

参赛学生姓名：唐语瞳、林昕瑶、巩卓沁

中学：西南大学附属中学校

省份：重庆市

国家/地区：中国

指导老师姓名：雷琳、刘轶

指导老师单位：西南大学、西南大学附属中学校

论文题目：胭脂萝卜花青素/纳米硒复合物的体外抗氧化能力及消化特性研究

胭脂萝卜花青素/纳米硒复合物的体外抗氧化能力及消化特性研究

唐语瞳、林昕瑶、巩卓沁

摘要：以重庆涪陵胭脂萝卜花青素提取物（RRA）为功能组分、燕麦 β -葡聚糖为稳定剂，采用抗坏血酸还原亚硒酸钠制备纳米硒复合物，考察 RRA 添加量（1 mg/mL、3 mg/mL、5 mg/mL）对纳米硒形貌特征和体外抗氧化能力的影响，并评价 1 mg/mL RRA 添加量的纳米硒复合物（RRA-1）在体外模拟消化过程中的硒释放及形貌变化。结果显示，纳米硒颗粒呈近球形，添加 RRA 后其粒径分布范围变宽。硒主要呈零价态，拉曼光谱呈现与无定形硒相符的振动特征。添加 RRA 后纳米硒复合物红外吸收带发生变化。随着 RRA 添加量增加，DPPH 和 ABTS 自由基清除率均升高。RRA-1 在胃、肠消化终点的硒释放率均低于未添加 RRA 组，且消化后仍可观察到纳米颗粒结构。本研究为胭脂萝卜花青素与纳米硒复合体系的构建及其体外消化行为评价提供了实验依据。

关键词：胭脂萝卜花青素；纳米硒；燕麦 β -葡聚糖；体外抗氧化能力；体外消化

目 录

1.1 材料与试剂	2
1.2 仪器与设备	2
1.3 实验方法	2
1.3.1 胭脂萝卜花青素/纳米硒复合物的制备	2
1.3.2 透射电子显微镜测试	3
1.3.3 X 射线光电子能谱测试	3
1.3.4 拉曼光谱测试	3
1.3.5 傅里叶变换红外光谱测试	3
1.3.6 体外自由基清除活性	3
1.3.7 体外模拟口腔-胃肠消化	3
1.3.7.1 体外模拟口腔消化	3
1.3.7.2 体外模拟口腔-胃消化	4
1.3.7.3 体外模拟口腔-胃肠消化	4
1.3.7.4 总硒含量测定	4
1.3.7.5 残渣微观结构	4
2 数据处理与统计分析	4
3 结果与讨论	5
3.1 RRA 添加量对纳米硒复合物形貌及粒径分布的影响	5
3.2 RRA 添加量对纳米硒复合物硒价态的影响	6
3.3 RRA 添加量对纳米硒复合物晶体结构的影响	7
3.4 RRA 添加量对纳米硒复合物红外光谱的影响	8
3.5 RRA 添加量对纳米硒复合物抗氧化能力的影响	9
3.6 体外模拟消化过程中硒的释放	10
3.7 体外模拟消化过程中纳米硒的形貌变化	10
4 结论	11
参考文献	12
致谢	13

硒是人体必需微量元素，其营养功能主要通过硒蛋白参与抗氧化防御、甲状腺激素代谢及免疫调节等生理过程实现^[1]。硒的生物学效应与摄入剂量和化学形态密切相关，摄入不足或过量均可能产生不利影响。因此，开发性质可控的含硒体系，并明确其理化特征和消化行为，是硒营养相关食品研究的重要内容。纳米硒作为一种纳米尺度的元素硒形态，因其体外自由基清除活性及相对低毒性受到关注^[2,3]。同时，其表面可引入有机组分，为构建兼具含硒组分与天然活性物质的复合体系提供了可能。然而，纳米硒容易发生聚集，其分散状态和结构稳定性限制了进一步应用。已有研究采用壳聚糖、卡拉胶、阿拉伯胶等多糖改善纳米硒的理化稳定性，并探索多糖与多酚共同参与的复合策略^[4,5]。这些研究为选择食品来源材料构建功能化纳米硒提供了依据。

胭脂萝卜（*Raphanus sativus* L.）是重庆涪陵的特色农业资源，也是天然萝卜红色素的重要来源，拓展其花青素的功能利用，有助于提升传统色素原料的应用价值。胭脂萝卜花青素具有体外抗氧化活性，其活性表现与化学组成及结构特征有关^[6]。胭脂萝卜花青素提取物（RRA）富含酰基化的天竺葵素和矢车菊素衍生物，具有具有抗氧化、抗增殖、缓解视力疲劳及改善心脑血管疾病等作用。将 RRA 引入纳米硒体系，有望将花青素的自由基清除能力与纳米硒的材料特征相结合，但复合后的结构特征、抗氧化能力及消化过程中的变化仍需实验评价。

本研究选择燕麦 β -葡聚糖（OA）作为稳定剂。其分子链含有 β -(1 $\rightarrow$ 3)和 β -(1 $\rightarrow$ 4)糖苷键及多个羟基位点，可为纳米硒复合体系提供多糖基质。在此基础上引入 RRA，可进一步考察花青素添加对纳米颗粒形成及功能表现的影响。因此，本研究在 OA 存在下，采用抗坏血酸还原亚硒酸钠，制备不同 RRA 添加量的复合物；利用多种光谱技术和高分辨率透射电镜表征其结构与形貌，测定 DPPH 和 ABTS 自由基清除活性，并通过体外模拟消化观察复合物硒释放与颗粒形貌变化。研究旨在明确 RRA 添加与复合体系理化及功能特征之间的关系，为重庆地产胭脂萝卜花青素的精深加工利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

OA (纯度 $\geq 90\%$) 购自合泰新光生物科技有限公司; RRA 由重庆市丹青生物技术有限公司提供。抗坏血酸 (分析纯) 购自广东光华科技股份有限公司, 亚硒酸钠 (分析纯) 购自 Alfa Aesar 公司; 硝酸和盐酸 (优级纯) 及过氧化氢 (分析纯) 购自成都市科隆化学有限公司; 实验用水为超纯水。 α -淀粉酶 (A0521, 1 000 ~ 3 000 U/mg)、胃蛋白酶 (P7125, ≥ 400 U/mg) 购自美国 Sigma 公司; 胰酶 (S10031, 胰蛋白酶 $\geq 4 000$ U/mg; 胰 α -淀粉酶 $\geq 7 000$ U/mg; 胰脂肪酶 $\geq 4 000$ U/mg) 购自上海源叶生物科技有限公司; 猪胆盐 (G8310, 纯度 $> 65\%$), 购自北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器与设备

DF-101SZ 型恒温磁力搅拌器, 巩义创远仪器制造有限公司; HT7800 型透射电子显微镜, 日本日立公司; AF-3320D 型原子荧光光谱仪, 北京北分瑞利仪器有限公司; Escalab 250XI 型 X 射线光电子能谱仪, 美国赛默飞世尔科技有限公司; Renishaw inVia 型拉曼光谱仪, 英国雷尼绍公司; Spectrum 100 型傅里叶变换红外光谱仪, 美国珀金埃尔默公司; L6 分光光度计, 上海仪电分析仪器有限公司; Scientz-10ND 真空冷冻干燥机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; H1850R 高速台式冷冻离心机; 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 胭脂萝卜花青素/纳米硒复合物的制备

将 OA 加入 85 °C 超纯水中搅拌溶解, 配制成 3 mg/mL 溶液, 于 4 °C 水合过夜。取 20 mL OA 溶液, 加入 500 μ L、0.1 mol/L 亚硒酸钠溶液, 涡旋混匀 1 min 后, 加入 1 mL、0.2 mol/L 抗坏血酸溶液。于 25 °C、1 000 r/min 条件下反应 6 h, 随后在 4 °C、12000 r/min 条件下离心 45 min, 弃去上清液, 收集沉淀, 记为 RRA-0。

向 3 mg/mL OA 溶液中加入不同浓度的 RRA 水溶液 (1、3 和 5 mg/mL), 于 25 °C 搅拌 30 min。分别取 20 mL 上述混合液, 加入 500 μ L、0.1 mol/L 亚硒酸钠溶液, 涡旋 1 min, 再加入 1 mL、0.2 mol/L 抗坏血酸溶液。于 25 °C、1 000 r/min 条件下反应 6 h, 随

后在 4 °C、12 000 r/min 条件下离心 45 min。弃去上清液，将沉淀重分散于 20 mL 超纯水中，分别记为 RRA-1、RRA-3 和 RRA-5。

1.3.2 透射电子显微镜测试

取 5 μ L 滴加到 230 目无碳方华膜铜网上，在 25 °C 下干燥过夜。透射电子显微镜（TEM）在 80 kV 的加速电压下对样品形貌进行观察。采用 Image J 软件统计分析粒径尺寸分布。

1.3.3 X 射线光电子能谱测试

将新鲜制备的纳米硒沉淀物冷冻干燥后用于 X 射线光电子能谱（XPS）测试。利用单色化的 Al K α 源在超高真空（ 7.5×10^{-11} torr）条件下对样品的表面元素组成进行分析。全光谱扫描和窄光谱扫描的通过能量分别设置为 100 和 20 eV，步长分别为 1.0 和 0.1 eV。所得光谱用 284.8 eV 的 C1s 校准。使用 Thermo Advantage 软件（v5.9931）进行高斯-洛伦兹型拟合和 Shirley 背景扣除。

1.3.4 拉曼光谱测试

采用拉曼光谱仪分析样品的振动特征，激发波长为 532 nm，每个光谱采集时间为 30 s。

1.3.5 傅里叶变换红外光谱测试

将新鲜制备的纳米硒沉淀物冷冻干燥后，室温下使用配备衰减全反射附件（ATR）的傅里叶变换红外光谱仪进行扫描，扫描范围 4000-600 cm^{-1} ，分辨率为 4 cm^{-1} ，扫描次数为 16 次。

1.3.6 体外自由基清除活性

取一定量样品溶液，进行 DPPH 自由基清除活性和 ABTS 阳离子自由基清除活性测定^[7]。

1.3.7 体外模拟口腔-胃肠消化

1.3.7.1 体外模拟口腔消化

参考 Brodtkorb 等^[8]的方法，研究体外模拟口腔过程中纳米硒复合物的释放变化。取 3 mL 样品，加入 3 mL 模拟人工唾液（含 12.5 mg/mL α -淀粉），在 37 °C 恒温水浴摇床（120 r/min）消化 5 min。在口腔消化 0 min 和 5 min 分别取样，记为 O0 和 O5，立即沸

水浴灭酶 5 min 终止反应。消化液随后在 4 °C 以 12000 r/min 离心 10 min，上清液和残渣分别收集后，-20 °C 保存待测。

1.3.7.2 体外模拟口腔-胃消化

取 3 mL 样品，按照 1.3.7.1 节中经体外模拟口腔消化 5 min 后，用 0.5 mol/L HCl 溶液调 pH 至 1.5，加入 6 mL 模拟人工胃液（含 10 mg/mL 胃蛋白酶），充入 N₂ 后在 37 °C 恒温水浴摇床继续消化，在胃消化 120 min 取样，记为 O5+G120，立即沸水浴灭酶 5 min 终止反应。消化液随后在 4 °C 以 12000 r/min 离心 10 min，上清液和残渣分别收集后，-20 °C 保存待测。

1.3.7.3 体外模拟口腔-胃肠消化

取 3 mL 样品，按照 1.3.7.2 节中经体外模拟口腔-胃消化 125 min 后，用饱和 NaHCO₃ 溶液调 pH 至 6.8，加入 8 mL 模拟人工肠液（含 25 mg/mL 胰酶和 9 mg/mL 猪胆盐），充入 N₂ 后在 37 °C 恒温水浴摇床继续消化，在肠消化 120 min 取样，记为 O5+G120+I120，立即沸水浴灭酶 5 min 终止反应。消化液随后在 4 °C 以 12000 r/min 离心 10 min，上清液和残渣分别收集后，-20 °C 保存待测。

1.3.7.4 总硒含量测定

采用 GB 5009.93—2017 方法测定上清液总硒含量。硒释放率计算公式如下：

$$\text{释放率}/\% = \frac{m_t}{m_0} \quad (1)$$

式中： m_0 ，为纳米硒复合物总硒含量， μg ； m_t ，为 O0、O5、O5+G120 或 O5+G120+I120 阶段样品上清液中总硒含量， μg 。

1.3.7.5 残渣微观结构

参照 1.3.2 的方法，对消化后收集的残渣进行观察。

2 数据处理与统计分析

测定结果以“平均值 $\pm$ 标准差”表示（ $n=3$ ），使用 SPSS 26.0 版软件进行单因素方差分析(ANOVA)，进一步 Posthoc 分析采用 Duncan 法进行多重比较。P < 0.05 认为差异有统计学意义。

3 结果与讨论

3.1 RRA 添加量对纳米硒复合物形貌及粒径分布的影响

如图 1 所示，仅添加 OA 的实验组（图 1A）形成了均一透亮的橙红色溶液。溶液的红色是由于单质硒颗粒表面等离子体振动的激发，代表无定形纳米硒的生成^[9]。随着 RRA 添加量增加，溶液红色呈现逐渐变深的趋势。TEM 图像显示，四组样品均观察到近球形纳米硒粒子，RRA-0 样品纳米硒粒子较小，添加 RRA 后形成较大纳米硒粒子，同时部分区域存在团聚现象，这可能是由于多酚在纳米硒表面的组装所致。

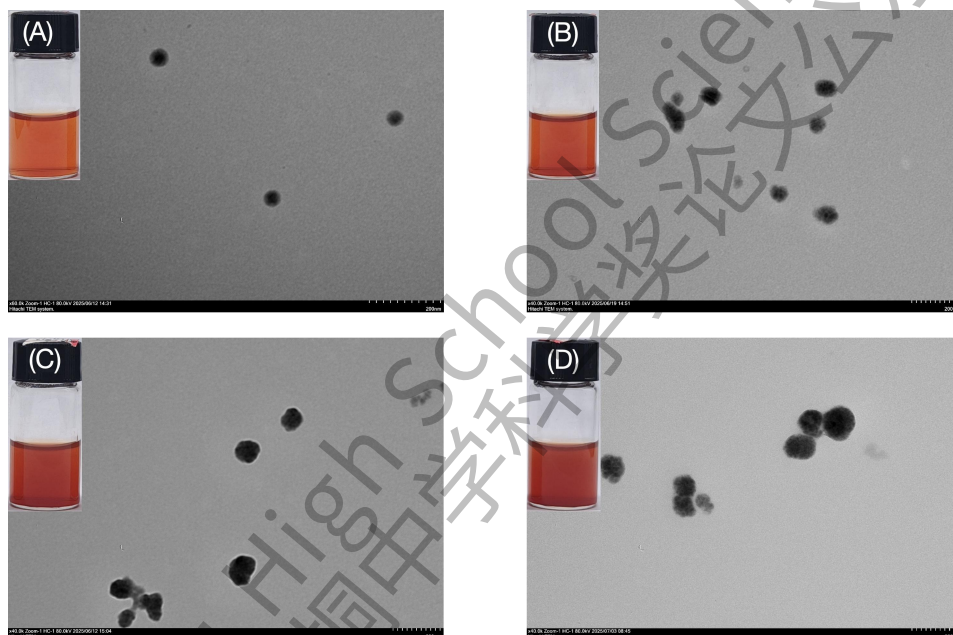


图 1 RRA 添加量对纳米硒复合物外观及 TEM 形貌的影响

注：A, RRA-0; B, RRA-1; C, RRA-3; D, RRA-5（比例尺为 200 nm）。

对纳米硒复合物粒径进行统计（图 2），结果表明，随着 RRA 添加量增加，纳米硒复合物粒径分布范围变宽，RRA-0、RRA-1、RRA-3、RRA-5 的平均粒径分别为 45 nm、76 nm、82 nm、97 nm，说明 RRA 添加导致纳米硒颗粒发生聚集，整体分散性下降。

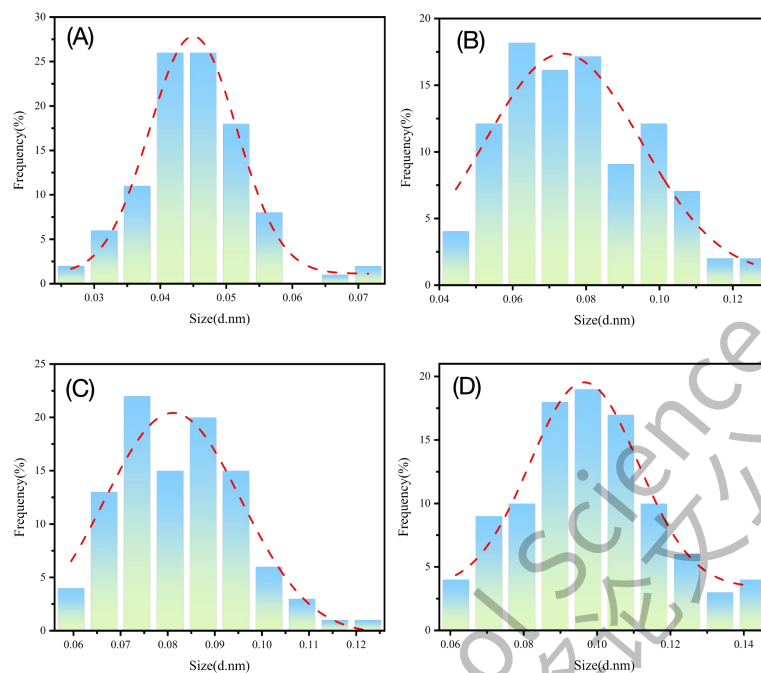


图 2 RRA 添加量对纳米硒复合物粒径分布的影响
注：A, RRA-0; B, RRA-1; C, RRA-3; D, RRA-5。

3.2 RRA 添加量对纳米硒复合物硒价态的影响

采用 XPS 对纳米硒复合物中的硒价态进行表征，结果如图 3 所示。全谱扫描显示（图 3A），荷载不同添加量 RRA 的纳米硒复合物同时存在硒（Se）、碳（C）和氧（O）的特征信号。其中，C 和 O 信号来源于 OA，表明多糖对纳米硒的成功包覆^[10]。Se 3d 轨道的特征结合能位于 55 eV，且在 59.5 eV 附近没有检测到归属于亚硒酸钠（ Se^{4+} ）的特征峰，说明 Se^{4+} 已被完全还原为零价态硒（ Se^0 ）^[11]。进一步对 Se 3d 轨道进行窄区高分辨扫描发现，没有添加 RRA 时，纳米硒复合物的 Se 3d_{3/2} 和 Se 3d_{5/2} 峰分别位于 55.98 eV 和 55.08 eV（图 3B）。随着 RRA 添加量增加，Se 3d 双峰结合能发生了轻微偏移（图 3C-E），这可能是 RRA 导致 Se 3d 轨道电子环境发生了改变，说明 RRA 与纳米硒复合物之间存在非共价键合。

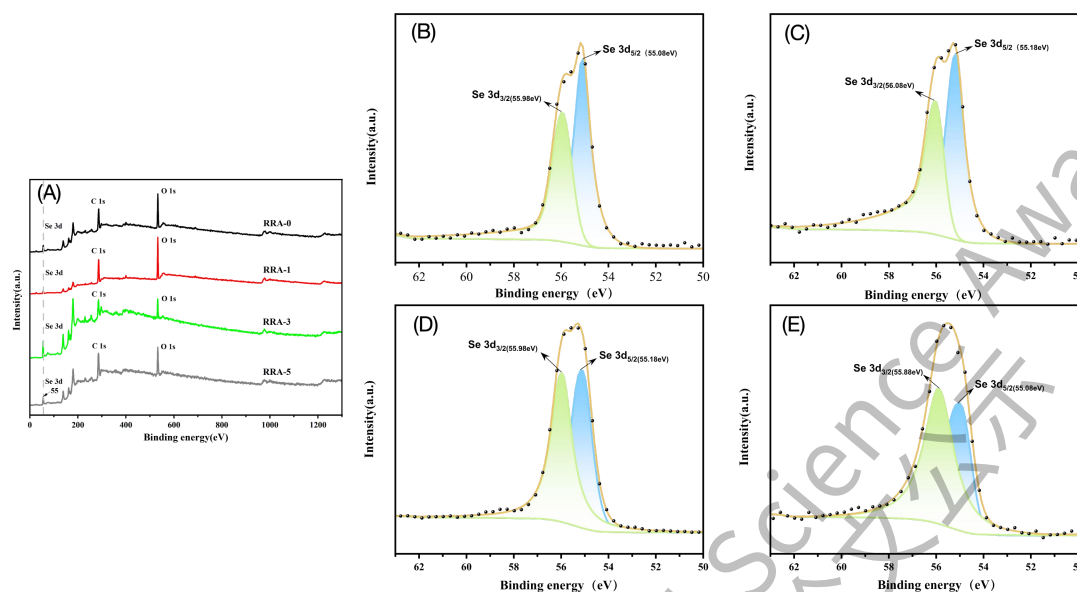


图 3 RRA 添加量对纳米硒复合物 XPS 全谱图 (A) 及 Se 3d 轨道高分辨图 (B-E) 的影响
注: B, RRA-0; C, RRA-1; D, RRA-3; E, RRA-5。

3.3 RRA 添加量对纳米硒复合物晶体结构的影响

无定形结构对纳米硒的生物活性起着关键作用^[12], 该状态下硒原子以无序方式排列, 体系处于相对较高的熵状态, 赋予了其较高的反应活性和良好的生物利用度。当无定形结构被破坏, 纳米硒转变为结晶态或进一步生长为硒纳米棒时, 体系熵值降低, 结构趋于稳定, 但生物利用度也随之显著下降。

拉曼光谱分析揭示了 RRA 对纳米硒晶体结构及稳定性影响 (图 4)。结果表明, 所有样品在 253 cm^{-1} 附近呈现出宽泛的特征共振峰, 表明不同添加量 RRA 获得的纳米硒均具有无定形结构。随着 RRA 含量增加, 无定形硒特征峰的峰面积呈现逐渐减小的趋势, 且归属于花青素的特征峰 620 cm^{-1} 附近的信号在所示光谱中逐渐突出, 进一步验证了纳米硒有效荷载 RRA。

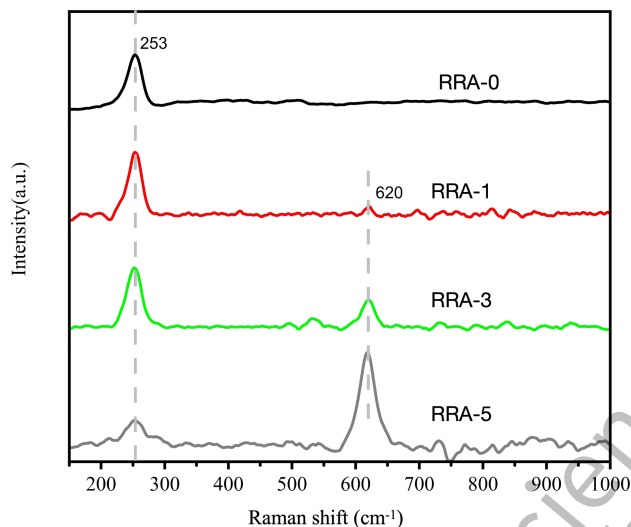


图 4 RRA 添加量对纳米硒复合物拉曼光谱图的影响

3.4 RRA 添加量对纳米硒复合物红外光谱的影响

图 5 所示，在 $3200\sim3500\text{ cm}^{-1}$ 、 $2850\sim3000\text{ cm}^{-1}$ 和 $1000\sim1300\text{ cm}^{-1}$ 范围内的吸收带分别对应于多糖 O-H、C-H 和 C-O 的振动。与 OA 相比，所有纳米硒复合物的 -OH 特征峰均发生了红移，说明硒可能主要通过氢键 ($\text{O-H}\cdots\text{Se}$) 与 OA 的多糖链结合^[13]。此外，荷载 RRA 的纳米硒复合物在 $\sim 1620\text{ cm}^{-1}$ 和 $\sim 830\text{ cm}^{-1}$ 出现新的吸收峰，这些吸收峰归属于花青素苯环骨架的 C=C 伸缩振动，且峰强度随 RRA 浓度增加而增强，表明 RRA 成功荷载于纳米硒复合物中。

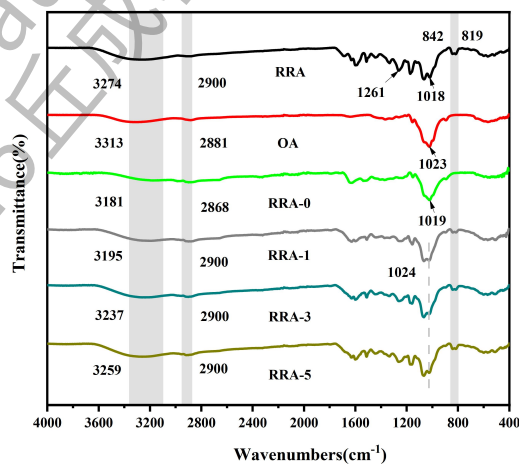


图 5 RRA 添加量对纳米硒复合物红外光谱图的影响

3.5 RRA 添加量对纳米硒复合物抗氧化能力的影响

如图 6 所示，RRA-0、RRA-1、RRA-3 和 RRA-5 的 DPPH 自由基清除率依次约为 17%、22%、31%和 49%，ABTS 自由基清除率依次约为 16%、29%、40%和 80%。两种体系均呈现随 RRA 添加量增加而显著升高的趋势，这与 RRA 中酚羟基的自由基清除能力相一致，表明花青素成功荷载于纳米硒复合物中。综合粒径、均一性及体外抗氧化能力表现，选择 RRA-0 和 RRA-1 进行体外消化实验。

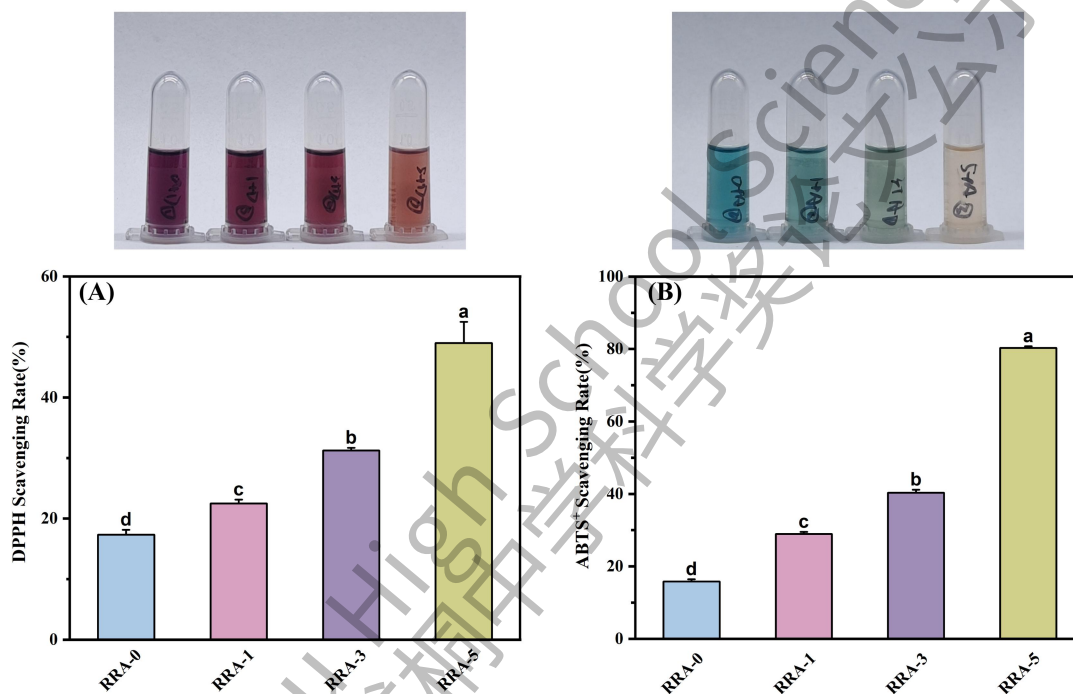


图 6 RRA 添加量对纳米硒复合物体外抗氧化活性的影响

注：a-d 不同小写上标字母表示不同样品具有显著性差 ($P < 0.05$)。

3.6 体外模拟消化过程中硒的释放

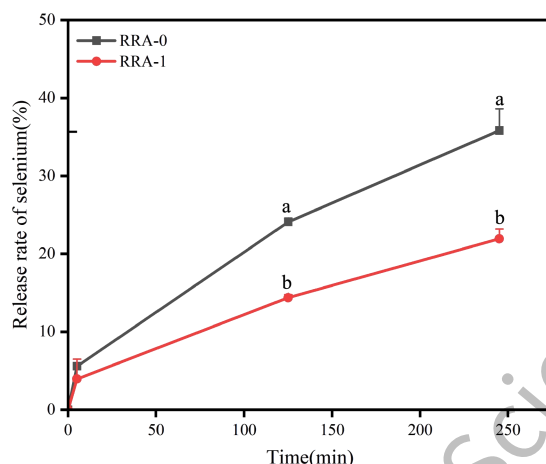


图 7 RRA-0 和 RRA-1 纳米硒复合物在体外消化过程中的硒释放率

注：0~5 min 为体外口腔消化，5~125 min 为体外胃消化，125~245 min 为体外小肠消化。ab 不同小写上标字母表示不同样品具有显著性差 ($P < 0.05$)。

图 7 显示，RRA-0 与 RRA-1 纳米硒的硒释放率均随体外消化时间延长增加，且 RRA-1 纳米硒复合物在体外胃-肠消化阶段的硒释放率均显著低于 RRA-0 纳米硒复合物，说明 RRA 与纳米硒组装在一定程度上延缓硒的释放速率。

3.7 体外模拟消化过程中纳米硒的形貌变化

图 8 表明，体外口腔消化刚开始时 (O0)，两组均可见完整的纳米颗粒结构。开始消化后，RRA-0 的颗粒形貌趋于模糊，部分区域出现团聚；而 RRA-1 仍保持相对完整的球形轮廓，进一步佐证了花青素包覆层对纳米硒结构具有保护作用。

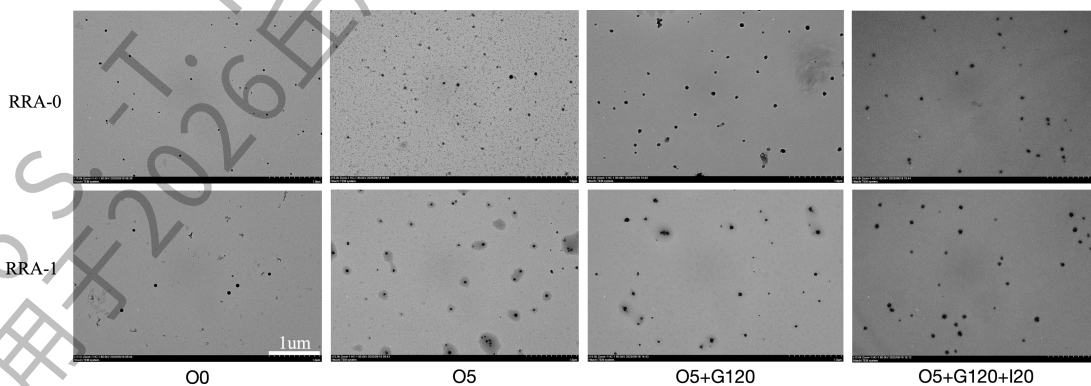


图 8 RRA-0 和 RRA-1 纳米硒复合物体外消化产物微观结构

注：O0, 体外口腔消化 0 min; O5, 体外口腔消化 5 min; O5+G120, 体外连续口腔-胃消化 125 min; O5+G120+I20, 体外连续口腔-胃肠消化 245 min (比例尺为 1 μm)。

4 结论

本研究以 OA 为稳定剂，在抗坏血酸还原亚硒酸钠的过程中引入 RRA，制备了不同 RRA 添加量的纳米硒复合样品。TEM 及粒径分布表明，颗粒总体呈近球形，RRA 复合样品的尺寸分布整体向较大范围偏移，部分视野可见局部聚集。光谱结果显示，RRA 加入伴随有机组分振动特征变化，样品中的硒主要呈零价态，并具有与无定形硒相符的拉曼特征。随 RRA 添加量增加，两种自由基清除率均升高。添加 1 mg/mL RRA 的纳米硒复合物在体外胃-肠消化后的硒释放率低于未添加 RRA 组，消化后两组均仍可观察到颗粒。结果表明，添加 RRA 可改变纳米硒复合体系的理化特征、体外抗氧化表现及硒释放率，为重庆地方特色资源的功能开发提供了一定的理论基础。后续需结合实际负载量及其在体外发酵中的益生特性，进一步区分游离组分与颗粒组分的贡献，并评价其稳定性、吸收及安全性，以期进一步明确该复合体系的应用潜力。

参考文献

- [1] Rayman M P. Selenium and human health[J]. *The Lancet*, 2012, 379(9822): 1256–1268.
- [2] Huang B, Zhang J, Hou J, Chen C. Free radical scavenging efficiency of Nano-Se in vitro[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2003, 35(7): 805–813. DOI: 10.1016/S0891-5849(03)00428-3.
- [3] Wang H, Zhang J, Yu H. Elemental selenium at nano size possesses lower toxicity without compromising the fundamental effect on selenoenzymes: comparison with selenomethionine in mice[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2007, 42(10): 1524–1533.
- [4] Song X, Chen Y, Sun H, Liu X, Leng X. Physicochemical stability and functional properties of selenium nanoparticles stabilized by chitosan, carrageenan, and gum Arabic[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 255: 117379. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117379.
- [5] Zhou J, Zhang D, Lv X, et al. Green synthesis of robust selenium nanoparticles via polysaccharide-polyphenol interaction: design principles and structure-bioactivity relationship[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(6): 2052–2062. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c06048.
- [6] Jiang W, Zhou X. Hydrolysis of radish anthocyanins to enhance the antioxidant and antiproliferative capacities[J]. *Food Chemistry*, 2019, 294: 477–485.
- [7] 张嘉妮, 张晓轩, 王大毛等. 乳酸菌发酵改善脱脂富硒米糠的抗氧化活性[J]. *食品科学*. 2023, 44(24), 146-154
- [8] Brodtkorb A, Egger L, Alminger M, et al. INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion[J]. *Nature Protocols*, 2019, 14: 991–1014. DOI: 10.1038/s41596-018-0119-1.
- [9] Borah S N, Goswami L, Sen S, et al. Selenite bioreduction and biosynthesis of selenium nanoparticles by *Bacillus paramycoides* SP3 isolated from coal mine overburden leachate[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 285: 117519.
- [10] Chen W, Cheng H, Xia W. Construction of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide functionalized selenium nanoparticles for the enhancement of stability and antioxidant activity[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(2): 240.
- [11] Chen Y, Stoll S, Sun H, et al. Stability and surface properties of selenium nanoparticles coated with chitosan and sodium carboxymethyl cellulose[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 278: 118859. Bai K, Hong B, He J, et al. Preparation and antioxidant properties of selenium nanoparticles-loaded chitosan microspheres[J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2017, 12: 4527-4539.
- [12] Li K, Li J, Zhang S, et al. Amorphous structure and crystal stability determine the bioavailability of selenium nanoparticles[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 465: 133287.
- [13] Song X, Chen Y, Sun H, et al. Physicochemical stability and functional properties of selenium nanoparticles stabilized by chitosan, carrageenan, and gum Arabic[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 255: 117379.)

致谢

本课题的完成，离不开雷琳老师、李贞霞老师、刘轶老师、范林佳老师的耐心指导，也离不开我们三位学生在研究过程中的相互支持与共同努力。在此，我们向老师以及所有曾给予我们帮助的人表示诚挚的感谢。

最初接触这个课题时，我们对科研的认识还比较有限。课题从重庆涪陵胭脂萝卜这一地方特色资源出发，将其中的花青素与纳米硒结合，探究其抗氧化能力及消化特性。随着研究不断深入，我们逐渐意识到，一个看似简单的问题，真正做起来往往需要反复实验、认真分析和不断调整。

在整个研究过程中，老师们给予了我们无偿的指导。从研究思路和实验方案的确定，到实验操作、结果分析，再到论文撰写，老师们始终在关键环节给予建议和帮助。当我们对实验结果产生疑问，或者不知道应该如何继续时，老师们会和我们一起分析问题、寻找原因，而不是直接给出答案。这种指导让我们逐渐学会独立思考，也让我们第一次真正体会到科研工作的严谨与耐心。

我们三位学生共同参与了课题的实施。前期，我们一起查阅资料、了解研究背景并梳理实验思路；实验过程中，我们参与样品制备、表征、抗氧化实验及模拟消化实验，并共同整理和分析实验数据；后期，我们一起讨论实验结果、修改论文。三个人在研究中的具体工作各有侧重，但遇到问题时，我们会相互讨论、相互提醒，尽可能共同解决。对我们而言，这不仅是一项需要完成的研究任务，也是一次真正意义上的团队合作经历。

科研过程中并非所有实验都能一次得到理想结果。面对实验条件、操作细节以及数据分析中的问题，我们通过查阅资料、重新梳理实验步骤、反复检查数据，并及时向老师请教，逐步找到解决办法。论文从最初的零散资料，到最终形成较完整的研究报告，也经历了多次修改。这个过程虽然有过迷茫和反复，但也让我们更加理解了“严谨”二字的含义。

感谢雷琳老师和李贞霞老师给予我们的指导与信任，也感谢在实验和论文完成过程中帮助过我们的老师、同学。更感谢我们三个人在这段研究经历中的陪伴与坚持。也许这项研究还有许多不足，但它让我们第一次认真地走近科研，学会提出问题、面对问题，也学会在一次次尝试中寻找答案。这段经历本身，就是我们收获的一部分。