

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.03.012

宋军成, 张莉莉, 刘琪, 等. 大豆酱油渣及低温豆粕中可溶性膳食纤维对油脂体稳定性及消化特性的影响[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(3): 117-124.

SONG J C, ZHANG L L, LIU Q, et al. The effect of soluble dietary fiber from soybean sauce residue and low-temperature soybean meal on the stability and digestive characteristics of oil bodies[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(3): 117-124.

# 大豆酱油渣及低温豆粕中可溶性 膳食纤维对油脂体稳定性 及消化特性的影响

宋军成<sup>1</sup>, 张莉莉<sup>1</sup>, 刘琪<sup>1</sup>, 邹彩凤<sup>1</sup>, 冯时<sup>1</sup>, 刘峰<sup>2</sup>, 宋立里<sup>3</sup>, 李向阳<sup>1,4</sup>✉

1. 鲁东大学 食品工程学院, 山东 烟台 264205;
2. 山东御馨生物科技股份有限公司, 山东 滨州 256599;
3. 山东金胜粮油食品有限公司, 山东 临沂 276600;
4. 鲁东大学 生命科学学院, 山东 烟台 264205)

**摘要:** 从大豆酱油渣及低温豆粕中提取了可溶性膳食纤维 (Soybean soluble dietary fiber, SSDF), 并以 Zeta 电位绝对值、平均粒径、过氧化值 (POV 值)、硫代巴比妥酸值 (TBARS 值) 以及游离脂肪酸 (FFA) 释放率等为特征参数探究了 SSDF 对大豆油脂体 (soybean oil body, SOB) 乳液的理化稳定性和消化特性的影响规律。结果表明: 一定浓度的 SSDF 可有效降低 SOB 乳液体系的 Zeta 电位、平均粒径、POV 值、TBARS 值, 显著改善 SOB 乳液的理化稳定性; 此外体外模拟消化试验表明, SSDF 可显著降低 SOB 乳液的 FFA 释放率, 有效延缓 SOB 中的脂质在胃肠道内的消化进程。本研究可为酱油渣、豆粕等加工副产物的高值化利用, 为提高 SOB 的加工适性以及开发新型含 SOB 及 SSDF 的低脂保健食品提供理论依据及参考。

**关键词:** 酱油渣; 豆粕; 可溶性膳食纤维; 油脂体; 稳定性

中图分类号: TS222.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)03-0117-08

网络首发时间: 2024-05-10 14:40:14

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240510.1119.005>

## The Effect of Soluble Dietary Fiber from Soybean Sauce Residue and Low-temperature Soybean Meal on the Stability and Digestive Characteristics of Oil Bodies

SONG Jun-cheng<sup>1</sup>, ZHANG Li-li<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, ZOU Cai-feng<sup>1</sup>, FENG Shi<sup>1</sup>,  
LIU Feng<sup>2</sup>, SONG Li-li<sup>3</sup>, LI Xiang-yang<sup>1,4</sup>✉

收稿日期: 2023-11-19

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2022YFD2101203); 鲁东大学科技重大创新任务培育项目 (2023000105)

Supported by: National Key Research and Development Project of the 14th five-year plan, China (No. 2022YFD2101203); Ludong University Cultivation Project of Major Science and Technology Task (No. 2023000105)

作者简介: 宋军成, 男, 1998 年出生, 在读硕士生, 研究方向为食品质量与安全。E-mail: 1351804412@qq.com

通讯作者: 李向阳, 男, 1969 年出生, 博士, 教授, 研究方向为粮油食品加工。E-mail: xiangyang\_l@163.com

- (1. School of Food Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264205, China;
2. Shandong Yuxin Biotechnology Co., Ltd., Binzhou, Shandong 256599, China;
3. Shandong Jinsheng Grain, Oil and Food Co., Ltd., Linyi, Shandong 276600, China;
4. School of Life Sciences, Ludong University, Yantai, Shandong 264205, China)

**Abstract:** Soybean soluble dietary fiber (SSDF) was extracted from soy sauce residue and soybean meal. The influence of SSDF on the physicochemical stability and digestive characteristics of soybean oil body (SOB) lotion was investigated by taking the absolute value of Zeta potential, average particle size, peroxide value (POV value), thiobarbituric acid value (TBARS value) and fatty acid release rate (FFA) as characteristic parameters. The results showed that certain concentration of SSDF could effectively reduce the Zeta potential, average particle size, POV value, TBARS value of SOB lotion system, and significantly improve the physical and chemical stability of SOB lotion. In addition, in vitro simulated digestion experiments further showed that the introduction of SSDF can significantly reduce the FFA release rate of SOB emulsion, which effectively delayed the digestion process of lipids in the gastrointestinal tract. This study can provide theoretical basis and reference for the high-value utilization of soybean processing by-products such as soy sauce oil residue and soybean meal, which could improve the processing applicability of SOB, and develop new low-fat health foods containing SOB and SSDF.

**Key words:** soy sauce residue; soybean meal; soluble dietary fiber; oil body; stability

大豆可溶性膳食纤维 (SSDF) 为优秀的水溶性阴离子多糖, 在酱油渣、豆粕等加工副产物中含量丰富。据统计, 酱油渣及豆粕的膳食纤维约含 30% 左右的 SSDF, 这些 SSDF 可采用酶法、水

热法、超声法、酸碱法等工艺进行提取。据《食品安全国家标准 食品添加剂 可溶性大豆多糖》(GB 1886.322—2021) 描述 SSDF 的主成分化学结构如图 1 所示, SSDF 由半乳糖醛酸 (GalA)、半乳

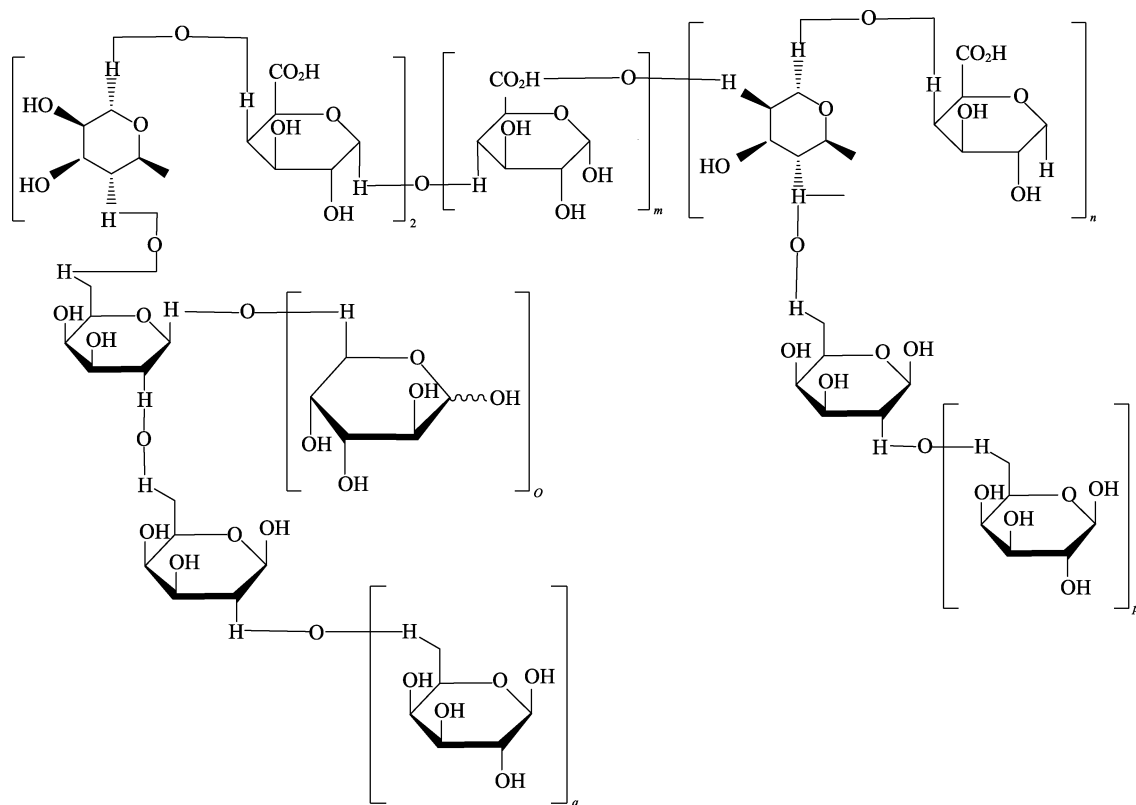


图 1 SSDF 主要成分的化学结构

Fig.1 The chemical structure of the main components of SSDF

糖 (Gal)、鼠李糖 (Rha) 等组成, 和果胶具有相似的结构<sup>[1]</sup>。SSDF 不仅具有促消化、降血糖、抗氧化、抗肥胖等多种生理保健活性及改善代谢综合征的潜在活力, 还具有优秀的溶解性、分散性、乳化性、稳定性及黏着性功能特性, 可作为分散剂、乳化剂、稳定剂及抗结剂等应用于乳制品、饮料、调理食品及保健食品加工等领域。

油脂体 (oil body, OB) 作为一种储存脂质的结构稳定的细胞器, 其主要包括富含蛋白质-磷脂的外膜和储存脂质的疏水核心<sup>[2]</sup>。独特的磷脂-蛋白外膜赋予 OB 良好的稳定性, 保护了 OB 内脂质免受氧化和水解, 使 OB 可以分散于水相中形成具有良好理化稳定性的水包油 (O/W) 乳液体系<sup>[3]</sup>。OB 的乳液稳定性优于人工乳液, 且不需要均质及乳化, 可作为天然乳化剂直接应用于食品加工, 在食品加工业已备受关注。大豆 OB (SOB) 富含不饱和脂肪酸、蛋白质、生育酚、植物甾醇等营养成分, 其乳化活性及乳化稳定性优于葵花籽、花生等植物 OB, 在食品加工业极具应用潜力<sup>[4]</sup>。

虽然 SOB 具有良好的稳定性, 但在近等电点、酶解等极端环境下, 其稳定性也会受到破坏而发生聚集与融合, 影响其在食品中的应用。为了提高 SOB 的稳定性, Iwanga D 等研究了果胶对 SOB 乳液稳定性的影响<sup>[5]</sup>。结果表明, 涂有果胶层的 SOB 其乳化稳定性有显著提高。Su 等用海藻酸钠 (ALG) 覆盖 SOB, 发现在等电点、高盐浓度下, 涂有 ALG 的 SOB 乳液的稳定性明显高于天然 SOB 乳液<sup>[6]</sup>。Wu 等研究也表明, 添加果胶、海藻酸钠等带有负电荷的多糖可提升 SOB 的稳定性<sup>[7]</sup>。SSDF 作为阴离子多糖是否可以用于改善 SOB 乳液的乳化稳定性, 是否可以影响 SOB 的消化特性, 目前还鲜有报道。本文探究来自酱油渣的膳食纤维 (RSSDF) 及来自豆粕的膳食纤维 (MSSDF) 对 SOB 乳液的理化特性的影响, 为酱油渣及豆粕的高值化利用及进一步拓宽 SSDF 及 SOB 在食品加工领域的应用提供理论依据与技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

酱油渣 (传统发酵工艺以大豆为主要原料酿

造酱油的副产物): 佛山市海天 (高明) 调味食品有限公司提供; 大豆、豆粕 (低温豆粕, 氮溶解指数大于 50%): 山东御馨生物科技股份有限公司提供; 胃蛋白酶、胆盐及胰脂肪酶: Sigma-Aldrich; 纤维素酶、淀粉酶、糖化酶、木瓜蛋白酶: 上海源叶生物科技有限公司; 乙醇、氢氧化钠、磷酸盐缓冲液 (pH 5.0 及 pH 7.0)、蔗糖: 天津凯通, 所用试剂皆为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

LCQ 液相色谱-质谱联用仪: 美国 Finnigan 公司; HP 1100 高效液相色谱系统: 美国惠普公司; Zetasizer-Nano-ZS 激光纳米粒度分析仪: 英国马尔文公司; MODEL BE-210 型垂直电泳仪: 日本 BIO CRAFT 公司; ChemiDoc MP 凝胶成像仪: 美国 Bio-Rad 公司; Nikon Eclipse 80i 激光共聚焦显微镜: 日本 Nikon 公司; 模块化智能流变仪: Anton Paar 股份有限公司; pH 计: 上海仪电科学仪器股份有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 SOB 的提取

参考刘璐等的方法<sup>[8]</sup>稍作修改: 将大豆种子清洗干净后与去离子水混合, 保鲜膜封口, 4 °C 环境浸泡 18 h。完成浸泡的种子与 9 倍重量的 4 °C 去离子水混合, 18 000 r/min 研磨打浆 6 min 后对浆液进行过滤, 向滤液内加入适量蔗糖充分混合后进行 10 min 冰水浴, 之后将混合液 pH 调到 11, 置于冷冻离心机 (在 4 °C, 12 000 r/min 的条件下) 离心 60 min, 收集最上层乳状物质并将其分散于去离子水中, 同样的条件重复收集上层乳状液 3 次。所收集的上层乳状液为 SOB, 将其保存于 4 °C 冰箱内以备后续使用。

#### 1.3.2 SSDF 的提取

参照高辰等的方法略作改变<sup>[9]</sup>。首先将豆粕或酱油渣挤压后脱脂, 然后向脱脂的豆粕或酱油渣中依次加入纤维素酶、淀粉酶、糖化酶及木瓜蛋白酶在其最适酶解条件 (表 1) 进行酶解, 对酶解液进行灭酶及离心, 离心后取上清液进行浓缩, 浓缩结束后向浓缩液内加入其 4 倍体积的 95% 乙醇进行醇沉过夜, 醇沉后离心收集沉淀物, 沉淀物加水溶解, 经浓缩、冷冻干燥得 SSDF。

表 1 最适酶解条件

Table 1 The optimal conditions for enzymatic hydrolysis

酶种类	纤维素酶	淀粉酶	糖化酶	木瓜蛋白酶
最适合温度/℃	50	25	55	50
最适合 pH	4.8	6.0	4.5	6

### 1.3.3 SSDF-SOB 乳液体系的制备

将粉末状 SSDF 溶于磷酸盐缓冲溶液 (10 mmol/L) 配制成 1% (w/w) 的溶液, 并在 85 °C 条件下水浴加热 30 min, 边加热边搅拌, 使其溶解充分。取 10 g SOB, 加入 40 g 磷酸盐缓冲溶液 (10 mmol/L), 制备成 20% (w/w) 的 SOB 乳液。SOB-SSDF 乳液由 20% (w/w) 的 SOB 乳液, 1% (w/w) 的 SSDF 溶液和 (10 mmol/L) 的磷酸盐缓冲液室温混合搅拌 2 h 制备而成。各组 SOB-SSDF 乳液其 SOB 浓度均为 10% (w/w), 其 SSDF 浓度分别为 0、0.1% (w/w)、0.2% (w/w)、0.3% (w/w)、0.4% (w/w)、0.5% (w/w)。

### 1.3.4 乳液的 Zeta 电位及粒径测定

取适量 1.3.3 制备的 SOB-SSDF 乳液, 用磷酸盐缓冲溶液将其浓度稀释为 0.05% (w/w), 在 25 °C 条件下用激光纳米粒度分析仪测定其 Zeta 电位, 每个样品平行测定 3 次。将 SOB-SSDF 乳液稀释 1 000 倍, 用激光纳米粒度分析仪测定其平均粒径, 每个样品平行测定 3 次。

### 1.3.5 抗氧化稳定性实验

将 1.3.3 制备的 3 种乳液 (SOB 浓度 10%, SSDF 浓度 0.5%) 放置在避光处恒温 (37 °C) 贮存, 每隔 2 天分别取样 1 次, 并测定其过氧化值 (POV 值) 及硫代巴比妥酸值 (TBARS 值) 来监测乳液中脂质的氧化程度。参考 Khouryieh 等的方法测定乳液体系的 POV 值和 TBARS 值<sup>[10]</sup>。

### 1.3.6 模拟消化实验

参照梁丽的方法制备胃消化液及肠消化液<sup>[11]</sup>。首先进行体外模拟胃部消化实验: 取 10.0 mL 的 1.3.3 中制备的乳液, 与 8.0 mL 已预热的胃部模拟消化液混合, 调整混合体系 pH 至 2.0, 然后将混合体系放置于 37 °C 恒温水浴摇床 120 rpm 振荡 1 h, 进行模拟胃消化阶段实验。胃部消化结束立即进行体外模拟肠部消化: 取 30 mL 胃消化产物, 然后加入已预热的 3.0 mL 胆盐溶液, 调整体系 pH 至 7.0, 之后快速加入 4.0 mL 已预热的脂肪

酶溶液, 37 °C 条件下恒温水浴摇床 120 rpm 振荡 2 h, 进行模拟小肠消化阶段实验, 每隔 10 min 取 1 次样, 将所取样品置于 95 °C 水浴锅中进行灭酶以终止消化反应。保持体系 pH 为 7.0, 采用 pH-stat 自动电位测定仪监控并记录体系反应过程中 NaOH (0.01 mol/L) 的消耗量。按如下公式计算 SOB 的游离脂肪酸释放率:

$$\text{脂肪酸释放率} = \frac{V \times c \times M}{2 \times m} \times 100\%$$

式中: V 为所消耗 NaOH 溶液的体积; c 为 NaOH 溶液的浓度; m 为消化体系中三酰基甘油脂的质量; M 为三酰基甘油脂的摩尔质量。

## 1.4 数据处理

每组实验均重复进行 3 次, 实验数据统计分析均采用 SPSS18.0 来完成, 作图处理均采用 Origin 8.0 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 SSDF 对 SOB 乳液 Zeta 电位的影响

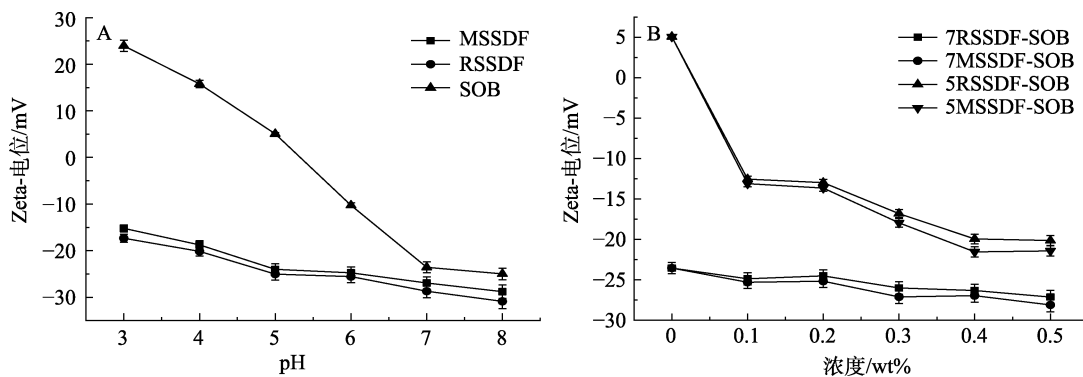
Zeta 电位是表征乳液稳定性的重要指标。通常, Zeta 电位绝对值越大的乳液体系越稳定, 反之, Zeta 电位绝对值越低的乳液体系越不稳定, 在等电点附近乳液稳定性最差, 容易发生凝聚或破裂<sup>[12]</sup>。测定了相同浓度的 SOB、MSSDF、RSSDF 乳液体系在不同 pH 下的 Zeta 电位以及不同浓度的 MSSDF 及 RSSDF 稳定的 SOB 乳液在 pH 分别为 7 和 5 时的 Zeta 电位, 实验结果如图 2 所示。

图 2A 为相同浓度的 SOB、MSSDF 及 RSSDF 乳液体系在不同 pH 下的 Zeta 电位测定结果, 可以看出: SOB 乳液的 Zeta 电位随着 pH 值的增大而降低, 且由正逐渐变为负, 其等电点大约在 pH5.3 左右; 在 pH 相同时, MSSDF 及 RSSDF 乳液的 Zeta 电位值较为接近, 且两者 Zeta 电位均为负值, 并随着 pH 值的增大小幅降低。

图 2B 为不同浓度的 MSSDF 及 RSSDF 稳定的 SOB 乳液在 pH 分别为 7 和 5 时的 Zeta 电位检测结果。显然在 pH 为 5 时, MSSDF 及 RSSDF 的加入导致 SOB 乳液的 Zeta 电位显著降低, 由正值变为负值, 且随着 MSSDF 及 RSSDF 浓度增加, 乳液体系的电位绝对值逐渐增大, 当 MSSDF 及 RSSDF 浓度增加到 0.4% 后电位的变化趋势趋

于平缓。究其原因,应该是在接近等电点的条件下带负电的 MSSDF 及 RSSDF 会和带正电荷的 SOB 通过静电相互作用而相互吸引,导致 MSSDF-SOB 及 RSSDF-SOB 乳液体系所带的负电荷增多,而当多糖浓度达到一定范围,乳液体系几乎达到平衡状态, MSSDF 及 RSSDF 浓度继续增加,也不会改变乳液体系的液滴大小和表面的负电荷数量,这主要是因为带负电的 MSSDF 及 RSSDF 增加乳液体系的负电荷能力是一定的,当乳液体系的负电荷达到一定数量时, MSSDF 及

RSSDF 电荷的累积效应会被抑制,从而乳液体系达到电荷趋于平衡的状态<sup>[13]</sup>。与 pH 为 5 的乳液体系相比较,当 pH 为 7 时 MSSDF 及 RSSDF 的加入导致 SOB 乳液的 Zeta 电位变化幅度较小,但伴随着 MSSDF 及 RSSDF 的浓度增加,乳液体系的电位绝对值也会逐渐增大,可能是因为在中性环境 MSSDF 及 RSSDF 表面的负电荷只是略多于 SOB 的表面电荷,乳液体系的电位绝对值增加的幅度较小<sup>[14]</sup>。显然,SSDF 在等电点附近对 SOB 的稳定性改善效果更显著。



注: A: 乳液体系在不同 pH 下的 Zeta 电位; B: 乳液体系在不同浓度下的 Zeta 电位。误差线代表三组平行实验的标准偏差。

Note: A: The Zeta potential of emulsion system at different pH; B: The Zeta potential of emulsion system at different concentration. The errors were from three parallel experiments.

图 2 乳液体系的 Zeta 电位

Fig.2 The Zeta potential of emulsion system

## 2.2 SSDF 对 SOB 乳液粒径的影响

不同浓度的 MSSDF 及 RSSDF 稳定的 SOB 乳液在 pH 为 5 和 7 条件下的粒径如图 3 所示。在 pH 为 5 条件下的 MSSDF 及 RSSDF 稳定的 SOB 乳液粒径显著降低,在 SSDF 浓度为 0.4% 时乳液体系的粒径最小,此时乳液的分散性较好、较稳定。这可能是由于 MSSDF 及 RSSDF 具有弱凝胶性带有大量的负电荷,可连接到 SOB 蛋白质的表面,且其部分结构还可伸入到两相中形成了凝胶网络保护层,增强液滴间的静电排斥作用,使其不易聚集,从而导致 SOB-SSDF 乳液体系的粒径变小,稳定性增加<sup>[15]</sup>。与 pH 为 5 的乳液体系相比较,在 pH 为 7 条件下的 MSSDF 及 RSSDF 稳定的 SOB 乳液粒径并没有出现极为显著的变化,伴随 MSSDF 及 RSSDF 浓度的增加(0.1%~0.4%),SOB 乳液的粒径只出现了小幅降低的趋势,且整个乳液体系持续保持稳定,这主要是因为

为 7 的中性环境,SOB 表面带有负电荷,因静电斥力体系本身就较为稳定,当加入带负电的 MSSDF 及 RSSDF 时,尽管具有弱凝胶性的 MSSDF 及 RSSDF 会与 SOB 表面蛋白形成一定的凝胶网络,导致体系更加稳定,但乳液的粒径变化幅度并不大<sup>[16]</sup>。这与前面对乳液体系 Zeta 电位的分析结果基本一致。显然,与 pH 为 7 的中性

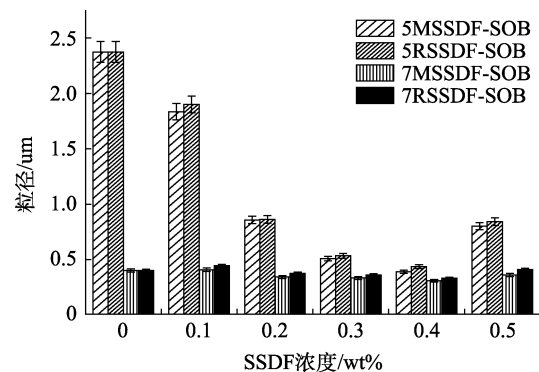


图 3 乳液体系的平均粒径

Fig.3 The average particle size of emulsion system

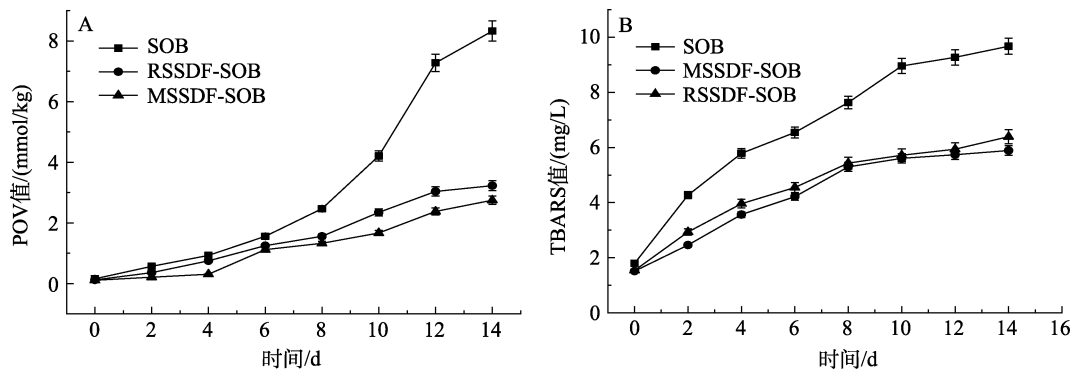
环境下的 SOB 乳液相较, MSSDF 及 RSSDF 对酸性近等电点环境 SOB 乳液的稳定性改善效果更显著。

### 2.3 SSDF 对 SOB 抗氧化稳定性的影响

与花生、核桃等油料作物的油脂体相较, SOB 具有更高的氧化稳定性, 在食品加工工业具有更为广阔的应用潜力, 然而在 SOB 的储存及应用过程中, 因环境因素的改变也会导致 SOB 内脂肪酸、磷脂及生育酚等营养成分的含量发生改变, 进而影响 SOB 的氧化稳定性, 导致 SOB 内脂质的氧化, 产生不良风味物质, 甚至影响食用安全。因脂质氧化会产生氢过氧化物以及丙二醛等产物, 分别通过硫氰酸铁法及硫代巴比妥酸法对 SOB 乳液、MSSDF 及 RSSDF 稳定的酸性环境下 SOB 乳液脂质的氧化过程进行了监测, 分别获得了乳

液体系的 POV 值和 TBARS 值, 以表征三种乳液体系的抗氧化稳定性, 实验结果如图 4 所示。

图 4A 可以看出, SOB、MSSDF-SOB 及 RSSDF-SOB 三种乳液体系的 POV 值均随贮存时间的延长而增大, 说明在储存过程中, 三者的脂质均发生了一定程度的氧化。但在同一储存时间内, MSSDF-SOB 及 RSSDF-SOB 两种乳液体系的 POV 值却显著低于 SOB 乳液体系, 这可能是因为适当浓度的 MSSDF 及 RSSDF 会与 SOB 表面蛋白发生相互作用从而在 SOB 表面形成蛋白质-多糖保护层, 从而抑制脂质与氧接触发生脂质氧化<sup>[17]</sup>。图 4B 为 SOB、MSSDF-SOB 及 RSSDF-SOB 三种乳液体系的 TBARS 值检测结果, 显然 MSSDF 及 RSSDF 的加入显著降低了 SOB 乳液的 TBARS 值, 进一步表明 MSSDF 及 RSSDF 为 SOB 提供了有效保护, 提升了 SOB 的抗氧化稳定性。



注: A: POV 值; B: TBARS 值。

Note: A: POV value; B: TBARS value.

图 4 乳液体系的 POV 值和 TBARS 值

Fig.4 The POV value and TBARS value of emulsion system

### 2.4 SSDF 对 SOB 消化特性的影响

SOB、RSSDF-SOB、MSSDF-SOB 三种乳液体系经体外模拟消化后, 其乳液的平均粒径检测结果如图 5A 所示。图 5A 可以看出, 经胃消化后三种乳液体系的平均粒径均有增大, 这是因为胃液内的胃蛋白酶会水解部分油体表面蛋白为小肽等成分, 导致 SOB 表面所带电荷减少, 引起乳液液滴的聚集絮凝<sup>[18]</sup>。此外, 与 SOB 乳液体系相较, MSSDF-SOB 及 RSSDF-SOB 两种乳液体系的平均粒径均低于 SOB 乳液体系, 这可能因为 SSDF 的包覆为油体表面提供了保护, 导致被包覆的油体表面蛋白不易被胃蛋白酶水解, MSSDF-SOB

及 RSSDF-SOB 乳液液滴的表面电荷数多于 SOB, 乳液液滴间静电斥力大于 SOB 体系, 乳液较为稳定。经肠消化后, 三种乳液体系的平均粒径均小于胃消化阶段, 这是因为在胆盐及脂肪酶等消化液的作用下, 乳液体系的部分脂类会被分解成游离脂肪酸等成分, 导致粒径较大的液滴会被水解而分散, 从而三种乳液体系经肠消化后其粒径低于胃消化阶段。此外, 肠消化后 MSSDF-SOB 及 RSSDF-SOB 两种乳液体系的粒径均低于 SOB 乳液体系, 进一步说明了 SSDF 可有效提升 SOB 的理化稳定性。

SOB 内脂质的消化主要是在小肠内进行,

SOB 内所储存的甘油三酯在肠液内脂肪酶的作用下发生分解反应,从而释放出游离脂肪酸(FFA),FFA 的释放率为表征 SOB 消化特性的关键指标之一<sup>[19]</sup>。图 5B 为 SOB、MSSDF-SOB 及 RSSDF-SOB 三种乳液体系在体外模拟肠消化过程中 FFA 的释放率实验结果。图 5B 可以看出,在肠内消化的前 30 分钟,三种乳液体系 FFA 的释放率的增幅比较显著,随后逐渐平缓。这可能是因为肠消化起始阶段,底物相对充足,胰脂肪酶与三酰基甘油酯等脂类大分子能够较好的发生作用,脂质的消化速度较快,但随着脂质消化的持续进行,

释放出来的脂肪酸可能会聚集于 SOB 周围,阻碍脂肪酶与 SOB 内脂质的接触,从而降低脂肪的消化速度,直至达到稳定平衡的状态<sup>[20]</sup>。重要的是,在模拟肠消化的每一个相同的时间段内,MSSDF-SOB 及 RSSDF-SOB 两种乳液体系的 FFA 释放率显著低于 SOB 乳液体系,这可能是因为 SSDF 与 SOB 表面的蛋白分子间因静电沉积作用形成了蛋白质-多糖复合物,导致多糖包覆在油脂体表面,限制了脂质与脂肪酶的接触,抑制了脂质的分解。表明,SSDF 可以有效抑制 SOB 内脂类物质的消化,可用于开发降脂类保健食品。

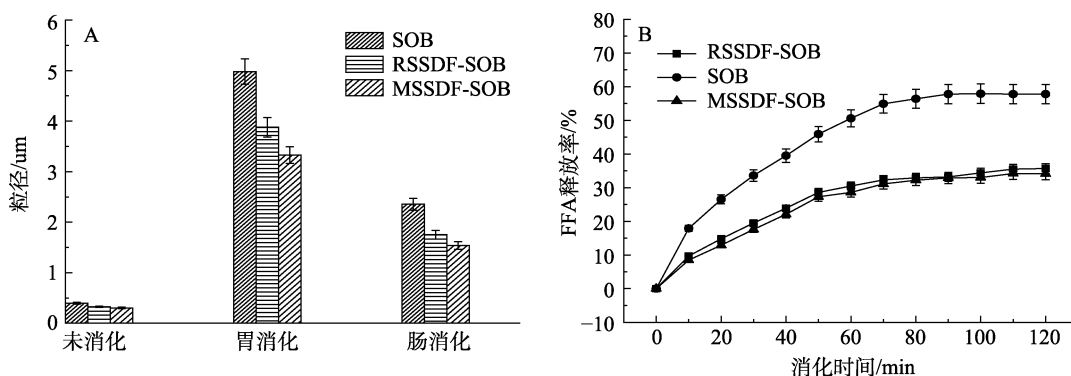


图 5 乳液体系的游离脂肪酸释放率

Fig.5 The free fatty acid release rate of emulsion system

### 3 结论

以大豆酱油渣及低温豆粕等大豆加工副产物为原料制备了 SSDF,并揭示了 MSSDF 及 RSSDF 对 SOB 乳液的 Zeta 电位、粒径、抗氧化稳定性及消化特性的影响,为 SSDF 的应用提供了参考,也为酱油渣及豆粕等加工副产物的高值化利用提供了依据。从酱油渣内提取的 RSSDF 及从豆粕内提取的 MSSDF 对 SOB 乳液的理化稳定性的改善结果基本相同,无显著性差异。在酸性 (pH=5) 和中性 (pH=7) 环境下,RSSDF 及 MSSDF 的引入均可有效降低 SOB 乳液的 Zeta 电位及平均粒径,且在等电点附近 (pH=5) RSSDF 及 MSSDF 对 SOB 乳液的 Zeta 电位及平均粒径的改善效果更为显著。乳液体系的抗氧化稳定性实验结果表明,随储存时间的延长三种乳液体系的 POV 值及 TBARS 值均呈现逐渐上升之势,在同一时间段内 RSSDF-SOB 及 MSSDF-SOB 体系的 POV 值及

TBARS 值比较接近,但均显著低于 SOB 乳液,RSSDF 及 MSSDF 的引入有效提升了 SOB 乳液的抗氧化稳定性。此外,模拟体外消化实验结果表明,肠消化阶段,三种乳液体系 FFA 释放率均随时间的延长而增加,但 RSSDF-SOB 及 MSSDF-SOB 乳液体系的 FFA 释放率显著低于 SOB 乳液体系,RSSDF 及 MSSDF 的引入有效提升了 SOB 乳液内油脂的缓释效果。总之,来源于酱油渣及豆粕的 SSDF 可有效改善 SOB 乳液的理化稳定性,可有效抑制 SOB 在小肠内的 FFA 释放率,在食品加工领域尤其是低脂/降脂健康食品开发领域具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 王思琪,胡彦波,翟丽媛,等.豆渣可溶性酸性多糖的分离纯化及结构解析[J].食品科学,2021,42(10):52-57.  
 WANG S Q, HU Y B, ZHAI L Y, et al. Extraction, purification and structure analysis of soluble acidic polysaccharides from

- soybean dregs[J]. *Food Science*, 2021, 42(10): 52-57.
- [2] LAIBACH N, POST J, TWYMAN R M, et al. The characteristics and potential applications of structural lipid droplet proteins in plants[J]. *Journal of Biotechnology*, 2015, 201: 15-27.
- [3] DING J, XU Z, QI B, et al. Thermally treated soya bean oleosomes: the changes in their stability and associated proteins[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(1): 229-238.
- [4] LAN X, QIANG W, YANG Y, et al. Physicochemical stability of safflower oil body emulsions during food processing[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 132(2): 109838.
- [5] IWANAGA D, GRAY D A, FISK I D, et al. Extraction and characterization of oil bodies from soy beans: a natural source of pre-emulsified soybean oil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(21): 8711-8716.
- [6] SU C, FENG Y, YE J, et al. Effect of sodium alginate on the stability of natural SOB emulsions[J]. *Rsc Advances*, 2018, 8(9): 4731-4741.
- [7] WU N N, HE X T, QI J R, et al. Stabilization of SOB emulsions using @i-carrageenan: Effects of salt, thermal treatment and freeze-thaw cycling[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 28(1): 110-120.
- [8] 刘璐, 朱建宇, 李啸天, 等. 大豆油体-果胶复合油凝胶的制备、表征及氧化稳定性分析[J]. *食品科学*, 2023, 44(12): 10-17.
- LIU L, ZHU J Y, LI X T, et al. Preparation, characterization and oxidation stability of soybean oil body-pectin composite oleogel[J]. *Food Science*, 2023, 44(12): 10-17.
- [9] 高辰, 朱杰, 王明芳, 等. 豆渣可溶性膳食纤维的提取分析及抗氧化研究[J]. *食品研究与开发*, 2013(10): 23-27.
- GAO C, ZHU J, WANG M F, et al. Researches on extraction, characterization and antioxidant of soluble dietary fiber from okara[J]. *Food Research And Development*, 2013(10): 23-27.
- [10] KHOURYIEH H, PULI G, WILLIAMS K, et al. Effects of xanthan-locust bean gum mixtures on the physicochemical properties and oxidative stability of whey protein stabilised oil-in-water emulsions[J]. *Food Chemistry*, 2015, 167(1): 340-348.
- [11] 梁丽. 乳脂肪球的体外消化特性及其影响因素研究[D]. 江南大学, 2019. 1-79.
- LIANG L. Study on milk fat globules digestion characteristics in vitro and its influence factors[D]. Jiangnan University, 2019. 1-79.
- [12] 刘建华, 杜启伟, 丁玉庭. 两性离子型乳化剂对高能量乳液稳定性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(7): 88-94.
- LIU J H, DU Q W, DING Y T. Effects of zwitterionic emulsifiers on the stability of high energy emulsions[J]. *Food And Fermentation Industries*, 2019, 45(7): 88-94.
- [13] VERKEMPINCK S H E, KYOMUGASHO C, SALVIA-TRUJILLO L, et al. Emulsion stabilizing properties of citrus pectin and its interactions with conventional emulsifiers in oil-in-water emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 85(12): 144-157.
- [14] SALMINEN H, WEISS J. Electrostatic adsorption and stability of whey protein-pectin complexes on emulsion interfaces[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35: 410-419.
- [15] 丁俭, 马文君, 毕爽, 等. 超高压改性大豆蛋白与可溶性多糖复合物对乳液形成及稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(7): 96-101.
- DING J, MA W J, BI S, et al. Effect of ultra-high pressure processing on the formation and stability of emulsions containing soy protein and soluble polysaccharide complexes[J]. *Food Science*, 2017, 38(7): 96-101.
- [16] 高倩茹, 吕雯雯, 郝佳, 等. 亚麻籽胶对米糠油体稳定性及消化的影响[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(4): 91-97.
- GAO Q R, LV W W, HAO J, et al. Effect of flaxseed gum on stability and digestion of rice bran oil body[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(4): 91-97.
- [17] 刘璐, 江连洲, 齐宝坤. 基于大豆油体-果胶复合油凝胶的制备、表征及氧化稳定性分析[J]. *食品科学*, 2023, 44(12): 10-17.
- LIU L, JIANG L Z, QI B K. Preparation, characterization and oxidation stability of soybean oil body-pectin composite oleogel[J]. *Food Science*, 2023, 44(12): 10-17.
- [18] 何胜华, 邓乾春. 大豆和油菜籽油体形成的天然乳液的稳定性及胃肠道消化特性[J]. *食品科学*, 2021, 42(13): 9.
- HE S H, DENG Q C. Stability and in vitro simulated gastrointestinal digestion properties of natural soybean and rapeseed oil body emulsions[J]. *FOOD SCIENCE*, 2021, 42(13): 9.
- [19] 宋哈钰, 钟明明, 康梦雪, 等. 碱性 pH 值提取对大豆油脂体稳定性及消化特性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(4): 57-63.
- SONG H Y, ZHONG M M, KANG M X, et al. Effect of alkaline pH extraction on the stability and digestive properties of soybean oil bodies[J]. *Food Science*, 2023, 44(4): 57-63.
- [20] KIRKHUS B, AFSETH N K, BERGE G, et al. Increased release of carotenoids and delayed in vitro lipid digestion of high pressure homogenized tomato and pepper emulsions[J]. *Food Chemistry*, 2019, 285: 282-289. 完