

# 碱热改性米渣谷蛋白对 W/O/W 型双重乳液稳定性的影响

Effects of alkali-heat-modified rice residue glutenin on stability of W/O/W double emulsions

郭元博 薛婧 张成 王芝晓 付湘晋 龙肇

GUO Yuanbo XUE Jing ZHANG Cheng WANG Zhixiao FU Xiangjin LONG Zhao

(中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南 长沙 410000)

(College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410000, China)

**摘要:**目的: 实现米渣谷蛋白在乳浊体系中的应用。方法: 选取碱热改性米渣谷蛋白和 span80, 采用一步乳化法制备 W/O/W 型双重乳液, 并考察蛋白浓度对双重乳液稳定性的影响。结果: 当蛋白质质量分数从 0.5% 升高至 2.5% 时, 乳液大粒径峰消失, 显微结构中液滴的双重结构增强, 表观黏度及黏弹性提高, 离心稳定性和贮藏稳定性增强。当蛋白质质量分数为 2.5% 时, 离心后乳清析出指数从 37.21% 降至 10.56%, 分层时间从 6 h 延长至 96 h。蛋白质与 span80 形成复合膜共同稳定油水界面, 形成中间态液滴, 当界面蛋白足以形成刚性界面膜时, 液滴从中间态转为稳定的双重结构; 当蛋白质质量分数为 3.0% 时, 双重乳液发生絮凝使大粒径峰重新出现, 稳定性下降, 离心后乳清析出指数为 16.48%, 制备后 96 h 左右分层, 过剩的蛋白质一部分参与内相液滴的构建, 另一部分单独形成 O/W 型液滴吸附于大体积液滴外侧。结论: 一步乳化法下, 蛋白质质量分数为 2.5% 时, 可制得稳定双重乳液。  
**关键词:** 米渣谷蛋白; 一步乳化法; 蛋白浓度; 双重乳液; 稳定机制

**Abstract:** Objective: To achieve the application of rice dreg glutenin in emulsions system. Methods: This paper selected alkali-heat modified rice dregs glutenin and span80 as emulsifiers to prepare W/O/W double emulsions by one-step emulsification

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(编号: 2022YFD2101303); 湖南省重点研发计划项目(编号: 2022NK2032); 湖南省教育厅科学研究项目(编号: 21B0247)

**作者简介:** 郭元博, 男, 中南林业科技大学在读硕士研究生。

**通信作者:** 龙肇(1986—), 女, 中南林业科技大学讲师, 博士。

E-mail: 442921980@qq.com

收稿日期: 2023-03-29

改回日期: 2023-08-12

method, and investigated the effect of protein concentration on the stability of double emulsions to provide the theoretical reference for the preparation of stable double emulsions by one-step emulsification. Results: When the protein mass fraction increased from 0.5% to 2.5%, the large particle size peak disappears in emulsion, the apparent viscosity and viscoelasticity of emulsions were improved, the centrifugal stability and storage stability were enhanced, enhanced dual structure of droplets in microstructure. When the protein mass fraction reached 2.5%, after centrifugation, the whey precipitation index decreased from 37.21% to 10.56%, and the layering time was extended from 6 hours to 96 h. Protein and span80 formed a composite membrane to jointly stabilize the oil-water interface, and formed an intermediate droplet. When the interface protein was enough to form a rigid boundary facial mask, the droplet changed from the intermediate state to a stable dual structure. When the protein mass fraction reached 3.0%, the flocculation of the double emulsions led to the reappearance of the large particle size peak, and the stability was reduced. After centrifugation, the emulsion index was 16.48%, and about 96 hours after preparation, the excess protein was partially involved in the construction of the internal phase droplets, and the other part was separately formed into W/O droplets and adsorbed on the outside of the large volume droplets. Conclusion: Under one-step emulsification method, when the protein content is 2.5%, stable double emulsions can be prepared.

**Keywords:** glutenin from rice dregs; one step emulsification method; protein concentration; double emulsions; stability mechanism

双重乳液是一种结构复杂的乳液, 一般指大量表层

液滴内具有更小结构的乳液系统,此类乳状液液滴具有多个或多层小液滴,较为常见的结构为水包油包水(W/O/W)和油包水包油(O/W/O)<sup>[1]</sup>。双重乳液的结构特点使得其可同时充当极性和非极性活性物质的载体,并对载体物质有保护和缓释的效果,且对茶多酚<sup>[2]</sup>、益生菌<sup>[3]</sup>和胰岛素<sup>[4]</sup>等物质的包埋研究较多。双重乳液的制备方式有单步乳化和两步乳化的方法。单步乳化的制备方式有先通过高速剪切得到 W/O 型初乳,再低速剪切将初乳包裹至内相<sup>[5-8]</sup>。一步乳化的方法步骤简单但难以对内水相进行精准调控。有研究<sup>[9]</sup>发现,一步乳化的制备的双重乳液性质优于两步乳化的方法,但未深入研究其稳定机理。相较传统乳液的絮凝、聚结、乳析、沉降和奥氏熟化<sup>[10]</sup>,双重乳液还存在内水相液滴聚集、内水相向外迁移等因素造成的失稳,因此提高双重乳液的稳定性至关重要。

米渣蛋白是由大米制糖后产生的副产物米渣中提取的蛋白质,其中谷蛋白为其主要的贮藏蛋白。与大米蛋白一样,米渣蛋白是兼具高营养与低致敏性的优质蛋白质,作为其变性蛋白的米渣蛋白由于溶解性差却难以被应用至食品工业中<sup>[11]</sup>。热处理是较为常见的物理改性方式,可改善蛋白的溶解性及乳化性能<sup>[12-16]</sup>。研究拟在前期工作研究的基础上,选取 pH 12、55 ℃ 碱热处理后的米渣谷蛋白作为研究对象,考察其与 span80 共同构建双重乳液过程中,蛋白浓度对双重乳液结构性质及稳定性的影响,旨在为探究蛋白浓度对双重乳液的构建及稳定性提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 原 料

米渣蛋白:蛋白质含量 $\geq 90\%$ ,无锡金农生物科技有限公司;

玉米油:山东三星玉米产业科技有限公司;

span80、氯化钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

氢氧化钠:分析纯,西陇科学股份有限公司;

无水乙醇:分析纯,湖南弘汇试剂有限公司;

叠氮钠:分析纯,上海天齐生物科技有限公司。

### 1.2 主要仪器设备

磁力搅拌水浴锅:SHJ-6 型,常州澳华仪器有限公司;

pH 计:FE20 型,梅特勒-托利多(上海)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;

数显性高速分散机:T18 型,德国 IKA 公司;

激光微米粒度仪:LS13320 型,美国贝克曼库尔特有限公司;

流变仪:DHR-2 型,美国 TA 公司;

尼康倒置荧光显微镜:Ti2-E 型,日本尼康公司;

低速离心机:TDZ5-WS 型,长沙湘仪离心机仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 米渣谷蛋白的制备 参考孙媛等<sup>[17]</sup>的方法并修改。称取 200 g 米渣蛋白于蒸馏水中配成 1 000 mL 的蛋白分散液,均匀分散。室温磁力搅拌 1 h,3 000 r/min 离心 15 min 取沉淀,重复操作 1 次去除清蛋白。将沉淀配成 1 000 mL 含质量分数为 3.0% NaCl 的蛋白分散液,室温搅拌 1 h,3 000 r/min 离心 15 min 取沉淀,重复操作 1 次去除球蛋白及少量的清蛋白。取沉淀配成 1 000 mL 含乙醇体积分数为 65% 的蛋白分散液,重复操作 1 次除去醇溶蛋白。将蛋白分散液 pH 调至 7.0,水洗 3 次,离心,冷冻干燥得米渣谷蛋白样品。

1.3.2 改性米渣谷蛋白的分离 称取一定量的米渣谷蛋白,配成质量分数为 4.0% 的蛋白分散液,分散 30 min,调节 pH 至 12,55 ℃ 水浴 2 h,迅速冰水浴冷却至室温,并调节 pH 至 7.0,3 000 r/min 离心 20 min,取上清液冷冻干燥得碱热处理米渣谷蛋白(AHRDG)。

1.3.3 W/O/W 双重乳液的制备 采用一步乳化的方法。分别称取 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,1.2 g AHRDG 分散于 16 mL 蒸馏水中作为水相。称取 0.36 g span80 分散于 24 mL 玉米油中为油相,将油相和水相混合,15 600 r/min 剪切 2 min,制得蛋白质质量分数分别为 0.5%,1.0%,1.5%,2.0%,2.5%,3.0% 的乳液。

1.3.4 乳液粒径测定 采用 LS13320 型激光微米粒度仪测定,加样量为 40%~45%。

1.3.5 双重乳液的流变学特性 采用 DHR-2 型流变仪测定。剪切流变测定参数:40 mm 平行板夹,板间距 1 mm,测定温度 25 ℃,剪切速率 0~100 s<sup>-1</sup>,上样量 2 mL,上样时样品均匀充盈于板夹狭缝且无气泡。频率扫描参数:采用 40 mm 夹板,板间距 1 mm,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,并在 0.01~10 Hz 范围内施加 1% (线性黏弹区内) 的应变进行频率扫描,上样时样品均匀充盈于板夹狭缝且无气泡。

1.3.6 双重乳液的微观结构 参考李鹤林<sup>[18]</sup>的方法并修改,取新鲜乳液 1 mL,加入 20  $\mu$ L 尼罗蓝染液和 20  $\mu$ L 尼罗红染液,混匀后滴于洁净载玻片上,轻缓盖上盖玻片防止气泡产生,4 ℃ 静置 12 h,于倒置荧光显微镜下观察微观结构,放大倍数分别为 200 $\times$ ,400 $\times$ 。荧光成像为同视野下荧光图像通过 NIS-Elements Viewer 5.21 合成得到。

1.3.7 双重乳液的离心稳定性测定 取 5 mL 新鲜乳液于 10 mL 离心管中,3 000 r/min 离心 5 min,观察乳液的

分层情况,并按式(1)计算乳液的乳清析出指数。

$$R = \frac{H_1}{H_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$R$ ——乳清析出指数, %;

$H_1$ ——底部水相高度, cm;

$H_2$ ——样品总高度, cm。

1.3.8 双重乳液的贮藏稳定性测定 取 10 mL 新鲜乳液置于样品瓶中,加入 0.02% 叠氮化钠抑制微生物生长,观察其外观形貌的变化。

1.3.9 数据处理 所有试验均重复 3 次,取平均值,采用 Excel 软件进行数据处理及绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 蛋白质质量分数对双重乳液粒径分布的影响

由图 1 可知,随着蛋白质质量分数的增大,乳液粒径分布逐渐向小粒径方向移动,当蛋白质质量分数为 1.0% 时,乳液粒度分布由双峰变为单峰。当蛋白质质量分数为 3.0% 时,粒径继续减小,但峰型重新变为双峰。体系中蛋白的增多会改变分散相与蛋白的比例,乳化过程中发生界面吸附的蛋白增多,有效阻止了液滴聚集导致的粒径增大。当体系中蛋白质质量分数过大时,连续相中过剩的蛋白可导致体系排斥絮凝的发生<sup>[19]</sup>,造成大粒径重新出现。

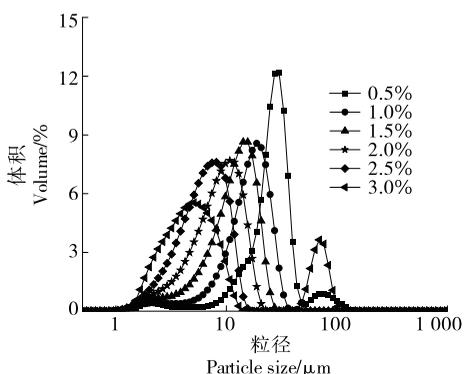


图 1 蛋白质质量分数对双重乳液粒径分布的影响

Figure 1 Effects of protein concentration on particle size distribution of dual emulsions

### 2.2 蛋白质质量分数对双重乳液表观黏度的影响

由图 2 可知,随着剪切速率的增大,乳液表观黏度降低,说明乳液属典型的剪切稀化流体。适量增加蛋白质质量分数可提高乳液的表观黏度,是因为蛋白在剪切过程中吸附于界面上并包裹分散相液滴,密集的液滴间相对运动阻力增大,此外蛋白质质量分数增大后,界面上吸附量提升,黏度也因此增大。但过大的蛋白质质量分数(3.0%)反而大幅降低了乳液的表观黏度,可能是因为过剩的蛋

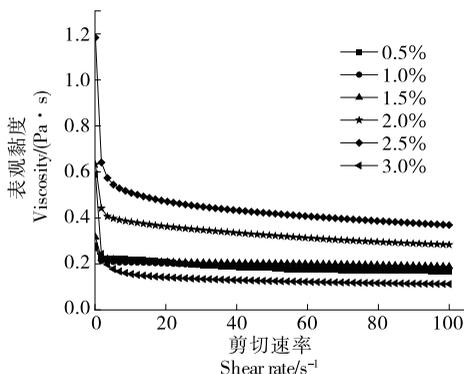


图 2 蛋白质质量分数对双重乳液粒径分布的影响

Figure 2 Effects of protein concentration on particle size distribution of double emulsions

白质会使得乳液的多重结构发生改变,其具体作用机制尚未明晰。

### 2.3 蛋白质质量分数对双重乳液黏弹特性的影响

由图 3 可知,剪切过程中蛋白质吸附至油-水界面形成黏弹性的界面膜包裹液滴,降低界面张力稳定乳液结构。蛋白质质量分数的增大使得膜的覆盖率和厚度逐渐增大,液滴的刚性结构也因此提高,乳液的储能模量和损耗模量均有所增大。所有蛋白质质量分数下,扫描频率较低时,双重乳液的损耗模量初始值皆大于储能模量,说明此时乳液表现出更多的黏性。随着频率的增大二者相交,储能模量大于损耗模量,说明较高频率下乳液开始出现无序网络结构状态,流体性质逐渐向固态的弹性结构转变。当蛋白质质量分数为 3.0% 时,体系向着弱凝胶的趋势最明显,但表观黏度下降,且粒径分布中大粒径液滴有所增加。这可能是剪切过程中未形成双重乳液的部分微型液滴对大液滴进行了包裹,达成了类 Pickering 效应<sup>[20]</sup>,强化了乳液的结构,促进乳液的凝胶结构,但是此类结构可能较少,液滴间更容易发生相对移动导致黏度下降。

### 2.4 蛋白质质量分数对双重乳液微观结构的影响

由图 4(a)可知,乳液的液滴体积基本随蛋白质质量分数的升高而减小,蛋白质质量分数较低的双重乳液中,液滴的体积相对较大且有不规则形状液滴存在,说明放置过程中乳液液滴发生了聚结,且液滴内未观察到更小体积的液滴,双重结构并未明显形成。当蛋白质质量分数  $\geq 2.0\%$  时,乳液的液滴平均体积减小,液滴内部可观察到大量微小液滴,说明双重乳液结构开始逐渐形成。由图 4(b)可知,相较于普通光学微观结构,荧光成像对于小液滴的显示更加直观。随着蛋白质质量分数的增加,小液滴粒径逐渐减小且数量增多,当蛋白质质量分数为 3.0% 时,双重乳液中较大的液滴周围被许多小液滴紧密包围,与小液滴形成的类 Pickering 效应的猜测较为相符。

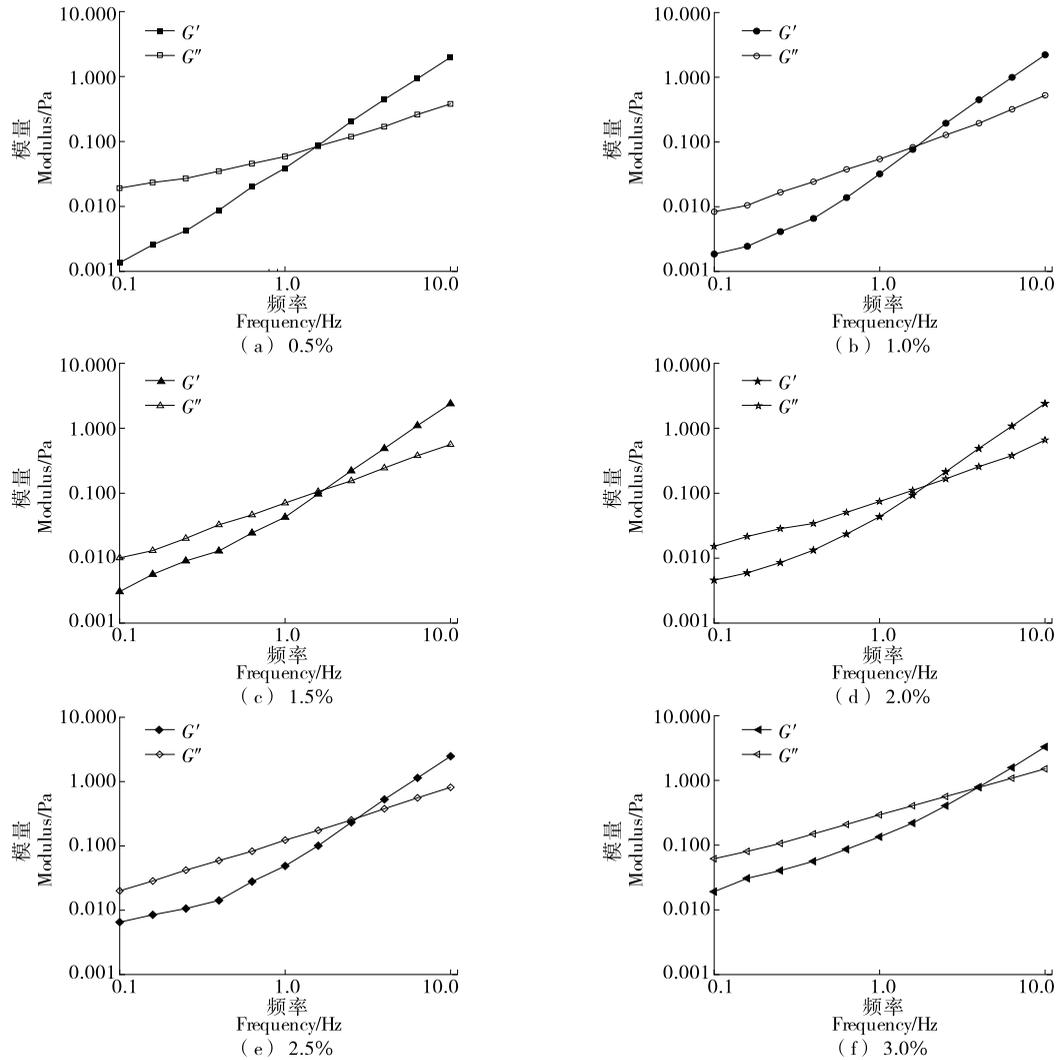
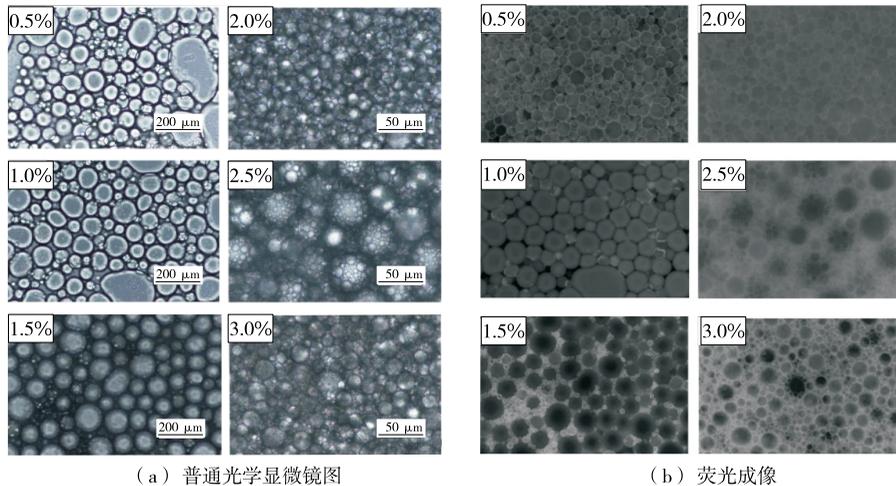


图3 蛋白质质量分数对双重乳液储能模量( $G'$ )和损耗模量( $G''$ )的影响

Figure 3 Effects of protein concentration on storage modulus ( $G'$ ) and loss modulus ( $G''$ ) of double emulsions



(a) 普通光学显微镜图

(b) 荧光成像

图4 不同蛋白质质量分数下双重乳液的普通光学微观结构与荧光成像

Figure 4 Ordinary optical microstructure and fluorescence imaging of double emulsions under different protein concentrations

### 2.5 蛋白质质量分数对双重乳液离心及贮藏稳定性的影响

由图 5 可知,当蛋白质量分数从 0.5% 升高至 2.5% 时,离心后分层情况逐渐轻微,乳清析出指数从 37.21% 降至 10.56%。同时,蛋白质量分数为 0.5% 的乳液在上层可观察到明显的油相迁移且表面出现游离油相,蛋白质量分数更高的乳液未明显观察到游离油相。蛋白质量分数较低时,乳化剂含量不足,因此造成界面膜强度不够导致在离心力的作用下失稳发生油水分离。随着蛋白质量分数的升高,双重乳液结构形成加上体系表观黏度增大液滴移动困难,一定程度上避免了分层现象。当蛋白质量分数为 3.0% 时,乳液乳清析出程度有所增大但未观察到游离油析出,是因为乳液的黏度大幅下降,以及体系出现由体相蛋白引起的排斥絮凝,稳定性再度降低。

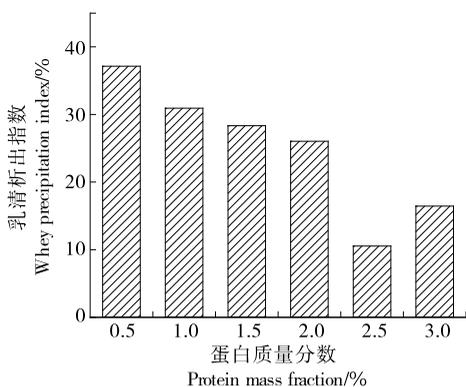


图 5 蛋白质质量分数对双重乳液离心稳定性的影响

Figure 5 Effects of protein concentration on centrifugal stability of double emulsions

试验发现,新鲜制备的双重乳液颜色洁白、乳化情况良好;贮藏 6 h 后,蛋白质量分数为 0.5%、1.0%、1.5% 的双重乳液发生分层;贮藏 12 h 后,蛋白质量分数为 2.0% 的双重乳液发生轻微分层,蛋白质量分数为 2.5% 和 3.0% 的乳液未出现分层现象;贮藏 96 h 后,蛋白质量分数为 3.0% 的乳液出现水析现象。乳化层高度随蛋白质量分数的增大而增大,与离心稳定性的结果相符。

### 2.6 W/O/W 双重乳液构建机制探讨

一步乳化法通过高速剪切将油水两相分散成微小液滴,span80 由于分子量较小先迅速吸附到水-油界面,随后蛋白质也吸附到界面上与 span80 形成复合膜<sup>[21]</sup>,二者在短时间内共同稳定中间态液滴。低蛋白浓度下,蛋白质与 span80 共同稳定水-油界面维持在该中间态,极少部分 span80 则形成了少量细小 W/O 型液滴被包裹在内部,形成双重乳液。升高蛋白质量分数,界面上蛋白吸附量升高,大分子蛋白质即可形成刚性界面膜,多余蛋白则在界面上发生堆积<sup>[22-23]</sup>。故在剪切过程中,span80 界面区域从二者共同分布的界面上向内收缩<sup>[24]</sup>,形成 span80 构建的 W/O 型内相液滴,此时 span80 与蛋白质各自形

成界面膜,形成相对稳定的 W/O/W 型双重乳液。体系中蛋白质量分数过高时,一方面中间态连续水相中部分未吸附蛋白被 span80 形成的液滴包裹,在 span80 向内收缩并在构建的液滴过程中与 span80 共同稳定 W/O 液滴界面,另一方面剪切过程中形成由蛋白质单独稳定的 O/W 型微小液滴,吸附于较大体积的 O/W 型液滴外侧,产生类 Pickering 效应,其构建机制见图 6。

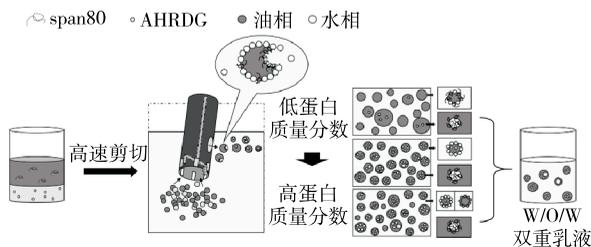


图 6 蛋白质质量分数对双重乳液的构建机制图

Figure 6 The construction mechanism of protein concentration on double emulsions

## 3 结论

以碱热改性米渣谷蛋白与 span80 作为乳化剂通过一步乳化法制备了较为稳定的双重乳液,并探究了蛋白质质量分数对双重乳液稳定性的影响及其机制。结果表明,蛋白质量分数对双重乳液稳定性具有明显影响。低蛋白浓度的双重乳液很快就出现失稳现象。随着蛋白质量分数的升高,表观黏度、储能模量、损耗模量有所提高,粒径分布向减小方向移动,乳液稳定性有所改善。当蛋白质量分数为 3.0% 时,乳液中未吸附蛋白造成了排斥絮凝,使得粒径分布中大粒径峰重新出现,稳定性下降。当蛋白质量分数为 2.5% 时,双重乳液的稳定性最佳。随着蛋白质量分数的增大,双重乳液稳定性增强,双重结构的液滴数增加且双重结构增强。内相液滴数量增多,说明蛋白质量分数的增大在增强乳液稳定性的同时使 span80 向内相发生迁移形成了明显的双重结构。但较大蛋白质量分数则会使体系稳定性下降,双重结构减弱。

### 参考文献

[1] ESFANJANI A F, JAFARI S M, ASSADPOOR E, et al. Nano-encapsulation of saffron extract through double-layered multiple emulsions of pectin and whey protein concentrate[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 165: 149-155.

[2] TIAN H Y, XIANG D, LI C F. Tea polyphenols encapsulated in W/O/W emulsions with xanthan gum-locust bean gum mixture: Evaluation of their stability and protection[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 175: 40-48.

[3] LIANG Z Q, CHU H, HOU Z Q, et al. W/O/W emulsions stabilized with whey protein concentrate and pectin: Effects on storage, pasteurization, and gastrointestinal viability of Lacticaseibacillus rhamnosus[J]. International Journal of Biological Macromolecules,

- 2023, 232: 123477.
- [4] HAN L, LU K Y, ZHOU S J, et al. Co-delivery of insulin and quercetin in W/O/W double emulsions stabilized by different hydrophilic emulsifiers[J]. *Food Chemistry*, 2022, 369: 130918.
- [5] 魏慧贤, 钟芳, 麻建国. 各相体积比对 W/O/W 复合乳状液性质的影响[J]. *食品与机械*, 2007, 23(6): 35-38, 47.
- WEI H X, ZHONG F, MA J G. Influences of volume ratios on stability of W/O/W multiple emulsions[J]. *Food & Machinery*, 2007, 23(6): 35-38, 47.
- [6] 许杨杨, 朱力杰, 刘秀英, 等. 蛋白种类对大豆皂苷-蛋白 W/O/W 型乳液稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(10): 36-42.
- XU Y Y, ZHU L J, LIU X Y, et al. Effect of protein type on the stability of soyasaponin-soybean protein water-in-oil-in-water type emulsion[J]. *Food Science*, 2022, 43(10): 36-42.
- [7] XING Y H, LI R Y, XUE L, et al. Double emulsion (W/O/W) gel stabilised by polyglycerol polyricinoleate and calcium caseinate as mangiferin carrier: Insights on formulation and stability properties [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(8): 5 268-5 279.
- [8] 刘冬雪, 肖茜, 刘成国, 等. 基于熊果酸的 W/O/W 型 Pickering 乳液制备方法[J]. *食品与机械*, 2023, 39(2): 176-181.
- LIU D X, XIAO Q, LIU C G, et al. Preparation of W/O/W Pickering emulsion based on ursolic acid[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(2): 176-181.
- [9] 翟晓梅. 一步法制备 W/O/W 型乳状液形成的关键因素研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2018: 2-3.
- ZHAI X M. Study on influencing factors of W/O/W multiple emulsions formed by one-step emulsification [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2018: 2-3.
- [10] 梁安源. pH 协同热处理对米渣蛋白-黄原胶复合物交互作用的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021: 9.
- LIANG A Y. Effect of pH synergistic heat treatment on the interaction of rice dregs protein-xanthan gum complex [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021: 9.
- [11] 耿肖倩, 龙肇, 刘宁. 米渣蛋白改性研究进展及其应用[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(17): 307-314.
- GENG X Q, LONG Z, LIU N. Research progress and application of rice dreg protein modification [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(17): 307-314.
- [12] 周小玲, 李娜, 张冬生. 高温高湿处理对小麦中蛋白质性质的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(7): 7-13.
- ZHOU X L, LI N, ZHANG D S. Effects of high-temperature and high-humidity treatment on the properties of the proteins from wheat flour[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(7): 7-13.
- [13] YU N X, JIANG C J, NING F J, et al. Protein isolate from *Stauntonia brachyanthera* seed: Chemical characterization, functional properties, and emulsifying performance after heat treatment[J]. *Food Chemistry*, 2021, 345: 128542.
- [14] 黄慧, 王传洋, 李世超, 等. 贮藏过程中米谷蛋白纤维聚集集体理化性质变化规律[J]. *食品与机械*, 2022, 38(6): 137-143.
- HUANG H, WANG C Y, LI S C, et al. Changes of physicochemical properties of rice glutelin fibril aggregates during storage[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(6): 137-143.
- [15] LIU L L, ZENG J H, SUN B Y, et al. Ultrasound-assisted mild heating treatment improves the emulsifying properties of 11S globulins[J]. *Molecules*, 2020, 25(4): 875.
- [16] LI L Y, CAI R Y, WANG P, et al. Manipulating interfacial behavior and emulsifying properties of myosin through alkali-heat treatment [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 85: 69-74.
- [17] 孙媛. 改良 Osborne 法分级分离四种小麦蛋白的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 34.
- SUN Y. Modification of Osborne method for fractionation of four wheat bran proteins[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015: 34.
- [18] 李鹤林. 米糠酸败诱导的蛋白质氧化对米糠蛋白乳液稳定性影响及机制研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022: 14.
- LI H L. Effects of rice bran rancidity-induced protein oxidation on the emulsion stability of rice bran protein and its mechanism[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022: 14.
- [19] 代克克, 陈碧芬, 黄丽华, 等. 蛋白质用量对黄油基淡奶油搅打前乳液性质及搅打性能的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(14): 23-29.
- DAI K K, CHEN B F, HUANG L H, et al. Effects of protein concentration on emulsion properties before whipping and whipping properties of butter-based whipping cream [J]. *Food Science*, 2020, 41(14): 23-29.
- [20] 张莉丽, 唐传核. 两步乳化法改善蛋白基高内相乳液稳定性[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(11): 180-187.
- ZHANG L L, TANG C H. Improving the stability of protein-based high internal phase emulsions by two-step emulsifying method[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(11): 180-187.
- [21] 程欢, 唐传核. 不同 HLB 值非离子型表面活性剂与粘蛋白的相互作用[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(9): 64-69.
- CHENG H, TANG C H. Interaction between nonionic surfactants with different HLB values and mucin[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(9): 64-69.
- [22] ASSADPOUR E, MAGHSOUDLOU Y, JAFARI S M, et al. Optimization of folic acid nano-emulsification and encapsulation by maltodextrin-whey protein double emulsions[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 86: 197-207.
- [23] FRANK K, KÖHLER K, SCHUCHMANN H P. Formulation of labile hydrophilic ingredients in multiple emulsions: Influence of the formulation's composition on the emulsion's stability and on the stability of entrapped bioactives [J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2011, 32(12): 1 753-1 758.
- [24] 颜东琼, 章绍兵, 和文昭. 吐温 20 对界面大豆分离蛋白的取代及其对乳液稳定性的影响[J]. *中国油脂*, 2020, 45(2): 63-68.
- YAN D Q, ZHANG S B, HE W S. Competitive substitution of soy protein isolate by Tween 20 at interface and its effect on emulsion stability[J]. *China Oils and Fats*, 2020, 45(2): 63-68.