

## 不同乳源乳脂肪球的体外消化特性

王煜林<sup>1</sup>, 宝音朝克图<sup>2</sup>, 吉日木图<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup> 内蒙古农业大学 乳品生物技术与工程教育部重点实验室 呼和浩特 010018

<sup>2</sup> 苏尼特右旗畜牧工作站 内蒙古锡林郭勒盟 011299)

**摘要** 基于模拟婴幼儿胃肠道消化,采用粒径分布、Zeta 电势和激光共聚焦扫描电镜观察不同乳源(牛、羊、驼)乳脂肪球(MFG)在消化各阶段物理特性的差异,采用气相色谱-质谱联用及滴定法,探究在不同消化阶段游离脂肪酸及脂解速率的变化,完善脂质消化的变化规律。结果表明,不同乳源 MFG 的颗粒粒径随消化时间的延长,均呈减小的趋势,与激光共聚焦显微镜染色后观察结果一致。在肠消化末端,驼乳 MFG 的平均粒径为 $(0.46\pm 0.07)\mu\text{m}$ ,显著低于牛乳 MFG 的粒径( $P<0.05$ )。动态光散射电位仪测得电势绝对值显示,所有乳源 MFG 进胃肠消化后均表现出强负电性,其中肠消化末端的电势绝对值由大至小排序为羊乳>牛乳>驼乳。不同乳源 MFG 在肠道消化期间的脂解速率无明显差异,而驼乳 MFG 相较于其它两种乳源在不同消化阶段,棕榈油酸(C16:0)的含量显著更高( $P<0.05$ ),长链脂肪酸比例更低。研究结果为驼乳产品的加工以及新型配方奶粉的制备提供新思路。

**关键词** 乳脂肪球; 消化特性; 乳源

文章编号 1009-7848(2024)07-0070-09 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.07.007

乳被认为是一种营养丰富的优质食品,自史前时代就有人类饮用牛乳和羊乳作为饮食营养来源的一部分<sup>[1]</sup>。近年来,因驼乳的营养价值和潜在的药用特性而备受关注。与羊乳和牛乳相比,因驼乳不含 $\beta$ -乳球蛋白,故很少有人因饮用驼乳而发生过敏,并且驼乳含有丰富的免疫相关蛋白质,其中一些在牛乳和人乳中并不存在,如肽聚糖识别蛋白 1、乳清酸性蛋白,当婴幼儿食用这些蛋白质时可能对健康有益,然而需通过体内和体外试验验证这一猜想<sup>[2]</sup>。迄今为止,关于不同乳源蛋白质消化率的研究甚多,如:Jrad 等<sup>[3]</sup>研究了驼乳蛋白质的消化率,Raquel 等<sup>[4]</sup>探究了不同乳源蛋白质的消化率。

乳脂为乳中的主要成分之一,是新生儿最早接触的营养物质,可为新生儿提供必要的营养物质。研究发现,脂质的组成和结构的独特性是脂质代谢的基础,对婴幼儿的发育至关重要。通常,乳脂是以甘油三酯(TAG)为核心的小球组成,称为乳脂肪球(MFG),其表面由厚度约为 8~10 nm 的

膜所包裹,称为乳脂肪球膜(MFGM),该膜由 60% 的蛋白质和 40% 的脂质组成<sup>[5]</sup>。对于大多数哺乳动物而言,乳脂可以为新生儿提供 50%~60% 的能量,并且是脂溶性成分的重要载体,例如:类胡萝卜素和脂溶性维生素。除此之外,乳脂在新生儿体内起多种生物活性作用,包括建立免疫系统,参与脂质代谢,构建细胞膜以及维持神经发育<sup>[6]</sup>。

诸多研究结果显示,不同乳源的脂质结构和化学成分与母乳中的脂质仍有很大差异,因此探究不同乳源 MFG 的差异性,对充分发挥其营养成分的作用具有重要意义<sup>[7]</sup>。前人研究表明,不同乳源差异主要体现在脂肪水平、MFG、三酰甘油以及脂肪酸的组成<sup>[8-9]</sup>。He 等<sup>[10]</sup>发现婴儿在消化过程中,MFG 的结构、颗粒大小和组成可能会影响以及改变脂质的消化行为。有研究表明,羊乳 MFG 含有丰富的短链和中链三酰甘油<sup>[11]</sup>,驼乳 MFG 比牛乳含有更高比例的长链脂肪酸<sup>[12]</sup>,而短链和中链脂肪酸可以被脂肪酶更有效地水解、消化<sup>[13]</sup>。此外,哺乳动物种类不同,导致 MFGM 蛋白质比例存在差异,如酪蛋白与乳清蛋白的比例。其中,酪蛋白会影响 MFG 在消化过程中的凝固行为,继而影响消化水平<sup>[14]</sup>。Jenkins 等<sup>[15]</sup>研究发现,与牛乳、羊乳 MFGM 蛋白相比,驼乳 MFGM 中 $\alpha\text{s1}$ -和 $\beta$ -酪蛋白与人乳更为相似,这会降低驼乳消化时的

收稿日期: 2023-07-03

基金项目: 内蒙古自治区科技成果转化专项资金项目  
(2021CG0021)

第一作者: 王煜林,男,硕士生

通信作者: 吉日木图 E-mail: yeluotuo1999@163.vip.com

过敏性。

众所周知,所有哺乳动物的脂肪都是以小的 MFG 形式存在,据报道,人乳的 MFG 颗粒大小在 1~10  $\mu\text{m}$  范围,平均粒径范围 3~5  $\mu\text{m}$ ,其中大多数约为 4  $\mu\text{m}$ ;牛乳和羊乳的 MFG 颗粒平均粒径为 2.8~4.0  $\mu\text{m}$ <sup>[16]</sup>,驼乳 MFG 平均粒径为 2~3  $\mu\text{m}$ <sup>[17]</sup>,并且相对较小的脂肪球在胃肠道中可能更易消化<sup>[18]</sup>。此外,哺乳动物的 MFG 脂肪酸与人 MFG 脂肪酸相比,人 MFG 所含饱和脂肪酸的比例较低,单不饱和脂肪酸以及多不饱和脂肪酸中的  $\omega$ -6 和  $\omega$ -3 脂肪酸比例较高。驼等哺乳动物 MFG 中所含有更低比例的饱和脂肪酸和更高比例的多不饱和脂肪酸,其中  $\omega$ -6 和  $\omega$ -3 脂肪酸含量更高,与人乳 MFG 脂肪酸含量具有明显差异<sup>[19]</sup>。鉴于 MFG 的营养功能,本文探究不同乳源(牛乳、羊乳和驼乳)MFG 所具有的营养价值,旨在为非牛乳成分补充提供一定的数据支持。通过模拟婴幼儿体外消化试验,对比 3 种乳源 MFG 经胃肠消化后结构、颗粒大小等多方面的差异,探究它们独特的消化特性,为新型婴幼儿配方奶粉的制备提供研究思路。

1 材料和方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 试验样品 牛乳、羊乳和驼乳均取自内蒙古阿拉善右旗的牧场。将采集新鲜的乳源进行过滤,除去砂石、毛发等杂质后,将乳样温度迅速降至 4  $^{\circ}\text{C}$ ,保持该温度并将乳样快速运至实验室。将采得同类乳样混匀,尽量避免样品误差,将乳样分离出蛋白质和乳脂肪(每组 3 次重复),冻干成粉,将粉末置于-20  $^{\circ}\text{C}$  储存,备用。

1.1.2 试验试剂 胰蛋白酶 T0303-1G、胆盐 G9910-250MG、猪胃蛋白酶 p6887-250MG、脂肪酶 L3126-25G,美国 Sigma 公司;磷酸氢二钾( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ )、氯化钠( $\text{NaCl}$ )、盐酸( $\text{HCl}$ )、二氯甲烷( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ )、甲醇( $\text{CH}_3\text{OH}$ ),国药集团化学试剂有限公司。

1.2 设备与仪器

恒温振荡培养箱,上海赫田公司;高效液相色谱仪,日本 Shimadzu 公司;Zetasizer 纳米粒度电位仪、Mastersizer 激光粒度仪,英国 Malvern 公司;

Leica-TCSP5 激光扫描共聚焦显微镜,德国 Leica 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 体外模拟胃、肠消化环境步骤

1.3.1.1 消化液储备液 模拟胃、肠消化液储的组成,见表 1。

1.3.1.2 消化液工作液 模拟消化液工作液按表 2 配制。

表 1 模拟消化液储组成

Table 1 Composition of simulated digestive fluid storage

模拟消化液 储备液	试剂	分子式	质量浓度/ (g/L)
胃	氯化钠	$\text{NaCl}$	2
	盐酸	$\text{HCl}$	7
肠	磷酸氢二钾	$\text{K}_2\text{HPO}_4$	6.8
	氯化钠	$\text{NaCl}$	8

表 2 模拟消化液工作液配制

Table 2 Configuration of simulated digestive fluid working fluid

模拟消化液工作液	消化液	含量
胃(SGFS)	胃蛋白酶	0.001 mg/mL
	人工胃液(SGF)	20 mL
	人工肠液(SIF)	20 mL(等量 SGF)
小肠(SIFWS)	胆盐	0.05 mg/mL
	胰蛋白酶	0.003 mg/mL
	脂肪酶	0.25 mg/mL

1.3.2 模拟婴儿胃肠消化系统 以 Bourlieu 等<sup>[20]</sup>报道的婴儿胃部消化特征,并参照 Liu 等<sup>[21]</sup>的方法,根据美国药典配制胃液、肠液等方法,稍作改进。

1) 胃液的配制(SGF) 取 2 g  $\text{NaCl}$ ,加 7 mL 浓  $\text{HCl}$ ,用 0.2 mol/L  $\text{NaOH}$  将溶液 pH 值调至 3,去离子水定容至 1 000 mL。加入猪胃蛋白酶(0.001 mg/mL),溶于上述溶液,室温下磁力搅拌 20 min,即为 SGF。

2) 肠液的配制(SIF) 取 6.8 g  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,加入 250 mL 水溶解,加 0.2 mol/L  $\text{NaOH}$  溶液 77 mL,溶于 500 mL 水中,用 0.2 mol/L  $\text{HCl}$  将溶液 pH 值调至 6.8。加入胆盐(0.05 mg/mL)、胰蛋白酶

(0.003 mg/mL)、脂肪酶(0.25 mg/mL)溶于上述溶液,磁力搅拌 20 min,即为 SIF。

3) 模拟消化 将 125 mg 样品加入 25 mL 水中,置于 37 ℃水浴锅,加入 25 mL SGF,在恒温摇床 37 ℃,120 r/min,分别消化 30,60,90,120 min,分别抽取,一式 3 份,调 pH 值为 7,使酶钝化。加入等量的肠液,分别消化 30,60,90,120 min,加热 10 min,使酶失活,一式 3 份。

1.3.3 表面电势(Zeta 电位) 不同乳源 MFG 的各阶段消化产物表面电势(Zeta 电位)的测定,于室温(25 ℃)下采用动态光散射电位测定仪 Zeta Nano ZS 测定。

1.3.4 粒径和粒径分布 不同乳源 MFG 的各阶段消化产物粒径和粒径分布,根据国标粒度分布激光衍射法(GB/T 19077-2016),于室温(25 ℃)下测定平均粒径和粒径分布(PSD)。采用静态光散射激光粒度仪 Mastersizer2000 进行测量。

1.3.5 微观结构测定 不同乳源 MFG 的各阶段消化产物微观结构采用激光扫描共聚焦显微镜(CLSM,Leica-TCSSP5)观察,He-Ar 离子激光器,用 10×目镜和 60×油镜观测样品。样品中的脂质部分采用 1 mg/mL 尼罗红乙醇溶液进行染色。所有微观结构图采用 LAS X 软件处理。

1.3.6 脂解速率测定 不同乳源 MFG 肠消化阶段的脂解速率测定,使用 pH 自动滴定仪记录 2 h 内模拟小肠消化过程中 NaOH 的消耗情况,每隔 15 min 滴定 1 次,使滴定值达到 7,计算产生的 FFA 的量。脂解速率按照公式(1)计算。

$$M_{\text{FFA}} = \frac{V(\text{NaOH}) \times m(\text{NaOH})}{v} \quad (1)$$

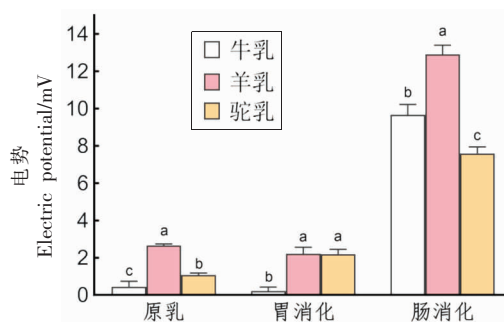
式中: $V(\text{NaOH})$ 为 NaOH 为消化过程中消耗 NaOH 的体积,mL; $m$ 为 NaOH 的浓度, $\mu\text{mol/mL}$ ; $v$ 为小肠阶段驼乳的体积,mL。

1.3.7 脂肪酸测定 取 200  $\mu\text{L}$  不同乳源各个阶段的乳样,加二氯甲烷:甲醇(1:1,V/V)的溶液 1 mL,涡旋超声 30 min,离心取 300  $\mu\text{L}$  下层液体到 1.5 mL 离心管中,氮气吹干;加入 0.5 mL 氢氧化钠甲醇溶液,涡旋 30 s,超声 10 min,60 ℃水浴 0.5 h,冷却后,加入 0.5 mL 正己烷,涡旋 30 s。于 4 ℃,13 000 r/min 离心 10 min,取 200  $\mu\text{L}$  上清液到进样小瓶,进行 GC-MS 检测。

## 2 结果与分析

### 2.1 Zeta 电位分析

通常 Zeta 电位的绝对值越大,表明该分散体系的稳定性越好,即体系内的微粒越不容易发生聚集,并且 MFG 表面的电荷也同样能够反映其在消化过程中 MFGM 组成的变化。不同乳源 MFG 在消化各阶段的 Zeta 电位比较如图 1 所示。在未经消化时,羊乳 MFG 的表面  $\zeta$ -电位绝对值显著高于牛乳和驼乳 MFG( $P<0.05$ ),推测其原因可能是:羊乳中 MFG 的空间构象更为稳定,因此影响了 MFG 间的静电斥力和空间位阻,从而抑制其发生聚集和絮凝<sup>[22]</sup>。经胃消化后,羊乳和牛乳 MFG 表面的  $\zeta$ -电位绝对值与未消化相比出现微小变化,这可能与 MFG 结构稳定有关。此外,模拟胃液具有强酸性(pH 2.5),该 pH 值显著低于 MFGM 蛋白的等电点,影响了 MFG 表面物质的消化<sup>[23]</sup>。经过小肠消化后,所有乳源 MFG 表面均具有较高的电位绝对值, $\zeta$ -电位由胃消化后的弱负电性变为强负电性。因 MFG 组成复杂,故推测其变化原因可能如下:1) 肠消化后的产物是由阴离子型胆盐、游离脂肪酸(FFA)和多肽混合形成的胶体结构,例如酪蛋白胶束会包裹在 MFG 脂质外围,使其产生凝固,继而导致 MFG 无法消化完全,因此  $\zeta$ -电位绝对值均变大<sup>[24]</sup>;2) 在肠消化过程中,由于胃液中未经消化的蛋白质将会在胰蛋白酶的作用下被分解,部分蛋白质将释放酸性基团,例如磷酸基团、羧基基团和氨基基团;3) 当脂滴与模拟肠液混合后,胆盐会置换脂滴原有界面,从而造成电位



注:小写字母不同表示同组数据差异显著( $P<0.05$ )。

图 1 不同乳源 MFG 在消化各阶段的  $\zeta$ -电位绝对值  
Fig.1 Absolute values of zeta-potential of MFG from different milk sources at different stages of digestion



的增加<sup>[25]</sup>。因此,小肠阶段所有乳源 MFG 表面电势均为强负电性。不同乳源 MFG 在肠消化末端时,驼乳 MFG 表面绝对电势显著低于其它两种乳源( $P<0.05$ )。推测其差异原因可能是:驼乳 MFGM 蛋白中的酪蛋白/乳清蛋白比值较低,继而携带部分负电荷,使其电位绝对值低于其它两种乳源 MFG<sup>[26]</sup>。羊乳 MFG 与牛乳 MFG 相比,因在消化过程中羊乳 MFG 可能具有更高的消化率,所以其表面电势绝对值相对更高<sup>[27-28]</sup>。

2.2 粒径的比较

不同乳源 MFG 各消化阶段平均粒径如表 3 所示。从未消化阶段到胃消化再到肠消化,不同乳源 MFG 的平均粒径全部减小。分析其原因可能是:MFG 经过胃、肠的消化使其包被的蛋白质、脂质等物质分解代谢,进而导致 MFG 粒径减小。在未消化时,MFG 平均粒径大小为牛乳>羊乳>驼乳,而不同种类的 MFG 大小差异可能会对脂肪的

消化产生不同影响<sup>[29]</sup>。经过胃消化后,牛、羊和驼乳中 MFG 粒径均减小,说明 MFG 经过酸水解、酶解和稀释的作用被破坏,大分子物质被分解,而 MFG 中某些物质在胃条件下不稳定,如酪蛋白需要肠液进一步消化<sup>[30]</sup>。胃消化过程中,与牛乳 MFG 和羊乳 MFG 比较,驼乳 MFG 粒径显著更小( $P<0.05$ ),原因可能是驼乳 MFG 在酸化和胃蛋白酶处理后会形成软凝乳,使得 MFG 结构更为松散,从而导致其粒径明显下降<sup>[31]</sup>。不同乳源 MFG 由胃液到肠液的消化过程中,由于其 MFG 所含蛋白质、脂质以及矿物质含量不同,均会影响其在小肠中的消化,随着消化时间的延长,均会被消化、降解<sup>[32]</sup>。故所有乳源 MFG 粒径在整个消化过程中均呈逐渐减小的趋势,而不会减为零。这是由于经过酶的作用,MFG 虽被逐渐分解为分子和可吸收胶束,由于甘油三酯并不会被完全分解代谢,因此 MFG 只会减小,并不会消失<sup>[33]</sup>。

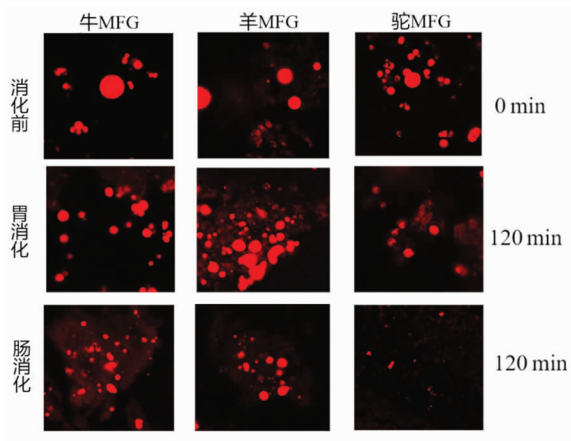
表 3 不同乳源 MFG 在消化各阶段的平均粒径

Table 3 Average particle size of MFG from different milk sources at different stages of digestion			
阶段	牛乳的平均粒径/ $\mu\text{m}$	羊乳的平均粒径/ $\mu\text{m}$	驼乳的平均粒径/ $\mu\text{m}$
未消化(原乳)	$3.83 \pm 1.32^a$	$3.26 \pm 1.25^a$	$3.16 \pm 1.33^a$
胃消化	$1.60 \pm 0.28^a$	$1.42 \pm 0.35^{ab}$	$1.21 \pm 0.14^b$
肠消化	$0.75 \pm 0.04^a$	$0.66 \pm 0.07^{ab}$	$0.46 \pm 0.07^b$

注:不同肩标小写字母表示同列数据差异显著( $P<0.05$ )。

2.3 微观结构

牛、羊和驼乳 MFG 的微观结构如图 2 所示。在未消化时,乳中的 MFG 以不同粒径均匀的分散在乳液体系中,均由 MFGM 所包裹呈圆球状,该结果与 Et-Thakafy 等<sup>[34]</sup>的研究结果一致。经过胃消化后,MFG 粒径减小,一部分的 MFG 发生了聚集,然后相互融合形成了更大的 MFG。发生这种情况的原因可能是 MFG 在发生水解过程中会释放 FFA 和甘油(MAG),从而很容易结合到未发生降解 MFG 的表面,从而降低 MFG 之间的黏性和弹性,并且肠道中的 pH 环境与胃中有明显的区别,所以促进了 MFG 的融合<sup>[35]</sup>。其次,MFG 中存在脂质结构域,当经过消化后,更小的 MFG 中的结构域会倾向于合并成大的结构域,这也会导致 MFG 发生聚集<sup>[36]</sup>。3 种乳源 MFG 经过消化后聚集形成的体积各不相同,这可能与 MFG 中组分、含



注:尼罗红将脂质染为红色,孔径 0.75 $\mu\text{m}$ ,放大倍数 20 $\times$ 。

图 2 不同乳源 MFG 在不同阶段的微观结构  
Fig.2 Microstructure of MFG from different milk sources at different stages

量以及结构有关。经过肠消化后,3种乳源 MFG 均多数发生了降解,只有部分 MFG 还未消化。从图 2 可明显看出,驼乳 MFG 消化的更完全。推测其原因可能是驼乳 MFG 上的酪蛋白具有独特的胶束大小,从而更容易形成软凝块,易于消化<sup>[37]</sup>。其次,驼乳 MFG 相比与其它乳源而言,乳脂结构与母乳更为接近,这可能是驼乳 MFG 消化的更好的原因之一<sup>[38]</sup>。

## 2.4 脂解速率

图 3 为不同乳源 MFG 在肠道消化过程中游离脂肪酸释放量。不同乳源 MFG 进入肠液消化时,在初始 0 min 时,FFA 释放量并无明显差异,推测其原因可能是酶需要穿过 MFGM 的磷脂层才能够进入,并水解 TAG<sup>[39]</sup>。随着消化时间的延长,所有乳源 MFG 脂质在 0~1 h 时,FFA 释放量均迅速增加,推测其原因可能是反应初期底物浓度较高,并且胆盐具有较高的表面活性,脂肪酶被迅速吸附到界面进行水解。此外,胆盐也可以清除在胃消化结束时附着在 MFGM 表面的脂解产物,从而增加脂滴的接触面积<sup>[40]</sup>。当消化 1~2 h 时,FFA 释放量增加缓慢,最终趋于稳定。推测其原因可能是:1)反应不断进行会持续消耗脂肪酶,释放游离脂肪酸以及甘油二酯等活性物质,这些物质将会吸附在 MFGM 表面,从而抑制酶的活性<sup>[41]</sup>;2) MFG 表面积累大量脂解产物,从而导致界面达到饱和,降低脂解速率。此外,由图 3 可知,消化结束时,不同乳源 MFG 的 FFA 瞬时释放量:羊乳>驼乳>牛乳。推测其原因可能是不同乳源的 MFG 表

面营养物质的组成以及矿物质含量存在差异,故而不同乳源的 MFG 经消化所释放的 FFA 会存在差异<sup>[42]</sup>。

## 2.5 不同乳源在消化各阶段的脂肪酸含量

众所周知,通常将 C4:0 至 C10:0 称之为短链脂肪酸(SCFA);C12:0 至 C17:1 称之为中链脂肪酸(MCFA);C18:0 至 C24:0 称之为长链脂肪酸(LCFA)。n6、n3 等称为多不饱和酸(PUFA)。如表 4 所示,3 种乳源 MFG 中均未检测到 C4:0 的脂肪酸,推测其原因可能是 C4:0 的脂肪酸含量过低,超出了检测限度。羊乳 MFG 中的短链脂肪酸显著高于其它两种乳源( $P<0.05$ ),其中癸酸(C10:0)占比 5.27%,该脂肪酸是羊乳中的特征脂肪酸,不仅赋予了其独特的膻味,还具有抗病毒的特性<sup>[11]</sup>。未消化前,驼乳 MFG 中的主体脂肪酸为棕榈油酸(C16:0),占比 29.33%,显著高于其它两种乳源( $P<0.05$ ),该脂肪酸不仅作为喂养婴儿的主要能量来源,且对于调节代谢、抗炎症以及降血糖均具有积极影响<sup>[43]</sup>。在长链脂肪酸中,不同乳源 MFG 间存在差异,羊乳含量更高,驼乳含量更低,长链脂肪酸越高可能会在胃肠道中更难消化<sup>[13]</sup>。在多不饱和酸中,驼乳 MFG 中的 DHA(C22:6n3,俗称脑黄金)显著高于其它两种乳源,该物质对于智力开发和提高智商具有积极影响,并且可以促进婴儿的视网膜成熟和视觉发育。整体而言,不同乳源 MFG 所含短链脂肪酸含量较少,中长链脂肪酸仍是主体,该结果与 Kula 等<sup>[12]</sup>的研究结果一致。

诸多研究结果显示,脂肪在胃中几乎不发生水解,主要在小肠中被消化<sup>[44]</sup>。不同乳源 MFG 经过肠消化后的相对脂肪酸含量如表 5 所示。经过消化后,羊乳 MFG 中碳十二以下的短、中长链脂肪酸仍显著高于其它两种乳源,该结果表明羊乳 MFG 的添加可能会对抑制胆固醇的沉积,降低血清胆固醇水平<sup>[45]</sup>,以及增加婴幼儿肠道免疫功能,延缓胃肠排空时间具有积极的影响<sup>[46]</sup>。与未消化结果一致,棕榈油酸(C16:0)占比 43.10%,仍为驼乳 MFG 脂肪酸的主体,并高于未消化时的含量,故推测驼乳 MFG 的添加可能会更加满足婴幼儿成长时能量的需求。此外,驼乳 MFG 中的不饱和脂肪酸显著低于其它两种乳源,而 DHA 含量却高于其它两种乳源,该结果可能会给配方奶粉的制

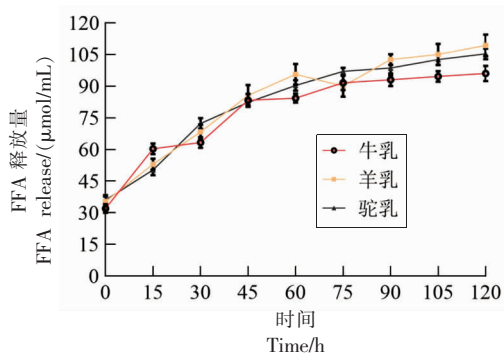


图 3 小肠阶段单位体积不同乳源 MFG 释放 FFA 动力学曲线

Fig.3 FFA release kinetics curve of MFG from different milk sources per unit volume at small intestine stage

表 4 不同乳源 MFG 未消化时的相对脂肪酸含量  
(%总脂肪酸)

Table 4 The relative fatty acid content of different milk-derived MFGs when undigested (% total fatty acids)

脂肪酸	驼乳脂肪球	羊乳脂肪球	牛乳脂肪球
C6:0	0.08 ± 0.007 <sup>b</sup>	1.72 ± 0.06 <sup>a</sup>	1.75 ± 0.13 <sup>a</sup>
C8:0	0.18 ± 0.004 <sup>b</sup>	1.26 ± 0.023 <sup>a</sup>	1.24 ± 0.072 <sup>a</sup>
C10:0	0.28 ± 0.002 <sup>c</sup>	5.27 ± 0.041 <sup>a</sup>	3.12 ± 0.083 <sup>b</sup>
C12:0	1.17 ± 0.002 <sup>c</sup>	2.96 ± 0.006 <sup>b</sup>	4.03 ± 0.081 <sup>a</sup>
C13:0	0.12 ± 0.014 <sup>a</sup>	0.08 ± 0.011 <sup>a</sup>	0.12 ± 0.004 <sup>a</sup>
C14:0	15.26 ± 0.486 <sup>a</sup>	7.67 ± 0.176 <sup>c</sup>	10.38 ± 0.375 <sup>b</sup>
C14:1	0.86 ± 0.006 <sup>b</sup>	0.12 ± 0.008 <sup>c</sup>	1.24 ± 0.008 <sup>a</sup>
C15:0	1.28 ± 0.012 <sup>b</sup>	1.19 ± 0.007 <sup>c</sup>	1.58 ± 0.019 <sup>a</sup>
C15:1	0.32 ± 0.001 <sup>a</sup>	0.16 ± 0.008 <sup>c</sup>	0.26 ± 0.011 <sup>b</sup>
C16:0	29.33 ± 0.426 <sup>a</sup>	20.98 ± 0.148 <sup>c</sup>	25.94 ± 0.599 <sup>b</sup>
C16:1	9.23 ± 0.088 <sup>a</sup>	1.70 ± 0.011 <sup>b</sup>	1.93 ± 0.103 <sup>b</sup>
C17:0	0.79 ± 0.037 <sup>b</sup>	1.72 ± 0.055 <sup>a</sup>	0.88 ± 0.029 <sup>b</sup>
C17:1	0.56 ± 0.025 <sup>b</sup>	0.96 ± 0.034 <sup>a</sup>	0.26 ± 0.014 <sup>c</sup>
C18:0	11.64 ± 0.116 <sup>b</sup>	12.32 ± 0.184 <sup>a</sup>	11.98 ± 0.235 <sup>b</sup>
C18:1n9c	17.08 ± 0.148 <sup>c</sup>	28.90 ± 0.443 <sup>a</sup>	23.12 ± 0.286 <sup>b</sup>
C18:1n9t	7.34 ± 0.036 <sup>a</sup>	7.42 ± 0.454 <sup>a</sup>	7.30 ± 0.516 <sup>a</sup>
C18:2n6t	0.24 ± 0.014 <sup>c</sup>	0.52 ± 0.047 <sup>a</sup>	0.36 ± 0.046 <sup>b</sup>
C18:2n6c	1.85 ± 0.018 <sup>b</sup>	3.03 ± 0.091 <sup>a</sup>	3.08 ± 0.071 <sup>a</sup>
C18:3n6	0.02 ± 0.004 <sup>b</sup>	0.05 ± 0.012 <sup>a</sup>	0.06 ± 0.006 <sup>a</sup>
C18:3n3	0.45 ± 0.018 <sup>b</sup>	0.59 ± 0.031 <sup>a</sup>	0.18 ± 0.015 <sup>c</sup>
C20:0	0.53 ± 0.029 <sup>a</sup>	0.31 ± 0.049 <sup>b</sup>	0.14 ± 0.004 <sup>c</sup>
C20:1n9	0.28 ± 0.009 <sup>a</sup>	0.15 ± 0.014 <sup>b</sup>	0.07 ± 0.004 <sup>c</sup>
C20:2	0.31 ± 0.011 <sup>a</sup>	0.17 ± 0.015 <sup>b</sup>	0.06 ± 0.006 <sup>c</sup>
C21:0	0.07 ± 0.003 <sup>b</sup>	0.10 ± 0.011 <sup>a</sup>	0.03 ± 0.001 <sup>c</sup>
C20:3n6	0.09 ± 0.003 <sup>b</sup>	0.02 ± 0.004 <sup>c</sup>	0.14 ± 0.006 <sup>a</sup>
C20:4n6	0.16 ± 0.009 <sup>c</sup>	0.18 ± 0.003 <sup>b</sup>	0.23 ± 0.004 <sup>a</sup>
C20:3n3	0.02 ± 0.003 <sup>a</sup>	0.02 ± 0.002 <sup>a</sup>	0.02 ± 0.005 <sup>a</sup>
C22:0	0.10 ± 0.005 <sup>b</sup>	0.14 ± 0.002 <sup>a</sup>	0.06 ± 0.001 <sup>c</sup>
C20:5n3	0.07 ± 0.007 <sup>a</sup>	0.07 ± 0.007 <sup>a</sup>	0.04 ± 0.003 <sup>b</sup>
C22:1n9	0.07 ± 0.005 <sup>a</sup>	0.08 ± 0.009 <sup>a</sup>	0.03 ± 0.001 <sup>b</sup>
C23:0	0.04 ± 0.005 <sup>ab</sup>	0.06 ± 0.008 <sup>a</sup>	0.03 ± 0.000 <sup>b</sup>
C24:0	0.08 ± 0.006 <sup>a</sup>	0.06 ± 0.009 <sup>a</sup>	0.05 ± 0.004 <sup>a</sup>
C22:6n3	0.09 ± 0.004 <sup>a</sup>	0.02 ± 0.002 <sup>b</sup>	0.02 ± 0.000 <sup>b</sup>
C24:1n9	0.03 ± 0.004 <sup>a</sup>	0.03 ± 0.007 <sup>a</sup>	0.02 ± 0.008 <sup>a</sup>
SCFAs	0.55 ± 0.015 <sup>c</sup>	8.24 ± 0.175 <sup>a</sup>	6.17 ± 0.348 <sup>b</sup>
MCFAs	58.91 ± 0.347 <sup>a</sup>	37.49 ± 0.416 <sup>c</sup>	47.11 ± 1.249 <sup>b</sup>
LCFAs	40.54 ± 0.156 <sup>c</sup>	54.27 ± 0.035 <sup>a</sup>	47.22 ± 0.889 <sup>b</sup>
PUFAs	2.98 ± 0.094 <sup>b</sup>	4.52 ± 0.106 <sup>a</sup>	4.06 ± 0.225 <sup>a</sup>

注:不同肩标小写字母表示同列数据差异显著( $P<0.05$ )。

表 5 不同乳源 MFG 肠消化后的相对脂肪酸含量  
(%总脂肪酸)

Table 5 Relative fatty acid content of different milk-derived MFG after intestinal digestion (% total fatty acids)

脂肪酸	驼乳脂肪球	羊乳脂肪球	牛乳脂肪球
C6:0	0.10 ± 0.002 <sup>c</sup>	1.48 ± 0.026 <sup>a</sup>	1.33 ± 0.007 <sup>b</sup>
C8:0	0.15 ± 0.001 <sup>c</sup>	1.63 ± 0.114 <sup>a</sup>	0.90 ± 0.024 <sup>b</sup>
C10:0	0.22 ± 0.001 <sup>c</sup>	5.78 ± 0.164 <sup>a</sup>	2.62 ± 0.043 <sup>b</sup>
C12:0	0.99 ± 0.017 <sup>c</sup>	1.98 ± 0.016 <sup>b</sup>	4.23 ± 0.103 <sup>a</sup>
C13:0	0.08 ± 0.012 <sup>b</sup>	0.05 ± 0.001 <sup>c</sup>	0.15 ± 0.002 <sup>a</sup>
C14:0	14.38 ± 0.334 <sup>b</sup>	6.09 ± 0.128 <sup>c</sup>	15.03 ± 0.271 <sup>a</sup>
C14:1	0.51 ± 0.008 <sup>b</sup>	0.09 ± 0.0004 <sup>c</sup>	0.87 ± 0.01 <sup>a</sup>
C15:0	1.14 ± 0.043 <sup>a</sup>	0.86 ± 0.029 <sup>b</sup>	0.94 ± 0.025 <sup>b</sup>
C15:1	0.24 ± 0.004 <sup>a</sup>	0.13 ± 0.004 <sup>c</sup>	0.18 ± 0.004 <sup>b</sup>
C16:0	43.10 ± 0.675 <sup>a</sup>	23.38 ± 0.509 <sup>c</sup>	28.45 ± 0.224 <sup>b</sup>
C16:1	10.01 ± 0.009 <sup>a</sup>	1.05 ± 0.025 <sup>c</sup>	1.27 ± 0.096 <sup>b</sup>
C17:0	0.69 ± 0.019 <sup>b</sup>	1.15 ± 0.008 <sup>a</sup>	0.54 ± 0.021 <sup>c</sup>
C17:1	0.50 ± 0.001 <sup>b</sup>	0.64 ± 0.047 <sup>a</sup>	0.25 ± 0.026 <sup>c</sup>
C18:0	10.25 ± 0.139 <sup>c</sup>	13.58 ± 0.189 <sup>a</sup>	11.69 ± 0.549 <sup>b</sup>
C18:1n9c	10.39 ± 0.122 <sup>c</sup>	32.50 ± 0.566 <sup>a</sup>	25.78 ± 0.794 <sup>b</sup>
C18:1n9t	2.51 ± 0.045 <sup>b</sup>	3.42 ± 0.084 <sup>a</sup>	2.34 ± 0.048 <sup>b</sup>
C18:2n6t	0.23 ± 0.021 <sup>b</sup>	0.38 ± 0.020 <sup>a</sup>	0.15 ± 0.007 <sup>c</sup>
C18:2n6c	1.70 ± 0.013 <sup>b</sup>	3.26 ± 0.110 <sup>a</sup>	1.56 ± 0.064 <sup>b</sup>
C18:3n6	0.13 ± 0.005 <sup>a</sup>	0.10 ± 0.009 <sup>b</sup>	0.07 ± 0.006 <sup>c</sup>
C18:3n3	0.30 ± 0.007 <sup>b</sup>	0.58 ± 0.029 <sup>a</sup>	0.20 ± 0.001 <sup>c</sup>
C20:0	0.24 ± 0.003 <sup>a</sup>	0.27 ± 0.012 <sup>a</sup>	0.14 ± 0.001 <sup>b</sup>
C20:1n9	0.24 ± 0.008 <sup>a</sup>	0.16 ± 0.008 <sup>b</sup>	0.11 ± 0.001 <sup>c</sup>
C20:2	0.26 ± 0.031 <sup>a</sup>	0.12 ± 0.003 <sup>b</sup>	0.12 ± 0.002 <sup>b</sup>
C21:0	0.11 ± 0.002 <sup>a</sup>	0.10 ± 0.002 <sup>a</sup>	0.06 ± 0.001 <sup>b</sup>
C20:3n6	0.16 ± 0.001 <sup>a</sup>	0.09 ± 0.001 <sup>b</sup>	0.15 ± 0.002 <sup>a</sup>
C20:4n6	0.20 ± 0.002 <sup>b</sup>	0.26 ± 0.007 <sup>a</sup>	0.20 ± 0.005 <sup>b</sup>
C20:3n3	0.15 ± 0.006 <sup>a</sup>	0.09 ± 0.000 <sup>b</sup>	0.08 ± 0.004 <sup>b</sup>
C22:0	0.14 ± 0.003 <sup>a</sup>	0.17 ± 0.019 <sup>a</sup>	0.08 ± 0.003 <sup>b</sup>
C20:5n3	0.16 ± 0.001 <sup>a</sup>	0.14 ± 0.002 <sup>b</sup>	0.09 ± 0.003 <sup>c</sup>
C22:1n9	0.16 ± 0.002 <sup>a</sup>	0.11 ± 0.000 <sup>b</sup>	0.08 ± 0.001 <sup>c</sup>
C23:0	0.12 ± 0.001 <sup>a</sup>	0.08 ± 0.001 <sup>b</sup>	0.07 ± 0.001 <sup>c</sup>
C24:0	0.15 ± 0.002 <sup>a</sup>	0.08 ± 0.001 <sup>b</sup>	0.08 ± 0.002 <sup>b</sup>
C22:6n3	0.14 ± 0.012 <sup>a</sup>	0.09 ± 0.001 <sup>b</sup>	0.10 ± 0.002 <sup>b</sup>
C24:1n9	0.15 ± 0.001 <sup>a</sup>	0.09 ± 0.002 <sup>b</sup>	0.08 ± 0.01 <sup>b</sup>
SCFAs	0.47 ± 0.001 <sup>c</sup>	8.90 ± 0.123 <sup>a</sup>	4.84 ± 0.012 <sup>b</sup>
MCFAs	71.65 ± 2.786 <sup>a</sup>	35.42 ± 1.243 <sup>c</sup>	51.92 ± 2.231 <sup>b</sup>
LCFAs	27.84 ± 1.423 <sup>c</sup>	55.69 ± 2.186 <sup>a</sup>	43.23 ± 1.792 <sup>b</sup>
PUFAs	3.29 ± 0.591 <sup>b</sup>	5.00 ± 0.461 <sup>a</sup>	2.60 ± 0.2553 <sup>c</sup>

注:不同肩标小写字母表示同列数据差异显著( $P<0.05$ )。

作提供更优质的选择。经过胃肠的消化, 驼乳 MFG 中的长链脂肪酸占比明显下降, 这可能会成为驼乳 MFG 添加在配方奶粉中的一个有利因素。

### 3 结论

不同乳源的脂质结构和化学成分与人乳存在很大差异, 探究不同乳源 MFG 的差异性, 对其充分发挥营养价值, 具有重要意义。因此, 本文模拟婴幼儿胃肠系统对比分析了 3 种不同乳源 MFG 的消化动力学, 研究表明, 驼乳 MFG 相较于其它两种乳源具有更小的 MFG 粒径。经过消化后, 驼乳 MFG 中棕榈油酸(C16:0)含量更为显著, 长链脂肪酸占比更低。该研究可为制定非牛乳婴儿配方奶粉提供思路和理论依据。

### 参 考 文 献

- [1] DUNNE J, EVERSLED R P, SALQUE M, et al. First dairying in green Saharan Africa in the fifth millennium BC[J]. *Nature*, 2012, 486(7403): 390–394.
- [2] MATI A, SENOUSSEI-GHEZALI C, ZENNIA S S A, et al. Dromedary camel milk proteins, a source of peptides having biological activities – A review[J]. *International Dairy Journal*, 2017, 73: 25–37.
- [3] JRAD Z, EL HATMI H, ADT I, et al. Effect of digestive enzymes on antimicrobial, radical scavenging and angiotensin I-converting enzyme inhibitory activities of camel colostrum and milk proteins[J]. *Dairy Science & Technology*, 2014, 94(3): 205–224.
- [4] RAQUEL S, RETO P, SEBASTIEN D, et al. Protein digestion of different protein sources using the INFOGEST static digestion model[J]. *Food Research International*, 2020, 130: 108996.
- [5] LEE H, PADHI E, HASEGAWA Y, et al. Compositional dynamics of the milk fat globule and its role in infant development[J]. *Front Pediatr*, 2018, 6: 313.
- [6] GAUCHERON F. Milk and dairy products: A unique micronutrient combination[J]. *J Am Coll Nutr*, 2011, 30(Sup5): 400S–409S.
- [7] NGUYEN T T P, BHANDARI B, CICHERO J, et al. A comprehensive review on *in vitro* digestion of infant formula[J]. *Food Res Int*, 2015, 76: 373–386.
- [8] GALLIER S, TOLENAARS L, POSSER C. Whole goat milk as a source of fat and milk fat globule membrane in infant formula[J]. *Nutrients*, 2020, 12(11): 3486.
- [9] WANG L, LI X D, LIU L, et al. Comparative lipidomics analysis of human, bovine and caprine milk by UHPLC-Q-TOF-MS[J]. *Food Chem*, 2020, 310: 125865.
- [10] HE X, MCCLORRY S, HERNELL O, et al. Digestion of human milk fat in healthy infants[J]. *Nutr Res*, 2020, 83: 15–29.
- [11] ABD EL-SALAM M H, EL-SHIBINY S. A comprehensive review on the composition and properties of buffalo milk[J]. *Dairy Sci Technol*, 2011, 91: 663.
- [12] KULA J T, TEGEGNE D. Chemical composition and medicinal values of camel milk[J]. *Int J Res Stud Biosci*, 2016, 4(4): 13–25.
- [13] PARK Y W, HAENLEIN G F W. Goat milk—chemistry and nutrition[M]//Handbook of Milk of Non-Bovine Mammals. Oxford: Blackwell Publishing Professional, 2008: 34–58.
- [14] NGUYEN H T H, ONG L, HOQUE A, et al. A proteomic characterization shows differences in the milk fat globule membrane of buffalo and bovine milk[J]. *Food Biosci*, 2017, 19: 7–16.
- [15] JENKINS J A, BREITENEDER H, MILLS E N. Evolutionary distance from human homologs reflects allergenicity of animal food proteins[J]. *J Allergy Clin Immunol*, 2007, 120: 1399–1405.
- [16] KIM J, FRIEL J. Lipids and human milk[J]. *Lipid Technol*, 2012, 24(5): 103–105.
- [17] 王乃慧. 热处理对驼乳理化性质及体外消化特征的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [18] HAENLEIN G F W. Goat milk in human nutrition[J]. *Small Rumin Res*, 2004, 51(2): 155–163.
- [19] ROY D, YE A, MOUGHAN P J, et al. Composition, structure, and digestive dynamics of milk from different species—A review[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2020, 7: 577759.
- [20] BOURLIEU C, MENARD O, BOUZERZOUR K, et al. Specificity of infant digestive conditions: Some



- clues for developing relevant *in vitro* models[J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2014, 54(11): 1427–1457.
- [21] LIU W L, LU J M, YE A Q, et al. Comparative performances of lactoferrin-loaded liposomes under *in vitro* adult and infant digestion models[J]. Food Chemistry, 2018, 258: 366.
- [22] ZHANG R J, ZHANG Z P, ZHANG H, et al. Influence of emulsifier type on gastrointestinal fate of oil-in-water emulsions containing anionic dietary fiber (pectin)[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 45: 175–185.
- [23] GALLIER S, YE A, SINGH H. Structural changes of bovine milk fat globules during *in vitro* digestion[J]. Journal of Dairy Science, 2012, 95(7): 3579–3592.
- [24] 梁丽. 乳脂肪球的体外消化特性及其影响因素研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- LIANG L. Research on the *in vitro* digestive characteristics of milk fat globules and its influencing factors[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [25] SINGH H, YE A Q, HORNE D. Structuring food emulsions in the gastrointestinal tract to modify lipid digestion[J]. Progress in Lipid Research, 2009, 48(2): 92–100.
- [26] GENENE A, HANSEN E B, ESHETU M, et al. Effect of heat treatment on denaturation of whey protein and resultant rennetability of camel milk[J]. LWT, 2019, 101: 404–409.
- [27] ZOU Z Z, DULEY J A, COWLEY D M, et al. Digestibility of proteins in camel milk in comparison to bovine and human milk using an *in vitro* infant gastrointestinal digestion system[J]. Food Chemistry, 2021, 374: 131704.
- [28] 杨博睿, 张富新, 邵玉宇, 等. 牛乳、山羊乳和人乳中的蛋白质组成及消化特性研究[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(8): 4–9.
- YANG B R, ZHANG F X, SHAO Y Y, et al. Protein composition and digestive characteristics of cow's milk, goat's milk and human milk[J]. China Dairy Industry, 2020, 48(8): 4–9.
- [29] GANTNER V, MIJIC P, BABAN M, et al. The overall and fat composition of milk of various species[J]. Mljekarstvo, 2015, 65: 223–231.
- [30] YE A. Gastric colloidal behaviour of milk protein as a tool for manipulating nutrient digestion in dairy products and protein emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 115: 106599.
- [31] GAMBLE J A, BESLEY A K, ELLIS N R. Composition and properties of goat's milk as compared with cow's milk[EB/OL]. United States Department of Agriculture, Economic Research Service, 1939. <https://EconPapers.repec.org/RePEc:ags:uerstb:167939>.
- [32] DE OLIVEIRA S C, BOURLIEU C, MÉNARD O, et al. Impact of pasteurization of human milk on preterm newborn *in vitro* digestion: Gastrointestinal disintegration, lipolysis and proteolysis[J]. Food Chem, 2016, 211: 171–179.
- [33] FAVÉ G, COSTE T C, ARMAND M. physico-chemical properties of lipids: new strategies to manage fatty acid bioavailability[J]. Cellular and Molecular Biology (Noisy le Grand, France), 2004, 50(7): 815–831.
- [34] ET-THAKAFY O, GUYOMARCH F, LOPEZ C. Lipid domains in the milk fat globule membrane: Dynamics investigated in situ in milk in relation to temperature and time[J]. Food Chemistry, 2017, 220: 352–361.
- [35] STAGGERS J E, HERNELL O, STAFFORD R J, et al. Physical-chemical behavior of dietary and biliary lipids during intestinal digestion and absorption. 1. Phase behavior and aggregation states of model lipid systems patterned after aqueous duodenal contents of healthy adult human beings[J]. Biochemistry, 1990, 29(8): 2028–2040.
- [36] CHEN D, SANTORE M M. 1,2-Dipalmitoyl-sn-glycero-3-phosphocholine (DppC)-rich domain formation in binary phospholipid vesicle membranes: Two dimensional nucleation and growth[J]. Langmuir, 2014, 30(31): 9484–9493.
- [37] KAMAL M, FOUKANI M, KAROUI R. Rheological and physical properties of camel and cow milk gels enriched with phosphate and calcium during acid-induced gelation[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(2): 439–446.
- [38] KAPPELER S R, HEUBERGER C, FARAH Z, et al. Expression of the peptidoglycan recognition protein, pGRp, in the lactating mammary gland[J]. Journal of Dairy Science, 2004, 87(8): 2660–2668.
- [39] HAMOSH M. Lingual lipase and fat digestion in the neonatal period[J]. Journal of Pediatric Gastroenterology & Nutrition, 1983, 2(2): 280–283.



- [40] 冯坤, 孙聪, 梁少华. 以乳极性脂/蛋白为界面脂滴的体外消化特性研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 43–50.
- FENG K, SUN C, LIANG S H. Characterisation of *in vitro* digestion of lipid droplets at the interface of lactic polar lipids/proteins[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 43(3): 43–50.
- [41] HERNELL O, BLÄCKBERG L, BERNBÄCK S. Digestion of human milk fat in early infancy[J]. Acta Paediatrica, 1989, 351: 57–62.
- [42] GARCIA C, ANTONA C, ROBERT B, et al. The size and interfacial composition of milk fat globules are key factors controlling triglycerides bioavailability in simulated human gastro-duodenal digestion [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 494–504.
- [43] 张泽生, 高山, 郭擎, 等. 棕榈油酸的研究现状及展望[J]. 中国食品添加剂, 2016(9): 198–202.
- ZHANG Z S, GAO S, GUO Q, et al. Research status and prospect of palm oleic acid [J]. China Food Additives, 2016(9): 198–202.
- [44] MULET-CABERO A-I, EGGER L, PORTMANN R, et al. A standardised semi-dynamic *in vitro* digestion method suitable for food – an international consensus[J]. Food Funct, 2020, 11(2): 1702–1720.
- [45] AGUIAR A C R D, ROCHA JÚNIOR V R, CALDEIRA L A, et al. Milk composition of cows fed with different sources of nitrogen compounds[J]. Revista Brasileira De Saude E Producao Animal, 2015, 16(3): 591–605.
- [46] DASS N B, JOHN A K, BASSIL A K, et al. The relationship between the effects of short-chain fatty acids on intestinal motility *in vitro* and GPR43 receptor activation[J]. Neurogastroenterology & Motility, 2007, 19(1): 66–74.

### *In Vitro* the Digestive Characteristics of Milk Fat Globules from Different Milk Sources

Wang Yulin<sup>1</sup>, Baoyinchaoketu<sup>2</sup>, Jirimutu<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>Ministry of Education, Key Laboratory of Dairy Biotechnology and Engineering,  
Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018

<sup>2</sup>Animal Husbandry Workstation of Sunit Right Banner, Xilingol 011299, Inner Mongolia)

**Abstract** Based on the simulation of gastrointestinal digestion in infants and young children, particle size distribution, zeta potential and laser confocal scanning electron microscopy were used to observe the differences in the physical properties of milk fat globules (MFG) from different milk sources (bovine, ovine and camel) at different stages of digestion, Gas chromatography-mass spectrometry coupled to a titration method was used to study the changes in free fatty acids and lipolysis rate at different stages of digestion to refine the changing law of lipid digestion. The results showed that the particle size of MFG from different milk sources tended to decrease with increasing digestion time, which was consistent with the observation after laser confocal microscopy staining. At the end of intestinal digestion, the mean particle size of camel milk MFG was  $(0.46 \pm 0.07) \mu\text{m}$ , which was significantly lower than that of cow milk MFG ( $P < 0.05$ ). The absolute values of potentials measured by dynamic light scattering potentiometry showed that all milk source MFGs had strong negative electrical properties after entering the gastrointestinal digestion, with the absolute values of potentials at the end of the intestinal digestion in the order of goat's milk > cow's milk > camel's milk from largest to smallest. There was no significant difference in the rate of lipolysis of MFG from different milk sources during intestinal digestion, whereas camel milk MFG had a significantly higher ( $P < 0.05$ ) content of palmitoleic acid (C16:0) and a lower proportion of long chain fatty acids compared to the other two milk sources at different stages of digestion. The results of this study provide new ideas for the processing of camel milk products and the preparation of new formulas.

**Keywords** milk fat globules; digestive properties; milk source