

# NaCl 浓度对米糠不溶性纤维/大豆分离蛋白 高内相乳液稳定性的影响

龙 肇<sup>1</sup> 薛 婧<sup>2</sup> 王芝晓<sup>1</sup> 徐巨才<sup>3</sup> 付湘晋<sup>1</sup>

(1. 中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 临澧县市场监督管理局,  
湖南 常德 415200; 3. 五邑大学药学与食品工程学院, 广东 江门 529020)

**摘要:** [目的] 拓宽米糠不溶性膳食纤维 (rice bran insoluble dietary fiber, RBIDF) 在食品中的应用范围。 [方法] 通过  $\zeta$ -电位、粒径分布、流变特性、直观外貌结构、冻融稳定性等研究了在 pH 2, RBIDF 添加量为 0.20, 0.30 g/100 g 时, NaCl 浓度 (0~100 mmol/L) 对米糠不溶性纤维和大豆分离蛋白共同稳定的高内相乳液稳定性的影响。 [结果] 不同 NaCl 浓度条件下的乳液均具有较强的凝胶网状结构, RBIDF 添加量为 0.20 g/100 g, NaCl 浓度 > 25 mmol/L 时, 随着 NaCl 浓度的增大, 黏弹性行为逐渐增强, 而在 RBIDF 添加量为 0.30 g/100 g 时, 随着 NaCl 浓度的增加, 黏弹性增幅较小。 NaCl 的加入对两个不同 RBIDF 添加量的高内相乳液冻融稳定性均有明显的改善作用, 且在相对高盐浓度 (75, 100 mmol/L) 条件下, 高内相乳液在经过两次冷冻循环后仍保持良好的乳液自支撑状态。 [结论] NaCl 的加入可显著提高米糠不溶性膳食纤维/大豆分离蛋白共混体系高内相乳液的冻融稳定性。

**关键词:** NaCl; 米糠不溶性膳食纤维; 大豆分离蛋白; 高内相乳液; 冻融稳定性

## Effect of NaCl concentration on stability of high internal phase emulsions of insoluble fiber from rice bran/soybean protein isolate

LONG Zhao<sup>1</sup> XUE Jing<sup>2</sup> WANG Zhixiao<sup>1</sup> XU Jucai<sup>3</sup> FU Xiangjin<sup>1</sup>

(1. School of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 2. Linli County Market Supervision and Administration Bureau, Changde, Hunan 415200, China;  
3. School of Pharmacy and Food Engineering, Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529020, China)

**Abstract:** [Objective] This paper aims to broaden the application of insoluble dietary fiber from rice bran (RBIDF) in food. [Methods] The impact of NaCl concentration (ranging from 0 to 100 mmol/L) on the stability of high internal phase emulsions (HIPEs) co-stabilized by RBIDF and soybean protein isolate at pH 2, with RBIDF additions of 0.20 and 0.30 g/100 g, was studied by analyzing  $\zeta$ -potential, particle size distribution, rheological properties, visual appearance, and freeze-thaw stability. [Results] All emulsions under different NaCl concentrations exhibited robust gel-like network structures. When RBIDF was added at 0.20 g/100 g, and NaCl concentration exceeded 25 mmol/L, the viscoelastic behavior gradually intensified with increasing NaCl concentration. Conversely, at an RBIDF addition of 0.30 g/100 g, the increase in viscoelasticity was less pronounced with rising NaCl concentration. The addition of NaCl significantly improved the freeze-thaw stability of the HIPEs with both RBIDF additions. Notably, under relatively high salt conditions of 75 and 100 mmol/L, the HIPEs maintained excellent self-supporting emulsion states even after two freeze-thaw cycles. [Conclusion] The addition of NaCl can significantly enhance the freeze-thaw stability of HIPEs formulated from a blend of RBIDF and soybean protein isolate.

**Keywords:** NaCl; rice bran insoluble dietary fiber; soybean protein isolate; high internal phase emulsion; freeze-thaw stability

据统计<sup>[1]</sup>, 2024 年中国稻谷总产量约为 20 753.5 万 t, 明, 米糠中含 33%~47% 的纤维, 14%~24% 的脂肪, 12%~16% 的蛋白质, 8%~12% 的水分, 7%~14% 的灰分, 以及多  
稻谷加工碾白后的米糠约占稻谷总质量的 7%。研究<sup>[2]</sup>表

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目 (编号: 21B0247)

通信作者: 付湘晋 (1980—), 男, 中南林业科技大学教授, 博士。E-mail: drxjfu@163.com

收稿日期: 2024-08-08 改回日期: 2024-11-21

种维生素等营养成分。但米糠通常被用作动物饲料原材料<sup>[3]</sup>。作为一种安全性高的食品原料,米糠富含膳食纤维且价格低廉,是膳食纤维的优质来源。根据水溶性,米糠膳食纤维(rice bran dietary fiber, RBDF)可分为不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维,其中米糠不溶性膳食纤维(rice bran insoluble dietary fiber, RBIDF)主要由纤维素、半纤维素和木质素组成<sup>[4-6]</sup>。已有大量研究<sup>[5-11]</sup>表明, RBIDF具有一定的降血脂、降低胆固醇、降低糖尿病患者空腹和餐后血糖水平、维持肠道健康和预防便秘等作用。大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)具有较强的胶凝性、乳化性和起泡性等功能特性,在改善食品的质地、感官等方面发挥着重要作用<sup>[12-13]</sup>。在植物蛋白饮品、乳制品及豆奶等食品的生产中,可通过添加 RBIDF 和 SPI 的共同使用保证产品的稳定性。

高内相乳液(high internal phase emulsion, HIPEs)一般指分散相的体积分数高于 0.74<sup>[14]</sup>。高内相乳液分散相中球形液滴紧密堆积相互挤压,超过了几何堆积的填充极限,发生变形,液滴呈多面体形状<sup>[15]</sup>。由于 HIPEs 具有所需乳化剂少和高抗稳定性等优点,被越来越多地应用于食品中。在蛋白和/或多糖稳定的 HIPEs 体系中,NaCl 主要通过静电屏蔽作用、离子桥连、中和表面带电荷量等一系列机制影响乳化剂表面带电性质,从而影响乳液的稳定性<sup>[16]</sup>。NaCl 也可促进乳液凝胶状结构的形成,增加体系在冻融循环过程中对水油分离、乳化和油化的抵抗力,从而生产出具有良好冻融稳定性的新型高弹性食品材料<sup>[17-18]</sup>。在真实食品加工过程中通常会添加 NaCl 来改变食品的风味。研究拟考察 NaCl 浓度对米糠不溶性纤维/大豆分离蛋白高内相乳液 $\zeta$ -电位、粒径、剪切流变特性、黏弹性、贮藏稳定性和冻融稳定性等的影响,旨在探索膳食纤维/蛋白用于脂肪替换物、低胆固醇蛋黄酱等高内相乳液中的应用前景,为延长冷冻食品的保质期和改善感官品质提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

脱脂米糠:江苏瑞牧生物科技有限公司;

大豆分离蛋白:临沂山松生物制品有限公司;

碱性蛋白酶:300 U/mg,广州裕立宝生物科技有限公司;

高温 $\alpha$ -淀粉酶:4 000 U/g,上海源叶生物科技有限公司;

氢氧化钠:分析纯,西陇科学股份有限公司;

盐酸:分析纯,湖南汇虹试剂有限公司;

氯化钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

玉米油:山东三星玉米产业科技有限公司;

叠氮钠:分析纯,上海天齐生物科技有限公司。

#### 1.1.2 主要仪器设备

电子分析天平: AuY220 型,岛津(香港)有限公司;

pH 计: Five Easy 型,梅特勒托利多(上海)有限公司;

磁力搅拌水浴锅: HSJ-6 型,常州澳华仪器有限公司;

真空冷冻干燥机: Lab-1A-50E 型,北京博医康实验仪器有限公司;

数显型高速分散机: T18 型,德国 IKA 公司;

粒度及电位分析仪: Nano-ZS 型,英国 Malvern 公司;

激光微米粒度仪: LS 13320 型,美国贝克曼库尔特有限公司;

流变仪: DHR-2 型,美国 TA 公司;

低速离心机: TDZ5-WS 型,长沙湘仪离心机仪器有限公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 米糠不溶性膳食纤维制备 参考刘静怡等<sup>[19]</sup>的方法并稍加修改,脱脂米糠脱植酸后用双酶解法去除蛋白质和淀粉制备 RBIDF。取脱脂米糠于烧杯中,按 1:10 (g/mL) 料液比将原料与去离子水混合均匀后,水浴搅拌升温至 40 °C 后用 2 mol/L NaOH 调 pH 至 9.0, 40 °C 水浴搅拌 4 h, 3 000×g 离心 10 min, 取沉淀;按原料液比 1:10 (g/mL) 加入去离子水于沉淀中混合均匀,在 55 °C 下用 2 mol/L HCl 调节 pH 至 8.2, 加入碱性蛋白酶(添加量 1 500 U/g) 酶解 2.5 h;再升温至 60 °C 调节 pH 至 6.5, 水浴锅温度升至 90 °C 预糊化 30 min, 加入高温 $\alpha$ -淀粉酶(添加量 250 U/g), 在 95 °C 恒温水浴锅中 30 min 后, 灭酶处理;冷却至室温后, 3 000×g 离心 10 min, 洗涤沉淀至中性, 收集沉淀冷冻干燥。冻干样品经粉碎机粉碎 2 min 后, 过 100 目筛, 按球料比 1:6 (g/g) 进行超微粉碎处理 8 h。

#### 1.2.2 米糠不溶性膳食纤维基本成分测定

(1) 蛋白质:按 GB 5009.5—2016 凯氏定氮法执行。

(2) 水分:按 GB 5009.3—2016 直接干燥法执行。

(3) 淀粉:按 GB 5009.9—2016 酶水解法执行。

(4) 灰分:按 GB 5009.4—2016 第一法执行。

(5) 不溶性膳食纤维:按 GB 5009.88—2023 执行。

1.2.3 米糠不溶性膳食纤维/大豆分离蛋白共混体系制备 称取 2.4 g 粉末 SPI 于 200 mL 烧杯, 加入 90 g 去离子水于室温下磁力搅拌 2 h 使其充分溶解, 用 1 mol/L HCl 调节 pH 至 2 后, 分别加入 0.8, 1.2 g 的 RBIDF, 定容至 100 mL, 于室温下搅拌 2 h 使二者充分混匀, 再向其中添加一定量的 NaCl, 室温下磁力搅拌 2 h 得到 NaCl 浓度分别为 0, 100, 200, 300, 400 mmol/L 的 RBIDF/SPI 共混溶液。

#### 1.2.4 米糠不溶性膳食纤维/大豆分离蛋白高内相乳液制

备 取 10 mL 不同 NaCl 浓度的 RBIDF/SPI 共混溶液,加入 30 mL 玉米油,加入 0.02 g/100 mL 叠氮钠抑制微生物生长,用高速剪切机在 12 000 r/min 剪切分散 2 min,得到油相体积分数为 75% 的 HIPEs,于 4 °C 保存备用。此时乳液中 SPI 含量为 0.60 g/100 g, RBIDF 含量分别为 0.20, 0.30 g/100 g, NaCl 浓度分别为 0, 25, 50, 75, 100 mmol/L。

1.2.5 米糠不溶性膳食纤维/大豆分离蛋白高内相乳液  $\zeta$ -电位测定 用粒度及电位分析仪测定稀释 50 倍后高内相乳液的  $\zeta$ -电位。参数设定:测量温度 25 °C,平衡时间 2 min,每个样品测量 3 次。

1.2.6 米糠不溶性膳食纤维/大豆分离蛋白高内相乳液粒径测定 采用激光微米粒度仪对制备的高内相乳液进行粒径测定。参数设定:以水为背景,测量温度 25 °C,加样量为 PIDS 40%~60%,记录样品的粒径分布情况和体积平均粒径  $D(4,3)$ 。

1.2.7 米糠不溶性膳食纤维/大豆分离蛋白高内相乳液流变特性测定 用流变仪测定共混体系的流变特性,选用直径 40 mm 平板转子,测量夹具间隙 1 mm,加样量 2 mL,加样时使样品均匀充盈于板夹狭缝,注意保持样品均匀,防止产生气泡。剪切流变测量参数:环境温度(25±1) °C,剪切速率为 0~100 s<sup>-1</sup>。频率扫描测量参数:在 10 rad/s 的固定频率下对样品进行应力扫描确定线性黏弹区域;在恒定 0.2%(线性黏弹区内)的应力条件下从 0.1~10.0 Hz 范围内进行频率扫描。

1.2.8 米糠不溶性膳食纤维/大豆分离蛋白高内相乳液贮藏稳定性测定 取 5 mL 新鲜制备的高内相乳液置于 10 mL 玻璃瓶中,将玻璃瓶倒置于常温下分别静置 2 h 和 30 d,观察样品的整体外观图像,评估样品在贮藏过程中的稳定性。

1.2.9 米糠不溶性膳食纤维/大豆分离蛋白高内相乳液冻融稳定性测定 取约 6 mL 新鲜制备的高内相乳液于 10 mL 离心管中,置于 -20 °C 冰箱进行冷冻,24 h 后取出于室温下自然解冻 2 h,对样品整体外观拍照观测。反复进行两次冻融过程。

### 1.3 数据处理

所有试验均重复 3 次,并通过 SPSS 22 软件单因素方差分析取平均值,计算标准偏差,Duncan 检验对数据进行显著性分析,差异显著性  $P<0.05$ ,且试验数据以“平均值±标准偏差”表示;采用 Origin 2018 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 NaCl 浓度对米糠不溶性膳食纤维/大豆分离蛋白高内相乳液 $\zeta$ -电位的影响

由表 1 可看出,乳液的  $\zeta$ -电位呈负值。当 NaCl 浓度从 0 增加至 75 mmol/L, RBIDF 添加量为 0.20 g/100 g 时,

乳液  $\zeta$ -电位从 (-15.70±0.44) mV 增加至 (-2.84±0.50) mV,绝对值呈减小趋势,可能是 NaCl 加入后强的静电屏蔽作用导致乳液液滴之间的表面电荷减少<sup>[20]</sup>。RBIDF 添加量为 0.30 g/100 g 时,乳液的  $\zeta$ -电位则从 (-12.27±0.59) mV 降低至 (-32.73±1.21) mV,绝对值呈增加趋势,可能是 RBIDF 与 SPI 之间的相互作用一部分被 NaCl 离子破坏,在包裹油相之后,部分 RBIDF 分子被吸附在液滴表面而造成电位绝对值上升。当 NaCl 浓度从 75 mmol/L 增加至 100 mmol/L 时,两个不同 RBIDF 添加量下 HIPEs 的  $\zeta$ -电位绝对值都基本保持不变,可能意味着此时 NaCl 对 RBIDF 的屏蔽效应已经达到了一个平衡点,进一步增加 NaCl 浓度不再显著改变  $\zeta$ -电位,也可能是因为在高盐浓度下, RBIDF 与 SPI 电荷相互作用使得乳液粒子表面的电荷状态对盐离子的敏感性降低。

表 1 NaCl 浓度对高内相乳液  $\zeta$ -电位的影响<sup>†</sup>

Table 1 Effect of NaCl concentration on  $\zeta$ -potential of HIPEs

NaCl 浓度/ (mmol·L <sup>-1</sup> )	$\zeta$ -电位/mV	
	0.60 g/100 g SPI+ 0.20 g/100 g RBIDF	0.60 g/100 g SPI+ 0.30 g/100 g RBIDF
0	-15.70±0.44 <sup>d</sup>	-12.27±0.59 <sup>a</sup>
25	-10.19±0.29 <sup>c</sup>	-22.23±0.71 <sup>b</sup>
50	-4.30±0.11 <sup>b</sup>	-31.03±0.76 <sup>c</sup>
75	-2.84±0.50 <sup>a</sup>	-32.73±1.21 <sup>d</sup>
100	-2.30±0.11 <sup>a</sup>	-32.87±0.60 <sup>d</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同代表有显著性差异( $P<0.05$ )。

### 2.2 NaCl 浓度对 HIPEs 粒径分布的影响

乳液的粒径分布图反映了乳液液滴的大小分布及其相对数量,一定程度也反映了乳液的稳定性。图 1 展示了 NaCl 浓度对乳液粒径分布的影响。

当 RBIDF 添加量为 0.20 g/100 g 时,随着 NaCl 浓度的增加,乳液粒径分布整体右移,且在 100~300  $\mu$ m 范围内出现明显小峰拖尾,说明乳液液滴的粒径有所增大,并出现了一定量的大粒径液滴。这可能是因为乳液中加入低浓度的 NaCl 时,静电屏蔽效应使得液滴之间的静电斥力减小,小液滴聚集形成少量大液滴<sup>[21]</sup>。在 RBIDF 添加量为 0.30 g/100 g, NaCl 浓度为 25 mmol/L 时,粒径稍有变大但尺寸分布规律与未添加 NaCl 的样品差不多。当 NaCl 浓度增加至 50, 75 mmol/L 时,粒度分布明显增大,在 NaCl 浓度达到 100 mmol/L 时,粒径分布出现两个主峰且分布范围较宽,说明随着 NaCl 浓度的增大,乳液中大液滴尺寸明显增多,可能是因为 NaCl 影响 RBIDF 和 SPI 之间的相互作用从而影响 RBIDF 在油/水界面的有效吸附,连续相

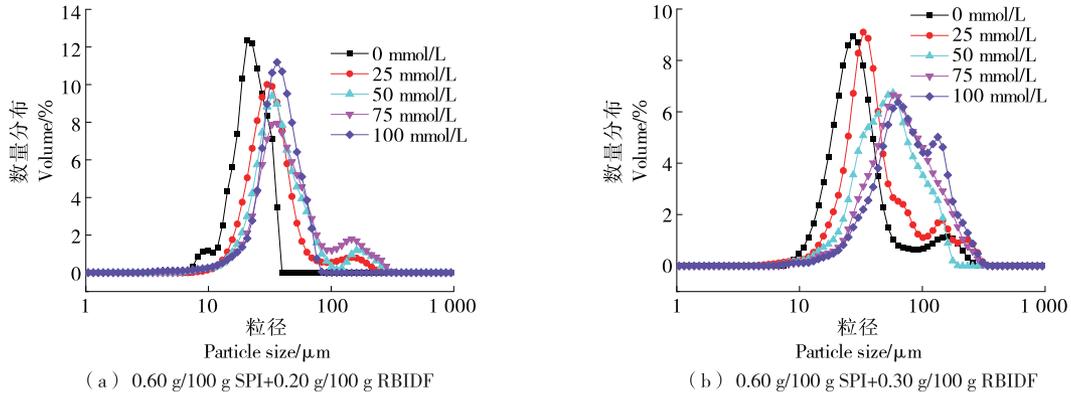


图 1 NaCl 浓度对高内相乳液的粒径分布影响

Figure 1 Effect of NaCl concentration on particle size distribution of HIPEs

中的 RBIDF 引起体系出现排斥絮凝,液滴发生聚集,粒径明显增大。

### 2.3 NaCl 浓度对 HIPEs 剪切流变特性的影响

由图 2 可知,由于剪切过程中乳液絮凝结构的破坏和液滴间的定向排布,表观黏度随着剪切速率的增大而减小,表现出剪切稀化行为。在两个 RBIDF 添加量下,随着 NaCl 浓度的增加,表观黏度基本呈增大趋势。在  $\beta$ -乳球蛋白

白稳定的 HIPEs 中也报道了类似的现象,随着离子强度的增加,由  $\beta$ -乳球蛋白制备的 HIPEs 表观黏度增大<sup>[22]</sup>。这可能是因为 RBIDF 添加量为 0.20 g/100 g 时体系由于静电屏蔽作用出现了液滴的聚集,而 RBIDF 添加量为 0.30 g/100 g 时体系出现了排斥絮凝,聚集体和絮凝体的抗形变和重新排布需要更大的作用力,故呈现出更大的表观黏度。这与  $\zeta$ -电位和粒径分布推测结果一致。

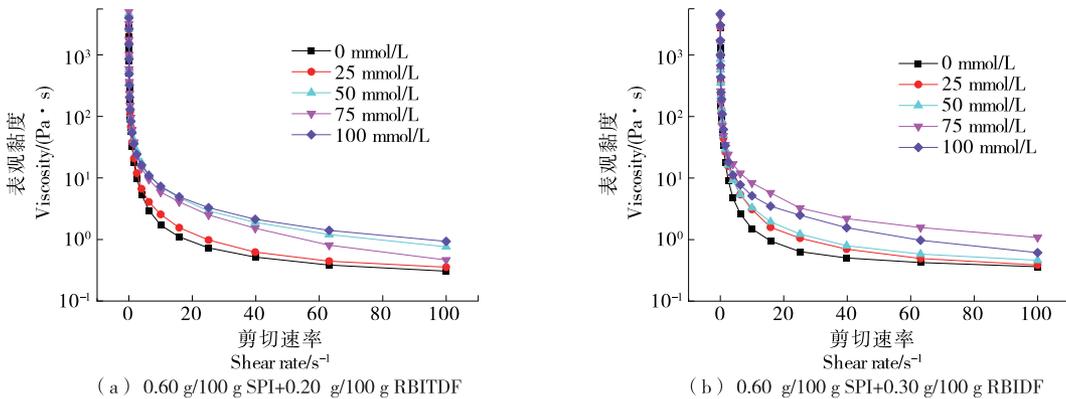


图 2 NaCl 浓度对高内相乳液剪切流变特性的影响

Figure 2 Effect of NaCl concentration on shear rheological properties of HIPEs

### 2.4 NaCl 浓度对 HIPEs 黏弹性的影响

由图 3 可看出,所有样品的  $G'$  (储能模量) 均大于  $G''$  (损耗模量),说明样品都是以弹性为主的黏弹体系。高内相乳液的这种凝胶状的网络结构很大程度是由于油滴的紧密堆积和相互作用造成的。当 RBIDF 添加量为 0.20 g/100 g, NaCl 浓度  $> 25$  mmol/L 时,随着 NaCl 浓度的增加,储能模量增大。当 HIPEs 中的 RBIDF 添加量为 0.30 g/100 g 时,  $G'$  和  $G''$  在不同 NaCl 浓度下变化均不明显,随着 NaCl 浓度的增加,尽管储能模量  $G'$  有所增加,但其增幅相对较小。这表明虽然离子强度的增加有助于增强凝胶网络的强度<sup>[23]</sup>,但该作用效果有限,可能是因为

一定范围内,乳液的弹性网络结构已经相对稳定,进一步地增加离子浓度对凝胶强度的贡献不大。

### 2.5 NaCl 浓度对 HIPEs 贮藏稳定性的影响

食品工业中的真实乳液体系是一种复杂的热力学不稳定体系,它在贮藏过程中经常会出现水相与乳化剂下沉而油相上浮的现象。这种现象会对食品的生产、加工与销售造成不利影响。图 4 展示了不同 NaCl 条件下新鲜的 HIPEs 和常温贮藏 30 d 后乳液的直观外貌图。

当 RBIDF 添加量为 0.20 g/100 g, NaCl 浓度  $> 75$  mmol/L 时,新鲜制备的 HIPEs 外壁呈絮凝状态,可能是高浓度 NaCl 的加入,静电屏蔽作用导致带电体电荷密

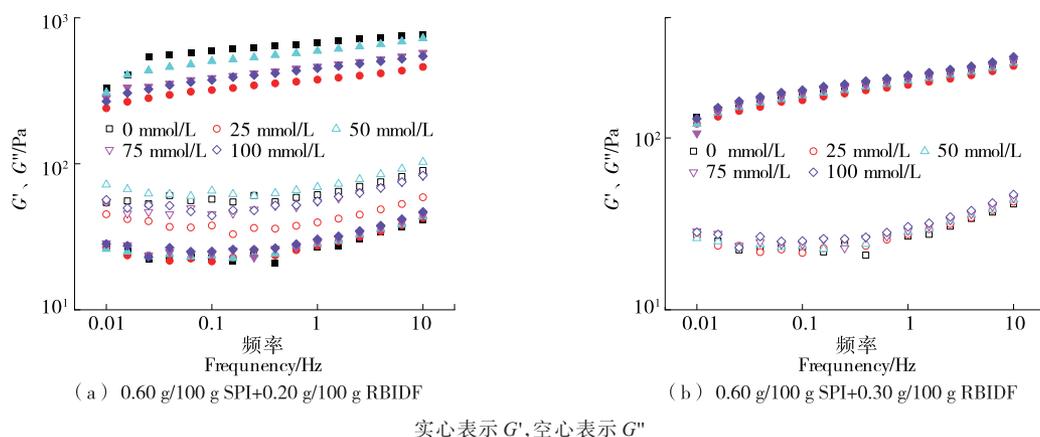


图3 NaCl浓度对高内相乳液储能和损耗模量的影响

Figure 3 Effect of NaCl concentration on energy storage and loss modulus of HIPEs

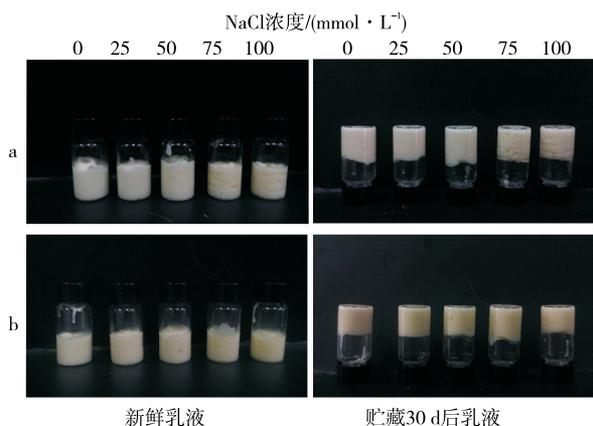


图4 NaCl浓度制备HIPEs在贮藏30d前后直观外貌图

Figure 4 Visual appearance of HIPEs prepared by NaCl concentration before and after 30 d of storage

度发生变化从而静电斥力减小,液滴发生聚集,这与 $\zeta$ -电位测量结果相印证。低NaCl浓度条件下制备的HIPEs在室温下贮藏30d后仍呈半固体凝胶状,倒置具有较好的自支撑状态。当RBIDF添加量为0.30 g/100 g时,添加不同浓度NaCl后直观外貌图无明显区别,均呈白色凝胶状乳液。在室温下贮藏30d后,倒置时HIPEs仍呈半固体凝胶状,且未出现乳析、油水相分离、破乳的现象,显示出良好的自支撑性质,表明在不同NaCl浓度下制备的HIPEs均表现出良好的贮藏稳定性。NaCl的加入会影响乳液中乳化剂和颗粒的表面电荷,进而影响油滴间的相互作用和乳液的结构。NaCl作为常用盐离子的一种,可以通过改变乳化剂分子的电荷密度和颗粒表面的电荷相互作用,来促进颗粒在油水界面的吸附,从而加强油滴的包裹和稳定的乳液结构。此外,NaCl还可能影响油滴间相互

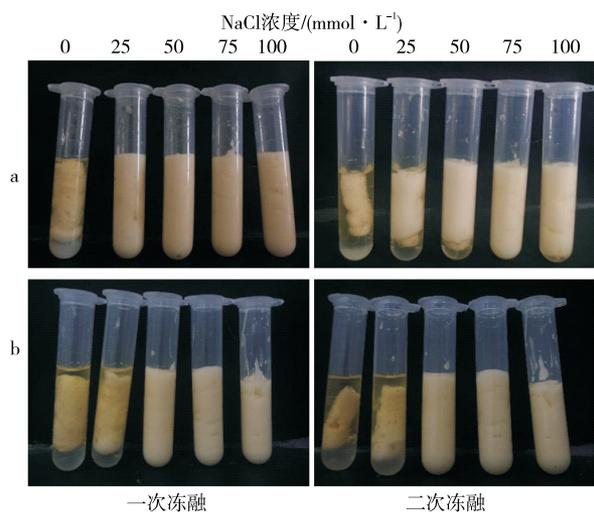
作用的平衡,包括静电斥力和范德华力,进一步影响乳液的流变性质和自支撑能力。因此,通过适当调节NaCl浓度,可以优化HIPEs的宏观性能,提高其在贮藏过程中的稳定性,对于延长HIPEs产品的货架期和保证产品质量具有重要意义。

### 2.6 NaCl浓度对HIPEs冻融稳定性的影响

食品乳液体系在冻融过程中失稳的原因可能有:  
 ① 乳液进行冷冻处理时,连续相最外层水相最先冻结成冰,然后冰晶依次向内扩展<sup>[24]</sup>。在此过程中,冻结水相中的乳化剂会向未冻结的水相迁移,导致液滴表面乳化剂的吸附浓度发生改变,从而导致乳化剂稳定乳液的能力减弱。  
 ② 冷冻过程中形成的冰晶会破坏乳化剂在液滴表面形成的界面膜,解冻后乳液液滴聚结,从而引起乳液的相分离<sup>[25]</sup>。  
 ③ 解冻过程中,迁移的乳化剂可能会重新分布到液滴表面,但是冷冻过程中结构被破坏可能会无法重新吸附到油水界面形成稳定乳液。

图5展示了不同NaCl浓度条件下,HIPEs经两次冻融过程后的外观图。由图5可看出,两个不同RBIDF浓度下未添加NaCl的乳液在经过一次冻融循环后均破乳,出现明显油析现象。当RBIDF添加量为0.20 g/100 g时,添加NaCl的样品一次冻融后均没有出现油析现象,二次冻融循环后25~50 mmol/L的低NaCl浓度乳液出现了明显的油析、破乳及相分离现象。在NaCl浓度>50 mmol/L时,样品仍能保持原有的乳液质地,没有油相析出,即NaCl浓度>50 mmol/L的HIPEs均表现出良好的冻融稳定性,说明NaCl浓度的增加有助于提高HIPEs的冻融稳定性。这可能是因为添加了较高浓度的NaCl后,RBIDF和SPI之间的相互作用被破坏,部分粒子吸附在液滴表面抑制了冰晶在液滴屏障层的形成。此外,较高的黏弹性能也可能是乳液在冻融后仍保持稳定的原因之一。当RBIDF添加量为0.30 g/100 g时,添加25 mmol/L NaCl的

HIPEs 在一次冻融后出现了油析,且二次冻融后油析现象更为明显。在 NaCl 浓度  $>25$  mmol/L 时 HIPEs 均表现出良好的冻融稳定性。在添加一定浓度 NaCl 之后有助于颗粒迅速吸附至界面形成稳固的界面膜,从而提高乳液的冻融稳定性。Zhong 等<sup>[26]</sup>在探究 NaCl 和  $\text{CaCl}_2$  对亲脂性蛋白-羟丙基甲基纤维素乳液冻融稳定性的影响,发现了在 100 mmol/L 条件下存在最佳冻融稳定性,归因于盐的添加减少了乳液中静电相互作用。



a. 0.60 g/100 g SPI+0.20 g/100 g RBIDF b. 0.60 g/100 g SPI+0.30 g/100 g RBIDF

图 5 NaCl 浓度对 HIPEs 冻融稳定性的影响

Figure 5 Effect of NaCl concentration on freeze-thaw stability of HIPEs

### 3 结论

(1) 通过对 NaCl 浓度进行调控,可改变乳液体系的电荷密度,从而调节乳液液滴间的相互作用,改善高内相乳液的相关性质。不同氯化钠浓度(0~100 mmol/L)下 RBIDF/SPI 共混体系均能形成稳定的弹性高内相乳液。

(2) NaCl 对于高内相乳液的冻融稳定性具有很好的提高作用。随着离子浓度的增加,米糠不溶性膳食纤维添加量为 0.20, 0.30 g/100 g 时,高内相乳液的冻融性增强;当离子浓度  $>50$  mmol/L 时,乳液经过两次冻融循环后仍能保持良好的自支撑状态。

(3) 盐离子的加入显著提高了米糠不溶性膳食纤维/大豆分离蛋白共混体系高内相乳液的冻融稳定性,为绿色开发新型多糖/蛋白乳化稳定剂提供新思路,可延长米糠高值化产业链。但该研究未深入分析冻融过程中的其他稳定性指标,后续可以着重考察盐离子抑制蛋白质-膳食纤维体系冻融乳液破乳失稳的机理,以进一步阐明米糠不溶性膳食纤维在高内相乳液中的稳定机制。

### 参考文献

- [1] 颜榕, 刘旭华, 孙强强, 等. 食品级米糠粉开发工艺优化及营养消化特性[J]. 安徽科技学院学报, 2024, 38(2): 59-69.  
YAN R, LIU X H, SUN Q Q, et al. Optimization of development process and analysis of nutritional digestion characteristics of edible rice bran powder[J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2024, 38(2): 59-69.
- [2] 马宗会, 殷宝茹, 张海, 等. 食品级米糠的研究进展及前景展望[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(5): 11-20, 11.  
MA Z H, YIN B R, ZHANG H, et al. Research progress and outlook of food grade rice bran[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(5): 11-20, 11.
- [3] 朱仁威, 黄亮, 谭沙, 等. 米糠膳食纤维提取和改性及功能性质的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(5): 12-16.  
ZHU R W, HUANG L, TAN S, et al. Research progress on extraction, modification and functional properties of rice bran dietary fiber[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(5): 12-16.
- [4] 宋丹丹. 米糠膳食纤维脂肪代替物的制备、性质及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2016: 1.  
SONG D D. Study on preparation, properties and application of fat substitute of rice bran dietary fiber[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2016: 1.
- [5] 任明非. 米糠不溶性膳食纤维与  $\text{Cd}^{2+}$  结合特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 5.  
REN M F. Study on the binding characteristics of rice bran insoluble dietary fiber with  $\text{Cd}^{2+}$  [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020: 5.
- [6] 王旭. 米糠膳食纤维的改性制备及其特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 1.  
WANG X. Study on modified preparation of rice bran dietary fiber and its properties[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018: 1.
- [7] 李素芬, 田心怡. 蒸汽爆破对不同品种米糠可溶性膳食纤维结构及特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 110-117.  
LI S F, TIAN X Y. Effects of steam explosion on structural and properties of soluble dietary fiber in rice bran from different varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10): 110-117.
- [8] REN F Y, FENG Y L, ZHANG H J, et al. Effects of modification methods on microstructural and physicochemical characteristics of defatted rice bran dietary fiber[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151: 112161.
- [9] 刘倩, 范普川, 刘素诗, 等. 米糠粕不溶性膳食纤维理化性质及对高脂大鼠肠道菌群的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 174-179.  
LIU Q, FAN Y C, LIU S S, et al. Physicochemical properties of insoluble dietary fiber from defatted rice bran and its effect on intestinal microbiota of high-fat diet fed rats[J]. Food Science, 2021, 42(15): 174-179.

- [10] 李向菲, 沈丹, 黄俊凯, 等. 米糠功能活性成分及其功效的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 466-474.  
LI X F, SHEN D, HUANG J K, et al. Research progress on functional active components and its efficacy in rice bran[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13): 466-474.
- [11] LIU Y L, ZHANG H B, YI C P, et al. Chemical composition, structure, physicochemical and functional properties of rice bran dietary fiber modified by cellulase treatment[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128352.
- [12] CHEN L, CHEN J S, YU L, et al. Improved emulsifying capabilities of hydrolysates of soy protein isolate pretreated with high pressure microfluidization[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 69: 1-8.
- [13] SUN P, ZHANG Q, ZHAO Y, et al. Improving gel properties of soy protein isolate through alkaline pH-shifting, mild heat treatment, and TGase cross-linking[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 108924.
- [14] 卫姣, 陈雨露, 高彦祥, 等. 高内相乳液的制备及在食品中的应用[J]. 中国食品学报, 2022, 22(4): 418-429.  
WEI J, CHEN Y L, GAO Y X, et al. Preparation of high internal emulsion and its application in food[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(4): 418-429.
- [15] SHI A M, FENG X Y, WANG Q, et al. Pickering and high internal phase Pickering emulsions stabilized by protein-based particles: a review of synthesis, application and prospective[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 109: 106117.
- [16] WAN X S, KANG Q, LI J Q, et al. Effect of NaCl concentration on the formation of high internal phase emulsion based on whey protein isolate microgel particles[J]. Food Chemistry, 2024, 433: 1373195.
- [17] ZHU X F, ZHENG J, LIU F, et al. Freeze-thaw stability of Pickering emulsions stabilized by soy protein nanoparticles. Influence of ionic strength before or after emulsification[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 74: 37-45.
- [18] WANG T, LI F S, ZHANG H, et al. Plant-based high internal phase emulsions stabilized by dual protein nanostructures with heat and freeze-thaw tolerance[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131458.
- [19] 刘静怡, 丁城, 周梦舟, 等. 双酶法分离提取米糠膳食纤维的研究[J]. 食品科技, 2017, 42(10): 179-184.  
LIU J Y, DING C, ZHOU M Z, et al. Extraction of dietary fiber from rice bran by double enzyme hydrolysis[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(10): 179-184.
- [20] XU X Y, FAN L P, LI J W. Freeze-thaw stability of high-internal-phase emulsion stabilized by chickpea protein microgel particles and its application in surimi[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(14): 8 621-8 633.
- [21] WEN J Y, JIN H N, WANG L, et al. Fabrication and characterization of high internal phase Pickering emulsions based on pH-mediated soy protein-epigallocatechin-3-gallate hydrophobic and hydrophilic nano-stabilizer[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 179: 114638.
- [22] DAI H J, LI Y, MA L, et al. Fabrication of cross-linked  $\beta$ -lactoglobulin nanoparticles as effective stabilizers for Pickering high internal phase emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 109: 106151.
- [23] YU J, WANG Y, LI D, et al. Freeze-thaw stability and rheological properties of soy protein isolate emulsion gels induced by NaCl[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107113.
- [24] HILLGREN A, LINDGREN J, ALDÉN M. Protection mechanism of Tween 80 during freeze-thawing of a model protein, LDH[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2002, 237(1/2): 57-69.
- [25] SAITO H, KAWAGISHI A, TANAKA M, et al. Coalescence of lipid emulsions in floating and freeze-thawing processes: examination of the coalescence transition state theory[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1999, 219(1): 129-134.
- [26] ZHONG M M, SUN Y F, SUN Y D, et al. The effect of salt ion on the freeze-thaw stability and digestibility of the lipophilic protein-hydroxypropyl methylcellulose emulsion[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151: 112202.