面组成的变化，是表征乳状液稳定性的重要指标，其绝对值越大，表示粒子间的静电斥力越大，整个系统越稳定[32]。如图 2 所示，所有样品的电位均呈现负值，在消化开始之前，IF1 和 FE 的电位显著低于 IF2 和 HM（P<0.05），可能是因为 IF1 和 FE 中的 MFGM 磷脂与乳清蛋白之间发生相互作用改变了蛋白质的构象，使更多带有负电荷的氨基酸残基暴露于表面，并且在 MFG 界面吸附了更多的负电荷，导致了较低的电位值[33]。HM 的电位值为−24.13±0.65 mV，显著低于以往报道中新鲜母乳的电位值（−5.85±0.04 mV）[34]，而在 Liu 等[5] 的相关报道中，母乳的电位为−39.05±0.54 mV。这些差异可能与 HM 的采集地点和母亲饮食习惯有

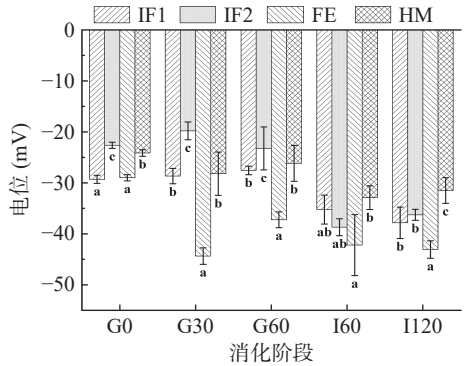


图 2　模拟体外婴儿胃肠消化过程中电位的变化

Fig.2　Changes in zeta potential during *in vitro* infant gastrointestinal digestion

注：G0、G30、G60、I60 和 I120 分别表示体外消化前、胃消化 30 min 和 60 min、肠消化 60 min 和 120 min；不同字母表示组间样品之间存在显著性差异（P<0.05）。

关，导致不同研究 HM 中的 pH 和离子强度存在差异，进而造成 Zeta 电位的测定差异[2]。

消化过程中，电位的显著变化反映了 MFG 界面成分及结构的不断变化。在胃消化初期，随着消化的进行，IF1 和 IF2 电位的绝对值有降低的趋势，考虑到 IF 的生产过程，推测为酪蛋白聚集覆盖了 MFG 导致静电屏蔽[35]。而 FE 和 HM 电位的绝对值整体有升高的趋势，应是 MFGM 磷脂中的负电荷粒子逐渐释放并吸附于 MFG 界面，使其负电荷量增加所导致。直到 G60 阶段，各样品电位的绝对值均有增加的趋势(除了 IF1)。进入肠消化阶段后，胆盐的加入与界面磷脂及蛋白质形成竞争性吸附，从而形成了磷脂-胆盐复合界面，而胆盐在肠液环境中含有更高的负电荷，导致所有样品的电位绝对值大幅度升高[30,36]。与此同时，胰脂肪酶分解磷脂和 TAG 产生了带负电荷的游离脂肪酸并附着于油水界面处，进一步使电位的绝对值升高[20]，所以，很明显观察到肠消化阶段所有样品的电位绝对值显著高于胃消化阶段(P<0.05)。因此从整个体外消化过程中来看，FE 与 HM 的电位变化趋势呈现显著的相似性。

2.3　婴儿配方奶粉乳液在体外消化过程中微观结构变化

MFG 界面物质分配及结构显著影响脂肪酶的活性并对脂质分解产生影响，IF1、IF2、FE 和 HM 在体外消化过程中微观结构的变化如图 3 所示。在体外消化开始之前，IF 中大部分 MFG 单独存在于体系中，只有部分 MFG 表面有蛋白质存在，且磷脂未成环(如图 3(a)和图 3(b)A_1 中箭头所示)。FE 和 HM 中有完整的 MFG 结构，其界面处有蛋白质包裹(如图 3(a)D_1 和 C_1 中箭头所示)，并在图 3(b)D_1 和 C_1 中发现有大量均匀分布的磷脂环存在。FE 和 HM 的 MFG 大小与磷脂环直径显著大于 IF1 和 IF2，与 2.1(图 1 和表 2)中粒径结果一致。

进入胃消化阶段之后，IF1 和 IF2 的 MFG 微观结构变化最明显，在低 pH 环境和消化酶作用下，蛋白质聚集，MFG 失去界面层的保护而聚集成大脂滴，造成其粒径显著增加。G60 阶段观察到大的甘油三酯-蛋白质聚集体，且磷脂在脂肪酶的作用下产生了大面积聚集，表明此时的 MFG 结构被严重破坏(如图 3(a)和(b)A_3、B_3 中箭头所示)。IF1 中虽然添加了 MFGM 成分，但可能因其添加的只是含 MFGM 的乳清蛋白粉，磷脂纯度极低，经一系列生产工序后，微量磷脂无法有效保护 MFG 结构，导致 MFG 界面被破坏[37]。FE 始终保持较完整近似球形的脂滴结构及完整的磷脂环结构(如图 3(a)和图 3(b)C_3 中箭头所示)，说明可能是因为 MFG 界面的 MFGM 磷脂疏水尾部嵌入脂肪相，亲水头部结合乳清蛋白极性残基，构建了稳定的“磷脂-蛋白”保护层，有效延缓了脂质消化，使其微观结构变化与 HM 相似[16]。

进入肠消化阶段以后，IF1 和 IF2 在整个消化过程中始终存在着聚集现象。FE 及 HM 中的 MFGM

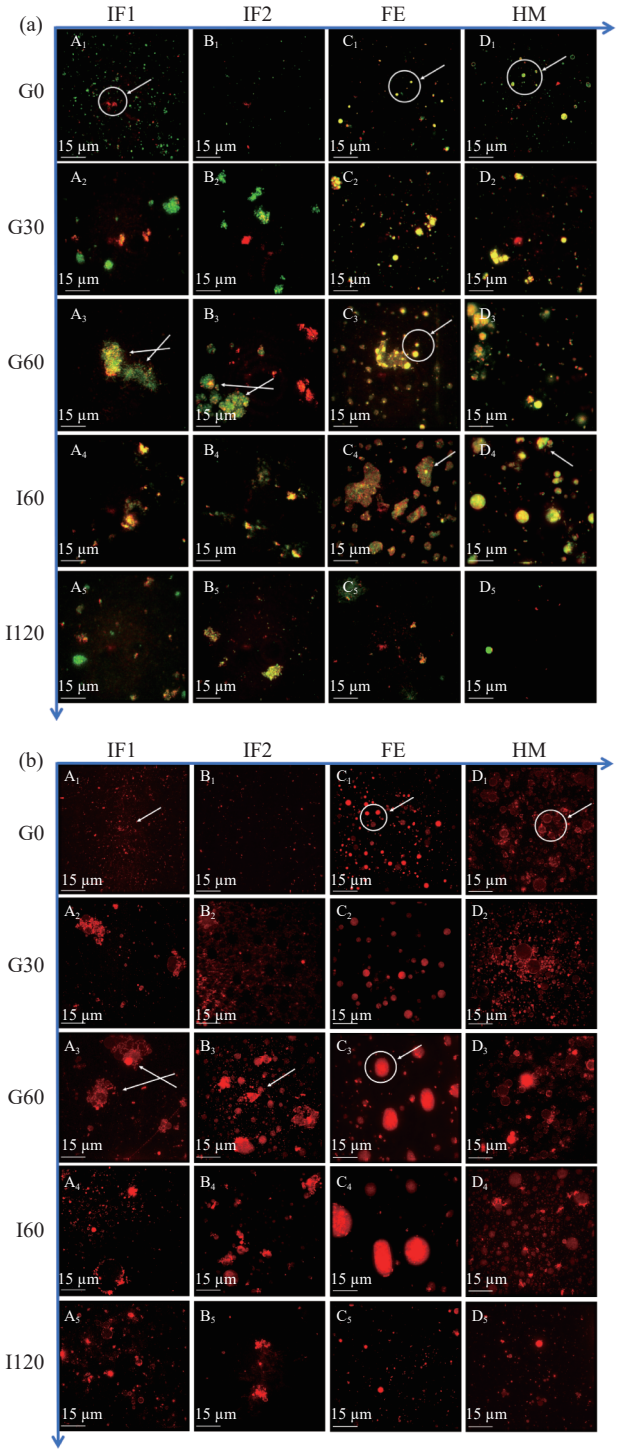


图 3　模拟体外婴儿胃肠消化过程中微观结构的变化

Fig.3　Changes of microstructure during *in vitro* infant gastrointestinal digestion

注：图(a)表示样品在消化过程中甘油三酯和蛋白质的变化，其中甘油三酯被标记为绿色，蛋白质被标记为红色；图(b)表示样品在消化过程中磷脂的变化，磷脂被标记为红色；G0、G30、G60、I60 和 I120 分别表示体外消化前、胃消化 30 min 和 60 min、肠消化 60 min 和 120 min。

磷脂与蛋白质的相互作用在肠消化过程中逐渐减弱，复合膜在脂肪酶和蛋白酶的作用下被破坏，TAG 释放分散，胆盐取代被降解的酪蛋白并吸附于 MFG 界面，而酪蛋白脱落后与 TAG 形成了大面积聚集体(如图 3(a)D_4 和 C_4 中箭头所示)[38]。消化进行到

120 min 时，FE 和 HM 的体系出现了均匀分散的小颗粒，说明多数油脂和蛋白质已基本分解。可见，MFGM 磷脂加入后，FE 中 MFGM 磷脂与蛋白形成的保护层很好地保护了 MFG 结构，从而使体系处于一个较为稳定的状态。

2.4　婴儿配方奶粉乳液在体外消化过程中界面蛋白分析

使用 SDS-PAGE 对 IF1、IF2、FE 和 HM 在体外消化过程中的蛋白质组成进行了表征和分析，如图 4 所示。未消化时所有样品在 MFGM 蛋白（48~250 kDa）附近均有较深的染色，在胃消化阶段，所有样品的 MFGM 蛋白在蛋白酶的作用下均显示出不同程度的水解，而 IF1 在 MFGM 蛋白处始终呈现较深的染色，说明其添加的 MFGM 材料中含有较高含量的 MFGM 蛋白，且如图 4 所示，IF1 的酪蛋白条带在胃消化过程中没有明显的变化。而 IF2 中的酪蛋白和乳清蛋白在胃消化阶段已基本被消化完全，这可能是由于其 MFG 界面主要由酪蛋白和乳清蛋白包裹而成，在低 pH 的条件下，酪蛋白被胃蛋白酶水解导致其从 MFG 界面处脱落。FE 中的酪蛋白在胃消化阶段结束时仍能少量检测到，而 HM 中酪蛋白的条带在胃消化过程没有明显的变化，Nguyen 等[39] 也在相关研究中得出了同样的结论。而且由于 α-乳清蛋白具有显著抵抗胃消化的消化模式，FE 和 HM 中的乳清蛋白在胃消化阶段几乎未被分解[39]。

进入肠消化阶段之后，在 I120 时 IF2 中还可以观察到部分 MFGM 蛋白条带存留，表明还存在部分蛋白未被消化完全，而 IF1、FE 和 HM 中的蛋白条带已基本消失，说明蛋白质被迅速分解，于 I120 时刻基本被消化完全，Sun 等[40] 的研究也得到了相似结果。综上，FE 在消化过程中的蛋白质水解行为与 HM 一致，二者胃消化结束阶段有酪蛋白存留且乳清蛋白抵抗胃消化，肠消化阶段蛋白质均被迅速分解并于 I120 基本消化完全，体现了 FE 在界面蛋白消化上与 HM 的显著相似性。

2.5　婴儿配方奶粉乳液在体外消化过程中脂解动力学

如图 5 所示，所有样品的游离脂肪酸在胃消化前 40 min 被迅速释放，脂解度较高，而随后趋于缓慢，这可能是由于迅速释放的游离脂肪酸积聚在 MFG 界面处抑制了胃脂肪酶发挥作用[41]。在整个胃消化阶段，IF1 和 IF2 的脂解度和游离脂肪酸释放量显著高于 FE 和 HM（P<0.05），这是由于市售 IF 因生产工艺及低磷脂含量导致产品 MFG 界面主要由蛋白质包裹，在胃蛋白酶的作用下迅速被分解，导致 MFG 内部的 TAG 被快速水解，而 HM 中的 MFG 界面主要由 MFGM 包裹，富含高含量磷脂，包括磷脂酰胆碱（Phosphatidylcholine, PC），磷脂酰乙醇胺（Phosphatidylethanolamine, PE），磷脂酰肌醇（Phosphatidylinositol, PI），磷脂酰丝氨酸（Phosphatidylserine, PS）和鞘磷脂（Sphingomyelin, SM）等，其中 SM 中的脂肪酸大多是长链饱和脂肪酸，脂肪酸尾部与胆固醇交错填充头部之间的间隙，使之形成了紧密堆积的结构，因此 FE 和 HM 中的 MFG 界面不易被破坏[42]。

进入肠消化阶段以后，从 I60（消化时间 120 min）开始，IF1 和 IF2 的脂解度及脂肪酸释放量低于 FE 和 HM，表明 IF1 和 IF2 的 MFG 界面由于积聚了胃消化期分解的酪蛋白和乳清蛋白，阻碍脂肪酶进入 TAG 核心，导致低脂解度和脂肪酸释放量[43]。而 FE 因前期 MFGM 磷脂保护，脂肪球结构完整，胆盐能更好地与 MFG 界面结合，增强脂肪酶吸附，促进 TAG 分解，使脂解度快速上升并接近 HM。由此可见 FE 和 HM 的脂质消化存在明显的滞后期，这可归因于 MFGM 的外侧双层膜上存在一个横向分布组织，为 SM 和胆固醇组成的液态有序相（也被称为“脂筏”结构），该区域会促进脂肪酶和胆盐与其作用位点吸附结合，进而加速其内部 TAG 的消化水解[44]，且高负电荷的胆汁盐占据 MFG 界面，吸附脂肪酶的能力增强有利于 TAG 核心的分解[45]。这一变化趋势由 2.2 电位变化（图 2）中也可看出。

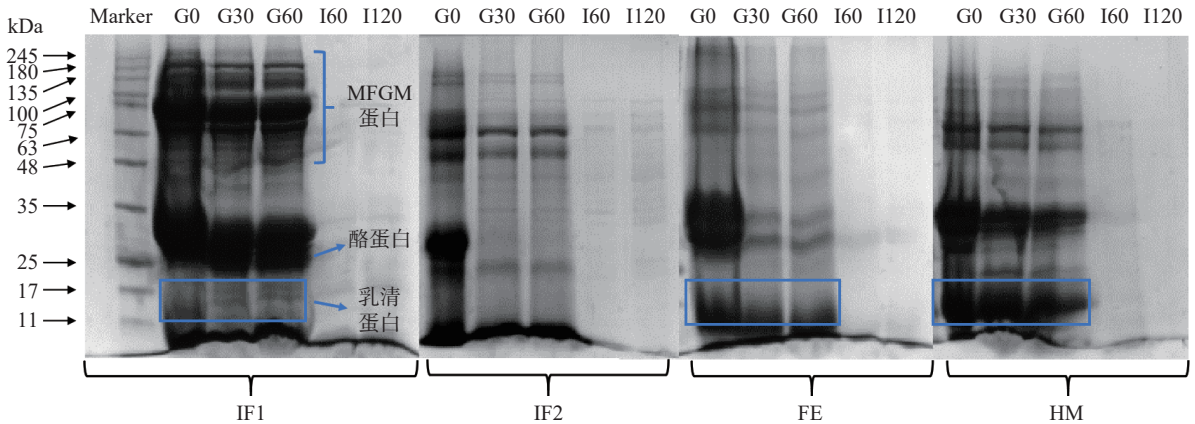


图 4　模拟体外婴儿胃肠消化过程中界面蛋白的变化

Fig.4　Changes of interface proteins during *in vitro* infant gastrointestinal digestion

注：G0、G30、G60、I60 和 I120 分别表示体外消化前、胃消化 30 min 和 60 min、肠消化 60 min 和 120 min。

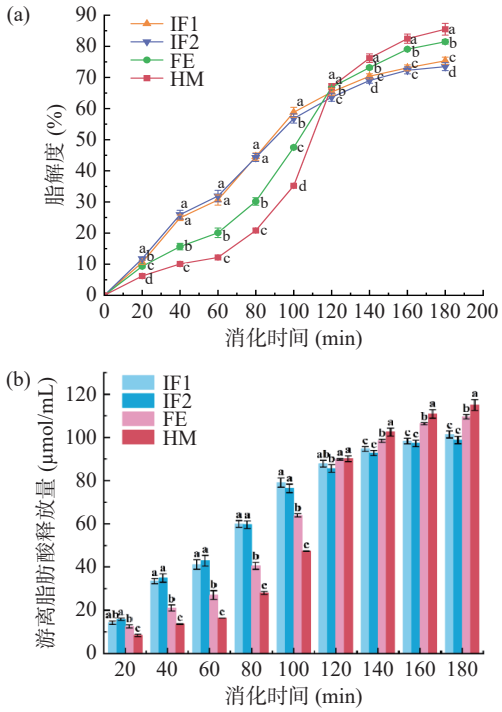


图 5　模拟体外婴儿胃肠消化过程中的脂解度和游离脂肪酸释放量

Fig.5　Lipolysis and free fatty acid release during *in vitro* infant gastrointestinal digestion

注: 0~60 min 表示胃消化阶段, 60~180 min 表示肠消化阶段, 不同字母表示组间样品之间存在显著性差异(P<0.05)。

图 5(a)、图 5(b)可直观看到, 在 I60 以后, FE 和 HM 的脂解程度和游离脂肪酸释放量超过了 IF1 和 IF2。到 I120 时, 所有样品脂解程度排序为: HM>FE>IF1>IF2, 其中 FE 的脂解度达到了 81.46%±0.75%, 略低于 HM(85.49%±1.89%), 可见, 此比例 MFGM 磷脂的加入(MFGM 磷脂:乳清蛋白=5:10)会保护 MFG 最初的完整结构, 使其消化行为更接近于 HM。

2.6　婴儿配方奶粉乳液在体外消化过程中游离脂肪酸组成分析

为明确各个样品的消化行为差异, 测定了胃消化和肠消化阶段结束时的脂肪酸组成及相对含量, 如图 6 所示, 所有样品在消化期间释放的游离脂肪酸主要包括 C16:0、C18:0、C18:1 和 C18:2。

在胃消化阶段, IF2 释放出最多的 C16:0 和 C18:0; HM 释放出最高含量的 C18:1 和 C18:2, 分别达到了总脂肪酸含量的 41.80%±1.50% 和 26.45%±0.78%, 显著高于其它样品(P<0.05), 这与 Liu 等[46] 的研究结果一致。

所有样品在肠消化阶段的游离脂肪酸组成与胃消化阶段基本一致。其中, IF1 和 IF2 释放出较高含量的长链饱和脂肪酸, 如 C16:0 和 C18:0。此外在 IF1 和 IF2 中均发现了微量的在 HM 消化中未发现的 C6:0 和 C17:0, 且中短链脂肪酸如 C8:0、C10:0 和 C12:0 均与 HM 存在显著性差异(P<0.05), 这可能与脂芯的植物油基组成有关。与胃消化相比,

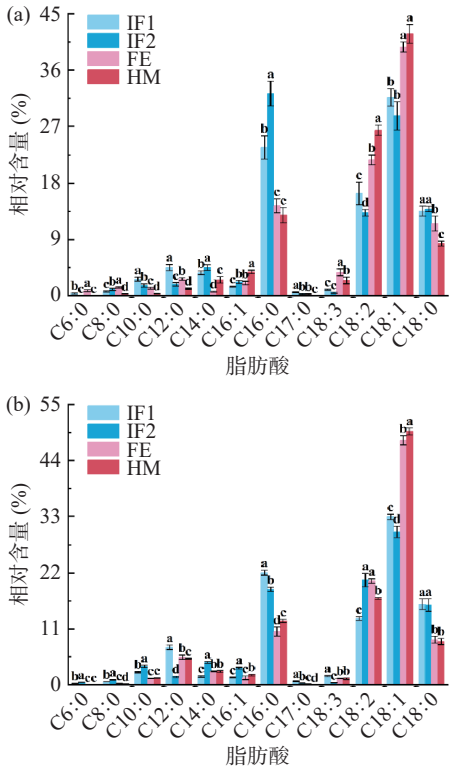


图 6　模拟体外婴儿胃肠消化过程中释放的游离脂肪酸的组成及含量

Fig.6　Composition and content of free fatty acids released during *in vitro* infant gastrointestinal digestion

注: (a)和(b)分别表示胃消化结束和肠消化结束时释放的游离脂肪酸的组成, 不同字母表示组间样品之间存在显著性差异(P<0.05)。

FE 在肠消化结束时表现出更高的 C18:1 释放量, 达到了 47.99%±0.88%, 表明其 C18:1 的释放存在滞后性, 缩小了与 HM 的差距(49.71%±0.68%)。油酸(OA, C18:1)作为 HM 中的重要脂质成分, 能为婴儿提供支持日常活动和生长所需能量, 并参与构成神经细胞膜, 间接促进婴儿大脑和视觉系统的发育; 亚油酸(LA, C18:2)是一种可以降低血液胆固醇水平的必需脂肪酸, 亚油酸可代谢生成花生四烯酸(ARA, C20:4), 这是促进婴儿神经组织和视网膜发育的重要脂质, 并在调节免疫反应和炎症反应中发挥关键作用[47]。因此建议注意在商业生产的婴配粉中对二者进行强化, 满足婴儿生长和发育的基本需求。

对消化结束后的消化产物中脂肪酸的含量进行对比分析, IF1、IF2、FE 和 HM 在饱和脂肪酸组成上从大到小呈现出: IF1>IF2>HM>FE 的趋势, 在不饱和脂肪酸组成上从大到小呈现出: HM>FE>IF1>IF2 的趋势。从整个胃肠消化过程中来看, FE 释放的脂肪酸含量分布趋势与 HM 最为接近, 特别是 C18:1 和 C18:2, 而消化产物中的脂肪酸组成会影响婴儿体内进一步的脂质吸收及后期的代谢[48]。

2.7　脂肪酸主成分分析（PCA）

对所有样品胃肠消化后释放的脂肪酸进行了 PCA, 如图 7 所示。胃消化后的样品均分布于不同

的象限，距离较远且分散，表明市售 IF 和 FE 均与 HM 的脂肪酸组成存在显著性差异，其中如图 7(a)所示，IF1 和 FE 因 MFGM 磷脂的添加使得它们的脂肪酸组成较为接近。如图 7(b)所示，第一、二主成分的总贡献率为 87.70%，FE 与 HM 虽然分布于不同的象限，但与 IF1 和 IF2 相比，FE 在 PC1 和 PC2 水平上都更接近 HM，表明其与 HM 之间脂肪酸组成上的差异最小，即 MFGM 磷脂的补充使得 FE 在消化行为上更加接近于 HM。

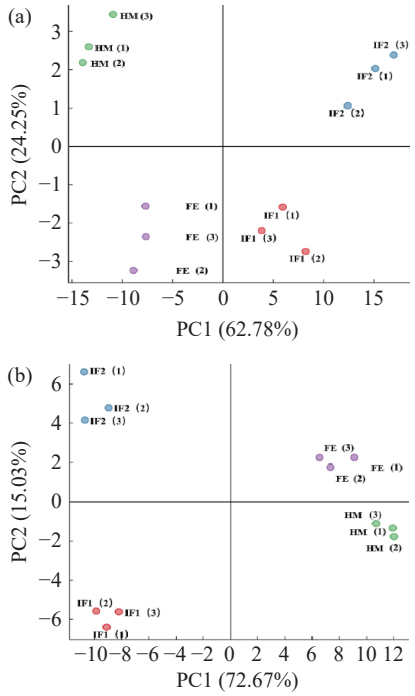


图 7　模拟体外婴儿胃肠消化过程中释放的游离脂肪酸 PCA

Fig.7　PCA of free fatty acids released during *in vitro* infant gastrointestinal digestion

注：(a)和(b)分别表示胃消化结束和肠消化结束时释放的游离脂肪酸的 PCA。

3　结论

本研究以 HM、市售含 MFGM 磷脂的 IF1 及不含 MFGM 磷脂的 IF2 为对照，系统探讨了按 MFGM 磷脂与乳清蛋白最佳比例(MFGM 磷脂∶乳清蛋白=5∶10)制备的 FE 的体外消化特性。结果显示，该比例下 FE 的消化特性与 HM 一致，且显著优于两款市售 IF。物理特性方面，FE 的粒径、电位变化与 HM 相近，这是因为 MFGM 磷脂与乳清蛋白会形成界面保护层，在胃消化过程中能减少脂滴聚集、维持体系稳定，而市售 IF 则易发生絮凝，稳定性较差。微观形态与界面蛋白方面，FE 在整个消化过程中可保持完整的脂肪球形态及磷脂环结构，其界面蛋白水解规律也与 HM 相似，具体表现为胃消化阶段酪蛋白少量存留、乳清蛋白抗胃消化，进入肠消化阶段后两类蛋白均快速分解。脂解动力学与游离脂肪酸组成方面，FE 的脂解过程呈现出与 HM 相似的滞后期特征，其游离脂肪酸分布(尤其是不饱和脂肪酸占比)也更为接近 HM，显著优于两款市售 IF(其饱和脂肪酸占比偏高)。综上，此比例(MFGM 磷脂∶乳清蛋白=5∶10)下的 MFGM 磷脂能够有效保护 MFG 结构，延缓脂质消化，使 FE 的消化行为更接近 HM。本研究为婴配粉 MFGM 母乳化提供一定实验依据，对推动婴配粉 MFGM 母乳化进程具有积极意义。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] ANDREAS N J, KAMPMANN B, MEHRING LE-DOARE K. Human breast milk: A review on its composition and bioactivity[J]. Early Human Development, 2015, 91(11): 629−635.

[2] MA Q, MA S, ZHAO Y, et al. Interaction between whey protein and soy lecithin and its influence on physicochemical properties and *in vitro* digestibility of emulsion: A consideration for mimicking milk fat globule[J]. Food Research International, 2023, 163: 112181.

[3] SÁNCHEZ C, FRANCO L, REGAL P, et al. Breast milk: A source of functional compounds with potential application in nutrition and therapy[J]. Nutrients, 2021, 13(3): 1026.

[4] LOPEZ C, CAUTY C, GUYOMARC'H F. Unraveling the complexity of milk fat globules to tailor bioinspired emulsions providing health benefits: The key role played by the biological membrane[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2018, 121(1): 1800201.

[5] LIU L, PAN Y, ZHANG X, et al. Effect of particle size and interface composition on the lipid digestion of droplets covered with membrane phospholipids[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(1): 159−169.

[6] 李晓东, 林爽, 刘璐, 等. 婴儿配方乳粉脂质母乳化的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 339−348. [LI Xiaodong, LIN Shuang, LIU Lu, et al. Advances in the research on lipid humanization of infant formula milk powder[J]. Food Science, 2022, 43(7): 339−348.]

[7] MA Q, SUN M, ZHAO Y, et al. Improving lipid digestion by modulating interfacial structure of fat globule based on milk fat globule membrane and different phospholipids[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109736.

[8] LI B, CHEN Q, MU L, et al. Milk fat globule membrane regulates the physicochemical properties and surface composition of infant formula powders by improving the stability of the emulsion[J]. Food Chemistry, 2024, 440: 137522.

[9] WU Z, ZHENG S, YUAN X, et al. Effect of the addition of milk fat globule membrane materials to the construction of fat globule interface in infant formula[J]. International Journal of Dairy Technology, 2023, 77(2): 497−509.

[10] TIMBY N, DOMELLÖF M, LÖNNERDAL B, et al. Supplementation of infant formula with bovine milk fat globule membranes[J]. Advances in Nutrition, 2017, 8(2): 351−355.

[11] REIS P M, RAAB T W, CHUAT J Y, et al. Influence of surfactants on lipase fat digestion in a model gastro-intestinal system [J]. Food Biophys, 2008, 3(4): 370−381.

[12] 王鑫, 于景华, 赵亭亭, 等. 基于乳脂肪球膜结构以提高液态乳体系的稳定性: 乳脂肪球膜构建机制综述[J]. 食品科学, 2025, 46(2): 308−316. [WANG Xin, YU Jinghua, ZHAO Tingting, et al. Improving the stability of liquid milk system based on milk fat globule membrane structure: A review on the construction mechanism of milk fat globule membrane[J]. Food Science, 2025, 46(2): 308−316.]

[13] YU X, ZHAO Y, SUN M, et al. Effects of egg yolk lecithin/milk fat globule membrane material ratio on the structure and stability of oil-in-water emulsions[J]. LWT, 2022, 168: 113891.

[14] MA Q, ZHANG X, ZHAO Y, et al. Regulating interfacial structure of fat globules based on milk fat globule membrane with milk phospholipids to improve physicochemical properties and fat digestion of infant formula emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 157: 110433.

[15] PAN Y, LIU S, LI J, et al. Regulating the lipid droplet interface based on milk fat globule membrane and milk proteins to improve lipid digestion of model infant formula emulsion[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109187.

[16] ZHAO Y, LIU L, MA Q, et al. Milk fat globule membrane (MFGM) phospholipid-whey protein interaction characterization and its effect on physicochemical, interfacial properties and evaluation of *in vitro* digestion of emulsions-Inspired by the MFGM[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 155: 110173.

[17] LU J, LIU L, PANG X Y, et al. Comparative proteomics of milk fat globule membrane in goat colostrum and mature milk[J]. Food Chemistry, 2016, 209: 10−16.

[18] LIU Y, LIU L, LIU S, et al. The influence of MPL addition on structure, interfacial compositions and physicochemical properties on infant formula fat globules[J]. Food Research International, 2023, 168: 112769.

[19] DRAPALA K P, MULVIHILL D M, O'MAHONY J A. Improving the oxidative stability of model whey protein hydrolysate-based infant formula emulsions with lecithin[J]. International Journal of Dairy Technology, 2018, 71(4): 966−974.

[20] YU X, ZHOU W, JIA Z, et al. Interfacial composition in infant formulas powder modulate lipid digestion in simulated *in-vitro* infant gastrointestinal digestion[J]. Food Research International, 2023, 165: 112553.

[21] MÉNARD O, BOURLIEU C, de OLIVEIRA S C, et al. A first step towards a consensus static *in vitro* model for simulating full-term infant digestion[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 338−345.

[22] SUN Y, YU X, HUSSAIN M, et al. Influence of milk fat globule membrane and milk protein concentrate treated by ultrasound on the structural and emulsifying stability of mimicking human fat emulsions[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 82: 105881.

[23] PAN Y, LIU L, TIAN S, et al. Comparative analysis of interfacial composition and structure of fat globules in human milk and infant formulas[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107290.

[24] LUO J, LIU L, LIU T, et al. Simulated *in vitro* infant gastrointestinal digestion of yak milk fat globules: A comparison with cow milk fat globules[J]. Food Chemistry, 2020, 314: 126160.

[25] BERTON-CARABIN C C, SAGIS L, SCHROËN K, et al. Formation, structure, and functionality of interfacial layers in food emulsions[J]. Annual Review of Food Science & Technology, 2018, 9: 551−587.

[26] LOPEZ C, MÉNARD O. Human milk fat globules: Polar lipid composition and *in situ* structural investigations revealing the heterogeneous distribution of proteins and the lateral segregation of sphingomyelin in the biological membrane[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2011, 83(1): 29−41.

[27] PINHEIRO A C, LAD M, SILVA H D, et al. Unravelling the behaviour of curcumin nanoemulsions during *in vitro* digestion: Effect of the surface charge[J]. Soft Matter, 2013, 9(11): 3147−3154.

[28] MULET-CABERO A-I, TORCELLO-GÓMEZ A, SAHA S, et al. Impact of caseins and whey proteins ratio and lipid content on *in vitro* digestion and *ex vivo* absorption[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126514.

[29] BAARS A, OOSTING A, ENGELS E, et al. Milk fat globule membrane coating of large lipid droplets in the diet of young mice prevents body fat accumulation in adulthood[J]. Br J Nutr, 2016, 115(11): 1930−1937.

[30] MALDONADO-VALDERRAMA J, WILDE P, MACIERZANKA A, et al. The role of bile salts in digestion[J]. Advances in Colloid & Interface Science, 2011, 165(1): 36−46.

[31] SINGH H, GALLIER S. Nature's complex emulsion: The fat globules of milk[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 68: 81−89.

[32] ZHANG X, QI B, XIE F, et al. Emulsion stability and dilatational rheological properties of soy/whey protein isolate complexes at the oil-water interface: Influence of pH[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106391.

[33] WU F, CHEN F, PU Y, et al. Effects of soy lecithin concentration on the physicochemical properties of whey protein isolate, casein-stabilised simulated infant formula emulsion and their corresponding microcapsules[J]. International Journal of Dairy Technology, 2022, 75(3): 513−526.

[34] HERNÁNDEZ-OLIVAS E, ASENSIO-GRAU A, CALVO-LERMA J, et al. Impact of refrigeration and freezing-thawing of breast milk on *in vitro* digestibility and liposoluble vitamin bioaccessibility in breast-fed infants[J]. LWT, 2023, 187(1): 115348.

[35] JUKKOLA A, PARTANEN R, XIANG W, et al. Food emulsifiers based on milk fat globule membranes and their interactions with calcium and casein phosphoproteins[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 30−37.

[36] MUN S, DECKER E A, PARK Y, et al. Influence of interfacial composition on *in vitro* digestibility of emulsified lipids: Potential mechanism for chitosan's ability to inhibit fat digestion[J]. Food Biophysics, 2006, 1(1): 21−29.

[37] LIU L, LIN S, MA S, et al. A comparative analysis of lipid digestion in human milk and infant formulas based on simulated *in vitro* infant gastrointestinal digestion[J]. Foods, 2022, 11(2): 200.

[38] 陈冲, 张宁, 任怡镁, 等. 酪蛋白凝胶颗粒对水包油型乳液稳定性及体外消化的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(9): 8. [CHEN Chong, ZHANG Ning, REN Yimei, et al. Effect of casein gel particles on stability and *in vitro* digestion of oil-in-water emulsions[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(9): 8.]

[39] NGUYEN T T P, BHANDARI B, CICHERO J, et al. Gastrointestinal digestion of dairy and soy proteins in infant formulas: An *in vitro* study[J]. Food Research International, 2015, 76(3): 348−358.

［40］ SUN Y, MA S, LIU Y, et al. Changes in interfacial composition and structure of milk fat globules are crucial regulating lipid digestion in simulated *in-vitro* infant gastrointestinal digestion[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108003.

［41］ LI Y, HU M, MCCLEMENTS D J. Factors affecting lipase digestibility of emulsified lipids using an *in vitro* digestion model: Proposal for a standardised pH-stat method[J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 498−505.

［42］ WENG J, LIN R, JIANG C, et al. O/W emulsion stabilized by bovine milk phospholipid-protein nanoemulsions: Preparation, stability, and *in vitro* digestion[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(17): 5003−5012.

［43］ BOURLIEU C, MÉNARD O, de LA CHEVASNERIE A, et al. The structure of infant formulas impacts their lipolysis, proteolysis and disintegration during *in vitro* gastric digestion[J]. Food Chemistry, 2015, 182: 224−235.

［44］ BOURLIEU C, MAHDOUENI W, PABOEUF G, et al. Physico-chemical behaviors of human and bovine milk membrane extracts and their influence on gastric lipase adsorption[J]. Biochimie, 2020, 169: 95−105.

［45］ VERGARA D, LÓPEZ O, BUSTAMANTE M, et al. An *in vitro* digestion study of encapsulated lactoferrin in rapeseed phospholipid-based liposomes[J]. Food Chemistry, 2020, 321: 126717.

［46］ LIU L, ZHANG X, LIU Y, et al. Simulated *in vitro* infant gastrointestinal digestion of infant formulas containing different fat sources and human milk: Differences in lipid profiling and free fatty acid release[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(24): 6799−6809.

［47］ NI X, ZHANG Z, DENG Z, et al. Optimizing ARA and DHA in infant formula: A systematic review of global trends, regional disparities, and considerations for precision nutrition[J]. Food Research International, 2024, 182: 114049.

［48］ YEN C-L E, NELSON D W, YEN M-I. Intestinal triacylglycerol synthesis in fat absorption and systemic energy metabolism[J]. Journal of Lipid Research, 2015, 56(3): 489−501.