

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241217003

引用格式: 雷森, 梁键, 刘爽, 等. 银耳多糖大豆油 Pickering 乳液的表征及稳定性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 157-164.

LEI M, LIANG J, LIU S, et al. Characterization and stability properties of soybean oil Pickering emulsion stabilized by *Tremella fuciformis* polysaccharide [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 157-164. (in Chinese with English abstract).

# 银耳多糖大豆油 Pickering 乳液的表征及 稳定性研究

雷森, 梁键, 刘爽, 吴小勇\*

(广东药科大学食品科学学院, 中山 528453)

**摘要:** **目的** 探究银耳多糖(*Tremella fuciformis* polysaccharide, TFP)对大豆油 Pickering 乳液的稳定作用及机制。**方法** 构建 TFP 大豆油 Pickering 乳液, 通过对乳液的粒径分布、流变学特性、热稳定性及贮藏稳定性等特性进行表征, 系统分析 TFP 浓度对乳液特性的影响。**结果** 显微观察和粒径分析表明, 当 TFP 浓度为 0.5% 时, 液滴尺寸最小, 均一性最高。流变学分析显示 TFP 大豆油 Pickering 乳液呈假塑性流体特征, 乳液黏度随温度升高明显下降, 而 TFP 浓度提高则增加了乳液的黏度, 尤其当剪切速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时, TFP 浓度为 0.5% 时乳液表观黏度达  $516.4400 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , 是浓度为 0.1% 时的 45 倍。在 TFP 浓度为 0.4% 和 0.5% 时, 经  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  热处理 30 min 后, 乳液稳定性仍达  $(99.03 \pm 0.15)\%$  和  $(91.38 \pm 0.70)\%$ , 粒径保持稳定, 表明乳液的热稳定性较好; 储藏 14 d 后, 0.5% 浓度的 TFP Pickering 乳液无分层现象, 显示出优异的贮藏稳定性。TFP 大豆油 Pickering 乳液的稳定性与 TFP 浓度呈正相关。**结论** TFP 通过界面膜增强和空间位阻效应抑制液滴聚集, 从而提高 Pickering 乳液的稳定性。本研究可为多糖类乳化稳定剂的开发应用提供理论支持和实验参考。

**关键词:** 银耳多糖; Pickering 乳液; 乳液稳定性; 流变学

## Characterization and stability properties of soybean oil Pickering emulsion stabilized by *Tremella fuciformis* polysaccharide

LEI Miao, LIANG Jian, LIU Shuang, WU Xiao-Yong\*

(School of Food Science, Guangdong Pharmaceutical University, Zhongshan 528453, China)

**ABSTRACT: Objective** To explore the stabilizing effects and mechanism of *Tremella fuciformis* polysaccharide (TFP) on soybean oil Pickering emulsion. **Methods** In this study, TFP was used to construct soybean oil Pickering emulsion. The effects of TFP concentration on emulsion stability were systematically analyzed by characterizing the particle size distribution, rheological properties, thermal stability and storage stability of the emulsion. **Results** Microscopic observation and particle size analysis indicated that when the TFP concentration was 0.5%, the droplet size was the

收稿日期: 2024-12-17

基金项目: 广东省教育厅项目(2023KTSCX055)

第一作者: 雷森(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为功能性食品。E-mail: 17817584087@163.com

\*通信作者: 吴小勇(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能性食品。E-mail: perryfe@163.com

smallest and the uniformity was the highest. In addition, rheological analysis showed that the Pickering emulsion was characterized by pseudoplastic fluid, and the viscosity of the emulsion decreased significantly with the increase of temperature, while the increase of TFP concentration increased the viscosity of the emulsion. Especially when the shear rate was  $0.1 \text{ s}^{-1}$ , the apparent viscosity of 0.5% TFP emulsion reached  $516.4400 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , which was 45 times of 0.1% emulsion. When the TFP concentration were 0.4% and 0.5%, after heating treatment at  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  for 30 min, the emulsion stability still reached  $(99.03 \pm 0.15)\%$  and  $(91.38 \pm 0.70)\%$ , and the particle size remained stable, showing excellent thermal stability. After 14 days of storage, there was no stratification appeared in the 0.5% TFP emulsion, exhibiting excellent storage stability. The results showed that the concentration of TFP was positively correlated with the stability of Pickering emulsion. **Conclusion** TFP inhibits droplet aggregation through interfacial film enhancement and steric hindrance effects, thereby improving the stability of Pickering emulsions. This study provides theoretical support and experimental reference for the development and application of polysaccharides stabilizers in Pickering emulsions.

**KEY WORDS:** *Tremella fuciformis* polysaccharide; Pickering emulsion; emulsion stability; rheology

## 0 引言

Pickering 乳液是一种由微米或纳米级固体颗粒稳定油水界面的乳液体系,其制备无需大量使用化学表面活性剂,在绿色环保,安全健康方面具有显著优势<sup>[1]</sup>。目前,用于稳定 Pickering 乳液的物质多集中于大分子蛋白和蛋白-多糖复合物<sup>[2]</sup>,包括玉米醇溶蛋白/果胶复合物<sup>[3]</sup>、小麦醇溶蛋白/果胶复合物<sup>[4]</sup>、乳清分离蛋白和菊粉的复合物<sup>[5]</sup>以及大豆分离蛋白-壳聚糖复合物等<sup>[6]</sup>。相较于大分子蛋白和蛋白-多糖复合物,天然多糖颗粒因其来源可再生、生物相容性好、制备工艺简便、成本低、安全环保等特点,在 Pickering 乳液的制备和应用方面具有更大的潜力<sup>[7]</sup>。基于天然多糖颗粒的 Pickering 乳液研究,不仅为开发绿色、安全的乳化体系提供了科学依据,也为推动可持续材料在乳液稳定剂领域的应用拓展了新方向<sup>[8-9]</sup>。

银耳(*Tremella fuciformis*),又名白木耳,为多孔菌科银耳属(*Tremella*)真菌银耳的干燥菌核,是一种深受我国人民喜爱的食用菌。银耳中含有丰富的银耳多糖(*Tremella fuciformis* polysaccharides, TFP),具有抗氧化、免疫调节等生理活性<sup>[10-11]</sup>。TFP 是一种由葡萄糖、甘露糖和木糖等组成的酸性杂多糖<sup>[12-13]</sup>。作为天然来源的高分子化合物,因其独特的物理化学性质和生物活性,TFP 在食品、化妆品和医药领域展现了广泛的应用潜力<sup>[14-15]</sup>。HOU 等<sup>[16]</sup>研究表明,与阿拉伯树胶、果胶和羧甲基纤维素相比,银耳粗多糖具有更好的乳化活性和冻融稳定性。TIAN 等<sup>[17]</sup>研究发现,TFP 在不同 pH 条件下均具有较高的乳化稳定性,适合用于长期贮藏乳液的稳定剂。当前,关于 TFP 与大豆油构建 Pickering 乳液的研究鲜有报道,TFP 浓度对 Pickering 乳液特性及其稳定性的影响也未见系统阐明。本研究利用 TFP 构建大豆油 Pickering 乳液,探究 TFP 浓度对 Pickering 乳液粒径、流变学特性以及热稳定性、贮藏稳定性的影响,

以期期为开发功能性食品乳液体系提供新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、试剂与设备

银耳[无限极(中国)有限公司提供];银耳多糖(实验室自制,采用苯酚硫酸法测得其总糖含量为  $779.7 \text{ mg/g}$ ,体积排阻色谱法测得其重均分子量为  $75.68 \times 10^4 \text{ g/mol}$ );大豆油[益海嘉里(武汉)粮油工业有限公司,批号:20240612]。

十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)(电泳级,国药集团化学试剂有限公司)。

IKA T25 高剪切分散乳化机[艾卡(广州)仪器设备有限公司];BSA224S 电子天平[精度  $0.0001 \text{ g}$ ,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司];MCR102 模块化智能高级旋转流变仪(奥地利 Anton Paar 公司);SB-25-12DT 超声波清洗机(宁波新芝生物科技有限公司);BX53 荧光显微镜(日本 Olympus 公司);Nano-ZS 激光粒度分析仪(英国 Malvern 公司);SC-3610 低速离心机(安徽中科中佳科学仪器有限公司);L5S 紫外-可见分光光度计(上海仪电分析仪器有限公司)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 TFP 的制备

参照文献[18]方法,采用实验室前期相关研究优化得到的多糖制备方法,干燥银耳子实体经粉碎,过 80 目筛,然后在提取温度  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (沸水浴加热)、液料比 30:1 (mL/g)、搅拌转速  $200 \text{ r/min}$  的条件下水提 70 min,水提液经浓缩、醇沉、精制、冷冻干燥得 TFP 冻干粉。

#### 1.2.2 Pickering 乳液的制备

参照文献[19]方法,精确称取 TFP 冻干粉  $0.25 \text{ g}$ ,去离子水溶解并定容至  $50 \text{ mL}$ ,制备浓度为 0.5% (m:V)的 TFP 溶液,然后加水稀释制得浓度分别为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%的 TFP 溶液,将不同浓度的 TFP 溶液与大豆油

按 8:2 (V:V) 的比例混合, 然后在 10000 r/min 下高速剪切均质 2 min, 制得不同 TFP 浓度的 Pickering 乳液。

### 1.2.3 Pickering 乳液的显微观察

取乳液 5  $\mu\text{L}$ , 置于载玻片, 缓慢盖上盖玻片, 然后采用荧光显微镜, 在 100 倍物镜下观察, 拍照。

### 1.2.4 Pickering 乳液的粒径测定

参考文献[20]稍作修改, 取乳液 20  $\mu\text{L}$ , 用去离子水稀释 500 倍, 采用 Nano-ZS 激光粒度仪测定乳液粒径(设定温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ , 连续相水的折射率为 1.333, 分散相 TFP 的折射率为 1.336)。

### 1.2.5 Pickering 乳液的流变测量

#### (1) 静态流变测定

参考文献[21]方法, 取乳液 20 mL 置于仪器测试筒内, 设置应变范围为 0.01%~10.00%, 狭缝间距为 1.0 mm, 温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ , 剪切速率范围为 0.01~1000.00  $\text{s}^{-1}$  进行测定。收集不同流动曲线的实验数据, 按公式(1)拟合幂律模型:

$$\tau = K\gamma^n \quad (1)$$

式中,  $\gamma$  为剪切速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\tau$  为剪切应力, Pa;  $K$  为稠度系数,  $\text{Pa} \cdot \text{sn}$ ;  $n$  为流动行为指数。

#### (2) 动态流变测定

参考文献[22]方法, 经预实验确定样品线性黏弹区后, 将测试应变设为 1%, 角频率扫描测试的范围为 1~100 rad/s, 在温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ , 通过测量样品的弹性模量( $G'$ )和黏性模量( $G''$ )进行频率扫描测试。

### 1.2.6 Pickering 乳液的稳定性测定

#### (1) Pickering 乳液的热稳定性

参考文献[23]方法稍作修改。准确量取 10 mL 不同样品于比色管中, 95  $^{\circ}\text{C}$  下水浴加热 30 min。以 0.1% SDS 溶液为空白, 在波长 500 nm 处测定加热前后乳液(稀释 500 倍)的吸光度值  $A_0$  和  $A_1$ , 按公式(2)计算乳液稳定性指数(emulsion stability index, ESI)。

$$\text{ESI}/\% = \frac{A_1}{A_0} \times 100\% \quad (2)$$

#### (2) Pickering 乳液的储藏稳定性

参考文献[24]方法稍作修改。取 1 mL 不同乳液样品于 EP 管中, 密闭, 室温下静置 14 d 后观察乳液分层情况, 并测定样品的乳析指数(creaming index, CI), 按公式(3)计算 CI:

$$\text{CI}/\% = \frac{H_{E3}}{H_{W3}} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $H_{W3}$  为乳化液总高度, cm;  $H_{E3}$  为下层乳清层高度, cm。

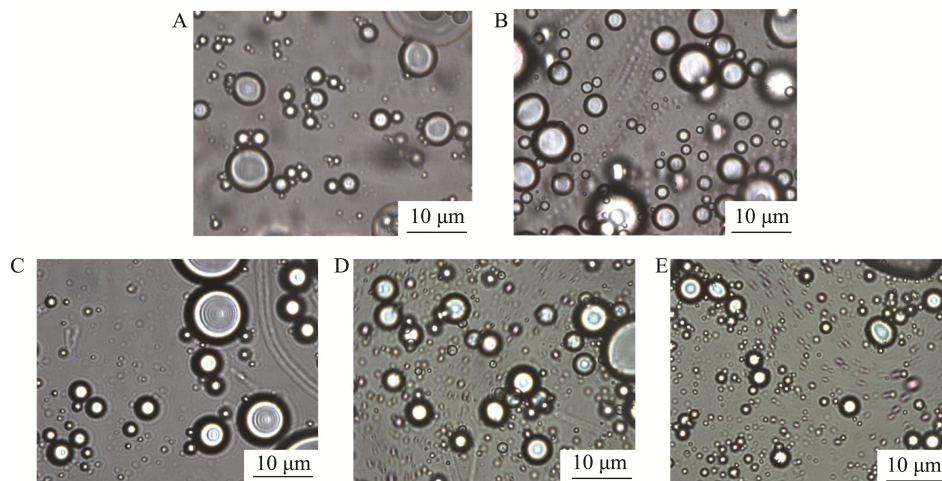
## 1.3 数据处理

所有实验重复测定 3 次, 结果用平均值和标准偏差表示; 运用 Microsoft Excel 2019 对实验数据进行分析处理, 采用 GraphPad prism 8.0.2 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 TFP 浓度对 Pickering 乳液显微形态的影响

不同浓度 TFP 大豆油 Pickering 乳液的显微形态见图 1。当 TFP 浓度为 0.1%~0.3% 时, 液滴多呈边缘清晰、形状规则的圆形结构, 但液滴尺寸差异较大; 当 TFP 浓度达到 0.4%~0.5% 时, 液滴尺寸减小且分布趋于均匀, 当 TFP 浓度为 0.5% 时, 液滴尺寸最小, 均一性最高。这是由于在低浓度条件下, 液滴表面的颗粒覆盖率不足, 导致液滴在相互碰撞过程中未被多糖覆盖的部分容易发生聚结, 导致液滴的粒径增大。随着多糖浓度的升高, TFP 颗粒在油滴表面形成了致密均匀的界面膜, 有效覆盖油滴并防止液滴间聚集<sup>[25]</sup>。TFP 浓度的增加进一步增强 Pickering 乳液的稳定性, 一方面, 界面颗粒覆盖率提高; 另一方面, 体系黏度的上升减缓了乳液中油滴的运动速度, 从而降低了液滴间的碰撞概率<sup>[25]</sup>, 这一规律与 CASTEL 等<sup>[26]</sup>研究结果相一致。即 TFP 在 Pickering 乳液中展现出典型的黏度驱动效应。



注: A. 0.1%; B. 0.2%; C. 0.3%; D. 0.4%; E. 0.5%。

图 1 TFP 浓度对 Pickering 乳液微观结构的影响( $\times 1000$ )

Fig.1 Effects of TFP concentrations on the microstructure of Pickering emulsion ( $\times 1000$ )

## 2.2 TFP 浓度对 Pickering 乳液粒径的影响

不同浓度 TFP 大豆油 Pickering 乳液的粒径及其多分散指数(polymer dispersity index, PDI)见图 2。从图 2 可以看出,乳液平均粒径随多糖浓度的增加而减小, PDI 则先增大后减小, 但差异均没有统计学意义。当 TFP 浓度较小, 尚未达到临界胶束浓度时, 油滴表面吸附的 TFP 量不足以完全覆盖油滴, 导致油滴易聚集并形成较大的 PDI<sup>[27]</sup>。随着体系 TFP 浓度的增加, 有更多 TFP 可吸附在油滴表面形成界面膜, 因此可以形成粒径更小, 分布更均匀的 Pickering 乳液。此外, TFP 浓度增加导致分子间相互作用力增强, 形成更为致密均匀的网状结构, 减小了粒度分布的不均匀性, 降低了 PDI 且提升了 Pickering 乳液的整体稳定性。本研究结果表明, TFP 稳定 Pickering 乳液的机制在于: TFP 浓度能够在油滴表面形成均匀致密的界面膜, 通过氢键和空间位阻效应增强乳液稳定性<sup>[28]</sup>。

## 2.3 Pickering 乳液的流变学性质

### 2.3.1 黏度曲线和流动曲线

图 3A 为不同 TFP 浓度 Pickering 乳液的黏度曲线, 从

图 3A 可知, 乳液的黏度均随剪切速率增加而下降, 呈现剪切稀化行为, 符合假塑性流体特性<sup>[29]</sup>。此外, 乳液的表观黏度随着 TFP 浓度升高而升高, 在剪切速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时, TFP 浓度为 0.1% 的 Pickering 乳液初始黏度为  $11.4070 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , 而 0.5% 浓度时达到  $516.4400 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , 这可能是由于糖链和羟基基团增加导致分子间作用力增强, 导致乳液流动性下降和剪切黏度显著提高<sup>[30]</sup>。TFP 浓度为 0.5% 的黏度是浓度为 0.1% 时的 45 倍, 进一步证明浓度对乳液结构稳定性的贡献。综上所述, TFP 浓度是调控 Pickering 乳液黏度和稳定性的关键因素, 较高浓度能显著增强乳液的界面稳定性。

图 3B 为不同 TFP 浓度下 Pickering 乳液的流动曲线, 从图 3B 可以看出, 剪切应力随剪切速率增加而上升, 随 TFP 浓度的提高, 而逐渐增大; 当 TFP 浓度增加到 0.5% 时, 应力值达到最高。这可能是因为高浓度 TFP 在油水界面上形成了更为致密的颗粒界面层或空间网络结构, 这种结构可以更有效地抑制乳滴间的聚集与分离, 从而提高乳液的整体稳定性。因此, TFP 浓度的增加有助于提升 Pickering 乳液的稳定性。

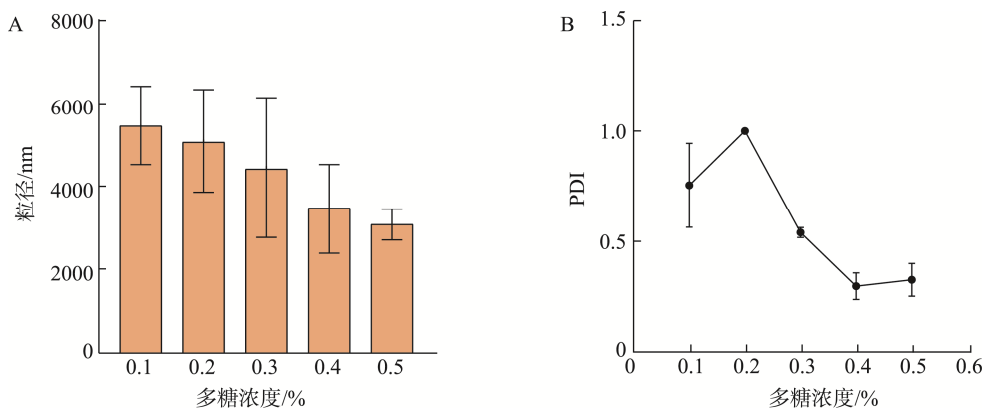


图 2 不同 TFP 浓度 Pickering 乳液的粒径(A)和 PDI (B)

Fig.2 Particle size (A) and PDI (B) of Pickering emulsions with different TFP concentrations

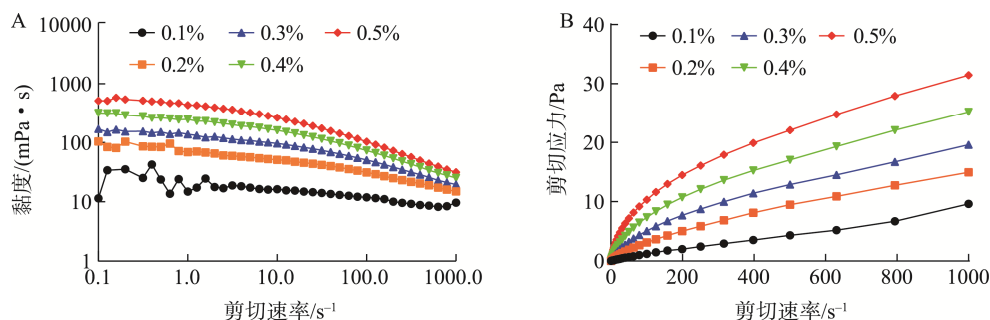


图 3 不同浓度 TFP Pickering 乳液的黏度曲线(A)和流动曲线(B)

Fig.3 Viscosity curve (A) and flow curve (B) of TFP Pickering emulsion at different concentrations

表 1 为经幂律模型拟合的流变参数。结果表明, 当 TFP 浓度从 0.1% 增加到 0.5% 时,  $K$  逐渐增大, 表明乳液的黏度随着 TFP 浓度的升高而增大。相关系数  $r^2$  均大于 0.9900, 表明剪切应力与剪切速率之间的关系能够良好地拟合幂律模型。在 0.1% 至 0.5% 范围内, Pickering 乳液的  $n$  值均小于 1, 进一步证明该体系均为非牛顿流体, 这与黏度曲线结果一致(图 3A)。

表 1 不同浓度 TFP Pickering 乳液的幂律模型拟合参数  
Table 1 Power-law model fitting parameters of TFP Pickering emulsions with different concentrations

质量浓度 /%	$K/(\text{Pa} \cdot \text{sn})$	$n$	相关系数( $r^2$ )
0.1	0.0120	0.9568	0.9914
0.2	0.1287	0.6893	0.9996
0.3	0.3026	0.6038	0.9986
0.4	0.5383	0.5577	0.9983
0.5	0.9406	0.5095	0.9978

2.3.2 频率扫描

图 4A~E 展示了不同 TFP 浓度下 Pickering 乳液在 1% 应变条件下的储能模量( $G'$ )与损耗模量( $G''$ )随频率变化的关系。从图 4 示结果可以看出, 随着频率增加, 不同 TFP 浓度乳液的  $G'$  和  $G''$  在频率变化中呈现出差异性, 说明 Pickering 乳液表现出不同的黏弹性特性<sup>[31]</sup>。在 TFP 浓度为 0.1% 的乳液中, 低频下  $G''$  大于  $G'$ , 当频率达到 61.06 rad/s 时  $G'$  和  $G''$  曲线相交, 形成凝胶点, 标志着样品从液体行为过渡至弹性主导的弱凝胶状态<sup>[32]</sup>。这一现象表明, 在低浓度 TFP 体系中, 液滴间非共价相互作用增强, 局部形成了弱凝胶网络<sup>[33]</sup>。相较之下, TFP 浓度为 0.2%~0.5% 时,  $G'$

始终大于  $G''$ , 显示出典型的流体特性。在 0.2% 和 0.3% TFP 乳液中, 尽管  $G''$  随频率增加而持续上升, 但  $G'$  在高频区域略有下降, 表明弹性贡献在较高频率下有所减弱。而在 0.4%~0.5% 浓度的乳液中,  $G'$  和  $G''$  基本上均随频率增加持续上升, 反映出较高浓度乳液在黏弹性支撑和界面稳定性方面具有优势。图 4F 展示了不同浓度 TFP 乳液在角频率下损耗角正切的变化。从图 4F 中看出, 随着振荡频率增加, 当 TFP 浓度为 0.1% 时,  $\tan\delta < 1$ , 表现为弹性行为, 具有弱凝胶的性质。当 TFP 浓度  $\geq 0.2\%$  时,  $G''$  始终大于  $G'$ ,  $\tan\delta > 1$ , 显示出典型的流体特性。综上所述, 随着 TFP 浓度的增加, 乳液整体表现出更高的黏性主导行为以及更强的界面结构韧性, 有助于提高 Pickering 乳液的稳定性。

2.3.3 温度对 Pickering 乳液黏度和流动性的影响

选取中间浓度进行温度对 Pickering 乳液黏度和流动性影响研究, 结果见图 5。图 5A 展示了 TFP 浓度为 0.3% 的 Pickering 乳液在不同温度下的黏度曲线。由图 5A 可知, TFP 乳液具有高黏度的特点, 且乳液的黏度随着温度升高逐步下降。温度升高乳液分子的布朗运动加强, 液滴间黏聚性减弱, 因此黏度下降。这与 GUO 等<sup>[34]</sup>的研究报道一致。图 5B 展示了 TFP 浓度为 0.3% 的 Pickering 乳液在不同温度下的流动曲线, 从图 5B 中可以看出 TFP 乳液的剪切应力随剪切速率增加而增加。采用“幂律定律”, 对不同温度下 TFP Pickering 乳液的流动数据进行拟合, 流变特性参数见表 2。结果表明, 乳液的剪切应力与剪切速率的拟合曲线具有较高相关系数( $r^2 > 0.9870$ ), 线性关系较好。不同温度下, 乳液的流动指数均小于 1, 具有剪切稀释现象, 即流体的表观黏度随剪切速率的增加而减小, 属于典型的假塑性流体。随温度增加, 乳液稠度系数  $K$  逐渐下降, 这与图 5 观察的 Pickering 表观黏度随温度变化的规律一致。

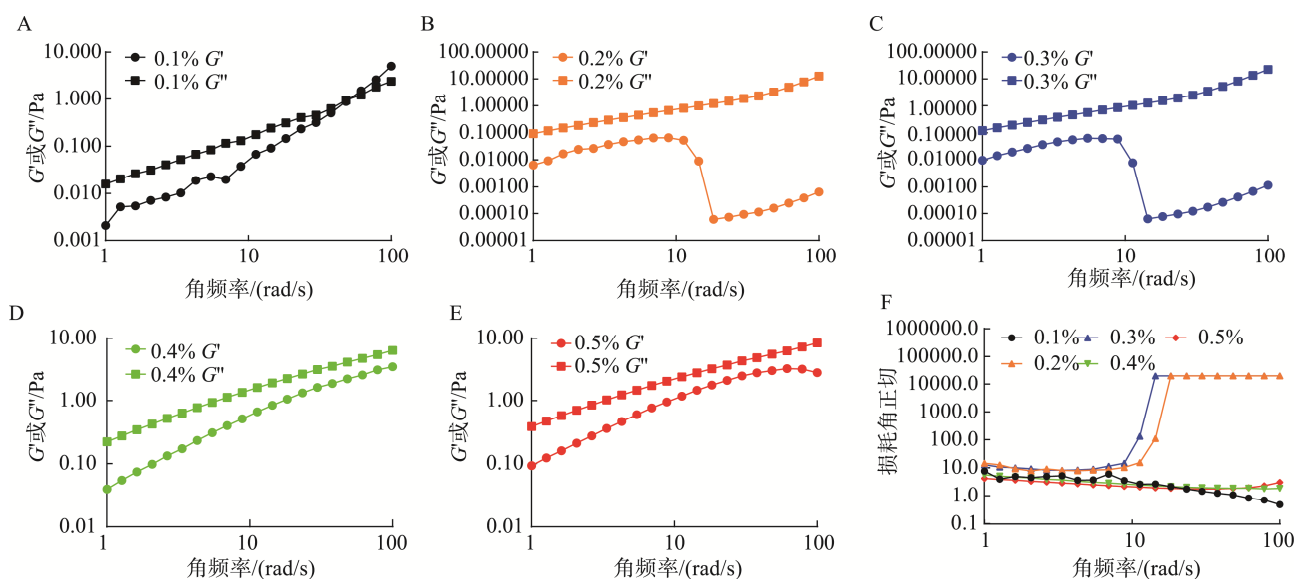


图 4 不同浓度 TFP Pickering 乳液的频率扫描结果  
Fig.4 Frequency scan results of TFP Pickering emulsion with different concentrations

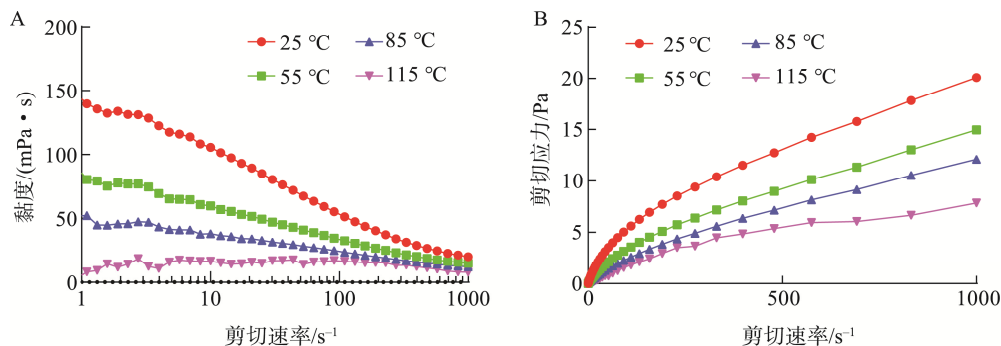


图 5 TFP 浓度为 0.3% 的 Pickering 乳液在不同温度下的黏度曲线(A)和流动曲线(B)

Fig.5 Viscosity curves (A) and flow curves (B) of 0.3% TFP Pickering emulsion at different temperatures

表 2 TFP 浓度为 0.3% 的 Pickering 乳液在不同温度下的幂律模型拟合参数

Table 2 Power-law model fitting parameters of 0.3% TFP Pickering emulsion at different temperatures

温度/°C	$K/(\text{Pa} \cdot \text{sn})$	$n$	相关系数( $r^2$ )
25	0.3261	0.5959	0.9988
55	0.1557	0.6592	0.9993
85	0.0916	0.7067	0.9996
115	0.0773	0.6745	0.9874

## 2.4 Pickering 乳液的热稳定性

不同 TFP 浓度下, 热处理对粒径、乳液稳定性的影响如图 6 所示, 结果表明, TFP 浓度对乳液热稳定性具有显著调控作用。低浓度(0.1%~0.3%) Pickering 乳液在热处理后, 随着浓度降低 ESI 下降, 粒径增大, 表明热处理削弱了低浓度 Pickering 乳液的稳定性; 而高浓度 0.4%和 0.5%乳液经 95 °C 加热后 ESI 分别为(99.03±0.15)%和(91.38±0.70)%, 与加热前基本一致, 显示出较强的热稳定性。同时, 随着浓度的增加, 热处理对 Pickering 乳液粒径和粒径的影响逐渐减小。上述现象可归因于温度升高分子运动加剧, 液滴间碰撞频率增加。当多糖浓度不足时, 界面膜未能完全包裹油滴, 导致液滴易于聚集和沉淀, 粒径增大, 稳定性降低; 而在高浓度下, TFP 在油滴表面形成均匀致密的界面膜, 粒径减小同时 ESI 增大, TFP 有效抵抗热处理引发的液

滴聚集, 确保 Pickering 乳液稳定性不受加热的影响。综上, TFP 在 0.4%~0.5%浓度下, Pickering 乳液表现出优异的热稳定性。

## 2.5 Pickering 乳液的贮藏稳定性

图 7 展示了不同 TFP 浓度下 Pickering 乳液贮藏 14 d 外观情况。由图 7 中可以观察到, TFP 浓度与 Pickering 乳液稳定性呈正相关。图 7A 中, 经过静置 1 h 后, 各个浓度的 TFP 溶液均能有效稳定 Pickering 乳液; 图 7B 中, 0.5% 浓度的 TFP Pickering 乳液外观几乎保持不变, 没有明显的相分离现象。这表明高浓度 TFP 具有较好的乳化效果, 其制备得到的 Pickering 乳液表现出优异的贮藏稳定性。

图 8 展示了不同 TFP 浓度下, Pickering 乳液的 CI 值随贮藏时间的变化情况。从图 8 中可以看出, 随着贮藏时间的延长, 乳液分层现象逐渐加剧, 但较高浓度的 TFP 减缓了相分离的速度和程度。具体而言, 当浓度为 0.1%~0.3%时, 相分离在 1 d 内发生急剧变化, 该浓度范围内 CI 从 0 分别增加到 70.75%、63.21%、55.10%; 而在 TFP 浓度为 0.5%时, 贮藏 14 d 后乳液的 CI 值仍保持为 0。分析表明, 提升 TFP 浓度可通过两种机制增强 Pickering 乳液稳定性: (1)高浓度 TFP 形成更厚的界面膜, 为油滴提供更强的空间位阻效应; (2)TFP 提高 Pickering 乳液黏度, 显著抑制液滴运动。以上结果表明, TFP 在较高浓度下可延长 Pickering 乳液的贮藏稳定性。

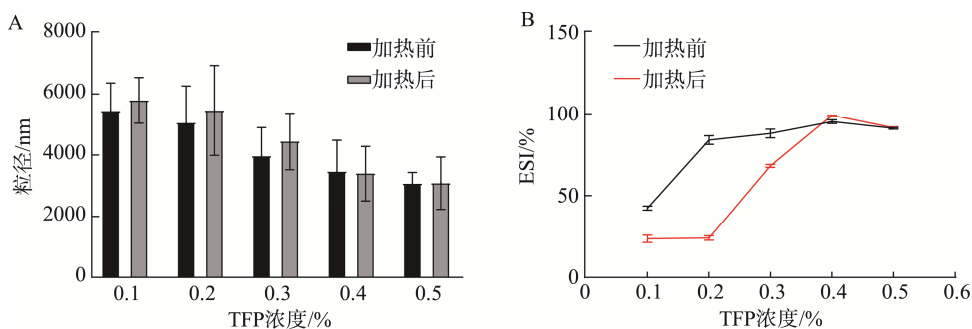


图 6 热处理对 TFP Pickering 乳液粒径(A)和 ESI (B)的影响

Fig.6 Effects of heat treatment on the particle size (A) and ESI (B) of TFP Pickering emulsions



注: A. 1 h; B. 14 d

图 7 TFP Pickering 乳液的表现情况

Fig.7 Appearance of TFP Pickering emulsion

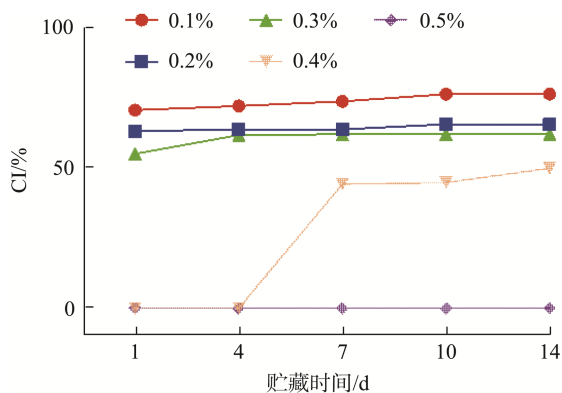


图 8 不同浓度 TFP Pickering 乳液的贮藏稳定性

Fig.8 Storage stability of TFP Pickering emulsions with different concentrations

### 3 结 论

本研究对 TFP 大豆油 Pickering 乳液进行了初步表征并探讨了其稳定机制, 重点分析了多糖浓度对乳液显微形态、粒径分布、流变特性、热稳定性及贮藏稳定性的调控效应。本研究结果表明, TFP 在大豆油 Pickering 乳液中展现出典型的黏度驱动效应。TFP 能够在油滴表面形成均匀致密的界面膜, 推测是通过氢键和空间位阻效应增强大豆油 Pickering 乳液的稳定性。TFP 浓度是调控大豆油 Pickering 乳液黏度和稳定性的关键因素, 在 TFP 浓度为 0.5% 时, 能够显著改善大豆油 Pickering 乳液界面结构的均匀性和强度, 增强乳液的热稳定性, 并有助于提高乳液的长期储存稳定性。本研究为 TFP 作为天然乳化剂在食品体系中的应用提供了实验参考。

#### 参考文献

[1] WU J, MA GH. Recent studies of Pickering emulsions: Particles make the

difference [J]. *Small*, 2016, 12(34): 4633–4648.

- [2] YAN X, MA C, CUI F, *et al.* Protein-stabilized Pickering emulsions: Formation, stability, properties, and applications in foods [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 103: 293–303.
- [3] 吴滋灵, 尹寿伟, 党华, 高内相 Pickering 乳液荷载生物活性物质的构建[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(8): 3367–3373.
- WU ZL, YIN SW, DANG H. Fabrication of high internal phase Pickering emulsion loaded with bioactive substances [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(8): 3367–3373.
- [4] 许雪儿, 王孟姣, 张开云, 等. 小麦醇溶蛋白纳米颗粒稳定皮克林乳液的研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(8): 148–154.
- XU XER, WANG MJ, ZHANG KY, *et al.* Research on Pickering emulsion stabilized by gliadin nanoparticles [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(8): 148–154.
- [5] 陈云洁, 徐艳阳, 周千了, 等. 超声辅助均质制备负载人参皂苷功能型 Pickering 乳液的工艺优化[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(23): 196–205.
- CHEN YJ, XU YY, ZHOU QL, *et al.* Optimization of ultrasonic assisted homogenization for preparation of functional Pickering emulsion loaded with ginsenoside [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(23): 196–205.
- [6] YANG H, SU Z, MENG X, *et al.* Fabrication and characterization of Pickering emulsion stabilized by soy protein isolate-chitosan nanoparticles [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 247: 116712.
- [7] REHMAN A, JAFARI SM, TONG Q, *et al.* Drug nanodelivery systems based on natural polysaccharides against different diseases [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, 284: 102251.
- [8] CUI F, ZHAO S, GUAN X, *et al.* Polysaccharide-based Pickering emulsions: Formation, stabilization and applications [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 119: 106812.
- [9] SHAO P, FENG J, SUN P, *et al.* Recent advances in improving stability of food emulsion by plant polysaccharides [J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109376.
- [10] DENG W, WU L, XIAO Z, *et al.* Structural characterization and anti-inflammatory activity of polysaccharides from *Tremella fuciformis* on monosodium urate-stimulated RAW264.7 macrophages [J]. *Foods*, 2023, 12(24): 4398.
- [11] FU GQ, LI YX, HE Y, *et al.* Extraction, structure and bioactivity of *Tremella fuciformis* polysaccharides: A review [J]. *Food & Medicine Homology*, 2024, 2(2025): 9420038.
- [12] SHI X, FENG J, WANG S, *et al.* Primary structure, physicochemical properties, and digestive properties of four sequentially extracted polysaccharides from *Tremella fuciformis* [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 115: 105005.
- [13] YUAN H, DONG L, ZHANG Z, *et al.* Production, structure, and bioactivity of polysaccharide isolated from *Tremella fuciformis* [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022, 11(4): 1010–1017.
- [14] WOZNIAK B, GHUDZINSKA J, SZCZYGLEWWSKA P, *et al.* Optimization of the composition of a cosmetic formulation containing *Tremella fuciformis* extract (fungi) [J]. *Cosmetics*, 2023, 10(3): 82.
- [15] YAN Y, WANG M, CHEN N, *et al.* Isolation, structures, bioactivities,

- application and future prospective for polysaccharides from *Tremella aurantialba*: A review [J]. *Frontiers in Immunology*, 2022, 13: 1091210.
- [16] HOU F, YANG S, MA X, *et al.* Characterization of physicochemical properties of oil-in-water emulsions stabilized by *Tremella fuciformis* polysaccharides [J]. *Foods*, 2022, 11(19): 3020.
- [17] TIAN L, ROOS YH, GOMEZ LG, *et al.* Tremella fuciform polysaccharides: Extraction, physicochemical, and emulsion properties at different pHs [J]. *Polymers*, 2023, 15(7): 1771.
- [18] 许海林, 吴小勇, 聂少平, 等. 黑木耳多糖提取工艺优化及其对小鼠巨噬细胞功能的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(10): 100–104.
- XU HL, WU XY, NIE SP, *et al.* Optimization of extraction conditions of crude polysaccharide from *Auricularia auricular* and its effects on the functions of mouse peritoneal macrophages [J]. *Food Science*, 2016, 37(10): 100–104.
- [19] WANG H, ZHANG M, HU J, *et al.* Sustainable preparation of surface functionalized cellulose nanocrystals and their application for Pickering emulsions [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 297: 120062.
- [20] HAMDANI AM, WANI IA, BHAT NA. Sources, structure, properties and health benefits of plant gums: A review [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 135: 46–61.
- [21] KONGJAROEN A, METHACANON P, GAMONPILAS C. On the assessment of shear and extensional rheology of thickened liquids from commercial gum-based thickeners used in dysphagia management [J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 316: 110820.
- [22] WANG X, CHEN Y, DONG M, *et al.* Comparisons of shear and extensional rheological properties of *Tremella* polysaccharide with commercial thickeners at different IDDSI levels for dysphagia management [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 156: 110377.
- [23] 缪雨雁, 曹燕, 立静芝, 等. 不同黏度多糖阿拉伯胶和瓜尔胶对肌原纤维蛋白乳化性质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(6): 57–64.
- MIAO YY, CAO Y, LI JZ, *et al.* Effects of arabic gum and guar gum, polysaccharides with different viscosity, on the emulsifying properties of myofibrillar protein [J]. *Food Science*, 2023, 44(6): 57–64.
- [24] AHSAN HM, ZHANG X, LI Y, *et al.* Surface modification of microcrystalline cellulose: Physicochemical characterization and applications in the stabilization of Pickering emulsions [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 132: 1176–1184.
- [25] HUANG X, KAKUDA Y, CUI W. Hydrocolloids in emulsions: Particle size distribution and interfacial activity [J]. *Food Hydrocolloids*, 2001, 15(4-6): 533–542.
- [26] CASTEL V, RUBIOLO AC, CARRARA CR. Droplet size distribution, rheological behavior and stability of corn oil emulsions stabilized by a novel hydrocolloid (Brea gum) compared with gum arabic [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63: 170–177.
- [27] ZHAO J, WEI T, WEI Z, *et al.* Influence of soybean soluble polysaccharides and beet pectin on the physicochemical properties of lactoferrin-coated orange oil emulsion [J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 44: 443–452.
- [28] XU Y, WANG S, XIN L, *et al.* Interfacial mechanisms, environmental influences, and applications of polysaccharide-based emulsions: A review [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 293: 139420.
- [29] YUE M, HUANG M, ZHU Z, *et al.* Effect of ultrasound assisted emulsification in the production of Pickering emulsion formulated with chitosan self-assembled particles: Stability, macro, and micro rheological properties [J]. *Food Science and Technology*, 2022, 154: 112595.
- [30] BAI L, HUAN S, LI Z, *et al.* Comparison of emulsifying properties of food-grade polysaccharides in oil-in-water emulsions: Gum arabic, beet pectin, and corn fiber gum [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 66: 144–153.
- [31] TORRES MD, HALLMARK B, WILSON DI. Effect of concentration on shear and extensional rheology of guar gum solutions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 40: 85–95.
- [32] WU Y, CUI SW, WU J, *et al.* Structure characteristics and rheological properties of acidic polysaccharide from boat-fruited sterulia seeds [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 88(3): 926–930.
- [33] WANG W, JI S, XIA Q. Influence of carboxymethyl cellulose on the stability, rheology, and curcumin bioaccessibility of high internal phase Pickering emulsions [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 334: 122041.
- [34] GUO Q, ZHU X, ZHEN W, *et al.* Rheological properties and stabilizing effects of high-temperature extracted flaxseed gum on oil/water emulsion systems [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106289.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)