公伶俐, 楚晨俐, 杨晗, 等. 葵花籽蛋白-黄原胶 Pickering 乳液的制备与性质 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(8): 109−121. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040274
GONG Lingli, CHU Chenli, YANG Han, et al. Preparation and Properties of Sunflower Seed Protein-Xanthan Gum Pickering Emulsion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(8): 109−121. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040274

·研究与探讨·

葵花籽蛋白-黄原胶 Pickering 乳液的制备与性质

公伶俐, 楚晨俐, 杨　晗, 努尔则巴·努尔麦麦提, 布买丽亚木·买买提吐逊, 孔令明*
（新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052）

摘　要: 为提高葵花籽蛋白的高值化利用，以葵花籽蛋白（Sunflower seed protein，SSP）和黄原胶（Xanthan gum，XG）作为原料，制备复合颗粒并用于稳定 Pickering 乳液。通过傅里叶变换红外光谱、接触角测量仪、扫描电镜对 SSP-XG 进行表征，探究 SSP 与 XG 质量比对 SSP-XG 颗粒特性的影响；以粒径、Zeta 电位、乳化活性指数（Emulsifying activity index，EAI）和乳液稳定性指数（Emulsion stability index，ESI）为指标，分析不同 SSP-XG 质量比和油相体积分数对 Pickering 乳液微观结构、流变特性和稳定性的影响。结果表明：SSP 与 XG 二者存在氢键、静电相互作用和疏水相互作用；XG 的加入使 SSP-XG 表面更光滑且增大了接触角测量值。SSP 与 XG 质量比为 5∶1，油相体积分数为 70% 的 Pickering 乳液粒径最小（6.65 μm），Zeta 电位最大（28.82 mV），EAI 和 ESI 最大（1.26 m^2/g，154.81 min），液滴分布均匀，呈现良好的凝胶网络结构，具有良好的乳化性和稳定性，且在 4 ℃ 下储藏乳析指数更小，具有较高的 pH 稳定性、离子稳定性和加热稳定性；流变学剪切变稀的行为，表明该乳液属于非牛顿流体；激光共聚焦显微镜显示复合颗粒包围在油相液滴周边，形成了水包油（O/W）型乳液。本研究可为开发新型绿色食品级 Pickering 乳液提供有益参考。

关键词: 葵花籽蛋白, 黄原胶, Pickering 乳液, 复合颗粒, 性质
中图分类号: TS210.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)08−0109−13
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040274
本文网刊:

Preparation and Properties of Sunflower Seed Protein-Xanthan Gum Pickering Emulsion

GONG Lingli，CHU Chenli，YANG Han，NUERZEBA Nuermaimaiti，BUMAILIYAMU Maimaitituxun，KONG Lingming*

（School of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China）

Abstract: In order to improve the high-value utilization of sunflower seed protein, composite particles were prepared using sunflower seed protein (SSP) and xanthan gum (XG) as raw materials and used to stabilize Pickering emulsions. SSP-XG was characterized using Fourier transform infrared spectroscopy, contact angle measurement, and scanning electron microscopy to investigate the effect of the mass ratio of SSP to XG on the properties of SSP-XG particles. Particle size, Zeta potential, emulsifying activity index (EAI), and emulsion stability index (ESI) as indicators, this study analyzed the effects of different SSP-XG mass ratios and oil phase volume fractions on the microstructure, rheological properties and stability of Pickering emulsions. The results showed that hydrogen bonds, electrostatic interactions, and hydrophobic interactions existed between SSP and XG. The addition of XG made the SSP-XG surface smoother and increased the contact angle measurement value. The mass of SSP to XG ratio was 5∶1, and the Pickering emulsion with an oil phase

收稿日期: 2025−04−22
基金项目: 新疆维吾尔自治区油料产业技术体系资助（XJARS-05-09）; 自治区农业农村发展创新与服务项目: 葵花籽饼粕中蛋白资源高值化加工技术示范推广项目; 2025 年度校级研究生教育创新计划项目（XJAUGRI2025077）。
作者简介: 公伶俐（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 1468138612@qq.com。
*** 通信作者:** 孔令明（1976−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 粮油及蛋白质加工, E-mail: klingming@126.com。

volume fraction of 70% exhibited the smallest particle size (6.65 μm), the highest Zeta potential (28.82 mV), and the highest EAI and ESI (1.26 m^2/g, 154.81 min), the droplets were evenly distributed, forming a well developed gel network structure, and demonstrated excellent emulsification and stability. Additionally, it showed a lower emulsification index when stored at 4 ℃. They also had high pH, ionic stability and heat stability. The shear thinning behavior of rheology indicated that the emulsion was a non-Newtonian fluid. Laser confocal microscopy showed composite particles surrounding oil phase droplets, forming an oil-in-water (O/W) type emulsion. This study provides useful reference for the development of new green food-grade Pickering emulsions.

Key words: sunflower seed protein; xanthan gum; Pickering emulsion; composite particle; property

Pickering 乳液是一种使用超细固体颗粒作为乳化剂而形成的乳状液体系[1]。Pickering 乳液与传统乳液相比, 具有环境友好、生产成本低、稳定性良好等特点, 是近年来的研究热点之一[2]。植物蛋白和多糖是目前用于制备 Pickering 乳液的天然植物性固体颗粒的主要生物大分子, 蛋白质和多糖通过非共价相互作用来提高乳液体系的稳定性, 从而提高食品的营养价值[3]。近年来蛋白-多糖及二元以上复合乳化剂制备的食品级 Pickering 乳液, 如核桃分离蛋白和壳聚糖[4]、花生蛋白和多糖复合体系[5]、花生分离蛋白-羧甲基壳聚糖复合体系[6] 等, 在食品加工中得到了广泛应用。

向日葵作为一种重要的油料资源, 其产量在世界上仅次于大豆、棉籽、菜籽、花生, 是五大油料之一, 也是我国的主要油料作物之一[7]。目前对于葵花籽加工研究主要集中于葵花油的加工, 而葵花籽蛋白研究较少。葵花籽蛋白(Sunflower seed protein, SSP)是一种营养价值极高的植物蛋白, 是人类摄取蛋白的重要来源[8]。与大多数植物蛋白相比, SSP 的氨基酸组成比较均衡, 具有良好的消化率(90%)[9], 营养价值较高, 具有广泛的开发前景, 但目前大部分 SSP 被用作饲料或遭废弃, 仅少量用于生产葵花蛋白粉、乳饮料等初级产品, 没有充分发挥其作为高营养食品原料的潜力[10]。因此, 有效利用 SSP 资源, 对葵花产业的可持续发展具有重要的意义。近年来, 在 SSP 为乳化剂稳定乳液的研究中, SSP 与多酚物质相互作用, 乳化性能显著提高[11]。黄原胶(Xanthan gum, XG)作为一种天然的高分子亲水性多糖胶体, 具有较好的稳定性、增稠性、乳化性、悬浮性和安全性, 对环境影响较小, 是一种绿色环保的食品添加剂, 凭借其较好的乳化性和稳定性在食品工业中得到广泛应用[12]。杨婷[13]研究表明, 苦荞蛋白与 XG 结合, XG 可通过提高蛋白质的乳化性, 从而影响 Pickering 乳液的稳定性。因此, 本文选择 XG 作为乳化剂进行 SSP Pickering 乳液的制备。目前使用蛋白-多糖复合乳化剂制备食品级 Pickering 乳液已被广泛研究, 但 SSP-XG 复合共同构建的 Pickering 乳液及性质鲜有报道。

基于此, 本研究以 SSP 和 XG 作为原料, 通过改变 SSP 和 XG 的质量比制备 SSP-XG 复合颗粒, 并用来稳定 Pickering 乳液, 研究不同质量比和油相体积分数对 Pickering 乳液性能的影响。本研究以期拓宽 SSP 的应用领域, 为蛋白-多糖体系提供有价值的信息。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

SSP 健肽生物科技有限公司; XG 河南飞仕生物科技有限公司; 葵花籽油 日照福之泉粮油食品有限公司; 氢氧化钠、盐酸、碘化钾 分析纯, 天津市鑫铂特化工有限公司; 氯化钠、淀粉、十二烷基硫酸钠、硫代硫酸钠、冰乙酸、三氯甲烷 分析纯, 天津市致远化学试剂有限公司。

TU-1810 APC 紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限公司; PHS-3C pH 计 上海雷磁仪器有限公司; S550T-720HD 生物显微镜 苏州倍特嘉光电科技有限公司; LXJ-IIB 低速台式离心机 陕西环宇仪器设备有限公司; WQF-530A 傅里叶变换红外光谱仪、TDP-5 型单冲压片机 北京瑞利分析仪器有限公司; FSH-2A 高调速匀浆机 安庆洁佳仪器设备有限公司; Anton Paar MCR302 流变仪 安东帕商贸有限公司; Nano Brook 90Plus Zeta 型激光粒度仪 英国 Malvern 仪器有限公司; STELLARIS 5 激光共聚焦显微镜 Leica 公司; SZ-CAMC32 接触角测量仪 苏州奥普特光电技术有限公司; DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱 上海齐欣科学仪器有限公司; JSM7610FPLUS 扫描电镜 北京科贸有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 SSP-XG 的制备 参考 Yang 等[14] 方法, 略微修改。将 1 g 的 SSP 加入 100 mL 去离子水中, 在室温下搅拌 2 h 后放入冰箱中冷藏过夜, 使 SSP 充分水化, 取出后搅拌 30 min, 分别以 SSP∶XG 质量比 1∶0、10∶1、5∶1、10∶3、5∶2、2∶1(w/w)制备混合溶液, 使用 1 mol/L 的 NaOH 将溶液的 pH 调节至 12, 在室温下 600 r/min 搅拌 3 h, 再用 1 mol/L 的 HCl 将溶液 pH 调节至 7, 搅拌 2 h, 将溶液在 5000 r/min 离心 20 min 除去不溶成分, 得到 SSP-XG 复合体系。

1.2.2 SSP-XG 的表征

1.2.2.1 傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)分析 将制备好的 SSP 和 SSP-XG 复合物悬浊液经冷冻干燥后, 与 KBr 粉末混合研磨成粉, 用压片机压成片, 将薄片快速转移

至傅里叶变换红外成像光谱仪，选择扫描范围为 400~4000 cm^{-1}，扫描次数为 32 次，分辨率 4 cm^{-1} 进行测量。

1.2.2.2　扫描电镜　采用扫描电镜观察样品的微观形貌。取少量样品置于导电胶并黏附于样品台上，喷金 30 s，在 5 kV 的工作电压下进行 100 倍、1000 倍、3000 倍观察并拍照。

1.2.2.3　接触角测量　用压片机（压力 20 MPa）将 SSP 和不同质量比的 SSP-XG 复合物粉末制成 1 cm×1 cm 的圆形薄片，在薄片表面滴一滴去离子水，静置待稳定后，对接触角进行测量。

1.2.3　Pickering 乳液的制备

1.2.3.1　SSP 和 XG 质量比对 Pickering 乳液的影响　分别以 SSP 和 XG 质量比为 1∶0、10∶1、5∶1、10∶3、5∶2、2∶1（w/w）的 SSP-XG 颗粒为乳化剂，油相体积分数 70%，高调速匀浆机 15000 r/min 均质 120 s，分析不同质量比对乳液稳定性的影响。

1.2.3.2　油相体积分数对 Pickering 乳液的影响　以 SSP 和 XG 质量比为 5∶1（w/w）为乳化剂，油相体积分数 30%、40%、50%、60%、70%，高调速匀浆机 15000 r/min 均质 120 s，分析油相体积分数对乳液稳定性的影响。

1.2.3.3　粒径、PDI（Polydispersity，PDI）和 Zeta 电位　使用激光粒度仪测定 Pickering 乳液的粒径、PDI 和 Zeta 电位，分散剂为去离子水，折射率为 1.33，温度为 25 ℃。

1.2.3.4　乳液外观及微观结构　a.乳液外观：将新鲜乳液置于西林瓶中，观察其乳液的外观图像，从宏观角度分析乳液状态。

b.乳液微观：将新鲜制备的乳液用去离子水稀释 10 倍，用移液枪滴加 2 μL 于载玻片上，后用生物显微镜 40 倍进行观察。

1.2.3.5　乳化活性指数（EAI）和乳化稳定性指数（ESI）　将葵花籽油与 SSP-XG 溶液混合，15000 r/min 剪切 2 min 以产生乳液。将乳液倒入烧杯中，取固定在 0.5 cm 底部的 50 μL 乳液与 5 mL 0.1% 的十二烷基硫酸钠混合，并使用分光光度计在 500 nm 下测量样品的吸光度。10 min后，使用相同的方法测量 50 μL 等份乳液的吸光度，空白组为 0.1% 的十二烷基硫酸钠溶液[15]。按照下式计算乳液的 EAI 和 ESI：

$$EAI(m^2/g)=\frac{2\times2.303\times A_0\times N}{C\times\theta\times1000}$$　式（1）

$$ESI(min)=\frac{10\times A_0}{A_0-A_{10}}$$　式（2）

式中：A_0 为 0 min 的吸光度；N 为稀释倍数；C 为样品浓度，g/mL；θ 为油相体积分数；A_{10} 为 10 min 的吸光度；10 为时间间隔，min。

1.2.3.6　流变特性　在室温下（25 ℃），使用直径为 35 mm、间隙为 1 mm 的平板夹测定乳液的流变性。在 1~100 s^{-1} 范围内进行剪切板扫描，测量乳液黏度与剪切频率的关系，在 1~100 Hz范围内进行动态频率扫描，记录乳液的储能模量（G'）和耗损模量（G"）[16]。

1.2.3.7　抗氧化能力测定　DPPH 自由基清除率：根据 DPPH 试剂盒法，取 50 μL 乳液与 950 μL 配制好的 DPPH 溶液充分混合，在 25 ℃ 下避光保存 30 min，以蒸馏水代替样品作为对照组。在 517 nm 处测定吸光度。DPPH 自由基清除率计算如下：

$$DPPH自由基清除率(\%)=\frac{A_0-A_1}{A_1}\times100$$　式（3）

式中，A_0 为空白对照；A_1 为测试样品的吸光度。

$ABTS^+$自由基清除率：根据 ABTS 试剂盒法，取 50 μL 乳液与 950 μL 配制好的 ABTS 溶液充分混合，空白以蒸馏水代替样品作为对照组，静置 20 min 后，在 734 nm 处测定吸光度。$ABTS^+$自由基清除率计算如下：

$$ABTS^+自由基清除率(\%)=\frac{A_0-A_1}{A_1}\times100$$　式（4）

式中，A_0 为空白对照；A_1 为测试样品的吸光度。

1.2.3.8　过氧化值测定　为了测定贮藏过程中乳液的氧化稳定性，用西林瓶贮藏乳液在 50 ℃ 恒温下加速氧化 20 d，分别在第 0、5、10、15 和 20 d 测定乳液的过氧化值。按照最新版 GB 5009.227-2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》进行测定计算。

1.2.4　激光共聚焦显微镜观察　采用激光共聚焦显微镜观察乳液的微观结构。将尼罗蓝（1 mg/mL，溶于异丙醇）和尼罗红（1 mg/mL，溶于异丙醇）溶液 1∶1 混合制成染色剂。取 20 μL 乳液于离心管中，加入 10 μL 混合染液，避光反应 10 min。取 20 μL 染色后的样品置于载玻片上密封后观察。其中尼罗蓝的激发波长为 633 nm，尼罗红的激发波长为 488 nm。用 1000 油镜观察，扫描成像分辨率 2048×2048 dpi[17]。

1.2.5　Pickering 乳液稳定性测定　pH 稳定性：根据 Shah 等[18] 方法，略微修改。用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液和 0.1 mol/L 的 HCl 溶液分别将乳液 pH 调节为 3、5、7、9、11，测量乳液的粒径、PDI、Zeta 电位、EAI 和 ESI。

离子稳定性：参考邓苏梦[19] 的方法，略微修改。加入浓度分别为 50、100、200、300、400、500 mmol/L的 NaCl，测量乳液的粒径、PDI、Zeta 电位、EAI、ESI，并观察微观结构。

加热稳定性：根据张达超[20] 的方法，略微修改。将乳液放置于西林瓶中，分别在 50、60、70、80、90 ℃ 下水浴加热 30 min，然后在室温下冷却 2 h，测量乳液的粒径、PDI、Zeta 电位、EAI、ES，并观察微观结构。

储藏稳定性：取新鲜制备的乳液放置于西林瓶

中，在 5 ℃ 和 4 ℃ 下贮藏 1、5、7、15 和 30 d 测定乳析指数(CI)[21]。

$$CI(\%) = \frac{H}{H_0} \times 100 \quad \text{式（5）}$$

式中，H 为清液层高度，cm；H_0 为乳液总高度，cm。

1.3　数据处理

所有实验均重复 3 次，数据结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS 27 进行方差分析，$P<0.05$，差异显著，采用 Origin 2021 进行统计作图。

2　结果与分析

2.1　SSP-XG 的表征

2.1.1　FTIR 分析　由图 1 可知，SSP 和 SSP-XG 在 3400~3600 cm^{-1} 波长处的宽吸收峰，是-OH 的伸缩振动峰[22]，2996 cm^{-1} 出现 C-H 的伸缩振动峰[23]。SSP 和不同质量比的 SSP-XG 在 2800~3100 cm^{-1} 处的峰与-CH_3 和-CH_2 的 C-H 拉伸有关，但 SSP-XG 复合颗粒峰的强度较高，表明 SSP 和 XG 之间存在疏水相互作用[24]。SSP 的酰胺Ⅱ带在 1477 cm^{-1} 有最大峰值，酰胺 II 带是由 N-H 弯曲振动和 C-N 伸缩振动引起[25]，加入 XG 后，与 SSP 相比，SSP-XG 复合颗粒在酰胺Ⅱ带有轻微偏移(1480~1484 cm^{-1})，峰的强度发生了增加，且在 SSP-XG 质量比为 5∶1 时强度增加最大，表明 SSP 的氨基和 XG 的羧基发生了静电相互作用[26]。1196 cm^{-1} 处为 SSP 的 C-O 伸缩振动吸收，与 SSP 相比，SSP-XG 质量比 10∶1~2∶1 在 3360 cm^{-1} 峰发生偏移，SSP-XG 复合颗粒在此处吸收峰分别移至 1198、1200、1201、1202、1209 cm^{-1}，表明在 SSP-XG 复合体中，SSP 的 C-O 基团与 XG 的羟基和羧基存在氢键相互作用[27]，结果表明，疏水相互作用、静电相互作用和氢键相互作用是 SSP-XG 形成的主要相互作用力。

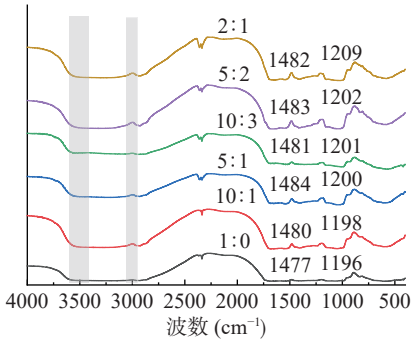


图 1　SSP 与 XG 比例对 SSP-XG 颗粒 FTIR 图谱影响

Fig.1　Effects of SSP to XG ratio on FTIR profiles of SSP-XG particles

2.1.2　扫描电镜分析　由图 2 可以观察到，经过 pH 循环后 SSP 表面的某些化学键断裂或重新组合，导致其形态发生变化，从而形成棒球状和不规则状结构，在扫描电镜观察下，观察到其表面粗糙、不光滑和不平整，且存在较多细小的碎片，表明 SSP 形成的结构不够稳定和致密，可能无法有效地稳定乳液液滴。当 SSP 与 XG 质量比为 5∶1 时，呈现出较为规则的片状或块状结构，这种结构有利于在油-水界面形成稳定的界面膜，从而更好地稳定乳液[28]。当质量比 10∶3~2∶1 时，出现了一些较小的颗粒和不规则的团聚体。可能是 XG 比例进一步增加，导致 SSP-XG 相互作用发生变化，复合物的结构稳定性受到一定影响。综上所述，再次证明 SSP 和 XG 之间发生了相互作用，形成了 SSP-XG 复合物，该复合物是导致其乳化性能提高的原因。

2.1.3　接触角分析　三相接触角(θ)是颗粒-水-油三相的接触角，反映了固体颗粒表面的润湿性和乳液的类型[29]，颗粒会朝向对颗粒吸引力较小的一面弯曲，当 $\theta<90°$，颗粒为亲水性颗粒，形成的乳液类型为 O/W 乳液；当 $\theta>90°$，颗粒为疏水性颗粒，形成的乳液类型则为 W/O 乳液[30]，而当 θ 越接近 90°时，形成的乳液越稳定[31]。SSP 和 SSP-XG 复合颗粒的 θ 值如表 1 和图 3 所示，所有样品的 θ 值均小于 90°，因此 SSP 和 SSP-XG 复合颗粒均为亲水性颗粒，对应的乳液类型均为 O/W 乳液。SSP-XG 复合颗粒的 θ 值均高于 SSP，质量比 10∶1~5∶1，θ 值呈增大趋势，因为随着 XG 的增加，促进了 SSP 疏水基团的暴露，增加了颗粒的表面疏水性[32]，质量比 5∶1~2∶1，θ 值呈下降趋势，因为 XG 的增加，颗粒表面被 XG“包裹”，界面吸附效率下降，导致颗粒亲水性增强，降低

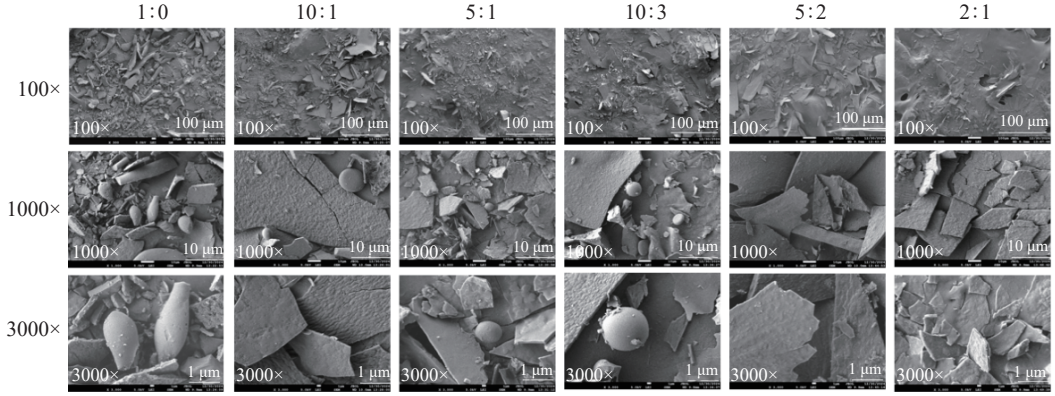


图 2　SSP 与 XG 比例对 SSP-XG 复合颗粒扫描电镜的影响

Fig.2　Effects of SSP and XG ratio on scanning electron microscopy of SSP-XG composite particles

表 1　不同 SSP 与 XG 比例下的三相接触角

Table 1　Three-phase contact angles at the ratio of different SSP to XG

指标	1∶0	10∶1	5∶1	10∶3	5∶2	2∶1
接触角(°)	42.59±0.78^{d}	45.04±1.12^{c}	52.67±0.46^{a}	51.03±0.76^{a}	49.05±0.95^{b}	45.97±1.33^{c}

注：同行不同小写字母表示数据差异显著，P<0.05。

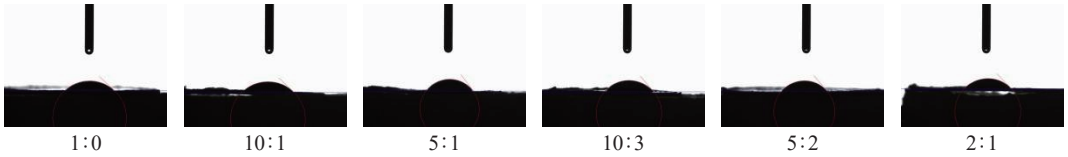


图 3　不同 SSP 与 XG 比例下的三相接触角

Fig.3　Three-phase contact angles at the ratio of different SSP to XG

了颗粒的表面疏水性，导致 θ 值逐渐下降[33]。质量比 5∶1时，θ 最大，因为 XG 双螺旋结构赋予其亲水基团和疏水基团，其羟基和羧基与 SSP 形成氢键，XG 在 SSP 表面形成稳定的吸附层，疏水基团暴露程度最大[34]，表明其具有良好的界面湿润性，能更好地在油水界面吸附，有期望作为 Pickering 乳液的理想稳定颗粒。

2.2　SSP 与 XG 质量比对 Pickering 乳液的影响

2.2.1　乳液微观结构、粒径、Zeta 电位、EAI 和 ESI

由图 4A 可知，质量比 1∶0 的乳液颗粒稀疏，大小不一，质量比 10∶1 的乳液出现分层，油滴表面的颗粒覆盖度可能不足，导致油滴间的相互作用增强，容易出现破乳和聚并等现象，其乳液稳定性较差。质量比 5∶1 时，固体颗粒形成的保护层防止了乳液体系中的相互作用，从而使乳液稳定不发生聚结[35]。质量比为 5∶2 和 2∶1 时，颗粒大小不一，液滴尺寸逐渐增大。

由图 4B 可知，不同比例的 SSP-XG 颗粒粒径不同。SSP 的粒径和 PDI 分别为 18.52 μm 和 0.46，与 SSP-XG 复合体相比，粒径和 PDI 显著增大，说明 XG 的加入改善了 SSP 颗粒的表面润湿性，促进了其在油水界面的均匀吸附，形成了更稳定的乳液[36]。随着 XG 的比例升高，SSP-XG 颗粒的粒径呈先降低后升高的趋势，随着 XG 的增加，形成的黏弹性网络包裹部分油滴，导致乳液液滴的聚集，从而使得粒径增大[37]。SSP 与 XG 比值为 5∶1 时，复合乳液的粒径最小为 6.65 μm，证明复合效果最好，形成稳定的界面层，稳定性最好。复合颗粒的 PDI 值均小于 0.3，表明粒径分布均匀。

由图 4C 可知，未添加 XG 时，SSP 的电位绝对值为 21.04 mV，随着 XG 的加入，XG 作为阴离子多糖，其羧酸基团在溶液中解离带负电，更多的 XG 分子吸附在 SSP 颗粒表面，增加了颗粒的负电荷密度，从而导致乳液的 Zeta 电位绝对值增大。质量比 5∶1~2∶1 时，Zeta 电位绝对值呈下降趋势，因为体系黏度过高而影响乳液的稳定性。质量比在 5∶1 时电位绝对值达到最大(28.82 mV)，形成较稳定的蛋白-多糖复合体系[38]。

EAI 和 ESI 是表征蛋白质形成和稳定油水界面能力的重要指标[39]。由图 4D 可知，添加 XG 的乳液比单一颗粒的乳液 EAI 和 ESI 高，由于 XG 具有亲水性，SSP 具有疏水性。当 XG 与 SSP 结合时，形成

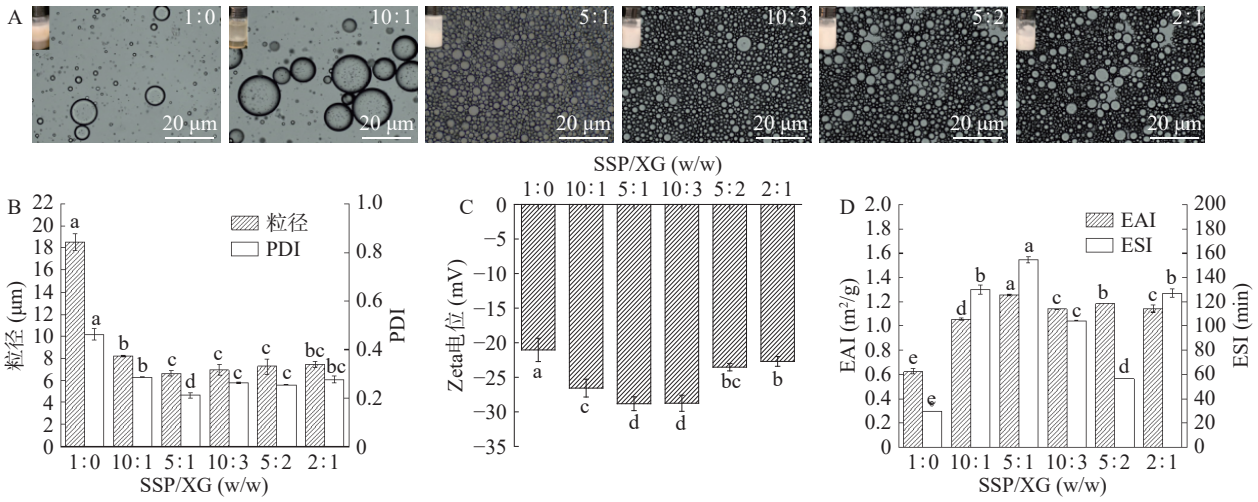


图 4　SSP 和 SSP-XG 复合颗粒的微观结构(A)、粒径、PDI(B)、Zeta 电位(C)和 EAI、ESI(D)

Fig.4　Microstructure (A), particle size, PDI (B), Zeta potential (C) and EAI, ESI (D) of SSP and SSP-XG composite particles

注：不同小写字母代表差异显著(P<0.05)，图 6~图 7、图 9、图 11~图 14 同。

了具有适中润湿性的复合颗粒稳定剂，这种复合颗粒能够更好地吸附在油-水界面上，形成有效的界面膜，从而提高了乳液的 EAI 和 ESI。当质量比 5∶1 时，EAI（1.26 m^2/g）和 ESI（154.81 min）达到最大，质量比 10∶3~2∶1 时，随着乳液黏度增大，蛋白质吸附在界面的速率降低，从而导致 EAI 和 ESI 的降低，质量比 2∶1 时，ESI 上升，因为 XG 浓度过高时，可能在界面上形成更致密的黏弹性网络，这种网络结构虽然不利于 EAI，但一定程度阻止了乳液液滴的聚集和合并，从而提高了 ESI[40]。因此，当 SSP 与 XG 质量比为 5∶1 时，SSP-XG 可有效稳定 Pickering 乳液。

2.2.2 流变特性 SSP-XG 不同质量比的乳液黏度随剪切速率的变化，如图 5A 所示。随着剪切速率从 1 s^{-1} 增加到 100 s^{-1}，所有 Pickering 乳液的黏度随剪切速率的增大而减小，呈现剪切变稀的行为，表明该乳液属于非牛顿流体[41]。图 5A 中 SSP-XG 颗粒稳定的乳液黏度均大于 SSP 稳定的乳液，XG 分子链在水中通过螺旋构象形成刚性三维网络，显著增加连续相的黏度。质量比 1∶0~5∶2 时，黏度明显增加。

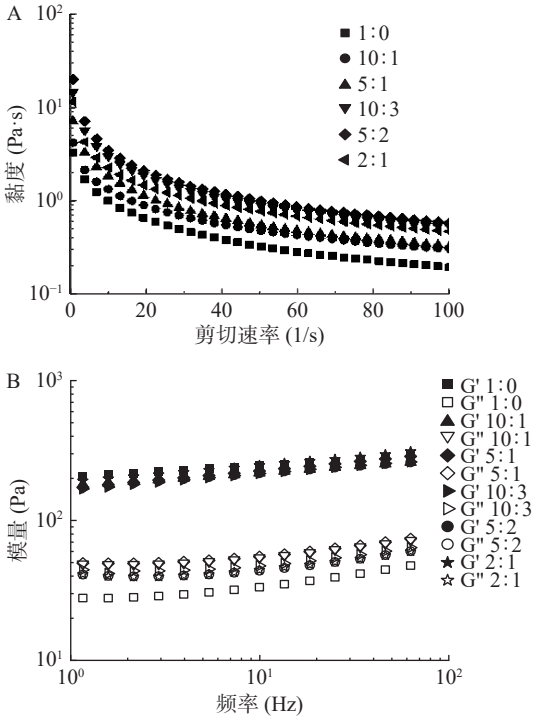


图 5 SSP 与 XG 质量比对 Pickering 乳液黏度（A）和 G'、G"（B）的影响

Fig.5 Effects of SSP and XG mass ratio on Pickering emulsion viscosity (A) and G' and G" (B)

Pickering 乳液的黏弹性和网络结构强度可以通过储能模量（G'）和损耗模量（G"）来表征[42]。图 5B 可知不同质量比的 G'>G"，表明乳液形成了以弹性为主的凝胶网络结构，乳液呈现出固体的性质，且乳液对频率的依赖性较低。质量比 10∶1~2∶1 的 G"始终大于 1∶0 的 G"，XG 的添加促进乳液滴之间的聚集，形成更致密的堆积结构，导致更高的 G"。

2.2.3 抗氧化能力分析 如图 6 可知，SSP 与 XG 质量比 1∶0 的 DPPH 自由基清除率为 29.21%，该蛋白含有丰富的蛋氨酸和半胱氨酸，这些氨基酸可以清除自由基和螯合金属离子，具有一定的抗氧化能力。随着 XG 的加入，SSP-XG 复合颗粒的 DPPH 和 $ABTS^+$ 自由基清除率均有所增加，质量比 5∶1 时，DPPH 和 $ABTS^+$ 自由基清除率最高，分别为 73.36% 和 50.93%，这表明 XG的加入增加了抗氧化能力，XG 本身具有一定的抗氧化能力，其双螺旋结构能抵抗酶解和氧化，与 SSP 结合后能够协同其清除自由基[43]。质量比 10∶3~2∶1 时，SSP-XG 复合颗粒的 DPPH 和 $ABTS^+$ 自由基清除率降低，因为 XG 的持续结合引起了蛋白的构象变化，减少了抗氧化基团的暴露[44]。

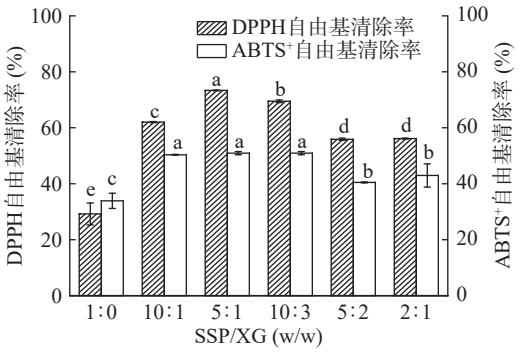


图 6 不同 SSP-XG 比例的抗氧化能力影响

Fig.6 Antioxidant capacity of different SSP-XG ratio

2.2.4 过氧化值分析 油水界面是参与氧化反应的主要区域，因此界面组成对乳液脂质氧化具有极大影响[45]。如表 2 可知，随着储藏时间的增加，不同质量比的 SSP-XG Pickering 乳液的过氧化值逐渐增加，因为油脂持续发生自动氧化，产生氢过氧化物。当质量比 1∶0 时，乳液的过氧化值最大，因为 SSP 在氧化条件下易发生聚集，形成大分子聚集体，油脂分子可通过孔隙扩散至水相，与氧化物质接触。随着 XG 比例的增加，过氧化值逐渐降低，XG 具有亲水性，增强了界面层的机械强度和厚度，形成更致密的物理屏障，有效阻止氧气和自由基进入油滴内部，从而降低氧化反应的可能性[46]，其浓度增加也会显著增大乳液连续相的黏度，油滴布朗运动受限，减少了油滴间碰撞导致的氧化产物交换[47]。综上所述，SSP

表 2 不同 SSP-XG 比例的过氧化值影响

Table 2 Effect of different SSP-XG ratios on peroxide value

SSP-XG质量比（w/w）	过氧化值（mmol/kg）				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
1∶0	0.16±0.02^a	0.23±0.04^a	0.29±0.02^a	0.42±0.04^a	0.48±0.03^a
10∶1	0.14±0.01^{ab}	0.17±0.04^b	0.19±0.02^b	0.26±0.05^b	0.30±0.04^b
5∶1	0.09±0.02^{bc}	0.11±0.01^c	0.13±0.02^c	0.21±0.02^{bc}	0.25±0.02^c
10∶3	0.08±0.06^c	0.10±0.01^c	0.13±0.01^c	0.18±0.01^{cd}	0.24±0.02^c
5∶2	0.05±0.02^c	0.09±0.01^c	0.10±0.01^c	0.15±0.01^{de}	0.16±0.01^d
2∶1	0.02±0.01^c	0.08±0.01^c	0.09±0.01^c	0.13±0.01^e	0.15±0.01^d

注：同列不同小写字母表示差异显著，P<0.05，表3同。

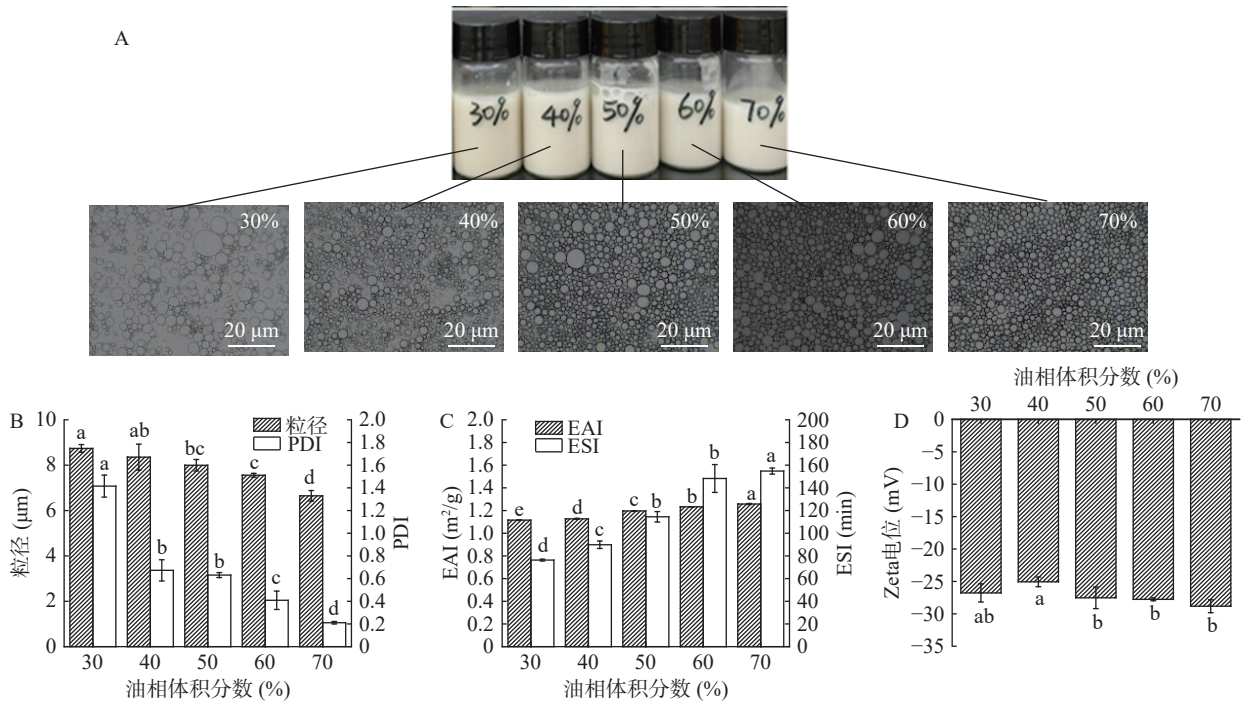


图 7　不同油相体积分数的微观结构(A)、粒径、PDI(B)、EAI 与 ESI(C)和 Zeta 电位(D)

Fig.7　Microstructure (A), particle size, PDI (B), EAI, ESI (C) and Zeta potential (D) with different oil phase volume fractions

与 XG 质量比为 5∶1 时，乳液的粒径较小，液滴分布均匀，稳定性较好，所以选择质量比 5∶1 的乳液进行后续实验。

2.3　油相体积分数对 Pickering 乳液的影响

2.3.1　乳液微观结构、粒径、Zeta 电位、EAI 和 ESI

图 7A 观察，当油相体积分数为 30%~60% 时，乳液颗粒普遍增多，颗粒饱满，当油相体积分数为 70%，颗粒能够均匀地覆盖在油滴表面，大小均一，颗粒之间紧密连接，形成三维网络结构，形成一层连续的保护层。其液滴的直径越小，体积就越致密，形成的三维网络结构就越紧凑。

由图 7B、图 7C 可知，不同油相体积分数的颗粒粒径不同。油相体积分数 30%~70% 时，乳液的粒径从 8.74 μm 减小到 6.65 μm，PDI 从 1.42 减小到 0.21，粒径和 PDI 随油相体积分数的增加而减小，油相体积分数 70% 达到最小。EAI 和 ESI 随油相体积分数的增加而增加，油相体积分数 70% 达到最大，乳液稳定性最佳，液滴间相互作用增强，形成网络结构，进一步抑制分层和聚结。

由图 7D 可知，油相体积分数 30%~40% 的 Zeta 电位绝对值从 26.77 mV 降低到 25.07 mV，颗粒在界面的覆盖率较高，导致更多的颗粒参与界面稳定，从而增加 Zeta 电位的绝对值[48]。油相体积分数 40%~70% 的 Zeta 电位绝对值呈上升趋势，油相体积分数在 70% 达到最大(28.82 mV)，颗粒间相互作用增强，电位升高，乳液稳定性提升。

2.3.2　流变特性　不同油相体积分数的乳液黏度随剪切速率的变化，如图 8A 所示。油相体积分数 30%~70% 时，乳液的黏度随油相体积分数的增大而

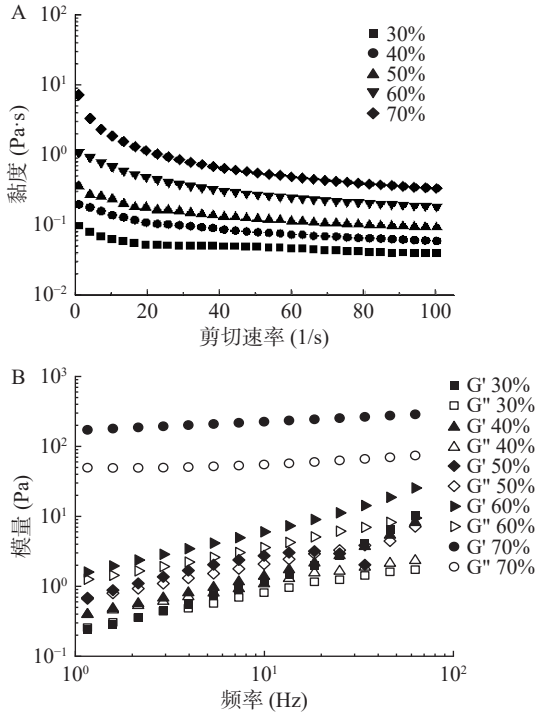


图 8　油相体积分数对 Pickering 乳液黏度(A)和 G'、G"(B)的影响

Fig.8　Effects of oil phase fraction on viscosity (A) and G' and G" (B) of Pickering emulsion

增加，乳液黏度与油相体积分数呈正相关，且在 70% 时达到最大，因为随着油相体积分数的增加，液滴非常紧密地堆积在一起，会系统产生一些类似固体的特性，提高体系黏度[49]。

由图 8B 可知，在 0~1.58 Hz、0~1.16 Hz 和 0~0.85 Hz，油相体积分数为 30%、40% 和 50% 的 G">G'，因为乳液滴间距更小，碰撞频率增加，局部重排加

剧, G"升高, 当频率超过临界值, 乳液之间形成更多的接触点, 体系逐渐进入类固态, G'升高。油相体积分数为 70% 时, G'和 G"最大, 乳液的弹性和黏性最好, 形成的凝胶网络结构更坚定, 具有更高的稳定性[50]。

2.3.3 抗氧化能力分析 自由基清除率越高, 乳液抗氧化能力越强。如图 9 可知, 油相体积分数 30%~70% 时, 乳液的 DPPH 自由基清除率从 47.37% 增加到 73.36%, $ABTS^+$自由基清除率从 38.36% 增加到 50.93%, 且在油相体积分数 70% 时达到最大。随着油相体积分数的增加, 液滴排列更紧密, 凝胶强度增强导致油相中抗氧化物质的浓度增加, 从而维持 DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除率的持续升高, 提高了乳液的稳定性。Cen 等[51] 研究发现, 在藜麦蛋白乳液中, 随着油相体积分数的增加, $ABTS^+$自由基清除率也在增加, 从而提升了乳液的抗氧化活性。

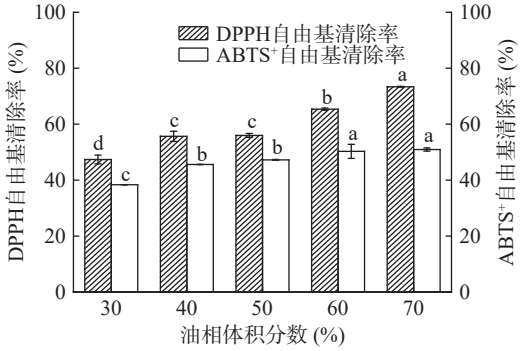


图 9 不同油相体积分数的抗氧化能力影响

Fig.9 Antioxidant capacity of different oil phase volume fraction

2.3.4 过氧化值分析 如表 3 可知, 油相体积分数 30%~70% 时, 随着油相体积分数的增加, 过氧化值在逐渐降低, 在油相体积分数为 70% 时最小, 因为油相体积分数增加, 油滴总表面积减少, 氧气与油脂的接触面积有所降低, 避免过氧化自由基的生成, 从而控制油脂氧化程度并减少氢过氧化物的生成, 从而减缓氧化速率[52]。Zhao 等[53] 研究发现, 在大麦醇溶蛋白-壳聚糖 Pickering 乳液中, 随着油相体积分数的增加, 乳液的过氧化值有所降低, 表明界面稳定性增强有效抑制了油脂氧化。综上所述, 油相体积分数 70% 的乳液凝胶网络结构更稳定, 具有更高的稳定性, 所以选择油相体积分数 70% 的乳液进行后续实验。

表 3 不同油相体积分数的过氧化值影响

Table 3 Effect of different oil phase volume fraction on peroxide value

油相体积分数 (%)	过氧化值(mmol/kg)				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
30	0.66 ± 0.07^{a}	0.67 ± 0.06^{a}	0.94 ± 0.06^{a}	1.86 ± 0.09^{a}	2.25 ± 0.14^{a}
40	0.48 ± 0.09^{b}	0.66 ± 0.07^{a}	0.70 ± 0.07^{b}	1.42 ± 0.11^{b}	1.53 ± 0.06^{b}
50	0.27 ± 0.07^{c}	0.45 ± 0.09^{b}	0.56 ± 0.06^{c}	1.26 ± 0.10^{c}	1.46 ± 0.10^{bc}
60	0.26 ± 0.10^{c}	0.31 ± 0.16^{b}	0.49 ± 0.07^{c}	0.98 ± 0.10^{d}	1.34 ± 0.06^{c}
70	0.09 ± 0.02^{d}	0.11 ± 0.01^{c}	0.13 ± 0.02^{d}	0.21 ± 0.02^{e}	0.25 ± 0.02^{d}

2.4 激光共聚焦显微镜观察

为了更深入了解 SSP-XG 的界面特征, 对最优条件下(SSP∶XG 质量比为 5∶1, 油相体积分数为 70%)制备的 Pickering 乳液进行激光共聚焦显微镜观察。采用尼罗蓝和尼罗红分别对蛋白和油相进行染色, 油相信号设为红色、蛋白信号设为绿色。由图 10 观察到, SSP-XG 颗粒包围在油相液滴周边, 形成了水包油(O/W)型乳液。油滴被充分乳化后剩余的蛋白颗粒相互交联形成了渗透型蛋白质网络, 油滴牢牢地“镶嵌”在凝胶网络结构里[54]。SSP-XG 颗粒的界面吸附交联以及 SSP 与 XG 颗粒之间的相互作用形成了一个统一的凝胶状网络结构, 球形油相外圈的一些绿色颗粒为散落在颗粒周围的 SSP/XG, 这表明乳液存在未吸附到水油界面上的胶体颗粒, 这些颗粒形成三维网络结构以限制分散相液滴的运动, 从而可以降低液滴碰撞和聚并的频率[55]。因此, SSP-XG 能吸附在油水界面上有效地稳定 Pickering 乳液。

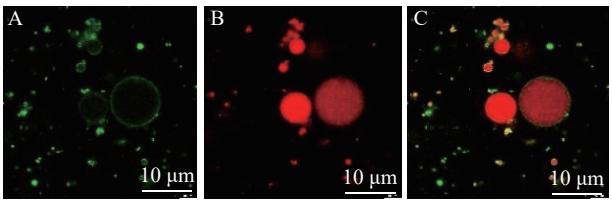


图 10 Pickering 乳液激光共聚焦显微镜观察

Fig.10 Observation of Pickering emulsion via laser confocal microscopy

注: A: SSP-XG 粒子; B: 油滴; C: Pickering 乳液液滴。

2.5 Pickering 乳液的稳定性

通过前期研究, 在 SSP∶XG 质量比为 5∶1, 油相体积分数为 70% 时制备的 SSP-XG Pickering 乳液粒径小, 液滴分布均匀, 所以选择其进一步讨论 pH 稳定性、离子稳定性、加热稳定性和储藏稳定性。

2.5.1 pH 稳定性 由图 11A 可知, pH 为 3~7 时, 乳液粒径和 PDI 呈下降趋势, pH 为 3 时粒径和 PDI 最大, 因为在强酸的环境下, 静电排斥弱, 颗粒聚集程度高, 液滴大小显著不均, 乳液稳定性下降[56]。pH 为 7~11 时, 乳液粒径呈先增加后减小的趋势, pH 为 9 时形成较大的颗粒聚集物, 导致粒径增大, pH 为 11 时, 处于强碱环境, SSP 发生变性, 其分子结构展开, 疏水基团暴露, 导致颗粒聚集行为改变[57], 粒径减小。

由图 11B 可知, 随着 pH 的升高, 电位绝对值呈上升趋势, pH 为 3 时, 静电排斥弱, 导致电位绝对值最低, pH 为 5 时, 接近于 SSP 等电点, 蛋白质表面电荷接近中性, 导致电位绝对值较低, pH 为 7 时, SSP 与 XG 的静电相互作用增强, 电位绝对值低。pH 为 9~11 时, 在碱性环境下 SSP 和 XG 的羧基去质子化, 导致电位绝对值显著增大[58]。由图 11C 可知, pH 为 3~7 时, EAI 和 ESI 呈现出上升趋势, SSP 溶解性较好, 分子链更紧密地与 XG 相互作用, 更有

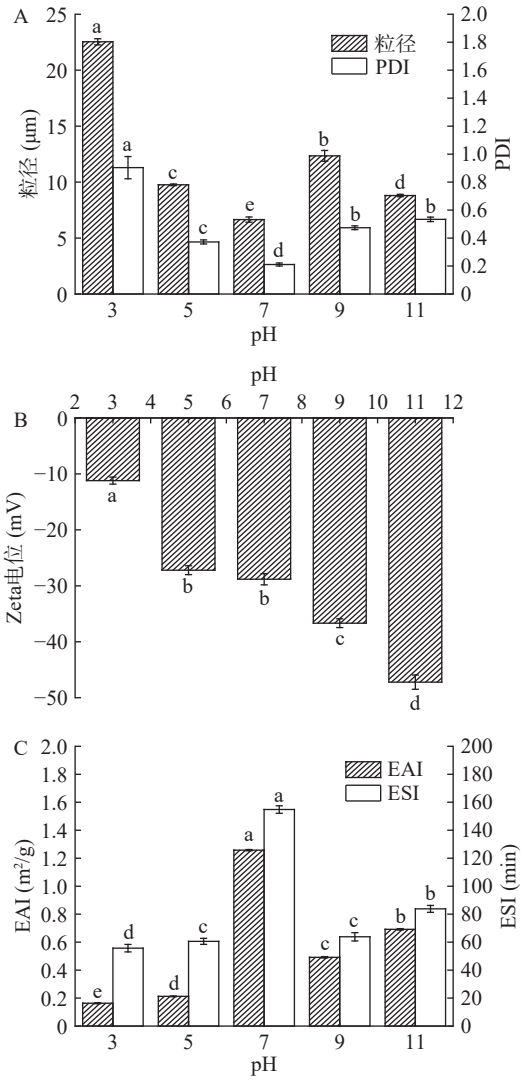


图 11　不同 pH 的粒径、PDI(A)、Zeta 电位(B)和 EAI、ESI(C)

Fig.11　Particle size, PDI (A), Zeta potential (B), and EAI, ESI (C) for different pH

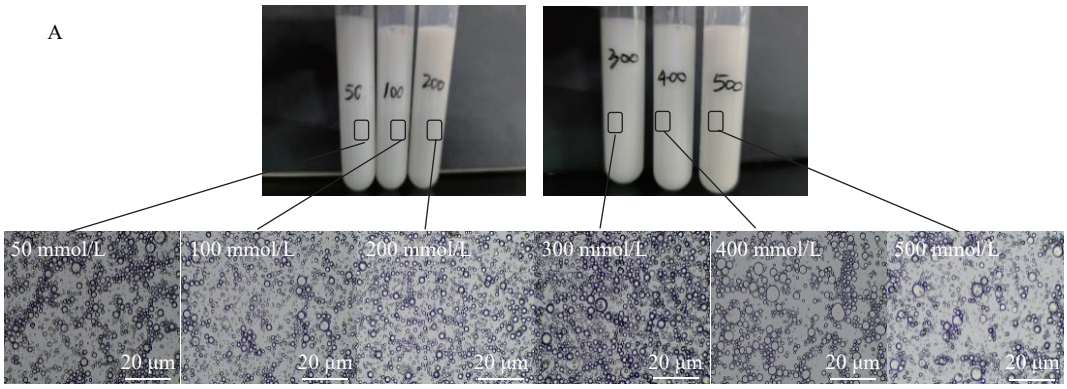
利于在油水界面吸附和展开，形成有效的界面膜和稳定的网络结构[59]，乳液稳定性增加，pH 为 7~11 时，EAI 和 ESI 呈先降低后增加趋势，因为 XG 的过度伸展和 SSP 的变性导致乳液稳定性迅速下降，EAI 和 ESI 降低，而后 SSP 和 XG 处于聚集状态，增强了油滴之间的作用力，恢复了乳液的稳定性，使得 EAI 和 ESI 开始增加[60]，与粒径的结果一致。

2.5.2　离子稳定性　由图 12A 可知，在不同盐离子浓度下，乳液外观无分层。在显微镜观察下，盐离子浓度在 50~300 mmol/L 下，乳液呈现出完整的颗粒状态，400~500 mmol/L 下的颗粒逐渐减少，但乳液部分依然保持稳定，表明其良好的离子稳定性。

由图 12B~图 12D 可知，不同盐离子浓度的颗粒粒径不同，随着盐离子浓度的增加(50~500 mmol/L)，乳液的粒径呈急速上升的趋势，从 7.48 μm 上升到 41.23 μm，NaCl 浓度为 500 mmol/L 时粒径最大，当乳液体系中存在高浓度的盐离子时，盐离子会与颗粒表面的电荷发生相互作用，屏蔽颗粒表面的电荷，降低颗粒之间的静电排斥力[61]。NaCl 屏蔽了 SSP 的表面电荷，压缩双电层，导致静电斥力减弱，液滴之间絮凝程度增加形成了较大的液滴聚集体(“盐析”效应)[62]。同样发现，随着盐离子浓度的增加(50~500 mmol/L)，乳液电位绝对值、EAI 和 ESI 不断减小。因为高离子强度可能会减弱颗粒表面的电荷屏蔽效应，使得颗粒之间的静电斥力减小，颗粒更容易发生聚并，导致乳液稳定性下降。

2.5.3　加热稳定性　由图 13A 可知，在温度 50~90 ℃ 范围内加热 30 min 后，乳液外观没有明显的变化，只有个别颗粒在油水界面上的吸附能力可能会发生变化，乳液仍保持着完整的形状，表明 SSP-XG 颗粒稳定的 Pickering 乳液有很好的加热稳定性。

由图 13B 可知，不同加热温度的颗粒粒径不同，随着温度的升高，乳液的粒径呈现不断增大的趋势，50 ℃ 粒径最小为 12.45 μm，90 ℃ 粒径最大为 15.74 μm，温度升高导致蛋白质变性，改变其构象和表面性质，形成聚集物，导致乳液粒径变大，影响乳液的稳定性。PDI 均小于 0.35，呈现分布均一性。由图 13C 可知，电位的绝对值随温度的变化没有明显的相关性，卢嘉欣[63] 制备了环糊精-壳聚糖 Pickering 乳液，也发现了不同加热温度在外观和电位上没有较大的变化。由图 13D 可知，随着温度上升，EAI 呈现下降趋势，ESI 呈现先增加后降低趋势，温度为 50 ℃ 时，未显著变性，仍保持较好的乳化能力，SSP 与 XG 结合形成凝胶网络，增强乳液的稳定性。随着温度的升高，SSP 聚集物增多，界面层破坏严重，乳液液滴碰撞频率增加，导致乳液失稳[64]。



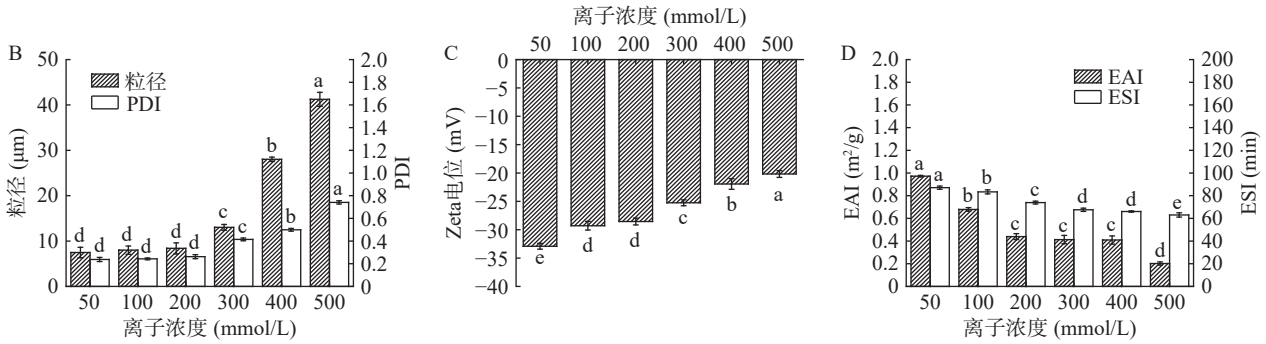


图 12　不同离子浓度的微观结构(A)粒径、PDI(B)、Zeta 电位(C)和 EAI、ESI(D)

Fig.12　Microstructure (A), particle size, PDI (B), Zeta potential (C) and EAI, ESI (D) of different ionic concentrations

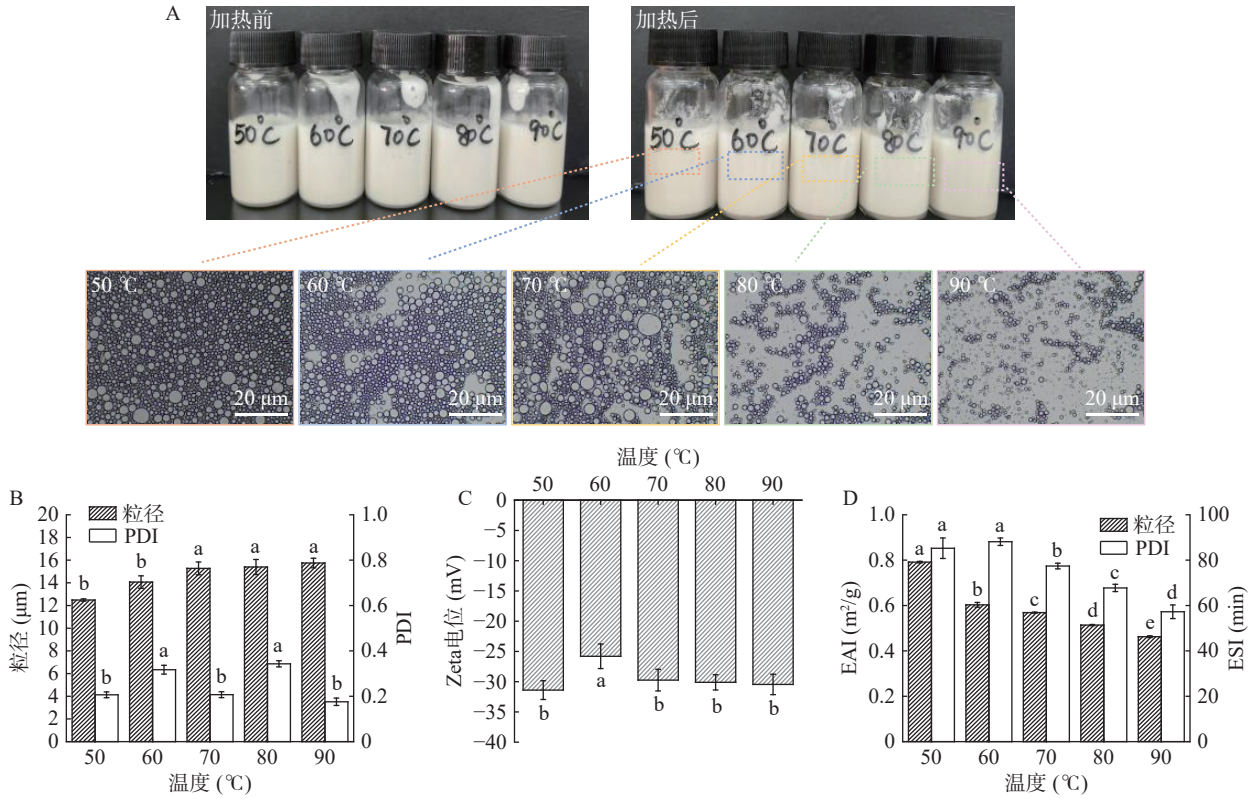


图 13　不同加热稳定的微观结构(A)粒径、PDI(B)、Zeta 电位(C)和 EAI、ESI(D)

Fig.13　Different heating-stable microstructures (A) particle size, PDI (B), Zeta potential (C) and EAI, ESI (D)

2.5.4　储藏稳定性　由图 14 可知, 随着时间的增加, 4 ℃ 下的 CI 值始终低于 25 ℃ 下的 CI 值, 表明在 4 ℃ 贮藏环境下的乳液始终比 25 ℃ 下乳析指数低, 因为在 4 ℃ 下, 颗粒的热运动减弱, 界面吸附更加紧密, 形成的界面膜更致密, 能有效抵抗液滴间的聚结和重力作用导致的分层[65], 有助于维持乳液的稳定性。在 25 ℃ 下, 颗粒的热运动加剧, 从而使连续相中颗粒形成的紧密网络结构被破坏, 界面膜强度降低, 液滴间隙变大, 导致乳滴之间的聚结和乳液的失稳, 从而增加乳析指数[66]。

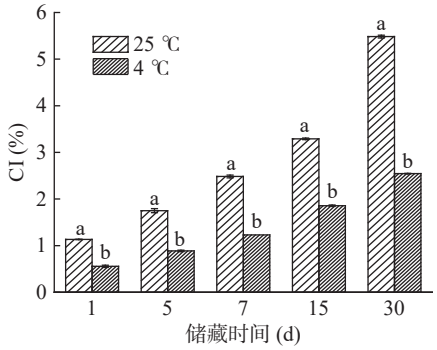


图 14　25 ℃ 和 4 ℃ 储藏稳定性影响

Fig.14　Effects of storage stability under 25 ℃ and 4 ℃

3　结论

本研究采用 SSP 和 XG 构建了 SSP-XG 复合颗粒, 以其为稳定剂制备 Pickering 乳液。SSP 与 XG 通过疏水、静电和氢键相互作用形成紧密的网络结构; 与 SSP 相比, XG 的加入, 改变了 SSP 的表面和形态, 形成更紧凑的结构; 复合后的 SSP-XG 颗粒接触角 θ 值均有所提高, SSP 与 XG 质量比 5∶1 时, θ 最大, 界面湿润性最好; 当 SSP 与 XG 质量比为 5∶1, 油相体积分数为 70% 的 Pickering 乳液粒径、

Zeta 电位、EAI 和 ESI 分别为 6.65 μm、28.82 mV、1.26 m^2/g 和 154.81 min，颗粒之间紧密连接，形成稳定的三维网络结构，具有较好的 pH 稳定性、离子稳定性和加热稳定性，且在 4 ℃ 下储藏乳析指数更低，进一步证明合适的固体颗粒和油相体积分数有利于乳液的稳定。本研究将为开发 SSP 产品及产业化发展奠定良好的基础并对 Pickering 乳液的稳定性研究提供一定的技术支持，为未来食品在健康、可持续和功能化方面提供了新的思路。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ 谭天仪, 李璟, 夏锐, 等. 超细化豆渣作为皮克林乳液稳定剂的特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(2): 47−54. ［TAN T Y, LI J, XIA R, et al. Preparation of ultrafine okara and itscharacteristics as a stabilizer for Pickering emulsion[J]. Food andFermentation Industries, 2020, 46(2): 47−54.］

［2］ TANG J, QUINLAN P J, TAM K C. Stimuli-responsive Pickering emulsions: Recent advances and potential applications[J]. SOFT MATTER, 2015, 11(18): 3512−3529.

［3］ 陈俊芃, 王雯曦, 张琴秋, 等. 菜籽分离蛋白-卡拉胶轭合物-花椒精油 Pickering 乳液的构建及其理化性质分析[J]. 中国油脂, 2024, 49(6): 34−41. ［CHEN J P, WANG W X, ZHANG Q Q, et al. Fabrication of rapeseed protein isolate-carrageenan conjugate-pepper essential oil Pickering emulsion and analysis of its physicochemical properties[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(6): 34−41.］

［4］ 裴素平. 核桃分离蛋白-壳聚糖纳米复合物稳定的 Pickering 乳液体系的构建及应用[D]. 北京: 北京林业大学, 2022. ［PEI S P. Construction and application of Pickering emulsion stabilized by walnut protein isolate-chitosan nanocomposite[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.］

［5］ 焦博. 花生蛋白-多糖 Pickering 乳液的制备及稳定机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018. ［JIAO B. Preparation and stabilizing mechanism of peanut protein-polysaccharide composite particles stabilized pickering emulsions[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.］

［6］ 郑乾坤. 花生分离蛋白-羧甲基壳聚糖 Pickering 乳液体系的构建及其荷载性能研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023. ［ZHENG Q K, Construction and loading performance of peanut separation protein-carboxymethyl chitosan Pickering emulsion system[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.］

［7］ 陈珂玥. 11S/2S 比值及热处理改性对葵花分离蛋白结构与功能特性的影响[D]. 齐齐哈尔: 齐齐哈尔大学, 2015. ［CHEN K Y, Effects of 11S/2S ratios and heat treatment on structural andfunctional properties of sunflower protein isolate[D]. Qiqihar: Qiqihar University, 2015.］

［8］ 罗丰收. 葵花籽粕蛋白提取及其改性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014. ［LUO F S. Extraction of sunflower seed meal protein and study of modification on sunflower seed meal protein [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014.］

［9］ 冷玉娴. 水酶法提取葵花籽油和葵花籽蛋白的回收[D]. 无锡: 江南大学, 2007. ［LENG Y X. Aqueous enzymatie extraction of sunflower seeds oil and recovery protein[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007.］

［10］ 李祎. 利用葵花籽粕制备绿原酸和葵花籽蛋白的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023. ［LI Y. Study on preparation of chlorogenic acid and sunflowerseed protein from sunflower seed meal[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.］

［11］ KARACA A C, TAN C, ASSADPOUR E, et al. Recent advances in the plant protein-polyphenol interactions for the stabilization of emulsions[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2024, 335: 103339.

［12］ 万文瑜. 核桃粕蛋白-多糖复合 Pickering 乳液的制备及其稳定性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022. ［WAN W Y. Preparation and stability study of walnut protein-polysaccharide complex Pickering emulsion[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.］

［13］ 杨婷. 苦荞蛋白-黄原胶复合物的构建及其在 Pickering 乳液中的应用研究[D]. 成都: 成都大学, 2023. ［YANG T. Construction of tartary buckwheat protein-xanthan gum complex and its application in Pickering emulsion[D]. Chengdu: Chengdu University, 2023.］

［14］ YANG Y, WANG R, FENG W, et al. Carboxymethylcellulose/pectin inhibiting structural folding of rice proteins via trinary structural interplays[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 133: 93−100.

［15］ LI C, HUANG X J, PENG Q, et al. Physicochemical properties of peanut protein isolate-glucomannan conjugates prepared by ultrasonic treatment[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(5): 1722−1727.

［16］ MANOI K, RIZVI S S. Emulsification mechanisms and characterizations of cold, gel-like emulsions produced from texturized whey protein concentrate[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(7): 1837−1847.

［17］ LIU F, TANG C H. Soy protein nanoparticle aggregates as pickering stabilizers for oil-in-water emulsions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(37): 8888−8898.

［18］ SHAH B R, LI Y, JIN W P, et al. Preparation and optimization of pickering emulsion stabilized by chitosan-tripolyphosphate nanoparticles for curcumin encapsulation[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 369−377.

［19］ 邓苏梦. 面筋蛋白粒子-黄原胶皮克林乳液的制备及其 β 胡萝卜素负载研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018. ［DENG S M. Fabricationof pickering emulsions stabilized by wheat gluten nanoparticles-xanthan gum and their beta-carotene loading capacity[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.］

［20］ 张达超. 玉米醇溶蛋白-黄原胶纳米颗粒的制备及其递送姜黄素研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021. ［ZHANG D C. Preparation of maillardin-hempelnan nanoparticles and its application in curcumin delivery[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.］

［21］ OWENS C, GRIFFIN K, KHOURYIEH H, et al. Creaming and oxidative stability of fish oil-in-water emulsions stabilized by whey protein-xanthan-locust bean complexes: Impact of pH[J]. Food Chemistry, 2018, 239(1): 385−386.

［22］ CERQUEIRA M A, SOUZA B W, TEIXEIRA J A, et al. Effect of glycerol and corn oilon physicochemical properties of polysaccharide films-A comparative study[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27(1): 175−184.

［23］ HU Y, QIU C, MCCLEMENTS D J, et al. Simple strategy preparing cyclodextrin carboxylate as a highly effective carrier for bioactive compounds[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(37): 11006−11014.

[24] YANG Y, WANG Q, LEI L, et al. Molecular interaction of soybean glycinin and β-conglycinin with epigallocatechin gallate induced by pH changes[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 106010.
[25] HOQUE M S, BENJAKUL S, PRODPRAN T. Effects of partial hydrolysis and plasticizer content on the properties of film from cuttlefish (*Sepia pharaonis*) skin gelatin[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(1): 82−90.
[26] YANG S F, DAI L, SUN C X, et al. Characterization of curcumin loaded gliadin-lecithin composite nanoparticles fabricated by antisolvent precipitation in different blending sequences[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85: 185−194.
[27] HUANG G Q, SUN Y T, XIAO J X, et al. Complex coacervation of soybean protein isolate and chitosan[J]. Food Chemistry, 2012, 135(2): 534−539.
[28] EVANS M, RATCLIFFE I, WILLIAMS P A. Emulsion stabilisation using polysaccharide-protein complexes[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2013, 18(4): 272−282.
[29] AKARTUNA I, STUDART A R, TERVOORT E, et al. Stabilization of oil-in-water emulsions by colloidal particles modified with short amphiphiles[J]. Langmuir, 2008, 24(14): 7161−7168.
[30] 焦博, 石爱民, 刘红芝, 等. 基于食品级固体颗粒稳定的 Pickering 乳液研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 296−303. [JIAO B, SHI A M, LIU H Z, et al. A review on food-grade particle stabilized Pickering emulsion[J]. Food Science, 2018, 39(5): 296−303.]
[31] 谢丽清. 乳铁蛋白、EGCG、高甲酯果胶、β-环糊精四元复合物构建及在 Pickering 乳液中的应用[D]. 新乡: 河南科技学院, 2023. [XIE L Q. Fabrication of tetrameric complex and applicated in Pickering emulsion by lactoferrin, EGCG, high methyl ester pectin and β-cyclodextrin[D]. Xinxiang: Henan University of Science and Technology, 2023.]
[32] 李姿坤. 牛血清白蛋白-普鲁兰多糖-儿茶素纳米颗粒的制备及其在 Pickering 乳液的应用研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2024. [LI Z K. Preparation of bovine serum albumin-pullulan-catechin nanoparticles and its application in Pickering emulsion[D]. Yantai: Yantai University, 2024.]
[33] WEI Y, YU Z, LIN K, et al. Fabrication, physicochemical Stability, and microstructure of coenzyme q10 pickering emulsions stabilized by resveratrol-loaded composite nanoparticles[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(5): 1405−1418.
[34] JIANG Y, ZHANG C, YUAN J H, et al. Effects of pectin polydispersity on zein/pectin composite nanoparticles (ZAPs) as high internal-phase Pickering emulsion stabilizers[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 219: 77−86.
[35] 陆丹丹. 猪皮 Pickering 乳液的制备表征及应用研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023. [LU D D. The ization and application of Pickering emulsion[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.]
[36] YANG Z, YANG H, YANG H. Effects of sucrose addition on the rheology and microstructure of κ-carrageenan gel[J]. Food Hydrocolloid, 2018, 75: 164−173.
[37] DAI L, SUN C X, LI R R, et al. Structural characterization, formation mechanism and stability of curcumin in zein-lecithin composite nanoparticles fabricated by antisolvent co-precipitation[J]. Food Chemistry, 2017, 237: 1163−1171.
[38] SONG X Z, ZHOU C J, FU F, et al. Effect of high-pressure homogenization on particle size and film properties of soy protein isolate[J]. Industrial Crops and Products, 2013, 43: 538−544.
[39] 杨婷婷, 罗国柳, 覃小丽, 等. 低分子糖-麦醇溶蛋白复合物的结构与性能及其相互作用分析[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(5): 15−21. [YANG T T, LUO G L, QIN X L, et al. Analysis of the structure and properties and interactions of the low molecular sugar-malinin complex[J]. Food Research and Development, 2023, 44(5): 15−21.]
[40] 王卉楠. 植物蛋白及其 Pickering 乳液对带鱼肌球蛋白凝胶特性的影响研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2023. [WANG H N. Effect of plant protein and its pickering emulsion on the gel properties of hairtail myosin[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2023.]
[41] 鲁路通. 小麦醇溶蛋白/卵磷脂复合纳米颗粒稳定 Pickering 乳液的制备与应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022. [LU L T. Fabrication and application of Pickering emulsions stabilized by gliadin-lecithin nanoparticles[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.]
[42] 王舒予. 肌原纤维蛋白-魔芋葡甘聚糖高内相 Pickering 乳液的制备、表征与应用[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023. [WANG S Y. Preparation, characterization and application of myofibrillillin-konjac glucan an Pickering emulsion[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.]
[43] LESMA G, LURAGHI A, BAVARO T, et al. Phytosterol and gamma-oryzanol conjugates: Synthesis and evaluation of their antioxidant, antiproliferative, and anti-cholesterol activities[J]. J Nat Prod, 2018, 81(10): 2212−2221.
[44] CHEN W, LI T, YU H, et al. Structure and emulsifying properties of whey protein isolate: Effect of safflower yellow concentration[J]. Food Science and Technology, 2020, 123: 109079.
[45] BERTON-CARABIN C C, SCHROEN K. Pickering emulsions for food applications: background, trends, and challenges[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2015, 6: 263−297.
[46] 范祺, 张明, 张博华, 等. 多糖对灵芝孢子油乳状液稳定性的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(22): 51−56. [FAN Q, ZHANG M, ZHANG B H, et al. Effects of polysaccharides on the stability of *Ganoderma lucidum* spore oil emulsion[J]. Food Research and Development, 2021, 42(22): 51−56.]
[47] 张婷. 大豆蛋白-壳聚糖乳液模板油凝胶的制备及其应用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023. [ZHANG T. Study on Preparation and application of emulsion-templated oleogels with soybean protein-chitosan[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.]
[48] TORRES L G, ITURBE R, SNOWDEN M J, et al. Preparation of O/W emulsions stabilized by solid particles and their characterization by oscillatory rheology[J]. Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, 302(1−3): 439−448.
[49] 孙正伟. 乳清分离蛋白-藻酸丙二醇酯复合物结构的构建及 Pickering 乳液稳定性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022. [SUN Z W. Study on the construction of whey protein isolate propylene glycol alginate complex structure and stability of Pickering emulsion[D]. Changchun: Jilin University, 2022.]
[50] 许馨予, 杨鹤隽, 贾斌, 等. 大豆分离蛋白-高酯柑橘果胶-没食子酸复合 Pickering 乳液制备及其稳定性分析[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 42−51. [XU X Y, YANG H J, JIA B, et al. Preparation of soy separation protein-high ester citrus pectin-gallic acid complex Pickering emulsion and its stability analysis[J]. Food Science, 2022, 43(24): 42−51.]
[51] CEN K, YU X, GAO C, et al. Effects of quinoa protein Pickering emulsion on the properties, structure and intermolecular interactions of myofibrillar protein gel[J]. Food Chemistry, 2022, 394: 133456.

［52］ LI F, LI X, HUANG K, et al. Preparation and characterization of pickering emulsion stabilized by hordein-chitosan complex particles[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 292: 110275.
［53］ ZHAO T, HUANG K, LUO Y, et al. Preparation and characterization of high internal phase Pickering emulsions stabilized by hordein-chitosan composite nanoparticles[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 659: 130766.
［54］ LIU C, FAN L, YANG Y, et al. Characterization of surimi particles stabilized novel Pickering emulsions: Effect of particles concentration pH and NaCl levels[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117(23): 106731.
［55］ 孙玉南. 基于玉米醇溶蛋白-肉桂醛 Pickering 乳液的制备及其食品保鲜性能研究[D]. 广州：仲恺农业工程学院, 2023. ［SUN Y N. Preparation of corn zona pellucida protein-cassia bark-aldehyde pickering emulsion and its food preservation performance [D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2023.］
［56］ 徐甜. 基于 OSA 淀粉/壳聚糖复合物的 Pickering 乳液界面稳定化研究[D]. 无锡：江南大学, 2023. ［XU T. Study on the stabilization of Pickering emulsion interfaces based on OSA starch/chitosan complex[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.］
［57］ LÜ P, WANG D, CHEN Y. Pickering emulsion gels stabilized by novel complex particles of high-pressure-induced WPI gel and chitosan: Fabrication, characterization and encapsulation[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 105992.
［58］ 牛冠超. pH 响应型海藻酸钠基水凝胶对染料吸附性能研究[D]. 哈尔滨：黑龙江大学, 2024. ［NIU G C. Study on the dye adsorption performance of pH-responsive sodium alginate-based hydrogels[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2024.］
［59］ ISCIMEN E M, ASLAN T D. Effect of pH-shifting on sunflower meal protein isolate: Improved stability and interfacial properties of chitosan-stabilized Pickering emulsion[J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(3): 2765−2780.
［60］ 沈小倩, 张梦, 周伟, 等. pH 和离子强度对甘蔗渣纳米纤维 Pickering 乳液稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 102−108. ［SHEN X Q, ZHANG M, ZHOU W, et al. pH Influence of pH and ionic strength on the stability of nanofiber Pickering emulsions from bagasse[J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(6): 102−108.］
［61］ 李小敏. 淀粉基复合胶体颗粒皮克林乳液的构建与应用[D]. 合肥：合肥工业大学, 2020. ［LI X M. Preparation and application of starch-based complex colloidal particles on Pickering emulsions[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.］
［62］ QIN X S, LUO Z G, PENG X C, et al. Fabrication and characterization of quinoa protein nanoparticle-stabilized food-grade pickering emulsions with ultrasound treatment: Effect of ionic strength on the freeze-thaw stability[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(31): 8363−8370.
［63］ 卢嘉欣. 环糊精-壳聚糖基 Pickering 乳液制备及应用研究[D]. 无锡：江南大学, 2022. ［LU J X. Research on the preparation and application of cyclodextrin-chitosan-based Pickering emulsion [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.］
［64］ YANG X, LI A, LI D, et al. Applications of mixed polysaccharide-protein systems in fabricating multi-structures of binary food gels-A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 197−210.
［65］ 李媛. 基于 β-乳球蛋白纳米颗粒稳定的高内相 Pickering 乳液的制备、表征与应用[D]. 重庆：西南大学, 2020. ［LI Y. Preparation, characterization and application of high-phase Pickering emulsions stabilized by β-lactoglobulin nanoparticles[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.］
［66］ 冯鑫, 马良, 戴宏杰, 等. 食品级 Pickering 乳液的稳定性及 β-胡萝卜素的装载研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(6): 18−25. ［FENG X, MA L, DAI H J, et al. Stability and loading of β-carotene in food-grade Pickering emulsion[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(6): 18−25.］