

阿拉伯胶乳液对共轭亚油酸的氧化保护和在模拟胃肠液中的释放研究

姚晓琳^{1,2}, 向圣萍¹, 聂珂¹, 范刚³, 胡泽锋¹, 赵丹¹, 姜发堂^{1,2}, 方亚鹏^{1,2}

(1. 湖北工业大学轻工学部食品与制药工程学院, 湖北武汉 430068) (2. 工业发酵湖北省协同创新中心, 湖北武汉 430068) (3. 华中农业大学食品科技学院, 湖北武汉 430070)

摘要: 共轭亚油酸 (CLA) 是一类具有多种生理活性的不饱和脂肪酸, 极易被氧化, 在食品工业中的应用受到很大限制。本文采用阿拉伯胶 (GA) 制备 CLA 乳液, 从 CLA 氧化产物角度来评价 GA 对 CLA 乳液的氧化保护作用, 同时对 CLA 在模拟胃肠液中的释放动力学特征进行研究。结果表明, 5.0% 浓度时 GA 在乳液界面荷载量达到最大, 此浓度下乳液中 CLA 的挥发性氧化降解产物浓度最低, 氧化稳定性最好; 在模拟胃液中释放率缓慢增加, 粒径分布均匀; 在模拟肠液中释放率加快, 乳液出现大颗粒聚集。随着 GA 浓度增加, CLA 挥发性氧化降解产物含量增加, 氧化稳定性降低; CLA 在胃部释放率有所增加, 大颗粒聚集增多。但总体来说, GA 乳液中 CLA 在模拟胃肠液中的释放显示出了良好的营养缓释性能, 延长了 CLA 的释放时间, 提高了 CLA 的生物利用度。

关键词: 共轭亚油酸; 阿拉伯胶; 乳液; 氧化保护; 模拟胃肠道

文章编号: 1673-9078(2016)3-24-29

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.3.005

Protective Effect of Gum Arabic-Stabilized Emulsion against Oxidation of Conjugated Linoleic Acid and the Release Kinetics in Simulated Gastrointestinal Juice

YAO Xiao-lin^{1,2}, XIANG Sheng-ping¹, NIE Ke¹, FAN Gang³, HU Ze-feng¹, ZHAO Dan¹, JIANG Fa-tang^{1,2}, FANG Ya-peng^{1,2}

(1. School of Food and Pharmaceutical Engineering, Faculty of Light Industry, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China) (2. Hubei Collaborative Innovation Center for Industrial Fermentation, Wuhan 430068, China) (3. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Conjugated linoleic acid (CLA) is an unsaturated fatty acid with many physiological activities. Since it can be easily oxidized, its application in the food industry was greatly limited. A CLA emulsion was prepared using gum arabic (GA), and the protective effect of GA against oxidation of CLA emulsion was evaluated in terms of the oxidative degradation products, and the characteristics of the release kinetics of CLA encapsulated by GA emulsion in simulated gastrointestinal juice were also investigated. The results showed that the surface loading of GA was the highest in the emulsion stabilized with 5% GA. Moreover, at this concentration, the lowest concentrations of volatile oxidative degradation products of CLA in the emulsion were found, and the optimal oxidative stability was presented. In addition, the release rate of CLA in emulsion in the simulated gastric juice slowly increased with homogeneous particle size distribution, while the release rate was accelerated in intestinal juice with aggregation of large particles in emulsion. With increasing concentration of GA, the content of the volatile oxidative degradation products of CLA increased, and the oxidative stability decreased. Furthermore, the release rate of CLA in gastric juice increased to some extent, along with the increase in large particle aggregation. Thus, CLA encapsulated in GA emulsion exhibited the properties of sustained nutrition release, extended release time, and enhanced bioavailability in simulated gastrointestinal tract.

Key words: conjugated linoleic acid; gum Arabic; emulsion; oxidation protection; simulated gastrointestinal tract

收稿日期: 2015-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31470096; 31101260; 31322043; 31171751); 湖北省自然科学基金 (20140FB602); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划 (T201307); 湖北工业大学博士启动金 (BSQD12050)

作者简介: 姚晓琳 (1982-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品胶体的功能性应用; 通讯作者: 方亚鹏 (1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品胶体

共轭亚油酸 (CLA) 是一类具有多种生理活性的不饱和脂肪酸, 如抗氧化、抗肿瘤、抗动脉粥样硬化、降低人体胆固醇及甘油三酯等^[1]。但是, CLA 不溶于水, 对光、热、氧气敏感, 极易被氧化, 因此其在食品工业中的应用受到了很大限制^[2~4]。

目前市售的CLA产品以微胶囊居多, 微胶囊化可以在CLA液滴表面覆盖一层薄膜, 使其隔绝光、水和氧气, 有效延长货架期^[5]。Jimenez等人以浓缩乳清蛋白为壁材将CLA包封, 包封后的CLA在产品稳定性及货架期方面均有所增强^[6]。石强等人以大豆分离蛋白、麦芽糊精及玉米糖浆为壁材, 研究了喷雾干燥法制备CLA微胶囊的工艺, 获得了较好的CLA稳定性, 防止CLA氧化降解^[7]。

基于乳液界面技术设计CLA功能因子载体, 将CLA添加至饮料等水基食品中, 能够提高其氧化稳定性, 且具有制备简单、消费方便、成本低廉等优点。实验室前期研究表明, CLA乳液的氧化稳定性在很大程度上依赖于其物理稳定性。乳液油滴聚集可增大油相与氧气、金属离子、过氧化物自由基等促氧化成分接触的几率, 从而导致乳液中CLA的氧化速率提高。采用阿拉伯胶 (GA) 制备CLA乳液, 可在CLA液滴表面可形成厚而致密的界面层, 降低界面张力, 有效防止CLA的氧化降解^[8]。

乳液界面不仅能实现对CLA的氧化保护, 而且对其在人体内的吸收利用产生着重要影响。通过减缓CLA在体内的释放速度, 使之在机体血液中的浓度维持较长时间, 有效避免“峰谷”现象的出现, 从而使CLA的有效性和适应性得以提高。

本文采用凝胶渗透色谱-多角度激光光散射仪 (GPC-MALLS) 测定GA在乳液液滴的界面吸附量, 顶空固相微萃取 (SPME) 和气质联用仪 (GC-MS) 对CLA乳液的挥发性氧化降解产物进行分析, 从氧化产物角度评价GA对CLA乳液的氧化保护作用; 同时对CLA在模拟胃肠液中的释放动力学特征进行研究, 为CLA的乳液荷载在营养强化中的应用提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

GA由日本San-Ei Gen食品公司提供, CLA购自北京豪尔斯科科技有限公司 (纯度80%), 胃蛋白酶购自Sigma公司, 醛类标准品 (己醛、庚醛、辛醛和壬醛) 购自Sigma公司。NaCl、CaCl₂、胆盐3号、十二烷基磺酸钠等常规试剂均购自国药集团化学试剂有限公

司。

GPC-MALLS (DAWN HELEOS), 示差折光检测仪 (Optilab rEX), 美国Wyatt技术公司; 激光粒度仪 (Mastersizer 2000), 英国马尔文仪器有限公司; 高速剪切预乳化机 (PT-MR2100), 瑞士Kinematica公司; 高压纳米均质机 (M-110L), 美国Microfluidics公司; ORION 4 STAR pH计, 梅特勒-托利多仪器有限公司; SPME萃取手柄和萃取头 PDMS/DVB/CAR, 美国Supelco公司; 7890A/5975C型气质联用仪, 20 mL顶空采样瓶, 美国Agilent公司; 高速冷冻离心机 (GL-21M), 长沙平凡仪器仪表有限公司; 双光束紫外分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司。

1.2 试验方法

1.2.1 乳液制备

将不同浓度的GA溶液置于滚轴式混合器上室温下混合12 h, 使其充分溶解混匀, 添加15.0% CLA作为乳液的油相, 利用高速剪切乳化机预乳化3 min (26000 r/min), 高压纳米均质机75 MPa下1次循环制备新鲜乳液, 整个过程冰水浴, 防止CLA的氧化。

1.2.2 乳液粒径测定

采用Mastersizer 2000型激光粒度仪测定不同浓度的GA乳液的粒径尺寸分布^[9]。将乳液经微振荡摇匀, 逐滴加至分散剂中, 通过Hydro 2000MU型湿法进样器进样。试验中用超纯水做分散剂, 分散相和连续相的折光率分别是1.52和1.33, 样品的吸收率是0.01, 泵速为2000 r/min, 添加样品至激光指数略大于10%, 即可开始测定。乳液的平均粒径用表面积加权平均值D[3,2]表示, 按下式计算:

$$D[3,2] = (\sum n_i d_i^3 / \sum n_i d_i^2),$$

其中 n_i 表示粒径大小为 d_i 的颗粒数目。

1.2.3 乳液界面吸附物质的分离

乳液界面吸附物质的分离与测定参照Nakauma等的方法^[10]。5.0 g新鲜乳液与20.0 g A液 (36.0%蔗糖和6.0% NaCl) 用Ika磁力搅拌器200 r/min搅拌1 min, 10 °C下10000 r/min离心30 min后收集下层水相。残留物 (即乳析层和上层油层) 继续添加A液 (总重25.0 g) 后重复上述操作三遍, 回收下层水相。在离心残留物中添加B液 (0.1%十二烷基磺酸钠和5.0% NaCl) (总重25.0 g), 使用PT-MR2100 Polytron-type混合器在10000 r/min下搅拌2 min。十二烷基磺酸钠具有很强的界面活性, 可取代吸附在油/水界面上的物质, 将其置换于水相中。混合物在10 °C下10000 r/min离心30 min后收集下层水相, 残留物继续添加B液 (总

重 25.0 g) 后重复上述操作三遍回收下层水相。收集部分采用 GPC-MALLS 检测乳化剂浓度和分子特性。乳液分散相的体积分数 ϕ 可按下式计算^[10]:

$$\phi = (\rho_{aq} - \rho_{em}) / (\rho_{aq} - \rho_{oil}),$$

其中 ρ_{aq} , ρ_{em} , 和 ρ_{oil} 分别表示胶溶液、乳液和油的密度。乳液的比表面积计算方法如下:

$$S_v: S_v = 6\phi / D[3,2] \quad (\text{m}^2/\text{mL 乳液})$$

其中 $D[3,2]$ 为新鲜乳液粒径。

阿拉伯胶的界面荷载体积 Γ 按下述公式计算

$$\Gamma(\text{mg}/\text{m}^2) = C_{ads}(\text{mg}/\text{mL 乳液}) / S_v(\text{m}^2/\text{mL 乳液})$$

其中 C_{ads} 为单位体积乳液的界面上阿拉伯胶的吸附量。

1.2.4 GPC-MALLS 测定界面吸附量

GPC-MALLS 被用来表征水相中吸附在乳液界面上的 GA 的含量和分子量^[11]。采用 DAWN HELEOS 多角度激光光散射检测器(砷化镓光源, 激光波长 658 nm)、SPD-10Avp 紫外检测器(214 nm), 和 Optilab rEX 示差折光检测器(激光波长 658 nm) 进行检测。Superose 6 10/300GL 凝胶柱、流速 0.4 mL/min, 流动相为 0.2 M NaCl (含 0.03% NaN_3)。实验前样品通过 0.45 μm 微孔滤膜过滤, 进样量 200 μL , 阿拉伯胶的折光指数增量 dn/dc 值为 0.142 mL/g, 数据分析软件为 ASTRA5.3.4.14, 分析方法为 Berry。

1.2.5 GC-MS 分析条件

色谱柱: DB-5MS 型弹性毛细管柱 (60 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm); 程序升温: 柱初温 40 $^{\circ}\text{C}$, 以 2.5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 130 $^{\circ}\text{C}$, 保持 1 min, 再以 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 250 $^{\circ}\text{C}$, 保持 1 min; 进样口温度 270 $^{\circ}\text{C}$; 载气流量: 恒流 1 mL/min, 不分流; 传输线温度 280 $^{\circ}\text{C}$, 离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$, 四极杆温度 150 $^{\circ}\text{C}$; 电子能量 70 eV; 质量扫描范围 m/z 35~395^[12]。氧化产物定性分析是采用 GC-MS 进行分析鉴定, 运用 NIST08 谱库进行检索分析, 化合物匹配度应大于 90%。部分醛类物质(己醛、庚醛、辛醛及壬醛)的鉴定同时采用了与标准品的质谱数据比对定性。

1.2.6 SPME 萃取 CLA 乳液挥发性氧化产物

将不同 GA 浓度的 CLA 乳液, 在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下敞口贮存 12 h。在 20 mL 的顶空采样瓶中加入 5.0 g 贮存后的 CLA 乳液, 置于磁力搅拌台上, 将 PDMS/DVB/CAR 萃取头插入顶空瓶中, 调整并固定萃取头在顶空体积中的位置, 搅拌速度为该磁力搅拌器的最大档, 在 80 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴中顶空萃取 40 min, 迅速取出插入气质联用仪的进样口, 解吸 5 min, 取出 PDMS/DVB/CAR 针管。

1.2.7 CLA 标准曲线的绘制

采用正己烷配制一定浓度 CLA 溶液, 用紫外分光

光度计做波长扫描, 测定 CLA 的最大吸收波长为 234 nm。在最大吸收波长下, 测定不同浓度 CLA 溶液(0-10 $\mu\text{g}/\text{mL}$) 的吸光度, 绘制吸光度与 CLA 浓度的标准曲线, 得到相关性方程 $y=0.118x+0.018$, 相关系数 $R^2=0.996$, 线性关系良好。

1.2.8 CLA 乳液在模拟胃肠液中的释放

将 2.0 g NaCl 用 950.0 mL 水溶解, 用 HCl 调 pH 至 2.0, 加胃蛋白酶 3.2 g, 定容至 1000.0 mL, 混合均匀得到模拟胃液。取 1.0 mL CLA 乳液与 29.0 mL 模拟胃液混合, 37 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴, 搅拌速度为 100 r/min, 定时取样。取 1.0 mL 用于测定粒径, 1.0 mL 加等量正己烷萃取, 并定容至 10.0 mL, 测定 234 nm 处的吸光度, 并计算含量^[13]。

称取 4.4 g NaCl、21.1 g CaCl_2 和 2.5 g 胆盐, 用 Tris 缓冲液 (10 mM, pH 7.0) 定容至 500.0 mL, 混合均匀得到模拟肠液。将 1.0 mL CLA 乳液与 29.0 mL 模拟肠液混合, 37 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴, 搅拌速度为 100 r/min, 定时取样。取 1.0 mL 用于测定粒径, 1.0 mL 加等量正己烷萃取, 并定容至 10.0 mL, 测定 234 nm 处的吸光度, 并计算含量^[13]。

1.2.9 数据处理

实验数据均为 3 次重复的平均值, 采用 Origin7.0 进行标准差分析, 采用 SPSS11.5 统计软件进行显著性分析, 检验水平为 $p < 0.05$ 时为差异显著。

2 结果与讨论

2.1 乳液粒径及界面荷载

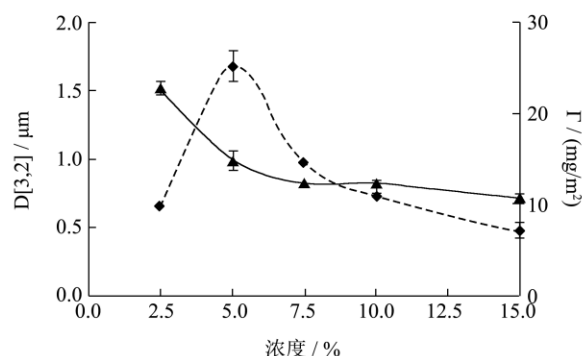


图 1 不同 GA 浓度下 CLA 乳液的粒径(实线)和界面荷载(虚线)

Fig.1 Particle size (solid line) and surface loading (dashed line) of CLA emulsion stabilized with different concentrations of GA

图 1 中显示了不同胶浓度下乳液颗粒粒径变化和油滴单位比表面积下的界面荷载 Γ 。随着 GA 浓度增加, 乳液粒径逐渐降低。当 GA 浓度大于 5.0%, $D[3,2]$ 变化缓慢, 逐渐趋于平衡。同时, GA 在 5.0% 浓度下

油滴的界面荷载 Γ 显著增大至最大值 ($P < 0.05$), 表明此浓度下乳液油滴表面的 GA 吸附量最大 (图 2-1B)。当 GA 浓度高于 5.0%, 乳液液滴的界面吸附量下降。这与前期研究中 GA 在 5.0% 浓度下粒径分布均一, 稳定性最好, 高于 5.0% 时乳液出现大颗粒聚集现象相对应^[8]。

2.2 CLA 乳液挥发性氧化产物分析

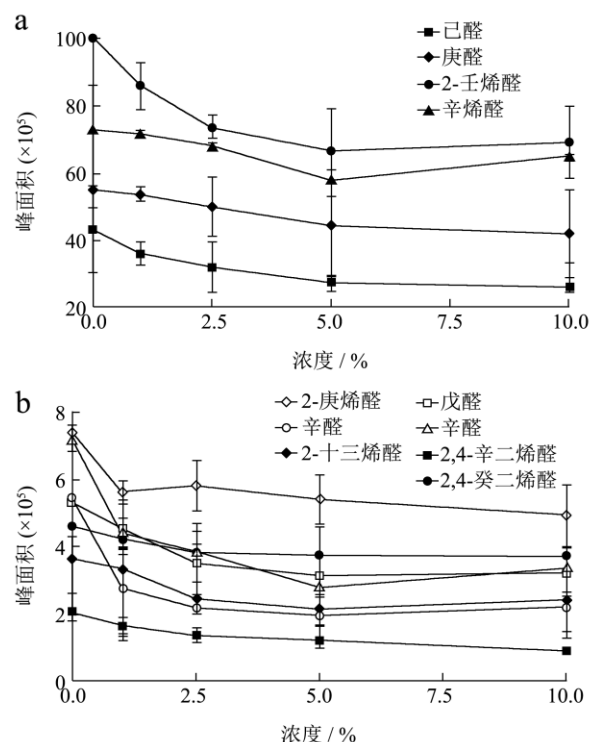


图 2 不同 GA 浓度下 CLA 乳液的挥发性氧化产物分析

Fig.2 Volatile oxidative degradation products of CLA emulsion stabilized with different concentrations of GA

将不同 GA 浓度的 CLA 乳液, 在 60 °C 下敞口贮存 12 h。采用顶空固相微萃取条件, 分别萃取各 GA 浓度下的 CLA 乳液的挥发性氧化降解产物, GC-MS 分析。CLA 因其分子中双键含有流动性较大的 π 电子, 极易受到氧化剂的攻击而断裂, 因此在空气中容易被氧化成醛、酮类化合物。从图 2 可以看出, CLA 的挥发性氧化降解产物为醛类物质, 主要包括 2-壬烯醛、辛烯醛、庚醛、己醛、2-庚烯醛、2,4-癸二烯醛、戊醛、辛醛、壬醛、2,4-辛二烯醛等。与纯 CLA 相比, 乳液体系中的 CLA 的降解产物含量降低, 起到了一定的氧化保护效果。5.0% GA 制备的乳液中 CLA 产物含量最低, 表明其氧化速率最慢, 保护效果最显著。当 GA 浓度较低时, CLA 乳液界面未被包覆完全, CLA 可直接与氧气接触, 氧化速率较快, 导致氧化产物含量较高。10.0% GA 制备的 CLA 乳液, 部分氧化产物 (如 2-壬烯醛、辛烯醛、辛醛及壬醛等) 含量有升高

趋势, 氧化保护效果下降, 与此浓度下 CLA 乳液的物理稳定性降低相对应^[8]。

2.3 CLA 乳液在模拟胃液中的释放动力学研究

由图 3a 可知, 5.0% GA 制备的 CLA 乳液在模拟胃液中的释放率随时间缓慢增加。在 0~120 min, 乳液中 CLA 的释放较为缓慢, 120 min 之后 CLA 释放变快。图 3b 为 15.0% GA 制备的 CLA 乳液在模拟胃液中的释放率。在 0~120 min 内, 15.0% GA 乳液的 CLA 在模拟胃液的释放率增加缓慢, 与 5.0% GA 乳液类似。而 120 min 后, 与 5.0% GA 乳液相比, 15.0% GA 乳液的 CLA 释放率增加更为显著, 在 300 min 时释放率达到约 35.89%。图 4 为 CLA 乳液在模拟胃液中的粒径分布。5.0% GA 乳液在模拟胃液中始终保持单峰分布。随着在模拟胃液中时间的延长, 15.0% GA 乳液中大颗粒聚集峰出现增加趋势。

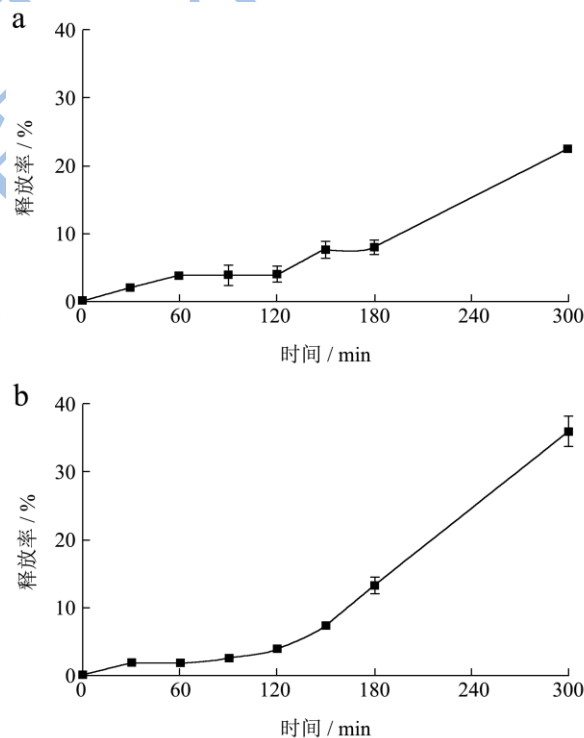


图 3 GA 乳液中 CLA 在模拟胃液中的释放动力学曲线

Fig.3 Release kinetics of CLA encapsulated by GA emulsion in simulated gastric juice

注: a: 5.0%; b: 15.0%。

由此可知, CLA 乳液处于模拟胃液中 120 min 之后, GA 在胃蛋白酶的作用下开始逐渐被酶解, 导致 CLA 液滴表面的界面膜逐渐消失, 乳液对 CLA 形成的界面保护屏障降低, 因此 CLA 向体系扩散的速率增大。5.0% GA 乳液颗粒分布均匀, 呈现优异的物理稳

定性；而 15.0% GA 乳液中有少量大颗粒聚集，处于相对不稳定状态^[8]。在胰蛋白酶的作用下，乳液界面被破坏，15.0% GA 乳液相对更易出现液滴聚结，乳液结构破坏，CLA 释放率显著增大。

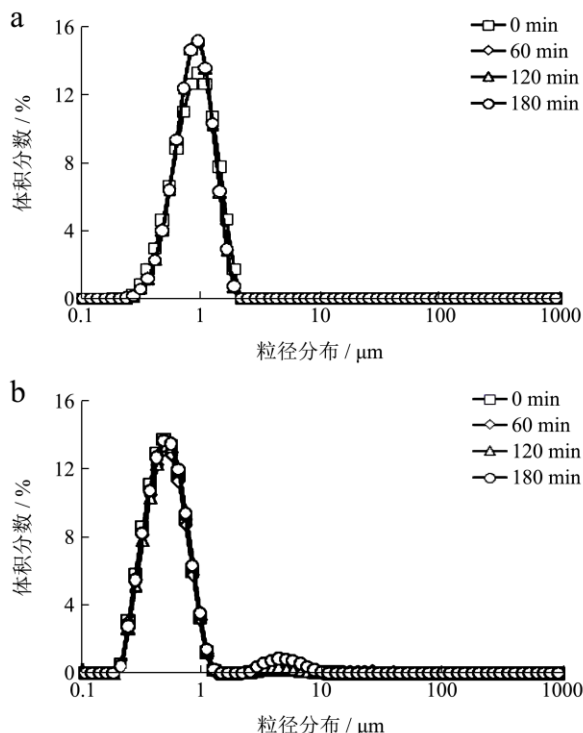


图 4 GA 乳液中 CLA 在模拟胃液中的粒径分布

Fig.4 Partide size distribution of CLA encapsulated by GA emulsion in simulated gastric juice

注：a: 5.0%; b: 15.0%。

2.4 CLA 乳液在模拟肠液中的释放动力学研究

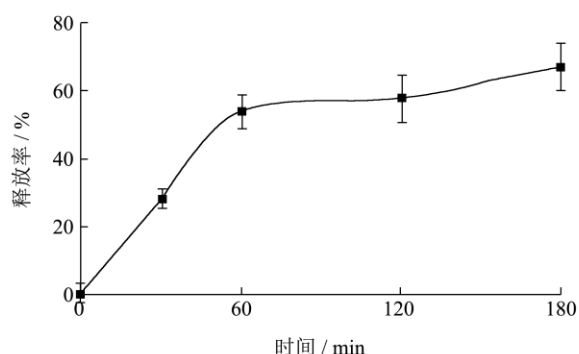


图 5 5.0% GA 乳液中 CLA 在模拟肠液中的释放动力学曲线

Fig.5 Release kinetics of CLA encapsulated by 5.0% GA emulsion in simulated intestinal juice

由图 5 可知，5.0% GA 制备的 CLA 乳液在模拟肠液中的释放率随时间变化呈现迅速增加的趋势。在 0~60 min 内，乳液中 CLA 的释放率迅速增加，60 min

之后 CLA 释放逐渐平缓，在 180 min 时 CLA 的释放率达到约 67.08%。与胃中释放速率相比，CLA 在小肠中的释放速率较快。由图 6 可知，5.0% GA 乳液在模拟肠液中出现明显的大颗粒聚集，推测是小肠内的胆盐取代了液滴界面的 GA^[14]，加速了乳液界面保护屏障的破坏，导致 CLA 的快速释放。

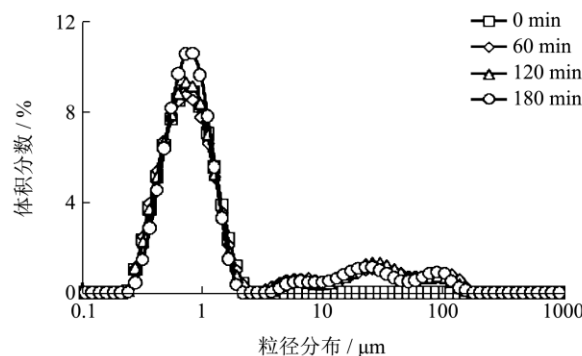


图 6 5.0% GA 乳液中 CLA 在模拟肠液中的粒径分布

Fig.6 Partide size distribution of CLA encapsulated by 5.0% GA emulsion in simulated intestinal juice

3 结论

3.1 随着乳化剂浓度增加，CLA 乳液颗粒粒径逐渐降低并达到平衡。5.0% 浓度时 GA 在乳液界面荷载量达到最大，对应此浓度下乳液中 CLA 的挥发性氧化降解产物浓度最低，氧化稳定性最好；在模拟胃液内释放率增加缓慢，乳液液滴分布较为均匀；在模拟肠液中释放率加快，乳液出现大颗粒聚集，与肠液中胆盐取代界面 GA 有关。随着 GA 浓度增加，CLA 挥发性降解产物含量增加，氧化稳定性降低，CLA 在胃部释放率有所增加。但总体来说，GA 乳液中 CLA 在胃肠道的释放率较为较慢，显示出了良好的营养缓释性能，延长了 CLA 的释放时间，提高了 CLA 的生物利用度。

3.2 实验室前期研究表明，CLA 乳液的物理稳定性影响其化学稳定性，提高乳液物理稳定性是保证较好氧化稳定性的前提^[8]。本研究同样表明，乳液中 CLA 的氧化稳定性和其在胃肠道内的释放情况取决于乳液的液滴分布及界面吸附特性。GA 在 5.0% 浓度下粒径分布均一，稳定性最好，界面荷载量最大，因此保证了 5.0% GA 浓度下 CLA 乳液的氧化稳定性最好，且乳液中 CLA 在胃肠道的释放率较低。

参考文献

[1] Yang B, Chen HQ, Stanton C, et al. Review of the roles of conjugated linoleic acid in health and disease [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 15, 314-325
 [2] Khaskheli A A, Talpur F N, Demir A S, et al. A highly

- selective whole cell biocatalysis method for the production of two major bioactive conjugated linoleic acid isomers [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2013, 2: 328-332
- [3] Mele M C, Cannelli G, Carta G, et al. Metabolism of c9, t11-conjugated linoleic acid (CLA) in humans [J]. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 2013, 89: 115-119
- [4] 刘峰.食品功能因子/表面活性剂自聚集体系的制备及表征[D].无锡:江南大学,2010
LIU Feng. Formation and characterization of food functional factors/surfactants self-assemble systems [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010
- [5] Choi K O, Ryu J, Kwak H S, et al. Spray-dried conjugated linoleic acid encapsulated with maillard reaction products of whey proteins and maltodextrin [J]. *Food Science Biotechnology*, 2010, 19(4): 957-965.
- [6] Jimenez M, Garcia H S, Beristain C I. Sensory evaluation of dairy products supplemented with microencapsulated conjugated linoleic acid (CLA) [J]. *Swiss Society of Food Science and Technology*, 2008, 41: 1047-1052
- [7] 石强,吾满江,艾力.共轭亚油酸微胶囊化的乳化工艺研究[J].*食品科学*,2006,27(11):310-315
SHI Qiang, WU Man-jiang, AI Li. Study on emulsification technology with conjugated linoleic acid microencapsulation [J]. *Food Science*, 2006, 27(11): 310-315
- [8] Yao X L, Xu Q, Tian D Z, et al. Physical and chemical stability of gum arabic-stabilized conjugated linoleic acid oil-in-water emulsions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(19): 4639-4645
- [9] Day L, Xu M, Lundin L, Wooster T J, et al. Interfacial properties of deamidated wheat protein in relation to its ability to stabilize oil-in-water emulsions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23: 2158-2167
- [10] Nakauma M, Funami T, Noda S, et al. Comparison of sugar beet pectin, soybean soluble polysaccharide, and gum arabic as food emulsifiers. 1. Effect of concentration, pH, and salts on the emulsifying properties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(7): 1254-1267
- [11] Mao P, Zhao M, Zhang F, et al. Phase separation induced molecular fractionation of gum arabic-sugar beet pectin systems [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 98(1), 699-705
- [12] 李冬生,李阳,汪超,等.不同加工方式的武昌鱼鱼肉中挥发性成分分析[J].*食品工业科技*,2014,35(23):49-53.
LI Dong-sheng, LI Yang, WANG Chao, et al. Analysis of volatiles in *Megalobrama amblycephala* by different processing methods [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(23): 49-53
- [13] 谢岩黎,史秀丽.微胶囊化维生素 A 在模拟胃肠液中释放特性的研究[J].*现代食品科技*,2007,23(11):27-29
XIE Yan-li, SHI Xiu-li. Study on the release of kinetic model of vitamin A microcapsule in false gastric and intestines succus [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2007, 23(11): 27-29
- [14] Yao X L, Wang N N, Fang Y P, et al. Impact of surfactants on the lipase digestibility of gum arabic-stabilized O/W emulsions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 33, 393-401