

大豆 7S 蛋白-壳聚糖自组装核壳纳米颗粒的载体性质研究

刘玲玲, 刘思琪, 刘晨, 陈培鑫, 班兆军*

(浙江科技学院生物与化学工程学院 浙江省农产品化学与生物加工技术重点实验室
浙江省农业生物资源生化制造协同创新中心 杭州 310023)

摘要 利用尿素分子破坏大豆 7S 和壳聚糖(CS)的分子间作用力,使两者充分解离。解离的 7S 和 CS 在疏水及静电引力的驱动下,自组装制备 7S 蛋白-CS 纳米颗粒(SCP)。SCP 颗粒的 ζ -电位与 CS 的电位值相近,说明颗粒结构为“核-壳”型结构,该结构通过透射电镜(TEM)得到进一步的证实。SCP 颗粒在整个体外消化过程中均匀缓慢释放,表明 SCP 颗粒在胃肠道环境中具有一定的颗粒稳定性。为进一步探究 SCP 颗粒的载体性质,研究了 SCP 颗粒对姜黄素抗癌活性的影响,发现与游离姜黄素相比,包埋在 SCP 颗粒后,姜黄素对 Caco-2 细胞的增殖抑制活性没有显著性差异,说明该方法是一种提高姜黄素生物效价和生物活性的有效方法。

关键词 自组装; 大豆 7S 蛋白; 壳聚糖; 姜黄素; 抗肿瘤活性

文章编号 1009-7848(2024)01-0041-08 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.01.005

近年来,姜黄素因其氧化、抑菌、抗炎、抗癌、神经保护和伤口愈合等药理作用而备受关注^[1]。然而,姜黄素较差的水溶性和化学不稳定性,导致其生物利用度极低^[2]。研究表明,具有高载药量和智能递送特性的“核-壳”型颗粒,可有效改善难溶活性物质的水溶性和稳定性。与普通的纳米粒子相比,“核-壳”型纳米颗粒具有更多的优势,如更高的分散性、更好的控制释放特性、更强的消化稳定性等^[3-5]。目前,已有多种“核-壳”型多糖-蛋白质材料被成功制备,作为活性成分的递送和控释载体^[6-8]。Zhu 等^[9]介绍了 1 种壳寡糖和酪蛋白磷酸肽“核-壳”型微粒,该颗粒不仅显著提高了钙结合能力,还实现对姜黄素的控制释放。Tan 等^[10]利用反相乳液聚合法制备的多糖-蛋白质“核-壳”型纳米粒子用于包封花青素,表现出较高的包封效率和抗环境干扰能力,同时具有良好的生物相容性和细胞吸收能力。

通过一定的诱导手段,具有亲水基团和疏水基团的两亲性聚合物在水溶液中可自发形成“核-壳”型纳米颗粒^[11-12]。鉴于此,本文利用大豆 7S 蛋白和 CS 分子的亲水性差异,通过具有盐溶效应的

尿素调控分子间相互作用力,最终形成具有“核-壳”型结构的纳米输送载体。利用原子力显微镜(AFM)、等温滴定微量热仪(ITC)、红外光谱仪(FTIR)、动态光散射技术(DLS)及透射电子显微镜(TEM)等仪器表征相关纳米颗粒的形貌及结构,并对其在模拟胃肠环境中的释放特性和抗肿瘤活性进行测定,以为食品医药领域的实际应用提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试剂与材料

大豆 7S 蛋白利用脱脂豆粕实验室自制。壳聚糖($M_w = 200$ ku,脱乙酰度 $\geq 90\%$),阿拉丁公司。姜黄素($\sim 98\%$)、猪胆汁提取物(B8631)、胰酶(P1750)、胃蛋白酶(P7000),美国 Sigma 公司,其它化学品均为分析纯级。

1.2 仪器与设备

Nano-ZS 型激光动态粒度扫描仪,英国 Malvern 公司;原子力显微镜,德国 Bruker 公司;F-7000 型荧光分光光度计,日本 Hitachi 公司;圆二色谱仪,英国 AppliedPhotophysics 有限公司;等温量热滴定仪,美国 MicroCal 公司。

1.3 制备方法

大豆 7S(d-7S)和壳聚糖(d-CS)的解离:将 7S (200 mg)和 CS(200 mg)分别溶解在 20 mL 解离溶液(0.5%冰醋酸,6 mol/L 尿素)中。完全溶解后,用

收稿日期: 2023-01-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32172268);浙江省重点研发计划项目(2022C04039,2021C02015)

第一作者: 刘玲玲,女,博士,讲师

通信作者: 班兆军 E-mail: banzhaojun@zust.edu.cn

乙酸将最终 pH 值调至 5.5,并在 4 °C 下孵育 10 h 以上以完全解离。

大豆 7S-壳聚糖“核-壳”型颗粒(SCP)和负载姜黄素的大豆 7S-壳聚糖“核壳”型颗粒(Cur-SCP)的制备:将 d-7S 和 d-CS 溶液等比例混合,使用分子质量为 8.0~14 ku 的透析管在 4 °C 下用去离子水透析 2 d 以去除尿素。将透析完成后的混合液离心(8 000×g, 20 min),上清液即为 SCP 溶液。制备负载姜黄素的 Cur-SCP 颗粒溶液,需要在与 d-CS 溶液混合前,将姜黄素乙醇溶液添加到 20 mL d-7S 溶液中。其它步骤同 SCP 的制备方法。

1.4 7S 和 CS 解离过程的表征

用乙酸-乙酸钠缓冲液(10 mmol/L pH 5.5)将待测样品稀释至 20 μg/mL,滴加在云母片上,于 37 °C 烘箱中干燥 30 min 后进行 AFM 观察。驱动频率设置为 300 kHz,扫描速率为 1.2 Hz。图像由 Digital Nanoscope 软件处理。

1.5 颗粒的表征

1.5.1 颗粒的平均粒径、电位及微观形貌 根据动态光散射(DLS)技术测量了样品的平均粒径及光散射强度。测量前,溶液用经 0.22 μmol/L PES 水系滤膜过滤的 PBS 溶液(10 mmol/L, pH 7.0)稀释至 1 mg/mL。蛋白颗粒的电位用 Nano zs 仪测定,测量温度为 25 °C。颗粒的微观形貌用 TEM 和 AFM 进行观察。

1.5.2 CS 和 7S 的相互作用 利用低容量纳米 ITC 仪在 25 °C 对样品进行 ITC 测量,得到大豆 7S 和 CS 复合过程的热力学性质。将 300 μL d-7S(1 mg/mL)溶液加入样品池中,参考池中加入同体积的去离子水,注射器中加入 50 μL 质量浓度为 5 mg/mL 的 d-CS。所有样品在测试前真空脱气 20 min。校正试验为 d-CS 溶液滴定 6 mol/L 尿素 pH=5.5 乙酸缓冲液。通过扣除样品滴定缓冲液的稀释热得到相应的 d-CS 滴定 d-7S 的反应热。

SCP 颗粒的结构特性则采用傅里叶变换红外分析仪测定,测定条件为:扫描范围 400~4 000 cm⁻¹,扫描分辨率 4 cm⁻¹。

1.5.3 颗粒的载体性质 被包封在 SCP 纳米颗粒中的姜黄素可以通过以下公式计算:

$$EE(\%) = \left[1 - \frac{\text{未结合的姜黄素}(\text{mg})}{\text{总加入的姜黄素}(\text{mg})} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$LA = \frac{\text{总加入的姜黄素}(\mu\text{g}) - \text{未结合的姜黄素}(\mu\text{g})}{\text{总蛋白质质量}(\text{mg})} \quad (2)$$

未结合的姜黄素是指透析后离心所得的沉淀物中姜黄素的含量,该沉淀物用乙酸乙酯充分溶解后,离心取上清液,用紫外-分光光度计测定在波长 420 nm 处的吸光值并计算所得。

1.6 释放特性及抗肿瘤活性

使用体外模拟胃(1 h)、小肠(2 h)消化模型评估 Cur-SCP 中姜黄素的释放特性^[13]。在不同消化时间点,取 0.5 mL 消化液离心(15 000×g, 30 min),并测量上清液中残留的姜黄素。

取 Caco-2 细胞悬液接种到 96 孔培养板中,置于培养箱中(37 °C, 5%CO₂)孵化 24 h,丢弃培养基,并用 100 μL PBS 清洗。之后,向 96 孔培养板中分别加入用培养液稀释成原浓度 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%(V/V)的 SCP、Cur-SCP 和游离姜黄素消化液,置于培养箱中培养 24 h 后,使用倒置荧光显微镜观察细胞形态,并用亚甲基蓝法读取细胞在波长 570 nm 处的 OD 值,按照下述公式计算消化后结肠腺癌细胞 Caco-2 对样品的存活率。

$$\text{细胞生存率}(\%) = \frac{A_s}{A_c} \times 100 \quad (3)$$

式中, A_s——样品的吸光度;而 A_c——空白对照组的吸光度。

1.7 数据分析

除特别说明,每次试验进行 3 次重复。试验数据通过数据分析软件 SPSS 进行方差分析,并用 Duncan 多重比较分析不同处理间的显著性差异(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 大豆 7S 蛋白和 CS 的解离及重组过程

有机大分子的簇集和自卷现象是其很重要的性质之一。通过自卷的方式,有机大分子的疏水基团聚集于分子内部,而亲水基团包围在分子外部,以形成在水相中稳定存在的结构。具有盐溶效应的尿素可以降低溶剂的促簇能力(Solvent aggregation power),将包裹在分子内部的疏水基团彻底暴露出来,为疏水活性物质提供更多的结合位点^[14]。CS 和大豆 7S 在低 pH 值(4.5~6)下会形成不

溶性凝聚物。从 AFM 微观图观察到,单独的 7S 和 CS 在 pH=5.5 条件下会自聚集成较大颗粒(图 1, ~93 nm 和 187 nm),这与 Yuan 等^[15]在低 pH 条件下观察的结果一致。尿素分子可以通过破坏分子

间氢键和疏水相互作用力,从而使大分子发生解离。图 1 显示,经尿素处理的 7S 和 CS 粒径大大降低(~16 nm 和 41 nm),并由团聚的颗粒状态转变为柔顺的线条状或棒状,说明 7S 和 CS 发生了解离。

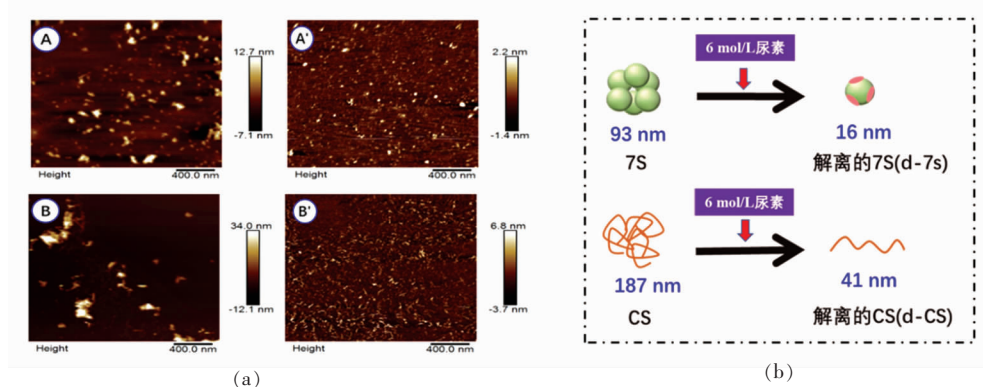


图 1 天然 7S(A)、CS(B)和解离 7S(d-7S,A')、CS(d-CS,B')的 AFM 图像(a)和机理图(b)

Fig.1 Typical AFM 2D images (a) and mechanograms (b) of particles in nature 7S (A), CS (B) and denatured 7S (A'), CS (B')

本试验利用 ITC 技术定量分析 d-7S 和 d-CS 混合时形成复合物的饱和浓度^[16]。如图 2 显示,热流量随着滴定时间的延长而降低,这说明在这个环境中,两种滴定物之间存在相互作用,且两者形成复合物的过程是一个放热过程,放热焓变值为 8 kcal/mol。此外,滴定反应在 CS 与大豆 7S 比例

达到 0.5 g/g 时达到平衡,这说明 7S-CS 复合物在这一比例下达到饱和,这个现象与其他研究者的报道乳球蛋白与壳聚糖的结果类似。因此,当体系中 CS:7S 小于 0.5 g/g,体系中主要以解离的蛋白亚基和复合物组成;当体系中 CS:7S 大于 0.5 g/g,体系中主要以解离的 CS 和复合物组成。

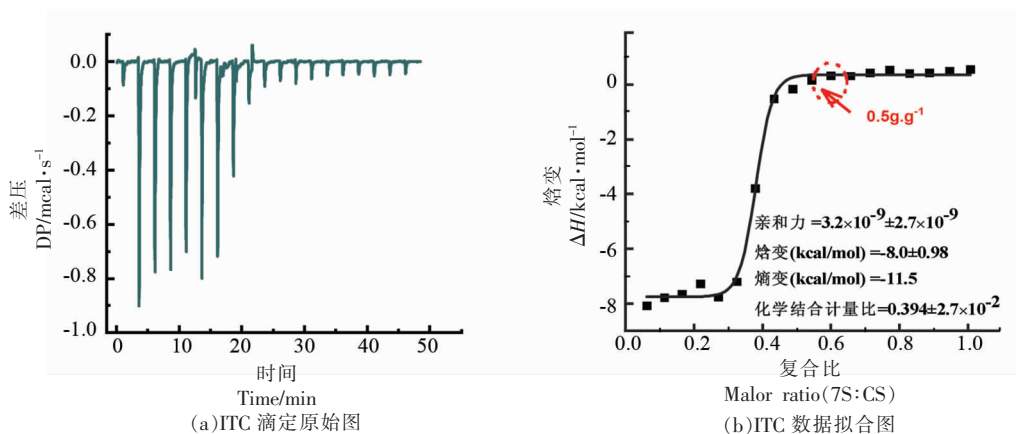


图 2 d-CS 与 d-7S 的结合的 ITC 测定结果

Fig.2 ITC determination of the binding of d-CS to d-7S

2.2 SCP 颗粒的形成与结构表征

为了获得重组 SCP 颗粒,对 7S-CS 解离溶液进行缓慢透析,并监测透析过程中重组颗粒的 D_z 及光散射强度变化(图 3a)。在 0~36 h 的透析过程

中,溶液的 D_z 值和光散射强度均呈逐渐增加的趋势,说明颗粒正在发生重组行为。当透析时间进一步延长到 48 h,溶液的 D_z 和光散射强度变化则逐渐平稳,这说明溶液在透析时间为 48 h 时,可

以形成稳定的重组颗粒。经 DLS 技术测定,重组颗粒的平均粒径为 197 nm,微观图见图 4。利用粒子表面电荷直接相关的电位研究 7S 蛋白与 CS 之间的相互作用,得到图 3b 所示结果。从图中可以

看出,SCP 颗粒的 ζ 电位值在 CS 和 7S 之间,并且更趋于 CS 的 ζ 电位值,说明 CS 和 7S 发生了相互作用,并且重组颗粒的表面更大可能由 CS 覆盖^[17]。

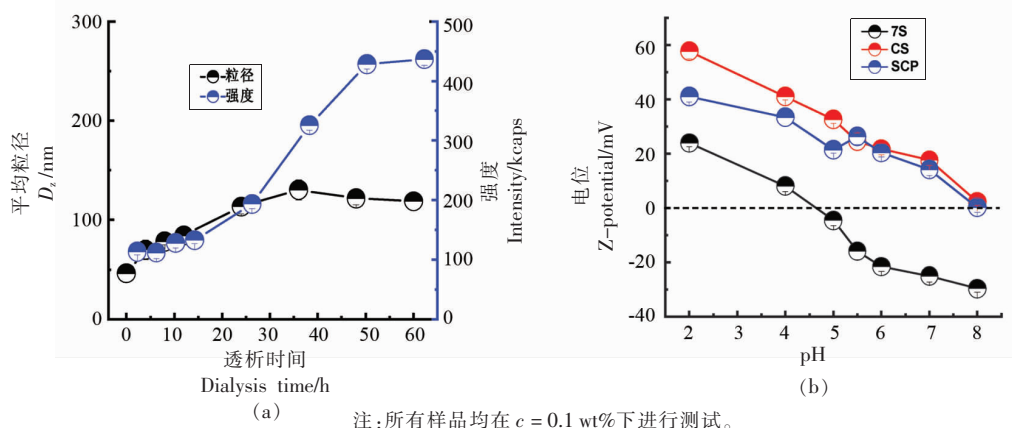


图 3 透析时间对重组 SCP 颗粒的平均粒径和光散射强度的影响(a);pH 对 7S、CS 及 SCP 颗粒 ζ -电位的影响(b)

Fig.3 Effect of dialysis on SCP particle size and derived count rate (a); the ζ -potentials of the 7S, CS and SCP as function of pH (b)

大豆 7S 和 CS 在共溶剂 (6 mol/L 尿素, pH 5.5) 中的亲水性不同,其中 CS 是亲溶剂的,7S 因带有较多疏水氨基酸而具有一定的疏水性。当 CS:7S 比例为 1:1 时(大于 0.5 g/g),在透析缓慢去除共溶剂尿素过程中,复合物在 7S 的疏水牵引下优

先发生聚集,而多余的 d-CS 则在静电左右下吸附在复合物聚集颗粒的附近形成亲溶剂的微区,从而阻止更大聚集体的产生,最终得到以 7S 相对集中的核和以 CS 相对集中的壳的组装颗粒,其形成机理如图 4 所示。

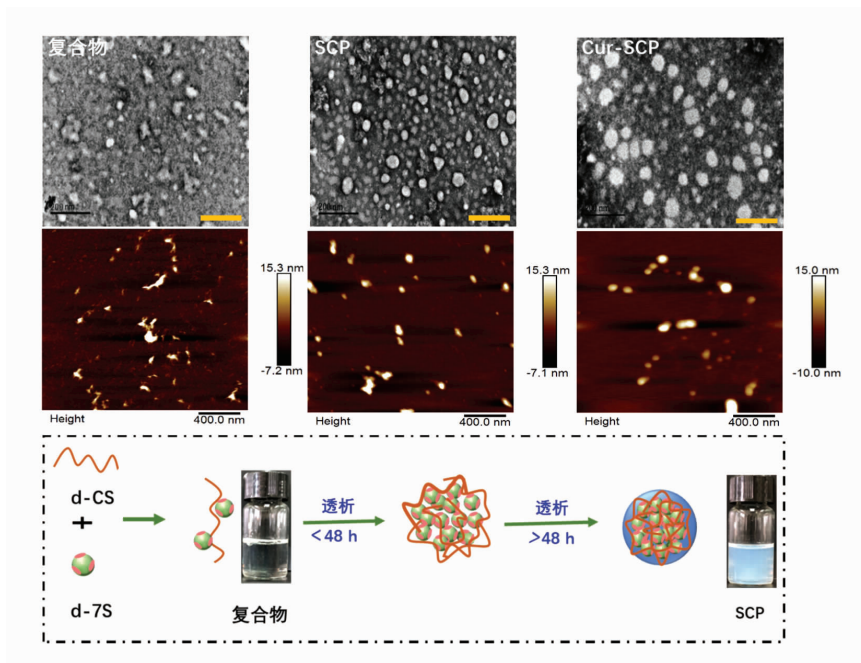
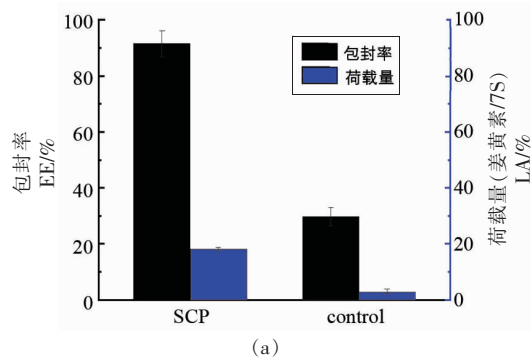


图 4 d-7s/d-cs 复合物、SCP、Cur-SCP 颗粒的 TEM 和 AFM 2D 图像
Fig.4 Typical TEM and AFM 2D images of d-7s/d-cs complex, SCP and Cur-SCP

2.3 SCP 颗粒的载体性质

为了探究 SCP 颗粒的载体性质,考察了在 7S 和 CS 质量浓度均为 10 mg/mL 条件下,制备的 SCP 对姜黄素的包封率(EE%)和荷载量(LA)的影响。如图 5 所示,当 $[Cur]=2.0\text{ mg/mL}$ 时,包封率



注:对照指未经尿素解离的 7S 和 CS 静电复合物。

为 $91.5\% \pm 4.7\%$,每 100 g 7S 可荷载 18.3 g 的姜黄素(图 5a)。显著高于经加热超声处理的大豆分离蛋白(14.45%)纳米复合物中姜黄素的最大荷载量^[18],以及酪蛋白纳米胶囊中姜黄素的最大 LA (0.19%)^[19]。

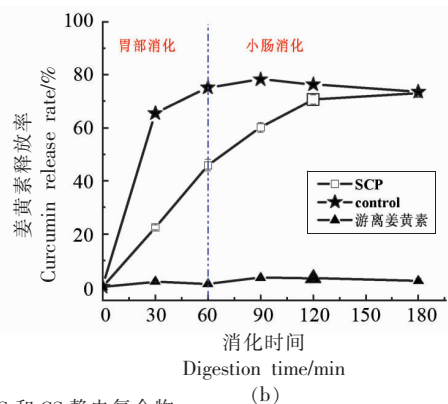


图 5 SCP 颗粒中姜黄素的包封率和荷载量(a)及姜黄素在模拟胃肠液中的释放规律(b)

Fig.5 Encapsulation rate and loading of curcumin in SCP particles (a) and curcumin release pattern in simulated gastrointestinal fluid (b)

通过评估姜黄素在体外模拟消化过程中的释放速率,来评估 SCP 颗粒对姜黄素的生物可及性(图 5b)。如图所示,游离姜黄素(预先溶于乙醇中)在消化液中遇水会发生结晶,导致其在整个消化过程中的释放速率低于 5%。对照组包封的姜黄素在消化过程中快速释放并达到最大释放量,这是因为 CS 和 7S 在模拟胃液中均带有正电荷,两者间的作用力由静电引力变为静电斥力,颗粒完整性遭到破坏,姜黄素被快速释放^[20]。而 SCP 颗粒在整个消化过程中均匀缓慢释放,这是因为 CS 壳层可以保护 7S 内核不被胃蛋白酶水解,而在肠消化过程中,却能因 pH 转变完全有效的水解达到与对照样品同样的生物可及性。

2.4 消化后姜黄素对 Caco-2 细胞的增殖抑制活性

用培养液将稀释后的消化液样品作用于 Caco-2 细胞,发现没有添加姜黄素的 SCP 消化液对 Caco-2 细胞没有明显的细胞毒性,说明其具有在功能食品上应用的可能性(图 6)。Cur-SCP 和游离姜黄素(溶解于 DMSO)消化液对 Caco-2 细胞的增殖抑制作用呈现剂量依赖关系,随着作用浓度升高细胞增殖抑制活性增大(图 6),两者对 Caco-

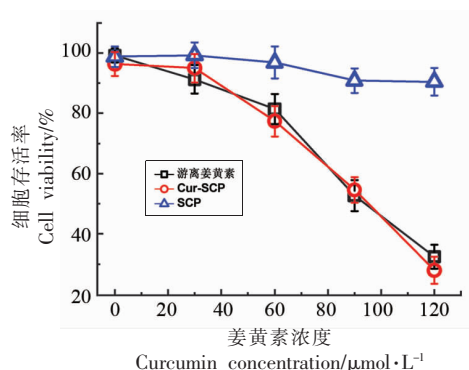


图 6 SCP、Cur-SCP 和游离姜黄素消化液对结肠腺癌细胞 Caco-2 的增殖抑制作用

Fig.6 The proliferation inhibition of Caco-2 by SCP, Cur-SCP and free curcumin digests

2 细胞的增殖抑制活性没有显著性差异。通过对 Caco-2 细胞形态的观察(图 7),发现在含有 SCP 培养液的细胞形态没有发生明显变化,而 Cur-SCP 和游离姜黄素在姜黄素浓度大于 $60\text{ }\mu\text{mol/L}$ 时,细胞均出现更多的边圆、细胞核固缩等细胞凋亡特征。以上结果说明,SCP 的包埋并没有损害姜黄素的抗肿瘤活性,利用该组装方法可以很好的提高姜黄素的溶解性,为开发预防肿瘤的功能食品或药品提供良好的途径。

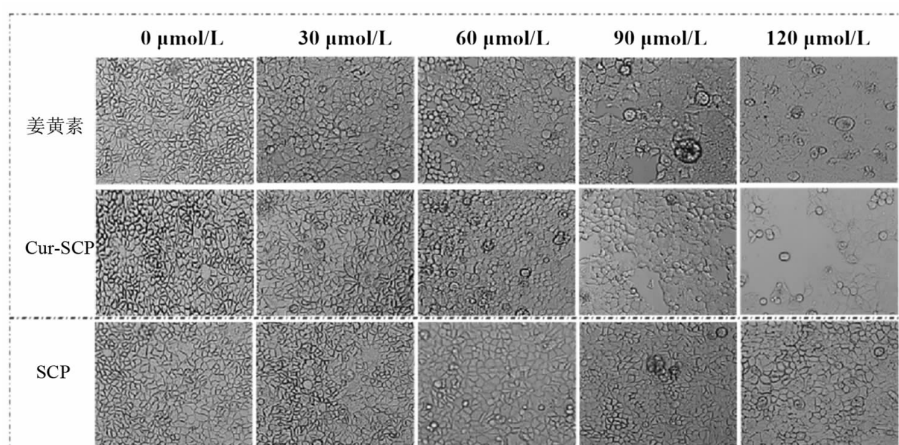


图7 用SCP、Cur-SCP和游离姜黄素消化液孵育的Caco-2癌细胞的细胞形态

Fig.7 Cell morphologies of Caco-2 cancer cells incubated in the digestion juice of SCP, Cur-SCP and free curcumin

3 结论

本文利用尿素调控7S和CS的解离与重组过程,提出了1种简单且适用于蛋白质和多糖等生物大分子的“核-壳”型纳米颗粒的制备方法。通过对组装颗粒的表面性质、微观形态、结构特性、消化性、体外活性等进行表征和分析,发现该粒子具有较高的包封率和消化稳定性。多糖壳层可以保护大豆7S内核,避免其在消化道过早水解,同时减缓姜黄素在小肠中的释放速率。组装颗粒对姜黄素的包埋仍然保留了姜黄素原有的抗肿瘤活性,因此这种特点非常适用于开发以共组装纳米颗粒为输送载体的口服营养物质产品,对于即载药物的持续释放和药物的智能输送有重大借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] CHEN Y, SU J, DONG W, et al. Cyclodextrin-based metal-organic framework nanoparticles as superior carriers for curcumin: Study of encapsulation mechanism, solubility, release kinetics, and antioxidative stability[J]. Food Chemistry, 2022, 383(30): 132605.
- [2] 董潇, 黄国清, 肖军霞. 玉米醇溶蛋白-葡萄糖美拉德反应产物制备姜黄素纳米颗粒[J]. 中国食品学报, 2021, 21(3): 118-127.
DONG X, HUANG G Q, XIAO J X. Preparation of curcumin nanoparticles by zein-glucose maillard reaction products [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(3): 118-127.
- [3] LAW W C, YONG K T, ROY I, et al. Optically and magnetically doped organically modified silica nanoparticles as efficient magnetically guided biomarkers for two-photon imaging of live cancer cells[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2008, 112(21): 7972-7977.
- [4] SOUNDERYA N, ZHANG Y. Use of core/shell structured nanoparticles for biomedical applications[J]. Recent Patents on Biomedical Engineering, 2008, 1(8): 34-42.
- [5] CHATTERJEE K, SARKAR S, RAO K J, et al. Core/shell nanoparticles in biomedical applications[J]. Advances in Colloid & Interface Science, 2014, 209: 8-39.
- [6] CHAO Q, MCCLEMENTS D J, JIN Z, et al. Resveratrol-loaded core-shell nanostructured delivery systems: Cyclodextrin-based metal-organic nanocapsules prepared by ionic gelation[J]. Food Chemistry, 2020, 317(1): 126328.
- [7] SUGITA P, AMBARSARI L, LIDINIYAH. Optimization of ketoprofen-loaded chitosan nanoparticle ultrasonication process[J]. Procedia Chemistry, 2015, 16(16): 673-680.
- [8] HOSSEINI S F, ZANDI M, REZAEI M, et al. Two-step method for encapsulation of oregano essential oil in chitosan nanoparticles: Preparation, characterization and *in vitro* release study[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 95(1): 50-56.

- [9] ZHU B Y, HOU T, HUI H. Calcium-binding casein phosphopeptides-loaded chitosan oligosaccharides core-shell microparticles for controlled calcium delivery: Fabrication, characterization, and *in vivo* release studies[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 154: 1347-1355.
- [10] TAN C, ARSHADI M, LEE M C, et al. A robust aqueous core-shell-shell coconut-like nanostructure for stimuli-responsive delivery of hydrophilic cargo [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(8): 9016-9027.
- [11] HO K M, LI W Y, LEE C H, et al. Mechanistic study of the formation of amphiphilic core-shell particles by grafting methyl methacrylate from polyethyleneimine through emulsion polymerization [J]. *Polymer*, 2010, 51(15): 3512-3519.
- [12] 冯纪璐. 基于 Maillard 反应和自组装法的蛋白质-多糖核壳结构纳米凝胶的制备与表征[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- FENG J L. Fabrication and characterization of protein-polysaccharide core-shell nanogels via maillard reaction and self-assembly approach[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [13] 陈飞平. 大豆蛋白作为姜黄素纳米输送载体的途径及机理[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- CHEN F P. Soy protein as a nanocarrier for curcumin and the possible mechanisms involved [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [14] 刘廷国, 杨凌霄, 周彬, 等. 壳聚糖与尿素的相互作用及其应用研究进展[J]. *离子交换与吸附*, 2012, 28(2): 183-192.
- LIU Y G, YANG L X, ZHOU B, et al. Recent advances in the applications of the interaction between chitosan and urea[J]. *Ion Exchange and Adsorption*, 2012, 28(2): 183-192.
- [15] YUAN Y, WAN Z L, YANG X Q, et al. Associative interactions between chitosan and soy protein fractions: Effects of pH, mixing ratio, heat treatment and ionic strength[J]. *Food Research International*, 2014, 55: 207-214.
- [16] 袁杨. 食物蛋白与壳聚糖相互作用及其在食品体系的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- YUAN Y. Food protein-chitosan interaction and its application in food system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [17] 甘招娣. 米糠清蛋白-壳聚糖纳米自组装包载姜黄素纳米体系制备与评价[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- GAN Z D. Studies on the preparation and evaluation of nanocarriers self-assembled by the rice bran albumin and chitosan for encapsulating curcumin [D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.
- [18] CHEN F P, LI B S, TANG C H. Nanocomplexation of soy protein isolate with curcumin: Influence of ultrasonic treatment[J]. *Food Research International*, 2015, 75: 157-165.
- [19] PAN K, ZHONG Q, BAEK S J. Enhanced dispersibility and bioactivity of curcumin by encapsulation in casein nanocapsules[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(25): 6036-6043.
- [20] WEI Y, CAI Z X, WU M, et al. Core-shell pea protein-carboxymethylated corn fiber gum composite-nanoparticles as delivery vehicles for curcumin [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 240: 112673.

Studies on Carrier Properties of Soybean 7S Protein-Chitosan Self-Assembled Core-Shell Nanoparticles

Liu Lingling, Liu Siqi, Liu Chen, Chen Peixin, Ban Zhaojun*

(School of Biological and Chemical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Chemical and Biological Processing Technology of Farm Products, Zhejiang Provincial Collaborative Innovation Center of Agricultural Biological Resources Biochemical Manufacturing, Hangzhou 310023)

Abstract In this paper, the intermolecular force of soybean 7S and chitosan (CS) was destroyed by urea molecules to fully dissociate them. The dissociated 7S and CS were self-assembled to prepare 7S protein-CS nanoparticles (SCP) driven by hydrophobic and electrostatic attraction. The ζ -potential of the SCP particles was similar to that of the CS, suggesting a "core-shell" structure, which was further confirmed by transmission electron microscopy (TEM). SCP parti-

cles were evenly and gradually released during the *in vitro* digestion process, suggesting that SCP particles possess a specific level of stability in the gastrointestinal environment. In order to examine the characteristics of SCP particles as carriers, the impact of SCP particles on the anticancer properties of curcumin was studied. The results showed that there was no notable disparity in the ability to inhibit the growth of Caco-2 cells between curcumin embedded in SCP particles and free curcumin. This suggests that utilizing SCP particles is an efficient approach to enhance the effectiveness and biological activity of curcumin.

Keywords self-assembly; soybean 7S protein; chitosan; curcumin; antitumor activity