

大米蛋白酶解物—黄原胶纳米载体的 制备及性质研究

Preparation and properties of rice protein hydrolysate- xanthan gum nanocarriers

阳钰祺¹ 颜培洲¹ 程云辉¹ 林亲录² 王静³ 焦叶¹

YANG Yuqi¹ YAN Peizhou¹ CHENG Yunhui¹ LIN Qinlu² WANG Jing³ JIAO Ye¹

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中南林业科技大学食品科学与
工程学院, 湖南 长沙 410004; 3. 北京工商大学食品与健康学院, 北京 100048)

(1. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology,
Changsha, Hunan 410114, China; 2. School of Food Science and Engineering, Central South
University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 3. School of Food
and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

摘要:目的:提高疏水性生物活性物质的水溶性和稳定性。方法:利用大米蛋白酶解物(RPH)和黄原胶(XG),以疏水性模型活性物质姜黄素(Cur)为输送对象,构建了RPH-XG-Cur纳米输送体系,测定并分析纳米粒子的包封效果、稳定性、抗氧化性以及形成机制。结果:RPH-XG-Cur纳米粒子的姜黄素包封率为78.40%,粒径74.78 nm,多分散指数0.36,Zeta电位-27.93 mV,添加黄原胶可显著提高纳米粒子的包封性能以及pH和离子强度稳定性;傅里叶红外光谱和荧光光谱分析表明氢键、静电相互作用和疏水相互作用均参与纳米粒子的形成。结论:RPH-XG纳米体系具有作为疏水性生物活性物质纳米输送载体的应用潜力。

关键词:大米蛋白; 酶解物; 黄原胶; 纳米输送载体

Abstract: **Objective:** To enhance the water solubility and stability of hydrophobic active substances. **Methods:** A nano-delivery system of rice protein hydrolysate (RPH)-xanthan gum (XG)-curcumin (Cur) was developed, wherein curcumin served as the delivery object, and the encapsulation efficiency, stability, antioxidant activity, and formation mechanism of the nanoparticles were determined and analyzed. **Results:** The encapsulation efficiency of RPH-XG-Cur nanoparticles reached 78.40%, with a particle size of 74.78 nm, PDI of 0.36, and Zeta

potential of -27.93 mV. Remarkably, the incorporation of xanthan gum significantly improved the encapsulation performance as well as pH and ionic strength stability of the nanoparticles. Fourier infrared and fluorescence spectra analysis revealed that hydrogen bonding, electrostatic interaction, and hydrophobic interaction played crucial roles in nanoparticle formation. **Conclusion:** RPH-XG nanoparticles exhibit great potential as nanocarriers for delivering hydrophobic bioactive substances.

Keywords: rice protein; hydrolysate; xanthan gum; nanocarrier

姜黄素(Cur)是一种从姜黄属植物根茎中提取的多酚类化合物,具有抗氧化、抗炎、抑菌、抗病毒等生物和药理活性^[1]。但是由于姜黄素水溶性差、化学稳定性差、口服生物利用度低,限制了其在食品工业和生物医学等相关领域的广泛应用^[2]。纳米递送体系是一种对生物活性物质进行包埋保护的有效手段,对解决上述问题具有独特优势,近年来备受关^[3]。姜黄素也常作为疏水性生物活性模式化合物,用于研究纳米载体对溶解性、稳定性和生物利用度的改善^[4]。

大米蛋白是优质的植物性蛋白质资源,具有低致敏性、氨基酸比例均衡、生物效价高等优点,适合应用到婴幼儿食品和特殊食品中^[5]。大米蛋白酶解后,其溶解性、乳化性都得到显著改善,具有作为疏水性活性物质的纳米递送载体的潜力。大米蛋白酶解物(RPH)已被报道能有效荷载叶黄素、大豆异黄酮等生物活性物质^[6-7]^{[8]65}。但是,单一蛋白基纳米载体在常见的食品加工条件下容易

基金项目:湖南省自然科学基金(编号:2022JJ30587)

作者简介:阳钰祺,女,长沙理工大学在读本科生。

通信作者:焦叶(1989—),女,长沙理工大学副教授,博士。

E-mail: jiaoye@csust.edu.cn

收稿日期:2024-02-25 **改回日期:**2024-05-02

发生聚集而导致稳定性较差,而多糖可以通过提供静电排斥和空间位阻抑制蛋白质的聚集沉淀使体系具有更低的环境敏感性^[9]。此外,蛋白质与多糖相互作用形成的复杂纳米载体基质可能有助于进一步提高对生物活性物质的保护效果和生物利用度。因此,研究选用黄原胶(XG),基于荷载姜黄素的大米蛋白酶解物纳米体系,探讨添加黄原胶对纳米体系性能的影响,为姜黄素等疏水性生物活性物质在食品和药品领域的开发及应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

大米蛋白粉:85.3%(湿基),实验室采用碱提酸沉法制备;

姜黄素、黄原胶:上海麦克林生化科技有限公司;

中性蛋白酶:酶活 ≥ 50 U/mg,上海瑞永生物科技有限公司;

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼:梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;

2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸:上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

其他化学试剂:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验设备

台式高速离心机: TG16-WS 型,湘仪离心机仪器有限公司;

低速台式多管离心机: TDL-36C 型,上海安亭科学仪器厂;

注射泵: TYD01-01-CE 型,保定雷弗流体科技有限公司;

紫外可见分光光度计: UV1800 型,日本岛津公司;

Zeta 电位及激光粒度分析仪: NanoBrook90plusPALS 型,美国布鲁克海文仪器公司;

傅立叶红外光谱仪: NICOLET 380 型,美国 Thermo 公司;

荧光分光光度计: F-7100 型,日本日立公司。

1.3 试验方法

1.3.1 大米蛋白酶解物的制备 称取 10 g 大米蛋白粉,将其分散于 100 mL 蒸馏水中,于室温下搅拌水化 3 h。用 1 mol/L 的 NaOH 溶液调节蛋白水溶液 pH 至 7.6,并于 50 °C 下水浴 15 min;随后加入 600 mg 的中性蛋白酶进行酶解,酶解过程中不断加入 1 mol/L 的 NaOH 溶液维持 pH 值,制备水解度为 2%,4%,6%,8%,10% 的 RPH;酶解结束后,将酶解液移入 95 °C 的水浴锅中加热 15 min 使酶钝化,再冷却至室温,调节溶液 pH 至中性;最后将酶解液在 4 500 r/min 下离心 15 min 收集上清液,

冻干备用。RPH 的水解度采用 pH-stat 法^[10]测定。

1.3.2 大米蛋白酶解物—姜黄素纳米粒子的制备 采用反溶剂法制备大米蛋白酶解物—姜黄素纳米粒子(RPH-Cur)。使用无水乙醇配制质量浓度为 1 mg/mL 的姜黄素溶液,置于 4 °C 冰箱中避光保存备用。取 10 mL RPH 溶液(1 mg/mL),以 1 mL/min 的流速加入 1 mL 的姜黄素溶液,调节 pH,室温下搅拌 1 h,于 35 °C 下旋蒸除去乙醇并定容,再于 10 000 r/min 的转速下离心 10 min 沉淀游离的姜黄素,上清液于 4 °C 冰箱中避光贮藏或冻干备用。设置 RPH 的水解度为 2%,4%,6%,8%,10%,制备 pH 为 3,4,5,6,7,按照上述方法制备纳米粒子,考察 RPH 的水解度和 pH 值对纳米粒子制备的影响。

1.3.3 大米蛋白酶解物—黄原胶—姜黄素纳米粒子的制备 取 5 mL 黄原胶溶液(1 mg/mL)与 10 mL RPH 溶液(1 mg/mL)混合并搅拌,以 1 mL/min 的流速加入 1 mL 姜黄素溶液,调节 pH,室温下搅拌 1 h,后续操作与 1.3.2 相同,制得大米蛋白酶解物—黄原胶—姜黄素纳米粒子(RPH-XG-Cur)。

1.3.4 纳米粒子包封率的测定 根据 Yuan 等^[11]的方法测定纳米粒子的包封率。取 1 mL 新制备的纳米粒子溶液,加入 4 mL 无水乙醇,混匀后用紫外分光光度计在 426 nm 处测定吸光度,并通过式(1)计算包封率。

$$E = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

E ——包封率,%;

m_1 ——纳米粒子中姜黄素的含量,mg;

m_2 ——姜黄素的总添加量,mg。

1.3.5 粒度、多分散指数(PDI)和 Zeta 电位的测定 将纳米粒子用去离子水稀释一定倍数后,涡旋混匀 10 s,使用激光粒度仪测量纳米粒子的粒径、PDI 和 Zeta 电位。

1.3.6 傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析 将样品与溴化钾充分研磨后压制成片,再将其放入傅里叶红外光谱仪中扫描分析。设置扫描波段范围 400~4 000 cm^{-1} ,分辨率 2 cm^{-1} ,扫描信号累积 32 次。

1.3.7 X-射线衍射(XRD)分析 使用 X-射线衍射仪分析样品的晶体结构。设置扫描范围为 5°~60°,步长为 0.02°,加速电压 40 kV,电流 40 mA。

1.3.8 荧光光谱分析 设置 RPH 和黄原胶的质量浓度分别为 1.0,0.5 mg/mL,向 RPH 或 RPH-XG 溶液中加入不同体积的姜黄素储备液,使其最终浓度分别为 0,5,10,20,40,60 $\mu\text{mol/L}$,在 290 nm 的激发波长下记录样品在 300~450 nm 的发射光谱。仪器参数为激发和发射狭缝宽度 5 nm、加速电压 520 V、扫描速度 240 nm/min。采用 Stern-Volmer 方程探究 RPH 的荧光猝灭过程。

$$\frac{F_0}{F} = 1 + K_{sv}[Q] = 1 + K_q\tau_0[Q], \quad (2)$$

式中:

F_0 ——未加入姜黄素时的荧光强度;

F ——加入姜黄素后的荧光强度;

$[Q]$ ——姜黄素的浓度, mol/L;

τ_0 ——没有姜黄素的情况下荧光寿命(生物分子的荧光寿命为 10^{-8} s);

K_{sv} ——猝灭常数, L/mol;

k_q ——猝灭速率常数, L/(mol·s)。

1.3.9 纳米粒子的稳定性分析

(1) pH 稳定性:用 HCl 或 NaOH 溶液将纳米粒子溶液 pH 值分别调节为 3, 4, 5, 6, 7, 根据 1.3.5 的方法测定粒径和 PDI, 未调节 pH 的测定样品作为对照。

(2) 离子强度稳定性:向纳米粒子溶液中加入 NaCl, 使样品中盐离子浓度分别达到 0, 50, 100, 200, 250 mmol/L, 室温下放置 1 h 后根据 1.3.5 的方法测定样品的粒径和 PDI。

1.3.10 抗氧化活性的测定 姜黄素、RPH-Cur 和 RPH-XG-Cur 纳米粒子的抗氧化活性通过 DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除能力进行评价, DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除能力的测定方法参照 Mo 等^[6]的方法。

1.3.11 数据分析 所有试验进行 3 次, 数据表示为平均值±标准偏差, 采用 SPSS 25.0 软件对试验数据进行显著性差异分析, 采用 Origin 2019 软件绘图。

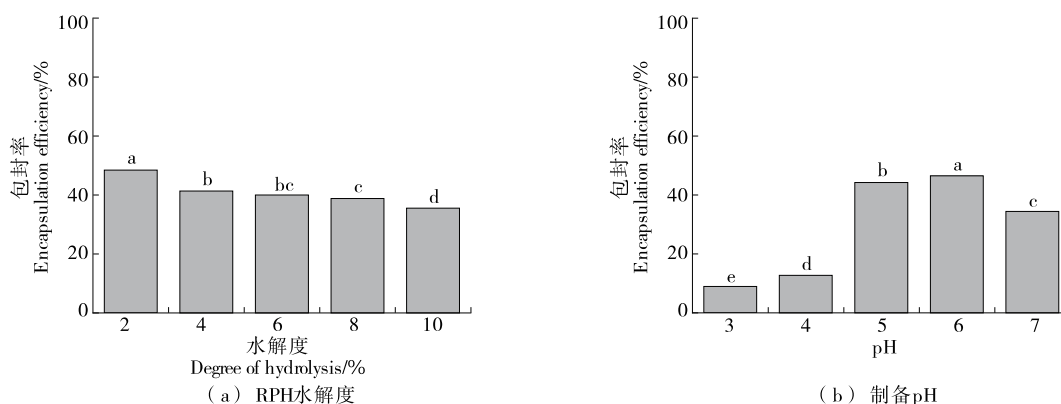
2 结果与分析

2.1 纳米粒子制备条件优化

以不同水解度的 RPH 作为纳米载体制备纳米粒子, 考察大米蛋白水解度对纳米粒子包封率的影响。如图 1(a)所示, 随着水解度的升高, 包封率呈下降的趋势; 当水解度为 2% 时, 体系中姜黄素的包封率最高。这可能是因为较高的水解度使得 RPH 的疏水微区变少, 不能充分结合姜黄素, 致使包封率降低^{[8]35}, 因此后续试验中选择水解度为 2% 的 RPH。

制备时体系不同 pH 对纳米粒子包封率的影响如图 1(b)所示。随着 pH 增加, 包封率呈先增加后减少的趋势, 在 pH 为 6 时达到最大值, 因此后续试验中选择 pH 6 为制备条件。分子之间的氢键是多肽自组装的重要驱动力, 但是氢键的形成易受 pH 的影响。改变溶液的 pH 会使肽链的一些化学基团出现正电化或负电化, 形成带正负电荷的多肽, 从而表现出不同的自组装趋势^[12]。

添加黄原胶对纳米粒子包封率、粒径、PDI 和 Zeta 电位的影响如表 1 所示。相同的制备条件下, 添加黄原胶的纳米粒子的包封率为 78.4%, 显著高于未添加的纳米粒子。这可能是因为黄原胶捕获了溶液中的游离姜黄素, 或者帮助纳米粒子将表面的姜黄素包封在纳米粒子内部^[13]。添加黄原胶的纳米粒子的 Zeta 电位绝对值也显著增加(−27.93 mV); 添加黄原胶对纳米粒子的粒径没有显著影响, 但是 PDI 有所升高。王艳红^[14]也发现在



字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图1 RPH的水解度和制备 pH 对纳米粒子包封率的影响

Figure 1 Effects of degree of hydrolysis of RPH and pH on the encapsulation efficiency of nanoparticles

表1 黄原胶对纳米粒子包封率、粒径、PDI 和 Zeta 电位的影响[†]

Table 1 Effects of xanthan gum on the encapsulation efficiency, particle size, PDI, and Zeta potential of nanoparticles

纳米粒子	包封率/%	粒径/nm	PDI	Zeta 电位/mV
RPH-Cur	46.46±0.60 ^b	77.09±4.43 ^a	0.10±0.01 ^b	−19.20±1.60 ^b
RPH-XG-Cur	78.40±0.66 ^a	74.78±1.43 ^b	0.36±0.00 ^a	−27.93±4.41 ^a

[†] 同列上标字母不同表示存在显著性差异($P < 0.05$)。

大豆分离蛋白—黄原胶—茶多酚纳米乳液中,黄原胶的添加能够提高 Zeta 电位的绝对值。

2.1 纳米粒子的形成机制分析

图 2 为 RPH-Cur 和 RPH-XG-Cur 纳米粒子在不同姜黄素浓度下的内源荧光光谱。在不添加姜黄素时, RPH-XG 的荧光强度显著低于 RPH, 可能是因为黄原胶与 RPH 通过静电相互作用而结合, 导致 RPH 的色氨酸残基被掩蔽。加入姜黄素后, 随着姜黄素浓度的增大, RPH-XG 和 RPH 的荧光猝灭强度均逐渐增加, 并且其最大发射波长出现轻微蓝移, 表明姜黄素与 RPH-XG 或 RPH 之间的相互作用影响了色氨酸残基的微

环境^[15]。

姜黄素对 RPH 和 RPH-XG 的荧光猝灭机制可由 Stern-Volmer 方程确定, 猝灭机制分为基于分子间碰撞的动态猝灭和基于形成非发光基态复合物的静态猝灭两种^[16]。通过计算得到 RPH-Cur 和 RPH-XG-Cur 的 K_{SV} 值分别为 2.72×10^4 , 4.94×10^4 L/mol, k_q 值分别为 0.91×10^{12} , 1.65×10^{12} L/(mol · s)。 K_{SV} 值越大表明蛋白质和姜黄素之间越容易发生相互作用^[17], 因此黄原胶的加入使姜黄素更易与 RPH 纳米载体基质发生结合。同时, k_q 值均大于最大扩散碰撞猝灭常数, 即 2.0×10^{10} L/(mol · s), 表明由姜黄素诱导的荧光猝灭属于静态猝灭。

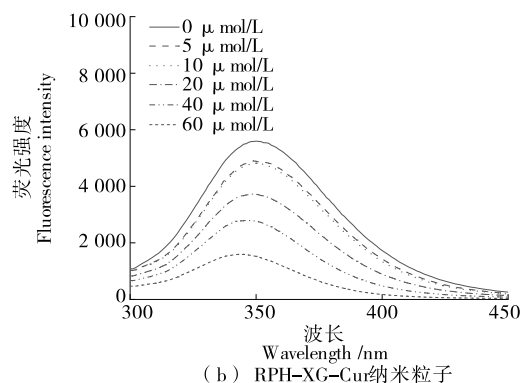
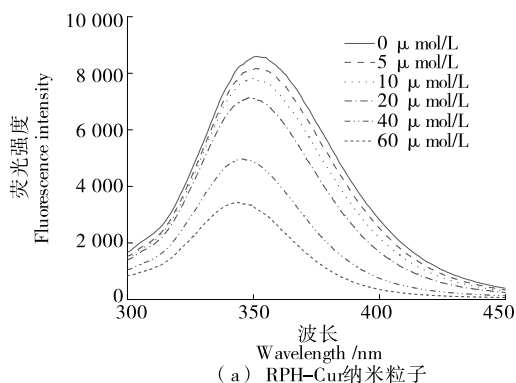


图 2 RPH-Cur 和 RPH-XG-Cur 纳米粒子在不同姜黄素浓度下的内源荧光光谱

Figure 2 Intrinsic fluorescence spectra of RPH-Cur and RPH-XG-Cur nanoparticles in the presence of various concentration of curcumin

图 3 为 RPH-Cur 和 RPH-XG-Cur 纳米粒子以及姜黄素、黄原胶和 RPH 的 FTIR 图谱。在 $3\ 000 \sim 3\ 500\text{ cm}^{-1}$ 的波段归因于羟基的 O—H 拉伸振动, 姜黄素、黄原胶、RPH 的特征峰分别位于 $3\ 402$, $3\ 426$, $3\ 430\text{ cm}^{-1}$, 而 RPH-Cur 和 RPH-XG-Cur 纳米粒子的光谱中羟基峰分别移至 $3\ 440$, $3\ 419\text{ cm}^{-1}$, 表明姜黄素、RPH 和黄原胶之间形成了氢键^[13]。RPH 在 $1\ 657\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰与酰胺 I 相关, RPH-Cur 和 RPH-XG-Cur 纳米粒子中与酰胺 I 相关的吸收峰分别移至 $1\ 645$, $1\ 635\text{ cm}^{-1}$, 表明静电相互作用参与了纳米粒子的形成过程^[18]。姜黄素指纹图谱区域 ($500 \sim 1\ 300\text{ cm}^{-1}$) 吸收峰的强度和数量在两种纳米粒子中均出现明显降低, 表明姜黄素、RPH、黄原胶之间可能存在疏水作用^[16]。RPH-XG-Cur 的形成机制可能是姜黄素通过氢键和疏水相互作用与 RPH 结合并被封装, 黄原胶则主要通过静电相互作用与 RPH 结合在一起^[19-20]。

图 4 为 RPH-Cur 和 RPH-XG-Cur 纳米粒子以及姜黄素的 XRD 图谱。姜黄素在 17.1° , 21.1° , 24.6° , 26.1° , 28.9° 等多处的特征峰表明其处于高度结晶状态^[21]。在 RPH-Cur 和 RPH-XG-Cur 中均未观察到明显的姜黄素特征峰, 表明姜黄素以无定形态被封装于 RPH 或

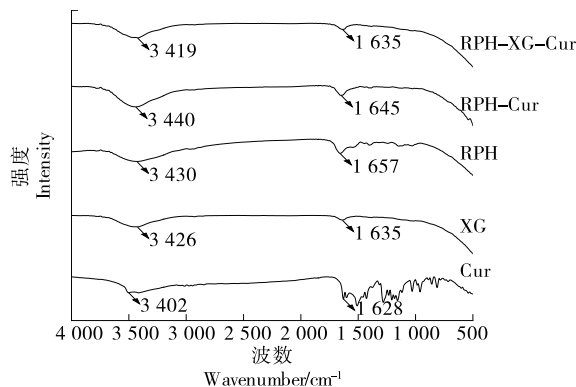


图 3 姜黄素、黄原胶、RPH、RPH-Cur 和 RPH-XG-Cur 纳米粒子的 FTIR 图谱

Figure 3 FTIR spectrum of curcumin, xanthan gum, RPH, RPH-Cur and RPH-XG-Cur nanoparticles

RPH-XG 载体中^[22]。研究^[23]表明, 处于无定形态的生物活性物质, 其口服生物利用度相比于其结晶状态更高。

2.3 RPH-XG-Cur 纳米粒子的稳定性

pH 对 RPH-Cur 和 RPH-XG-Cur 纳米粒子的粒径和 PDI 的影响如图 5(a) 所示。在 pH 值为 3 时, RPH-Cur 纳米粒子的粒径和 PDI 显著增大。这可能是因为极端

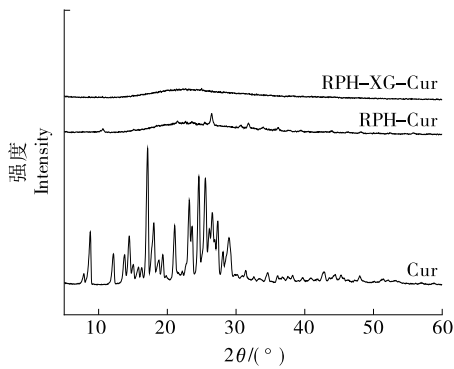


图4 姜黄素、RPH-Cur和RPH-XG-Cur纳米粒子的XRD图谱

Figure 4 XRD patterns of curcumin and nanoparticles

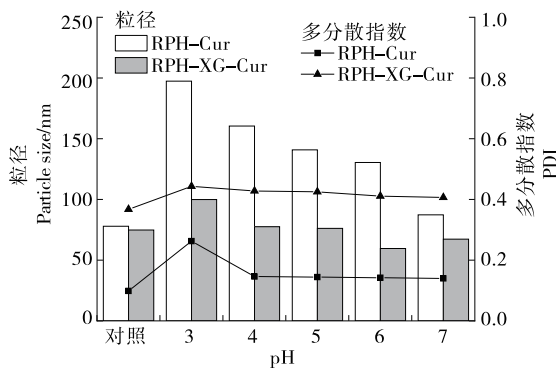
酸性环境下,纳米粒子的表面电荷减少,导致纳米粒子之间的静电斥力减弱,由此导致粒子发生聚集现象^[21]。虽然在pH值为3时,RPH-XG-Cur纳米粒子的粒径和PDI也有所增大,但是在pH 3~7的条件下,RPH-XG-Cur纳米粒子的粒径仍保持在60.0~99.9 nm,PDI的变化幅度

也较小,表明添加黄原胶增加了纳米粒子的稳定性。

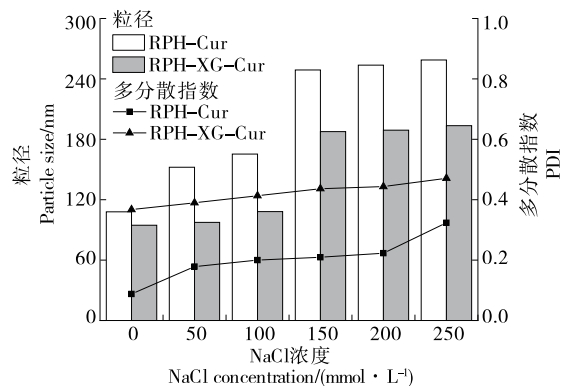
纳米粒子在不同离子强度下的稳定性如图5(b)所示,随着NaCl浓度的增加,RPH-Cur纳米粒子的粒径和PDI均快速增大。这是因为NaCl的加入导致静电屏蔽效应产生,使得RPH-Cur纳米粒子发生了聚集^[18]。而RPH-XG-Cur纳米粒子的粒径和PDI的变化幅度均比RPH-Cur纳米粒子的小,并且在NaCl浓度为0~100 mmol/L时,RPH-XG-Cur纳米粒子的粒径无显著变化,表明添加黄原胶可有效提高纳米粒子的盐离子稳定性。Zhang等^[24]的研究也表明,黄原胶可以在较宽的pH范围内和较高的盐离子浓度下稳定负载姜黄素的玉米醇溶蛋白纳米颗粒。

2.4 RPH-XG-Cur纳米粒子的抗氧化活性

姜黄素具备较强的抗氧化活性,能够清除自由基,测定姜黄素及其在纳米粒子中的自由基清除活性,结果如图6所示。与游离姜黄素相比,RPH-Cur纳米粒子能提高DPPH自由基和ABTS自由基清除能力;添加黄原胶后,RPH-XG-Cur纳米粒子的DPPH自由基清除能力



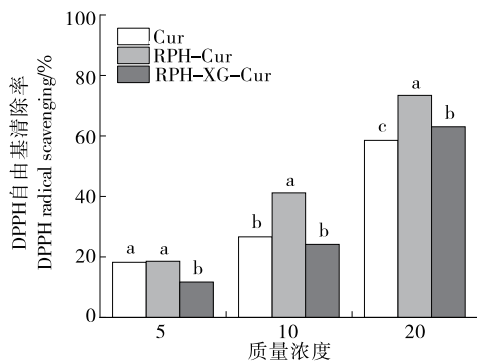
(a) pH稳定性



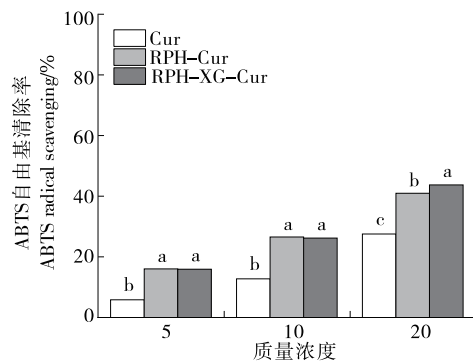
(b) 离子强度稳定性

图5 pH和NaCl浓度对RPH-Cur和RPH-XG-Cur纳米粒子稳定性的影响

Figure 5 Effects of pH and NaCl concentration on RPH-Cur and RPH-XG-Cur nanoparticles



(a) DPPH自由基清除能力



(b) ABTS自由基清除能力

字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图6 姜黄素、RPH-Cur和RPH-XG-Cur纳米粒子的DPPH自由基和ABTS自由基清除能力

Figure 6 DPPH and ABTS radical scavenging ability of curcumin, RPH-Cur and RPH-XG-Cur nanoparticles

较 RPH-Cur 纳米粒子有所下降,但仍与游离姜黄素的相近;RPH-XG-Cur 纳米粒子的 ABTS 自由基清除能力与 RPH-Cur 纳米粒子的相近,并显著高于游离姜黄素的。RPH 和黄原胶使包封在纳米粒子中的姜黄素具有更高的水溶性、更高的分散性以及更大的表面积,使其与自由基之间的接触概率增大,从而使其向自由基提供氢原子的能力得以增强^[2]。

3 结论

研究构建了大米蛋白酶解物—黄原胶—姜黄素纳米输送体系,大米蛋白酶解物作为姜黄素的纳米载体能够有效提高疏水性活性物质的水溶性和抗氧化活性,添加黄原胶能够进一步提高大米蛋白酶解物—姜黄素纳米粒子的包封能力和环境稳定性,氢键、静电相互作用和疏水相互作用均参与纳米粒子的形成。纳米粒子的生物利用度以及其在体内的代谢吸收过程有待后续进一步研究探索。

参考文献

- [1] 郭玉,任迪峰,郭子烟,等.姜黄素增溶技术研究进展[J/OL].食品与发酵工业.(2023-09-28)[2024-02-01].<https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036980>.
GUO Y, REN D F, GUO Z Y, et al. Research progress on technology to improve solubility of curcumin[J/OL]. Food and Fermentation Industries. (2023-09-28) [2024-02-01]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036980>.
- [2] CAI T M, XIAO P, YU N X, et al. A novel pectin from *Akebia trifoliata* var. *australis* fruit peel and its use as a wall-material to coat curcumin-loaded zein nanoparticle [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 152: 40-49.
- [3] GORANTLA S, WADHWA G, JAIN S, et al. Recent advances in nanocarriers for nutrient delivery [J]. Drug Delivery and Translational Research, 2022, 12(10): 2 359-2 384.
- [4] LIU Y J, CAI Y X, YING D Y, et al. Ovalbumin as a carrier to significantly enhance the aqueous solubility and photostability of curcumin: Interaction and binding mechanism study[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 116: 893-900.
- [5] AMAGLIANI L, O'REGAN J, KELLY A L, et al. Composition and protein profile analysis of rice protein ingredients[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 59: 18-26.
- [6] MO H R, CHEN X W, CUI B, et al. Formation and characterization of self-assembled rice protein hydrolysate nanoparticles as soy isoflavone delivery systems[J]. Foods, 2023, 12(7): 1 523.
- [7] 陈秀文,焦叶,崔波,等.大米蛋白酶解物—大豆苷元复合纳米粒子的构建[J].食品与机械,2021,37(2): 42-46, 110.
CHEN X W, JIAO Y, CUI B, et al. Fabrication of rice protein hydrolysate-daidzein composite nanoparticles [J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 42-46, 110.
- [8] 马晓雨.基于大米蛋白酶解物构建的叶黄素纳米输送体系的制备及性质研究[D].南昌:南昌大学,2020.
MA X Y. Fabrication and characterization of lutein nano-delivery system based on rice protein hydrolysate[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [9] GAN C F, LIU Q, ZHANG Y, et al. A novel phytosterols delivery system based on sodium caseinate-pectin soluble complexes: Improving stability and bioaccessibility [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107295.
- [10] XU X F, LIU W, LIU C M, et al. Effect of limited enzymatic hydrolysis on structure and emulsifying properties of rice glutelin [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 61: 251-260.
- [11] YUAN Y K, LI H, ZHU J X, et al. Fabrication and characterization of zein nanoparticles by dextran sulfate coating as vehicles for delivery of curcumin [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 151: 1 074-1 083.
- [12] 于伟康,张珊珊,杨占一,等.超分子多肽自组装在生物医学中的应用[J].生物工程学报,2021,37(7): 2 240-2 255.
YU W K, ZHANG S S, YANG Z Y, et al. Application of supramolecular peptide self-assembly in biomedicine[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, 37(7): 2 240-2 255.
- [13] XIAO J, NIAN S, HUANG Q R. Assembly of kafirin/carboxymethyl chitosan nanoparticles to enhance the cellular uptake of curcumin[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51: 166-175.
- [14] 王艳红.大豆分离蛋白—黄原胶—茶多酚的制备及在纳米乳液中的应用[D].郑州:河南工业大学,2021: 21.
WANG Y H. Preparation of soybean protein isolate-xanthan gum-tea polyphenols and its application in nanoemulsion [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021: 21.
- [15] WANG L, KE L J, RAO P F, et al. Fabrication and characterization of curcumin-loaded nanoparticles using protein from brewers' spent grain [J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 150: 111992.
- [16] 梅钰琪,高亚轩,杨韵仪,等.蛋黄蛋白肽纳米颗粒对姜黄素的包埋与递送特性[J].食品科学,2023,44(21): 14-22.
MEI Y Q, GAO Y X, YANG Y Y, et al. Curcumin encapsulation and delivery properties of egg yolk protein peptide nanoparticles [J]. Food Science, 2023, 44(21): 14-22.
- [17] LI Z P, XIAO Z L, JIANG M H, et al. A comparison on the binding mechanisms of zein and gliadin with curcumin to guide the self-assembly of nanoparticles for delivery purpose[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 13: 100660.
- [18] DAI L, LI R R, WEI Y, et al. Fabrication of zein and rhamnolipid complex nanoparticles to enhance the stability and *in vitro* release of curcumin[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 617-628.
- [19] SRIVASTAVA N, CHOUDHURY A R. Microbial polysaccharide-based nanoformulations for nutraceutical delivery[J]. ACS Omega, 2022, 7(45): 40 724-40 739.

(下转第 136 页)

- 与机械, 2022, 38(11): 149-154.
- WANG L M, JIANG Y. Automatic classification of banana ripeness based on deep learning[J]. Food & Machinery, 2022, 38(11): 149-154.
- [18] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks [J]. Communications of the ACM, 2017, 60(6): 84-90.
- [19] 孙道宗, 丁郑, 刘锦源, 等. 基于改进 SqueezeNet 模型的多品种茶树叶片分类方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 223-230, 248.
- SUN D Z, DING Z, LIU J Y, et al. A multi variety tea tree leaf classification method based on improved SqueezeNet model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 223-230, 248.
- [20] 李阳德, 马晓慧, 王骥. 基于轻量级 MobileNet V3-YOLOv4 的生长期菠萝成熟度分析[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(2): 35-44.
- LI D Y, MA X H, WANG J. Analysis of pineapple maturity during growth period based on lightweight MobileNet V3-YOLOv4[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(2): 35-44.
- [21] 吕金锐, 付燕, 倪美玉, 等. 基于改进 YOLOv4 模型的番茄成熟度检测方法[J]. 食品与机械, 2023, 39(9): 134-139.
- LU J R, FU Y, NI M Y, et al. Research on tomato maturity detection method based on improved YOLOv4 model[J]. Food & Machinery, 2023, 39(9): 134-139.
- [22] 李志臣, 凌秀军, 李鸿秋, 等. 基于改进 ShuffleNet 的板栗分级方法[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2023, 54(2): 299-307.
- LI Z C, LING X J, LI H Q, et al. Chestnut grading method based on improved ShuffleNet[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2023, 54(2): 299-307.
- [23] ZHOU Z, SONG Z, FU L, et al. Real-time kiwifruit detection in orchard using deep learning on Android™ smartphones for yield estimation[J]. Comput Electron Agric, 2020, 179: 105856.
- [24] GENAEV M A, KOMYSHEV E G, SHISHKINA O D, et al. Classification of fruit flies by gender in images using smartphones and the YOLOv4-tiny neural network[J]. Mathematics, 2022, 10(3): 295.
- [25] ZENG T, LI S, SONG Q, et al. Lightweight tomato real-time detection method based on improved YOLO and mobile deployment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107625.
- [26] ELWIREHARDJA G N, PRAYOGA J S. Oil palm fresh fruit bunch ripeness classification on mobile devices using deep learning approaches[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188: 106359.

(上接第 20 页)

- [31] 于美娟, 杨慧, 黄绿红, 等. 传统鲈鱼固态发酵过程中细菌群落与挥发性风味物质的相关性[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 1-10.
- YU M J, YANG H, HUANG L H, et al. The potential correlation between bacterial community and the characteristic volatile flavour of traditional fermented fish during solid fermentation[J]. Food & Machinery, 2023, 39(3): 1-10.
- [32] 张春林, 杨亮, 李喆, 等. 酱香型白酒酒醅堆积微生物多样性及其与风味物质的关系[J]. 食品科技, 2022, 47(4): 111-118.
- ZHANG C L, YANG L, LI Z, et al. Microbial community and its relationship with volatile compounds in Moutai-flavor Baijiu stacking fermentation process[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(4): 111-118.
- [33] 于倩倩, 李聪, 周辉, 等. 发酵肉制品风味分析及形成途径研究[J]. 肉类工业, 2019(11): 52-58.
- YU Q Q, LI C, ZHOU H, et al. Study on flavor analysis of fermented meat product and its forming way[J]. Meat Industry, 2019(11): 52-58.
- [34] 张盼文, 李浩, 徐钰红, 等. 一株来源于豆豉的地衣芽孢杆菌全基因组学及其风味物质形成分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 36-44.
- ZHANG P W, LI H, XU Y H, et al. Whole genome and flavor formation analysis of a *Bacillus licheniformis* strain from Douchi [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(19): 36-43.

(上接第 42 页)

- [20] XU P C, QIAN Y X, WANG R, et al. Entrapping curcumin in the hydrophobic reservoir of rice proteins toward stable antioxidant nanoparticles[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132906.
- [21] LI Z P, LIN Q Q, MCCLEMENTS D J, et al. Curcumin-loaded core-shell biopolymer nanoparticles produced by the pH-driven method: Physicochemical and release properties [J]. Food Chemistry, 2021, 355: 129686.
- [22] LI M L, LIU Y B, LIU Y, et al. pH-driven self-assembly of alcohol-free curcumin-loaded zein-propylene glycol alginate complex nanoparticles [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 213: 1 057-1 067.
- [23] JOG R, BURGESS D J. Pharmaceutical amorphous nanoparticles [J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2017, 106(1): 39-65.
- [24] ZHANG D C, JIANG F Y, LING J H, et al. Delivery of curcumin using a zein-xanthan gum nanocomplex: Fabrication, characterization, and in vitro release properties[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2021, 204: 111827.