

单双脂肪酸甘油酯/磷脂复配对婴儿配方奶粉乳液中脂溶性营养素生物可给性的影响

Study of the impacts of mono-, di-glyceride/phospholipid (MDG/PL) on the bioaccessibility of lipophilic nutrients in infant formula emulsion

胡俊杰 李 艳 崔欢欢

HU Jun-jie LI Yan CUI Huan-huan

(华中农业大学食品科学技术学院, 湖北 武汉 430070)

(College of Food Science & Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China)

摘要:以婴儿配方奶粉乳液为模型,采用体外消化模型研究单双脂肪酸甘油酯和磷脂复配对脂溶性营养素(维生素 D、类胡萝卜素)生物可给性的影响。结果表明,在小肠消化过程中,单双脂肪酸甘油酯和磷脂的添加能显著提高奶粉模型乳液体系中脂溶性营养素(维生素 D 等)的胶束化,并有效提升其生物可给性,有利于促进脂溶性营养素的吸收效率和生物利用率,使其消化行为更为接近母乳。同时,不同组成结构单双脂肪酸甘油酯的添加均可提升脂溶性营养素的生物可给性,其中油酸结构的存在对脂溶性营养素生物可给性的提升效果最佳。

关键词:单双脂肪酸甘油酯;脂溶性营养素;生物可给性;体外模拟消化;类胡萝卜素;维生素 D

Abstract: In this study, the *in vitro* digestion model was used for investigating the impacts of the application of Mono-, Di-glyceride (MDG) and phospholipid (PL) in the infant formula model emulsions on the bioaccessibility of lipophilic nutrients (vitamin D, carotenoids) contained in the formula. The addition of MDG/PL were found to significantly facilitate the micellization of lipophilic nutrients contained in the infant formula-based emulsion system at the simulated small intestine stage and led the digestion behavior more similar to human breast milk. The higher micellization rate resulted in higher absorption efficiency and higher bioavailability of lipophilic nutrients in the infant formula. Furthermore, the structures of MDG also impacted the bioaccessibility of lipophilic nutrients contained in the formula and

the results indicated that the presence of oleic acid structure in the MDG molecules showed the higher effectiveness on enhancing the bioaccessibility of lipophilic nutrients.

Keywords: mono- and diglycerides; lipophilic nutrients; bioaccessibility; *in vitro* digestion model; beta-carotene; vitamin D

食物中的脂溶性营养素如脂溶性维生素、不饱和脂肪酸(DHA、ARA 等)及类胡萝卜素等是提高婴幼儿免疫力、促进其健康发育的必不可少的关键营养素。研究^[1]表明,维生素 D 对婴幼儿时期的骨骼生长发育具有极为重要的促进和保护作用,可有效防治佝偻病。类胡萝卜素是人类重要的维生素 A 来源,对视力发育及改善有重要作用^[2]。然而,脂溶性营养素大多存在水相溶解性差、易氧化分解、化学稳定性差的特点,其生物可利用度低^[3]。同时,人体对一般食品中类胡萝卜素的吸收率仅为 5%~30%^[4],极大地限制了其在体内相关功效的发挥。母乳中虽然部分脂溶性营养素如维生素 D 和类胡萝卜素等含量远低于配方奶粉中允许添加量,却仍能满足婴幼儿营养需求,由此可推断母乳中营养素活性形式和营养素的吸收方式可能是主要的影响因素。

研究^[5]表明,母乳中天然存在磷脂、胆固醇、单双脂肪酸甘油酯等极性脂质,这些极性脂质与蛋白一起构成了母乳乳液特殊的表面结构,在营养素吸收中发挥着重要作用。Lu 等^[6]的体外消化试验表明,单脂肪酸甘油酯的添加能提升食品体系中的类胡萝卜素的生物可给性。Marriage 等^[7-8]的动物试验表明,单、双脂肪酸甘油酯及磷脂的混合体系对叶黄素的吸收有提升作用。现有婴幼儿配方奶粉生产过程中普遍仅采用较为传统的乳化体系如乳蛋白和磷脂等,且研究的重点多为仿制母乳脂肪制备乳液^[9-10],有关通过模拟母乳界面脂质群结构的方式对脂溶性营养素的吸收效率进行研究尚未见报道。因

基金项目:中国食品科学技术学会食品科技基金—雅培食品营养与安全专项科研基金(编号:2019-07);国家自然科学基金面上项目(编号:31972976)

作者简介:胡俊杰,男,华中农业大学在读硕士研究生。

通信作者:李艳(1983—),女,华中农业大学副教授,博士。

E-mail: yanli@mail.hzau.edu.cn

收稿日期:2020-05-06

此,传统乳化体系生产的婴儿配方粉的脂溶性营养吸收率普遍较低。Bettler 等^[11]研究发现,婴幼儿对婴儿配方粉中类胡萝卜素(叶黄素)的吸收效率仅为母乳中类胡萝卜素(叶黄素)的 1/4。

试验拟以婴儿配方奶粉乳液为模式体系,通过复配添加母乳中存在的极性脂质成分——单双脂肪酸甘油酯(mono-, di-glyceride, MDG)及磷脂(phospholipid, PL),研究其对乳液消化行为和脂溶性营养素(维生素 D、 β -胡萝卜素)生物可给性的影响,并探索不同组成结构的单、双脂肪酸甘油酯的影响效果差异,以期为未来的婴儿配方奶粉升级提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

乳清浓缩蛋白(WPC):约为 85%,Hilmar 8010,美国希尔玛配料公司;

混合植物油:葵花籽油/大豆油,益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司;

中链脂肪酸甘油酯(MCT):博星化学试剂有限公司;

辛酸单甘酯(GMC)、月桂酸单甘酯(GML)、硬脂酸单甘酯(GMS):分析纯,上海源叶生物科技有限公司;

单双脂肪酸甘油酯(MDG)、单油酸甘油酯(GMO, $\geq 50\%$, HPLC)、双油酸甘油酯(GDO, 1, 3-GDO, 1, 2-GDO 混合体系, 90%):阿拉丁试剂有限公司;

β -胡萝卜素: $>98\%$, 慧科生物科技有限公司;

维生素 D ($>90\%$)、黏蛋白、胃蛋白酶(3 000 U/mg)、胆盐:上海源叶生物科技有限公司;

胰酶:100~500 U/mg, 美国 Sigma-Aldrich 公司;

其他所用试剂均为分析纯。

1.1.2 主要仪器设备

高速剪切机:Ultra-TurraxT25 型,德国 IKA 公司;

高压微射流:M-110L 型,美国 Microfluidics 公司;

数显恒温水浴锅:HH-4 型,常州国华电器有限公司;

高速冷冻离心机:H1850R 型,湖南湘仪实验仪器开发有限公司;

紫外—可见分光光度计:UV-1700 型,日本岛津公司;

激光粒度分析仪:Malvern 2000 型,英国 Malvern 公司;

纳米粒度测定仪:Zetasizer Nano ZS 型,英国 Malvern 公司;

激光共聚焦显微镜:U-TB04917 型,日本 OLYMPUS 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 乳液制备

(1) 水相:将乳清蛋白与磷酸缓冲溶液(PBS

5 mmol/L, pH 7)混合,搅拌 2 h 后于 4 °C 过夜。

(2) 油相:将 MDG(或不同结构的 MDG)与脂溶性营养素(β -胡萝卜素或维生素 D)于 55 °C 下水浴搅拌混合,按相应比例加入植物油(或 MCT)。

(3) 乳化:油相与水相体系搅拌混合,10 000 r/min 高速剪切 3 min,预乳化后经高压微射流处理(6.21×10^7 Pa, 5 次循环),制备乳液,乳液于 4 °C 保存以用于体外消化研究。

1.2.2 体外消化模型 参照文献[12—13]并修改。

(1) 口腔:3 mL 的乳液和 4.5 mL PBS(pH 7.0, 5 mmol/L)混合,再与 7.5 mL 模拟唾液^[12]混合,用 NaOH 溶液调 pH 至 6.8, 37 °C、100 r/min 搅拌 2 min。

(2) 胃:经口腔消化的样品与模拟胃液^[13]按体积比 1:1 混合,调整 pH 至 2.5, 37 °C、100 r/min 下反应 1 h。

(3) 小肠:将 30 mL 胃消化样品 pH 调至 7.0,加入 3.5 mL 胆盐溶液(53.57 mg/mL),再加入 1.5 mL CaCl_2 (125 mmol/L)和 NaCl(3.75 mol/L)混合溶液,将 pH 调为 7.0,加入 2.5 mL 新鲜制备的胰酶悬浮液(24 mg/mL),采用 pH-stat 滴定仪使体系 pH 维持在 (7.00 ± 0.02) ,保持 2 h,记录消耗的 NaOH 体积。整个过程温度恒定在 37 °C,每个样品至少进行 3 次模拟消化试验。

1.2.3 乳液粒径和电位的测量 分别采用激光粒度分析仪和纳米粒度测定仪测定各消化阶段乳液的粒径分布及表面电位,胃阶段的样品使用 pH 调至 2.5 的超纯水稀释至相同油相含量,测量温度 25 °C。

1.2.4 乳液微观结构的变化 1 mL 样品加 10 μL 尼罗红(0.01%)荧光染色后,采用激光共聚焦显微镜观察各阶段乳液微观结构。

1.2.5 营养素的生物可给性测定 将小肠消化液于 25 °C 离心(12 000 r/min, 30 min)取胶束层。按式(1)计算营养素的生物可给性^[14]。

$$B = \frac{C_{\text{Micelle}}}{C_{\text{Digesta}}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

B——营养素的生物可给性, %;

C_{Micelle} ——胶束中营养素浓度, g/mL;

C_{Digesta} ——小肠消化液中营养素的浓度, g/mL。

1.2.6 维生素 D 含量测定 参照文献[14]。

1.2.7 类胡萝卜素含量的测定 取小肠消化液或胶束上清液 0.5 mL,加入 4.5 mL DMSO,涡旋混匀,测定 465 nm 处吸光值,使用标准曲线换算为类胡萝卜素浓度。

1.2.8 数据分析 数据用平均值 $\pm$ 标准差表示,使用 SPSS 25.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 MDG/PL 添加对维生素 D 生物可给性的影响

2.1.1 乳液体系消化过程中的粒径及结构变化 由图 1 可知,3 种乳液体系表观均呈均匀的乳白色,粒径范围为 $0.16\ \mu\text{m}$ 左右且初始粒径分布情况相似,说明在婴儿配方奶粉乳液体系中复配添加 MDG 和 PL 不会影响乳液体系的表现性状。

由图 2 可知,3 种乳液经胃和小肠消化后,粒径显著增加。由图 3 可知,纯 WPC 构建的乳液在胃消化条件下产生较大的絮凝团块,而 MDG 的添加能减少该现象的发生,可能是 MDG 的添加有助于胃蛋白酶在乳液表面的均匀分布,提高乳液在胃部的消化速率,减轻胃部的消化负担。

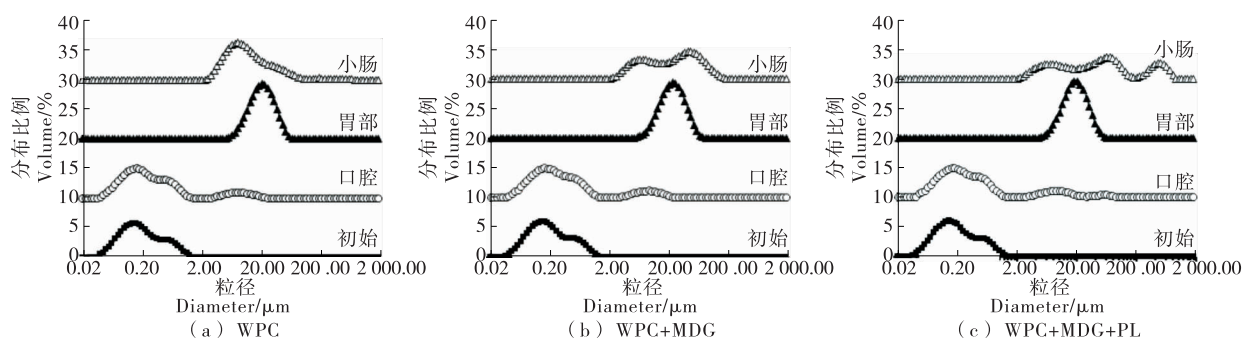


图 2 3 种乳液体系经各阶段消化后的粒径分布

Figure 2 Particle size distribution changes of three emulsion systems under each digestion site

由图 4 可知,复配添加 MDG+PL 的乳液体系其乳液粒径分布与文献[15]报道的母乳经消化后的粒径分布基本一致,均在 $>100\ \mu\text{m}$ 处出现了大量颗粒分布。而仅含有纯乳清蛋白的乳液经消化后粒径分布只在 $100\ \mu\text{m}$ 以内有单峰,在消化过程中无大粒径颗粒的形成。综上,

添加 MDG+PL 乳化体系使得乳液界面组成与母乳中天然存在磷脂、胆固醇、单双脂肪酸甘油酯等极性脂质^[5]组成更为接近,使其在小肠消化条件下,这些母乳中天然存在的极性脂质促进形成了大粒径消化物,其粒径与母乳的更为接近。因此,可推断添加 MDG+PL 乳化体系能促使乳液体系消化行为与母乳更为接近。

2.1.2 3 种乳液体系中脂肪消化水解及其脂溶性营养素

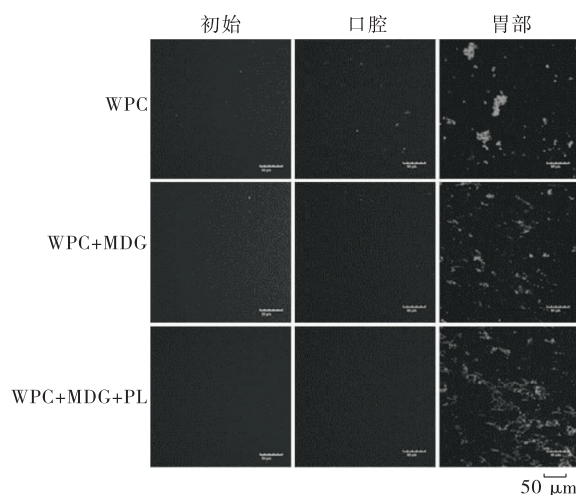


图 3 3 种乳液体系在各消化环境下的微观结构

Figure 3 Microstructure of three emulsion systems under each digestion site

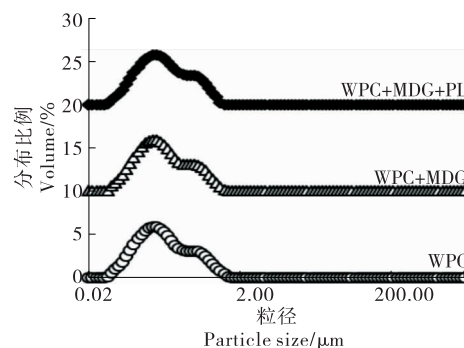


图 1 3 种乳液的初始粒径分布

Figure 1 Initial particle size distribution of three emulsion systems

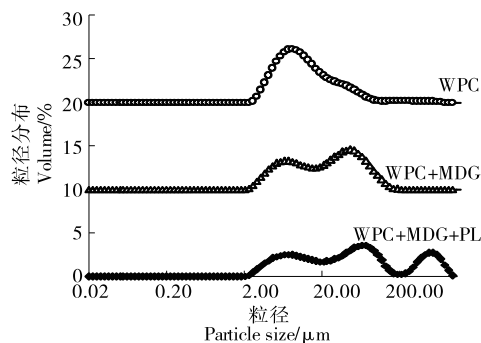


图 4 3 种乳液体系经胃肠道消化后在小肠中消化物的粒径分布

Figure 4 Particle size distribution of digesta in small intestine after passing through gastrointestinal tract of three emulsion systems

生物可给性比较 乳液进入小肠后,在胰脂肪酶的作用下,乳液中包埋的甘油三酯逐步水解生成 MDG 和游离脂肪酸,同时乳液中的脂溶性营养素被逐渐释放出来。释放出的脂溶性营养素可被胆盐、磷脂及甘油三酯水解生成的游离脂肪酸及 MDG 形成微胶束进行包载,微胶束从小肠腔穿过黏液层转运至小肠上皮细胞表面进行吸收^[16]。因此微胶束中包载的营养素含量可反映乳液体系中营养素的生物可给性。

由图 5 可知,消化初期,复配添加 MDG 和 PL 的乳液体系比纯乳清体系乳液消化速率更快,说明 MDG 和 PL 的复配添加能提升甘油三酯的水解速率,促进脂溶性营养素更快释放。这可能是 MDG 和 PL 等极性脂肪可部分取代乳液颗粒表面在油水界面上分布的蛋白,使得胰脂肪酶更易于脂肪接触,从而促进水解使得乳液体系中的脂溶性营养素更快地释放进入小肠腔中^[6]。添加 MDG+PL 乳液经小肠消化后,小肠消化液分离出的胶束层在大粒径处有更多分布,表明含有 MDG+PL 乳液消化液中存在更多粒径较大的微胶束。

由图 6 可知,WPC、WPC+MDG 及 WPC+MDG 与

PL 乳液中维生素 D 的生物可给率分别为 $(75.98 \pm 1.98)\%$, $(78.65 \pm 0.71)\%$, $(83.18 \pm 1.40)\%$ 。其中 MDG 与 PL 复配添加组维生素 D 的生物可给率显著高于纯 WPC 和 WPC+MDG 乳液体系 ($P < 0.05$),表明 MDG 和 PL 的复合添加具有显著提高乳液中脂溶性营养素——维生素 D 生物可给性的作用,而单一添加 MDG 并不能达到此效果。结合胶束层粒径分布结果,复配添加 MDG 和 PL 的乳液消化后形成胶束的大小和分布特点均与母乳相似。这可能是在乳液中复配添加极性脂质 (MDG 和 PL),与母乳乳液中表面膜组分上极性脂质组成更为接近,因此有助于形成与母乳类似的、结构更为复杂的、粒径更大的微胶束结构^[17-18]。而较大粒径的微胶束结构能有效地包载分子结构较大的脂溶性营养素,并能包载更多的脂溶性营养素,促进其在小肠中的转运吸收,提高其生物可给率^[19]。

2.2 MDG 组成结构对乳液中脂溶性营养素类胡萝卜素生物可给性的影响

由图 7 可知,对照组乳液 (纯 WPC 乳液) 中脂溶性营养素 β -胡萝卜素生物可给性最低,为 $(1.76 \pm 0.01)\%$,而

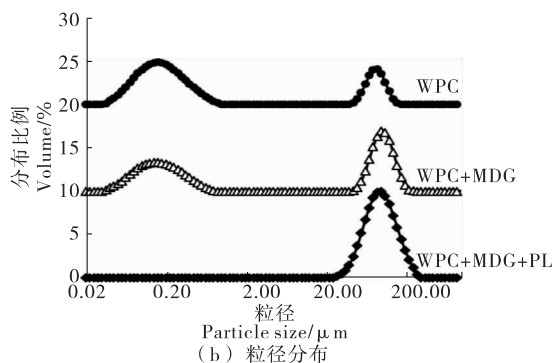
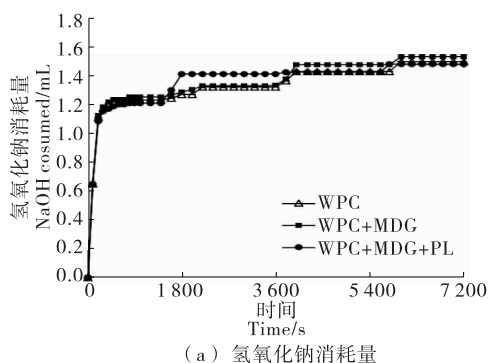


图 5 3 种乳液体系在小肠消化过程中 NaOH 的消耗量及消化后胶束的粒径分布

Figure 5 Consumption of NaOH during the small intestine digestion and Micellar particle size distribution after digestion of three emulsion systems

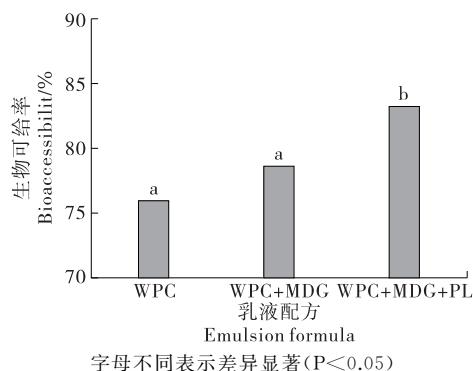


图 6 单双脂肪酸甘油酯/磷脂 (MDG/PL) 的添加对维生素 D 生物可给率的影响

Figure 6 Effect of mono- and diglycerides/lecithin (MDG/PL) on bioaccessibility of vitamin D

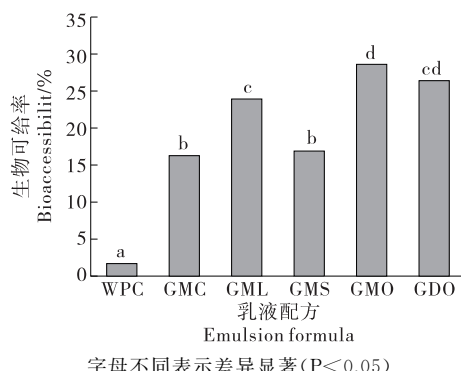


图 7 不同组成结构单双脂肪酸甘油酯 (MDG) 对类胡萝卜素生物可给率的影响

Figure 7 Influence of mono- and diglycerides (MDG) addition on bioaccessibility of beta carotenoids

在体系中添加 MDG 后,脂溶性营养素类胡萝卜素可给性显著提升($P<0.05$),生物可给性可提升至纯 WPC 乳液体系中类胡萝卜素生物可给性的 8~15 倍。相比于维生素 D,类胡萝卜素的生物可给性偏低^[14],而 MDG 的添加对提升类胡萝卜素这种本身在人体中吸收效率较低的脂溶性营养素的效果更为显著。说明不同组成结构的 MDG 对脂溶性营养素类胡萝卜素生物可给性的提升效果不同,其提升有效性依次为 GMO 乳液 $[(28.58 \pm 0.58)\%]>$ GDO 乳液 $[(26.42 \pm 0.72)\%]>$ GML 乳液 $[(23.95 \pm 1.39)\%]>$ GMS 乳液 $[(16.94 \pm 1.66)\%]\approx$ GMC 乳液 $[(16.24 \pm 1.23)\%]$ 。其中,GMO 和 GDO 对类胡萝卜素生物可给性的提升效果最为显著。

母乳脂肪酸中单不饱和长链脂肪酸(油酸等)占近 50%^[20],因此 MDG 应主要以单不饱和长链脂肪酸构建的形式为主。试验所选择的 MDG 是基于母乳中可能存在的 MDG 类型,选择性添加其中占主体的由单不饱和长链脂肪酸构建的 MDG,包括 GMO 和 GDO。试验发现单不饱和长链脂肪酸酯 GMO、GDO 对类胡萝卜素生物可给性的提升效果最佳。Bettler 等^[11]研究发现,相比于母乳,婴儿对婴儿配方粉中类胡萝卜素类(叶黄素)的吸收率显著较低,婴儿配方粉中需添加 4 倍于母乳含量以达到相同的吸收效果。

3 结论

研究基于母乳组成,在婴儿配方奶粉中复合添加极性脂质成分——单双脂肪酸甘油酯及磷脂,研究其对脂溶性营养素生物可给性的影响。结果表明,单双脂肪酸甘油酯及磷脂新型乳化技术能促使奶粉的消化过程和消化行为更接近母乳,显著提高了奶粉中脂溶性营养素在人体内的生物可给性,促进了其在人体中的吸收效率;添加单双脂肪酸甘油酯/磷脂的乳液在经消化后,其小肠中的粒径分布与母乳的相似,在大粒径处有较多分布;不同组成结构的单双脂肪酸甘油酯均能有效提高脂溶性营养素的吸收,但对脂溶性营养素的提升效果存在显著差异,油酸型的单双脂肪酸甘油酯由于与母乳中天然存在形式更为接近,因此对脂溶性营养素胶束化效率提升效果最佳。后续将对单双脂肪酸甘油酯/磷脂提高脂溶性营养素吸收效率的相关机制进行深入分析探讨。

参考文献

[1] 杨慧. 兰州市 1 月~36 月住院婴幼儿维生素 D 营养状况及其影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2013: 26-28.

[2] 盛布雷. pH 响应型 β -胡萝卜素双层乳液的制备及其性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 3-5.

[3] MCCLEMENTS D J. Nanoscale nutrient delivery systems for food applications: Improving bioactive dispersibility, stability, and bioavailability[J]. *Journal of Food Science*,

2015, 80(7): N1 602-N1 611.

[4] XAVIER A A O, MERCADANTE A Z. The bioaccessibility of carotenoids impacts the design of functional foods[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2019, 26: 1-8.

[5] MICHALSKI M C. Lipids and milk fat globule properties in human milk[M]//SHERMA Z, RONALD R W, VICTOR R. *In Handbook of dietary and nutritional aspects of human breast milk*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2013: 213-244.

[6] LU W, KELLY A L, MIAO S. Improved bioavailability of encapsulated bioactive nutrients delivered through monoglyceride-structured O/W emulsions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(14): 3 048-3 055.

[7] MARRIAGE B J, WILLIAMS J A, CHOE Y S, et al. Mono- and diglycerides improve lutein absorption in healthy adults: A randomised, double-blind, cross-over, single-dose study[J]. *The British Journal of Nutrition*, 2017, 118(10): 813-821.

[8] PATRICK T, MUSTAFA V, CHIH-WEI K, et al. Effect of mono- and diglycerides on the digestion and absorption of lutein in lymph fistula rats[J]. *American Journal of Physiology Gastrointestinal & Liver Physiology*, 2018, 315 (1): G95-G103.

[9] 武建刚, 霍贵成. 母乳化脂肪微胶囊化工艺的研究[J]. *食品与机械*, 2009, 25(1): 51-56.

[10] 袁婷兰, 伍文彬, 朱雪梅, 等. 脂肪酸位置分布对婴幼儿奶粉油脂乳液体外模拟消化的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(4): 92-99.

[11] BETTLER J, ZIMMER J P, NEURINGER M, et al. Serum lutein concentrations in healthy term infants fed human milk or infant formula with lutein [J]. *European Journal of Nutrition*, 2010, 49(1): 45-51.

[12] LI Yan, MCCLEMENTS D J. New mathematical model for interpreting pH-stat digestion profiles: Impact of lipid droplet characteristics on in vitro digestibility[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(13): 8 085-8 092.

[13] 刘晓丽, 魏长庆, 夏文水. 草鱼鱼油微胶囊芯材释放条件及缓释特性研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(12): 23-28.

[14] DIMA C, DIMA S. Bioaccessibility study of calcium and vitamin D-3 co-microencapsulated in water-in-oil-in-water double emulsions[J]. *Food Chemistry*, 2020, 303: 125416.

[15] DE OLIVEIRA S C, BELLANGER A, MÉNARD O, et al. Impact of human milk pasteurization on gastric digestion in preterm infants: A randomized controlled trial[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2017, 105 (2): 379-390.

[16] YAO Ming-fei, MCCLEMENTS D J, ZHAO Fa-qing, et al. Controlling the gastrointestinal fate of nutraceutical and pharmaceutical-enriched lipid nanoparticles: From mixed micelles to chylomicrons[J]. *Nanoimpact*, 2017, 5: 13-21.

(下转第 42 页)

致谢:感谢中粮(东莞)粮油工业有限公司提供测试仪器和指导。

参考文献

- [1] ANNALISA D B, ANTONELLA P, ROCCO R, et al. Traditions, health and environment as bread purchase drivers: A choice experiment on high-quality artisanal Italian bread[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 221: 249-261.
- [2] WERNER H, JUSSOFIE I, FELIX M. Investigations into the properties of emulsifiers in yeast-leavened dough by means of infrared spectroscopy[J]. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 1995, 200(4): 244-246.
- [3] AAMODT A, MAGNUS E M, HOLLUNG K, et al. Dough and hearth bread characteristics influenced by protein composition, protein content, DATEM, and their interactions[J]. *Journal of Food Science*, 2006, 70(3): C214-C221.
- [4] INOUE Y, SAPIRSTEIN H D, BUSHUK W. Studies on frozen doughs IV: Effect of shortening systems on baking and rheological properties[J]. *Cereal Chemistry*, 1995, 72(2): 221-226.
- [5] CHUNG O K. Lipid-protein interactions in wheat flour, dough, gluten, and protein fractions [J]. *Cereal Foods World*, 1986, 31(3): 242-256.
- [6] 胥奇. 面包、蛋糕老化剂的研制[D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 9.
- [7] 张彦. 重组华根霉脂肪酶的酶学性质及在面包面团体系的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [8] 李珍妮. 含有重组华根霉脂肪酶和转谷氨酰胺酶的冷冻面团抗冻性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 22-26.
- [9] GERITS L R, PAREYT B, DECAMPS K, et al. Lipases and their functionality in the production of wheat-based food systems[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2014, 13(5): 978-989.
- [10] 童大鹏. 焙烤过程对红茶面包淀粉消化特性的影响及其机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 10.
- [11] 李先玉. 冷冻甜面团流变发酵特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007: 10.
- [12] 张可欣, 蒋慧, 汤晓娟, 等. 复合酶制剂对甜酒酿面包发酵烘焙特性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(1): 16-21.
- [13] 王家宝, 陈诚, 王凤, 等. 含丙二醇酯低脂蛋糕的流变学、气泡微结构和烘焙特性研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(5): 1-7.
- [14] LIU X, ZHANG T, XUE Y, et al. Changes of structural and physical properties of semi-gel from Alaska pollock surimi during 4 °C storage[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87(2): 772-782.
- [15] 王家宝, 陈诚, 王凤, 等. 搅拌时间和乳化剂对海绵蛋糕表面气泡的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(10): 8-13, 70.
- [16] SROAN B S, MACRITCHIE F. Mechanism of gas cell stabilization in breadmaking II: The secondary liquid lamellae[J]. *Journal of Cereal Science*, 2009, 49(1): 41-46.
- [17] SARA M, WALTER R M M, JAN A D. Lipases in wheat flour bread making: Importance of an appropriate balance between wheat endogenous lipids and their enzymatically released hydrolysis products[J]. *Food Chemistry*, 2019, 298: 1-10.
- [18] ANALÍA V G, EVELINA G F, MARIA C A, et al. Changes in secondary structure of gluten proteins due to emulsifiers[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2013, 1 033: 51-58.
- [19] KESKIN S O, GÜLÜM S, SAHIN S. Usage of enzymes in a novel baking process[J]. *Die Nahrung*, 2004, 48(2): 156-160.
- [20] VALENTINA S, PAUL A. The effect of different enzymes on the quality of high-fibre enriched brewer's spent grain breads[J]. *Food Chemistry*, 2008, 110(4): 865-872.
- [21] SARA M, WALTER R M M, JAN A D. Lipases in wheat flour bread making: Importance of an appropriate balance between wheat endogenous lipids and their enzymatically released hydrolysis products[J]. *Food Chemistry*, 2019, 298: 1-10.
- [22] 苏晓琴, 张可欣, 黄卫宁, 等. 高 γ -氨基丁酸绿豆酸面团面包营养与烘焙特性[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(13): 340-345.
- [23] 姜培彦, 马晓军, 余斌, 等. 乳化剂与直链淀粉相互作用及其对蛋糕品质影响的研究[J]. *食品工业科技*, 2008(2): 247-250.
- [24] MOAYEDALLAIE S, MIRZAEI M, PATERSON J. Bread improvers: Comparison of a range of lipases with a traditional emulsifier [J]. *Food Chemistry*, 2010, 122(3): 495-499.

(上接第 37 页)

- [17] PORTER C J H, CHARMAN W N. In vitro assessment of oral lipid based formulations[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2001, 50(S1): S127-147.
- [18] PORTER C J H, CHARMAN W N. Lipid-based formulations for oral administration: Opportunities for bioavailability enhancement and lipoprotein targeting of lipophilic drugs[J]. *Journal of Receptor and Signal Transduction Research*, 2001, 21(2/3): 215-257.
- [19] YANG Ying, DECKER E A, XIAO Hang, et al. Enhancing vitamin E bioaccessibility: Factors impacting solubilization and hydrolysis of α -tocopherol acetate encapsulated in emulsion-based delivery systems[J]. *Food & Function*, 2015, 6(1): 83-96.
- [20] AHERN G J, HENNESSY A A, RYAN C A, et al. Advances in infant formula science[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2019, 25(10): 75-102.