孙一鸣, 沈梦琪, 张曼, 等. 大豆分离蛋白-黄原胶复合/双层乳液的制备及稳定性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 94−103. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120344

SUN Yiming, SHEN Mengqi, ZHANG Man, et al. Preparation and Stability of Soy Protein Isolate-Xanthan Gum Composite and Bilayer Emulsions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 94−103. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120344

· 研究与探讨 ·

大豆分离蛋白-黄原胶复合/双层乳液的制备及稳定性研究

孙一鸣[1], 沈梦琪[1], 张　曼[1], 李梦杰[1], 徐宝成[1,2,3,*], 刘丽莉[1,2,3]

（1.河南科技大学食品与生物工程学院, 河南洛阳 471003;
2.河南省食品绿色加工与质量安全控制国际联合实验室, 河南洛阳 471000;
3.食品加工与安全国家级实验教学示范中心, 河南洛阳 471003）

摘　要: 为提高以大豆分离蛋白（Soybean protein isolate，SPI）为单一乳化剂所制备乳液的稳定性，本研究采用大豆分离蛋白和黄原胶（Xanthan gum，XG）为乳化剂，制备葵花籽油复合乳液（SPI-XG-e）和双层乳液（SPI-e/XG），并重点考察了黄原胶浓度对乳液的物理特性（平均粒径、Zeta-电位、浊度）及稳定性的影响。结果表明：在黄原胶浓度为 1.0% 时，双层乳液具有优良的物理特性，表现为更均匀的粒径分布，较小的平均粒径（0.63±0.03 μm），较高的 Zeta-电位绝对值（46.70±0.25 mV）以及低的离心稳定常数（0.70%±0.46%）。在对比复合乳液和双层乳液的稳定性时，后者显示出更好的环境适应性，特别是在 1.0% 的黄原胶浓度下制备的双层乳液，能够在 4 ℃ 下存放 7 d 而不出现分层，并且在经过 90 ℃ 的热处理后仍保持较高的 Zeta-电位绝对值（44.47±0.31 mV），三次冻融循环后未出现絮凝等现象，具有较高的稳定性。本研究可为食品加工领域开发高稳定性水包油乳液提供参考和依据。

关键词: 大豆分离蛋白, 黄原胶, 双层乳液, 复合乳液, 稳定性

中图分类号: TS225.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0094−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120344　　本文网刊:

Preparation and Stability of Soy Protein Isolate-Xanthan Gum Composite and Bilayer Emulsions

SUN Yiming[1], SHEN Mengqi[1], ZHANG Man[1], LI Mengjie[1], XU Baocheng[1,2,3,*], LIU Lili[1,2,3]

（1.College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;
2.Henan International Joint Laboratory of Food Green Processing and Safety Control, Luoyang 471000, China;
3.National Experimental Teaching Demonstration Center of Food Processing and Safety, Luoyang 471003, China）

Abstract: To enhance the stability of emulsions prepared with soybean protein isolate (SPI) as the sole emulsifier, this study developed composite sunflower seed oil emulsions (SPI-XG-e) and bilayer emulsions (SPI-e/XG) using SPI and xanthan gum (XG) as co-emulsifiers. The primary objective was to investigate the effects of XG concentration on the physical characteristics of the emulsions, including mean particle size, Zeta potential, and turbidity, as well as their overall stability. The findings revealed that at a XG concentration of 1.0%, the bilayer emulsion demonstrated superior physical properties, characterized by a more uniform particle size distribution, a smaller mean particle diameter (0.63±0.03 μm), a higher absolute Zeta-potential value (46.70±0.25 mV), and a lower centrifugal stability constant (0.70%±0.46%). Comparative analysis of the composite and bilayer emulsions revealed that the latter exhibited enhanced environmental

收稿日期: 2024−12−26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目（31772094）; 河南省重点研发与推广专项（科技攻关 222102110033）; 河南科技大学博士科研启动基金（13480057）。

作者简介: 孙一鸣（2001−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 功能性食品开发, E-mail: yimingsunny@163.com。

*** 通信作者:** 徐宝成（1976−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 脂质化学与营养, E-mail: xbc76@163.com。

stress tolerance. Particularly, the bilayer emulsion prepared with 1.0% XG could maintain homogeneity for 7 days of storage at 4 ℃ with no detectable phase separation. After thermal treatment at 90 ℃, it retained a high absolute Zeta-potential value (44.47±0.31 mV) and showed no flocculation following three freeze-thaw cycles, demonstrating robust stability. This study provides actionable guidelines for developing highly stable oil-in-water emulsions in food manufacturing processes.

Key words: soy protein isolate; xanthan gum; bilayer emulsion; composite emulsion; stability

乳液因油相可以在水相中均匀分散，多用于脂溶性功能因子的递送。传统乳液虽然制备简单，但在面对外部环境压力时仍具有极大的不稳定性，易发生絮凝、聚结等现象[1]。目前广泛使用的合成表面活性剂，如吐温 20 和司盘 80 等，虽能提升乳液的稳定性，但其可能对环境及健康构成潜在的风险，促使人们更倾向于使用天然蛋白（如乳清分离蛋白、大豆分离蛋白和玉米蛋白）来进行代替[2]。其中，大豆分离蛋白因其来源广泛、价格低廉和高营养的特性[3]，在食品行业中有较好的应用前景。然而，冻融、温度等环境因素的变化很容易促使大豆分离蛋白变性，进而导致制备的乳液不稳定[4]。为了解决这一问题，国内外研究者已经进行了许多尝试来开发蛋白质-多糖二元组合，构建一种新型的乳液体系，以提高乳液的稳定性和功能特性[5−9]。Zhang 等[10] 利用阴离子多糖、豆科蛋白与油混合均质后制备的复合乳液，其稳定性较单独使用豆科蛋白制备的乳液更高。这是由于蛋白与多糖非共价复合能够显著增强蛋白的乳化性能，其中阴性及中性多糖的稳定效果要优于阳性多糖[11]。

黄原胶作为一种阴离子多糖，因其出色的高黏度特性及优异的冻融稳定性，被广泛应用在食品工业中[12]。研究表明，在酸性环境下，当黄原胶的浓度超过 0.12% 时，乳清分离蛋白与黄原胶形成的复合物会吸附在油滴的表面，有助于增强复合乳液的稳定性[13]。黄欢等[14] 采用酪蛋白酸钠和黄原胶混合而成的乳化剂，成功制备出了稳定性优异的椰子油复合型乳液。此外，黄原胶和果胶等多糖包裹在小麦醇溶蛋白包被的油滴表面，制备出的双层乳液能抵抗高离子强度和酸性 pH 带来的不利影响[15]。由此可见，乳液界面层的构建是决定其稳定性的关键性因素，设法促进乳液形成双层界面结构，增加界面层厚度及致密性，是提高乳液物理及氧化稳定性的有效途径。

尽管目前使用多糖协助蛋白来增强乳液稳定性已被广泛研究，但基于多糖与大豆分离蛋白共同构建不同界面层乳液及其对乳液稳定性的影响鲜有报道。因此，本研究以大豆分离蛋白和黄原胶为原料，制备了两种不同界面结构的乳液（复合乳液、双层乳液），通过比较乳液的粒径、表面电荷分布、浊度和流变学等特性，探讨黄原胶浓度对乳液性质以及稳定性的影响，以期为食品加工领域开发高稳定性水包油乳液提供参考和依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

大豆分离蛋白、黄原胶　上海源叶生物科技有限公司；葵花籽油　中粮福临门；盐酸、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、氢氧化钠　均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

GJJ-0.03/60 高压均质机　上海台驰轻工装备有限公司；DHR-2 流变仪　美国沃特斯公司；Bettersize2600 激光粒度仪、BeNano 90 Zeta 纳米粒度及 Zeta 电位分析仪　丹东百特仪器有限公司；UV-1800 紫外可见分光光度计　日本岛津公司；DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器　巩义予华仪器有限责任公司；PHS-3E 台式 pH 计　上海仪电科学仪器股份有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　乳液样品的制备

1.2.1.1　双层乳液样品的制备　参考张程超等[16] 的方法并进行适当修改。先制备单层乳液，再制备双层乳液。配制 2.0wt% 的 SPI 溶液，水合一夜后在室温条件下以 1000 r/min 的转速进行磁力搅拌，时间为 30 min，使其温度恢复至室温，并促进蛋白分散均匀，然后 4000 r/min 离心 10 min 后取清液作为水相。将水相倒入烧杯中，再加入体积分数为 10% 的油相，以 12000 r/min 的转速高速剪切 3 min，制备出粗乳液。再在 40 MPa 的压力下高压均质循环三次（全部乳液通过高压均质机腔视为一次循环），形成单层乳液 SPI-e。配制一定浓度（0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%）的 XG 溶液，将 XG 溶液和 SPI-e 的 pH 调至 4。随后以 7∶3 的体积比将 XG 溶液和 SPI-e 混合，并在 12000 r/min 的转速下剪切 3 min。最后在 40 MPa 的压力下高压均质循环三次，形成双层乳液 SPI-e/XG（图 1）。进行 3 次重复制备，以用于同一测定。

1.2.1.2　复合乳液样品的制备　配制 2.0 wt% 的 SPI 溶液，水合一夜后在室温条件下以 1000 r/min 的转速进行磁力搅拌，时间为 30 min，使其温度恢复至室温，并促进蛋白均匀分散，之后以 4000 r/min 的转速离心 10 min，取上清液于烧杯中备用。将一定浓度的 XG 溶液和 SPI 上清液的 pH 调至 4。随后以 7∶3 的体积比将 XG 溶液和 SPI 上清液混合，搅拌 30 min，使两者充分混合，然后加入 10% 的油相，并在 12000 r/min 的转速下剪切，时间为 3 min，制备出

粗乳液。最后在 40 MPa 下高压均质循环三次，形成复合乳液 SPI-XG-e（图 1）。进行 3 次重复制备，以用于同一测定。

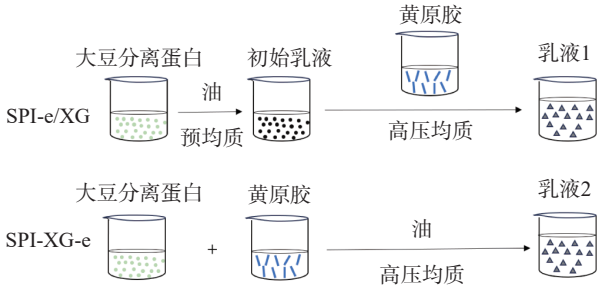


图 1 乳液制备方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of emulsion preparation methods

1.2.2 粒径的测定 利用 Bettersize2600 激光粒度仪测定乳液的粒径大小及分布状况。将乳液样品逐滴加入样品池中，直至遮光度达到 10%~15% 范围时进行测定。相对折光率为 1.095，测试温度 25 ℃，平衡时间 120 s。

1.2.3 Zeta-电位的测定 用蒸馏水将 1 mL 的乳液样品稀释 10 倍，将 1 mL 稀释过后的样品置于毛细管样品池内，设定测试温度为 25 ℃，平衡时间 120 s。

1.2.4 浊度 参考江连洲等[17] 的方法并进行适当修改。使用磷酸盐缓冲液（pH7、0.05 mol/L）将乳液进行 40 倍稀释，测定其在 600 nm 处的吸光度，浊度计算公式如式（1）所示：

$$T(cm^{-1}) = \frac{1.302AV}{I} \quad 式（1）$$

式中：A 表示稀释乳液样品在 600 nm 处的吸光度；V 表示稀释倍数（40 倍）；I 表示光程差，取 1 cm。

1.2.5 流变学测定 参考 Wang 等[18] 的方法并进行适当修改。选用直径为 40 mm 的平板，取适量样品放置在样品台上，测试温度设为 25 ℃。动态频率扫描模式的频率范围设为 0.1~10 Hz。

1.2.6 乳液稳定性

1.2.6.1 离心稳定性 使用去离子水将乳液进行 100 倍稀释，并在 500 nm 处测定其吸光度；以 3000 r/min 的转速将稀释后的乳液样品离心 20 min，取下层样品在 500 nm 处测定吸光度。离心稳定性的计算公式如式（2）所示：

$$Ke(\%) = \left(\frac{A - A_0}{A}\right) \times 100 \quad 式（2）$$

式中：Ke 表示离心稳定常数；A 表示乳液（离心前）在 500 nm 波长处的吸光度；A_0 表示乳液（离心后）在 500 nm 波长处的吸光度。

1.2.6.2 储藏稳定性 分别取 10 mL 新鲜乳液于玻璃瓶中，在 4 ℃ 储存 7 d 后，分别记录乳液的粒径与 Zeta-电位，并观察乳液的外观变化。

1.2.6.3 热稳定性 分别取 10 mL 新鲜乳液于玻璃瓶中，使用磁力搅拌器分别加热至不同的温度：45、60、75、90 ℃。加热 30 min（避光恒温）之后立即取样，待其冷却至室温，测定乳液粒径和 Zeta-电位的变化[19]。

1.2.6.4 冻融稳定性 分别取 10 mL 的新鲜乳液于离心管中，将其放置于−22 ℃ 的冰箱内进行冷冻，持续 48 h，冷冻完毕之后在 20 ℃ 环境中解冻 48 h。循环三次，并在每个循环后对乳液的粒径和 Zeta-电位进行测定。

1.3 数据处理

所有实验重复三次，最终结果以平均值±标准差（SD）表示。采用 SPSS 26.0 进行显著性分析，显著性水平 $P<0.05$。采用 Origin 2022 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 粒径分析

复合乳液的粒径随着 XG 浓度的增加表现出先增加后减小的趋势，其中当 XG 浓度为 0.2% 时，其平均粒径显著增加（$P<0.05$），出现这种现象的原因可能是乳液体系中存在非吸附性的 XG 分子，当液滴因布朗运动接近，且间距小于 XG 分子直径时，XG 将会被排除出去。因此，液滴间距小于 XG 分子直径的区域内的 XG 浓度为零，并与周围连续相产生渗透压，为降低渗透压，液滴之间的相互作用力随之增强，发生排斥絮凝现象[20]。随着 XG 浓度的增加，乳液网络结构相应增强，从而减弱布朗运动并阻止液滴的聚集絮凝，粒径随之降低。然而，双层乳液的平均粒径随着 XG 浓度的增加逐渐减小，并未出现排斥絮凝现象，这种差异主要是因为在双层乳液中，XG 能更有效地覆盖在初级乳液液滴的外层，增强液滴间的静电排斥力，进而有效防止了液滴的聚集及絮凝现象[21]。此外，XG 与 SPI 相互作用不仅产生了空间位阻效应，还提高了蛋白在油水界面的吸附能力[22]，进一步稳定了乳液结构。

同时，复合乳液与双层乳液的粒径分布表现存在显著差异。复合乳液的粒径均呈多峰分布（图 2C），表明液滴分布不均匀，易聚集或沉淀，不利于乳液的长期稳定[23]。随 XG 浓度的增加，平均粒径减小的速度越来越慢，且在 XG 浓度为 1.0% 时降至最小，为 22.52±0.74 μm（图 2A）。相比之下，双层乳液的粒径分布较为均匀（图 2D）且在 XG 浓度为 1.0% 时，粒径达到最小，为 0.63±0.03 μm（图 2B），表明其具有更优的稳定性，可适用于多种食品加工场景中。

2.2 Zeta-电位分析

乳液的 Zeta-电位绝对值越大，乳液体系越稳定[24]。XG 浓度对复合乳液和双层乳液 Zeta-电位的影响如图 3 所示。复合乳液和双层乳液的 Zeta-电位均为负值，这是乳液的 pH 超过了 SPI 的等电点导致的[25]。

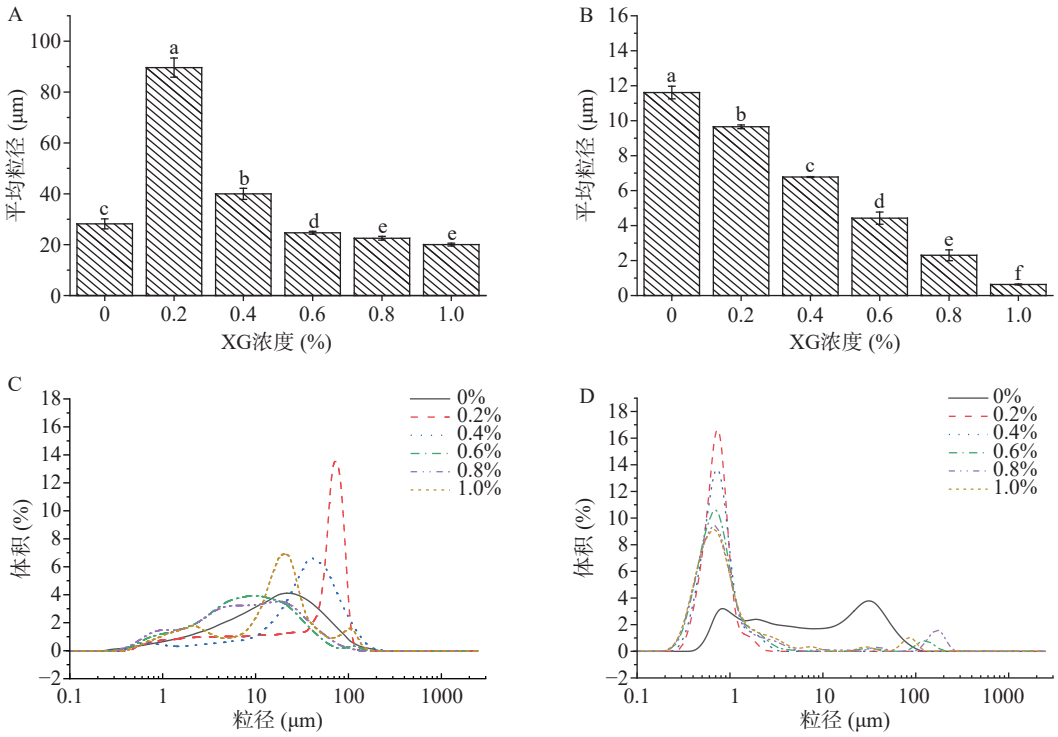


图 2　黄原胶浓度对不同葵花籽油乳液平均粒径的影响

Fig.2　Effect of xanthan gum concentration on average particle size of different sunflower oil emulsions

注：A、C 代表 SPI-XG-e；B、D 代表 SPI-e/XG。图中不同小写字母代表差异显著（P<0.05），图 3、图 4、图 6、图 8~图 11 同。

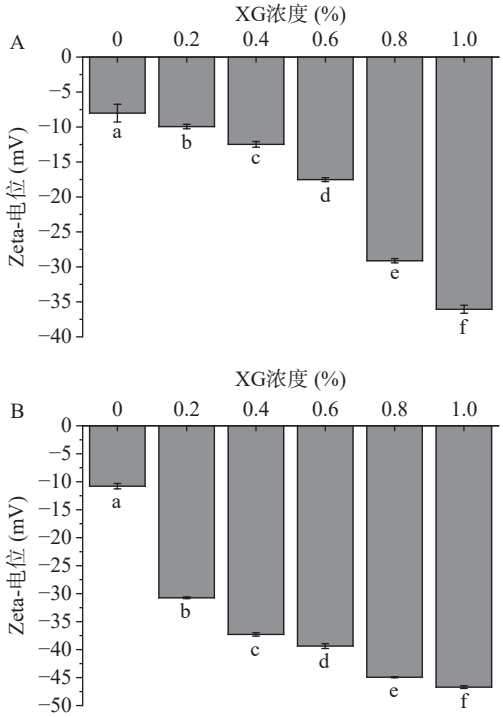


图 3　黄原胶浓度对不同葵花籽油乳液 Zeta-电位的影响

Fig.3　Effect of xanthan gum concentration on Zeta-potential value of different sunflower oil emulsions

注：A 代表 SPI-XG-e；B 代表 SPI-e/XG。

复合乳液和双层乳液的 Zeta-电位值差异明显，反映了两种乳液结构对稳定性的影响。随着 XG 浓度增加至 1.0%，复合乳液的 Zeta-电位绝对值从较低水平显著增加至 36.06±0.57 mV（P<0.05），这是由于 XG 带负电荷，随着浓度的增加，乳液中负电基团的数量上升，从而导致 Zeta-电位绝对值相应增加[26]。此外，由于结构上的差异，双层乳液在酸性条件（pH4）下，带正电荷的 SPI 可以通过静电力吸引 XG 覆盖在单层乳液的外层，进而会导致 Zeta-电位发生明显的变化[27]。而由图 3 可知，在添加了相同浓度的 XG 后，双层乳液的 Zeta-电位绝对值均明显高于复合乳液，故可以初步判断出 XG 已经吸附在了 SPI 上并形成第二层膜，经过一段时间的静置，乳液仍保持稳定的形态且未出现分层，由此推断形成了双层乳液的结构[16]。总的来说，双层乳液由于其更高的 Zeta-电位绝对值和更强的静电排斥机制，展现出比复合乳液更优的稳定性。

2.3　浊度

浊度是评估乳液体系分散程度和聚集情况的关键指标。从图 4A 可以看出，随着 XG 浓度的增加，复合乳液的浊度逐渐增大，在 XG 浓度为 1.0% 时达到最大值 103.76±0.21 cm^{-1}。另一方面，图 4B 显示了当 XG 浓度为 1.0% 时，双层乳液的浊度最小，为 74.34±0.03 cm^{-1}。结果表明复合乳液相比双层乳液有更高的浊度，这是由于双层乳液经过了两次高压均质处理，而均质过程中产生的剪切力和空化现象有效破坏了蛋白质的聚集，进而降低了乳液的浊度。彭群等[28] 探究不同均质次数对纳米乳液的影响，结果表明随着均质次数的增加，乳液的平均粒径及浊度均相应降低。此外，Lee 等[29] 研究发现，未被处理的 SPI 溶液的溶解度较低且浊度较高，但经均质处理之后，其蛋白质的溶解度显著增加，浊度有所降低。

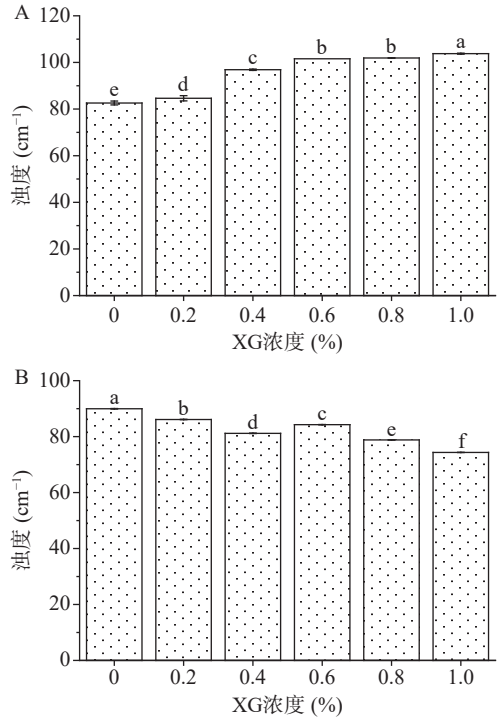


图 4 黄原胶浓度对不同葵花籽油乳液浊度的影响

Fig.4 Effect of xanthan gum concentration on turbidity of different sunflower oil emulsions

注: A 代表 SPI-XG-e; B 代表 SPI-e/XG。

2.4 流变学分析

如图 5 所示，当 XG 浓度在 0.2%~1.0% 范围内，复合乳液和双层乳液储能模量(G′)和损耗模量(G″)随着 XG 浓度的提高而增加，表明乳液的网络结构强度逐渐增强[30]。在 0.1~10 Hz 的频率范围内，所有样品的 G′均高于 G″，表现出固体特性和黏弹性。这表明含有较高浓度的 XG 比较低浓度的 XG 的乳液形成了更好的凝胶网络结构。在探究食品乳液体系时发现，相较于那些使用较低浓度黄原胶的乳液，当黄原胶浓度提升到较高水平时，往往能够构建更为稳固且致密的凝胶网络结构，这一规律在多种包含聚合物成分的乳液系统中均得到了重复验证[31]。

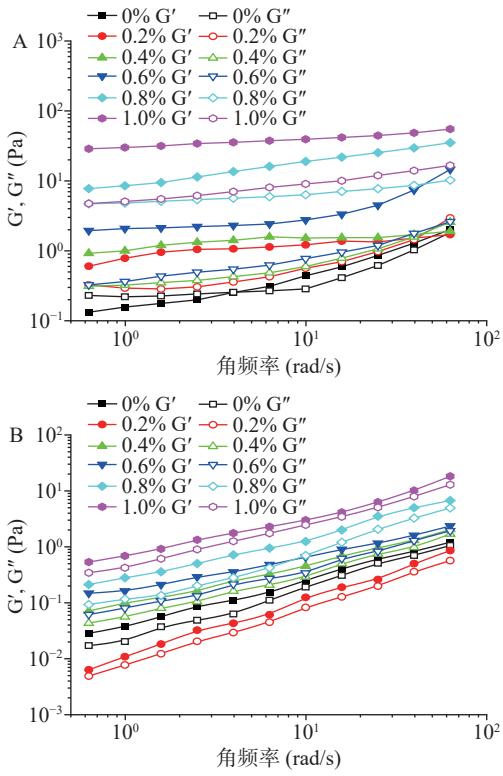


图 5 黄原胶浓度对不同葵花籽油乳液储能模量和损耗模量的影响

Fig.5 Effect of xanthan gum concentration on energy storage modulus and loss modulus of different sunflower oil emulsions

注: A 代表 SPI-XG-e; B 代表 SPI-e/XG。

2.5 乳液稳定性

2.5.1 离心稳定性 乳液的离心稳定常数越小，表示其离心稳定性越好，且低于 20% 时被认为是相对稳定的[32]。由图 6A 可知，复合乳液的离心稳定常数(Ke)随着 XG 浓度的增加呈现先上升后下降的趋势。当 XG 浓度为 0.4% 时，离心稳定常数为 57.98%±5.79%，此时低浓度的 XG 无法提供充分的乳化作用，导致油滴颗粒较大或分布不均匀。而当 XG 浓度为 1.0% 时，离心稳定常数降低至 3.30%±0.97%，说明高浓度的 XG 可以通过双重机制有效提升乳液的稳定性，一方面是 XG 浓度的提高增加了连续相的黏度并抑制液滴迁移，另一方面是当 XG 达到一定的浓度时可以促进 SPI 在油-水界面上的吸附，降低界面张力，并通过空间位阻和静电排斥抑制液滴聚集，从而提高乳液的稳定性[33]。由图 6B 可知，随着 XG 浓度的增加，双层乳液的离心稳定常数呈现逐渐降低的趋势。这主要是因为 XG 浓度的提高使得其

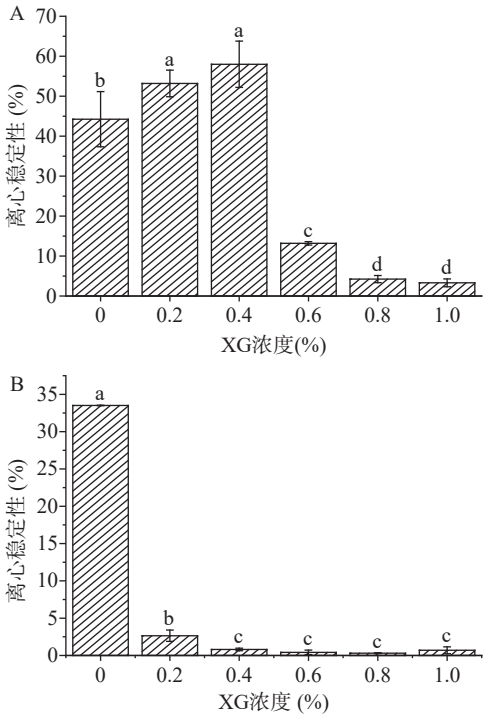


图 6 黄原胶浓度对不同葵花籽油乳液离心稳定性的影响

Fig.6 Effect of xanthan gum concentration on centrifugal stability of different sunflower oil emulsions

注: A 代表 SPI-XG-e; B 代表 SPI-e/XG。

在 SPI 单层乳液液滴表面的覆盖度增加，从而增强了乳液的物理稳定性[34]。当 XG 浓度为 0.4%~1.0% 时，离心稳定常数降低到极低水平且差异不显著，分别为：0.81%±0.17%、0.42%±0.30%、0.31%±0.06% 和 0.70%±0.46%。这进一步证实了双层结构在提高乳液稳定性方面的优势。这种结构通过增加油水界面的保护层，减少了油滴在离心过程中的聚集和沉淀，使乳液更稳定。

2.5.2　储藏稳定性　两种乳液样品在 4 ℃ 下储藏 7 d 后，测试其外观、粒径以及 Zeta-电位的变化以评估两种乳液的储藏稳定性。由图 7A 可以看出，复合乳液在 XG 浓度低于 0.2% 时出现分层现象，而在 XG 浓度高于 0.2% 时外观保持稳定，未观察到明显变化，表明较高浓度的 XG 有助于增强复合乳液的储藏稳定性。相比之下，双层乳液低温贮藏 7 d 后并未发生分层现象，展示出更高的储藏稳定性。这种差异源于双层结构更有效的界面保护和油水层之间更均匀的力学性质分布，使其在储存期间保持更好的稳定性。

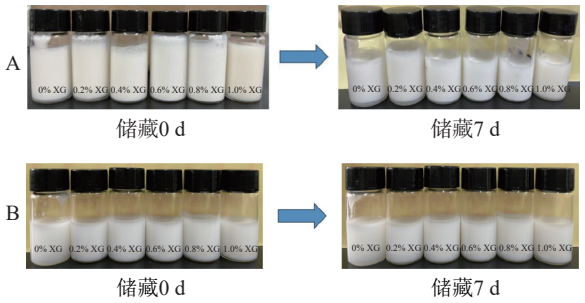


图 7　复合乳液和双层乳液储藏 0 d 和 7 d 的外观图

Fig.7　Schematic diagrams of composite and bilayer emulsions after 0 and 7 days of storage

注：A 代表 SPI-XG-e；B 代表 SPI-e/XG。

复合乳液低温储藏 7 d 后，粒径呈多峰分布（图 8B），反映出乳液液滴的不均匀性。结合其外观图（图 7A）来看，可能是乳液中的一些成分发生沉淀或分离，导致原本单峰的分布（图 8A）逐渐趋于多峰。由图 8C 和图 8D 可以看出，储藏 7 d 后的复合乳液的平均粒径增大，Zeta-电位绝对值减小，这是因为复合乳液液滴之间的静电排斥作用力减小，液滴之间更易形成大的颗粒。这些变化凸显了复合乳液在储存过程中稳定性的下降。

如图 9A 和图 9B 所示，即使在低温储藏 7 d 后，添加 XG 的双层乳液仍然保持单峰粒径分布。当 XG 浓度达到 1.0% 时，双层乳液的平均粒径从 0.63 μm 上升至 1.04 μm（图 9C），Zeta-电位绝对值从 46.7 mV 降低到 44.90 mV（图 9D）。这表明虽然 XG 的增加略微增大了粒径并降低了 Zeta-电位绝对值，但双层乳液仍表现出良好的储藏稳定性。

2.5.3　热稳定性　为了解热处理对乳液稳定性的影响，本研究对复合乳液和双层乳液分别进行了 45、60、75 和 90 ℃ 的热处理，每个温度处理 30 min 并观察其粒径和 Zeta-电位的变化。如图 10A 和图 10B 所示，复合乳液和双层乳液的粒径都随着温度的升高而逐渐增大。这种变化是由于在加热过程中，虽然乳液的整体结构保持完整，但是液滴运动加剧，碰撞机会增加，从而引发聚集，粒径变大。此外热处理也可能使蛋白质变性，其结构展开，疏水基团暴露，进而促

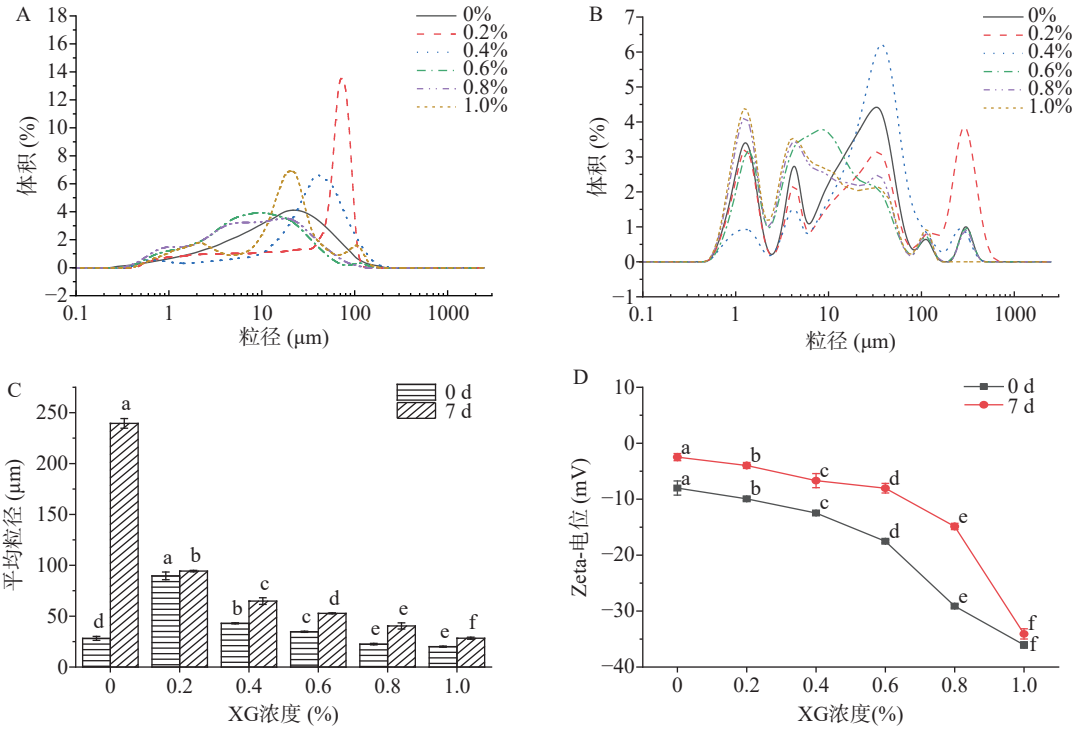


图 8　黄原胶浓度对复合乳液 0 d 粒径分布（A）、7 d 粒径分布（B）、平均粒径（C）和 Zeta-电位（D）的影响

Fig.8　Effect of xanthan gum concentration on 0 d particle size distribution (A), 7 d particle size distribution (B), average particle size (C) and Zeta-potential (D) of composite emulsion

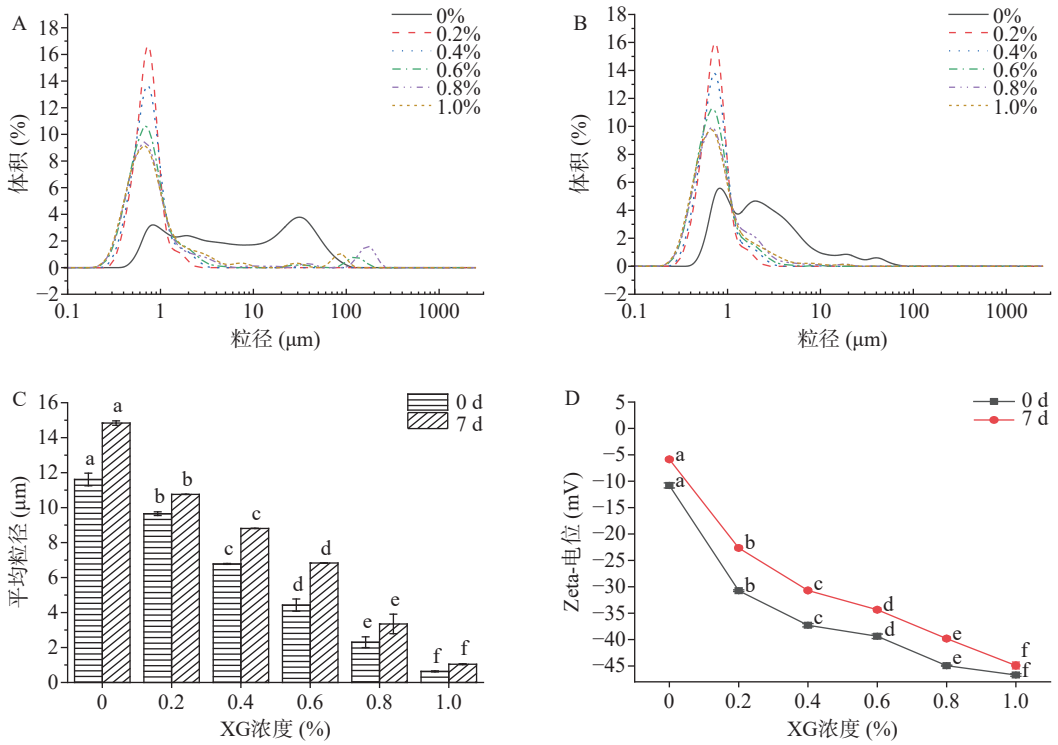


图 9　黄原胶浓度对双层乳液 0 d 粒径分布(A)、7 d 粒径分布(B)、平均粒径(C)和 Zeta-电位(D)的影响

Fig.9　Effect of xanthan gum concentration on 0 d particle size distribution (A), 7 d particle size distribution (B), average particle size (C) and Zeta-potential (D) of bilayer emulsion

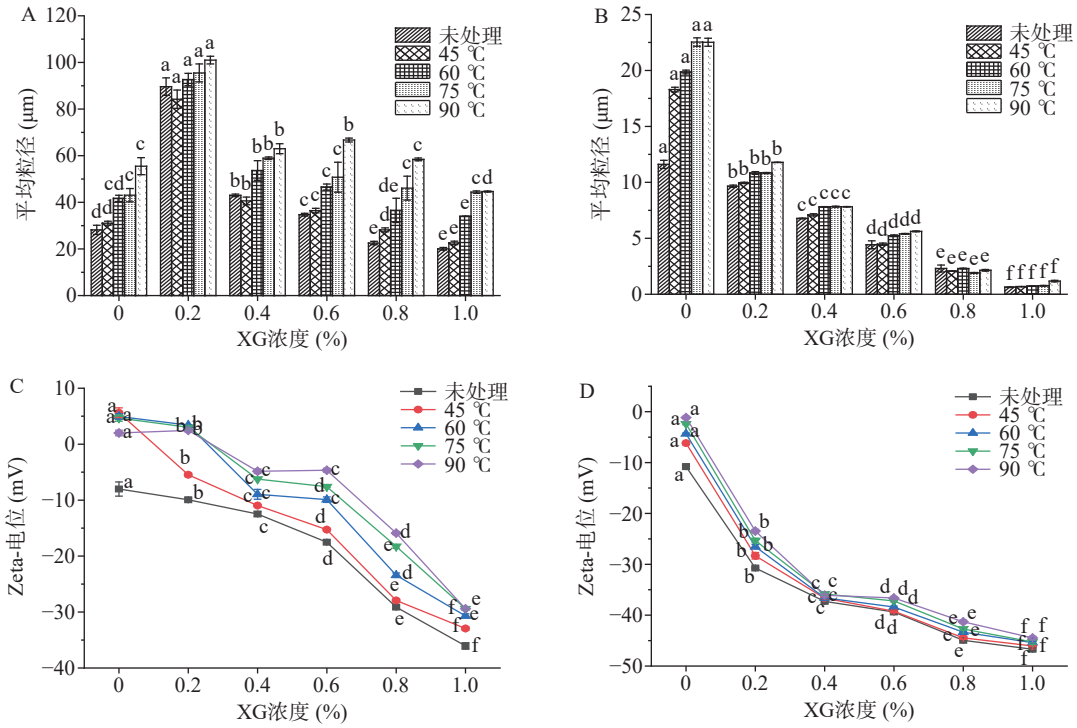


图 10　温度和黄原胶浓度对不同葵花籽油乳液平均粒径和 Zeta-电位的影响

Fig.10　Effect of temperature and xanthan gum concentration on average particle size and Zeta-potential value of different sunflower oil emulsions

注: A、C 代表 SPI-XG-e; B、D 代表 SPI-e/XG。

使蛋白质分子通过疏水相互作用聚集, 导致粒径增大[35−36]。双层乳液添加 XG 后的平均粒径增幅较小, 这是因为 XG 的加入增加了连续相的黏度, 增大了空间位阻, 从而增强了乳液的热稳定性[37]。

如图 10C 和图 10D 所示, 复合乳液和双层乳液的 Zeta-电位绝对值随温度的升高呈现逐渐减小的趋势, 其中未添加 XG 的复合乳液在 90 ℃ 时 Zeta-电位绝对值降至最低, 为 2.00±0.50 mV, 这表明高温破

坏了 SPI 的结构，从而降低了乳液的稳定性。当 XG 为 1.0%，加热温度为 90 ℃ 时，复合乳液 Zeta-电位绝对值为 29.42±0.23 mV，双层乳液 Zeta-电位绝对值为 44.47±0.31 mV。说明 XG 的加入增强了乳液的耐热性，但 SPI-e/XG 的热稳定性要优于 SPI-XG-e。这是因为在高温条件下，热处理会导致蛋白质的二级结构展开，复合乳液很快失稳，而双层乳液的 SPI 膜外额外覆盖了一层 XG 膜，能够减少高温带来的不利影响，使得双层乳液在高温条件下的稳定性更好[38]。

2.5.4　冻融稳定性　冻融稳定性是评估乳液食品稳定性的关键因素。冻融过程中形成的冰晶可能导致乳液絮凝或聚结，从而影响其稳定性[39]。本研究对两种乳液的冻融稳定性进行了分析，结果如图 11 所示。

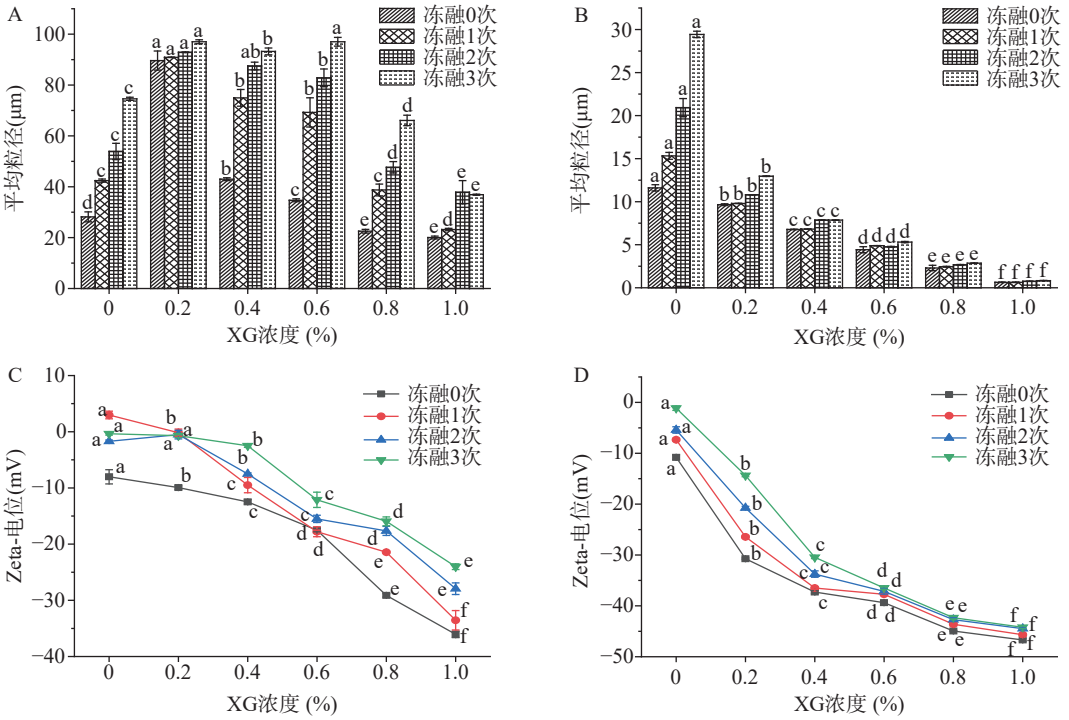


图 11　冻融处理和黄原胶浓度对不同葵花籽油乳液平均粒径和 Zeta-电位的影响

Fig.11　Effect of freeze-thaw treatment and xanthan gum concentration on average particle size and Zeta-potential value of different sunflower oil emulsions

注：A、C 代表 SPI-XG-e；B、D 代表 SPI-e/XG。

在经过一次冻融循环处理后，复合乳液的平均粒径均表现出上升（图 11A），并在未添加 XG 的复合乳液中观察到了层析现象。然而，当 XG 浓度达到或超过 0.4% 时，乳液保持均匀状态，未见分层，显示出较好的稳定性。相比之下，添加了 XG 的双层乳液即使经过三次冻融循环后，也未出现絮凝或层析等失稳现象。这与其平均粒径表现相一致，由图 11B 可知，随着 XG 浓度的增加，即使在经过三次冻融循环处理后，双层乳液的平均粒径仍保持在较低水平。这与 Zhang 等[40] 的结果相似，其利用 SPI 和葡聚糖的美拉德反应共价复合物制备双层乳液，并与 SPI 乳液、SPI/葡聚糖混合物乳液的冻融稳定性进行了对比分析，结果表明，双层乳液的冻融稳定性显著优于另外两种乳液。同时，复合乳液较双层乳液而言，其 Zeta-电位增幅较大，这是因为复合乳液中的单层乳化剂形成的保护层易在冷冻中破裂，导致大冰晶生成，降低了乳液稳定性。相反，双层乳液外由双层乳化剂形成的保护层能够有效抵抗冷冻过程中的冰晶生成，使乳液更加稳固不易受到破坏[40]。

3　结论

针对仅由单一大豆分离蛋白作为乳化剂制备的乳液不稳定的问题，本研究制备了大豆分离蛋白-黄原胶葵花籽油复合乳液与双层乳液，并深入探讨了黄原胶浓度对乳液的物理性质及环境稳定性的影响。当黄原胶浓度为 1.0% 时，复合乳液和双层乳液的粒径最小、电位绝对值最大，且双层乳液的稳定性显著高于复合乳液。相比复合乳液而言，双层乳液有良好的储藏稳定性、热稳定性和冻融稳定性，即面临不同的环境不易出现失稳现象。后续可将其应用于不同食品加工场景，探讨其对食品品质、感官的影响，为食品加工领域开发高稳定性水包油乳液提供参考和依据。

© 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] McCLEMENTS D J. Emulsion design to improve the delivery

of functional lipophilic components[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2010, 1: 241−269.
[2] ZHAO Hekai, WANG Shengnan, ZHAO Guilan, et al. Fabrication and emulsifying properties of non-covalent complexes between soy protein isolate fibrils and soy soluble polysaccharides[J]. Food & Function, 2022, 13(1): 386−397.
[3] YU Jie, WANG Xueying, LI Dong, et al. Development of soy protein isolate emulsion gels as extrusion-based 3D food printing inks: Effect of polysaccharides incorporation[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107824.
[4] YANG Feng, LIU Xue, REN Xian'e, et al. Swirling cavitation improves the emulsifying properties of commercial soy protein isolate[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 42: 471−481.
[5] SHI Yunqi, LIANG Rong, CHEN Ling, et al. The antioxidant mechanism of Maillard reaction products in oil-in-water emulsion system[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 582−592.
[6] ADNIAK A, JURAK M, WICEK A E. Effect of chitosan, hyaluronic acid and/or titanium dioxide on the physicochemical characteristic of phospholipid film/glass surface[J]. Politechnika Wrocławska, 2019, 55(6): 1535−1548.
[7] WANG Lechuan, ZHANG Hong, LI Hanyu, et al. Fabrication and digestive characteristics of high internal phase Pickering emulsions stabilized by ovalbumin-pectin complexes for improving the stability and bioaccessibility of curcumin[J]. Food Chemistry, 2022, 389: 133055.
[8] GAO Yuxing, WANG Zihua, XUE Changhu, et al. Modulation of fabrication and nutraceutical delivery performance of ovalbumin-stabilized oleogel-based nanoemulsions via complexation with gum Arabic[J]. Foods, 2022, 11(13): 1859.
[9] TIRGARIAN B, FARMANI J, FARAHMANDFAR R, et al. Ultra-stable high internal phase emulsions stabilized by protein-anionic polysaccharide Maillard conjugates[J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133427.
[10] ZHANG Lina, LIANG Renwen, LI Liang. The interaction between anionic polysaccharides and legume protein and their influence mechanism on emulsion stability[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107814.
[11] 马焕塔, 刘思彤, 招亮羽, 等. 罗非鱼分离蛋白-卡拉胶复合乳液的稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(18): 148−153. [MA Huanta, LIU Sitong, ZHAO Liangyu, et al. Studies on stability of tilapia protein isolate-carrageenan composite emulsion[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(18): 148−153.]
[12] KANG Ji, YUE Hongxia, LI Xinxue, et al. Structural, rheological and functional properties of ultrasonic treated xanthan gums[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 246: 125650.
[13] MATSUYAMA S, KAZUHIRO M, NAKAUMA M, et al. Stabilization of whey protein isolate-based emulsions via complexation with xanthan gum under acidic conditions[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106365.
[14] 黄欢, 田燕, 刘一哲, 等. 椰子油纳米乳液制备工艺优化及其稳定性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(9): 10−19. [HUANG Huan, TIAN Yan, LIU Yizhe, et al. Optimization of preparation technology and stability analysis of coconut oil nanoemulsion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(9): 10−19.]
[15] QIU Chaoying, ZHAO Mouming, McCLEMENTS D J. Improving the stability of wheat protein-stabilized emulsions: Effect of pectin and xanthan gum addition[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 377−387.
[16] 张程超, 蔡伊娜, 彭池方, 等. DHA 藻油纳米乳液制备及稳定性的研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(3): 88−94. [ZHANG Chengchao, CAI Yina, PENG Chifang, et al. Preparation and stability of DHA algae oil nanoemulsion[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(3): 88−94.]
[17] 江连洲, 綦玉曼, 马春芳, 等. 鱼油纳米乳液运载体系构建与稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 387−395. [JIANG Lianzhou, QI Yuman, MA Chunfang, et al. Formation and stability of fish oil enriched biocompatible nano-emulsion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 387−395.]
[18] WANG Qiming, RAO Zhenan, CHEN Yuanyuan, et al. Characterization of responsive zein-based oleogels with tunable properties fabricated from emulsion-templated approach[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107972.
[19] ZHU Zhenbao, WEN Ying, YI Jianhua, et al. Comparison of natural and synthetic surfactants at forming and stabilizing nanoemulsions: Tea saponin, *Quillaja* saponin, and Tween 80[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 536: 80−87.
[20] 卢锦丽, 傅玉颖, 武肖, 等. 添加黄原胶的纯胶乳液稳定性及流变特性研究[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(6): 93−98,103. [LU Jinli, FU Yuying, WU Xiao, et al. Stability and rheology of purity gum emulsions adding xanthan gum[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(6): 93−98,103.]
[21] NG S K, NYAM K L, LAI O M, et al. Development of a palm olein oil-in-water (O/W) emulsion stabilized by a whey protein isolate nanofibrils-alginate complex[J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 82: 311−317.
[22] LI Lijia, GENG Mengjie, TAN Xiangyun, et al. Insight on the interaction between soybean protein isolate and ionic/non-ionic polysaccharides: Structural analysis, oil-water interface properties investigation and double emulsion formation[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109754.
[23] 周乐松, 陈佳玲, 贺丽苹, 等. 全反式和顺式虾青素纳米乳液的物化特征、稳定性和生物利用率比较研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 69−80. [ZHOU Lesong, CHEN Jialing, HE Liping, et al. Comparative study on physicochemical properties, stability and bioavailability of all-E and Z-astaxanthin nano-emulsions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 69−80.]
[24] 万铮, 赵海洋, 曾朝喜, 等. 基于皮克林乳液的低芥酸菜籽油基凝胶油的性质及应用[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(3): 361−368. [WAN Zheng, ZHAO Haiyang, ZENG Chaoxi, et al. Characterization and application of rapeseed oil-low erucic acid oleogel based on Pickering emulsion[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2021, 47(3): 361−368.]
[25] 徐玮键, 王炜清, 余雄伟, 等. 黄原胶对扁桃仁蛋白质乳化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 76−85. [XU Weijian, WANG Weiqing, YU Xiongwei, et al. Effect of xanthan gum on the emulsifying properties of almond kernel protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(20): 76−85.]
[26] TABILO-MUNIZAGA G, VILLALOBOS-CARVAJAL R, HERRERA-LAVADOS C, et al. Physicochemical properties of high-pressure treated lentil protein-based nanoemulsions[J]. LWT, 2019, 101: 590−598.
[27] FUNAMI T, NAKANO K, MAEDA K, et al. Characteristics of O/W emulsion gels stabilized by soy protein-xanthan gum complex for plant-based processed meat products[J]. Journal of Texture Studies, 2023, 54(3): 428−439.

［28］彭群, 刘雄, 邹雨辰, 等. 高压微射流制备橙皮精油纳米乳液影响因素研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 69−73,80. ［PENG Qun, LIU Xiong, ZOU Yuchen, et al. Study on the factors influencing the preparation of orange oil nanoemulsion by high-pressure microfluidization[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(9): 69−73,80.］

［29］LEE H, YILDIZ G, dos SANTOS L C, et al. Soy protein nano-aggregates with improved functional properties prepared by sequential pH treatment and ultrasonication[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 55: 200−209.

［30］BRITO-OLIVEIRA T C, BISPO M, MORAES I C F, et al. Stability of curcumin encapsulated in solid lipid microparticles incorporated in cold-set emulsion filled gels of soy protein isolate and xanthan gum[J]. Food Research International, 2017, 102: 759−767.

［31］PATEL A R, CLUDTS N, SINTANG M D B, et al. Edible oleogels based on water soluble food polymers: Preparation, characterization and potential application[J]. Food & Function, 2014, 5(11): 2833−2841.

［32］高健. 络合—解离法提纯姜黄色素及其纳米乳液的制备[D]. 无锡: 江南大学, 2015. ［GAO Jian. Curcumin purification via complex-dissociation and its preparation of nanoemulsions[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.］

［33］兰冬梅, 周春霞, 张梦霞, 等. 黄原胶对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合体系乳浊液稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(2): 114−119. ［LAN Dongmei, ZHOU Chunxia, ZHANG Mengxia, et al. Effect of xanthan gum on emulsion stability on tilapia and soybean protein mixture[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(2): 114−119.］

［34］KALTSA O, PAXIMADA P, MANDALA I, et al. Physical characteristics of submicron emulsions upon partial displacement of whey protein by a small molecular weight surfactant and pectin addition[J]. Food Research International, 2014, 66: 401−408.

［35］LIU Gang, WANG Qi, HU Zhongze, et al. Maillard-reacted whey protein isolates and epigallocatechin gallate complex enhance the thermal stability of the Pickering emulsion delivery of curcumin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(18): 5212−5220.

［36］王喜波, 周国卫, 王小丹, 等. 热处理对糖基化大豆蛋白乳液冻融稳定性的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 389−396. ［WANG Xibo, ZHOU Guowei, WANG Xiaodan, et al. Effect of heat treatment on freeze-thaw stability of glycosylated soy protein emulsion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 389−396.］

［37］SRIPRABLOM J, SUPHANTHARIKA M. Influence of xanthan gum on properties and stability of oil-in-water Pickering emulsions stabilized by zein colloidal particles[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(4): 2772−2781.

［38］高飞, 余海霞, 张小军, 等. 热处理对金枪鱼蛋白乳液稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 86−92. ［GAO Fei, YU Haixia, ZHANG Xiaojun, et al. Effect of heat treatment on the stability of the tuna protein emulsion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 86−92.］

［39］ZHU Xuefeng, ZHANG Ning, LIN Weifeng, et al. Freeze-thaw stability of Pickering emulsions stabilized by soy and whey protein particles[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 173−184.

［40］ZHANG Zeyu, WANG Xibo, YU Jie, et al. Freeze-thaw stability of oil-in-water emulsions stabilized by soy protein isolate-dextran conjugates[J]. LWT, 2017, 78: 241−249.