

基于鱼明胶分散体系 SeNPs 制备及其抗氧化性研究

Preparation of selenium nanoparticles based on fish gelatin dispersion system and investigation of their anti-oxidant activities

都鹏程¹ 王 辉¹ 胡月明¹ 涂宗财^{1,2,3}

DU Peng-cheng¹ WANG Hui¹ HU Yue-ming¹ TU Zong-cai^{1,2,3}

(1. 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 江西 南昌 330047; 2. 江西师范大学国家淡水鱼加工技术研发专业中心, 江西 南昌 330022; 3. 江西师范大学江西省淡水鱼高值化利用工程技术研究中心, 江西 南昌 330022)

(1. *State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China*; 2. *National R&D Center for Freshwater Fish Processing [Nanchang], Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China*; 3. *Engineering Research Center for Freshwater Fish High-value Utilization of Jiangxi Province, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China*)

摘要:采用鱼明胶分散体系制备纳米硒颗粒(SeNPs), 利用动态光散射法、扫描电镜对其粒径、消化稳定性以及形态进行表征, 并对其体外抗氧化能力进行测定。结果表明: 鱼明胶可作为 SeNPs 制备的良好分散体系, SeNPs 形态、粒径大小不受鱼明胶分散体系浓度的影响。1.000%, 0.500%, 0.125% 鱼明胶体系制备的 SeNPs 表现出良好的体外抗氧化能力, 其中 DPPH 自由基清除 IC_{50} 值分别为 1.846 0, 0.923 0, $<0.461\ 5$ mg/mL; ABTS 自由基清除 IC_{50} 值分别为 0.580 0, 0.387 1, $<0.193\ 5$ mg/mL; 不同浓度鱼明胶分散体系制备 SeNPs 还原力依次为 0.125% 鱼明胶体系 $>0.500\%$ 鱼明胶体系 $>1.000\%$ 鱼明胶体系。SeNPs 在胃消化过程中会出现短暂的团聚现象, 在肠消化过程中又会重新恢复纳米尺寸。

关键词: 纳米硒; 动态光散射; 扫描电镜; 抗氧化; 消化

Abstract: Selenium nano particles (SeNPs) were prepared using fish gelatin dispersion system, and its particle size, morphology, and digestive stability were studied by dynamic light scattering (DLS) and scanning electron microscopy (SEM). The antioxidant capacity of SeNPs were determined. The results showed that fish gelatin was excellent dispersion system for preparation of SeNPs. The particle size of SeNPs and its morphology was barely affected

by the concentration of fish gelatin dispersion system. Moreover, SeNPs presented good antioxidant ability. Among them, the DPPH radical scavenging ability of SeNPs prepared by 1.000%, 0.500%, 0.125% fish gelatin dispersion system, and IC_{50} value were 1.846 0, 0.923 0, $<0.461\ 5$ mg/mL, respectively. Correspondingly, the ABTS radical scavenging ability of SeNPs IC_{50} value were 0.580 0, 0.387 1, $<0.193\ 5$ mg/mL, respectively. It was found during the in vitro simulated digestion that gastric digestion would lead to agglomeration of SeNPs, and the agglomerated selenium particles regained nano-size during intestinal digestion.

Keywords: SeNPs; dynamic light scattering; scanning electron microscopy; antioxidant capacity; digestion

硒作为必需微量元素, 与人体生理功能密切相关, 如构成体内谷胱甘肽过氧化物酶、硫氧还蛋白还原酶的活性中心^[1-3], 还具有预防心血管疾病、抗衰老、抗病毒等作用^[4]。单质硒是一种生物惰性硒, 无生物毒性和生物活性^[5]。张劲松等^[6-7]发现硒颗粒在纳米尺寸状态下表现出较高的生物活性和较低的生物毒性。研究表明, 粒径 <500 nm 的红色硒纳米颗粒 (Selenium nanoparticles, SeNPs) 在生物传感器^[8]、纳米医学领域如抗菌^[9]、抗氧化^[10]、抑癌^[11-12]等方面均表现出优异特性。

目前, 利用还原法制备 SeNPs, 其分散体系的选择很大程度上决定了 SeNPs 的尺寸大小及稳定性。蛋白质 (牛血清白蛋白)^[13]、多糖 (阿拉伯胶、海藻多糖)^[14-15] 等物质可作为分散体系制备合适尺寸的 SeNPs。而鱼明胶

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目 (编号: 31860428); 国家现代农业产业技术体系建设专项 (编号: CARS-45)

作者简介: 都鹏程, 男, 南昌大学在读硕士研究生。

通信作者: 涂宗财 (1965—), 男, 南昌大学特聘教授, 博士。

E-mail: Tuzc_mail@aliyun.com

收稿日期: 2020-03-22

作为不同水解程度的胶原蛋白混合物,不仅具有蛋白质作为制备 SeNPs 分散体系所需特性,还具有优异的凝胶性、稳定性、成膜性等加工特性。试验拟选用鱼明胶作为分散体系,利用还原法制备 SeNPs,并采取动态光散射法、扫描电镜等手段探究 SeNPs 粒径大小、形貌特征,抗氧化活性以及消化稳定性,以期为 SeNPs 制备提供新的分散体系,为其产业化以及应用提供技术和理论指导依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

抗坏血酸(V_C)、亚硒酸、DPPH、ABTS:分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

透析袋(3 000 Da)、邻苯三酚、Tris-HCl、EDTA- Na_2 :分析纯,北京索莱宝科技有限公司;

鱼明胶:美国 Sigma 公司。

1.1.2 主要仪器设备

酶标仪:Synergy H1 型,美国伯腾仪器有限公司;

粒度仪:Nano ZS90 型,英国马尔文仪器有限公司;

扫描电镜:Regulus8100 型,日本日立公司;

冻干机:LGJ-1D-80 型,北京亚泰科技仪器技术有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 纳米硒制备 分别向鱼明胶水溶液加入 0.5,1.0,1.5,2.0 mL 浓度为 0.2 mol/L 的亚硒酸溶液,混匀,加入 3 倍于亚硒酸体积的 0.2 mol/L V_C 溶液,用蒸馏水定容至 8 mL,混匀,使鱼明胶分散体系浓度分别为 2.000%,1.000%,0.500%,0.125%,常温反应 2 h,透析袋透析 72 h,冷冻干燥,备用。

1.2.2 SeNPs 粒径测定及形貌表征

(1) 粒径测定:将冻干后的 SeNPs 配置成 30 mg/mL 溶液,利用超声波使其充分溶解后备用。取 5 μ L 溶液,稀释 10 000 倍后测定。扫描次数 3 次,单次扫描时间 13 s,单次扫描重复 15 次。

(2) 形貌表征:取 5 μ L 质量分数为 30 mg/mL 的 SeNPs 溶液稀释 20 000 倍,取 10 μ L 稀释液滴于洁净的硅片上,自然干燥,喷金后置于扫描电镜下进行形貌表征。加速电压 5 000 V,发射电流 9.6 μ A。

1.2.3 SeNPs 体外抗氧化能力测定

(1) DPPH 自由基清除能力:根据 Xie 等^[16]的方法稍作修改。利用 70%乙醇配制浓度为 0.25 mmol/L 的 DPPH 溶液,吸取 DPPH 溶液 300 μ L,分别加入 30 mg/mL 的 SeNPs 溶液 0,5,10,15,20,25 μ L,用蒸馏水定容至 325 μ L,于暗处反应 30 min,离心,测定 517 nm 处吸光值。以 V_C 、谷胱甘肽为阳性对照,亚硒酸为阴性

对照。按式(1)计算 DPPH 自由基清除能力。

$$DC = \frac{A_b - (A_s - A_c)}{A_b} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

DC——DPPH 自由基清除能力,%;

A_s ——样品与 DPPH 溶液混合后的吸光值;

A_c ——样品与 70%乙醇混合后的吸光值;

A_b ——DPPH 与水混合后的吸光值。

(2) ABTS 自由基清除能力:根据郑善元等^[17]的方法稍作修改。配制 7.4 mmol/L ABTS 溶液以及 2.6 mmol/L 过硫酸钾溶液,等比混合,室温避光反应 16 h,用 70%乙醇溶液稀释至 734 nm 处的吸光值为 0.75 左右,备用。吸取 ABTS 溶液 300 μ L,分别加入 30 mg/mL 的 SeNPs 溶液 0,2,4,6,8,10 μ L,用蒸馏水定容至 310 μ L,室温反应 10 min,测定 734 nm 处吸光值,按式(2)计算 ABTS 自由基清除能力。

$$AC = \frac{A_0 - A_s}{A_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

AC——ABTS 自由基清除能力,%;

A_0 ——水取代样品测得的吸光值;

A_s ——样品与 ABTS 溶液反应后的吸光值。

(3) 还原力:根据 Yen 等^[18]的方法稍作修改。各取 200 μ L 1%铁氰化钾溶液和磷酸盐缓冲溶液(0.2 mol/L, pH 6.6)于试管中,分别加入 30 mg/mL 的 SeNPs 溶液 0,5,10,15,20,25 μ L,用蒸馏水定容至 425 μ L,50 $^{\circ}$ C 水浴 20 min,再加入 10%三氯乙酸溶液 200 μ L,混匀,3 000 r/min 离心 5 min。吸取 200 μ L 上清液,加入 200 μ L 蒸馏水以及 40 μ L 0.1%三氯化铁溶液,室温反应 2 min,测定 700 nm 处吸光值。

(4) 超氧阴离子清除能力:根据郭雪峰等^[19]的方法稍作修改。取 236 μ L 0.1 mol/L Tris-HCl 缓冲溶液(pH 8.5,含 2 mmol/L EDTA- Na_2)置于 96 孔板中,分别加入 3 mg/mL 的 SeNPs 溶液 4 μ L,混匀,再迅速加入 10 μ L 1.2 mmol/mL 邻苯三酚溶液(pH 2.4,1 mmol/L HCl 溶解),使反应体系 SeNPs 浓度为 48 μ g/mL,持续测定 319 nm 处吸光值,每 40 s 测定一次,共 10 min。以水为空白对照, V_C 、谷胱甘肽为阳性对照,亚硒酸为阴性对照。

1.2.4 消化稳定性测定 以 1.000%,0.500%,0.125%鱼明胶分散体系制备的 SeNPs 为样品,分别记为 1,2,3,进行体外模拟消化。采用粒度仪测定其在胃肠模拟消化过程中的粒径变化,其中胃消化用 G 表示,肠消化用 I 表示。G-0、G-1 分别表示样品模拟胃消化 0,1 h;G+I-0、G+I-1、G+I-2 分别表示经胃消化 1 h 样品模拟肠消化 0,1,2 h。

1.2.5 数据处理 结果以“平均值 $\pm$ 标准偏差”表示,利用 SPSS 21.0,Origin 9.0 以及 CS 5 软件对数据、图像进

行处理。

2 结果与分析

2.1 SeNPs 粒径及形貌分析

由表 1 可知,SeNPs 在溶液中均具有较小的粒径分布系数(PDI 值, $PDI<0.3$),即 SeNPs 在溶液中有较高的分散度^[20]。随着鱼明胶浓度的升高或降低,SeNPs 的平均粒径均增大,但其平均粒径始终 $<100\text{ nm}$ (处于 $77\sim 90\text{ nm}$),说明鱼明胶可作为 SeNPs 制备过程中良好的分散体系,使其在溶液中分散均匀。Zhang 等^[21]利用牛血

清白蛋白(BSA)作为 SeNPs 分散体系,增加 BSA 的浓度在一定程度上有利于更小的硒颗粒的生成;Jia 等^[22]利用多糖提取物为分散体系制备 SeNPs,发现硒颗粒粒大小会随着多糖含量的增加而减小。此外,改变鱼明胶浓度或亚硒酸浓度对 SeNPs 粒径有一定影响,但其尺寸始终 $<500\text{ nm}$,处于具有生物活性范围内。因此,利用鱼明胶作为 SeNPs 制备过程中分散体系,具有较高的可操作性,其制备过程中,SeNPs 粒径大小受物料浓度影响小,可使得制备的 SeNPs 具有均一性、稳定性。

表 1 亚硒酸含量对鱼明胶分散体体系的 SeNPs 粒径分布的影响

Table 1 Effects of selenite content on the size distribution of SeNPs in fish gelatin dispersion System

鱼明胶 浓度/%	0.5 mL 亚硒酸		1.0 mL 亚硒酸		1.5 mL 亚硒酸		2.0 mL 亚硒酸	
	平均粒径/nm	PDI	平均粒径/nm	PDI	平均粒径/nm	PDI	平均粒径/nm	PDI
2.000	87.35±1.21	0.15±0.02	89.01±0.24	0.15±0.01	89.01±0.42	0.10±0.01	88.10±1.02	0.10±0.01
1.000	85.88±1.32	0.12±0.01	82.91±0.31	0.09±0.02	82.10±0.38	0.06±0.01	81.17±0.72	0.12±0.02
0.500	86.70±0.57	0.12±0.01	78.29±0.72	0.11±0.01	77.59±0.66	0.09±0.02	85.87±1.32	0.16±0.02
0.125	86.93±0.96	0.12±0.02	76.86±1.48	0.22±0.07	83.16±1.67	0.24±0.02	82.91±1.62	0.27±0.02

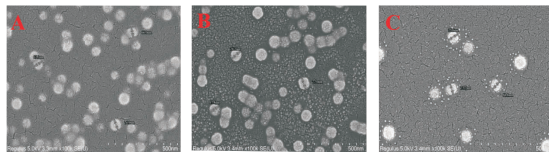
鱼明胶分散体系制备的 SeNPs 在溶液中均呈透明稳定的红色胶体状态,而不含鱼明胶的分散体系的硒颗粒经反应后快速团聚并沉淀于容器底部。由图 1 可知,鱼明胶分散体系制备的 SeNPs 均为大小均一的球形颗粒,且尺寸均为 73 nm 左右,说明鱼明胶是良好的制备 SeNPs 的分散体系,可有效防止生成的 SeNPs 团聚沉淀,且制备的 SeNPs 均为球形,形貌、粒径大小不受鱼明胶体分散体系浓度影响。而此处测定 SeNPs 粒径大小与动态光散射法测定 SeNPs 存在差异,可能是由于溶液中包裹 SeNPs 的鱼明胶具有一定厚度,导致其整体粒径测定值偏大。

2.2 SeNPs 体外抗氧化能力

2.2.1 DPPH 自由基清除能力 由图 2 可知,SeNPs 的 DPPH 自由基清除能力低于 V_c 、谷胱甘肽等强还原剂,但仍表现出较强的 DPPH 自由基清除能力,而亚硒酸水溶液表现出较弱的 DPPH 自由基清除能力。不同浓度鱼明胶分散体系制备的 SeNPs 溶液 DPPH 自由基清除能力表现出较大的差异(清除能力为 1.000% 鱼明胶体系 $<0.500\%$ 鱼明胶体系 $<0.125\%$ 鱼明胶体系),但其自由基清除能力均随 SeNPs 溶液浓度的增高而增大。其中, 1.000% ,

0.500% 鱼明胶分散体系的 SeNPs 自由基清除 IC_{50} 值分别为 $1.846\text{ }0,0.923\text{ }0\text{ mg/mL}$ 。当 0.125% 鱼明胶分散体系制备的 SeNPs 溶液浓度为 $0.461\text{ }5\text{ mg/mL}$ 时,DPPH 自由基清除率达 $(58.316\pm0.323)\%$,说明 SeNPs 具有良好的 DPPH 自由基清除能力。不同浓度鱼明胶分散体系制备的 SeNPs 溶液 DPPH 自由基清除能力可能与制备的 SeNPs 溶液中 SeNPs 绝对含量有关,反应体系鱼明胶浓度越低,SeNPs 绝对含量越高,DPPH 自由基清除能力越强。

2.2.2 ABTS 自由基清除能力 由图 3 可知,亚硒酸、 V_c 以及谷胱甘肽都具有极强的 ABTS 自由基清除能力。而不同浓度鱼明胶体系制备的 SeNPs 也表现出较强的 ABTS 自由基清除能力,其清除能力为 1.000% 鱼明胶体系 $<0.500\%$ 鱼明胶体系 $<0.125\%$ 鱼明胶体系,其中 1.000% ,



(a) 1.000%鱼明胶 (b) 0.500%鱼明胶 (c) 0.125%鱼明胶

图 1 SeNPs 的扫描电镜图

Figure 1 SEM images of SeNPs

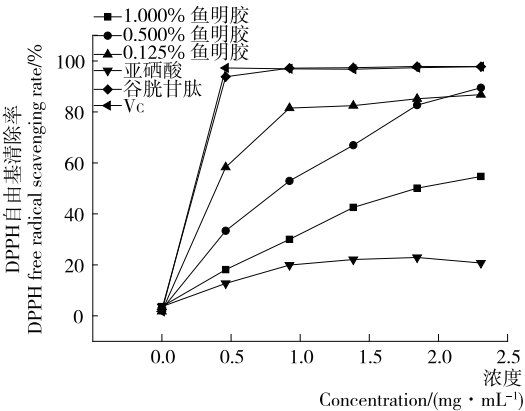


图 2 SeNPs 的 DPPH 自由基清除能力

Figure 2 DPPH clearance ability of SeNPs

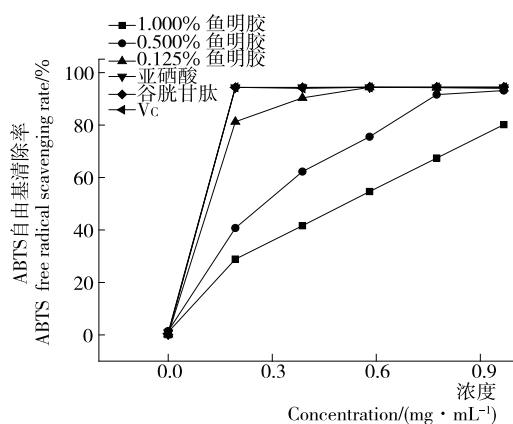


图3 SeNPs的ABTS自由基清除能力

Figure 3 ABTS clearance ability of SeNPs

0.500%, 0.125% 鱼明胶体系制备的 SeNPs 清除 ABTS 自由基 IC_{50} 值分别为 0.580 0, 0.387 1, <0.193 5 mg/mL, 说明 SeNPs 具有较强的 ABTS 自由基清除能力, 且制备过程中鱼明胶浓度越低其清除能力越强, 与 DPPH 自由基清除能力结果一致。

2.2.3 还原力 由图 4 可知, 亚硒酸无还原能力, V_c 以及谷胱甘肽均具有强还原力, SeNPs 具有较强的还原能力, 且随 SeNPs 浓度的增加而增大。其中 0.125% 鱼明胶体系制备 SeNPs 的还原力显著高于 0.500%, 1.000% 鱼明胶体系的。说明不同鱼明胶体系制备的 SeNPs 还原力大小仅与溶液中 SeNPs 的绝对含量有关, 反应体系鱼明胶浓度越低, SeNPs 绝对含量越高, 其还原力越大。

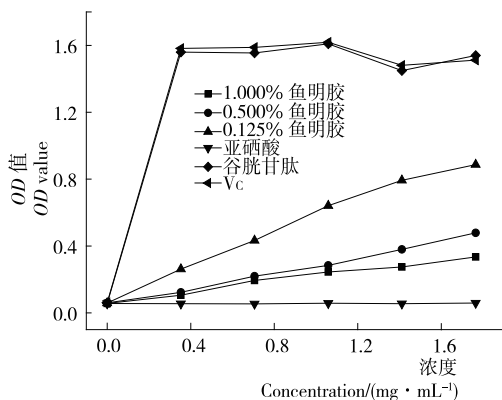


图4 SeNPs的还原力

Figure 4 Reducing power of SeNPs

2.2.4 超氧阴离子清除能力 由图 5 可知, 当反应时间为 2.5~9.5 min 时, 邻苯三酚自氧化监测曲线呈良好的线性关系, 其曲线斜率代表了反应体系中邻苯三酚自氧化速率, 表明除 V_c 具有一定羟基自由基清除能力外, 其他样品均能在一定程度上促进羟基自由基的产生。其中亚硒酸促进羟基自由基产生的程度显著高于其他试验组, 3 种体系制备的 SeNPs 促进羟基自由基产生的能力

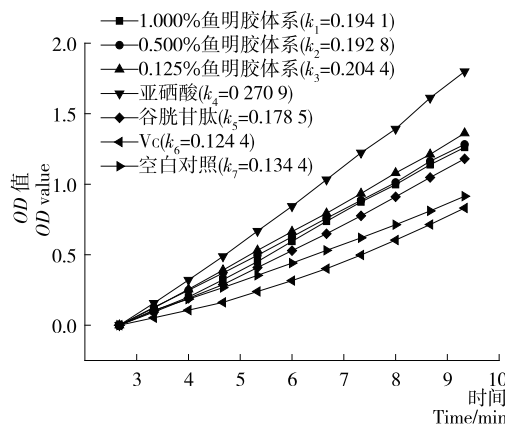


图5 SeNPs的羟基自由基清除能力测定

Figure 5 Determination of clearance ability of SeNPs

无显著差异, 但是体系中 SeNPs 含量越高, 其自氧化速率越快。这可能是硒元素在体内代谢过程中产生羟基自由基或其他形式的活性氧, 从而对机体产生氧化损伤。综上, SeNPs 可促进羟基自由基的产生, 加速邻苯三酚自氧化速率, 但 SeNPs 的促进程度又显著低于亚硒酸, 说明其生物毒性低于亚硒酸。

2.3 SeNPs 消化稳定性

由图 6 可知, 加入胃液后, SeNPs 尺寸分布主要集中在 220 nm 以上, 而其平均粒径增加至 850 nm 左右; 胃消化过程中, SeNPs 尺寸继续增加, 而经胃消化 1 h 后的硒颗粒溶液充分分散后, 在模拟肠消化过程中, 聚集的 SeNPs 又重新回到纳米尺寸, 均匀地分散于溶液中。此时, SeNPs 粒径尺寸分布主要集中在 105 nm 以下, 平均粒径 <100 nm, 且体系鱼明胶含量越少, SeNPs 平均粒径越小。综上, 胃消化过程会使 SeNPs 聚集乃至形成沉淀, 但该沉淀仅为简单堆积, 在肠消化过程中聚集状态的 SeNPs 重新分散, 拥有纳米尺寸, 表现出良好的消化稳定性。研究^[23-24]表明, 肠黏膜只能阻断 >1 mm 的颗粒, 而纳米硒颗粒可通过毛细血管深入组织。经肠消化后 SeNPs 尺寸均 <100 nm, 说明 SeNPs 可能成为硒补充剂从而被机体消化吸收。

3 结论

采用鱼明胶作为制备 SeNPs 的分散体系, 并对其粒径、形貌、抗氧化性、消化稳定性进行研究。结果表明, 鱼明胶可作为 SeNPs 制备过程中良好的分散体系, 制备出的 SeNPs 受物料分散体系浓度影响小, 呈球形, 且尺寸 <100 nm, 并具有优异的体外抗氧化能力, 且与 SeNPs 的绝对含量呈正比。此外, SeNPs 在静态模拟消化过程中表现出良好的消化稳定性。但研究仅对 SeNPs 体外相关性质进行了探索, 后续可继续采用细胞模型、动物模型开展 SeNPs 细胞抗氧化活性、细胞毒性、体内

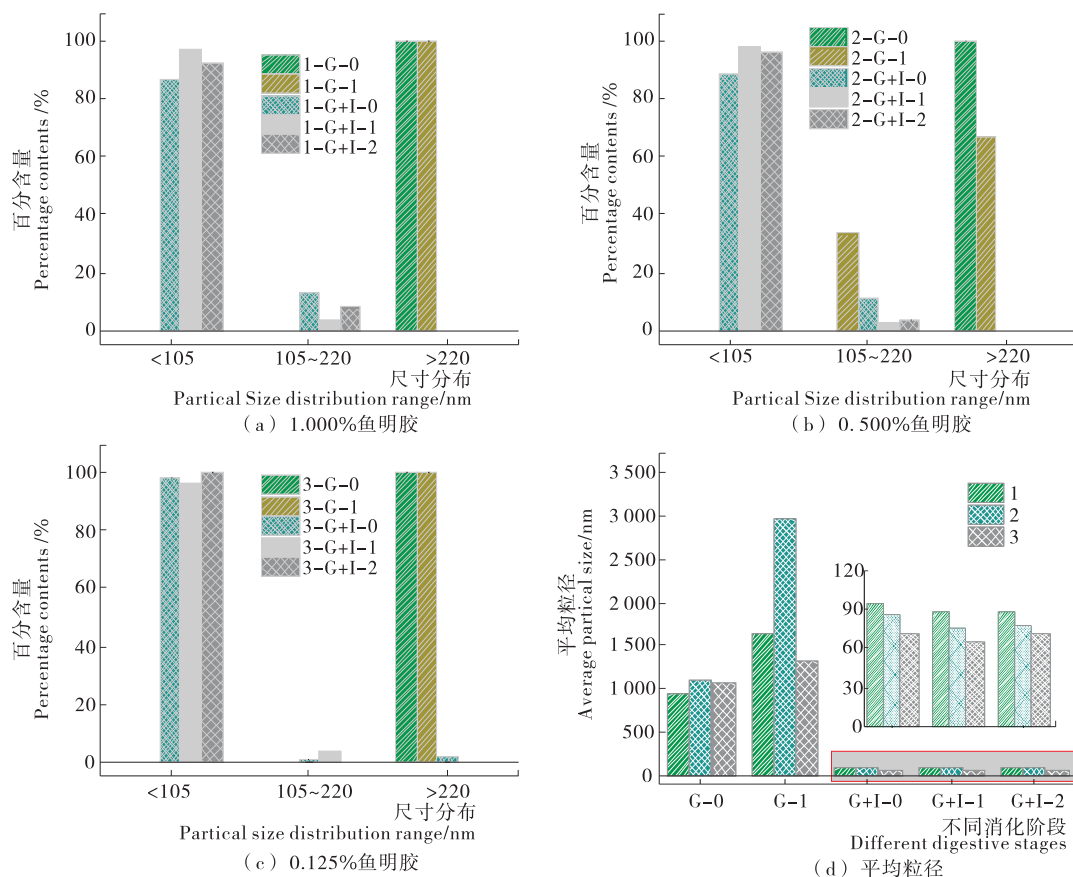


图6 SeNPs在模拟胃肠消化过程中的粒径变化图

Figure 6 Changes in particle size of SeNPs during gastrointestinal digestion

吸收机制以及 SeNPs 生理活性相关研究,进一步为 SeNPs 可能成为新型硒补充剂提供理论指导和数据支撑。

参考文献

- [1] KUROKAWA S, BERRY M J. Selenium. Role of the essential metalloid in health [M]. America: Springer, 2013: 499-534.
- [2] NOINAJ N, WATTANASAK R, LEE D, et al. Structural insights into the catalytic mechanism of *Escherichia coli* selenophosphate synthetase[J]. Journal of Bacteriology, 2012, 194(2): 499-508.
- [3] 杜朝东, 朱松, 于添, 等. 富硒碎米荠不同提取物抗氧化性能研究 [J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 174-178.
- [4] 杜明, 王聪, 张兰威, 等. 硒的生物学功能及其补充剂的研究现状[J]. 生物信息学, 2007(4): 176-178.
- [5] COMBS G F, GARBISU C, YEE B C, et al. Bioavailability of selenium accumulated by selenite-reducing bacteria[J]. Biological Trace Element Research, 1996, 52(3): 209-225.
- [6] 高学云, 张劲松, 张立德, 等. 纳米红色元素硒抑制肿瘤和提高免疫功能的作用[J]. 中国公共卫生, 2003, 19(3): 309-310.
- [7] ZHANG Jin-song, WANG Hua-li, BAO Yong-ping, et al. Nano red elemental selenium has no size effect in the induction of seleno-enzymes in both cultured cells and mice[J]. Life Sciences, 2004, 75(2): 237-244.
- [8] WANG Ting-ting, YANG Liang-bao, ZHANG Bu-chang, et al. Extracellular biosynthesis and transformation of selenium nanoparticles and application in H_2O_2 biosensor[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2010, 80(1): 94-102.
- [9] HARIHARAN H, AL-HARBI N, KARUPPIAH P, et al. Microbial synthesis of selenium nanocomposite using *Saccharomyces cerevisiae* and its antimicrobial activity against pathogens causing nosocomial infection [J]. Chalcogenide Letters, 2012, 9(12): 509-515.
- [10] TORRES S K, CAMPOS V L, LEÓN C G, et al. Biosynthesis of selenium nanoparticles by *Pantoea agglomerans* and their antioxidant activity[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2012, 14(11): 1 236.
- [11] YUAN Chen-yan, AN Yan-li, ZHANG Jia, et al. Magnetic nanoparticles for targeted therapeutic gene delivery and magnetic-inducing heating on hepatoma [J]. Nanotechnology, 2014, 25(34): 345101.

- [12] 张驰, 商龙臣, 吴少魏, 等. 载亚硒酸钠壳聚糖微球的制备、表征及缓释性能研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 39-44.
- [13] ZHANG Jin-song, GAO Xue-yun, ZHANG Li-de, et al. Biological effects of a nano red elemental selenium[J]. Bio-factors, 2001, 15(1): 27-38.
- [14] KONG Hui-ling, YANG Ji-xin, ZHANG Yi-feng, et al. Synthesis and antioxidant properties of gum arabic-stabilized selenium nanoparticles[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 65(8): 155-162.
- [15] YANG Fang, TANG Quan-ming, ZHONG Xue-yun, et al. Surface decoration by Spirulina polysaccharide enhances the cellular uptake and anticancer efficacy of selenium nanoparticles[J]. International Journal of Nanomedicine, 2012, 7(1): 835-844.
- [16] XIE Zheng-jun, HUANG Jun-rong, XU Xue-ming, et al. Antioxidant activity of peptides isolated from alfalfa leaf protein hydrolysate[J]. Food Chemistry, 2008, 111(2): 370-376.
- [17] 郑善元, 陈填烽, 郑文杰, 等. 单丛茶水提取物清除 DPPH 和 ABTS 自由基的光谱学研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(9): 2 417-2 423.
- [18] YEN Gow-chin, CHEN Hui-yin. Antioxidant activity of various tea extracts in relation to their antimutagenicity[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43(1): 27-32.
- [19] 郭雪峰, 岳永德, 汤锋, 等. 用清除超氧阴离子自由基法评价竹叶提取物抗氧化能力[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(8): 1 823-1 826.
- [20] YAN Xiao-jia, ZHANG Xin-lu, MCCLEMENTS D J, et al. Co-encapsulation of epigallocatechin gallate (EGCG) and curcumin by two proteins-based nanoparticles: Role of EGCG[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(48): 13 228-13 236.
- [21] ZHANG Jin-song, WANG Hua-li, BAO Yong-ping, et al. Nano red elemental selenium has no size effect in the induction of seleno-enzymes in both cultured cells and mice[J]. Life Sciences, 2004, 75(2): 237-244.
- [22] JIA Xue-wei, LIU Qin-ye, ZOU Si-wei, et al. Construction of selenium nanoparticles/ β -glucan composites for enhancement of the antitumor activity[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 117(2): 434-442.
- [23] SZENTKUTI L. Light microscopical observations on luminally administered dyes, dextrans, nanospheres and microspheres in the pre-epithelial mucus gel layer of the rat distal colon[J]. Journal of Controlled Release, 1997, 46(3): 233-242.
- [24] CHEN Ling-yun, REMONDETTO G E, SUBIRADE M. Food protein-based materials as nutraceutical delivery systems[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(5): 280-283.
-
- (上接第 20 页)
- [16] JAYAKUMAR R, KANTHIMATHI M S. Inhibitory effects of fruit extracts on nitric oxide-induced proliferation in MCF-7 cells[J]. Food Chemistry, 2011, 126(3): 956-960.
- [17] FENG Jian-ying, WANG Yi-hai, YI Xiao-min, et al. Phenolics from durian exert pronounced NO inhibitory and antioxidant activities[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(21): 4 273-4 279.
- [18] 谢果, 吴敏芝, 成金乐, 等. 榴莲皮提取物抗炎作用研究[J]. 广州中医药大学学报, 2015, 32(1): 130-135.
- [19] HO L H, BHAT R. Exploring the potential nutraceutical values of durian (*Durio zibethinus* L.): An exotic tropical fruit[J]. Food Chem, 2015, 168: 80-89.
- [20] SUN Yong, LI Hong-yan, HU Jiang-ning, et al. Qualitative and quantitative analysis of phenolics in Tetra-stigma hemsleyanum and their antioxidant and antiproliferative activities[J]. J Agric Food Chem, 2013, 61(44): 10 507-10 515.
- [21] CUI Shua-na, WU Qing-qing, WANG Juan, et al. Quercetin inhibits LPS-induced macrophage migration by suppressing the iNOS/FAK/paxillin pathway and modulating the cytoskeleton[J]. Cell Adh Migr, 2019, 13(1): 1-12.
- [22] LIMTRAKUL P, YODKEEREE S, PITCHAKARN P, et al. Anti-inflammatory effects of proanthocyanidin-rich red rice extract via suppression of MAPK, AP-1 and NF-kappaB pathways in Raw 264.7 macrophages[J]. Nutr Res Pract, 2016, 10(3): 251-258.
- [23] ISABELLE M, LEE B L, LIM M T, et al. Antioxidant activity and profiles of common fruits in Singapore[J]. Food Chemistry, 2010, 123(1): 77-84.
- [24] GORINSTEIN S, POOVARODOM S, LEONTOWICZ H, et al. Antioxidant properties and bioactive constituents of some rare exotic Thai fruits and comparison with conventional fruits[J]. Food Research International, 2011, 44(7): 2 222-2 232.
- [25] CACHOFEIRO V, GOICOCHEA M, DE VINUESA S G, et al. Oxidative stress and inflammation, a link between chronic kidney disease and cardiovascular disease [J]. Kidney Int Suppl, 2008, 111: S4-S9.
- [26] 王敏, 刘保林, 国旭丹. 槲皮素及其代谢物抑制氧化应激与炎症[J]. 食品科学, 2013, 34(15): 263-267.
- [27] JIANG Fan, GUAN Hai-ning, LIU Dan-yi, et al. Flavonoids from sea buckthorn inhibit the lipopolysaccharide-induced inflammatory response in RAW 264.7 macrophages through the MAPK and NF-kappaB pathways[J]. Food Funct, 2017, 8(3): 1 313-1 322.
- [28] XIE Zheng-lu, WANG Yang, HUANG Ju-qing, et al. Anti-inflammatory activity of polysaccharides from *Phellinus linteus* by regulating the NF-kappaB translocation in LPS-stimulated RAW 264.7 macrophages[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 129: 61-67.