

人乳与市售婴儿配方乳粉脂质比较研究

王霁月¹, 陆乃彦¹, 季 莹², 陈 晨^{1*}

(1. 江南大学食品学院, 无锡 214122; 2. 无锡海关, 无锡 214000)

摘 要: **目的** 研究不同市售婴儿配方乳粉中脂质的结构、含量和组成特征, 并将其与人乳对比分析。**方法** 分别挑选了甲、乙(添加乳脂肪球膜)和丙 3 个品牌的婴儿配方乳粉, 利用激光共聚焦显微镜对人乳和乳粉中的中性和极性脂质进行显微结构观察, 并依靠气相色谱和拉曼光谱分析脂肪酸组成的差异。**结果** 各乳粉复溶后脂质呈现球状结构, 与人乳状态相似; 各乳粉极性脂质碎片化存在, 不同于人乳; 观察到乙乳粉脂肪亮斑较少, 其脂肪含量也较低, 为 16.3 g/100 g, 其脂肪球粒径为 2.74 μm , 显著大于其余乳粉。在脂肪酸组成上各种乳粉和人乳也有明显不同, 乙乳粉的单不饱和脂肪酸含量较为接近人乳, 含有较高二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)、花生四烯酸(arachidonic acid, AA); 拉曼光谱显示各乳粉脂质流动性较为接近。**结论** 目前市售的婴儿配方乳粉的脂质存在状态与人乳存在差异, 优化脂肪球的脂质微结构, 使其状态更加趋近于人乳可能是未来婴儿配方乳粉的重要方向。

关键词: 婴儿配方乳粉; 人乳; 脂质; 显微结构; 脂肪酸

Comparative research on lipids between breast milk and commercial infant formulas

WANG Ji-Yue¹, LU Nai-Yan¹, JI Ying², CHEN Chen^{1*}

(1. College of Food Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Wuxi Customs, Wuxi 214000, China)

ABSTRACT: Objective To study the structure, content and composition characteristics of lipids in different market infant formula milk powder and compare with breast milk. **Methods** Three brands of infant formula milk powder were selected: A, B (adding milk fat globule membrane) and C. The microstructure of neutral and polar lipids in breast milk and milk powder was observed by laser confocal microscopy, and the differences of fatty acid composition were analyzed by gas chromatography and Raman spectroscopy. **Results** The lipid in each milk powder presented spherical structure, which was close to breast milk. The polar lipids of milk powder existed in fragmentation, which was different from that of breast milk. It was observed that milk powder B had less fat spots and a lower lipid content of 16.3 g/100 g, the diameter of fat globules was 2.74 μm , significantly larger than that of other milk powder. There were also obvious differences in the composition of fatty acids between various milk powder and breast milk. The content of monounsaturated fatty acids in milk powder B was similar to that in breast milk, and it contained higher ocosahexaenoic acid and arachidonic acid. The results of Raman spectrum showed that

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFD0400603)、国家自然科学基金(31871865)、无锡市科技计划项目(N20191002)

Fund: Supported by the National Key R & D Program of China (2017YFD40400603), the National Natural Science Foundation of China (31871865), and the Science and Technology Development Foundation of WuXi (N20191002)

***通讯作者:** 陈晨, 硕士, 实验师, 主要研究方向为实验室管理和光谱技术方面的研究。E-mail: yingluo-sky@163.com

***Corresponding author:** CHEN Chen, Master, Experimentalist, College of Food Science, JiangNan University, Wuxi 214122, China. E-mail: yingluo-sky@163.com

the lipid fluidity of milk powder was similar. **Conclusion** The lipid status of infant formula currently on the market is different from that of breast milk. Optimizing microstructure of lipid to make its status more similar to breast milk may be an important direction of infant formula milk powder in the future.

KEY WORDS: infant formula; breast milk; lipid; microstructure; fatty acid

1 引言

母乳是婴儿的最佳食品, 能为其提供蛋白质、脂质、碳水化合物、矿物质和维生素等营养物质^[1], 还能起到一定的免疫保护作用。当母乳不足时, 最主要的替代品就是婴儿配方乳粉。目前销售的婴儿配方乳粉以母乳为黄金标准, 在蛋白质比例、营养素添加等方面尽可能的接近母乳, 是替代母乳的良好选择。

脂肪是母乳中的重要成分, 占母乳含量的 3%~5%, 却占了婴儿能量来源的 50%^[2]。乳脂肪含有 97%~98% 的甘油三酯^[3], 还有部分极性的磷脂以及甾醇、胆固醇等成分。乳脂肪能够提供婴儿神经系统、视网膜发育、细胞组织生长代谢所必需的脂肪酸, 还具有运载脂溶性维生素(维生素 A、维生素 D、维生素 E 等)的作用, 是婴儿食物来源中不可或缺的成分之一。天然母乳中的脂肪大部分以胶体粒子的形式存在于乳中, 即乳脂肪球(milk fat globules, MFG)。这些脂肪球大小不等, 直径大部分在 0.2~15 μm 之间, 平均粒径在 4 μm 左右^[4], 由甘油三酯核心和包裹在外层的乳脂肪球膜(milk fat globule membrane, MFGM)构成, 较为稳定地存在于水相之中, 这种结构对其物理特性(如稳定性), 及功能特性(防止酶退化^[5]、参与消化进程^[6]等)的维持有着重要的作用。目前国内对于婴儿配方乳粉脂质的研究主要集中于基料的组成和比例^[1,7]、结构脂质^[8,9]、特殊生物活性成分^[10]等问题上, 关于添加 MFGM 完善乳粉脂质结构的研究较少。国外有报道称添加了 MFGM 成分的强化乳粉在促进神经发育、肠道发育及提高免疫力方面的功能^[11], 动物实验也表明添加 MFGM 的乳粉在消化过程和炎症保护方面具有优势^[12,13], 部分企业也认识到婴儿配方乳粉中脂质结构状态的重要性, 并且做出了以添加 MFGM、模拟母乳为宣传点的乳粉产品。然而乳粉加工工艺会导致脂质常与蛋白结合成颗粒状, 微观结构上仍与母乳存在区别。因此, 本文研究了市面上不同品牌乳粉和人乳脂质的微观状态、脂质含量、脂肪酸组成和脂质拉曼光谱等性质, 对于了解婴儿配方乳粉产品的质量现状, 增进其与母乳的相似程度, 以及求索未来乳品的发展方向, 具有重要意义, 为婴儿配方乳粉的改进和发展提供参考

2 材料与方法

2.1 仪器与试剂

S3500 激光粒度分析仪(美国 Microtrac 公司); LSM710

激光共聚焦显微镜(德国蔡司公司); LabRAM HR Evolution 显微共聚焦拉曼光谱仪(法国 HORIBA Jobin Yvon S.A.S. 公司); GC-2030AF 气相色谱仪(日本岛津公司)。

3 款婴儿配方乳粉, 购于无锡大型超市, 按产品说明溶解; 人乳样品由无锡妇幼保健院提供, $n=10$; 脂肪酸甲酯标准品(1 g)、尼罗红染料、Rh-DOPE 染料(美国 Sigma-Aldrich 公司); 甲苯、甲醇、正庚烷(色谱纯, 国药集团化学试剂有限公司); 其他实验试剂为分析纯(国药集团化学试剂有限公司); 实验用水为超纯水(美国密理博公司)。

2.2 实验方法

2.2.1 激光共聚焦显微镜观察

100 μL 尼罗红染料(42 $\mu\text{g/mL}$)加入 0.5 mL 乳对中性脂质进行标记, 20 μL Rh-DOPE 染料加入 0.5 mL 乳中对极性脂质进行标记, 然后在室温下静置 30 min。取与样品等量琼脂糖(5 g/L, 储存在 45 $^{\circ}\text{C}$)于载玻片上混合。使用 He-Ne 激光器, 激发尼罗红和 Rh-DOPE 荧光探针激发波长为 488 nm 和 543 nm, 图像分析所用物镜为 $\times 63$ (NA 1.4)的油镜^[14]。

2.2.2 乳脂肪球粒径测定

粒度测定基于多源激光衍射法, 大约 0.2 mL 乳稀释到 100 mL 水中, 再加入 1 mL 35 mmol/L EDTA/NaOH 缓冲液来裂解乳中的酪蛋白胶束。乳脂肪球在 466 nm 和 633 nm 处的折射率分别为 1.460 和 1.458。粒径结果用 $D_{3,2}$ (体积-表面积平均直径)和 $D_{4,3}$ (质量-体积平均直径), 以及 D_m (多数直径)来表示^[14,15]。

2.2.3 脂肪酸测定

脂质含量使用盖勃法测定, 按照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》^[16]操作。

2.2.4 脂质含量测定

按照 GB 5009.168-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》^[17], 对乳粉和人乳样品进行前处理和气相色谱测定。

2.2.5 拉曼光谱分析

采用经修改的 Gallier 等^[18]的方法进行拉曼光谱分析。将样品滴 1 滴在载玻片上, 然后再滴 1 滴 0.5% 的琼脂糖进行固定。琼脂糖的光谱不会影响样品的光谱, 因为琼脂糖在样品检测的波段没有峰。在光谱区域范围 400~3200 cm^{-1} 进行扫描, 选择 532 nm 的激发波长。

2.2.6 统计学分析

所有测定至少重复 3 次。采用 SPSS 软件 20.0 版对结果进行统计学处理, 根据单因素方差分析法比较分析数据的显著性差异($P < 0.05$)。所有数据均表示为平均值 $\pm$ 标准差(standard deviation, SD)。

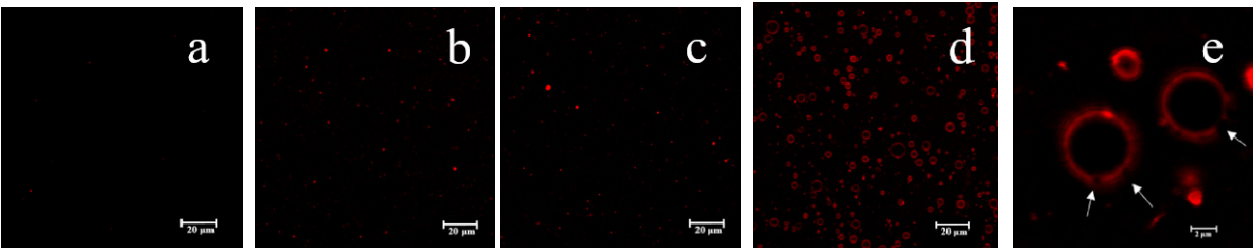
3 结果与分析

3.1 人乳和乳粉脂肪球结构观察

利用荧光染料尼罗红结合标记中性的甘油三酯内核, Rh-DOPE 结合标记 MFGM 上的磷脂等极性脂类, 染料在特定波长下激发荧光, 从而观察乳脂球微观结构。图 1 展示了 3 款市售乳粉和人乳中的极性脂质状态。乳粉极性脂质主要以碎片化的亮斑出现, 没有形成类似人乳 MFGM 的圆形包膜结构。其中甲乳粉(图 1a)相较于乙(图 1b)、丙(图 1c)2 款乳粉亮斑较少, 表示极性脂质含量更低。经过调研, 3 款乳粉中的磷脂含量不同, 其中乙款乳粉在配料时加入了 MFGM, 其中的极性脂质可能因此而增多, 也因此提高了乳粉的营养价值, 但是仍然并没有观察到类似天然母乳 MFGM 的膜结构。反观人乳体系(图 1d、e)中存在大小不

等的空心球体, 亮色代表被 Rh-DOPE 染色的磷脂, 标示了 MFGM 的存在。箭头所示的暗斑由高熔点脂质组成, 被称为脂质筏^[19], 是天然脂肪球结构的代表性特征。姚云平^[20]在研究中发现人乳 MFGM 上存在荧光探针难以结合的结构紧密区, 与本研究的结果一致。李雪晴等^[21]研究表明, 对婴儿配方乳粉补充 MFGM 有利于婴儿认知发育, 但是失去天然的圆形包膜结构是否会对 MFGM 功能造成影响有待进一步研究。

如图 2 所示, 复溶后甲、乙、丙 3 款市售乳粉的脂肪含量和状态有明显不同。整体来看中性脂肪均表现为圆形亮点。图 2b 中亮点数量少于 2a 和 2c, 但其直径较大, 这说明相对于其他两款乳粉, 乙乳粉脂肪球数量更少、直径更大; 同时从表 1 可以看出, 乳粉脂肪球粒径均低于人乳, 乙乳粉脂肪球粒径为 $2.74\ \mu\text{m}$, 显著高于甲($1.01\ \mu\text{m}$)、丙乳粉($0.75\ \mu\text{m}$), 这与显微观察结果吻合, 造成这种现象的原因可能是均质和喷雾干燥等工艺条件的不同^[22]。乙乳粉复溶后偏黄、易分层, 与 Timby 等^[23]报道中脂肪球粒度偏大可能造成乳液稳定性较低和外观发黄的说法一致。



注: a-甲乳粉极性脂质; b-乙乳粉极性脂质; c-丙乳粉极性脂质; d-人乳极性脂质(40 倍); e-人乳极性脂质(63 倍)。

图 1 3 种市售乳粉和人乳的显微结构(物镜倍数 40 倍和 63 倍, 使用 Rh-DOPE 标记极性脂质)

Fig.1 Microscopic structure of fat in 3 commercial infant formulas and human milk (the magnification of objective lens 40 $\times$ and 63 $\times$, polar lipid was labeled with Rh-DOPE)

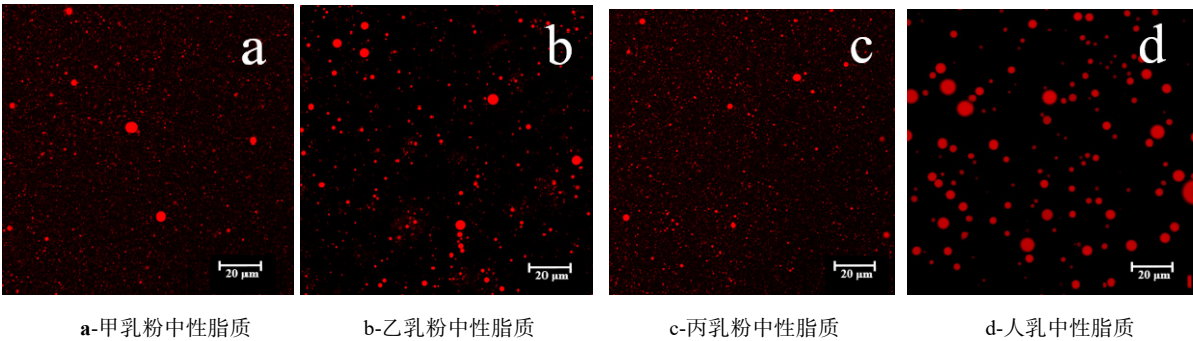


图 2 3 种市售乳粉显微结构(物镜倍数 40 倍, 使用尼罗红标记中性脂质)

Fig.2 Microscopic structure of fat in 3 commercial infant formulas (the magnification of objective lens is 40 $\times$, neutral lipid was labeled with Nile red)

表 1 3 种市售婴幼儿配方乳粉中脂肪粒径				
Table 1	Size of fat in 3 kinds of commercial infant formulas			
	甲	乙	丙	人乳
D _{3,2} /μm	1.01±0.01 _b	2.74±0.04 _c	0.75±0.00 _a	4.26±0.07 _d
D _{4,3} /μm	3.41±0.10 _b	8.25±0.40 _c	1.63±0.10 _a	7.26±0.28 _d
D _m /μm	1.41±0.02 _b	4.17±0.12 _c	0.99±0.00 _a	5.55±0.09 _d

注: 采用 Duncan 分析法, 同行数据标注有不同上标字母者表示有显著差异($P\leq 0.05$), 表 2、3 同。

3.2 脂肪含量和脂肪酸组成测定

脂肪是乳和乳粉的重要成分, 脂肪含量也是液态乳和乳粉的质量控制指标之一。3 款乳粉的脂肪含量测定结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 各款乳粉脂肪含量有明显差异, 但

都与文献报道结果接近^[24]。其中乙乳粉脂肪含量为 16.3 g/100 g, 显著低于其余 2 款乳粉, 与图 2 中乙乳粉脂肪荧光较为稀少的结果对应。其原因可能是不同乳粉在确定产品配方和设计冲泡浓度时存在区别。乳脂肪含量与脂肪球大小相关, 同时脂肪含量过高还会对乳液的稳定性产生负面影响^[22]。

表 2 3 种市售婴幼儿配方乳粉中脂肪含量(n=3)			
Table 2	Fat content in 3 kinds of commercial infant formulas(n=3)		
	甲	乙	丙
脂肪含量 /(g/100 g)	26.74±0.76 ^c	16.27±0.42 ^a	23.06±0.42 ^b

脂肪酸是脂肪的主要组成部分, 不仅可以为机体提供能量, 还是婴儿脂类合成的基础。3 款乳粉和人乳的脂肪酸组成如表 3 所示。

表 3 3 种市售婴幼儿配方乳粉和人乳的脂肪酸组成(n=3)				
Table 3	Fatty acid composition of 3 kinds of commercial infant formulas and human milk (n=3)			
	甲	乙	丙	人乳
饱和脂肪酸含量/(g/100 g)	29.89±0.17 ^b	41.05±0.20 ^d	32.65±0.03 ^c	25.98±0.01 ^a
C8:0 辛酸	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0.10±0.00 ^b
C10:0 癸酸	1.37±0.00 ^d	1.08±0.01 ^b	1.10±0.01 ^c	1.00±0.00 ^a
C11:0 十一烷酸	0.01±0.00 ^a	0.01±0.00 ^a	0.02±0.01 ^a	0 ^a
C12:0 月桂酸	11.78±0.04 ^d	8.30±0.03 ^c	5.61±0.02 ^b	4.15±0.01 ^a
C13:0 十三烷酸	0.01±0.00 ^b	0.01±0.00 ^b	0.02±0.00 ^c	0 ^a
C14:0 肉蔻酸	4.85±0.02 ^d	4.09±0.01 ^b	4.41±0.00 ^c	3.69±0.00 ^a
C15:0 十五烷酸	0.02±0.00 ^a	0.07±0.00 ^b	0.24±0.00 ^d	0.10±0.00 ^c
C16:0 棕榈酸	7.65±0.04 ^a	22.97±0.08 ^d	14.80±0.03 ^c	13.96±0.00 ^b
C17:0 珍珠酸	0.04±0.00 ^a	0.08±0.00 ^b	0.16±0.00 ^d	0.09±0.00 ^c
C18:0 硬脂酸	3.53±0.05 ^b	4.02±0.04 ^c	5.79±0.01 ^d	2.79±0.02 ^a
C20:0 花生酸	0.18±0.01 ^b	0.20±0.01 ^b	0.26±0.00 ^c	0.11±0.01 ^a
C22:0 二十二碳烷酸	0.45±0.01 ^c	0.23±0.02 ^b	0.25±0.00 ^b	0 ^a
单不饱和脂肪酸含量/(g/100 g)	46.53±0.14 ^d	40.30±0.06 ^b	38.45±0.02 ^a	41.82±0.03 ^c
C14:1 十四碳一烯酸	0.01±0.00 ^a	0.03±0.00 ^b	0.16±0.00 ^d	0.09±0.00 ^c
C16:1 棕榈油酸	0.07±0.03 ^a	0.10±0.00 ^a	0.48±0.03 ^b	2.13±0.04 ^c
C17:1 十七碳一烯酸	0.03±0.00 ^a	0.04±0.00 ^a	0.09±0.00 ^b	0.12±0.00 ^c
C18:1(T) 油酸	46.29±0.10 ^d	40.01±0.06 ^c	37.47±0.06 ^a	38.88±0.08 ^b
C20:1 二十碳一烯酸	0.13±0.01 ^a	0.12±0.00 ^a	0.26±0.00 ^b	0.28±0.00 ^c
C24:1 二十四碳一烯酸	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0.33±0.00 ^b
多不饱和脂肪酸含量/(g/100 g)	23.86±0.10 ^b	18.91±0.07 ^a	28.89±0.00 ^c	32.19±0.03 ^d

续表 3

	甲	乙	丙	人乳
C18:2 亚油酸	21.05±0.07 ^b	16.46±0.05 ^a	25.59±0.02 ^c	29.81±0.04 ^d
C18:3(n-3) 亚麻酸	2.15±0.04 ^c	1.20±0.00 ^b	2.65±0.01 ^d	0.98±0.03 ^a
C20:2 二十二碳二烯酸	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0.30±0.01 ^b
C20:3(n-6) 花生三烯酸	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0.41±0.02 ^b
C20:4(n-6) 花生四烯酸	0.37±0.00 ^b	0.79±0.00 ^d	0.28±0.01 ^a	0.69±0.00 ^c
C22:6(n-3) 二十二碳六烯酸	0.30±0.01 ^b	0.46±0.02 ^d	0.37±0.01 ^c	0 ^a

脂肪酸按照饱和程度分为饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸与多不饱和脂肪酸 3 大类, 几种婴幼儿配方乳粉中, 饱和脂肪酸种类较多, 主要由月桂酸、肉豆蔻酸、棕榈酸及硬脂酸组成, 但不同乳粉中其各部分占比也有较大不同。乙、丙款中棕榈酸含量最高, 甲乳粉中月桂酸含量占优, 而人乳中棕榈酸为饱和脂肪酸占比最大的成分。3 种乳粉中单不饱和脂肪酸主要为油酸, 而人乳中还含有少量的棕榈油酸。对于多不饱和脂肪酸, 婴儿配方乳粉主要由亚油酸及亚麻酸组成, 人乳中主要为亚油酸, 与报道相符^[25,26]。乙乳粉中还含有明显较多的 AA 和 DHA, DHA 和 AA 对婴幼儿发育起着重要作用, 尤其有助于大脑发育、认知功能、神经系统及视觉的发育。EPA 虽然是人体必需脂肪酸之一, 但由于其对婴幼儿存在的风险仍有争论, 3 款乳粉均没有进行添加, 在 3 种市售乳粉中均能检出少量 DHA 及 AA, 均未检出二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA), 与已有研究中对乳粉脂肪酸的测定结果一致^[27], 也和 3 款产品标示的配料相符。

各款乳粉饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸占比与人乳对比如图 3 所示。总体比较后可以看出, 几款市售乳粉和人乳各类脂肪酸占比有明显差别, 人乳的饱和脂肪酸含量较低, 为(25.98±0.01) (g/100 g), 甲乙丙 3 款乳粉饱和脂肪酸含量均高于人乳, 分别为(29.89±0.17) (g/100 g)、(41.05±0.2) (g/100 g)、(32.65±0.03) (g/100 g); 各款乳粉的 3 类脂肪酸占比与人乳也存在差异, 其中乙乳粉的单不饱和脂肪酸比例和人乳最为接近, 但多不饱和脂肪酸、饱和脂肪酸比例与人乳差别很大; 甲、丙 2 款乳粉的各类脂肪酸比例都较为接近人乳。

各品牌乳粉的脂肪酸组成及含量存在差异, 尤其体现在饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸上, 且各品牌婴儿配方乳粉与母乳的饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸占比也有明显不同, 这种差异可能导致婴幼儿的营养需求不能得到充分满足。

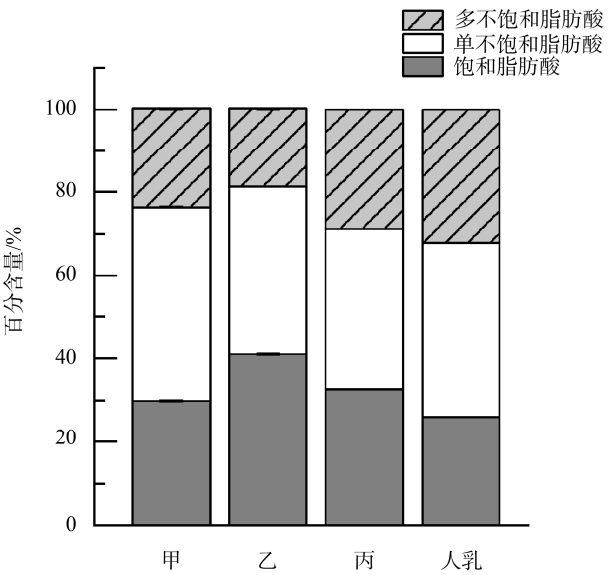
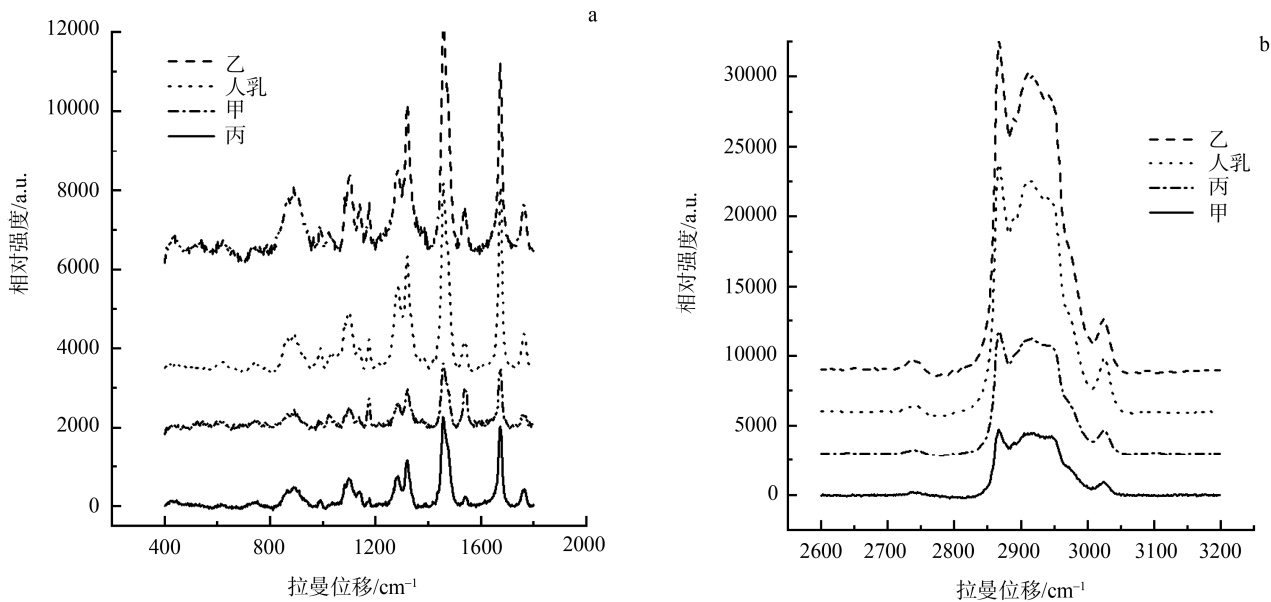


图 3 3 款婴儿配方乳粉和人乳的饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸占比

Fig.3 Proportion of saturated fatty acids, monounsaturated fatty acids and polyunsaturated fatty acids in 3 types of infant formulas and human milk

3.3 拉曼光谱分析

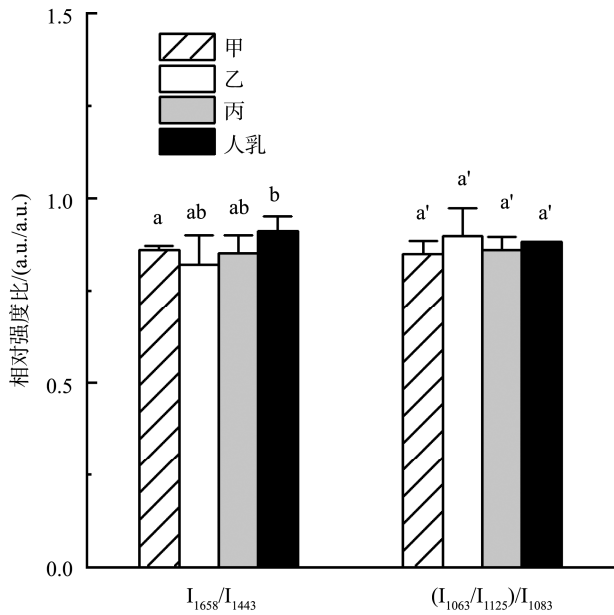
拉曼光谱依据光的拉曼散射效应, 通过分析入射光的散射光谱, 可以获得分子振动、转动等信息, 而且可以做到无损检测。通过分析脂肪的拉曼光谱峰可以得出其中的组成信息^[28,29], 其中 1658 cm^{-1} 处的特征峰代表了 C=C 的振动, 1443 cm^{-1} 处则为脂肪酸 CH_2 的剪切震动带, 因此峰值比 I_{1658}/I_{1443} 可用于表示脂肪酸的不饱和度信息; 在 1063~1083 cm^{-1} 和 1125 cm^{-1} 处的峰代表脂肪酸的 C-C 伸缩振动和面外摇摆, 峰强度比 $(I_{1063}+I_{1125})/I_{1083}$ 可以代表脂质的流动性, 受脂质组成影响。如图 4 所示, 不同乳粉和人乳之间脂质的拉曼光谱特征峰存在差异。从图 5 可以得知, 3 种乳粉的 I_{1658}/I_{1443} 值低于人乳, 表示人乳脂肪酸的不饱和度较高; 各款乳粉的 $(I_{1063}+I_{1125})/I_{1083}$ 值差异不明显, 代表其脂质流动性比较接近。



注: a-拉曼光谱图(400~1800 cm⁻¹); b-拉曼光谱图(2600~3200 cm⁻¹)。

图 4 3 款婴儿配方乳粉和人乳的拉曼光谱图

Fig.4 Raman spectra of 3 kinds of infant formulas and human milk



注: 采用 Duncan 分析法, 同系列数据标注有不同字母者表示有显著差异($P < 0.05$)。I₁₆₅₈/I₁₄₄₃ 代表脂质不饱和度, (I₁₀₆₃+I₁₁₂₅)/I₁₀₈₃ 代表脂质流动性。

图 5 3 款婴儿配方乳粉和人乳的拉曼光谱

Fig.5 Raman spectra of 3 kinds of infant formulas and human milk

4 结 论

3 款市售乳粉中的脂肪含量有所不同, 脂肪球的大小、组成和结构也有差别。其中甲、丙 2 款乳粉中脂肪含

量较高, 乙乳粉脂肪球直径最大, 各乳粉脂肪均呈球状, 与人乳相似; 3 种乳粉极性脂质均没有形成膜状结构, 与天然 MFGM 结构存在差异; 各款乳粉脂肪酸组成差异较大, 饱和脂肪酸占比相对于人乳均偏大, 乙乳粉的单不饱和脂肪酸比例接近人乳; 拉曼光谱还显示了各乳粉脂质的流动性较为接近。可以看出, 包括添加 MFGM 在内的市售乳粉在脂质微观结构、含量和脂肪酸组成等方面和母乳都还存在差别, 婴儿配方乳粉的技术研发还有进一步进步的空间, 通过全方位模拟母乳脂质, 尤其是在脂肪球微观结构方面深入研究, 将有利于生产出更有益于婴儿食用的乳粉产品。

参考文献

- [1] 王颂萍, 任发政, 罗洁, 等. 婴幼儿配方奶粉研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 200-210.
Wang SP, Ren FZ, Luo J, et al. Research progress of infant formula milk powder [J]. J Agric Mach, 2015, 46(4): 200-210.
- [2] Hamosh M, Bitman J, Wood L, et al. Lipids in milk and the first steps in their digestion [J]. Pediatrics, 1985, 75(1-2): 146-150.
- [3] Michalski MC, Briard V, Michel F, et al. Size distribution of fat globules in human colostrum, breast milk, and infant formula [J]. J Dairy Sci, 2005, 88(6): 1927-1940.
- [4] Dewettinck K, Rombaut R, Thienpont N, et al. Nutritional and technological aspects of milk fat globule membrane material [J]. Int Dairy J, 2008, 18(5): 436-457.
- [5] Ye A, Cui J, Singh H. Effect of the fat globule membrane on *in vitro* digestion of milk fat globules with pancreatic lipase [J]. Int Dairy J, 2010, 20(12): 822-829.
- [6] Hettinga K, Valenberg HV, Vries SD, et al. The host defense proteome of human and bovine milk [J]. PLoS ONE, 2013, 6(4): 19433.

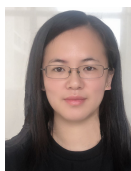
- [7] Lopez C, Mnard O. Human milk fat globules: Polar lipid composition and in situ structural investigations revealing the heterogeneous distribution of proteins and the lateral segregation of sphingomyelin in the biological membrane [J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2011, 83(1): 29–41.
- [8] Tanaka K, Hosozawa M, Kudo N, *et al.* The pilot study: Sphingomyelin-fortified milk has a positive association with the neurobehavioral development of very low birth weight infants during infancy, randomized control trial [J]. *Brain Dev*, 2013, 35(1): 45–52.
- [9] 谢跃杰, 王仲明, 熊政委, 等. 配方奶粉和母乳中结构脂质差异及其对婴幼儿生理功能的影响研究进展[J]. *食品科学*, 2018, 39(21): 293–298. Xie YJ, Wang ZM, Xiong ZG, *et al.* Research progress on structural lipid difference in formula milk powder and breast milk and its effect on physiological function of infants and young children [J]. *Food Sci*, 2018, 39(21): 293–298.
- [10] 张雪, 杨洁, 王伟, 等. 乳脂肪球膜的组成、营养及制备研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(1): 292–302. Zhang X, Yang J, Wei W, *et al.* Research progress in composition, nutrition and preparation of milk fat globular membrane [J]. *Food Sci*, 2019, 40(1): 292–302.
- [11] 都军霞, 韩立强, 乔新安, 等. 乳脂肪球膜主要膜蛋白功能的研究进展[J]. *中国畜牧兽医*, 2007, 34(10): 64–66. Du JX, Han LQ, Qiao XA, *et al.* Research progress of main membrane protein function of milk fat globule [J]. *Chin J Anim Husband Vet Med*, 2007, 34(10): 64–66.
- [12] Oshida K, Shimizu T, Takase M, *et al.* Effects of dietary sphingomyelin on central nervous system myelination in developing rats [J]. *Pediatr Res*, 2003, 53(4): 589–593.
- [13] 景萌娜, 姜铁民, 刘斌, 等. 母乳和牛乳中乳脂肪球膜蛋白质的差异分析[J]. *食品科学*, 2016, 37(20): 69–74. Jing MN, Jiang TM, Liu B, *et al.* Difference analysis of milk fat globulin membrane protein between breast milk and milk [J]. *Food Sci*, 2016, 37(20): 69–74.
- [14] 杨剑倩. 婴幼儿配方奶粉国际研究进展 [J]. *中国保健营养*, 2018, 28(26): 57–59. Yang JQ. International research progress of infant formula milk powder [J]. *Chin Health Nutr*, 2018, 28(26): 57–59.
- [15] 刘萌颖. 婴儿配方奶粉中低聚糖对肠道益生功能的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018. Liu MY. Effect of oligosaccharides in infant formula on intestinal probiotic function [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
- [16] GB 5009.6-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S]. GB 5009.6-2016 National food safety standard-Determination of fat in food [S].
- [17] GB 5009.168-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定[S]. GB 5009.168-2016 National food safety standard-Determination of fatty acids in food [S].
- [18] Gallier S, Gordon KC, Rafael JF, *et al.* Composition of bovine milk fat globules by confocal Raman microscopy [J]. *Int Dairy J*, 2011, 21(6): 402–412.
- [19] Lopez C, Madec MN, Jimenez FR. Lipid rafts in the bovine milk fat globule membrane revealed by the lateral segregation of phospholipids and heterogeneous distribution of glycoproteins [J]. *Food Chem*, 2010, 120(1): 22–33.
- [20] 姚云平. 乳脂肪球的组成结构、体外消化及抗菌特性[D]. 无锡: 江南大学, 2017. Yao YP. Composition, structure, *in vitro* digestion and antibacterial properties of milk fat globules [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [21] 李雪晴, 于景华. 乳粉表面脂肪在生产和贮存过程中的变化及对功能特性的影响研究进展[J]. *乳业科学与技术*, 2016, (2): 29–33. Li XQ, Yu JH. Research progress on changes of surface fat of milk powder during production and storage and its influence on functional properties [J]. *Dairy Sci Technol*, 2016, (2): 29–33.
- [22] 迟雪露, 仝令君, 潘明慧, 等. 乳脂肪含量对牛乳理化性质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(4): 26–31. Chi XL, Tong LJ, Pan MH, *et al.* Effect of milk fat content on physical and chemical properties of milk [J]. *Food Sci*, 2018, 39(4): 26–31.
- [23] Timby N, Domellof 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]. *Am J Clin Nutr*, 2014, 99(4): 860–868.
- [24] Kanno C, Kim DH. A simple procedure for the preparation of bovine milk fat globule membrane and a comparison of its composition, enzymatic activities, and electrophoretic properties with those prepared by other methods [J]. *J Agric Chem Soc Jpn*, 1990, 54(11): 2845–2854.
- [25] Corredig M, Dalgleish DG. Isolates from industrial buttermilk: Emulsifying properties of materials derived from the milk fat globule membrane [J]. *J Agric Food Chem*, 1997, 45(12): 4595–4600.
- [26] 章肇敏, 曾晓龙, 熊文英, 等. 婴幼儿配方乳粉中宏量营养素的设计研究[J]. *中国乳业*, 2016, (10): 63–67. Zhang ZM, Zeng XL, Xiong WY, *et al.* Design of macronutrients in infant formula milk powder [J]. *Chin Dairy*, 2016, (10): 63–67.
- [27] 杨帆, 吴娟, 郑颖. 人乳、牛乳和配方奶粉中脂肪酸组成随泌乳期及婴幼儿不同阶段的变化[J]. *卫生研究*, 2017, 46(4): 579–584, 614. Yang F, Wu J, Zheng Y. Changes of fatty acid composition in human milk, cow's milk and formula milk powder with lactation period and different stages of infants and young children [J]. *Health Res*, 2017, 46(4): 579–584, 614.
- [28] 仲玉备, 陈历俊, 赵军英, 等. 泌乳期母乳脂肪酸变化及其多不饱和脂肪酸影响因素[J]. *食品科学*, 2019, 40(4): 237–243. Zhong YB, Chen LJ, Zhao JY, *et al.* Changes of breast milk fatty acids during lactation and influencing factors of polyunsaturated fatty acids [J]. *Food Sci*, 2019, 40(4): 237–243.
- [29] 戴逸, 戴智勇, 张岩春, 等. 市售婴幼儿配方乳粉中脂肪酸组成分析[J]. *中国油脂*, 2019, 44(3): 160–163. Dai Y, Dai ZY, Zhang YC, *et al.* Analysis of fatty acid composition in commercial infant formula milk powder [J]. *China Oils Fats*, 2019, 44(3): 160–163.

(责任编辑: 于梦娇)

作者简介



王霁月, 硕士, 主要研究方向为食品组分与加工。
E-mail: seeking123@foxmail.com



陈晨, 硕士, 实验师, 主要研究方向为实验室管理和光谱技术方面的研究。
E-mail: yingluo-sky@163.com