

小麦蛋白酶解产物/槲皮素/甜菜果胶 复合乳液的构建及表征

卢薇¹, 黄晓梅², 韦翠兰², 欧阳颖², 郭健², 王金梅², 杨晓泉²

(1. 湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北武汉 430000)

(2. 华南理工大学小麦和玉米深加工国家工程实验室, 广东广州 510640)

摘要: 槲皮素(Quercetin, Que)作为一种高生物活性的黄酮类物质, 疏水性极强, 限制其在食品工业中的应用。本研究利用小麦蛋白酶解物(wheat protein hydrolysate, WPH)、Que构建复合纳米颗粒, 以甜菜果胶(sugar beet pectin, SBP)作天然复合乳化剂, 成功构建了WPH/Que/SBP复合乳液并对其性质表征, 主要结论如下: WPH对Que具有良好的增溶效果, Que溶解度从8.13 μg/mL提升至126.39 μg/mL。在乳化包埋的过程中, SBP优异的乳化性能可能有利于其在竞争关系中处于优势地位并弥补WPH乳化性能的劣化, 故界面WPH和界面Que含量下降。随着SBP的添加, 复合乳液粒径显著下降, 中性和酸性复合乳液的表面积平均粒径分别从2.35 μm和1.03 μm下降至0.56 μm和0.76 μm。复合乳液表现出良好的短期储藏稳定性和热稳定性, 等电点附近可能有利于SBP与WPH的结合, 故酸性复合乳液整体表现优于中性乳液。

关键词: 小麦蛋白酶解物; 槲皮素; 甜菜果胶; 复合乳液; 稳定性

文章编号: 1673-9078(2019)11-193-198

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.11.027

Construction and Characterization of Wheat Protein Hydrolysate / Quercetin / Sugar Beet Pectin Composite Emulsion

LU Wei¹, HUANG Xiao-mei², WEI Cui-lan², OUYANG Ying², GUO Jian², WANG Jin-mei², YANG xiao-quan²

(1.Hubei University of Technology, School of Food and Biological Engineering, Wuhan 430000, China)

(2.National Engineering Laboratory of Wheat & Corn Further Processing, College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Quercetin (Que), a highly bioactive component of flavonoids, has extremely high hydrophobicity (which limits its use in the food industry). In this research, wheat protein hydrolysate (WPH) and Que were used to construct composite nanoparticles, and sugar beet pectin (SBP) was added as a natural emulsifier to construct WPH/Que/SBP composite emulsion. The main findings included: WPH could increase the solubility of Que from 8.13 μg/mL to 126.39 μg/mL. During emulsion-based encapsulation, the excellent emulsifying properties of SBP may be beneficial to its dominance in the competition while compensating for the deterioration of emulsifying performance of WPH, causing the decreases in the contents of WPH and Que at the interfaces. With the addition of SBP, the particle size of the composite emulsion decreased significantly, with the average particle size in the surface area of the neutral and the acidic emulsions decreasing from 2.35 μm and 1.03 μm, respectively, to 0.56 μm and 0.76 μm. The composite emulsion exhibited good short-term storage and thermal stability. A pH around the PI value may be beneficial for the complexation of SBP and WPH, thereby, the overall performance of the acidic composite emulsion was better than that of the neutral emulsion.

Key words: wheat protein hydrolysate; quercetin; sugar beet pectin; complex emulsion; stability

槲皮素(Quercetin, Que)是一种在自然界中广泛存在的黄酮类物质, 因其抗癌、护肝、抗糖尿病等优良

投稿日期: 2018-12-26

基金项目: 广州市天河区科技计划项目(201704YH068)

作者简介: 卢薇(1989-), 女, 实验师, 研究方向: 蛋白质加工与利用

通讯作者: 王金梅(1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 蛋白质加工与利用

的生理活性引起人们的广泛关注^[1]。然而, 槲皮素的强疏水性结构严重制约了其在食品、药品领域中的应用^[2,3]。研究表明, 蛋白质的活性疏水基团可与疏水多酚发生非共价结合, 形成纳米颗粒, 提高其水溶性和生物利用度^[4,5]。小麦蛋白因其高疏水性、天然两性亲和自组装特性, 结合反溶剂沉淀法^[6]被广泛应用于白藜芦醇^[7]、槲皮素^[8]、姜黄素^[9]等疏水物质的纳米颗粒

制备。但小麦蛋白结构紧实,溶解度低,界面活性明显弱于具有灵活空间迁移性的小分子乳化剂(如 Tween 20),其所稳定的乳液粒径较大,不利于其在纳米乳液体系中的应用^[10]。

具有自组装能力的两亲性多肽易在界面上自组装形成有序的纳米结构,可能是理想的天然乳化剂^[11]。两亲性多肽已较多应用于疏水活性物质的包埋以提高其溶解度和生物利用度。以酶解作为低成本的蛋白质结构修饰手段,可获得结构展开、疏水基团暴露的蛋白酶解产物,有利于其自组装性和界面活性的提高^[12,13]。Wang^[14]利用碱性蛋白酶酶解玉米醇溶蛋白,所得酶解产物可与姜黄素形成具有良好单分散性的球形胶体颗粒。

然而,酶解可能导致产物界面膜粘弹性的缺失,稳定乳液能力的下降。Adjonu 等^[15]提出,蛋白酶解产物与其他乳化剂复合可能有效弥补界面稳定能力的损失,获得较小的乳液粒度及较强的稳定性。Xiong 研究团队利用马铃薯蛋白酶解产物稳定乳液,发现与 Tween20 稳定乳液相比,仍具有较大的乳液粒径^[16],但将水解产物与 Tween20 制备复合乳液,多肽复合界面拥有更均一的界面结构^[17]。小分子合成表面活性剂的大量添加虽可提高纳米乳液的稳定性,但不可避免地给食品安全带来隐患。本文拟采用小麦蛋白酶解产物和槲皮素为原料构建复合纳米颗粒,以甜菜果胶做外源天然乳化剂,构建小麦蛋白酶解产物/槲皮素/甜菜果胶复合乳液并进行表征,评估其界面活性、储藏稳定性和热稳定性,以期在两亲性多肽基纳米乳液的构建提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小麦谷朊粉,购于美国 Bob's Red Mill 公司;胰蛋白酶(Trypsin),购于 Sigma 公司;分析测定所用各种化学试剂均为分析纯。甜菜果胶(SBP):分子量 150000 u,中性糖含量 15%,半乳糖醛酸>65%。精制玉米油:市售。

1.2 仪器与设备

DELTA 冷冻干燥机,德国 Christ 公司;Version2.3 light 自动滴定仪,瑞士万通中国有限公司;Nano-ZS 纳米粒度分析仪和 Mastersizer 3000+EV 微米粒度仪,英国 Malvern 公司;M-110EH-30 高压微射流纳米均质机,美国 MFIC 公司。

1.3 方法

1.3.1 小麦蛋白酶解物(WPH)的制备

将小麦谷朊粉(5%, W/V)分散于水中,搅拌 30 min,预热到 37 °C,用 2 mol/L NaOH 标准溶液调节 pH 到 8.0,加入 Trypsin,酶:底物=1:100(W/V),于 37 °C 水浴中加热,用自动滴定仪滴定,保持溶液 pH 在 8.0,酶解 3 h 后于 95 °C 灭酶 10 min 后离心(10000 r/min, 15 min),上清液经冷冻干燥后即 WPH。

1.3.2 小麦蛋白酶解物/槲皮素(WPH/Que)复合纳米颗粒的制备

以无水乙醇为溶剂配制 4 mg/mL 的 Que 溶液,Que 溶液经过反溶剂分别加入到 pH 4.5 和 pH 7.0 的 5 mg/mL WPH 水溶液中,使 Que 的终浓度为 133 µg/mL,轻轻摇动即形成 WPH/Que 复合物体系,10000 r/min 离心 15 min 去除少量沉淀,上清液即为复合纳米颗粒。

1.3.3 复合纳米颗粒的粒度测定

粒度测试于 25 °C 下进行,采用背散射技术(光散射角度 173°)降低大颗粒的影响。利用光散射强度随时间的变化计算颗粒平均粒径(Z-average)、多分散指数(PDI)及体积分布。

1.3.4 复合纳米颗粒中槲皮素的增溶效果

用无水乙醇配制成不同的浓度 Que (0、2、4、6、8、10 µg/mL),以无水乙醇调零,用紫外分光光度计于 374 nm 下测试吸光值,绘制线性回归方程($Y=0.047X-0.0026$, $R^2=0.9995$)。将复合纳米颗粒溶液样品适当稀释后于同样条件下进行比色,并由线性回归方程计算出溶解度。荷载率为 Que 溶解度同初始浓度(133 µg/mL)下溶解度的比值。

1.3.5 小麦蛋白酶解物/槲皮素/甜菜果胶(WPH/Que/SBP)复合乳液的制备

取 1.3.2 中制备的 WPH/Que 复合物纳米颗粒溶液(WPH 为 5 mg/mL, Que 为 133 µg/mL),向其中添加 5% (m/V)的精炼玉米油和 2.5 mg/mL 的 SBP,将混合液用高速剪切机进行预均质后(50000 r/min, 2 min),转移入高压微射流均质机,在 500 bar 下进行高压均质,均质 2 次后向乳液中加入 0.02% 的 NaN₃ 抑菌。

1.3.6 复合乳液粒径分布测定

采用 Mastersizer 3000 激光粒度仪测定 1.3.5 制备的新鲜复合乳液液滴直径,参数设置如下:颗粒折射率为 1.520,颗粒吸收率为 0.001,折射率为 1.33,分散剂为水,分析模式为通用模式,进样器为 Hydro 2000 MU。乳液平均粒径采用表面积平均粒径表示, $d_{3,2}=\frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}$ 。

1.3.7 复合乳液的界面蛋白含量与槲皮素含量测定

乳液界面蛋白含量的测试方法参考 Wan^[18]: 取 1 mL 新鲜复合乳液置于离心管中, 真空高速离心机在 20000 r/min 下离心 40 min, 取下层水相过 0.22 μm 的滤膜后采用 Lowry 法测定蛋白含量, 以牛血清蛋白作为标准蛋白绘制标准曲线。界面蛋白含量如下:

$$\Gamma = 1000 \times (C_{\text{total}} - C_0) / A$$

其中: Γ 为界面蛋白含量(mg/m^2); C_{total} 为乳液中总蛋白浓度(g/g); C_0 为水相的蛋白浓度(g/g); A 为液滴比表面积(m^2/g), 由 Mastersizer 3000 激光粒度分布仪测得。

乳液界面 Que 含量测试方法同上述界面蛋白相似, 取离心后过膜的水相, 以无水乙醇调零, 用紫外分光光度计于波长 374 nm 下比色, 具体操作同 1.3.4。

1.3.8 复合乳液的储藏稳定性

取 10 mL 1.3.5 中制备的复合乳液, 缓慢注入比色管中 (高: 140 mm, 内径: 15 mm), 用玻璃盖密封, 室温条件下储藏, 定时取样, 观察乳液在储藏期间的乳析情况。

1.3.9 复合乳液的热稳定性

将 1.3.5 中制备的复合乳液分别注入密封的玻璃瓶中, 用恒温水浴锅分别以 90 $^{\circ}\text{C}$ 的恒定温度加热 30 min 后迅速冷却至室温, 用激光粒度仪测量乳液粒径变化。

1.3.10 数据分析

实验数据为三次测定平均值, 采用 SPSS 16.0 方差分析(ANOVA, Duncan)比较样品平均值间的显著差异($p < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 复合纳米颗粒的槲皮素增溶效果及粒度分布

在 Trypsin 的作用下, 小麦蛋白发生限制性水解, 水解 3 h 后水解度为 4.21% (数据未列出), 这可能是由于小麦蛋白中的麦谷蛋白和麦醇溶蛋白的强疏水性所致。Joye 和 McClements 研究发现^[19], 过度酶解可能导致 WPH 表面活性的损失, 而 Trypsin 所引发的限制性酶解有利于获得乳化性良好的两亲性多肽。

图 1 表征了复合纳米颗粒对 Que 的增溶效果及粒度分布。由图可知, 未添加 WPH 的槲皮素溶液较为浑浊, 出现大量的絮状物, 粒径分布较宽, 平均粒径高达 1800 nm, 这说明游离的 Que 颗粒在水溶液中极不稳定。此时 Que 溶解度虽仅为 8.13 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 但仍高于 Que 在水中的溶解度($< 1 \mu\text{g}/\text{mL}$)^[20], 说明反溶剂过程有利于 Que 溶解度的提高, 这与 Wang 等^[18]的研究

结果一致。当 WPH 浓度为 5 mg/mL 时, 溶液澄清透明, 平均粒径仅为 75.71 nm, 粒度分布均匀, 只在 10~100 nm 范围内有一单峰, 具有良好的单分散性。此时 Que 含量为 126.39 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 溶解度显著($p < 0.05$)提高近 16 倍, Que 荷载率高达 95%。这可能与 WPH 具有一定的两亲性有关。Que 与 WPH 中的两亲性多肽可能发生非共价结合, 自组装形成复合纳米颗粒, 故表现出良好的 Que 增溶性和胶体稳定性。

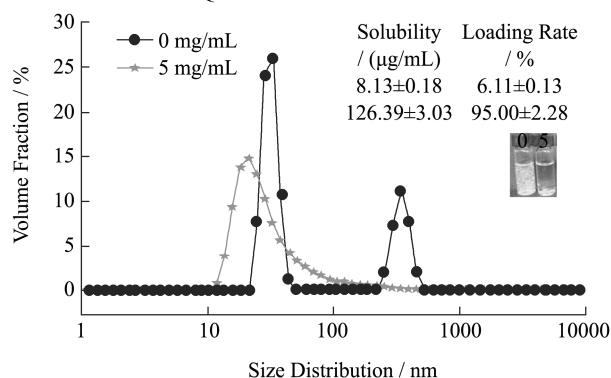


图 1 复合纳米颗粒的槲皮素增溶效果及粒度分布

Fig.1 Watersolubility of Que and particle size distribution of WPH/Que nanoparticles

2.2 复合乳液的粒度分布

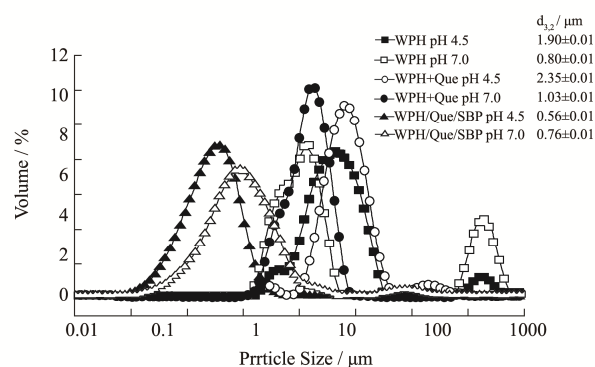


图 2 复合乳液的粒度分布

Fig.2 Particle size distribution of the complex emulsion

粒径-体积分布图是反应不同粒径范围内颗粒的个数 (或质量或表面积) 所占总颗粒数比例的指标, 表面积平均粒径($d_{3,2}$)是将每一个粒径区间百分数除以它对应的粒径区间的平均值后累加所得。图 2 为 WPH、WPH/Que、WPH/Que/SBP 复合乳液的粒径分布图。由图可知, 整体而言, 与 pH 4.5 时相比, pH 7.0 时的 WPH 和 WPH/Que 的表面积平均粒径较小, 说明中性环境下 WPH 和复合纳米颗粒的乳化性和稳定性优于酸性环境。添加 Que 后, WPH 乳液的表面积平均粒径略有提高, 这可能是由 WPH 和 Que 共组装而成的具有疏水空穴的复合胶束结构^[21], WPH 结构内卷, 乳化活性变弱。添加 SBP 后, 复合乳液的平均粒

经明显减小且粒度分布更为均匀,说明 SBP 对于该复合乳液的稳定有显著效果。此时, SBP 可能与蛋白形成混合乳液, SBP 的加入增加了体系的静电斥力,且其空间位阻作用可防止乳滴絮凝,从而增强了体系的稳定性,这与侯俊杰^[22]的研究结果一致。但 pH 7.0 时,复合乳液在 10 μm 附近仍出现粒度分布,而 pH 4.5 时,复合物乳液的粒径基本分布在 1 μm 以下,说明酸性条件下,复合乳液具有良好的稳定性。这可能是因为等电点附近有利于 SBP 与 WPH 发生结合并改变 WPH 表面的电荷属性,有效稳定 WPH。

2.3 复合乳液的界面蛋白及槲皮素含量

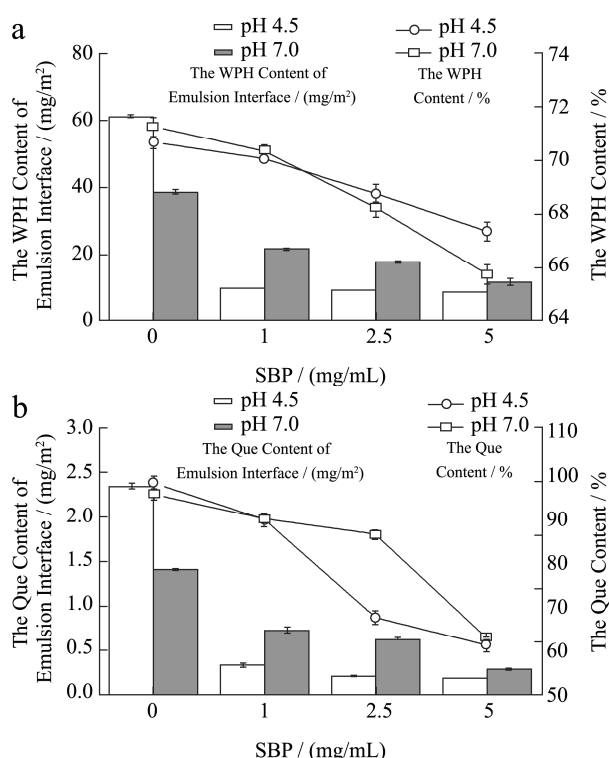


图3 (a) 复合乳液界面蛋白百分比和界面蛋白含量; (b) 复合乳液界面槲皮素百分比和界面槲皮素含量

Fig.3 (a) The protein content of emulsion interface; (b) The Que content of emulsion interface

图3为新鲜复合物乳液界面蛋白含量和界面槲皮素含量图。由图可知,当 pH 为 4.5 时, WPH/Que 复合纳米颗粒的界面蛋白含量和百分比分别为 61.20 mg/m^2 和 70.65%, 1 mg/mL SBP 的 WPH/Que/SBP 乳液则分别为 9.83 mg/m^2 和 70.05%。添加 SBP 后,界面蛋白百分比虽无明显差异,但由于 SBP 优异的界面活性,复合乳液液滴比表面积激增,故界面蛋白含量显著下降。SBP 的乳化性可能强于 WPH,在乳化包埋的过程中, SBP 占据竞争关系里的优势地位,故随着其含量的增加,乳液的界面蛋白百分比和界面蛋白含量逐渐下降。基于上述机理, pH 7.0 时,界面槲皮

素含量和百分比也出现与界面蛋白相近的变化趋势。中性环境下,复合纳米颗粒的界面蛋白和槲皮素百分比与酸性环境下无显著差异,由于此时复合纳米颗粒的粒径较小(结果见图1),液滴比表面积较大,故界面蛋白和槲皮素含量均约为酸性条件下的 60%。添加 SBP 后,中性条件下复合乳液粒径大于酸性条件(见图5),液滴比表面积小于酸性条件,故界面槲皮素和蛋白含量均高于酸性条件。

2.4 复合乳液的储藏稳定性

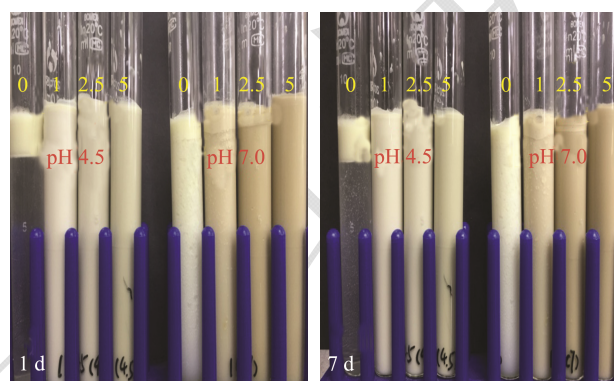


图4 复合乳液乳析稳定性

Fig.4 Emulsion stability of the complex emulsion

图4表征了复合乳液的储藏稳定性,其中左、右图分别为新鲜乳液放置 1 d、7 d 后的乳析图片。由图可知,未添加 SBP 的乳液在储藏首日便出现了较严重的乳析,且 pH 4.5 时的乳析较 pH 7.0 的更为严重,这可能是因为 pH 4.5 接近蛋白的等电点,部分酶解产物发生聚集,产生沉淀,造成乳化能力和乳化稳定性的下降。添加 SBP 后,复合乳液在 pH 4.5 下储藏 7 d,基本未乳析,且各浓度的 SBP 均能有效稳定酸性乳液并提高其短期储藏性。当 pH 为 7.0 时,添加中、低浓度 SBP 的乳液 1 d 后便出现少许乳析,当 SBP 添加量达 5 mg/mL 时,乳液保持稳定,说明高浓度 SBP 才可有效稳定中性乳液。Wang^[23]采用具有两亲性的单宁酸对玉米醇溶蛋白水解产物的乳化性进行修饰,乳液经过 4 周放置无乳析发生,说明某些外源天然乳化剂可显著改善蛋白水解产物的乳化活性和乳化稳定性,与本文的结果一致。

2.5 复合乳液的热稳定性

热处理是常用的食品加工手段,因此乳液的热稳定性是评估该乳液物理稳定性的重要指标。图5是加热前后复合乳液的粒径分布图。由图可知,经过热处理后的复合物乳液的粒度分布未发生明显变化,说明加热不会导致乳液的聚集或凝结。随着 SBP 浓度的增加,复合乳液粒度逐渐降低,且酸性条件下的复合乳

液粒径小于中性条件,说明 SBP 浓度的提升和酸性条件均能有效加强复合乳液的稳定性,这与图 2 结果一致。中、低浓度 SBP 复合乳液加热前后乳液粒径仅出现轻微波动,而中性条件下的高浓度 SBP 复合乳液加热后粒径虽较加热前上升 2.25 倍,但其粒径数值较小,接近中等浓度 SBP 复合乳液,整体而言,复合物乳液体系具有较强的热稳定性。

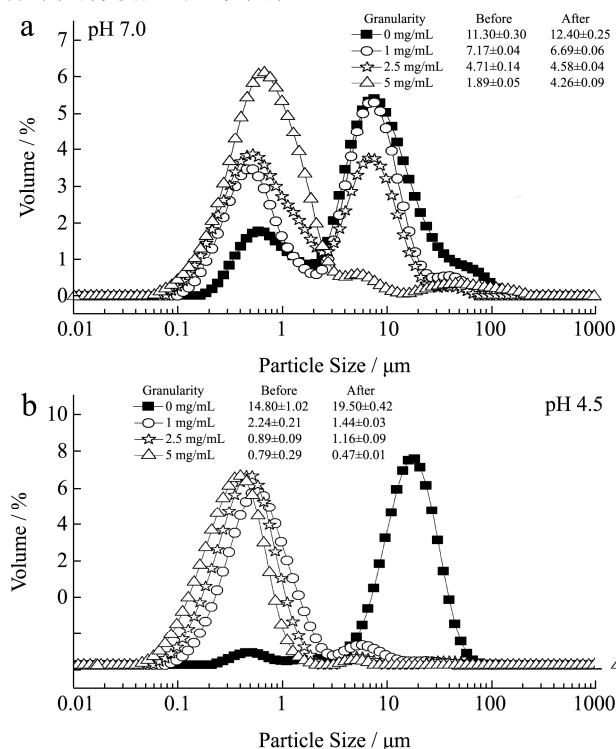


图 5 (a) pH 7.0 时复合乳液经热处理后的粒度分布图; (b) pH 4.5 时复合乳液经热处理后的粒度分布图

Fig.5. (a) Particle size distribution of the complex emulsion at pH 7.0 after heat treatment; (b) Particle size distribution of the complex emulsion at pH 4.5 after heat treatment

3 结论

本文利用小麦蛋白酶解产物和槲皮素构建复合纳米颗粒, Que 的溶解度提高约 16 倍, 荷载率高达 95.00%, 并表现出良好的胶体稳定性。采用甜菜果胶作外源天然复合乳化剂, 与纳米颗粒构建三元复合乳液, 随着 SBP 添加量的提升, 乳液粒径显著降低, 基本分布在 1 μm 以下, 乳液的界面蛋白和界面槲皮素含量也随之减少, 乳液表现出良好的稳定性。乳液在酸性条件下, 较中性条件表现出更优越的储藏稳定性和热稳定性。SBP 可能在乳化包埋的竞争关系中处于优势地位, 并能弥补由胰蛋白酶限制性水解引发的小麦蛋白粘弹界面缺失所致的乳化性能劣变, 显著提升 WPH/Que 复合纳米颗粒的乳化性和乳化稳定性, 为拓展疏水活性物质在食品体系中的应用和制备高生物活

性、高稳定性的肽基纳米乳液提供新思路。

参考文献

- [1] Seyed Fazel Nabavi, Gian Luigi Russo, Maria Daglia, et al. Role of quercetin as an alternative for obesity treatment: You are what you eat! [J]. Food Chemistry, 2015, 179: 305-310
- [2] Tayade Pralhad, Kale Rajendrakumar. Study of freeze-dried quercetin-cyclodextrin binary systems by DSC, FT-IR, X-ray diffraction and SEM analysis [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2004, 34(2): 333-339
- [3] Israeli-Lev G, Livney Y D. Self-assembly of hydrophobin and its co-assembly with hydrophobic nutraceuticals in aqueous solutions: Towards application as delivery systems [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 28-35
- [4] Patatel A, Hu Y, Tiwari J K, et al. Synthesis and characterisation of zein-curcumin colloidal particles [J]. Soft Matter, 2010, 6(24): 6192-6199
- [5] Balandrán-Quintana R R, Valdéz-Covarrubias M A, Mendoza-Wilson A M, et al. α-lactalbumin hydrolysate spontaneously produces disk-shaped nanoparticles [J]. International Dairy Journal, 2013, 32(2): 133-135
- [6] Iris J Joye, Veronique A Nelis, D Julian McClements. Gliadin-based nanoparticles: Fabrication and stability of food-grade colloidal delivery systems [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44: 86-93
- [7] Iris J Joye, Gabriel Davidov-Pardo, Richard D. Ludescher, et al. Fluorescence quenching study of resveratrol binding to zein and gliadin: Towards a more rational approach to resveratrol encapsulation using water-insoluble protein [J]. Food Chemistry, 2015, 185: 261-267
- [8] Patel A R, Heussen P C, Hazekamp J, et al. Quercetin loaded biopolymeric colloidal particles prepared by simultaneous precipitation of quercetin with hydrophobic protein in aqueous medium [J]. Food Chemistry, 2012, 133(2): 423-429
- [9] Sonekar, Shipra, Mishra, et al. Formulation and evaluation of folic acid conjugated gliadin nanoparticles of curcumin for targeting colon cancer cells [J]. Journal of Pharmaceutical Science, 2016, 6(10): 68-74
- [10] XU Hel-an, YANG Yi-qi. Nanoparticles derived from plant proteins for controlled release and targeted delivery of therapeutics [J]. Future Medicine, 2015, 10(13): 2001-2004
- [11] Zhao X B, Pan F, Xu H, et al. Molecular self-assembly and applications of designer peptide amphiphiles [J]. Chem. Soc. Rev, 2010, 39 (9): 3480-3498

- [12] Dimitrijevic-Dwyer M, He L, James M, et al The effects of acid hydrolysis on protein biosurfactant molecular, interfacial, and foam properties: pH responsive protein hydrolysates [J]. *Soft Matter*, 2012, 8, 5131
- [13] Arboleda J C, Rojas O J, Lucia L A Acid-generated soy protein hydrolysates and their interfacial behavior on model surfaces [J]. *Biomacromolecules*, 2014, 15, 4336-4342
- [14] Wang YH, Wang JM, Yang X Q, et al Amphiphilic zein hydrolysate as a novel nano-delivery vehicle for curcumin [J]. *Food & Function*, 2015, 6(8): 2636-2645
- [15] Adjonu R, Doran G, Torley P, et al Formation of whey protein isolate hydrolysate stabilised nanoemulsion [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 41: 169-177
- [16] Cheng Y, Xiong Y L, Chen J Antioxidant and emulsifying properties of potato protein hydrolysate in soybean oil-in-water emulsions [J]. *Food Chemistry*, 2010, 120: 101-108
- [17] Cheng Y, Chen J, Xiong Y L. Interfacial adsorption of peptides in oil-in-water emulsions costabilized by Tween 20 and antioxidative potato peptide [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2014, 62, 11575-11581
- [18] WANG JM, XIA N, Yang X Q, et al Adsorption and dilatational rheology of heat-treated soy protein at the Oil-Water Interface: Relationship to structural properties [J]. *Agric Food Chem*, 2012, 60, 3302-3310
- [19] Iris J Joye, David J McClements Emulsifying and emulsion-stabilizing properties of gluten hydrolysates [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2014, 62 (12): 2623-2630
- [20] Anand P, Kunnumakkara A B, Aggarwal BB curcumin as "Curecumin": from kitchen to clinic [J]. *Biochemical Pharmacology*, 2008, 75(4): 787-809
- [21] 韦翠兰, 欧阳颖, 王梦萍, 等小麦蛋白酶解物-槲皮素复合纳米颗粒的构建及表征[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(3): 95-100
WEI Cui-lan, OUYANG Ying, WANG Meng-ping, et al Fabrication and characterization of wheat protein hydrolysate-quercetin nanoparticles [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(3): 95-100
- [22] 侯俊杰大豆蛋白-甜菜果胶相互作用及其对食品微结构及感官性质影响的研究[D]. 广州华南理工大学, 2016
Hou J J. Soy protein and sugar beet pectin interaction and its application in manipulating the microstructure and sensory perception of food [D]. Guangzhou. South China University of Technology, 2016
- [23] Wang YH, Wan ZL, Yang XQ, et al Colloidal complexation of zein hydrolysate with tannic acid: Constructing peptides-based nanoemulsions for alga oil delivery [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 54: 40-48

(上接第 15 页)

- [25] Borgeraas H, Johnson L K, Skattebu J, et al. Effects of probiotics on body weight, body mass index, fat mass and fat percentage in subjects with overweight or obesity: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Obesity Reviews*, 2018, 19(2): 219-232
- [26] Li X, Xu Q, Jiang T, et al. A comparative study of the antidiabetic effects exerted by live and dead multi-strain probiotics in the type 2 diabetes model of mice [J]. *Food & Function*, 2016, 7(12): 4851-4860
- [27] Wang Z, Yan B, Zhang Y, et al. Effect of soymilk fermented with *Lactobacillus plantarum* P-8 on lipid metabolism and fecal microbiota in experimental hyperlipidemic rats [J]. *Food Biophysics*, 2013, 8(1): 43-49
- [28] Jose S L M, Candido R S, Javier R O F, et al. Effects of probiotics and synbiotics on obesity, insulin resistance syndrome, type 2 diabetes and non-alcoholic fatty liver disease: A review of human clinical trials [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2016, 17(6): 928
- [29] Zhang X L, Yan-Feng WU, Chun-Hong P, et al. Effects of probiotic-fermented soymilk on the hypolipidemic activity and on ameliorating liver injury in hyperlipidemic mice [J]. *Modern Food Science & Technology*, 2016, 32(5): 1-8
- [30] Zhang X L, Wu Y F, Wang Y S, et al. The protective effects of probiotic-fermented soymilk on high-fat diet-induced hyperlipidemia and liver injury [J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 30: 220-227
- [31] Wang W, Shi L P, Shi L, et al. Efficacy of probiotics on the treatment of non-alcoholic fatty liver disease [J]. *Chinese Journal of Internal Medicine*, 2018, 57(2): 101-106