赵钜阳, 刘静, 梁昌谋, 等. 芦丁添加量对热诱导芦丁-大豆分离蛋白复合高内相乳液理化性质、稳定性及体外消化性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(8): 55−67. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020004

ZHAO Juyang, LIU Jing, LIANG Changmou, et al. Influence of Rutin Addition Amount on the Physicochemical Properties, Stability and *in Vitro* Digestibility of Heat-induced Rutin-Soybean Protein Complex High-phase-inversion Emulsions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(8): 55−67. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020004

· 研究与探讨 ·

# 芦丁添加量对热诱导芦丁-大豆分离蛋白复合高内相乳液理化性质、稳定性及体外消化性的影响

赵钜阳[1], 刘　静[1], 梁昌谋[1], 苏　灿[1], 杜　威[1], 孙　莹[1,*], 边　鑫[2,*]

（1.哈尔滨商业大学旅游烹饪学院, 黑龙江哈尔滨 150028;
2.哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028）

**摘　要:** 本研究将大豆分离蛋白（Soy protein isolate，SPI，2%，w/v）与不同浓度芦丁（0%、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%，w/v）热诱导共价复合，制备芦丁-大豆分离蛋白（Rutin-Soy protein isolate，R-SPI）复合物颗粒，以此 R-SPI 颗粒作为稳定剂与大豆油通过一锅均质法制备成高内相乳液（High internal phase emulsions，HIPEs）。考察不同芦丁添加量对 R-SPI 复合 HIPEs 体系粒径、Zeta 电位、流变特性、界面蛋白吸附率、热力学特性和微观结构的影响，并研究乳液体系的贮藏稳定性、热稳定性、酸碱稳定性、离子稳定性、氧化稳定性和消化特性。结果发现，随着芦丁浓度的提高，HIPEs 的储能模量（G'）、损耗模量（G"）增加，当芦丁添加量为 2.5% 时，HIPEs 的 G'和 G"最大，此时 HIPEs 粒径（1494.23±54.05 nm）和电位（−59.23±1.82 mV）均达到最小值，且此时 HIPEs 的界面蛋白吸附率和游离脂肪酸释放量相较于其他处理组达到最大（$P$<0.05）。进一步分析 HIPEs 的稳定性发现，经 100 ℃ 加热 15 min 各处理组出现析油现象，而由 R-SPI 稳定的 HIPEs 的热稳定性较强，表现为储能模量（G'）较高，此外，随着芦丁浓度的增加，HIPEs 酸碱稳定性、离子稳定性、离心稳定性上升，当芦丁浓度为 2.5%~3% 时，酸碱稳定性、离子稳定性、离心稳定性相较于其他处理组较优，并且在此浓度范围内加速氧化后的 HIPEs 具有更强的抗氧化能力。这些发现将对开发新型功能性食品级 HIPEs 提供理论依据和实验指导。

**关键词:** 高内相乳液, 芦丁-大豆分离蛋白复合物, 乳液稳定性, 体外消化特性, 脂质氧化

**中图分类号:** TS201.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)08−0055−13

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025020004　　本文网刊:

# Influence of Rutin Addition Amount on the Physicochemical Properties, Stability and *in Vitro* Digestibility of Heat-induced Rutin-Soybean Protein Complex High-phase-inversion Emulsions

**ZHAO Juyang[1], LIU Jing[1], LIANG Changmou[1], SU Can[1], DU Wei[1], SUN Ying[1,*], BIAN Xin[2,*]**

（1.College of Tourism and Cuisine, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;
2.College of Food Science and Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China）

**Abstract:** This study involved the thermal-induced covalent conjugation of soy protein isolate (soy protein isolate, SPI, 2%,

**收稿日期:** 2025−02−08

**基金项目:** 黑龙江省自然科学基金（LH2024C068）; 黑龙江省博士后基金面上项目（LBH-Z22204）; 广西高校桂菜工业化加工与安全重点实验室开放课题（2024KLGC0201）。

**作者简介:** 赵钜阳（1987−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 生物活性物质递送, 蛋白质基凝胶体系构建, 中式预制菜肴开发, E-mail: zhaojuyang1987@163.com。

*** 通信作者:** 孙莹（1982−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 双蛋白基凝胶体系构建, E-mail: sunying625@163.com。

边鑫（1986−）, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 谷物加工, E-mail: bianbian1225@163.com。

w/v) with different concentrations of rutin (0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5%, 3%, w/v) to prepare rutin-soy protein isolate (rutin-soy protein isolate, R-SPI) complex particles. These R-SPI particles were used as stabilizers to prepare high internal phase emulsions (high internal phase emulsions, HIPEs) with soy oil by one-pot homogenization. The effects of different rutin addition amounts on the particle size, zeta potential, rheological properties, interface protein adsorption rate, thermodynamic properties and microstructure of R-SPI composite HIPEs systems were investigated. The storage stability, thermal stability, acid-base stability, ionic stability, oxidation stability and digestive properties of the emulsion system were also studied. It was found that as the rutin concentration increased, the storage modulus (G') and loss modulus (G") of HIPEs increased. When the rutin addition amount was 2.5%, the G' and G" of HIPEs reached the maximum, and at this time, the particle size (1494.23±54.05 nm) and potential (−59.23±1.82 mV) of HIPEs reached the minimum values. At this time, the interface protein adsorption rate and free fatty acid release amount of HIPEs were the highest compared to other treatment groups ($P$<0.05). Further analysis of the stability of HIPEs revealed that after heating at 100 ℃ for 15 minutes, all treatment groups showed oil precipitation, while the HIPEs stabilized by R-SPI had stronger thermal stability, manifested by higher storage modulus (G'). Moreover, with the increase in rutin concentration, the acid-base stability, ionic stability and centrifugal stability of HIPEs increased. When the rutin concentration was 2.5%~3%, the alkaline stability, ionic stability and centrifugal stability of other treatment groups were better, and HIPEs with this concentration range showed stronger antioxidant capacity after accelerated oxidation. These findings will provide theoretical basis and experimental guidance for the development of new functional food-grade HIPEs.

**Key words**: high internal phase emulsion; rutin-soybean protein isolate complex; emulsion stability; digestive characteristics *in vitro*; lipid oxidation

高内相乳液(High internal phase emulsions, HIPEs)是指油相体积比例大于或等于 74%($\phi \geq 0.74$)的乳液,呈半固体或固体,因此又称为高浓缩型乳液或者凝胶乳液[1],与液态乳液相比,HIPEs 具有更好的可塑流变特性和较好的稳定性结构,这使得 HIPEs在可食用 3D 打印油墨、动物脂肪代替物和生物材料的制备等方面拥有广阔的应用前景[2]。传统 HIPEs 在制备过程中通常使用合成表面活性剂、无机和化学合成颗粒来稳定,但无机稳定剂和合成稳定剂,存在稳定性有限、生物相容性差和成本高等弊端。因此,大量研究倾向于使用安全、环保的天然生物大分子(蛋白质、多糖、复合物)及其制备的固体颗粒来稳定 HIPEs 并应用于食品中[3]。蛋白质基颗粒由于环境友好性和良好的界面效应,可以用来稳定 HIPEs。然而,由于天然蛋白质两亲性不足不能够有效的稳定 HIPEs。蛋白质经改性处理或与其他分子(如多糖、多酚或蛋白质等)结合能够克服这些限制[4]。近年来,蛋白质与多酚的相互作用已成为研究热点。众多研究表明,多酚能够与蛋白质相互作用,形成蛋白质-多酚复合物,能够改善蛋白质的功能特性,如乳化性、胶凝性和发泡性[5−7]。

芦丁作为槲皮素(黄酮醇)与芦丁糖(双糖)形成的糖苷,呈淡黄色或淡绿色,可溶于乙醇、热水及碱水等。其结构含多个官能团,具备抗氧化[8]、抗炎[9]、抗癌[10]、抗高血压[11] 等多种生物活性,可用于多种疾病的治疗与预防。由于安全无毒且功能优良,芦丁已广泛应用于食品、药品和营养学领域,并且芦丁可以通过共价和非共价的方式,与蛋白质相互作用形成具有抗氧化性的复合物,从而在提高乳化剂的乳化能力的基础上,进一步提高乳化剂的抗氧化性[12−13]。据报道,与单独添加蛋白质的乳液相比,添加 2.5 mg/mL 猪骨蛋白水解物-芦丁耦联物的乳状液具有更高的乳化稳定性,且具有更小的液滴尺寸和更均匀的液滴分布[14]。Peng 等[15] 研究了大豆 $\beta$-伴大豆球蛋白和表没食子儿茶素-3-没食子酸酯复合纳米颗粒稳定的 HIPEs,发现这些 HIPEs 具有耐高温和较好的储存稳定性,能够抑制脂质氧化,并对包封在油相中的 $\beta$-胡萝卜素具有良好的加热保护作用。

大豆分离蛋白(soybean protein isolate, SPI)是大豆油生产中的副产品,因其营养价值高、成本低廉,来源广而在食品工业中得到了广泛利用。SPI 具有乳化性、粘弹性、凝胶性、持水性、起泡性等功能[3],这些功能特性是由 SPI 的两亲性质决定的:SPI 的氨基酸序列中有较高比例的疏水性残基(>40%)和一定比例的酸性/碱性氨基酸;分子链在疏水作用、氢键和范德华力的作用下,形成疏水核心区[16]。这种结构一方面使大豆蛋白本身具有乳化性、起泡性等功能,另一方面也为蛋白与小分子活性物质结合提供了疏水位点,使得 SPI 可以作为疏水物质的良好载体。另外,因为 SPI 具有油水两亲性,可以作为乳化剂构建乳液体系。课题组前期研究表明,通过芦丁与 SPI 形成复合物可以提高 SPI 的乳化性,并且复合物具有良好的界面活性[7]。基于此特性发现以芦丁-SPI 复合物为乳化剂可以稳定高内相乳液[17]。

本文研究不同芦丁添加量对热诱导 R-SPI 复合 HIPEs 性质的影响,通过粒径、电位、流变性质、热特性等分析乳液理化性质;界面蛋白吸附率、消化特性、稳定性和脂质氧化表征乳液贮藏与消化特性,旨在为研究多酚-蛋白质复合颗粒改善 HIPEs 乳液性质,制备具有较强抗氧化性、贮藏特性并利于消化的 HIPEs 提供一定的参考依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料与仪器

芦丁（≥98%）　合肥博美生物公司；大豆分离蛋白（>98%）　优宝嘉食品有限公司；大豆油　益海嘉里有限公司；盐酸　优级纯，北京化工厂；过硫酸钾　分析纯，天津市鑫铂特化工有限公司；脂肪酶（30000 U/g）、胰酶（1∶4000）、胃蛋白酶（1∶3000）　上海源叶生物科技有限公司；实验试剂均为分析纯。

T18DS25 均质机　德国 IKA；H1850R 高速离心机　湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；UV-800 紫外可见分光光度计　上海元析仪器有限公司；VORTEX 3 涡流振荡仪　德国 IKA；DK-9S-Ⅱ电热恒温水浴锅　天津市泰斯仪器有限公司；A01-10NA0899 冷冻干燥机　宁波新芝生物科技有限公司；DSC4000 差示扫描热量仪　美国珀金埃尔默股份有限公司；MCR102 流变仪　澳大利亚 Anton Paar 公司；Nano ZS 激光粒度仪　英国马尔文仪器公司。

### 1.2　实验方法

1.2.1　芦丁-大豆分离蛋白复合物颗粒制备　根据 Zhou 等[18] 的实验方法适当修改，将不同质量 0%、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%（w/v，溶液百分比）的芦丁及 2%（w/v）大豆分离蛋白分别称重溶解于蒸馏水中，两种溶液混合后搅拌 15 min，调节 pH 为 7.0，于 90 ℃ 加热 30 min。将反应样品透析 48 h（分子截流量 8000~14000 kDa），以除去未反应的游离的芦丁，每 2 h 更换一次水，将透析液冷冻真空干燥后备用。其中，不同浓度的芦丁制备的 R-SPI 复合颗粒分别记为：0% R-SPI（对照组）、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%、3% R-SPI。前期研究表明 1%（w/v）的芦丁及 2%（w/v）大豆分离蛋白复合的结合率为 28.53%。

1.2.2　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的制备　参考于迪[19] 的实验方法并稍作修改，首先将冻干的 R-SPI 以蒸馏水溶解，并装在 100 mL 的烧杯中，制备成质量分数 4%（w/v）的溶液（20% 的水相），用 150 mm 的转子搅拌 2 h，确保充分分散。在 4 ℃ 条件下搅拌过夜以充分水合。大豆油为油相（80%）。将水相与油相混合，11000 r/min 均质 2 min，得到 R-SPI 稳定大豆油的高内相乳液。

1.2.3　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 粒径与 Zeta 电位的测定　用激光粒度分析仪测量 HIPEs 液滴的粒径分布[20]。为了避免多次散射效应，每个样品分散在蒸馏水中，于 25 ℃ 测定 HIPEs 的平均粒径和 Zeta 电位，数据以 mean±SD 表示。

1.2.4　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 流变学特性的测定　采用流变仪测定高内相乳液的流变性能[21]，平行板（d=50 mm）。相关参数设定：测试温度 25 ℃，两板间隔 1 mm，频率扫描范围为 0.1~10 Hz，应变为 0.5%。用滴管吸取 5 mL HIPEs，挤在流变仪的平行板上进行测试。

1.2.5　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的差示扫描量热分析　所有 HIPEs 使用差示扫描量热计进行热分析[22]。将 7~12 mg 样品置于铝锅中密封，空锅作为参考。样品保存在 4 ℃ 直到分析。以 10 ℃/min 的速率从 25 ℃ 冷却到−40 ℃，在−40 ℃ 下保持 10 min，然后以 10 ℃/min 的速率从−40 ℃ 加热到 100 ℃。采用 Pyris Manager 软件计算初始温度、峰值温度、结束温度、结晶焓、熔融焓。

1.2.6　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 界面蛋白质吸附率的测定　参照李杨等[23] 的方法并适当修改，乳液在 12000 r/min 下离心 15 min 后，取上层清液过滤，用 BCA 法测定滤液中的蛋白质量浓度。界面蛋白吸附率计算公式（1）如下：

$$界面蛋白吸附率(\%) = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100 \qquad 式（1）$$

式中：$C_0$ 为制备乳液的水相中的蛋白质质量浓度，mg/mL；$C_1$ 为乳液离心后未吸附层（下清层+沉淀层）中的蛋白质浓度，mg/mL。

1.2.7　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的宏观和微观形态观察　将制备好的 HIPEs 装入玻璃瓶中，立即拍照记录。采用光学显微镜观察 HIPEs 的显微结构。将一滴稀释后的 HIPEs 滴入玻璃载玻片，并用盖玻片覆盖。样品在 25 ℃ 下用物镜 100×放大观察。

1.2.8　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的稳定性分析

1.2.8.1　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的储藏稳定性分析　将乳液置于 4 ℃ 的冰箱中保存 40 d，并测定其流变性质，方法同 1.2.4。

1.2.8.2　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的热稳定性分析　HIPEs 热稳定性按照 Miao 等[24] 的方法测定。将 HIPEs 在水浴锅加热（100 ℃，15 min），然后在冰水浴中冷却后，并测定其流变性质，方法同 1.2.4。

1.2.8.3　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的离子稳定性分析　用勺子将乳液小心填入 5 mL 量筒中，避免气泡，垂直静置片刻，待乳液自然下沉至刻度线，缓慢移至目标容器，刮净残留。然后分别取 2 mL 0.02、0.1 和 0.5 mol/L NaCl 溶液添加至 5 mL 乳液中。混匀后在室温下静置 12 h，对乳状液分层现象进行观察并拍照记录，并计算乳析指数（Creaming index，CI），乳析指数计算公式（2）如下：

$$CI(\%) = \frac{HSL}{HT} \times 100 \qquad 式（2）$$

式中：HT 为乳状液的总高度，cm；HSL 为清层高度，cm。

1.2.8.4　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的酸碱稳定性分析　调节蒸馏水 pH 至 3、7、11，溶解芦丁-大豆分离蛋白复合物，制备成质量分数 4%（w/v）的溶液（20% 的水相），大豆油为油相（80%）。将水相与油相混合，11000 r/min 均质 2 min，得到 R-SPI 稳定大豆油的高

内相乳液。在室温下静置 12 h, 测定乳析指数并拍照。

1.2.8.5 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的离心稳定性分析 参考赵妍嫣等[25] 的方法并适当修改测定离心稳定性。将制备的芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 置于离心管中, 使用台式高速离心机在 4 ℃ 下以 11000 r/min 离心 10 min。去除上层析出的大豆油和下清液后, 称重得到质量, 按照下式计算 HIPEs 的离心稳定性:

$$离心稳定性(\%) = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad 式（3）$$

式中: $m_1$ 为离心前芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的质量, g; $m_2$ 为离心后去除上层析出的大豆油和下清液后的芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的质量, g。

1.2.8.6 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的冻融稳定性分析 将乳液在−20 ℃ 下冷冻 24 h 后, 于室温解冻, 并记录 HIPEs 的宏观图像。

1.2.9 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 脂质氧化的测定 将乳液置于 50 ℃ 的常亮恒温箱中储存 15 d, 然后测定 HIPEs 的初级氧化产物(氢过氧化物)和次级氧化产物(丙二醛)的生成量。

1.2.9.1 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 初级氧化产物的测定 参考 Wang 等[26] 的方法并稍作改动。将等分(0.1 g)HIPEs 样品与 1.5 mL 异辛烷/2-丙醇(3∶1, v/v)涡旋混合(3 次, 每次约 10 s)。然后将混合物在 1000×g 下离心 2 min, 取上清液。将 200 μL 上清液加入 2.8 mL 甲醇∶1-丁醇(2∶1, v/v)混合物中, 然后加入 15 μL 3.94 mol/L 硫氰酸铵和 15 μL 亚铁溶液(由 0.132 mol/L $BaCl_2$ 和 0.144 mol/L $FeSO_4$ 混合而成)。反应 20 min 后, 在 520 nm 处测定样品的吸光度。采用双氧水异丙苯标准曲线(y=0.5406x−0.0021, $R^2$=0.9995)计算 HIPEs 的氢过氧化物浓度。氢过氧化物值计算公式(4)如下:

$$X = \frac{C \times V}{m} \times \frac{1000}{34} \quad 式（4）$$

式中: X 为试样中氢过氧化值含量, μmol/g; C 为根据标准曲线中得到的样品溶液中氢过氧化物浓度, mg/mL; V 为样品溶液总体积, mL; m 为样品质量, g; 1000/34 为换算系数。

1.2.9.2 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 次级氧化产物的测定 按照 Peng 等[15] 的方法并适当修改。将 0.1 g HIPE 样品加入去离子水(1.8 mL), 然后与 2.0 mL TBA 试剂(2.5%(w/v)三氯乙酸和 0.375%(w/v)TBA)在 0.25 mol/L HCl 中混合 3 次。沸水加热 15 min(空气冷却至室温)后, 用 1.5 μm 微孔膜过滤。在 532 nm 处测定吸光度。采用 1,1,3,3-四乙氧基丙烷标准曲线(y=1.6664x+0.0019, $R^2$=0.9991)计算丙二醛的生成量。

$$X = \frac{c \times V}{m} \times \frac{1}{72} \quad 式（5）$$

式中: X 为试样中丙二醛含量, μmol/g; c 为从标准系列曲线中得到的试样溶液中丙二醛的浓度, μg/mL; V 为试样溶液定容体积, mL; m 为最终试样溶液所代表的试样质量, g; 1/72 为换算系数。

1.2.10 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 消化特性的测定 按照姚弘彬等[27] 的方法并稍作修改, 胃消化阶段: 将 0.32 g 胃蛋白酶和 0.2 NaCl 混合, 用 10 mmol/L 磷酸盐缓冲溶液定容到 100 mL 的容量瓶中, 并用 1.0 mol/L 的 HCl 将 pH 调至 2.0, 得到模拟胃液。分别取 9 mL 乳液与 30 mL 模拟胃液混合均匀, 用 0.1 mol/L 的 NaOH 和 1.0 mol/L 的 HCl 将混合液的 pH 调至 2.0, 模拟胃液消化时间为 0.5 h。

肠消化阶段: 消化液冷却至室温, 用 0.1 mol/L 的 NaOH 将消化液调节为 pH7.0。取 10 mL 乳液按照顺序依次加入 8 mL 48.5 mg/mL 胆盐溶液、2 mL 750 mmol/L $CaCl_2$ 溶液、10 mL 12 g/mL 胰脂肪酶溶液, 混合均匀。然后加入 0.1 mol/L 的 NaOH 使得 pH 为 7.0, 在消化过程中记录加入 NaOH 的量。整个消化过程持续 1.5 h。整个消化过程在 37 ℃ 和 200 r/min 恒温震荡箱中进行。体外消化率用 FFA 释放量表示, 按公式(6)计算。

$$FFA释放量(\%) = \frac{V \times C \times 1000}{W} \quad 式（6）$$

式中: V 为 NaOH 的添加量, mL; C 为 NaOH 的浓度, mol/L; W 为大豆油的质量, g。

### 1.3 数据处理

采用 Excel 2019 进行数据的相关整理, 实验均采用 3 次平行重复测定, 实验结果以平均值±标准偏差方式表现。采用 Statistix 8 软件进行数据分析, 所得的有效数据组采用 Origin 2018 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 HIPEs 的粒径和 Zeta 电位

R-SPI HIPEs 的粒径和 Zeta 电位分布如表 1 所示, 除 0.5% 添加量外, 其余添加芦丁的 HIPEs 各处理组的平均粒径显著低于对照组($P$<0.05)。特别是, 当芦丁添加量为 2.5%时, R-SPI HIPEs 的粒径最小。这是由于芦丁与 SPI 发生的共价作用使 SPI 结构变得更加紧凑, 有利于 R-SPI 复合物吸附在油-水界面上[7], 当芦丁添加浓度适宜, 就会形成一层更加紧密、规整的界面膜, 有效阻止液滴之间的聚集, 降低界面张力, 使油滴更均匀的分散在水相中, 形成粒径更小的乳液液滴[28]。Chen 等[29] 研究也得到了类似的结论, 发现添加姜黄素制备形成姜黄素-SPI 颗粒制备的乳液粒径减小, 这主要源于姜黄素与 SPI 发生疏水相互作用诱导蛋白构象更加紧凑。当芦丁添加量为 3% 时, HIPEs 粒径反而增加, 但仍显著小于对照组($P$<0.05)。这可能是由于高浓度芦丁可能在水相中形成聚集体颗粒, 这些聚集体可能作为异质成核点, 吸附到乳液液滴表面, 引发液滴聚集, 导致粒径增大[30]。

表 1　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的粒径和 Zeta 电位

Table 1　Particle size and zeta potential of rutin-soybean protein isolate HIPEs

| 芦丁添加量(%) | 粒径(nm) | 多分散性指数(PDI) | ζ电位(mV) |
|---|---|---|---|
| 0 | 6420.45±1167.95$^{a}$ | 0.52±0.15$^{a}$ | −37.79±1.35$^{a}$ |
| 0.5 | 5716.70±837.42$^{a}$ | 0.31±0.14$^{b}$ | −42.86±0.81$^{ab}$ |
| 1 | 2854.24±316.30$^{b}$ | 0.34±0.11$^{b}$ | −44.47±0.31$^{bc}$ |
| 1.5 | 2677.58±408.57$^{b}$ | 0.38±0.10$^{ab}$ | −45.97±1.54$^{bc}$ |
| 2 | 2621.32±538.90$^{b}$ | 0.40±0.08$^{ab}$ | −51.91±3.84$^{d}$ |
| 2.5 | 1494.23±54.05$^{c}$ | 0.40±0.03$^{ab}$ | −59.23±1.82$^{e}$ |
| 3 | 2231.03±156.02$^{bc}$ | 0.44±0.07$^{ab}$ | −48.12±3.49$^{cd}$ |

注：小写字母不同表示组间差异显著($P$<0.05)。

多分散指数(PDI)可以用来反映颗粒的粒径分布程度，PDI 值越高，说明粒径分布越不均匀，当 PDI 小于 0.5 时，表明此颗粒在溶液中具有良好的分散性及稳定性[31]。由表 1 可知，由 R-SPI 稳定的 HIPEs 处理组的 PDI 均小于 0.5，并且随着芦丁浓度的提高，PDI 逐渐升高，这可能是由于芦丁浓度增加时，R-SPI 复合物形态发生改变，在高浓度芦丁添加量下，芦丁与 SPI 之间的相互作用(氢键、疏水相互作用)变得复杂，使得 R-SPI 复合物的聚集方式和程度不同，导致乳液中液滴大小分布不均匀，PDI 升高[32]。

Zeta 电位是评价乳液性质的重要指标，Zeta 电位的绝对值越大，对应乳液体系也就越趋于稳定[33]。从表 1 可以看出，芦丁添加量<2.5% 时，随芦丁添加量的增加，HIPEs 的 Zeta 电位的绝对值逐渐增加，当芦丁的添加量为 2.5% 时，乳液的 Zeta 电位的绝对值达到最高，乳液体系更加稳定。然而，当芦丁添加量为 3% 时，乳液的 Zeta 电位的绝对值降低。这可能是因为适当的芦丁添加量有助于复合物在油-水界面形成稳定的吸附层，复合物的带电有效阻止液滴聚集，导致 Zeta 电位的绝对值最大，稳定性较高[34]。有研究表明，蛋白质与多酚相互作用后可以改变蛋白质分子的表面电荷，使乳清分离蛋白-表没食子儿茶素-3-没食子酸酯共价耦联物稳定的 Pickering 高内相乳液的尺寸变小[35]。由 SPI 形成的 HIPEs Zeta 电位的绝对值最小，这是因为经过加热后的蛋白质结构展开，大量带电氨基酸(如谷氨酸和天冬氨酸)裸露出来[36]，加入适当芦丁后，会引入更多带电基团，进一步增强 SPI 乳状液中的 Zeta 电位的负电荷，乳液液滴之间形成较强的静电斥力，从而提高 HIPEs 的稳定性。这与苦荞麸皮蛋白-芦丁共价复合乳液的变化趋势一致[37]，苦荞麸皮蛋白-芦丁共价复合物形成 $\beta$-胡萝卜素乳液相较于纯荞麸皮蛋白形成的 $\beta$-胡萝卜素乳液具有更高的 Zeta 电位绝对值，能够有效抑制油滴聚集，稳定乳液。

## 2.2　HIPEs 的流变特性

频率扫描期间储能模量(G')用于描述 HIPEs 凝胶形成过程中的弹性特征，损耗模量(G")用于描述 HIPEs 凝胶形成过程中的黏性特征。通常，在流变性质测定中，乳状液的 G'大于 G"，表明乳液形成了类固状物，并且模量随着频率的提高而增大[35]。R-SPI HIPEs 的粘弹性变化情况如图 1 所示，所有乳液的 G'和 G"均呈现随扫描频率的增加而上升，最后趋于稳定。HIPEs 的 G'和 G"随着扫描频率的增加而逐渐上升的原因是 HIPEs 的制备过程中芦丁的加入增强了体系中蛋白质分子之间的交联，复合网络结构逐步形成。最后趋于稳定可能是因为参与交联的游离蛋白质分子减少，以及凝胶结构的基本形成[37]。所有的 HIPEs 的 G'均大于 G"，说明 R-SPI 乳液是类固体三维交联网络结构。随着芦丁添加量的增加，G'和 G"逐渐增大，表明芦丁的加入改善了乳液的流变特性，主要可能是因为芦丁的加入增强了体系中蛋白质分子之间的交联，诱导形成了较厚的界面膜和致密而坚固的网络结构[38]。然而，当芦丁添加量增加至 3% 时，G'和 G"反而减小，这可能是由于过量的芦丁与 SPI 结合，会屏蔽 SPI 的亲水基团，使蛋白聚集，降低 HIPEs 稳定性[39]。结合粒径和电位的结果发现，2.5% R-SPI 颗粒稳定的 HIPEs 具有更小的液滴尺寸和更强的静电斥力，增强了 HIPEs 液滴的堆积，形成了抗絮凝致密结构，具有更坚固的流变特性。

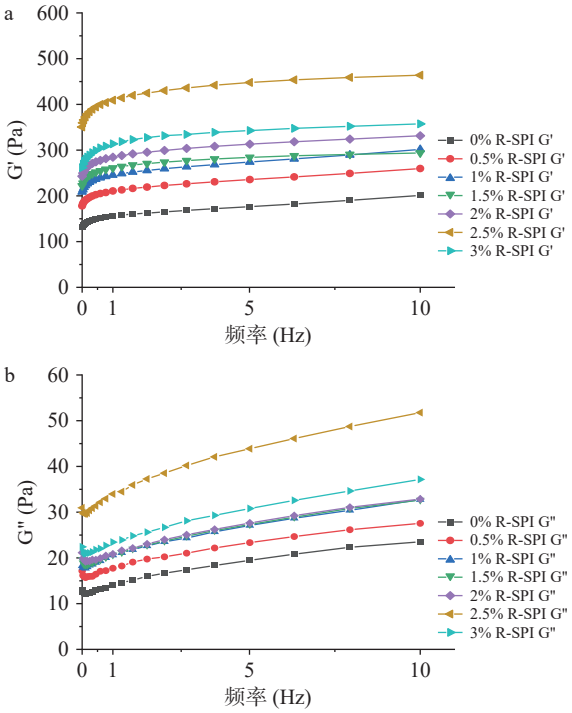



图 1　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的流变特性

Fig.1　Rheological properties of rutin-soy protein isolate HIPEs isolate

## 2.3　HIPEs 的热力学特性

差示扫描量热分析(DSC)被广泛应用于研究纯油和乳液体系中的脂肪相变热力学特性。油脂的物理状态(如熔化、结晶等)或晶型的变化都与热量的吸收(吸热)或释放(放热)有关[40]。通过计算峰面积确定其焓值，用差示扫描量热法对不同 R-SPI 颗粒

稳定的 HIPEs 进行分析，如图 2 所示。在降温过程中所有 HIPEs 均在−17 ℃ 左右形成明显的放热峰；而在升温过程中则在 3 ℃ 左右表现出一致的吸热反应。赵嘉雯[41] 的研究也发现在升温过程中，HIPEs 在 0~2 ℃ 出现明显的吸热峰。截取以上两个较明显的吸放热峰于图 2b 及图 2c 中进行进一步比较分析。由图 2b 可以看出，HIPEs 各处理组在降温段均表现出明显的结晶峰，大豆油的凝固点为−18~−15 ℃[42]，在降温过程中，乳液出现结晶峰[43]，一方面可能是因为在降温过程中，SPI 分子的构象发生变化，蛋白质分子因为温度降低发生聚集，促进结晶。另一方面可能是因为蛋白质周围水分子的结构改变，蛋白质为了适应改变发生聚集和构象改变[44]。R-SPI 稳定乳液放热峰的峰值温度显著高于对照组（$P$<0.05），并随着芦丁添加量的增加而提高，可能是因为芦丁与 SPI 之间通过氢键、疏水相互作用等非共价键结合，这种相互作用改变了 SPI 的结构，使得乳液稳定性增强，导致乳液在更高的温度下才出现状态变化，从而表现出较高的峰值温度[45−47]。各处理组

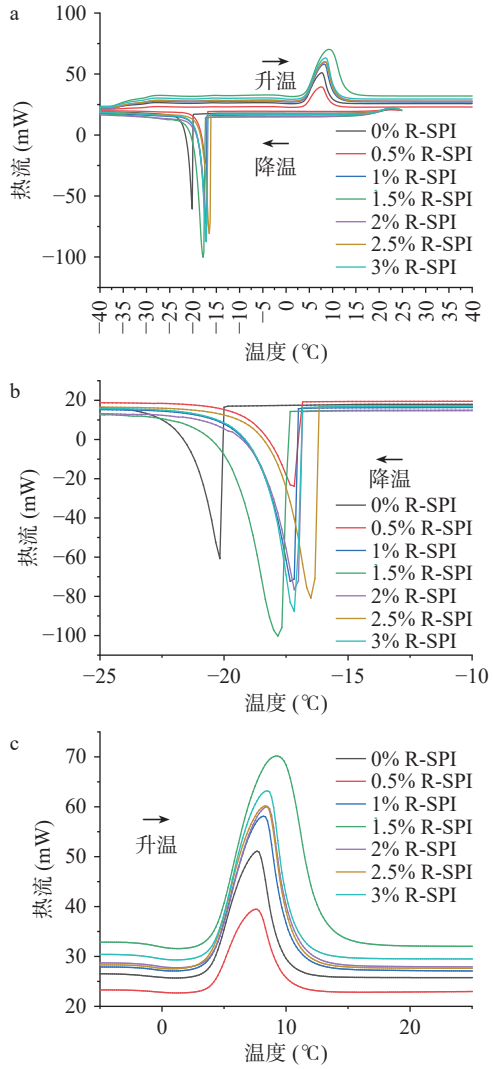



图 2 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的差示扫描量热分析结果

Fig.2 Differential scanning calorimetric analysis of rutin-soy protein isolate HIPEs

的降温阶段焓值如表 2 所示，对照组 HIPEs 降温阶段的焓值显著高于芦丁添加量为 1%~3% 的 R-SPI HIPEs 的焓值（$P$<0.05）。这说明对照组 HIPEs 具有较强的晶化放热能力，而研究发现乳液的晶化放热能力强，意味着体系不稳定[48]。进一步分析由 R-SPI 稳定的 HIPEs 焓值变化趋势发现，随着芦丁添加量的增加，HIPEs 焓值呈现先降低后升高的非单调性变化趋势，这一趋势与流变特性结果相似，表明由 R-SPI 稳定的 HIPEs三维交联网络结构致密，有效抑制了降温阶段由冰晶生长引发的应力破坏和油水相分离，从而显著提升乳液的低温稳定性。DSC 升温段的峰值温度及焓值见表 2。与对照组相比，由 R-SPI 稳定的 HIPEs 乳液峰值温度和焓值整体呈升高趋势，仅在芦丁添加量为 2% 时峰值温度略有波动。这可能是由于芦丁与 SPI 发生共价结合，芦丁的羟基与 SPI 氨基酸残基结合使其空间结构展开，R-SPI 稳定的 HIPEs 形成紧密交联的网状结构，从而令 R-SPI HIPEs 晶型崩解所需的能量提高。

表 2 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的 差示扫描量热分析图谱中的峰值温度及焓值

Table 2 Peak temperature and enthalpy values in differential scanning calorimetric analysis of rutin-soy protein isolate HIPEs

| 程序 | 芦丁添加量(%) | 峰值温度(℃) | 焓值(J/g) |
|---|---|---|---|
| 降温段 | 0 | −13.91±0.75$^{c}$ | −169.66±29.08$^{a}$ |
| | 0.5 | −12.41±0.28$^{b}$ | −204.46±4.63$^{ab}$ |
| | 1 | −12.01±0.13$^{ab}$ | −273.29±7.91$^{cd}$ |
| | 1.5 | −11.85±0.04$^{ab}$ | −286.42±28.49$^{cd}$ |
| | 2 | −11.75±0.01$^{ab}$ | −290.57±12.08$^{cd}$ |
| | 2.5 | −11.01±0.13$^{a}$ | −307.56±7.63$^{d}$ |
| | 3 | −11.41±0.07$^{ab}$ | −240.14±2.44$^{bc}$ |
| 升温段 | 0 | 3.57±0.46$^{a}$ | 303.24±67.50$^{b}$ |
| | 0.5 | 4.10±0.25$^{a}$ | 317.82±15.48$^{ab}$ |
| | 1 | 3.72±0.27$^{a}$ | 425.20±7.76$^{a}$ |
| | 1.5 | 4.11±0.68$^{a}$ | 395.20±17.82$^{ab}$ |
| | 2 | 3.49±0.78$^{a}$ | 359.21±37.49$^{ab}$ |
| | 2.5 | 4.22±0.09$^{a}$ | 416.96±54.07$^{ab}$ |
| | 3 | 4.21±0.12$^{a}$ | 355.51±30.11$^{ab}$ |

注：小写字母不同表示组间差异显著（$P$<0.05）。

## 2.4 HIPEs 的界面蛋白质吸附率

乳液的稳定性是由其油水界面的性质和组成决定的。在蛋白质稳定的连续相中，蛋白质的组成成分和两亲性均会影响其对于界面层的吸附能力和吸附量，进而影响乳液性能。此外，油水界面上的蛋白质彼此之间相互作用（疏水作用、范德华力）也会影响其界面吸附能力及乳液性质，并最终影响乳液的稳定性[49]。如图 3 所示，R-SPI HIPEs 的界面蛋白质吸附率随着芦丁添加量的增加呈先增加后降低的趋势，其中添加 2.5% 芦丁的处理组其界面蛋白质吸附率显著高于除添加量为 3.0% 以外的其他各处理组（$P$<0.05）。说明添加适量芦丁改变了 SPI 的构象，诱导 SPI 中的疏水基团暴露，增强了 R-SPI 的静电相互作用，增加了复合物对油相的亲和力，促进了在油水界

面上的吸附作用，提高了 SPI 在油滴界面上的稳定性[50]。而当芦丁添加量增至 3.0% 时，R-SPI HIPEs 的界面蛋白质吸附率反而降低，可能是因为过量芦丁使蛋白质逐渐形成二聚体或多聚物，二聚体和多聚物聚集成高分子量的不溶性团聚体[51]，反而抑制蛋白质的界面吸附作用。

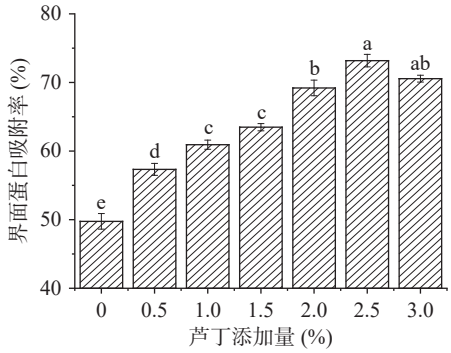



图 3　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的界面蛋白吸附率

Fig.3　Adsorption rate of interfacial protein of rutin-soybean protein isolate HIPEs

注：小写字母不同表示组间差异显著（$P<0.05$）。

## 2.5　HIPEs 的宏观和微观结构形貌

HIPEs 外观图如图 4 所示。从图 4a 可看出，各 HIPEs 处理组均可倒置不流动，说明乳液的结构稳定呈类固态，并且具有类凝胶的粘附性及可塑性。SPI HIPEs 呈现乳白色，受芦丁颜色（淡黄色或淡绿色）的影响，R-SPI HIPEs 呈现淡黄色。光学显微镜可以直观地表征乳液颗粒大小、分散状况。图 4b 为通过光学显微镜观察的 R-SPI HIPEs 的表观形态，如图所示，对照组样品出现球状液滴大小不均的情况，部分液滴尺寸较大，而随着 R-SPI 添加量的增加，R-SPI 稳定的 HIPEs 中液滴尺寸明显变小，且分布更加均匀。特别是当芦丁添加量为 2%、2.5% 和 3% 时，R-SPI HIPEs 液滴呈现出规则的球形外观，乳液均一性较高。这与粒径和电位的结果一致。这是因为芦丁-SPI 复合物作为乳液乳化剂时，芦丁的加入引入了带负电荷基团，液滴之间静电斥力变强，液滴不易聚集，有利于乳液平均粒径减小，乳液稳定性提高[52]。

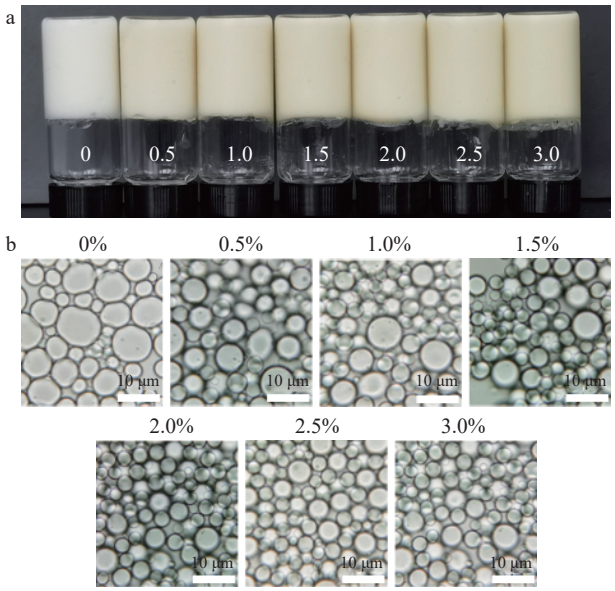



图 4　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的宏观和微观形貌

Fig.4　Macro and micro pictures of rutin-soy protein isolate HIPEs

## 2.6　HIPEs 的稳定性

2.6.1　HIPEs 的贮藏稳定性　图 5a~图 5b 为 HIPEs 贮藏 40 d 的流变特性，如图 5 所示，贮藏 40 d 后，所有处理组 HIPEs 的 G'均高于 G"，由于乳状液的 G'大于 G"，表明乳液是以弹性响应为主，具有类固体形态[53]。因此说明由 R-SPI 形成的 HIPEs 经过贮藏后仍然是以弹性为主的类固体结构。这与图 6 贮藏 40 d 的外观图结果一致，乳液倒置后不流动。R-SPI HIPEs 的 G'和 G"高于对照组，表明由 R-SPI 形成的 HIPEs 经过贮藏后仍优于 SPI 形成的 HIPEs 流变性能。对照组 SPI 稳定的液滴在储存过程中更容易聚集，而芦丁的加入提高了乳液的抗聚集能力。被 SPI 包裹的液滴可能在储存过程中缓慢聚集，这是由于球形蛋白在吸附到油水界面后展开的结果[54]。经过 40 d 贮藏，芦丁浓度为 0.5%、1% 和 1.5% 组 R-SPI HIPEs 的 G'和 G"变化不明显，适合的芦丁浓度（2.5%）能够较好地维持贮藏乳液稳定性。可能是由于 R-SPI HIPEs 中的油相在长期贮藏中发生自动氧化，生成自由基。这些自由基可与蛋白质的氨基酸残基发生反应，形成共价交联，导致蛋白质网络结构交联度增加。这与 HIPEs 的粒径、电位及界面蛋白吸附率的结果一致。适量的芦丁与 SPI 的紧密结合，使得 R-SPI HIPEs 凝胶网络结构更为致密，油水界面膜增

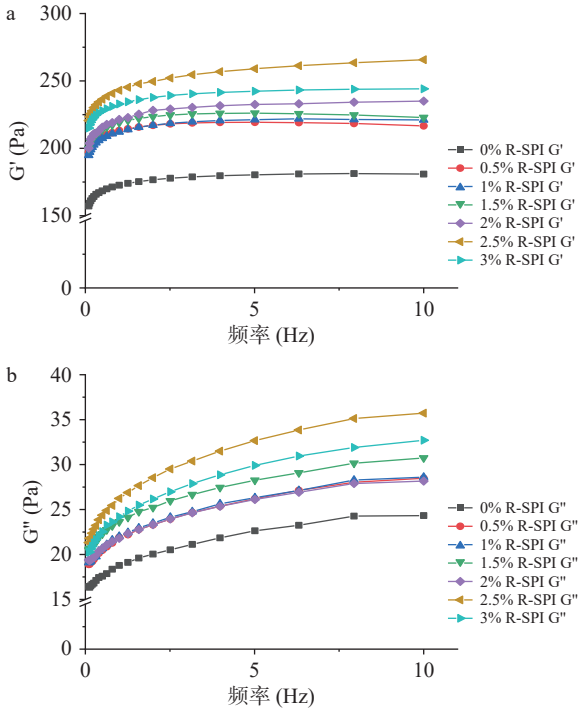



图 5　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 贮藏 40 d 的流变特性

Fig.5　Rheological properties of rutin-soy protein isolate HIPEs after storage for 40 days

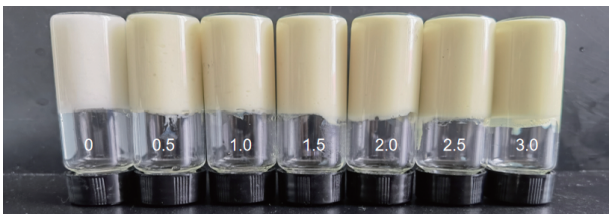



图 6 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 贮藏 40 d 的外观

Fig.6 Appearance of rutin-soy protein HIPEs after storage for 40 days

厚，使液滴迁移率降低[55]。然而，过量添加芦丁则不利于 R-SPI HIPEs 的贮藏稳定性，相较于 0 d 的 HIPEs 流变特性，经过贮藏 40 d 的 HIPEs G'和 G"显著降低。这说明过度氧化破坏原有交联网络的均一性，使蛋白质分子链断裂或聚集，导致乳液的流变特性降低[56]。此外，乳液受重力作用和布朗运动的影响，极易发生聚集，从而使稳定性下降[57]。

2.6.2 HIPEs 的热稳定性 在食品工业中，热处理技术（例如巴氏杀菌）是一种普遍应用的方法，它有助于保持食品的优良口感并延长其保存期限[58]。因此，有必要评价 HIPEs 的热稳定性，图 7 和图 8 表征了 100 ℃ 加热 15 min 后样品的流变性质和乳液外观。如图 7a 和图 7b，在剪切频率范围内（0.1~10 Hz），天然 SPI 稳定的 HIPEs 的 G'和 G"明显小于 R-SPI HIPEs，说明相较于天然 SPI 制备的 HIPEs，R-SPI 制备的 HIPEs 具有稳定的三维网络结构和较高的热稳定性。加热后各处理组 HIPEs 的 G'和 G"均发生不同程度的降低，这可能是因为高温会破坏 SPI 的氢键、疏水相互作用等非共价键，导致 $\alpha$-螺旋减少、$\beta$-

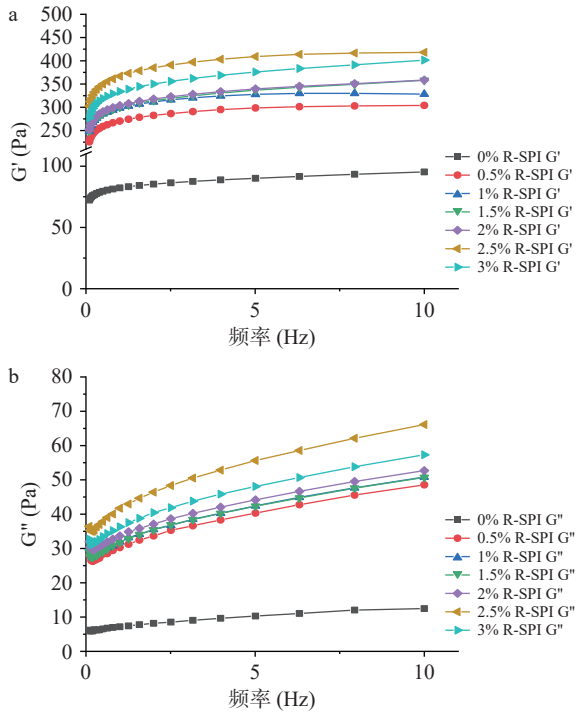



图 7 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 加热 100 ℃ 的流变特性

Fig.7 Rheological properties of rutin-soy protein isolate HIPEs when heated at 100 ℃




图 8 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 加热 100 ℃ 的外观

Fig.8 Appearance of rutin-soy protein HIPEs after heating at 100 ℃

折叠增加，蛋白质分子展开并失去原有构象的刚性。这种结构展开削弱了蛋白质分子间的相互作用力，降低乳液网络的弹性[59]。加热后 HIPEs 的 G'和 G"随着芦丁添加量的增加呈现先增加后减小的趋势，在芦丁添加量为 2.5% 时 G'和 G"最大，这与加热后乳液的外观图的结果一致，从图 8 可以看出，当芦丁添加量为 0%~2.0% 时，乳液有不同程度的裂痕，而当芦丁浓度为 2.5% 时，乳液结构致密。是因为当芦丁添加量 2.5% 时，界面吸附的蛋白质-芦丁复合物形成致密且均匀的膜，有效抵抗液滴聚集，表现为高 G'和 G"。过量芦丁可能导致界面膜过厚但机械强度不足，或液滴间发生“过度桥连”，引发结构缺陷[38]。这与 HIPEs 的粒径、电位及界面蛋白吸附率的结果一致。

2.6.3 HIPEs 的离子稳定性和酸碱稳定性 由乳液制备的食品中通常会含有一定浓度的离子，而盐离子在一定程度上会引起蛋白质发生絮凝和沉淀，因此探究离子浓度对 R-SPI HIPEs 稳定性的影响具有一定意义。乳液 CI 值指的是乳液的凝聚分层指数，常被用于评价乳液的稳定性，CI 值越大，意味着乳液的凝聚程度较大，稳定性差[60]。NaCl 浓度对 HIPEs 的 CI 值影响如图 9 所示。由宏观图片图 10 观察到，相较于 NaCl 浓度为 0.02 mol/L 和 0.1 mol/L 的乳液，当 NaCl 浓度为 0.5 mol/L 时，在相同芦丁添加量下 HIPEs分层程度明显变大，说明离子强度增加，HIPEs 的稳定性变差。可能是由于高浓度的 NaCl 能够屏蔽液滴之间的静电排斥作用，导致 R-SPI 乳

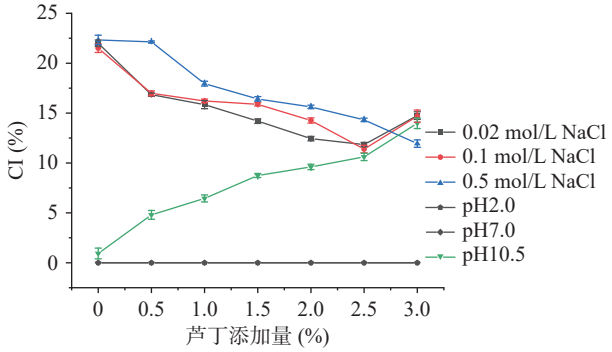



图 9 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的离子稳定性和酸碱稳定性 CI 值

Fig.9 CI values of ionic stability and acid-base stability of rutin-soybean protein isolate HIPEs

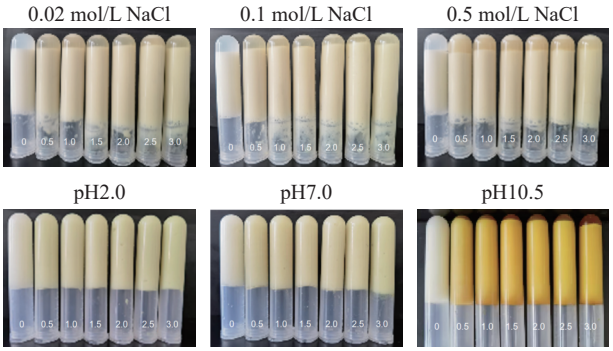



图 10　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的离子稳定性和酸碱稳定性宏观图片

Fig.10　Macroscopic picture of ion stability and acid-base stability of rutin-soy protein isolate

液中的液滴发生聚集，且 NaCl 浓度越大，静电排斥作用越弱，以及聚电解质与离子相互结合，胶体表面电荷被中和，会阻遏带有相反电荷的聚电解质相互结合导致体系失稳，从而降低油体乳液的稳定性[61−62]。如图 10 所示，乳液 CI 值随芦丁浓度增大呈减小的趋势。表明芦丁浓度越大，乳液越稳定，与粒径研究变化趋势一致。

乳液产品生产过程中也要考虑酸碱条件带来的变化，探究不同 pH 对 HIPEs 稳定性的影响如图 9 所示。由宏观图片可以看出，当调节 pH2.0 和 pH7.0 时，乳液没有出现分层，这可能是因为 R-SPI 颗粒吸附在油滴表面提供了致密的屏障，增强液滴之间的静电斥力和空间位阻，减少了油滴的聚集和奥氏熟化[63]。如图 8 所示，调节 pH2.0 和 pH7.0 的乳液 CI 值为 0，而当 pH 为 10.5 时，乳液的 CI 值随着芦丁浓度增加而增加，主要是因为芦丁分子中的羟基在碱性条件下可能发生去质子化，形成带负电荷的酚氧阴离子。然而，当芦丁浓度过高时，溶液中过量的负电荷可能通过静电屏蔽效应削弱芦丁分子间的静电排斥，导致芦丁分子聚集或沉淀。而 SPI 在 pH10.5 时带负电荷，芦丁的负电荷可能通过静电排斥阻碍其与 SPI 的结合，降低界面膜的稳定性，从而加剧液滴聚集和分层[64]。

2.6.4　HIPEs 的冻融稳定性和离心稳定性　图 11 为不同芦丁添加量对芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的离心稳定性的影响，如图 11 所示，随着芦丁添加量从 0% 增至 2.0%，HIPEs 的离心稳定性显著提升（$P<0.05$）；对照组的离心稳定性显著低于（$P<0.05$）其他处理组，说明 HIPEs 在离心过程中发生明显分层，液滴聚集严重。当芦丁添加量为 0.5%~1.5% 时，HIPEs 的离心稳定性逐步上升，但增幅不显著（$P>0.05$），推测可能是因为低浓度芦丁仅仅通过羟基与乳液界面蛋白形成弱氢键，提供有限的空间位阻效应，延缓液滴碰撞聚集[65]。当芦丁添加量为 2.0% 时，HIPEs 的离心稳定性达到峰值，此时芦丁分子在油水界面形成致密单分子层，有效抑制液滴聚并。而当芦丁添加量为 2.5%~3.0% 时，乳液的离心稳定性维持在 80% 以上，说明超过临界浓度后，芦丁的增稠效应和空间位阻作用趋于饱和。

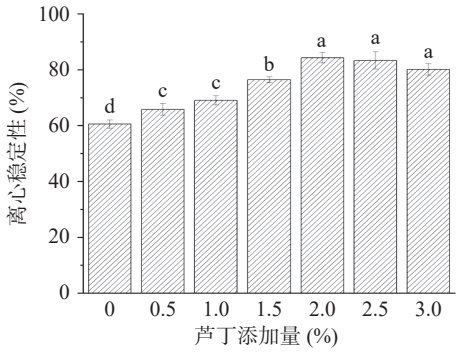



图 11　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的离心稳定性

Fig.11　Centrifugal stability of the rudine-soybean protein isolate HIPEs

注：小写字母不同表示组间差异显著（$P<0.05$）。

不同芦丁添加量对芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的冻融稳定性的影响如图 12 所示，刚制备的芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 乳液均可以倒立，而经过一个冻融循环后，乳液均出现不同程度的析油和分层现象。玻璃瓶底部是水相，中间层和顶部漂浮的是 HIPEs，可见芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的冻融稳定性欠佳。冻融处理后，对照组的 HIPEs 破乳最严重，当芦丁添加量大于 1% 时，分层现象有一定的改善，尤其当芦丁添加量为 2.0%~3.0% 时，说明芦丁在一定程度上能够抑制乳液的相分离。

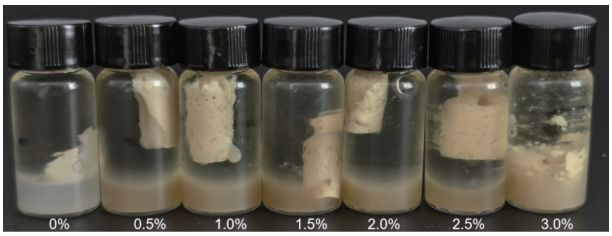



图 12　芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的冻融稳定性

Fig.12　Freezing-thawing stability of rutin-soy protein isolate HIPEs

### 2.7　HIPEs 的氧化稳定性

由于高内相乳液中油相占比超过 75%，因此乳液极易在贮藏期内发生油脂氧化产生氢过氧化物等氧化产物，最终使得乳液的贮藏品质下降。因此通过测定氢过氧化物含量可反映乳液的氧化程度，间接反映 HIPEs 的氧化稳定性[66]。图 13a 反映了 15 d 贮藏过程中 HIPEs 中氢过氧化物的变化情况，在 15 d 的加速氧化过程中，所有乳液的脂质氢过氧化物的生成量随着贮藏时间的延长而增加，随着芦丁添加量的增加，HIPEs 中氢过氧化物含量逐渐降低，并且随着贮藏时间的延长，高浓度芦丁含量（2.5% 和 3.0%）的 HIPEs 的脂质氢过氧化物形成过程较慢。表明 R-SPI 复合物在稳定 HIPEs 的同时还能发挥抗氧化作用。这是因为多酚能够与油相中的脂质相互作用和/或螯合水相中的过渡金属离子，能起到延缓油脂

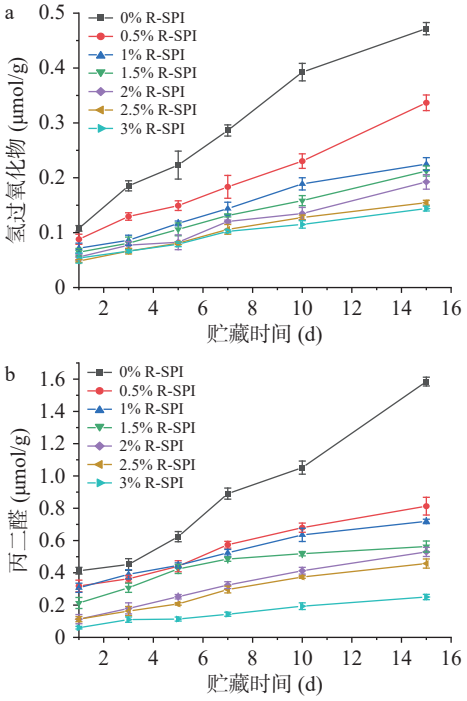



图 13 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 贮藏 15 d 内氢过氧化物(a)和丙二醛(b)的生成量

Fig.13 Production of hydroperoxide (a) and malondialdehyde (b) during 15 days of storage of Rutin-soy protein isolate HIPEs

氧化的作用[67]。

丙二醛是脂质过氧化的分解产物之一,常用于评估富含油脂食品的氧化程度。图 13b 反映了 15 d 贮藏过程中 HIPEs 中丙二醛的变化情况,由图 13b 可以看出,对照组的脂质丙二醛形成过程最快,添加芦丁的 HIPEs 的脂质丙二醛形成过程较慢。除了芦丁自身的抗氧化性还可能是因为 R-SPI 稳定的 HIPEs 比纯 SPI 稳定的 HIPEs 在油-水界面形成的界面膜更稳定,界面膜可以减少氧气和其他促氧物质进入油相,延缓丙二醛形成进程[68]。随着贮藏时间的延长,次级氧化产物丙二醛含量不断积累,这是因为在油水界面处,氧化因子与液滴表面的氢过氧化物接触,使其进一步氧化分解,从而导致脂质稳定性下降[69]。

### 2.8 HIPEs 的消化特性

通过检测模拟胃及小肠消化阶段 FFA 释放量,能够评估乳液中油脂的消化和分解水平,进而更深入地了解乳液在体外的模拟消化特性[70]。由图 14 可知,在胃消化 30 min 内 FFA 迅速释放,随后释放速度减慢,逐渐达到平缓状态。由 R-SPI 稳定的乳液 FFA 释放总量比对照组高,并随着芦丁浓度的增加逐渐提高,芦丁浓度为 2.5% 时达到最大。这可能是因为乳液界面层被水解,芦丁浓度的增加使乳液粒径减小,比表面积增大,增加了酶促反应的接触面积,促进脂肪的水解[71]。并且界面层厚度的增加导致液滴在胃蛋白酶存在下水解比在较低浓度芦丁下水解得更慢,使得更多的液滴至小肠阶段消化[72]。随着芦丁添加量的增加,HIPEs 的 FFA 释放量呈先提高后降低的趋势。结合图 1 可知,芦丁浓度为 2.5% 时,乳液粒径最小,因此其 FFA 释放总量最大。这与 SPI-表没食子儿茶素-3-没食子酸酯共价复合微凝胶颗粒稳定的乳液变化趋势一致[5]。随着芦丁浓度进一步提高(3%),FFA 释放量逐渐平缓。这可能是因为乳液粒径变大(图 1),减少液滴与消化液的接触面积,限制 FFA 的释放。

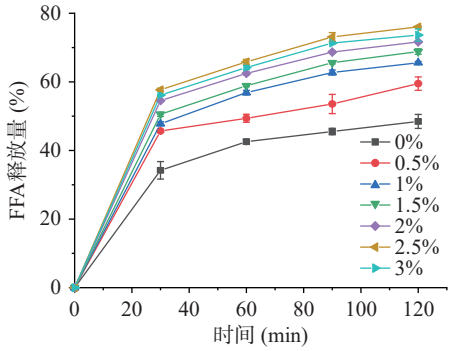



图 14 芦丁-大豆分离蛋白 HIPEs 的消化特性

Fig.14 Digestive characteristics of rutin-soy protein isolate HIPEs

## 3 结论

本实验探究不同芦丁添加量对 90 ℃ 热诱导芦丁-大豆分离蛋白复合高内相乳液理化、贮藏及体外消化特性的影响。结果表明,不同芦丁添加量对 HIPEs 的粒径、Zeta 电位、流变及消化特性等均有不同程度的影响。与对照组相比,随着芦丁浓度提高,HIPEs 的流变性能、界面蛋白吸附率和消化特性提高,芦丁浓度为 2.5% 时达到最大。当芦丁浓度 2.5%(w/v)时,HIPEs 粒径和电位达到最小值 1494.23±54.05 nm,−59.23±1.82 mV。界面蛋白吸附率结果显示,2.5% R-SPI HIPEs 的界面蛋白质吸附率最大(73.18%),R-SPI 颗粒吸附在油滴表面,乳化油滴聚集形成网络结构。流变特性结果表明 R-SPI 颗粒稳定 HIPEs 均表现出凝胶特性。与对照组相比,R-SPI 形成的 HIPEs G'和 G"增加。经过 100 ℃ 加热 15 min,对照组 HIPEs 出现析油现象,而 R-SPI 稳定的乳液可以增强 HIPEs 的弹性。此外,调节乳液到 pH10.5,HIPEs 的稳定性随着芦丁浓度的增加而上升,3% R-SPI HIPEs 的乳析指数(CI)最大(13.98%),2.5% R-SPI 稳定的 HIPEs 对长期储存、加热、离心、冻融和离子强度都非常稳定。经过 15 d 的加速氧化,芦丁浓度 3%(w/v)时,HIPEs 的抗氧化能力最大,R-SPI 颗粒同时具备乳化剂和抗氧化剂的作用。

© 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] CALDERÓ G, PATTI A, LLINAS M, et al. Diffusion in highly concentrated emulsions[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2012, 17(5): 255−260.

［2］ HUANG M, WANG Y, AHMAD M, et al. Fabrication of pickering high internal phase emulsions stabilized by pecan protein/xanthan gum for enhanced stability and bioaccessibility of quercetin[J]. Food Chemistry, 2021, 357: 129732.
［3］ 李文科. 大豆蛋白组装纳米颗粒作为高内相乳液稳定剂的构效关系[D]. 广州：华南理工大学, 2022. ［LI W K. Structure-activity relationship of soybean protein-assembled nanoparticles as stabilizers of high internal phase emulsions[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.］
［4］ LI R, CUI Q, WANG G, et al. Relationship between surface functional properties and flexibility of soy protein isolate-glucose conjugates[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 349−357.
［5］ GENG M, LI L, FENG X, et al. Encapsulation of *β*-carotene in high internal phase Pickering emulsions stabilized by soy protein isolate–epigallocatechin-3-gallate covalent composite microgel particles[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 360: 119511.
［6］ 石长波, 孙昕萌, 赵钜阳, 等. 添加儿茶素对喷雾干燥后的大豆分离蛋白结构、功能性和消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 22−31. ［SHI C B, SUN X M, ZHAO J Y, et al. Effects of catechin supplementation on structural, functional, and digestive properties of spray-dried soybean protein isolates[J]. Food Industry Technology, 2023, 44(4): 22−31.］
［7］ 赵钜阳, 袁惠萍, 孙昕萌, 等. 槲皮素、芦丁与大豆分离蛋白非共价作用机制及其功能性和消化性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 73−80. ［ZHAO J Y, YUAN H P, SUN X M, et al. Study on the non-covalent mechanism, functional and digestibility of quercetin and rutin with soybean protein isolate[J]. Food Industry Technology, 2022, 43(15): 73−80.］
［8］ CHOI S S, PARK H R, LEE K A. A comparative study of rutin and rutin glycoside: antioxidant activity, anti-inflammatory effect, effect on platelet aggregation and blood coagulation[J]. Antioxidants, 2021, 10(11): 1696.
［9］ PATEI K, PATEL D K. The beneficial role of rutin, a naturally occurring flavonoid in health promotion and disease prevention: A systematic review and update[J]. Bioactive Food as Dietary Interventions for Arthritis and Related Inflammatory Diseases, 2019: 457−479.
［10］ PANDEY P, KHAN F, QARI H A, et al. Rutin (Bioflavonoid) as cell signaling pathway modulator: Prospects in treatment and chemoprevention[J]. Pharmaceuticals, 2021, 14(11): 1069.
［11］ OYAGBEMI A A, BOLAJI-ALABI F B, AJIBADE T O, et al. Novel antihypertensive action of rutin is mediated via inhibition of angiotensin converting enzyme/mineralocorticoid receptor/angiotensin 2 type 1 receptor (ATR1) signaling pathways in uninephrectomized hypertensive rats[J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(12): e13534.
［12］ HAN Y H, KEE J Y, PARK J, et al. Lipin1-mediated repression of adipogenesis by rutin[J]. The American Journal of Chinese Medicine, 2016, 44(3): 565−578.
［13］ HUANG A, MCCLEMENTS D J, LUO S, et al. Fabrication of rutin-protein complexes to form and stabilize bilayer emulsions: Impact of concentration and pretreatment[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 122: 107056.
［14］ LIU H, HAN G, ZHANG H, et al. Improving the physical and oxidative stability of emulsions based on the interfacial electrostatic effects between porcine bone protein hydrolysates and porcine bone protein hydrolysate-rutin conjugates[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 418−427.
［15］ PENG L P, TANG C H. Outstanding antioxidant pickering high internal phase emulsions by co-assembled polyphenol-soy *β*-conglycinin nanoparticles[J]. Food Research International, 2020, 136: 109509.
［16］ HUANG J R, SONG J R, CAI W S, et al. Enhancing vitamin D3 bioaccessibility: Unveiling hydrophobic interactions in soybean protein isolate and vitamin D3 binding via an infant *in vitro* digestion model[J]. Food Chemistry, 2024, 451: 139507.
［17］ ZHAO J, XU S, GU L, et al. High internal phase emulsions gels stabilized by soy protein isolate and rutin complexes: encapsulation, interfacial properties and *in vitro* digestibility[J]. LWT, 2024: 116317.
［18］ ZHOU S D, LIN Y F, XU X, et al. Effect of non-covalent and covalent complexation of (−)-epigallocatechin gallate with soybean protein isolate on protein structure and *in vitro* digestion characteristics[J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125718.
［19］ 于迪. 改性大豆球蛋白颗粒稳定的高内相 Pickering 乳液的制备及其替代脂肪在香肠中的应用[D]. 沈阳：沈阳农业大学, 2022. ［YU D. Preparation of modified soybean globulin particle stabilized high internal phase Pickering emulsion and its application as a substitute for fat in sausage[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.］
［20］ TONG Q, YI Z, RAN Y, et al. Green tea polyphenol-stabilized gel-like high internal phase pickering emulsions[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(11): 4076−4090.
［21］ PEI Z, WANG H, XIA G, et al. Emulsion gel stabilized by tilapia myofibrillar protein: Application in lipid-enhanced surimi preparation[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134424.
［22］ ASYRUL-IZHAR A B, BAKAR J, SAZILI A Q, et al. Emulsion gels formed by electrostatic interaction of gelatine and modified corn starch via pH adjustments: potential fat replacers in meat products[J]. Gels, 2023, 9(1): 50.
［23］ 李杨, 徐清清, 韩璐, 等. 添加菊粉条件下的豌豆分离蛋白乳化特性研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 382−388. ［LI Y, XU Q Q, HAN L, et al. Emulsification characteristics of pea protein isolate in the presence of inulin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 382−388.］
［24］ MIAO J, XU N, CHENG C, et al. Fabrication of polysaccharide-based high internal phase emulsion gels: Enhancement of curcumin stability and bioaccessibility[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: 106679.
［25］ 赵妍嫣, 卢星星, 殷琦, 等. 磷酸化大豆蛋白稳定高内相乳液的制备及性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(10): 223−229. ［ZHAO Y Y, LU X X, YIN Q, et al. Preparation and properties of stable high internal phase emulsion of phosphorylated soybean protein[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(10): 223−229.］
［26］ WANG J, ZHANG L, TAN C, et al. Pickering emulsions by regulating the molecular interactions between gelatin and catechin for improving the interfacial and antioxidant properties[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 126: 107425.
［27］ 姚弘彬, 伍文彬, 陈涛, 等. 3 种水包油型 *β*-胡萝卜素乳液的稳定性和消化特性[J]. 中国油脂, 2023, 48(6): 39−46. ［YAO H B, WU W B, CHEN T, et al. Stability and digestion characteristics of three kinds of oil-in-water *β*-carotene emulsions[J]. Chinese Oils and Fats, 2023, 48(6): 39−46.］
［28］ 崔竹梅. 大豆蛋白—芦丁复合乳状液的稳定性及其对 *β*-胡萝卜素缓释效应的研究[D]. 无锡：江南大学, 2016. ［CUI Z M. Research on the Stability of soy protein-rutin composite emulsion and its effect on the slow-release of *β*-Carotene[D]. Wuxi: Jiangnan

University, 2016. ]
[ 29 ] CHEN S, ZHANG N, TANG C H. Influence of nanocomplexation with curcumin on emulsifying properties and emulsion oxidative stability of soy protein isolate at pH 3.0 and 7.0[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 61: 102−112.
[ 30 ] ZHANG L J, ZHOU C F, XING S H, et al. Sea bass protein-polyphenol complex stabilized high internal phase of algal oil Pickering emulsions to stabilize astaxanthin for 3D food printing[J]. Food Chemistry, 2023, 417: 135824.
[ 31 ] LI X M, ZHU J, PAN Y, et al. Fabrication and characterization of Pickering emulsions stabilized by octenyl succinic anhydride modified gliadin nanoparticle[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 19−27.
[ 32 ] TIAN L, ZHANG S, YI J, et al. Antioxidant and prooxidant activities of tea polyphenols in oil-in-water emulsions depend on the level used and the location of proteins[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131672.
[ 33 ] FAN L, LIU Y, HUANG S, et al. Effects of proteins on emulsion stability: The role of proteins at the oil–water interface[J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133726.
[ 34 ] LI Y, ZHONG M M, XIE F Y, et al. The effect of pH on the stabilization and digestive characteristics of soybean lipophilic protein oil-in-water emulsions with Hypromellose[J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125579.
[ 35 ] QIN X S, GAO Q Y, LUO Z G. Enhancing the storage and gastrointestinal passage viability of probiotic powder (*Lactobacillus plantarum*) through encapsulation with pickering high internal phase emulsions stabilized with WPI-EGCG covalent conjugate nanoparticles[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 116: 106658.
[ 36 ] SALAS C, ROJAS O J, LUCIA L A, et al. Adsorption of glycinin and *β*-conglycinin on silica and cellulose: surface interactions as a function of denaturation, pH, and electrolytes[J]. Biomacromolecules, 2012, 13(2): 387−396.
[ 37 ] 茹倩雯. 苦荞麸皮蛋白的制备、修饰及其在纳米乳液中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2022. [ RU Q W. Preparation and modification of Tartary buckwheat bran protein and its application in nanoemulsion[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. ]
[ 38 ] XIONG Y, LI Z, YANG X. Whey protein-tannic acid conjugate stabilized high internal phase Pickering emulsions: Interfacial stability based on covalent crosslinking[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 672: 131690.
[ 39 ] 耿子蔚. 茶汤浸提条件对奶茶品质及乳清蛋白性质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [ GENG Z W. Effect of tea decoction extraction conditions on milk tea quality and whey protein properties[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023. ]
[ 40 ] 王瑞元. 国内外食用油市场的现状与发展趋势[J]. 农业机械, 2011, 36(6): 1−6. [ WANG R Y. Current situation and development trend of edible oil market at home and abroad[J]. Agricultural Machinery, 2011, 36(6): 1−6. ]
[ 41 ] 赵嘉雯. 基于南极磷虾油的乳液的制备、特性表征及其水凝胶系统的性质研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. [ ZHAO J W. Preparation and characterization of emulsion based on krill oil and properties of its hydrogel system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. ]
[ 42 ] de GODOI K R R, BASSO R C, MING C C, et al. Crystallization, microstructure and polymorphic properties of soybean oil organogels in a hybrid structuring system[J]. Food Research International, 2020, 137: 109460.
[ 43 ] 田甜, 周艳, 高悦, 等. 异硫氰酸苄酯纳米乳液射流空化制备与冻融稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 337−342,351. [ TIAN T, ZHOU Y, GAO Y, et al. Preparation and freeze-thaw stability of benzyl isothiocyanate nanoemulsion by jet cavitation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 337−342,351. ]
[ 44 ] ZHANG H, WANG T, HE F, et al. Fabrication of pea protein-curcumin nanocomplexes via microfluidization for improved solubility, nano-dispersibility and heat stability of curcumin: Insight on interaction mechanisms[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 168: 686−694.
[ 45 ] WANG X, CHEN J, GENG Q, et al. Non-covalent interaction of the plant protein composites-proanthocyanidins and the utilization in oil in water emulsions[J]. LWT, 2024, 198: 116062.
[ 46 ] LOPEZ C, BOURGAUX C, LESIEUR P, et al. Thermal and structural behavior of milk fat.3. Influence of cooling rate and droplet size on cream crystallization[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2002, 254(1): 64−78.
[ 47 ] COOPER Z, SIMONS C, MARTINI S. Retardation of crystallization through the addition of dairy phospholipids[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2019, 96(11): 1205−1218.
[ 48 ] 宁爵勇, 简昊天, 朱正旺, 等. 非晶合金新型换能元材料性能初探[J]. 含能材料, 2023, 31(6): 577−588. [ NING J Y, JIAN H T, ZHU Z W, et al. Preliminary study on properties of new energy transducer materials of amorphous alloy[J]. Energetic Materials, 2023, 31(6): 577−588. ]
[ 49 ] MCCLEMENTS D J, BAI L, CHUNG C. Recent advances in the utilization of natural emulsifiers to form and stabilize emulsions [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2017, 8: 205−236.
[ 50 ] CHEN Y, YAO M, PENG S, et al. Development of protein-polyphenol particles to stabilize high internal phase Pickering emulsions by polyphenols' structure[J]. Food Chemistry, 2023, 428: 136773.
[ 51 ] 孟甘露, 楚玉南, 吴仪, 等. 自由基法多酚共价结合对大豆蛋白基乳液凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(1): 23−31. [ MENG G L, CHU Y N, WU Y, et al. Effect of free radical method of polyphenol covalent binding on the gel properties of soybean protein based emulsion[J]. Food Science, 2024, 45(1): 23−31. ]
[ 52 ] MURRAY B S. Interfacial rheology of food emulsifiers and proteins[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2002, 7(5−6): 426−431.
[ 53 ] 畅柯飞. 热处理对蛋清蛋白聚集行为及界面性质调控作用机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021. [ CHANG K F. Research on the regulation mechanism of heat treatment on the aggregation behavior and interfacial properties of egg white protein[D]. Changchun: Jilin University, 2021. ]
[ 54 ] KIM H J, DECKERR E A, MCCLEMENTS D J. Impact of protein surface denaturation on droplet flocculation in hexadecane oil-in-water emulsions stabilized by *β*-lactoglobulin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(24): 7131−7137.
[ 55 ] HEYSE A, KRAUME M, DREWS A. The impact of lipases on the rheological behavior of colloidal silica nanoparticle stabilized Pickering emulsions for biocatalytical applications[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2020, 185: 110580.
[ 56 ] 孙丛, 谭智峰, 董馨然, 等. 糖基化豌豆分离蛋白稳定 Pickering 高内相乳液的贮藏稳定性[J]. 大连工业大学学报, 2023, 42(5): 318−323. [ SUN C, TAN Z F DONG X R, et al. Storage stability of Pickering High internal phase emulsion stabilized by glyco-

sylation pea protein isolate[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2023, 42(5): 318−323. ]
[ 57 ] 陈玲, 张立伟, 雷芬芬, 等. 乳清分离蛋白-黄原胶复合乳化剂制备南瓜籽油 O/W 型乳液及其稳定性[J]. 中国油脂, 2022, 47(12): 76−83. [ CHEN L, ZHANG L W, LEI F F, et al. Preparation of pumpkin seed oil O/W emulsion with whey protein isolate and Xanthan gum complex emulsifier and its stability[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(12): 76−83. ]
[ 58 ] 缪金玉. 高负载姜黄素高内相乳液的构建及其生物可接受率的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022. [ MIAO J Y. Construction and bioacceptability of high loading curcumin high internal phase emulsion[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022. ]
[ 59 ] de WIT J N. Thermal stability and functionality of whey proteins[J]. Journal of Dairy Science, 1990, 73(12): 3602−3612.
[ 60 ] 谢莹珊. TGase 交联桑叶蛋白制备高内相 Pickering 乳液及其负载姜黄素的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024. [ XIE Y S. Preparation of high internal phase Pickering emulsions with TGase cross-linked mulberry leaf protein and its loading of curcumin[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024. ]
[ 61 ] 王金霞. 玉米醇溶蛋白/酪蛋白酸钠纳米颗粒载运槲皮素的构建及其应用[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2024. [ WANG J X. Construction and application of zein/sodium caseinate nanoparticles for transporting quercetin[D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2024. ]
[ 62 ] 郑瑞, 崔楠楠, 周大勇, 等. 预热处理方式对亚麻籽油体乳液稳定性的影响[J/OL]. 中国油脂, 1−10[2024-09-01]. https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240308. [ ZHENG R, CUI N N, ZHOU D Y, et al. Preheating treatment on flax seed oil emulsion stability[J/OL]. The influence of China's oil, 1−10[2024-09-01]. https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240308. ]
[ 63 ] 施杰煜. 玉米醇溶蛋白-白藜芦醇共价复合物制备表征及应用[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2022. [ SHI J Y. Preparation and characterization of zein-resveratrol covalent complex and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2022. ]
[ 64 ] 雷阳, 覃崇文, 郭晓芸, 等. 芦丁对花生蛋白水解物制备乳状液稳定性的影响[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(10): 82−86. [ LEI Y, QIN C W, GUO X Y, et al. Effects of rutin on the stability of emulsions prepared from peanut protein hydrolysate[J]. Chinese Food Additives, 2021, 32(10): 82−86. ]
[ 65 ] RASHIDINEJAD A, DIMA C, KARACA A C, et al. A review on rutin-loaded nanocarriers: Fundamentals, bioavailability, application in functional foods, and challenges[J]. European Polymer Journal, 2024: 113385.
[ 66 ] 唐浩, 孙银银, 甘勇, 等. 脂质药用辅料氧化指标的研究现状与挑战[J]. 药学进展, 2025, 49(2): 100−110. [ TANG H, SUN Y Y, GAN Y, et al. Research status and challenges of oxidation indicators for lipid pharmaceutical excipients[J]. Advances in Pharmaceutical Science, 2025, 49(2): 100−110. ]
[ 67 ] NAKAGAWA H, WACHI M, WOO J T, et al. Fenton reaction is primarily involved in a mechanism of (−)-epigallocatechin-3-gallate to induce osteoclastic cell death[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2002, 292(1): 94−101.
[ 68 ] ZHOU L, ELIAS R J. Factors influencing the antioxidant and pro-oxidant activity of polyphenols in oil-in-water emulsions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(11): 2906−2915.
[ 69 ] ZHOU L, ELIAS R J. Investigating the hydrogen peroxide quenching capacity of proteins in polyphenol-rich foods[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(16): 8915−8922.
[ 70 ] 黄小倩, 李佳琪, 郭梦雪, 等. 忧遁草多糖乳液体外消化特性研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 1−9. [ HUANG X Q, LI J Q, GUO M X, et al. Study on the *in vitro* digestion characteristics of polysaccharide emulsion of *Rhizophoria melitensis*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(19): 1−9. ]
[ 71 ] SALVIA-TRUJILLO L, QIAN C, MARTÍN-BELLOSO O, et al. Influence of particle size on lipid digestion and $\beta$-carotene bioaccessibility in emulsions and nanoemulsions[J]. Food Chemistry, 2013, 141(2): 1472−1480.
[ 72 ] DU C, WANG Z, ZHENG Z. The preparation of plant-based milk substitutes with antioxidant properties using soybean protein isolate and curcumin composite nanoparticles[J]. LWT, 2023, 182: 114780.