

高强度超声辅助乳化对金鲳鱼蛋白-茶皂苷复合乳液性质的影响

宿华林, 吴迪, 孙爽, 徐玉, 赵琪, 吴汶飞, 胡蒋宁

(大连工业大学食品学院, 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁大连116034)

摘要:为提升金鲳鱼蛋白乳液的稳定性,改善金鲳鱼蛋白的功能特性,以金鲳鱼蛋白-茶皂苷复合物为乳化剂、大豆油为油相,采用高强度超声(HIUS)辅助乳化制备金鲳鱼蛋白-茶皂苷复合乳液,测定超声处理前后不同乳化剂与油相比比例的金鲳鱼蛋白-茶皂苷复合乳液的乳化性、粒径分布、Zeta-电位、流变性、微观形态及贮藏稳定性。结果表明:与未超声处理金鲳鱼蛋白-茶皂苷复合乳液相比,超声处理后乳液的乳化活性指数和乳化稳定性指数总体增高,粒径减小,Zeta-电位的绝对值增加,流动指数升高,黏度系数降低,乳液液滴分布更均匀,乳液液滴更小,贮藏稳定性较好。综上,HIUS处理有助于改善金鲳鱼蛋白-茶皂苷的乳化性能。

关键词:高强度超声;金鲳鱼蛋白;乳液;稳定性

中图分类号:TS254.1;TS201.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2024)01-0035-08

Effect of high intensity ultrasound - assisted emulsification on properties of golden pompano protein - tea saponins composite emulsion

SU Hualin, WU Di, SUN Shuang, XU Yu, ZHAO Qi, WU Wenfei, HU Jiangning

(National Engineering Research Center of Seafood, School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, Liaoning, China)

Abstract: In order to improve the stability of the golden pompano protein emulsion and improve the functional properties of golden pompano protein, golden pompano protein - tea saponins composite emulsion was prepared by high intensity ultrasound (HIUS) - assisted emulsification with golden pompano protein - tea saponins complex as emulsifier, soybean oil as oil phase, the emulsifying properties, particle size distribution, Zeta - potential, rheological properties, microscopic morphology and storage stability of golden pompano protein - tea saponins composite emulsion with different emulsifier - oil ratio before and after ultrasonic treatment were measured. The results showed that compared with emulsion without ultrasonic treatment, the emulsifying activity index and emulsifying stability index of the golden pompano protein - tea saponins composite emulsion after HIUS treatment increased in general, the particle size decreased, the absolute value of Zeta - potential increased, flow index increased, and viscosity coefficient decreased. The distribution of emulsion drops was more uniform, the emulsion drops were smaller, and the storage stability was better. In summary, HIUS treatment is helpful to improve the emulsifying properties of golden pompano protein - tea saponins.

Key words: high intensity ultrasound; golden pompano protein; emulsion; stability

收稿日期:2022-11-04;修回日期:2023-09-02

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32172208)

作者简介:宿华林(1997),男,在读硕士,研究方向为食品科学(E-mail)1091980760@qq.com。

通信作者:胡蒋宁,教授,博士(E-mail)5103725@qq.com。

水生肉类蛋白比陆生肉类蛋白具有更高的营养价值,且更容易被消化吸收^[1]。金鲳鱼(*Trachinotus ovatus*)是一种重要的商业养殖鱼,在我国南方的年产量约为12万t^[2]。金鲳鱼肌肉间骨少,风味独特,深受消费者的喜爱^[3]。金鲳鱼蛋白相比于其他

肉类蛋白易消化、氨基酸含量高,具有降低胆固醇、预防冠状动脉粥样硬化等功能。金鲳鱼蛋白作为乳化剂,可以形成 O/W 型乳液,但以金鲳鱼蛋白为乳化剂所稳定的 O/W 型乳液是一种热力学不稳定体系,容易出现凝结、絮凝等常见的失稳现象而不能满足金鲳鱼蛋白产品配制过程中的生产要求^[4]。因此,提升金鲳鱼蛋白乳液的稳定性,改善金鲳鱼蛋白的功能特性,在金鲳鱼蛋白食品加工中显得尤为重要。

超声技术一般分为低强度超声(功率 < 1 W/cm²)和高强度超声(HIUS,功率 10 ~ 1 000 W/cm²)^[5]。HIUS 是一种新兴的技术,其是通过在被处理的液体中形成空化气泡来造成机械破坏,而空化气泡的破裂会产生极端的物理力,从而加速蛋白质溶液的传质^[6]。此外,这些强大的破坏力所产生的机械和化学效应可能会改变蛋白质的结构,并有效分解分散体中的蛋白质颗粒或聚集体^[7]。HIUS 处理被广泛应用于改善食品原料的性质和质量^[8]。Shen 等^[9]研究表明,HIUS 处理可以显著改善乳清分离蛋白的乳化特性,使乳清分离蛋白的颗粒更小,表面疏水性更高。Liu 等^[10]通过 HIUS 处理促进肌原纤维蛋白在油水界面的吸附和分子重排,进而形成完整的界面层,从而提高了乳液的稳定性。Sun 等^[11]研究表明,向金鲳鱼蛋白溶液中加入不同比例的茶皂苷可以形成不同性能的金鲳鱼蛋白-茶皂苷复合乳液,这种混合体系在设计基于蛋白乳液输送系统方面显示出巨大的潜力。研究发现,金鲳鱼蛋白经超声处理后,其与茶皂苷的相互作用增强^[12],但关于超声处理金鲳鱼蛋白-茶皂苷复合乳液的理化性质、流变性、乳化性和稳定性的研究目前仍然有限。

本文研究了 HIUS 处理对金鲳鱼蛋白-茶皂苷复合乳液乳化性能的影响,并从物理化学、流变性角度阐明 HIUS 处理提高乳化稳定性的潜在机制,以期提高金鲳鱼蛋白-茶皂苷复合乳液的贮藏稳定性,满足金鲳鱼蛋白产品配制过程的生产要求。

1 材料与方法

1.1 实验材料

金鲳鱼,海南翔泰渔业有限公司,储存于 -30℃ 下备用;大豆油,吉林省桂青源粮油有限公司;茶皂苷,阿拉丁试剂(上海)有限公司。

DF-101S 磁力搅拌器,汕头市粤威事业有限公司;超低温冰箱,日本三洋有限公司;DT-1202 声/电光谱仪,马尔文仪器公司;EVOS XL Core 光学显微镜,美国赛默飞公司;Discovery HR-1 旋转流变

仪,美国 TA 仪器公司;SCIENTZ 超声波细胞破碎仪,宁波新芝生物有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 金鲳鱼蛋白的提取

根据 Pearce 等^[13]的方法提取金鲳鱼蛋白(GPP),并进行了一些修改。称取 100 g 金鲳鱼肌肉,切碎,与 4 倍体积的冷蒸馏水混合后匀浆得到分散体。使用 2 mol/L 氢氧化钠溶液将分散体 pH 调至 10,于 4℃ 下搅拌 1 h 后,以 11 400 × g 在 4℃ 下离心 10 min。将所得上清液用 2 mol/L 盐酸溶液调 pH 至 5.5,搅拌 30 min,以 11 400 × g 在 4℃ 下离心 10 min。将所得沉淀物重新分散在去离子水中,并将其 pH 调至 7.0,得 GPP 分散液,加水稀释至蛋白质质量浓度为 30 mg/mL,并使用匀浆机以 8 000 r/min 均质 1 min,得分散液。然后将分散液在 4℃ 下以 500 r/min 搅拌 1 h。最后,将样品储存在 4℃ 以待进一步分析。

1.2.2 金鲳鱼蛋白-茶皂苷复合物乳化剂的制备

将 GPP 分散液稀释到蛋白质质量浓度 10 mg/mL,并通过高速匀浆机以 8 000 r/min 匀浆 1 min。将 1 g 茶皂苷(TS)(基于活性成分)分散到 100 mL 去离子水中,搅拌 4 h,并在 4℃ 下储存过夜以确保完全水合,得 TS 分散液。按一定质量比将 GPP 分散液与 TS 分散液混合,搅拌 4 h,形成均匀的混合物,制得 GPP-TS 复合物乳化剂,在 4℃ 下保存以供进一步分析。

1.2.3 游离巯基含量的测定

采用 Beveridge 等^[14]的方法测定游离巯基含量并稍加修改。用 Tris-甘氨酸缓冲液(pH 8.0)将 GPP-TS 复合物乳化剂的蛋白质质量浓度稀释至 3.0 mg/mL,然后取 2 mL 稀释后的 GPP-TS 复合物乳化剂,加入 20 μL Ellman 试剂,混合。最后,将反应混合物在黑暗中保持 1 h 以确保反应完全,再以 10 000 × g 离心 15 min,在 412 nm 处测定上清液的吸光度。使用 13 600 L/(mol·cm)的摩尔消光系数计算结果。游离巯基含量(S)按式(1)计算。

$$S = \frac{73.53 \times A_{412} \times D}{C} \quad (1)$$

式中: A_{412} 为 412 nm 处的吸光度; D 为稀释倍数; C 为蛋白质的质量浓度,mg/mL。

1.2.4 乳液的制备

将制备好的 GPP-TS 复合物乳化剂与大豆油分别以体积比 4:1、3:2、1:1、2:3 和 1:4 混合,使用高速匀浆机以 12 000 r/min 匀浆 2 min,制备的乳液

分别记为 N1、N2、N3、N4、N5,在 4℃ 下储存。

1.2.5 超声处理

采用超声波细胞破碎仪对乳液进行超声乳化。将乳液倒入 100 mL 的锥形瓶中,置于冰水浴中,样品温度不超过 25℃。超声处理条件为:输出功率 240 W/L,乳化处理时间 6 min,脉冲持续时间 1 s,间歇时间 3 s,频率 20 kHz。

乳化剂与大豆油体积比 4:1、3:2、1:1、2:3 和 1:4 制备的经超声处理的乳液分别记为 U1、U2、U3、U4 和 U5。

1.2.6 乳化性的测定

参照文献[15]测定 GPP-TS 复合乳液的乳化性。取 50 μL 新鲜乳液用 5 mL 0.1 g/100 mL 的十二烷基硫酸钠(SDS)溶液稀释至蛋白质质量浓度为 0.1 mg/mL,在 500 nm 处检测吸光度。乳化活性指数和乳化稳定性指数分别按式(2)和式(3)计算。

$$E_A = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times F}{c \times \phi \times (1 - \theta) \times 10\,000} \quad (2)$$

$$E_S = A_{10}/A_0 \times 100\% \quad (3)$$

式中: E_A 为乳化活性指数, m^2/g ; E_S 为乳化稳定性指数; F 为稀释倍数; c 为样品蛋白质质量浓度, g/mL ; ϕ 为比色皿的厚度, cm ; θ 为油相体积分数; A_0 、 A_{10} 分别为 0 min 和 10 min 时的吸光度。

1.2.7 Zeta - 电位和粒径分布的测定

通过声/电光谱仪测定不同乳化剂和油相比例稳定的 GPP-TS 复合乳液的 Zeta - 电位和粒径^[16]。实验前,以 ludox 硅胶为标准胶体溶液(Zeta - 电位为 -38 mV)为校正液进行校准,并在样品池中加入 25 mL 样品进行测试。通过数学模型计算样品的粒径分布。

1.2.8 流变性的测定

使用旋转流变仪在 25℃ 下测定乳液的流变性。旋转流变仪配备有平行板(直径 40 mm,间隙 0.5 mm,锥角 2°)^[17]。记录剪切速率从 0.1 s⁻¹ 增加到 100 s⁻¹ 时的应力和黏度。通过频率扫描测定在 10% 剪切应变下角频率从 0.1 rad/s 增加到 10 rad/s 的储能模量(G')和损耗模量(G'')。使用 Ostwald de Waele 流变模型确定黏度系数(k)和流动指数(n),见式(4)。

$$\tau = k \times \delta^n \quad (4)$$

式中: τ 为剪切应力,Pa; δ 为剪切速率,s⁻¹。

1.2.9 乳液微观形态的观测

取新鲜制备的乳液,通过光学显微镜在放大倍数为 200× 下观察其微观结构。

1.2.10 贮藏稳定性的测定

将乳液置于 10 mL 玻璃瓶内,并在室温下贮存 10 d,记录乳液外观的变化。

1.2.11 数据处理

所有实验重复 3 次,结果以“平均值 ± 标准偏差”表示。使用 Excel 2010 (Microsoft Corporation, USA)进行数据初步整合,并用 SPSS 18.0 (SPSS Inc Chicago, IL, USA)进行显著性分析、方差分析和 Duncan's 的多范围测试, $p < 0.05$ 为有显著性。使用 OriginPro 8.5 (Origin Lab Corporation MA, USA)绘图。

2 结果与分析

2.1 茶皂苷对金鲳鱼蛋白结构的影响

游离巯基是一种暴露在蛋白质表面的基团,通常用于评价蛋白质结构的变化^[18]。为了研究 GPP 结构特征与不同 TS 添加比例之间的关系,考察了 GPP 分散液与 TS 分散液质量比对游离巯基含量的影响,结果如图 1 所示。

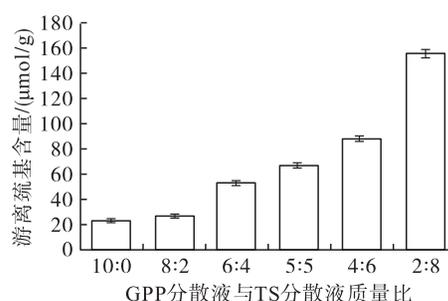
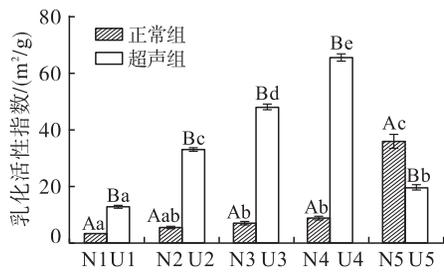


图 1 GPP 分散液与 TS 分散液质量比对游离巯基含量的影响

由图 1 可知,GPP-TS 复合物的游离巯基含量均显著高于单独 GPP,造成这种现象的原因可能是与 TS 结合后 GPP 中的二硫键断裂。加入的 TS 越多,游离巯基的含量越高,这一结果可能归因于 GPP 的结构随着 TS 添加量的增加而逐渐展开,从而导致位于蛋白质内部的巯基暴露于表面^[19]。此外,添加离子或非离子表面活性剂能够增强蛋白质的亲水性,因此游离巯基含量的增加可能与 GPP 的溶解度增加有关^[20]。因此,后续实验采用 GPP 分散液与 TS 分散液质量比为 2:8 制备乳液。

2.2 超声处理对乳液乳化性的影响

乳化性是反映蛋白质吸附到油水界面的能力,主要通过乳化活性指数与乳化稳定性指数来表征。乳化活性指数表示每单位质量蛋白质稳定的界面面积,乳化稳定性指数则是在特定时间内对乳液抵抗外界不稳定因素的表征。超声处理对 GPP-TS 复合乳液乳化活性指数和乳化稳定性指数的影响如图 2 所示。



注:不同大写字母表示正常组与超声组组间具有显著性差异($p < 0.05$);不同小写字母表示组内具有显著性差异($p < 0.05$)

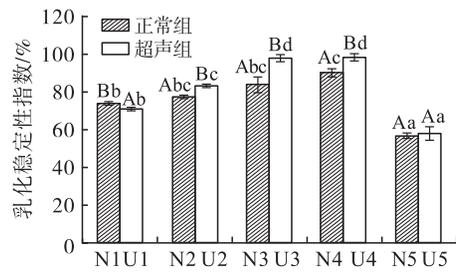
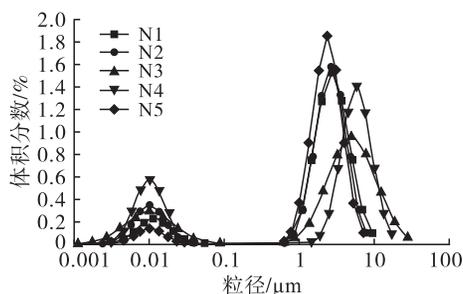
图2 超声处理对 GPP-TS 复合乳液乳化活性指数和乳化稳定性指数的影响

由图2可知,N1~N4的乳化活性指数从 $3.14 \text{ m}^2/\text{g}$ 增加到 $8.89 \text{ m}^2/\text{g}$,N5的乳化活性指数大幅增加,U1~U4的乳化活性指数从 $12.68 \text{ m}^2/\text{g}$ 增加到 $65.60 \text{ m}^2/\text{g}$,U5的乳化活性指数显著下降。乳化活性指数随着油相比的增加而增加,这可能是由于随着含油量的增加,所形成的界面面积增大,乳化活力上升,乳化活性指数提高^[21]。但U5的乳化活性指数下降可能是由于乳化剂添加量过少,单位质量蛋白质的超声强度增强,导致蛋白质变性,使其与茶皂苷的相互作用发生变化,从而导致乳化活性指数降低。超声处理乳液的乳化活性指数高于未超声处理乳液(除N5、U5),原因可能由于超声产生的空化作用减小了油滴和蛋白质以及茶皂苷分子的粒径,导致复合乳化剂与油滴之间的接触水平增加,从而提高蛋白质-茶皂苷复合物的乳化性能^[10]。

由图2可知,N1~N4的乳化稳定性指数从73.59%增加到89.83%,U1~U4的乳化稳定性指数从70.59%增加到98.41%,而N5和U5的乳化稳定指数则下降。超声处理乳液的乳化稳定性指数总体高于未超声处理乳液,这可以归因于茶皂苷在蛋白质上吸附量的增加。另外,超声后乳液粒径减小,进一步阻止了油滴的絮凝和聚集,从而增加了乳液的稳定性^[22]。

2.3 超声处理对乳液 Zeta-电位的影响

Zeta-电位表示粒子的表面电荷密度^[23]。超



声处理对 GPP-TS 复合乳液 Zeta-电位的影响如图3所示。

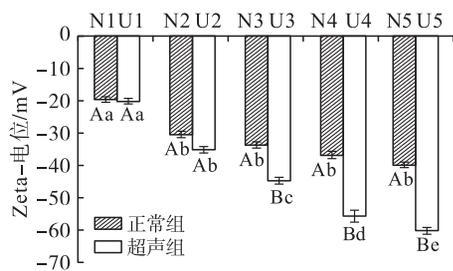


图3 超声处理对 GPP-TS 复合乳液 Zeta-电位的影响

由图3可知,随着乳化剂与油相比的减小,未超声处理乳液的 Zeta-电位绝对值从 19.62 mV (N1)增加到 39.82 mV (N5)。与未超声处理乳液相比,超声处理乳液的 Zeta-电位绝对值增加,且U3~U5增加显著。有研究表明,超声后浓缩蛋白的 Zeta-电位绝对值增加^[24]。超声处理导致丝状聚合物物理降解和蛋白质展开,最终导致内部极性位点暴露。此外,超声处理可能会破坏现有的蛋白质聚集体,并抑制其进一步聚集,这有助于蛋白质分子表面电荷的增加^[25]。

2.4 超声处理对乳液粒径分布的影响

乳液粒径反映了液滴的聚集和絮凝情况,是衡量乳液稳定性的重要指标^[26]。超声处理对 GPP-TS 复合乳液粒径分布的影响如图4所示。

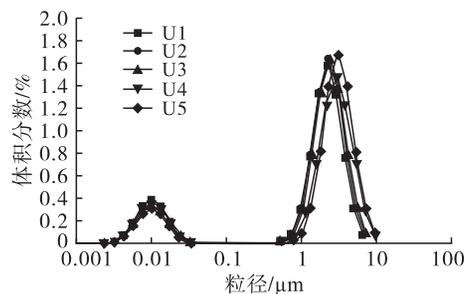


图4 超声处理对 GPP-TS 复合乳液粒径分布的影响

由图4可知,N1~N4的粒径随着油相比的

增加而增加。超声处理乳液的粒径相对于未超声处

理乳液减小,原因是一方面超声处理使蛋白质结构展开,蛋白质与茶皂苷分子间的相互作用增强,使乳液粒径减小,另一方面超声处理增强了复合乳化剂之间的静电排斥和空间排斥作用,提供了足够的作用力来防止液滴的聚集,从而使乳液的粒径减小^[27]。

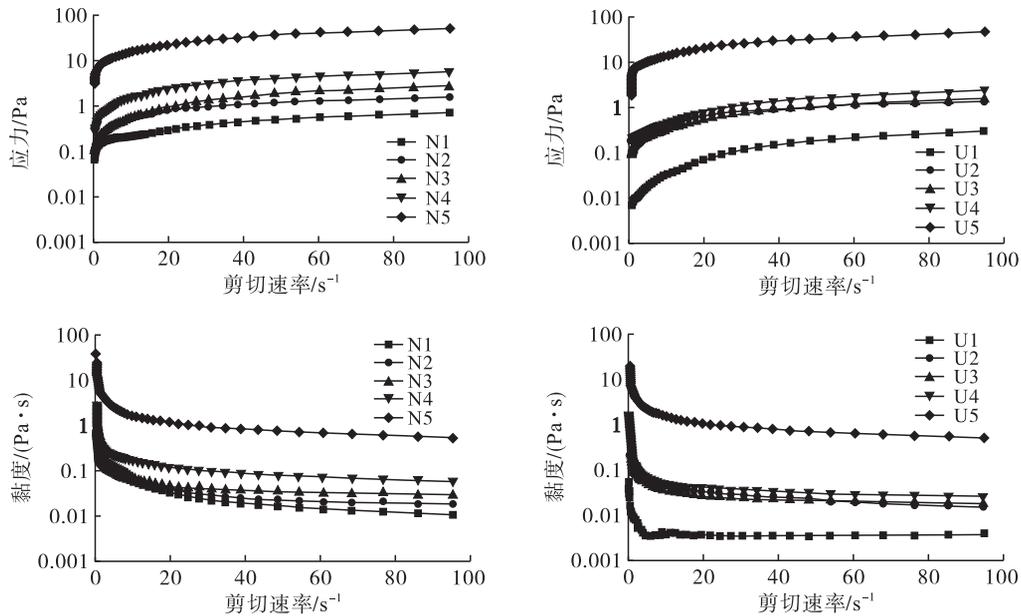


图5 超声处理对GPP-TS复合乳液应力和黏度的影响

由图5可以看出,在剪切速率 $0.1 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 范围内,随着剪切速率的增加,未超声处理以及超声处理乳液均呈现应力增加、黏度降低的趋势,表现出剪切稀化行为。这是由于吸附在液滴表面的乳化剂间的相互作用阻碍了液滴间的布朗运动,随着剪切速率的增加,流动阻力降低,导致乳液应力逐渐增加,黏度逐渐降低^[29]。未超声处理及超声处理乳液的黏度均随着油相比例的增加而增加,这是由于乳液中的高含油量增加了系统中的摩擦损失,导致黏度增加^[30]。超声处理乳液的黏度低于未超声处理乳液的,可能是因为超声处理后乳液粒径的减小而导致表观黏度降低^[31]。

表1为通过幂律模型对数据进行非线性回归分析确定的参数。

表1 超声处理对GPP-TS复合乳液黏度系数和流动指数的影响

乳液	$k/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	n	回归系数(R^2)
N1	0.106	0.404	0.96
U1	0.006	0.895	0.99
N2	0.421	0.264	0.95
U2	0.206	0.423	0.97
N3	0.146	0.649	0.99

2.5 超声处理对乳液流变性的影响

2.5.1 应力和黏度

流变学特性是食品最重要的性质之一,乳液粒径大小、连续相的黏度及组成成分等均会影响乳液的流变学特性^[28]。超声处理对GPP-TS复合乳液应力和黏度的影响如图5所示。

续表1

乳液	$k/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	n	回归系数(R^2)
U3	0.085	0.650	0.99
N4	0.469	0.553	0.99
U4	0.128	0.650	0.99
N5	5.856	0.470	0.99
U5	5.290	0.485	0.99

k 是黏稠性的表征; $n=1$ 表明该乳液为牛顿流体, $0 < n < 1$ 表明该乳液为假塑性流体^[32]。由表1可知,该模型对数据拟合效果较好($R^2 \geq 0.95$),超声处理乳液的 k 值较未超声处理的低,而 n 值较未超声处理的高,同时 n 值均小于1,说明所有乳液均为假塑性流体。

2.5.2 储能模量(G')和损耗模量(G'')

乳化剂与油相比例会影响乳液的流变特性,仅测定黏度不能完全表示乳液的内部结构和流动特性,还需要对其进行振动测试加以辅助。超声处理对GPP-TS复合乳液 G' 和 G'' 的影响见图6。

由图6可知,乳化剂与油相比例分别为4:1、3:2、1:1、2:3和1:4时,乳液的 G'' 均高于 G' ,说明乳液的流变行为主要以黏性为主。这与我们之前研究测得乳液 G' 均高于 G'' 的结果不一样,可能是因为乳液在流变学测量之前就发生凝胶化,凝胶化速度太

快^[33]。乳液的 G' 和 G'' 均随着角频率的增加逐渐增加,这种效应可归因于由聚集的乳化剂涂层油滴和乳化剂分子组成的三维网络的形成和加强^[34]。与未超

声处理乳液比较,在相同乳化剂与油相比比例条件下,超声处理乳液的 G' 、 G'' 均提高,这说明超声处理乳液液滴相比于未超声处理乳液具有更紧凑的结构^[30]。

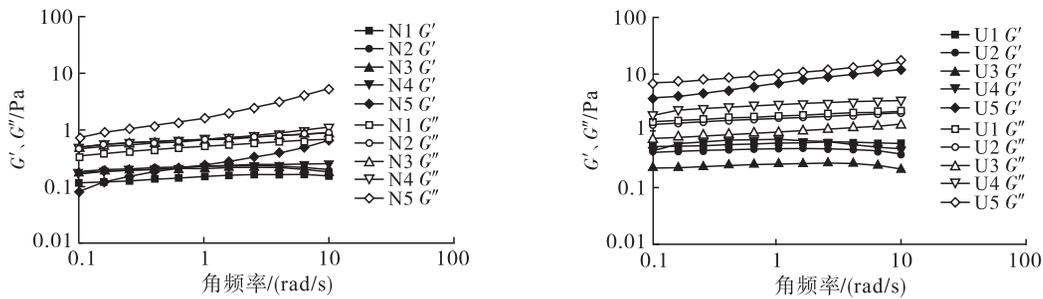


图6 超声处理对 GPP-TS 复合乳液 G' 和 G'' 的影响

2.6 超声处理对乳液微观形态的影响

图7为超声处理对 GPP-TS 复合乳液微观形态的影响。由图7可知,油滴被金鲳鱼蛋白-茶皂苷复合乳化剂分子包围。未超声处理乳液出现部分不规则的 O/W 型大液滴,这说明体系中的油滴乳化不充分,乳液的稳定性差。超声处理乳液油滴聚集减少,这是因为超声处理后蛋白质与茶皂苷分子

在界面层的疏水作用增强,并且产生的较强的静电排斥力以及空间排斥力,减轻了液滴的絮凝作用^[35]。然而,相对于其他超声处理的样品,U5发生了轻度的聚集,这可能是由于单位质量蛋白质的过度超声导致油-水界面乳化剂分子之间的聚合和分子间相互作用,液滴之间发生絮凝。Guzey 等^[36]研究也发现,过度超声导致乳液发生相分离。

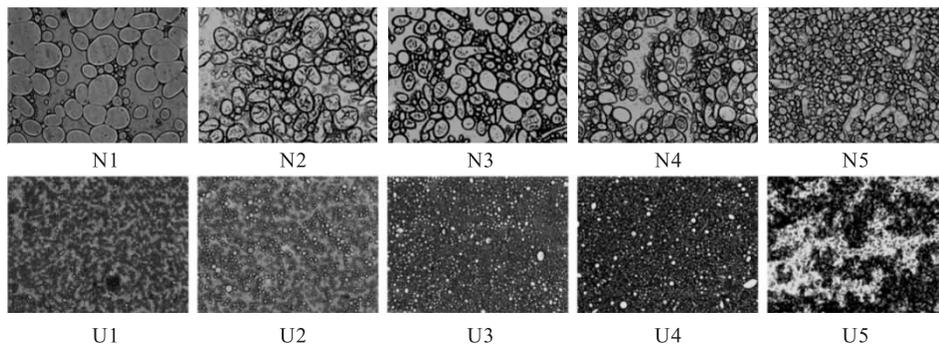


图7 超声处理对 GPP-TS 复合乳液微观形态的影响

2.7 超声处理对乳液贮藏稳定性的影响

超声处理对 GPP-TS 复合乳液贮藏稳定性的影响如图8所示。

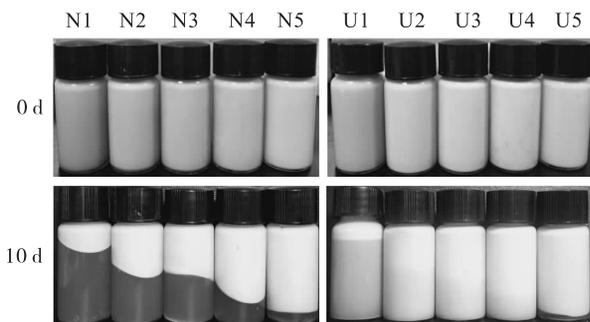


图8 超声处理对 GPP-TS 复合乳液贮藏稳定性的影响

由图8可知,室温下贮存 10 d, N1~N4 出现明显分层, N5 出现轻微的分层。乳液的稳定性随着油相比比例增加而增加,这可能是因为随着含油量的增加,液滴之间的空间排斥力增加,从而增加了乳液稳定性^[36]。相比于未超声处理乳液, U1~U5 表现出更好

的稳定性,在相同条件下,超声处理乳液在界面处吸附蛋白质比例较高,增加的吸附蛋白质可以增强液滴之间的排斥力,从而提高乳液稳定性。此外,超声后乳液粒径的减小也有利于乳液具有更好的贮藏稳定性。

3 结论

HIUS 辅助乳化可以提高不同乳化剂与油相比比例下金鲳鱼蛋白-茶皂苷复合乳液的乳化活性指数和乳化稳定性指数,并随着含油量的增高而增高(除乳化剂与油相比比例为 1:4 乳液)。超声处理后乳液的粒径减小, Zeta-电位绝对值增加。在不同的乳化剂与油相比比例条件下,超声处理乳液的流动指数相较于未超声处理的乳液升高,而黏度系数降低,超声乳化处理影响了乳液的流变性能。随着含油量的增高乳液黏度增加,同时提高了乳液的贮藏稳定性。显微图像表明超声处理乳液液滴分布更均匀,乳液液滴更小。因此, HIUS 辅助乳化是制备金鲳鱼蛋白-茶皂苷复合乳液的有效方法。

参考文献:

- [1] TACON A G J, METIAN M. Fish matters: Importance of aquatic foods in human nutrition and global food supply [J]. *Rev Fish Sci*, 2013, 21(1): 22–38.
- [2] CHEN Q, WANG Y, WU Y, et al. Investigation of fermentation – induced changes in the volatile compounds of *Trachinotus ovatus* (Meixiangyu) based on molecular sensory and interpretable machine – learning techniques: Comparison of different fermentation stages [J/OL]. *Food Res Int*, 2021, 150: 110739 [2022 – 11 – 04]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110739>.
- [3] 王娜. 加工工艺对金鲳鱼鱼糜凝胶特性及鱼糜蛋白冷冻变性影响的研究 [D]. 广东 湛江: 广东海洋大学, 2015.
- [4] DESFOUGÈRES Y, SAINT – JALMES A, SALONEN A, et al. Strong improvement of interfacial properties can result from slight structural modifications of proteins: The case of native and dry – heated lysozyme [J]. *Langmuir*, 2011, 27(24): 14947 – 14957.
- [5] MASON T J, PANIWNKYK L, LORIMER J P. The uses of ultrasound in food technology [J]. *Ultrason Sonochem*, 1996, 3(3): S253 – S260.
- [6] CHANDRAPALA J, OLIVER C, KENTISH S, et al. Ultrasonics in food processing [J]. *Ultrason Sonochem*, 2012, 19(5): 975 – 983.
- [7] 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 Hydrocolloid*, 2016, 55: 200 – 209.
- [8] GALLO M, FERRARA L, NAVIGLIO D. Application of ultrasound in food science and technology: A perspective [J/OL]. *Foods*, 2018, 7(10): 164 [2022 – 11 – 04]. <https://doi.org/10.3390/foods7100164>.
- [9] SHEN X, FANG T, GAO F, et al. Effects of ultrasound treatment on physicochemical and emulsifying properties of whey proteins pre – and post – thermal aggregation [J]. *Food Hydrocolloid*, 2017, 63: 668 – 676.
- [10] LIU H, ZHANG J, WANG H, et al. High – intensity ultrasound improves the physical stability of myofibrillar protein emulsion at low ionic strength by destroying and suppressing myosin molecular assembly [J/OL]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 74: 105554 [2022 – 11 – 04]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105554>.
- [11] SUN S, ZHANG C, LI S, et al. Improving emulsifying properties using mixed natural emulsifiers: Tea saponin and golden pompano protein [J/OL]. *Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects*, 2023, 656: 130311 [2022 – 11 – 04]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130311>.
- [12] UNDELAND I, KELLEHER S D, HULTIN H O. Recovery of functional proteins from herring (*Clupea harengus*) light muscle by an acid or alkaline solubilization process [J]. *J Agric Food Chem*, 2002, 50(25): 7371 – 7379.
- [13] PEARCE K N, KINSELLA J E. Emulsifying properties of proteins: Evaluation of a turbidimetric technique [J]. *J Agric Food Chem*, 1978, 26(3): 716 – 723.
- [14] BEVERIDGE T, TOMA S, NAKAI S. Determination of SH – and SS – groups in some food proteins using Ellman’s reagent [J]. *J Food Sci*, 1974, 39: 49 – 51.
- [15] ZHAO N, ZOU H, SUN S, et al. The interaction between sodium alginate and myofibrillar proteins: The rheological and emulsifying properties of their mixture [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 161: 1545 – 1551.
- [16] ZOU H, ZHAO N, LI S, et al. Physicochemical and emulsifying properties of mussel water – soluble proteins as affected by lecithin concentration [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 163: 180 – 189.
- [17] ZHOU L, ZHANG J, YIN Y, et al. Effects of ultrasound – assisted emulsification on the emulsifying and rheological properties of myofibrillar protein stabilized pork fat emulsions [J/OL]. *Foods*, 2021, 10(6): 1201 [2022 – 11 – 04]. <https://doi.org/10.3390/foods10061201>.
- [18] CAMPBELL J, GU X, DEWAR S J, et al. Effects of heat treatment and glucono – δ – lactone – induced acidification on characteristics of soy protein isolate [J]. *Food Hydrocolloid*, 2009, 23(2): 344 – 351.
- [19] LI R, WANG X, LIU J, et al. Relationship between molecular flexibility and emulsifying properties of soy protein isolate – glucose conjugates [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(14): 4089 – 4097.
- [20] KOTSMAR C, PRADINES V, ALAHLVERDJIEVA V S, et al. Thermodynamics, adsorption kinetics and rheology of mixed protein – surfactant interfacial layers [J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2009, 150(1): 41 – 54.
- [21] LI Z, DAI L, WANG D, et al. Stabilization and rheology of concentrated emulsions using the natural emulsifiers quillaja saponins and rhamnolipids [J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(15): 3922 – 3929.
- [22] TANG S Y, TAN K W, SIVAKUMAR M. Ultrasound cavitation as a green processing technique in the design and manufacture of pharmaceutical nanoemulsions in drug delivery system [M] // Green chemistry environmental remediation. Missouri: Scrivener Publishing, 2012: 153 – 208.
- [23] JIANG L, WANG J, LI Y, et al. Effects of ultrasound on the structure and physical properties of black bean protein isolates [J]. *Food Res Int*, 2014, 62: 595 – 601.
- [24] ARREDONDO – PARADA I, TORRES – ARREOLA W,

- SUÁREZ – JIMÉNEZ G M, et al. Effect of ultrasound on physicochemical and foaming properties of a protein concentrate from giant squid (*Dosidicus gigas*) mantle[J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2020, 121: 108954 [2022 – 11 – 04]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108954>.
- [25] GAO H, MA L, LI T, et al. Impact of ultrasonic power on the structure and emulsifying properties of whey protein isolate under various pH conditions [J]. *Process Biochem*, 2019, 81: 113 – 122.
- [26] ROMERO A, BEAUMAL V, DAVID – BRIAND E, et al. Interfacial and emulsifying behaviour of rice protein concentrate[J]. *Food Hydrocolloid*, 2012, 29(1): 1 – 8.
- [27] INTARASIRISAWAT R, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W. Stability of emulsion containing skipjack roe protein hydrolysate modified by oxidised tannic acid [J]. *Food Hydrocolloid*, 2014, 41: 146 – 155.
- [28] LIU F, TANG C H. Emulsifying properties of soy protein nanoparticles: Influence of the protein concentration and/or emulsification process[J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(12): 2644 – 2654.
- [29] TIAN Y, ZHANG Z, ZHANG P, et al. The role of conformational state of pH – shifted β – conglycinin on the oil/water interfacial properties and emulsifying capacities[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 108: 105990 [2022 – 11 – 04]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105990>.
- [30] DJORDJEVIC D, KIM H J, MCCLEMENTS D J, et al. Physical stability of whey protein – stabilized oil – in – water emulsions at pH 3: Potential – 3 fatty acid delivery systems (part A)[J]. *J Food Sci*, 2006, 69(5): C351 – C355.
- [31] MELLEMA M, VAN OPHEUSDEN J H J, VAN VLIET T. Categorization of rheological scaling models for particle gels applied to casein gels[J]. *J Rheol*, 2002, 46(1): 11 – 29.
- [32] CHUNG C, SHER A, ROUSSET P, et al. Impact of oil droplet concentration on the optical, rheological, and stability characteristics of O/W emulsions stabilized with plant – based surfactant: Potential application as non – dairy creamers[J]. *Food Res Int*, 2018, 105: 913 – 919.
- [33] YANG M, LIU F, TANG C H. Properties and microstructure of transglutaminase – set soy protein – stabilized emulsion gels[J]. *Food Res Int*, 2013, 52(1): 409 – 418.
- [34] XI Z, LIU W, MCCLEMENTS D J, et al. Rheological, structural, and microstructural properties of ethanol induced cold – set whey protein emulsion gels: Effect of oil content[J]. *Food Chem*, 2019, 291: 22 – 29.
- [35] ZOU H, ZHAO N, SUN S, et al. High – intensity ultrasonication treatment improved physicochemical and functional properties of mussel sarcoplasmic proteins and enhanced the stability of oil – in – water emulsion[J/OL]. *Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects*, 2020, 589: 124463 [2022 – 11 – 04]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124463>.
- [36] GUZEY D, MCCLEMENTS D J. Impact of electrostatic interactions on formation and stability of emulsions containing oil droplets coated by β – lactoglobulin – pectin complexes[J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55(2): 475 – 485.
-
- (上接第 28 页)
- [22] SHARMA A, MAZUMDAR B, KESHAV A. Ultrasound assisted extraction of phytochemicals from *Coccinia indica* fruits and its characterization[J]. *J Food Meas Charact*, 2021, 15(1): 466 – 477.
- [23] ZDERIC A, ALMEIDA – RIVERA C, BONGERS P, et al. Product – driven process synthesis for the extraction of oil bodies from soybeans[J]. *J Food Eng*, 2016, 185: 26 – 34.
- [24] SUN F, WANG Q, GAO C, et al. Effect of extraction pH and post – extraction heat treatment on the composition and interfacial properties of peanut oil bodies[J/OL]. *Colloid Surface A*, 2023, 656 (PA): 130351 [2022 – 12 – 30]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130351>.
- [25] 高海鸽. 超声波处理对大豆油体乳状液及 MTG 酶促豆腐凝胶的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [26] 杨慧, 曲也直, 高雅然, 等. 植物多酚 – 蛋白质复合物生物活性及应用研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(3): 258 – 266.
- [27] PERDIH T S, ZUPANC M, DULAR M. Revision of the mechanisms behind oil – water (O/W) emulsion preparation by ultrasound and cavitation [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 51: 298 – 304.
- [28] 仪淑敏, 李欢, 陈思, 等. 鱼骨粉对金线鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(9): 1 – 7.
- [29] 朱士臣, 冯媛, 刘书来, 等. 鱼糜凝胶热稳定性的增强技术研究进展[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(7): 384 – 396.
- [30] HAO L, SUN J, PEI M, et al. Impact of non – covalent bound polyphenols on conformational, functional properties and *in vitro* digestibility of pea protein [J/OL]. *Food Chem*, 2022, 383: 132623 [2022 – 12 – 30]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132623>.
- [31] ASNAASHARI M, FARHOOSH R, SHARIF A. Antioxidant activity of gallic acid and methyl gallate in triacylglycerols of Kilka fish oil and its oil – in – water emulsion[J]. *Food Chem*, 2014, 159: 439 – 444.