

## 不溶性豆渣纤维对豆渣蛋白乳液特性的影响

王中江，郭亚男，刘双奇，李柏良，张震，刘军，冯镇，郭增旺

### Effect of Insoluble Okara Fiber on the Properties of Okara Protein Emulsion

WANG Zhongjiang, GUO Yanan, LIU Shuangqi, LI Bailiang, ZHANG Zhen, LIU Jun, FENG Zhen, and GUO Zengwang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080302>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 黄原胶对扁桃仁蛋白质乳化特性的影响

Effect of Xanthan Gum on the Emulsifying Properties of Almond Kernel Protein

食品工业科技. 2021, 42(20): 76-85 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010122>

#### 蒸汽爆破对豆渣膳食纤维的影响及在韧性饼干中的应用

Effect of steam explosion on dietary fiber of okara and its application in semi hard biscuit

食品工业科技. 2018, 39(2): 188-191 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.02.035>

#### 肌肉蛋白乳化特性改善方法研究进展

Recent Progress on the Methods of Improvement on Emulsifying Properties of Meat Protein

食品工业科技. 2021, 42(20): 424-430 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090095>

#### 低温超微粉碎对豆渣蛋白结构及功能性质的影响

Effects of Superfine Comminution of Low Temperature on the Structural and Functional Properties of Soy Dregs Protein

食品工业科技. 2018, 39(23): 50-55 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.23.009>

#### 果胶结构、提取方法及乳化特性研究进展

Research Progress in Structure, Extraction Methods and Emulsifying Properties of Pectin

食品工业科技. 2018, 39(14): 315-322 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.14.060>

#### 物理改性对燕麦麸皮不溶性膳食纤维理化特性的影响

Effects of physical modification on physicochemical properties of insoluble dietary fiber from oat bran

食品工业科技. 2017(23): 35-39 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.23.008>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王中江, 郭亚男, 刘双奇, 等. 不溶性豆渣纤维对豆渣蛋白乳液特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 40–48. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080302

WANG Zhongjiang, GUO Yanan, LIU Shuangqi, et al. Effect of Insoluble Okara Fiber on the Properties of Okara Protein Emulsion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 40–48. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080302

· 研究与探讨 ·

# 不溶性豆渣纤维对豆渣蛋白乳液特性的影响

王中江<sup>1</sup>, 郭亚男<sup>1</sup>, 刘双奇<sup>1</sup>, 李柏良<sup>1</sup>, 张震<sup>1</sup>, 刘军<sup>2</sup>, 冯镇<sup>1</sup>, 郭增旺<sup>1,\*</sup>

(1.东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030;

2.山东禹王生态食业有限公司, 山东德州 251200)

**摘要:**本文探究不溶性豆渣纤维 (IOF) 对豆渣蛋白 (SOP) 乳液性能的影响。以葵花籽油为油相, 研究不同浓度的 IOF (0.25 wt%、0.50 wt%、0.75 wt% 和 1.00 wt%) 对 SOP 乳液微观结构、界面活性、乳化性和稳定性的影响。结果表明: 随着 IOF 浓度的升高, SOP/IOF 乳液的粒径呈现逐渐升高的趋势, 激光共聚焦表明乳液液滴变化呈现相同趋势,  $\zeta$  电位绝对值呈现升高趋势, 界面蛋白含量和浓度呈现增大趋势, 流变指标的变化表明剪切稀化的趋势在加强, 且高浓度的 IOF 能显著增强 SOP 乳液的长期储存稳定性、耐酸稳定性及耐盐稳定性, 这为 IOF 在蛋白乳液凝胶体系中的进一步应用提供了理论基础。

**关键词:**不溶性豆渣纤维, 豆渣蛋白, 乳化特性, 乳液稳定性

中图分类号:TS214.2

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2023)03-0040-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080302

本文网刊:



## Effect of Insoluble Okara Fiber on the Properties of Okara Protein Emulsion

WANG Zhongjiang<sup>1</sup>, GUO Yanan<sup>1</sup>, LIU Shuangqi<sup>1</sup>, LI Bailiang<sup>1</sup>,  
ZHANG Zhen<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>2</sup>, FENG Zhen<sup>1</sup>, GUO Zengwang<sup>1,\*</sup>

(1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Shandong Yuwang Ecological Food Industry Co., Ltd., Dezhou 251200, China)

**Abstract:** This article explored the effect of insoluble okara fiber (IOF) on the properties of okara protein (SOP) emulsion. The effects of different concentrations of IOF (0.25 wt%, 0.50 wt%, 0.75 wt% and 1.00 wt%) on the microstructure, interfacial activity, emulsifying activity and stability of SOP emulsion were studied with sunflower oil as oil phase. The results showed that with the increase of the IOF concentration, the particle size of the SOP/IOF emulsion showed a trend of gradual increase. The laser confocal microscope observation experiment showed that the emulsion droplets change in the same trend, and the absolute value of the zeta potential presents an increasing trend. The content and concentration of interfacial protein showed an increasing trend, and the change of rheological index showed that the trend of shear thinning was increasing, and high concentration of IOF could significantly enhance the long-term storage stability, acid resistance stability and salt resistance stability of SOP emulsion. This provides a theoretical basis for the further application of IOF in the protein emulsion gel system.

**Key words:** insoluble okara fiber; okara protein; emulsifying properties; emulsion stability

大豆作为世界上最主要的植物蛋白及植物油脂来源<sup>[1]</sup>, 每加工 1 吨大豆就会产生 3~4 吨的湿豆渣<sup>[2]</sup>。

干燥的豆渣中含有豆渣蛋白(SOP)(15.2%~33.4%)、豆渣纤维(IOF)(42.4%~58.1%)、钙和钾等<sup>[3]</sup>, 具有极

收稿日期: 2021-08-27

基金项目: 黑龙江省普通本科高等学校青年人才培养计划 (UNPYSCT-2018163); 青年人才托举工程项目 (2019QNRC001); 山东省重点研发计划 (重大科技创新项目) (2022CXGC010603); 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项项目 (2021ZX12B02); “十四五”国家重点研发计划 (2021YFD2100400); 黑龙江省重大科技成果转化项目 (CG19A002); 山东省新旧动能转换重大攻关项目。

作者简介: 王中江 (1987-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: wzjname@126.com。

\* 通信作者: 郭增旺 (1992-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: gzwname@163.com。

高的营养价值和潜在的经济价值<sup>[4]</sup>。但是由于豆渣的口感不佳、加工特性差及不易存放, 大量的豆渣作为废弃物倾倒或者低价销售给养殖户做家畜饲料, 造成了资源的浪费<sup>[5]</sup>。与大豆分离蛋白(SPI)相比, 豆渣蛋白含有更多的游离巯基及二硫键<sup>[6]</sup>。豆渣纤维则具有良好的持水性、膨胀性、热稳定性及抗氧化性等<sup>[7-8]</sup>。因此, 开发豆渣蛋白和豆渣膳食纤维具有较大的意义。

相比 SPI, 豆渣蛋白具有成本低、产量大的优势, 但其乳化性较弱, 限制了在食品、医药等领域的应用。目前的研究通过物理、化学和酶改性等多种方法来改善 SOP 的乳化性能<sup>[9-11]</sup>。其中蛋白质与多糖之间的相互作用受到了广泛的关注。研究表明, 在蛋白-多糖的复合乳液体系中, 蛋白分子和多糖分子能通过增强分子间的相互作用(范德华力、疏水键以及氢键等), 从而改善乳液的稳定性<sup>[12-13]</sup>。同时, 复合乳液通常也比单一乳液更能抵抗环境条件的变化<sup>[14]</sup>。覃定奎<sup>[15]</sup>对比了刺槐胶等膳食纤维对蛋白包油型乳液的理化性质及消化特性的影响, 发现不溶性膳食纤维可以和蛋白进行结合, 增强蛋白包油型乳液体系的稳定性, 表明不溶性膳食纤维可以通过和界面蛋白结合, 改善其乳液体系的稳定性。但是对不溶性膳食纤维对蛋白包油型乳液体系的微观结构和界面特性研究较少。而不溶性 IOF 是一种在豆渣蛋白、大豆分离蛋白等大豆制品生产过程中残留的产量巨大的副产品<sup>[16]</sup>, 其酸碱稳定性良好, 并且在油水界面中表现出良好的乳化性和界面吸附性<sup>[17]</sup>。

因此, 本文通过以葵花籽油为油相, 以 IOF 和 SOP 为水相, 以高压均质为均质方式, 从微观结构、界面特性、乳化特性和稳定性等方面, 探究了不同浓度的 IOF 对 SOP/IOF 复合乳液的功能特性和稳定性的影响, 以为 IOF 在蛋白乳液凝胶体系中的应用提供了理论基础, 拓宽了 SOP 和 IOF 作为食品添加剂的应用范围。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

豆渣粉(60.09% 的纤维、30.15% 的蛋白质、6.80% 的水、2.52% 的灰分和 0.44% 的脂肪) 临邑禹王植物蛋白有限公司; 葵花籽油(多力葵花籽油) 佳格食品(中国)有限公司; 0.22 μm Millipore 过滤器、叠氮化钠、尼罗红、尼罗蓝、Florisil 分子筛吸附剂 美国默克公司; 牛血清白蛋白(≥98%)、盐酸、氢氧化钠、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠, 均为分析纯 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 其他试剂均为分析纯。

AL204 型分析天平 梅勒特-托利多仪器(上海)有限公司; PHSJ-4A 型实验室 pH 计 中国上海雷磁公司; GL-21M 型高速冷冻离心机 上海卢湘仪离心机仪器有限公司; 3-18K 型高速冷冻离心机 Sigma 公司; 85-2 型磁力搅拌器 广州仪科实验仪

器有限公司; HH-4 型数显恒温水浴锅 金坛市双捷实验仪器厂; FD5-3 型冷冻干燥机 美国 SIM 公司; T25 型 ULTRA-TURRAX 高速均质 德国 IKA 公司; AH-BASIC II 型二级高速均质机 加拿大 ATS 工业公司; Zetasizer Nano ZS 型 Zeta 电位仪 英国马尔文有限公司; Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪 英国马尔文有限公司; Auto IQ 型比表面及孔隙分析仪 美国康塔仪器公司; OCA-25 型视频光学接触角测量仪 德国 Dataphysics 公司; TCS SP8 型激光共聚焦显微镜 德国 Leica 公司; HAAKE MARS III 型模块化流变仪 德国赛默飞公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 不溶性豆渣纤维(IOF)和豆渣蛋白(SOP)制备

参照文献 [18] 的方法稍作修改。将 50 g 豆渣粉与 1 L 去离子水混合, 用 1 mol/L 的 NaOH 调节 pH 至 12, 并在 50 °C 水浴锅中搅拌 2 h。以 9000 r/min 的转速在 4 °C 下将悬浮液离心 30 min 得到沉淀和清液。取沉淀部分用去离子水洗涤两次后悬浮在去离子水中, 调 pH 至 7; 将其在 8000 r/min、4 °C 离心 10 min 得到沉淀并用去离子水洗涤两次并冻干制得 IOF。取清液部分用 1 mol/L 的 HCl 调节 pH 为 4.5, 将其在 9000 r/min、4 °C 下离心 30 min 得到沉淀并用去离子水洗涤两次并冻干制得 SOP。

1.2.2 乳液制备 将 SOP 以 1.00% 的浓度溶于去离子水中, 并添加不同浓度的 IOF(0.25 wt%、0.50 wt%、0.75 wt% 和 1.00 wt%)作为实验组, 以不添加 IOF 作为对照组。然后室温下搅拌 120 min 使其充分溶解, 调 pH 为 7 后, 置于 4 °C 备用。将样品和葵花籽油以 9:1 的比例混合, 制备出初级乳液, 然后使用高速均质机均质 2 min, 转速为 10000 r/min。再用二级高压均质机在 40 MPa 压力下均质三次, 第二个阀门压力设为 4 MPa, 制成乳液, 之后向乳液中加入 0.02% 的叠氮化钠以抑制微生物并置于 4 °C 备用。

1.2.3 ζ-电位测定 参照文献 [19] 的方法稍作修改。将待测乳液用磷酸盐缓冲溶液(pH7.0, 0.01 mol/L)适度稀释后, 使用电位仪在 25 °C 测量电位, 上样量为 1 mL, 测定温度为 25 °C, 温度平衡时间为 2 min。

1.2.4 粒径分布测定 参照文献 [20] 的方法。将样品用去离子水稀释后, 使用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪对其进行粒径分布测定, 乳液液滴折射率为 1.46, 分散剂折射率为 1.33, 吸收参数为 0.001。

1.2.5 微观结构的测定 参照文献 [21] 的方法稍作修改。取 1 mL 样品乳液于试管中, 加入 40 μL 尼罗红染料和 40 μL 尼罗蓝染料, 混匀后避光反应 30 min 使其充分染色, 然后取少量样品于载玻片上, 盖上盖玻片后分别在 488 和 552 nm 激发波长下进行激光共聚焦扫描, 采集并保存图像。

1.2.6 界面张力测定 使用 OCA-25 视频光学接触

角测量仪检测系统, 测定了乳液吸附在油-水界面上的界面张力( $\gamma$ )随吸附时间(t)的变化。

实验前, 为了避免购买的葵花籽油中的杂质影响实验的精确度, 向 100 mL 葵花籽油中加入 3 g 的 Florisil 分子筛吸附剂, 搅拌静置和离心处理后, 再加入新的吸附剂, 重复三次, 直到葵花籽油与去离子水的界面张力在 30 min 内保持恒定值即可备用。

实验时, 将连接在毛细管上的不锈钢针插入含有纯化葵花籽油的光学玻璃试管中, 在针尖上形成 20  $\mu\text{L}$  的液滴。CCD 视频摄像系统立即开始连续地采集液滴外形图象, 检测界面张力( $\gamma$ )随吸附时间(t)的变化, 测试时间持续 3 h, 温度保持在室温(25 °C)。每个样品重复进行 3 次测定, 测定结果的误差控制在 0.5 mN/m。利用系统软件 SCA23 自动计算出界面张力  $\gamma$ (精确至 0.01 mN/m)。

**1.2.7 界面蛋白吸附量** 参照文献 [22] 的方法稍作修改。取适量刚制成的乳液在 10000×g, 4 °C 下离心 30 min。将上层的乳析层去除后使用注射器小心地取出底部的清液并通过 0.22  $\mu\text{m}$  过滤器过滤。以牛血清白蛋白(BSA)为标准, 采用 Lowry 法<sup>[23]</sup> 分析乳液和清液中的蛋白质含量。分别用式(1)和式(2)计算界面蛋白质含量( $P_A$ , %)和浓度( $\Gamma$ , mg/m<sup>2</sup>):

$$P_A (\%) = \frac{C_{\text{total}} - C_{\text{serum}}}{C_{\text{total}}} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

$$\Gamma (\text{mg/m}^2) = \frac{C_{\text{total}} - C_{\text{serum}}}{SSA} \quad \text{式 (2)}$$

式中:  $C_{\text{total}}$  为新鲜乳液的总蛋白质含量, mg/mL;  $C_{\text{serum}}$  为清液中的蛋白质含量, mg/mL; SSA 为使用比表面及孔隙分析仪测量的比表面积, m<sup>2</sup>/g。

**1.2.8 流动特性测量** 使用哈克流变仪在 25 °C 下测量乳液表观黏度。取适量体积的乳液加入到流变仪感应板上, 在平板直径 40 mm、角度 1°、剪切速率 0~100 s<sup>-1</sup>、取点数 100 的条件下, 采用流变仪测定其流变学曲线, 并利用 Sisko 模型进行拟合其流变学曲线, 具体如下:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad \text{式 (3)}$$

式中,  $\tau$  为表观黏度, Pa·s;  $\tau_0$  为初始表观黏度, Pa·s;  $K$  为稠度指数;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率, s<sup>-1</sup>;  $n$  为流动行为指数。

**1.2.9 振荡流变特性测量** 使用哈克流变仪在 25 °C 下测量乳液在不同频率(0.01~1 Hz)下的储能模量 G'(Pa)和损耗模量 G''(Pa)。所用配件为 P60 TiL 平行板, 间距 1 mm。在频率扫描之前, 通过对 pH7 的乳液在 1 Hz 下, 在 0.001 到 10 Pa 的应力范围内的振幅扫描实验确定乳液的线性粘弹区(LVR)。正式测定时设定参数如下: 恒定应力 0.01 Pa, 频率扫描范围 0.01~1 Hz。损耗角正切( $\tan\delta$ )由式(4)计算:

$$\tan\delta = \frac{G''}{G'} \quad \text{式 (4)}$$

**1.2.10 乳化性** 参照文献 [24] 的方法稍作修改。取 20  $\mu\text{L}$  乳液加入到 3 mL 0.1% 的 SDS 溶液中充分混匀, 在 500 nm 波长处测定吸光度 A。乳化性(EAI)计算公式如式(5)所示:

$$EAI = 2 \times 2.303 \times \frac{AN}{\rho\varphi \times 10000} \quad \text{式 (5)}$$

式中, EAI 为乳化性, m<sup>2</sup>/g; N 为稀释倍数(150);  $\rho$  为乳液形成前蛋白质水溶液中蛋白质质量浓度, g/mL;  $\varphi$  为乳化液中油相体积分数, %; A 为 0 min 时的吸光度。

### 1.2.11 乳液稳定性

**1.2.11.1 储藏稳定性** 将制备的乳液于 25 °C 密封储藏 30 d, 在第 0、7、15、30 d 取样, 测乳液的平均粒径、 $\zeta$ -电位。用式(6)计算  $\Delta_{30-0}$ :

$$\Delta_{30-0} (\%) = \frac{D_1 - D_2}{D_2} \times 100 \quad \text{式 (6)}$$

式中:  $D_1$  为第 30 d 的粒径;  $D_2$  为第 0 d 的粒径。

**1.2.11.2 耐酸稳定性** 考虑在饮料中的应用, 参照文献 [25] 的方法稍作修改。将 1.2.2 中制备的乳液调节至 pH 为 5.0, 静置 2 h 后测定乳液的  $\zeta$  电位和粒径。

**1.2.11.3 盐离子浓度稳定性** 参照文献 [25] 的方法稍作修改。向 1.2.2 中制备的乳液中添加 0.1 mol/L NaCl, 静置 2 h 后测定乳液的  $\zeta$  电位和粒径。

## 1.3 数据处理

所有的实验进行 3 次试验取平均值, 利用 SPSS Statistics 22 软件对数据进行 ANOVA 差异显著性分析,  $P<0.05$  为显著性差异。采用 Origin9.1 软件、OMNIC 软件包等进行数据分析、图表处理及图谱分析处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 IOF 对 SOP 乳液粒径和 $\zeta$ -电位的影响

IOF 浓度对 SOP 乳液粒径和  $\zeta$ -电位的影响见表 1。

表 1 IOF 浓度对 SOP 乳液粒径和  $\zeta$ -电位的影响

Table 1 The effect of IOF concentration on the particle size and  $\zeta$ -potential of SOP emulsion

IOF 浓度(wt%)	$\zeta$ -电位(mV)	乳液平均粒径(μm)
0	-35.2±0.3 <sup>e</sup>	4.81±0.19 <sup>e</sup>
0.25	-40.2±0.2 <sup>d</sup>	6.34±0.21 <sup>d</sup>
0.50	-42.0±0.2 <sup>c</sup>	13.98±0.45 <sup>c</sup>
0.75	-43.3±0.3 <sup>b</sup>	18.49±0.72 <sup>b</sup>
1.00	-43.9±0.2 <sup>a</sup>	26.09±0.82 <sup>a</sup>

注: 同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ), 表 2、表 3 同。

由表 1 可知, 未添加 IOF 的 SOP 乳液粒径最小为 4.81  $\mu\text{m}$ ,  $\zeta$ -电位为 -35.2 mV, 表明了未添加 IOF 的乳液液滴带负电荷, 具有一定的静电排斥力维持乳液稳定。随着 IOF 的添加量的增大, SOP 乳液的平均粒径和  $\zeta$ -电位绝对值呈现逐渐升高的趋势。这表

明 IOF 对 SOP 乳液的电位和粒径均具有显著影响 ( $P<0.05$ )。这是因为 IOF 能够和 SOP 中带正电荷的区域发生静电吸引进而通过分子间相互作用形成大粒径的复合物, 导致其乳液粒径增加; 同时 IOF 带有的-COO<sup>-</sup>阴离子可以和 SOP 分子上的正电基团通过疏水作用或者氢键作用结合, 促使形成的乳液界面膜的带电荷数量增加, 导致其乳液电位的降低。而且 IOF 含量的升高也会导致存在于连续相中未吸附的纤维分子增多, 形成相互交联的带电块状物质, 引起乳液粒径的升高和  $\zeta$ -电位的降低<sup>[26-27]</sup>。周海媚<sup>[28]</sup>的研究表明适当浓度的不溶性膳食纤维可以促使乳滴液滴表面形成更为致密和厚度的界面膜, 引起乳滴粒径的增大和  $\zeta$ -电位的降低。但当 IOF 的添加浓度超过 0.25 wt% 后, 乳液粒径显著上升( $P<0.05$ )。这可能是 IOF 添加量过高导致部分 IOF 无法与 SOP 充分结合, 引起排空效应和消耗絮凝作用, 导致乳液形成聚集和解体, 并且过多的 IOF 也会阻碍均质过程中蛋白和油滴分子的移动和在油水界面处的舒张吸附, 降低均质效率, 从而导致乳滴粒径变大<sup>[29]</sup>。

## 2.2 IOF 对 SOP 乳液微观结构的影响

IOF 浓度对 SOP 乳液微观结构的影响见图 1。

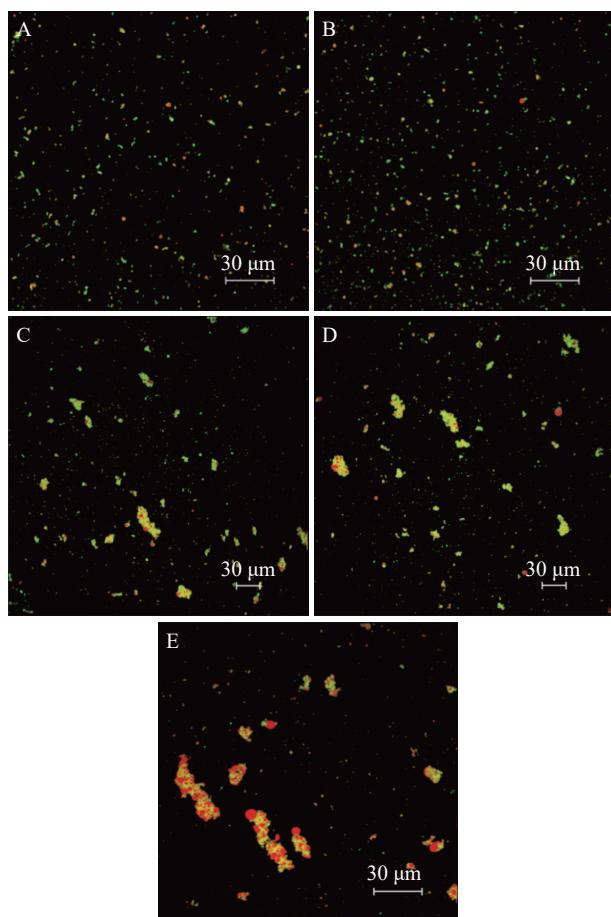


图 1 IOF 对 SOP 乳液微观结构的影响

Fig.1 The effect of IOF concentration on the microstructure of SOP emulsion

注: IOF 添加量: A: 0; B: 0.25 wt%; C: 0.50 wt%; D: 0.75 wt%; E: 1.00 wt%。

激光共聚焦(CLSM)图像中红色荧光代表油滴, 绿色荧光代表蛋白质。由图 1 可知, 未添加 IOF 的 SOP 乳液颗粒分布均匀, 蛋白可均匀的包裹在油脂表面形成均匀的乳液。当 IOF 添加量为 0.25 wt% 时, SOP 乳液的液滴粒径变大, 且蛋白界面膜变厚。这表明低浓度的 IOF 添加可以促进 IOF 和 SOP 共同在油滴界面形成致密的包裹层, 界面膜的厚度升高, 增强了液滴间的空间位阻斥力, 进而改善 SOP 蛋白乳化特性和阻碍液滴间的聚合<sup>[30]</sup>。但是随着 IOF 添加量的升高, 乳液液滴出现明显的聚集现象, 且 IOF 添加量越高, 聚集现象越明显, 这可能是由于存在于连续相中未被界面吸附的 IOF 分子间发生相互交联诱导而导致的絮凝现象<sup>[26]</sup>。向飞等<sup>[31]</sup>的研究表明随着魔芋葡甘聚糖添加量增加, 分子链间的凝聚缠结的强度与密度不断加强, 形成非常紧密的局部网络状的结构, 导致分子形成较大的聚集态。研究表明, 高分子聚合物也会导致乳液体系发生排空效应诱导聚集现象<sup>[32]</sup>。当在乳液体系中能和蛋白有效结合插入油脂内部的 IOF 浓度达到饱和后, 继续增大溶液体系的 IOF 浓度, 会导致界面和溶液体系间的 IOF 总体浓度存在差异产生渗透差压力。当渗透差压力大于乳滴间的斥力时就会发生乳滴絮凝和聚集现象。

## 2.3 界面张力

IOF 浓度对 SOP 乳液界面张力的影响见图 2。

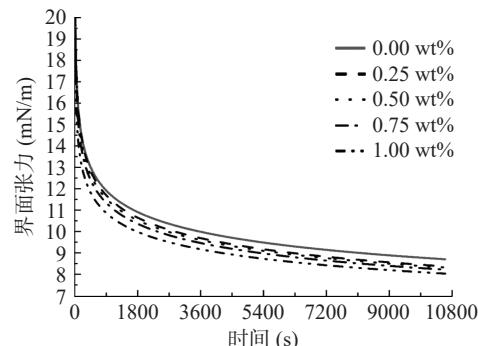


图 2 IOF 浓度对 SOP 乳液界面张力的影响

Fig.2 The effect of different concentrations of IOF on the interfacial tension of SOP emulsion

界面张力是表征油水界面中表面活性物质吸附和解析动力学性质的重要指标。由图 2 所示, 同一时间, IOF 浓度越高的乳液, 界面张力越低; 所有乳液的界面张力均随着吸附时间的延长呈现逐渐降低的趋势, 且在吸附初期(0~900 s)界面张力急剧下降, 随后下降速度逐渐趋于平缓; 低浓度(0.25~0.75 wt%) IOF 的复合乳液的界面张力整体变化趋势较为接近, 但随着吸附时间的增加, 含有 1.00 wt% IOF 的复合乳液的界面张力也逐渐接近添加了低浓度 IOF 的复合乳液。乳液界面形成一般都经历蛋白质逐步扩散至油滴表面构成次级界面区域, 然后到达次级界面区域的蛋白分子发生部分柔性化结构展开导致界面张力下降, 最后吸附在界面层的蛋白质分子发生结构重排的过程, 因此界面流动性质的变化极大程度的影响

乳液稳定性和乳化过程。动态界面张力是由缓冲液的界面张力减去蛋白的界面张力进行表示的,随着吸附时间的延长,界面张力逐渐减小,表明蛋白质逐渐吸附到油水界面。佟臻等<sup>[27]</sup>的研究表明膳食纤维添加量的适度升高,会导致乳液界面张力下降的速率逐渐升高,从而影响乳液的界面吸附速率。研究表明,乳液界面吸附特性受蛋白表面疏水性和粒径大小的影响,而 IOF 会和 SOP 相互结合会降低界面的吸附能,吸引更多分子在界面上,并且明显提高 IOF 和 SOP 复合体系的表面疏水性,进而加速蛋白质对油水界面的吸附,导致界面张力下降趋势加剧<sup>[33]</sup>;而 IOF 添加量会显著提高粒径大小,大粒径的 IOF 和 SOP 产生的空间位阻会在一定程度上降低疏水性提高导致的吸附速率的增加。因此,低浓度(0.25~0.75 wt%)IOF 的复合乳液的界面张力整体变化趋势较为接近。

#### 2.4 界面蛋白含量 ( $P_A$ ) 和浓度 ( $\Gamma$ )

IOF 浓度对 SOP 乳液界面蛋白含量和浓度的影响见表 2。

表 2 IOF 浓度对 SOP 乳液界面蛋白含量和浓度的影响  
Table 2 The effect of IOF concentration on the protein content and concentration of SOP emulsion interface

IOF浓度(wt%)	界面蛋白含量( $P_A$ , %)	界面蛋白浓度( $\Gamma$ , mg/m <sup>2</sup> )
0	34.211±0.106 <sup>d</sup>	0.127±0.002 <sup>c</sup>
0.25	38.153±0.062 <sup>c</sup>	0.131±0.003 <sup>c</sup>
0.50	41.785±0.099 <sup>b</sup>	0.169±0.003 <sup>a</sup>
0.75	42.062±0.150 <sup>b</sup>	0.174±0.004 <sup>a</sup>
1.00	46.566±0.271 <sup>a</sup>	0.151±0.009 <sup>b</sup>

界面蛋白含量( $P_A$ )是指吸附到乳滴表面上蛋白质含量和连续相蛋白质含量的百分比,而界面蛋白浓度( $\Gamma$ )表示乳滴表面单位面积上的蛋白质含量。乳液的乳化过程中,界面蛋白质会迅速从连续相吸附到新形成的小油滴表面上,阻止油滴间重新聚结,保持乳液稳定。界面蛋白质含量( $P_A$ )和界面蛋白质浓度( $\Gamma$ )是表征乳液稳定性的重要指标。由表 2 可知,随着 IOF 浓度的升高,界面蛋白含量呈现升高趋势,界面蛋白浓度呈现先升高后降低的趋势。在乳液体系中,IOF 和 SOP 经过高压均质机混合均质的瞬间,IOF 和 SOP 之间的热力学不兼容性会促进 SOP 在油水界面上的吸附厚度甚至形成多层界面膜的结构,且随着 IOF 的添加 SOP 和 IOF 间的相互作用力逐渐增强,促进了蛋白质在液滴表面的吸附<sup>[34]</sup>,因此,随着 IOF 浓度的升高,界面蛋白含量逐渐增加。当 IOF 浓度由 0 升高至 0.25 wt% 时,界面蛋白含量显著升高( $P<0.05$ ),界面蛋白浓度却差异不显著( $P>0.05$ )。界面蛋白浓度与界面蛋白含量和乳液比表面积的比值呈正相关,随着 IOF 浓度的升高,界面蛋白含量增大,并且粒径和激光共聚焦的结果表明,乳液的比表面积也逐渐增大,因此两者的比值变化不显著,从而导致界面蛋白浓度呈现不显著的升高趋势<sup>[33]</sup>。而当 IOF 的浓度由 0.50 wt% 升高至 0.75 wt% 时,界面蛋白

含量和界面蛋白浓度均差异不显著( $P>0.05$ ),继续升高至 1.00% 时,界面蛋白含量显著升高但界面蛋白浓度却呈现显著下降趋势( $P<0.05$ )。这可能是因为 IOF 浓度由 0.50 wt% 升高至 0.75 wt% 时,界面蛋白竞争吸附行为达到动态平衡。但继续升高 IOF 浓度会引起乳液体系中生成较大结构和粒径的絮凝乳滴且该乳滴在稀释过程中不被破坏<sup>[25]</sup>。而比表面仪测定乳滴的比表面积是基于将絮凝体假设作为球形颗粒得到的理论比表面积,而不是绝对真实的比表面积。在此前提下,随着 IOF 浓度升高,絮凝结构体越大,所得的理论比表面积逐渐升高,因此得到的界面蛋白浓度呈现下降趋势。

#### 2.5 流变特性

IOF 浓度对 SOP 乳液表观粘度随剪切速率的变化见图 3。IOF 浓度对 SOP 乳液流动行为的影响见表 3。

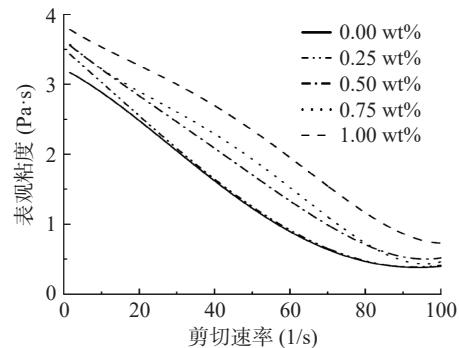


图 3 IOF 浓度对 SOP/IOF 复合乳液的表观粘度的影响  
Fig.3 The effect of different concentrations of IOF on the apparent viscosity of SOP/IOF composite emulsion

表 3 IOF 浓度对 SOP/IOF 复合乳液的流动行为的影响  
Table 3 The effect of different concentrations of IOF on the flow behavior of SOP/IOF composite emulsion

IOF浓度(wt%)	初始表观黏度(Pa·s)	稠度指数(Pa·sn)	流动行为指数	R <sup>2</sup>
0	3.681±0.940 <sup>d</sup>	2.734±0.619 <sup>c</sup>	0.9784±0.0163 <sup>a</sup>	0.9989
0.25	4.033±0.974 <sup>d</sup>	2.885±0.794 <sup>c</sup>	0.9715±0.0311 <sup>a</sup>	0.9996
0.50	9.917±1.048 <sup>c</sup>	4.967±1.538 <sup>bc</sup>	0.8515±0.0702 <sup>b</sup>	0.9993
0.75	16.004±1.411 <sup>b</sup>	10.154±3.192 <sup>b</sup>	0.8374±0.0386 <sup>b</sup>	0.9975
1.00	30.405±3.827 <sup>a</sup>	37.848±7.166 <sup>a</sup>	0.5635±0.0794 <sup>c</sup>	0.9967

由图 3 可知,在剪切速率范围(0.001~100 s<sup>-1</sup>)内,所有样品的表观粘度均随剪切速率的增大而减小,并呈现剪切稀化行为;在同一剪切速率下,SOP/IOF 复合乳液的表观粘度随着 IOF 浓度的增加而升高,但 IOF 含量为 0.25 wt% 的复合乳液的表观粘度与 SOP 乳液极为接近。乳液所呈现出的剪切变稀行为的原因可能是乳液界面中的蛋白质分子之间发生相互吸引所形成的网状结构所造成的<sup>[35]</sup>。对表观粘度曲线进行 Herschel-Bulkley 模型拟合,表征乳液的流变参数(初始表观黏度,稠度指数,流动行为指数)与 IOF 添加量之间的关系。由表 3 可知,拟合后方程 R<sup>2</sup> 均大于 0.99,证明模型选取正确,可用于后续

分析。随 IOF 添加量的增加, 初始表观黏度( $\tau_0$ )和稠度指数(K)均呈现升高趋势。这表明 IOF 参与了蛋白形成空间屏障结构, 进而影响乳液的流变特性。随 IOF 添加量的增加, 流动行为指数(n)则均小于1且呈现降低的趋势。这表明随着 IOF 浓度的增加, 乳液的剪切稀化程度加剧。龙肇<sup>[36]</sup>研究表明, IOF 可以通过参与乳液的界面组分重组构建三维网状结构。当低浓度的 IOF 添入到乳液制备体系中, IOF 会通过交互作用和 SOP 发生交联反应, 进而增加界面膜上的 SOP 和 IOF 的含量, 形成更为紧密的三维网状结构和界面膜结构, 从而导致表观粘度的升高, 但因低浓度的 IOF 并不会引起乳液液滴发生絮凝现象, 对乳液的流动限制性小, 升高速率较慢。随着 IOF 的添加量逐渐升高, 乳液液滴出现絮凝现象, 生成较大的絮凝液滴和出现聚集现象, 剪切稀化程度加剧, 而较大的乳液液滴则需要更大的外界剪切应力才能发生剪切流变行为, 导致表观粘度升高速率明显增加。

## 2.6 粘弹性

IOF 浓度对 SOP 乳液粘弹性的影响见图 4、图 5 和图 6。

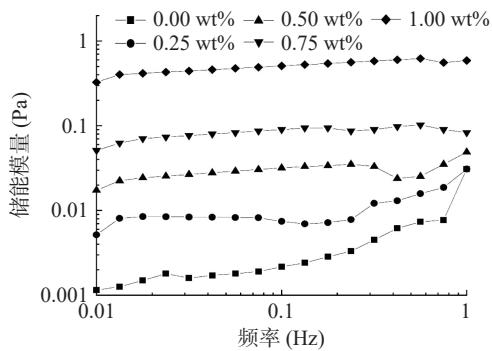


Fig.4 The effect of different concentrations of IOF on the storage modulus of SOP/IOF composite emulsion

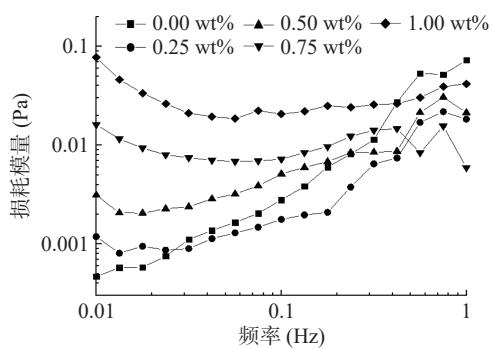


Fig.5 The effect of different concentrations of IOF on the loss modulus of SOP/IOF composite emulsion

当物体发生形变时, 其内部会产生一定的应力, 这种力可以作为衡量样品弹性的指标, 称为储能模量或弹性模量( $G'$ ), 而物体内部损失的一部分力可以衡量样品的粘性, 称为损耗模量或粘性模量( $G''$ )<sup>[37]</sup>。 $G''$  和  $G'$  的比值称为损耗角正切( $\tan\delta$ ), 可以表明样品

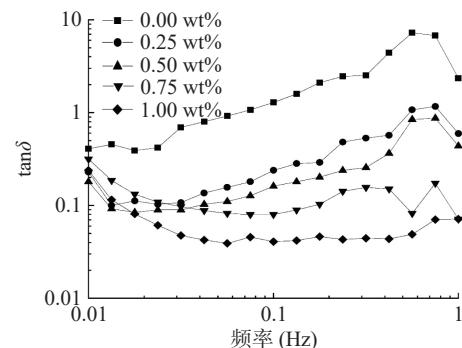


Fig.6 The effect of different concentrations of IOF on the loss tangent of SOP/IOF composite emulsion

的黏弹性<sup>[38]</sup>。图 4、图 5 和图 6 分别展示了不同 IOF 浓度下各个复合乳液的  $G'$ 、 $G''$  以及  $\tan\delta$  的频率扫描结果。

由图 4 可知,  $G'$  整体基本呈现随频率的增大而增大的趋势, 且在同一频率时, IOF 添加量越大的复合乳液的  $G'$  值越高。从图 6 中可以看出, 添加 0~0.25 wt% IOF 的乳液,  $\tan\delta$  有超过 1 的情况且基本上随着频率的增加而增加; 添加 0.50~1.00 wt% IOF 的乳液,  $\tan\delta$  虽然随频率的增加基本也呈现上升趋势, 但是  $\tan\delta$  一直小于 1; 而添加 0.50~1.00 wt% IOF 的乳液,  $\tan\delta$  则一直小于 1 且随频率的增加略有下降。这是因为未被吸收的 IOF 在连续相中形成凝胶状结构, IOF 可以促进乳液的弹性结构<sup>[39]</sup>。当  $\tan\delta$  出现超过 1 的情况, 则说明  $G'$  和  $G''$  之间存在一个交叉点, 证明了乳液中纠缠网络的形成<sup>[40]</sup>。当  $\tan\delta$  一直小于 1, 则说明乳液中的弹性行为占主导地位, 可将其归类为弱凝胶行为。这种明显的粘弹性行为可能是由于絮凝液滴和凝胶状网络的形成而导致的<sup>[41]</sup>。

## 2.7 乳化性

EAI 表示蛋白质在油水混合过程中吸附在油滴界面降低其界面张力, 起到乳化作用的性质, 它主要是由蛋白质分子链内部分布的亲水或疏水基团所决定的<sup>[42]</sup>。图 7 为添加不同浓度的 IOF 后的 SOP/IOF 复合乳液(pH7)的乳化性。

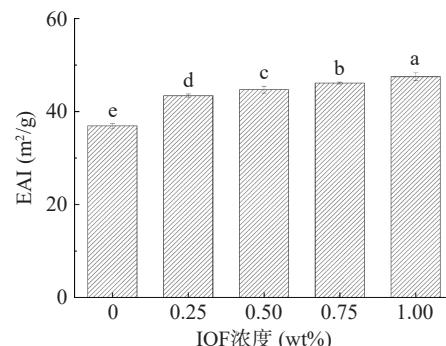


Fig.7 The effect of different concentrations of IOF on emulsifying activity of SOP/IOF composite emulsion

注: 不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

如图 7 所示, 随着 IOF 添加量的增加, EAI 呈现

显著增高的趋势( $P<0.05$ )。当乳液中不含 IOF 时, EAI 最低( $36.9 \text{ m}^2/\text{g}$ )。加入 0.25 wt% 的 IOF 后, EAI 有大幅度的升高( $43.4 \text{ m}^2/\text{g}$ ), 之后 EAI 随着 IOF 添加量的增加而缓慢上升到最大值( $47.5 \text{ m}^2/\text{g}$ )。这可能是因为 IOF 中含有丰富的亲水链, SOP 与 IOF 形成的复合物分子中也会含有亲水链, 进而影响了复合乳液的 EAI<sup>[24]</sup>。之后由于 IOF 添加量的增加导致了复合乳液的粒径因 SOP/IOF 复合分子的形成以及絮凝作用而增加, 从而导致 EAI 增长的速率放缓。

## 2.8 储存稳定性

IOF 浓度对 SOP 乳液储藏稳定性的影响见表 4。

表 4 IOF 浓度对 SOP 乳液储藏稳定性的影响

Table 4 The effect of IOF concentration on the storage stability of SOP emulsion

IOF浓度 (wt%)	乳液平均粒径(μm)				
	0 d	7 d	15 d	30 d	$\Delta_{30-0}(\%)$
0	4.81±0.19 <sup>Ed</sup>	5.96±0.04 <sup>Ec</sup>	8.13±0.04 <sup>Eb</sup>	11.49±0.15 <sup>Ea</sup>	138.82
0.25	6.34±0.21 <sup>Dd</sup>	9.51±0.18 <sup>Dc</sup>	11.08±0.19 <sup>Db</sup>	12.64±0.11 <sup>Da</sup>	99.37
0.50	13.98±0.45 <sup>Cd</sup>	15.71±0.63 <sup>Cc</sup>	18.69±0.52 <sup>Cb</sup>	22.09±0.46 <sup>Ca</sup>	58.03
0.75	18.49±0.72 <sup>Bd</sup>	19.3±0.31 <sup>Bc</sup>	21.74±0.44 <sup>Bb</sup>	23.38±0.35 <sup>Ba</sup>	26.43
1.00	26.09±0.82 <sup>Ad</sup>	26.49±0.39 <sup>Ac</sup>	26.90±0.06 <sup>Ab</sup>	28.58±0.27 <sup>Aa</sup>	9.56

注:同列不同大写字母表示有显著性( $P<0.05$ );同行不同小写字母表示有显著性( $P<0.05$ )。

由表 4 可知, 随着乳液储藏时间的延长, 乳液的平均粒径均呈现逐渐增大的趋势。这表明在乳液储藏过程中会发生界面蛋白质的重排和油滴间的相互聚集导致乳液粒径升高。随着 IOF 的添加量升高, 乳液  $\Delta_{30-0}$  的值逐渐降低, 表明添加 IOF 可以明显提高 SOP 乳液的稳定性。卢薇等<sup>[43]</sup>的研究表明低浓度 IOF 的添加量可以通过促进和 SOP 发生交联反应形成较厚的界面膜结构和弱凝胶网状结构, 明显提升乳液的分子间斥力、粘弹性和弱凝胶行为, 进而提升乳液的储藏稳定性。而高浓度的 IOF 会导致  $\Delta_{30-0}$  变化较小的原因可能在于高浓度 IOF 会导致乳液已经出现了严重的絮凝结构和聚集现象, 而粒径越大的粒子需要更大的解析能才能促使蛋白脱离界面, 同时高浓度 IOF 会引起乳液粘性能力的增大, 从而增强了乳液的聚结稳定性和导致后期粒径变化较小<sup>[44]</sup>。这和 IOF 浓度对 SOP/IOF 复合乳液流变性能的影响结果相一致。这表明在长期贮存过程中, 适当添加一定浓度的 IOF 能有效提高复合乳液的稳定性。

## 2.9 耐酸稳定性及耐盐稳定性

IOF 浓度对 SOP 乳液耐酸稳定性及耐盐稳定性的影响见表 5。

由表 5 可知, 乳液的 pH 由中性转为酸性时,  $\zeta$  电位和粒径大小显著升高( $P<0.05$ ), 但随着 IOF 添加量的升高, SOP 乳液的粒径增加速度显著放缓( $P<0.05$ ), 这表明酸性环境对乳液稳定性具有负面影响。陈冬等<sup>[45]</sup>的研究表明不溶性膳食纤维的添加可以有效增强乳液的耐酸稳定性, 这是因为随着 pH 逐渐接近蛋白质的等电点,  $\zeta$  电位升高, 乳液液滴间的静电斥力降低, 促进了乳液中粒子的聚集, 发生了絮凝聚集。而 IOF 的-COO<sup>-</sup>阴离子与 SOP 分子上的正电基团相结合并增强 SOP 乳液液滴的带电荷数量, 有助于在连续相中形成更为紧密的三维凝胶网状结构和界面膜, 从而增加乳滴间的静电斥力和空间斥力, 增强了 SOP 乳液的耐酸稳定性。

同时可以看到, 加入盐离子后乳液的  $\zeta$  电位显著升高( $P<0.05$ ), 粒径却没有大幅度的增加。而且添加了 NaCl 的乳液  $\zeta$  电位并没有随着 IOF 添加量的增加而下降, 反而在小幅度增加后保持稳定。这可能是由于 SOP 乳液中盐离子的存在导致乳液液滴表面吸附了大量的 Na<sup>+</sup>, 这会导致 SOP 和 IOF 表面产生电荷屏蔽作用, 导致 IOF 和 SOP 之间的分子间结合能力变弱, 使得  $\zeta$  电位值上升且基本不受 IOF 浓度影响<sup>[46]</sup>。而随着  $\zeta$  电位的升高, 乳液液滴间的静电斥力降低, 所以粒径均有所上升。

## 3 结论

利用动态光散射和激光共聚焦显微镜从宏观角度评价 IOF 添加量对 SOP 乳液粒径大小及乳滴分布的影响。添加 IOF 后, SOP 乳液粒径增大, 葵花籽油能够被包埋且均匀分布在乳液体系中(IOF 添加量为 0.25 wt%), 这与乳化性的变化规律相一致。采用  $\zeta$  电位分析、稳定性分析等方法从不同角度评价了乳液的稳定性。IOF 添加量为 1.00 wt% 时可以大幅度增强乳液的长期储存稳定性(>15 d)、耐酸稳定性以及耐盐稳定性。通过对乳液的界面性质及流变特性的研究可知, IOF 添加量为 1.00 wt% 时可以有效提升乳液的弹性。结合其能够大幅度增强乳液的稳定性这一性质, 可为 SOP 和 IOF 在蛋白乳液凝胶体系中的应用提供了理论基础, 拓宽其作为食品添加剂的应用范围。

表 5 不同 IOF 浓度下 pH 和盐离子对 SOP 乳液的  $\zeta$ -电位和平均粒径的影响

Table 5 The effect of pH and salt ions on the  $\zeta$ -potential and average particle size of SOP emulsion under IOF concentration

IOF浓度 (wt%)	乳液电位(mV)			乳液平均粒径(μm)		
	pH=7	pH=5	pH=7+0.1 mol/L NaCl	pH=7	pH=5	pH=7+0.1 mol/L NaCl
0	-35.2±0.3 <sup>eA</sup>	-23.9±0.3 <sup>eC</sup>	-30.7±0.2 <sup>aB</sup>	4.81±0.19 <sup>eE</sup>	17.62±0.24 <sup>dD</sup>	5.02±0.45 <sup>eE</sup>
0.25	-40.2±0.2 <sup>dA</sup>	-24.8±0.1 <sup>dC</sup>	-29.3±0.6 <sup>bB</sup>	6.34±0.21 <sup>gE</sup>	21.93±0.13 <sup>dD</sup>	6.62±0.53 <sup>dE</sup>
0.5	-42.0±0.2 <sup>cA</sup>	-26.0±0.5 <sup>cD</sup>	-29.0±0.4 <sup>bB</sup>	13.98±0.45 <sup>gF</sup>	27.34±0.51 <sup>bC</sup>	15.27±0.75 <sup>cE</sup>
0.75	-43.3±0.3 <sup>bA</sup>	-27.1±0.1 <sup>bD</sup>	-28.5±0.3 <sup>bC</sup>	18.49±0.72 <sup>gF</sup>	32.84±0.50 <sup>aB</sup>	19.84±0.18 <sup>bE</sup>
1	-43.9±0.2 <sup>aA</sup>	-28.3±0.4 <sup>aC</sup>	-28.9±0.4 <sup>bC</sup>	26.09±0.82 <sup>dD</sup>	33.28±0.22 <sup>aB</sup>	28.41±0.36 <sup>aC</sup>

注:同行不同大写字母表示有显著性( $P<0.05$ );同列不同小写字母表示有显著性( $P<0.05$ )。

## 参考文献

- [1] 孙英杰. 超声波处理对大豆分离蛋白结构和功能性质影响研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014. [SUN Y J. Effect of ultrasonic treatment on structure and functional properties of soybean protein isolate[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014.]
- [2] 徐赏, 华欲飞, 张彩猛. 豆渣蛋白的制备及其性质研究[J]. 中国油脂, 2013, 38(2): 36–39. [XU S, HUA Y F, ZHANG C M. Preparation and properties of soybean residue protein[J]. Chinese Oil, 2013, 38(2): 36–39.]
- [3] LI B, QIAO M Y, LU F. Composition, nutrition, and utilization of Okara (soybean residue)[J]. *Food Reviews International*, 2012, 28(3): 231–252.
- [4] 王鹏, 李贵全. 不同大豆品种农艺与质量性状的灰色关联度分析[J]. 山西农业科学, 2012, 40(12): 1243–1246. [WANG P, LI G Q. Grey correlation analysis of agronomic and quality traits of different soybean lines[J]. Shanxi Agricultural Science, 2012, 40(12): 1243–1246.]
- [5] 祝团结, 郑为完. 大豆豆渣的研究开发现状与展望[J]. 食品研究与开发, 2004, 25(4): 25–28, 39. [ZHU T J, ZHENG W W. Research and development status and prospect of soybean residue [J]. Food Research and Development, 2004, 25(4): 25–28, 39.]
- [6] 徐赏. 大豆分离蛋白副产物中豆渣蛋白的组分分析及回收[D]. 无锡: 江南大学, 2013. [XU S. Component analysis and recovery of soybean residue protein in by-product of soybean protein isolate[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.]
- [7] 李杨, 吴长玲, 马春芳, 等. 低温超微粉碎对豆渣膳食纤维结构及功能特性影响[J]. 食品工业, 2019, 40(2): 160–164. [LI Y, WU C L, MA C F, et al. Effects of low temperature ultrafine comminution on the structure and functional properties of dietary fiber from soybean dregs[J]. Food Industry, 2019, 40(2): 160–164.]
- [8] 涂宗财, 段邓乐, 王辉, 等. 豆渣膳食纤维的结构表征及其抗氧化性研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(6): 22–26. [TU Z C, DUAN D L, WANG H, et al. Study on structure characterization and antioxidant activity of soybean residue dietary fiber[J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2015, 30(6): 22–26.]
- [9] 王喜波, 王健, 张泽宇, 等. 物理改性对大豆蛋白柔性和乳化性的影响及其相关性分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 339–344. [WANG X B, WANG J, ZHANG Z Y, et al. Effect of physical modification on flexibility and emulsification of soybean protein and its correlation analysis[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 339–344.]
- [10] MANASSERO C A, DAVID B E, VAUDAGNA S R, et al. Calcium addition, pH, and high hydrostatic pressure effects on soybean protein isolates—Part 1: Colloidal stability improvement[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2018, 11: 1125–1138.
- [11] 郭荣佳. 酶解对大豆蛋白结构功能性影响及高乳化起泡性蛋白制备[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014. [GUO R J. Effect of enzymatic hydrolysis on structure and function of soybean protein and preparation of highly emulsified foaming protein[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014.]
- [12] 李伟伟. 高乳化性大豆蛋白的制备及其界面流变性质的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [LI W W. Preparation and interfacial rheological properties of highly emulsified soybean protein[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]
- [13] 邓若璇. 纳米纤维素作为乳化、稳定剂和膳食纤维的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [DENG R X. Application of nano cellulose as emulsification, stabilizer and dietary fiber[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]
- [14] DICKINSON E. Interfacial structure and stability of food emulsions as affected by protein-polysaccharide interactions[J]. *Soft Matter*, 2008, 4(5): 932–942.
- [15] 章定奎. 膳食纤维对蛋白包裹型乳液油脂消化的影响及其机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. [TAN D K. Effects of dietary fiber on the digestion of protein encapsulated emulsion and its mechanism[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.]
- [16] 陈亚非, 赵谋明. 水溶性与水不溶性膳食纤维对油脂、胆固醇和胆酸钠吸附作用研究[J]. 现代食品科技, 2005, 21(3): 58–60. [CHEN Y F, ZHAO M M. Study on the adsorption of oil, cholesterol and sodium cholate by water-soluble and water-insoluble dietary fiber[J]. Modern Food Technology, 2005, 21(3): 58–60.]
- [17] 范宏亮. 微波、超声波提取工艺对大豆种皮多糖乳化性质影响及多糖工厂设计[D]. 锦州: 渤海大学, 2019. [FAN H L. Effect of microwave and ultrasonic extraction process on emulsifying properties of soybean seed coat polysaccharide and polysaccharide factory design[D]. Jinzhou: Bohai University, 2019.]
- [18] CHEN B, CAI Y, LIU T, et al. Improvements in physico-chemical and emulsifying properties of insoluble soybean fiber by physical-chemical treatments[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93(8): 167–175.
- [19] RODRÍGUEZ S D, VON S M, PILOSOF A M R. Green tea polyphenols-whey proteins nanoparticles: Bulk, interfacial and foaming behavior[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 50: 108–115.
- [20] LI Y, WU C L, LIU J, et al. Soy protein isolate-phosphatidyl-choline nanoemulsions prepared using high-pressure homogenization[J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(5): 307.
- [21] 王喜波, 于洁, 王小丹, 等. 基于美拉德反应的酶改性大豆蛋白冻融稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 361–367. [WANG X B, YU J, WANG X D, et al. Study on freeze-thaw stability of enzyme modified soybean protein based on Maillard reaction[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 361–367.]
- [22] PUPPO C, BEAUMAL, F. SPERONI, et al.  $\beta$ -Conglycinin and glycinin soybean protein emulsions treated by combined temperature-high-pressure treatment[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25: 389–397.
- [23] LOWRY O H, ROSEBROUGH N J, FARR A L, et al. Protein measurement with the folin phenol reagent[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1951, 193(1): 265–275.
- [24] 李良, 张小影, 朱建宇, 等. 大豆-乳清混合蛋白对 O/W 乳液稳定性及流变性的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 372–379. [LI L, ZHANG X Y, ZHU J Y, et al. Effect of soybean whey mixed protein on stability and rheological properties of O/W emulsion[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 372–379.]
- [25] 江连洲, 蔡玉曼, 马春芳, 等. 鱼油纳米乳液运载体系构建与稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 394–402. [JIANG L Z, QI Y M, MA C F. Construction and stability of fish oil nano emulsion delivery system[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 394–402.]

- [ 26 ] 迟玉杰, 张好凯, 迟媛, 等. 高压均质协同高酰基结冷胶对青椒蛋液流变特性及稳定性的影响 [J]. 食品科学, 2019, 40(9): 91–98. [ CHI Y J, ZHANG H K, CHI Y, et al. Effects of high pressure homogenization and high acyl gellan gum on rheological properties and stability of green pepper egg and vegetable liquid [J]. Food Science, 2019, 40(9): 91–98. ]
- [ 27 ] 佟臻, 韦阳, 高彦祥. 基于食品级胶体颗粒稳定 Pickering 乳液的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2019, 40(4): 317–324.
- [ TONG Z, WEI Y, GAO Y X. Research progress of Pickering emulsion stabilized by food grade colloidal particles [J]. Food Industry Technology, 2019, 40(4): 317–324. ]
- [ 28 ] 周海媚. 大豆纤维改性粒子制备及其 Pickering 乳液特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017. [ ZHOU H M. Preparation of soybean fiber modified particles and properties of Pickering emulsion [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017. ]
- [ 29 ] 孙领鸽, 王丹丹, 毛晓英, 等. 丙烯醛氧化修饰对核桃蛋白结构和乳化特性的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(20): 43–48. [ SUN L G, WANG D D, MAO X Y, et al. Influence of oxidative modification with acrolein on structural and emulsifying properties of walnut protein [J]. Food Science, 2018, 39(20): 43–48. ]
- [ 30 ] 李霞. 不同结构纳米纤维素稳定 Pickering 乳液的作用机制与应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019. [ LI X. Study on the mechanism and application of nano emulsion stabilized pickering emulsion with different structures [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. ]
- [ 31 ] 向飞, 吴考, 肖满, 等. 魔芋葡甘聚糖基可食膜的成膜机理研究进展 [J]. 食品工业科技, 2020, 41(5): 340–347, 353. [ XIANG F, WU K, XIAO M, et al. Research progress on film forming mechanism of konjac glucomannan based edible film [J]. Food Industry Technology, 2020, 41(5): 340–347, 353. ]
- [ 32 ] 金伟平. 魔芋葡甘聚糖/明胶/多酚互作行为及微纳组装机制的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2016. [ JIN W P. Study on interaction behavior and micro nano assembly mechanism of konjac glucomannan/gelatin/polyphenol [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. ]
- [ 33 ] 王金梅. 大豆蛋白热聚集行为及界面、乳化性质研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012. [ WANG J M. Study on thermal aggregation behavior, interfacial and emulsifying properties of soybean protein [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. ]
- [ 34 ] LIU L, ZHAO Q, LIU T, et al. Sodium caseinate/carboxymethylcellulose interactions at oil-water interface: Relationship to emulsion stability [J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 1822–1829.
- [ 35 ] 陈先鑫. 不同抗氧化剂对蛋白乳液稳定性及油脂体外消化特性影响的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2016. [ CHEN X X. Effects of different antioxidants on stability of protein emulsions and *in vitro* digestibility of oils [D]. Nanchang: Nanchang University, 2016. ]
- [ 36 ] 龙肇. 蛋白质—多糖交互作用对高乳脂乳浊液稳定性的影响及作用机理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014. [ LONG Z. Effect of protein polysaccharide interaction on the stability of high fat emulsion and its mechanism [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. ]
- [ 37 ] 金星, 迟涛, 于鑫欣, 等. 热处理乳清蛋白对凝固型酸乳凝胶质量的影响 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(16): 42–48. [ JIN X, CHI T, YU X X, et al. Effect of heat treated whey protein on the quality of solidified yogurt gel [J]. Food Industry Technology, 2018, 39(16): 42–48. ]
- [ 38 ] 李薇, 郑炯, 陈映衡, 等. 超声波处理对豌豆淀粉糊化、流变及质构特性的影响 [J]. 食品与机械, 2018, 34(5): 32–37. [ LI W, ZHENG J, CHEN Y H, et al. Effects of ultrasonic treatment on gelatinization, rheology and texture properties of pea starch [J]. Food and Machinery, 2018, 34(5): 32–37. ]
- [ 39 ] 宁方建. 花生蛋白富硒特性及其纳米粒子稳定的皮克林乳液研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2019. [ NING F J. Selenium enriched characteristics of peanut protein and stable Pickering emulsion of nanoparticles [D]. Nanchang: Nanchang University, 2019. ]
- [ 40 ] 王启明, 唐瑜婉, 杨雅轩, 等. pH 值对麦醇溶蛋白-槲皮素相互作用及其 Pickering 乳液特性的影响 [J]. 食品科学, 2020, 41(20): 27–34. [ WANG Q M, TANG Y W, YANG Y X, et al. Effects of pH on the interaction between gliadin and quercetin and the properties of Pickering emulsion [J]. Food Science, 2020, 41(20): 27–34. ]
- [ 41 ] PROTONOTARIOU S, EVAGELIOU V, YANNIOTIS S, et al. The influence of different stabilizers and salt addition on the stability of model emulsions containing olive or sesame oil [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(1): 124–132.
- [ 42 ] 汪菁琴. 动态超高压均质对大豆分离蛋白改性的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2007. [ WANG J Q. Study on modification of soybean protein isolate by dynamic ultra-high pressure homogenization [D]. Nanchang: Nanchang University, 2007. ]
- [ 43 ] 卢薇, 黄晓梅, 韦翠兰, 等. 小麦蛋白酶解产物/槲皮素/甜菜碱复合乳液的构建及表征 [J]. 现代食品科技, 2019, 35(11): 193–198. [ LU W, HUANG X M, WEI C L, et al. Construction and characterization of wheat protein hydrolysate/quercetin/beet pectin composite emulsion [J]. Modern Food Technology, 2019, 35(11): 193–198. ]
- [ 44 ] 钟明丽, 齐宝坤, 赵添, 等. 大豆亲脂蛋白-羟丙基甲基纤维素乳液制备及其稳定性 [J]. 食品科学, 2019, 40(18): 41–47.
- [ ZHONG M M, QI B K, ZHAO T, et al. Preparation and stability of soybean lipoprotein hydroxypropyl methyl cellulose emulsion [J]. Food Science, 2019, 40(18): 41–47. ]
- [ 45 ] 陈冬, 张晓阳, 刘尧政, 等. 姜油纳米乳液超声波乳化制备工艺及其稳定性研究 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 250–258.
- [ CHEN D, ZHANG X Y, LIU Y Z, et al. Study on preparation and stability of ginger oil nano emulsion by ultrasonic emulsification [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 250–258. ]
- [ 46 ] 赵玲玲, 张红运, 范宏亮, 等. pH, Na<sup>+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 对大豆种皮果胶类多糖乳化稳定性的影响 [J]. 中国粮油学报, 2019, 34(1): 30–36. [ ZHAO L L, ZHANG H Y, FAN H L, et al. Effects of pH, Na<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> on emulsifying stability of pectin polysaccharides from soybean seed coat [J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2019, 34(1): 30–36. ]