

西瓜皮热浸出液介导合成纳米硒粒子的表征及其抗氧化活性测定

赖思蓉, 潘梦娟, 陈代坤, 李东, 贾振华, 雷雨*
(四川轻化工大学生物工程学院, 四川宜宾 628400)

摘要: 纳米硒 (SeNPs) 因其比表面积大, 具有抗氧化、抗菌等性能而广泛应用于材料、食品、农业等领域。该研究利用西瓜皮热浸出液介导合成 SeNPs 粒子, 借助扫描电镜、拉曼光谱、X-射线衍射仪及 FT-IR 红外光谱等确认 SeNPs 的形成并分析其外观特征, 通过测定其对 ABTS⁺、DPPH 自由基的清除能力明确 SeNPs 的抗氧化活性。结果表明, 西瓜皮热浸出液介导合成的 SeNPs 为球形颗粒状, 其平均粒径为 211.4 nm, 能谱分析证实了 Se 含量为 22.66%; X-射线衍射图谱未显示出尖锐的布拉格反射, 表明 SeNPs 粒子为非结晶态; FT-IR 红外光谱分析显示 SeNPs 表面有大分子蛋白质、酚类、醇类等大分子物质, 这可能与维持 SeNPs 粒子的稳定性和分散性有关; 此外, 抗氧化活性测试结果表明, 西瓜皮热浸出液介导合成的 SeNPs 在质量浓度 500 $\mu\text{g/mL}$ 时, 对 ABTS⁺、DPPH 自由基清除率分别为 83.80%、94.34%。综上所述, 西瓜皮热浸出液成功介导合成了平均粒径为 211.4 nm 且具备抗氧化活性的球形 SeNPs 粒子, 该研究为纳米硒生物合成及其抗氧化活性应用提供了一定的理论参考。

关键词: 西瓜皮热浸出液; 纳米硒合成; 表征; 抗氧化能力

文章编号: 1673-9078(2025)08-207-214

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.8.0559

Characterization and Antioxidant Activity Determination of Selenium Nanoparticles Synthesized *via* Mediation by Watermelon Peel's Hot Leaching Solution

LAI Sirong, PAN Mengjuan, CHEN Daikun, LI dong, JIA Zhenhua, LEI Yu*

(School of Biological Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 628400, China)

Abstract: Selenium nanoparticles (SeNPs) are widely used in the fields such as materials, food, and agriculture, due to their large specific surface area, antioxidant properties, and antibacterial capabilities. In this study, SeNPs were synthesized *via* the mediation by a hot watermelon peel leaching solution. The formation of SeNPs was confirmed and their apparent

引文格式:

赖思蓉,潘梦娟,陈代坤,等.西瓜皮热浸出液介导合成纳米硒粒子的表征及其抗氧化活性测定[J].现代食品科技, 2025,41(8):207-214.

LAI Sirong, PAN Mengjuan, CHEN Daikun, et al. Characterization and antioxidant activity determination of selenium nanoparticles synthesized *via* mediation by watermelon peel's hot leaching solution [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 207-214.

收稿日期: 2024-04-25

基金项目: 四川轻化工大学研究生创新基金 (Y2022075); 四川轻化工大学大学生创新创业训练计划 (B50104992); 四川轻化工大学人才引进项目 (2019RC32)

作者简介: 赖思蓉 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品安全控制技术, E-mail: 1071606961@qq.com

通讯作者: 雷雨 (1986-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 果蔬采后保鲜, E-mail: yulei@suse.edu.cn

characteristics were analyzed using scanning electron microscopy, Raman spectroscopy, X-ray diffraction, and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The antioxidant activity of the SeNPs was evaluated by measuring their scavenging capacities for ABTS⁺ and DPPH free radicals. The findings revealed that the SeNPs synthesized via the mediation by the hot watermelon peel leaching solution were spherical granular with an average particle size of 211.4 nm, and a selenium content of 22.66% as determined by energy dispersive X-ray spectroscopy. The X-ray diffraction pattern lacked sharp Bragg reflections, indicating that the SeNPs were amorphous. FT-IR spectroscopy analysis indicated the presence of substances such as macromolecular proteins, phenols, alcohols on the surface of the SeNPs, which might contribute to their stability and dispersion. Additionally, the results of antioxidant activity tests demonstrated that at a mass concentration of 500 µg/mL, the SeNPs exhibited free radical scavenging rates of 83.80% for ABTS⁺ and 94.34% for DPPH. In conclusion, spherical SeNPs with an average particle size of 211.4 nm and notable antioxidant activity were successfully synthesized through the mediation by the hot watermelon peel leaching solution. This research provides a theoretical reference for the biosynthesis of SeNPs and application of their antioxidant properties.

Key words: hot leaching solution of watermelon peel; synthesis of nano-selenium; characterization; antioxidant activity

在过去的几十年里,纳米材料因其独特的催化、电学、磁学和光学性质,在材料、化学、物理、生化、医疗等领域中受到高度重视。纳米硒(Selenium Nanoparticles, SeNPs)即具有纳米尺寸和表面效应的红色零价硒纳米颗粒^[1]。它本质上是无机硒,但其毒性比亚硒酸钠(Na_2SeO_3)小7倍,比有机硒小3倍。此外,纳米级的尺寸使SeNPs拥有更大的比表面积,增加了其活性位点,从而提高了其生物活性,也使其具有更强的清除自由基和抑制活性氧形成的能力^[2]。SeNPs因毒性低、生物相容性和生物利用度高^[3],引起了生物医学和食品科学学者们的广泛关注。

SeNPs的合成主要分为物理、化学、生物三种方法。相比于传统的物理化学合成法,利用生物资源(细菌、真菌、植物)作为合成介质的绿色合成方法成为新的研究热点,生物合成法不仅绿色安全,而且成本低廉,较之物理、化学方法而言,合成的纳米硒粒子具有更高的生物活性、更好的生物利用度和更低的毒性^[4]。研究显示,与生物资源中的微生物合成SeNPs相比,植物提取物介导合成的SeNPs可能表现出更多的生物医学功能,这与植物中的多种活性物质有关^[5]。目前,已有利用山楂、葡萄、芦荟、核桃叶、三角梅、生姜等^[6]植物提取物制备SeNPs的研究报道。采用不同植物进行SeNPs合成也可能导致获得的SeNPs在形态、尺寸、应用特性等方面存在一定差异^[4]。农业产品加工副产物由于富含促进还原反应的生物分子,如酚类、生物碱、黄酮类、蛋白质、碳水化合物和氨基酸,正成为制备纳米材料的热点领域^[7]。西瓜果肉

鲜红多汁,是夏季消暑佳品,深受消费者喜爱,但一直以来,西瓜皮被认为经济价值低,一般直接作为废物丢弃。然而,近年来研究表明西瓜皮除富含粗蛋白、脂肪、粗纤维、碳水化合物、维生素、矿物质等营养物质,还含有生物碱、单宁、酚类、黄酮类、皂苷和植酸酶等生物活性化合物^[8],这些生物活性化合物为西瓜皮合成SeNPs提供了可能的物质条件。借助农业副产物西瓜皮绿色合成SeNPs不仅可以对合理利用废弃农产品降低生产成本,且其合成的SeNPs的毒性和生物相容性等特性可能也会有所不同。

SeNPs因优异的抗菌、抗氧化等生物活性功能使其在食品保鲜、农业生产方面的利用价值被不断挖掘,因此探索SeNPs潜在的合成途径及其特点,可为开发和合理应用SeNPs提供更多可能。本研究拟以西瓜皮热浸出液及亚硒酸钠(Na_2SeO_3)为原料生物合成SeNPs,通过扫描电镜、拉曼光谱、X-射线衍射仪及傅里叶红外光谱(FT-IR)等对所合成的SeNPs进行表征。并利用ABTS⁺、DPPH自由基清除测试,初步明确其抗氧化能力,以期对纳米硒合成提供更多可能的途径。

1 材料和方法

1.1 材料

宁夏中卫大西瓜,市售; Na_2SeO_3 (≥98%),Sigma-Aldrich;2.5%戊二醛、丙酮、过硫酸钾、L-抗坏血酸分析标准品、2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二胺盐(ABTS⁺),购自上海麦克林

生化科技有限公司; 1,1-二苯基-2-苦基肼 (DPPH)、醋酸缓冲液, 购自上海源叶生物科技有限公司。

1.2 西瓜皮热浸出液 (WL) 的制备

西瓜去除红色果肉, 得到的果皮以蒸馏水冲洗两次, 以去除杂质和灰尘, 沥干西瓜皮多余水分, 备用。称取 70 g 果皮切碎, 置于 300 mL 蒸馏水中, 100 °C 水浴 2 h 后过滤掉果皮碎, 冷却、备用。

1.3 SeNPs 的制备

参考 Alvi 等^[9]的方法并略有改动。于 WL 中加入 Na_2SeO_3 使其终浓度为 5 mmol/L。然后将培养液置于摇床 180 r/min, 37 °C 暗环境培养 48 h。培养液颜色由淡黄转变为砖红后, 将培养液 7 000 r/min 离心 20 min 以获得培养物沉淀, 实验重复三次, 合并获得的样品以丙酮和蒸馏水 (1:1) 洗涤沉淀, 再以蒸馏水对沉淀进行多次洗涤。沉淀经冷冻干燥后于 -80 °C 保存备用。

1.4 SeNPs 粒子的表征

1.4.1 紫外光谱 (UV-Vis) 分析

分别将 WL 和培养 24 h 后的含 5 mmol/L Na_2SeO_3 的西瓜皮热浸出液 (WL- Se^{4+}) 样品置于石英比色皿中, 使用紫外分光光度计 (日本岛津 UV-1900i) 于 200~800 nm 的波长范围内测定红色粉末的紫外吸收光谱。

1.4.2 扫描电子显微镜 (SEM-EDS) 及粒径 (DLS) 分析

参考 Hosseini 等^[10]的方法并略有改动。取 0.05 g 冷冻干燥后的红色粉末样品以 pH 值 7.4 的 PBS 缓冲液洗涤三次, 加入 1 mL 2.5% 戊二醛混匀, 4 °C 过夜保存。24 h 后以无菌水分别浸泡洗涤 4、5、6 min 后, 再分别以 50%、70%、85%、95% (V/V) 的乙醇对样品进行脱水处理, 每次 14 min, 最后以无水乙醇脱水处理三次, 每次 15 min, 处理完成后将样品冷冻干燥, 使用 SBC-2 离子溅射仪真空喷金后, 使用扫描电子显微镜 (捷克 TESCAN VEGA 3SBU) 分析红色粉末的表观外貌, 并外接 Bruker 光谱仪 (EDS) 对样品中所含元素进行分析。至少对三个不同视野的样品进行观察测定。将红色粉末均匀分散于 75% (V/V) 乙醇溶液中, 使用纳米粒度及 Zeta 电位分析仪 (DLS 英国 Malvern Zetasizer Nano

ZS90) 分析样品粒径。实验重复三次。

1.4.3 傅里叶红外光谱 (FT-IR) 分析

通过 FT-IR 红外光谱 (PerkinElmer Frontier) 分析存在于纳米颗粒表面的官能团。将干燥样品的 FT-IR 光谱记录在 ALPHA FTIR-ATR Bruke 光谱仪上, 波数范围为 400~4 000 cm^{-1} 。采集时间间隔为 1 s。

1.4.4 X-射线衍射仪及拉曼分析

将冷冻干燥后的红色粉末样品研磨, 过 200 目筛备测。使用 X 射线衍射仪 (XRD, 德国 Bruker D2 PHASER) 评估红色粉末的晶型结构。测试靶材为铜靶, 角度 5~90 ° 范围内, 步进 0.02 °, 每步时间 0.1 s。进行拉曼 (美国 Thermo DXR Micro) 测量以探索合成的红色粉末的晶体特性。激发波长 780 nm, 功率 4 mW, 采集间隔 1.0 s, 扫描范围 80~3 000 cm^{-1} 。

1.4.5 抗氧化活性分析

参考 Vundela 等^[2]的方法略有改动。

1.4.5.1 ABTS⁺ 自由基清除率

分别配置过硫酸钾 (2.4 mmol/L) 和 ABTS⁺ 自由基溶液 (7 mmol/L), 等体积混合得到 ABTS⁺ 工作液, 室温下避光静置 12 h, 使用前调整工作液 $A_{734\text{ nm}}=0.7$ 。取 8 mL ABTS⁺ 工作液加入不同质量浓度的 SeNPs 2 mL, 室温下避光孵育 8 min, 测量 734 nm 处的光密度, 以抗坏血酸作为标准抗氧化剂。

1.4.5.2 DPPH 自由基清除率

分别配置 DPPH 自由基溶液 (0.1 mmol/L) 和醋酸缓冲液 (0.1 mol/L), 按体积比 2:1 混合得到 DPPH 工作液, 分别取 4 mL DPPH 工作液、4 mL 甲醇、2 mL 不同浓度的 SeNPs 溶液, 混合均匀室温下避光孵育 20 min, 测量 515 nm 处的光密度, 以抗坏血酸作为标准抗氧化剂。

$$R = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

R——自由基清除率, %;

A——处理组吸光值;

A_0 ——空白组吸光值。

1.5 数据处理方法

采用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行差异显著性分析, 使用 Origin 2021 进行数据处理和作图分析。

2 结果与讨论

2.1 UV-Vis分析

特征性的红色是亚硒酸盐还原为零价元素硒的直接证据^[11]。如图 1 所示，WL 为西瓜皮热浸出液，WL-Se⁴⁺ 为含有 Na₂SeO₃ 的西瓜皮热浸出液，经过 37 ℃，180 r/min 培养 24 h 后，WL 液体转变为浑浊的淡黄色，WL-Se⁴⁺ 液体转变为浑浊的砖红色，初步表明 WL-Se⁴⁺ 中可能有零价硒（Se⁰）的生成。使用紫外-可见分光光度计在 200~800 nm 波长下测定 WL 和 WL-Se⁴⁺ 的吸收光谱（图 2），记录到 WL 在 265 nm 处存在一个特征吸收峰，这可能是由于 WL 中存在一些黄酮类化合物^[12]。WL-Se⁴⁺ 样品的紫外吸收峰相比于 WL 产生了蓝移，且吸光度值远高于 WL，两个吸收峰分别位于 225、255 nm 处，这可能与砖红色沉淀物质的形成有关，据前人研究报告^[13,14]，球形硒纳米粒子的吸收峰通常在 250~400 nm 的范围内。本研究结果符合该规律，初步证明了砖红色沉淀可能与 SeNPs 粒子的生成有关。

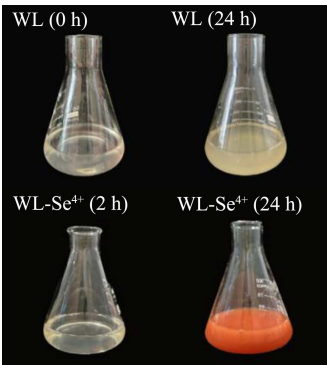


图 1 西瓜皮热浸出液（WL）和含 Na₂SeO₃ 的西瓜皮热浸出液（WL-Se⁴⁺）

Fig.1 Hot leaching solution of watermelon peel (WL) and hot leaching solution of watermelon peel containing Na₂SeO₃ (WL-Se⁴⁺)

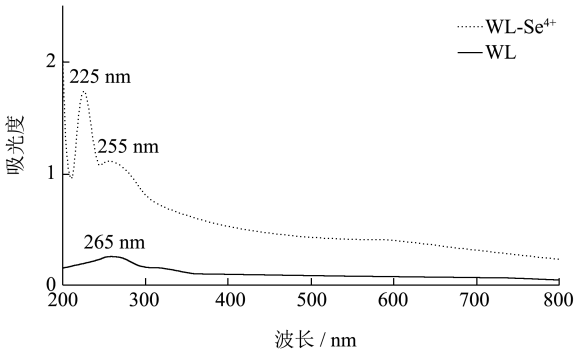


图 2 WL 和 WL-Se⁴⁺ 的 UV-Vis 吸收光谱图

Fig.2 UV-Vis absorption spectrum of WL and WL-Se⁴⁺

2.2 SEM-EDS及粒径分析

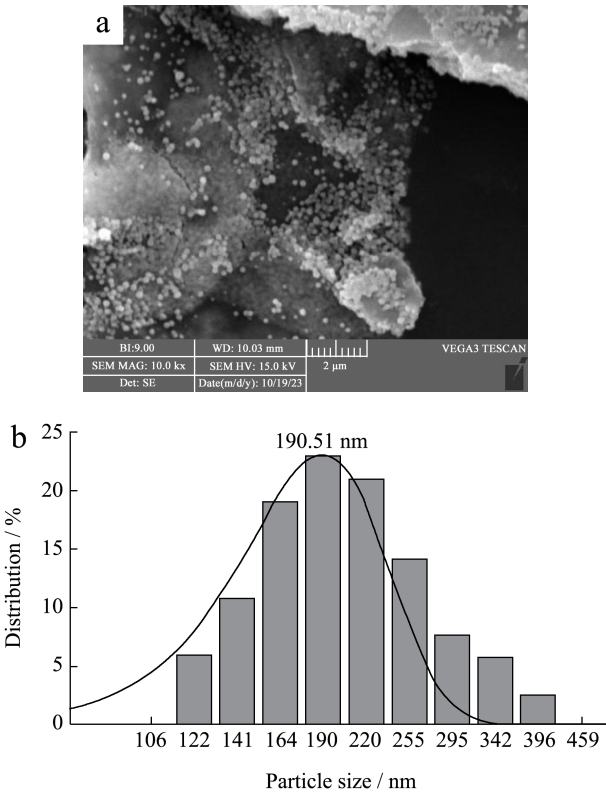


图 3 WL 介导合成 SeNPs 的 SEM 图（a）及其粒径尺寸（b）

Fig.3 SEM image (a) and particle size (b) of SeNPs mediated-synthesis by WL

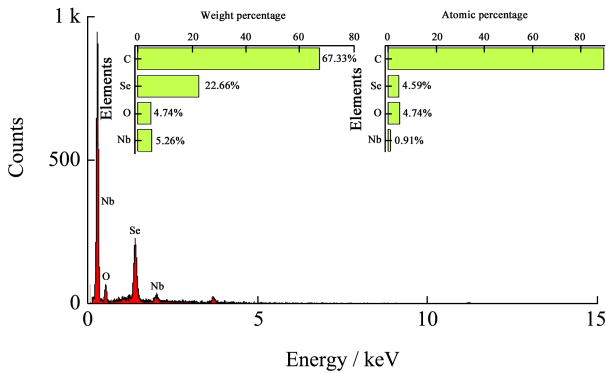


图 4 WL 介导合成的 SeNPs 的 EDS 图谱

Fig.4 EDS spectrum of SeNPs mediated-synthesis by WL

SEM 是强大而高效的分析纳米材料手段，常用于观察纳米材料的表面细微结构。图 3a 为西瓜皮热浸出物介导合成的红色粉末物质在 10 000 倍下的电镜扫描图，结果显示红色粉末为表面光滑的球形粒子。使用纳米粒度仪（DLS）进一步评估了红色沉淀的粒径大小与分布，结果如图 3b 所示，该红色粉末粒径主要分布在 122~396 nm 之间，其中 190.5 nm 占比最多为 22.92%，平均粒径为 211.4 nm。研究表明，液体介质中的颗粒形成聚

集体, DLS 测量的是聚集体的大小而不是单个纳米粒子的大小^[15], 从 SEM 扫描图 3a 中可以看出, 本次获得的红色粉末有团聚现象, 因此可能会导致粒径的测量值大于其实际尺寸。据报道^[4], 不同的反应介质、温度、方法、时间、硒酸盐浓度都会对纳米颗粒的形态及尺寸产生影响。Safadar 等^[16]利用木棉花提取物合成了尺寸范围在 30~150 nm 之间的球形 SeNPs; Naemi 等^[17]利用番红花花瓣合成了 180~250 nm 的球形 SeNPs 颗粒; Hashem 等^[18]利用石榴皮合成了平均直径为 14.5 nm 的球形 SeNPs 颗粒。SeNPs 能谱结果如图 4 所示, 合成的红色粉末样品中主要含有 C、Se、O、Nb 四种元素, 其所占的质量分数分别为 67.33%、22.66%、4.74%、5.26%。由于样品在含碳导电胶上固定, 且较为分散, 可能是导致 C 的质量百分比远高于 Se 的原因之一。EDS 图谱中 1.40 keV 处观察到的强峰是来自 Se 的典型吸收信号, 所占之质量分数为 22.66%。Yilmaz 等^[19]通过龙蒿提取物得到的 SeNPs 颗粒的 EDS 图谱在 1.35 keV 处展示出 Se 特征吸收峰。Trung 等^[20]使用绿橙皮合成 SeNPs 也得到相似的 EDS 图谱。综合前文所述西瓜皮热浸出液颜色变化、紫外吸收光谱变化、红色粉末物质电镜图及能谱分析, 均与此前报道^[4,6]的利用植物组织合成 SeNPs 报道中的结果相符, 表明此次获得的红色粉末物质即为 SeNPs。

2.3 FT-IR 红外光谱分析

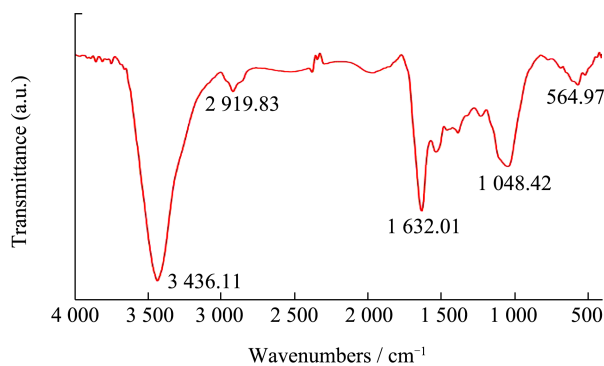


图 5 WL 介导合成的 SeNPs 的 FT-IR 红外光谱图

Fig.5 FT-IR spectrum of SeNPs mediated-synthesis by WL

通过 FT-IR 红外光谱分析进一步确定 SeNPs 合成过程中可能负责合成封端的官能团和生物分子。SeNPs 红外光谱如图 5 所示, 3 436.11、2 919.83、1 632.01、1 048.42、564.97 cm^{-1} 处有明显震动吸收峰。其中在 3 436 cm^{-1} 处的宽峰为 SeNPs 表

面 -OH 伸缩振动^[21]。2 919 cm^{-1} 附近的吸收峰为甲基、亚甲基中 C-H 对称和反对称伸缩振动^[20]。1 600~1 300 cm^{-1} 处的范围的吸收峰与 C-N 伸缩振动和 N-H 弯曲振动有关^[22]。1 048 cm^{-1} 处的吸收峰为 C-O 伸缩振动, 564 cm^{-1} 处的吸收峰与 Se-O 振动有关, 以上说明纳米硒表面可能存在含氨基、羟基等基团的生物分子, 例如蛋白质、多酚、醇类、黄酮类等。高飞等^[23]利用藏黄连多糖合成的 SeNPs 的红外光谱图中也发现相似吸收峰。Moodley 等^[21]使用绿橙皮绿色合成 SeNPs 在 1 075 cm^{-1} 和 540 cm^{-1} 位置观察到吸收峰, 本研究也在相似位置观察到吸收峰, 证实了 Se-O 和 O-Se-O 基团的存在。从光谱图吸收峰可以看出, 西瓜皮热浸出物介导合成的 SeNPs 中存在醇类、蛋白质和酚类等大分子物质。这些生物分子发挥其还原功能促进形成 SeNPs, 并包裹在 SeNPs 的表面, 有利于降低 SeNPs 的表面自由能, 一定程度上保证了其分散性和稳定性^[24]。

2.4 SeNPs 晶体学结构分析

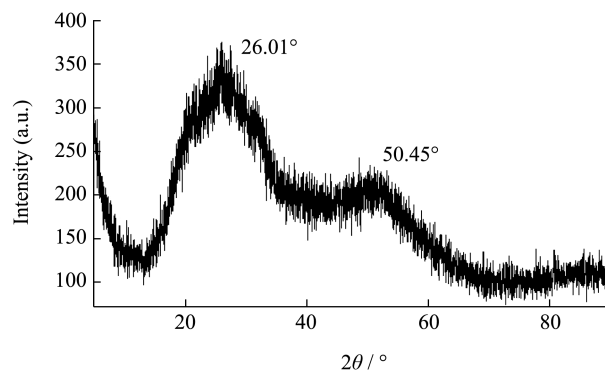


图 6 WL 介导合成的 SeNPs 的 XRD 图谱

Fig.6 XRD patterns of SeNPs mediated-synthesis by WL

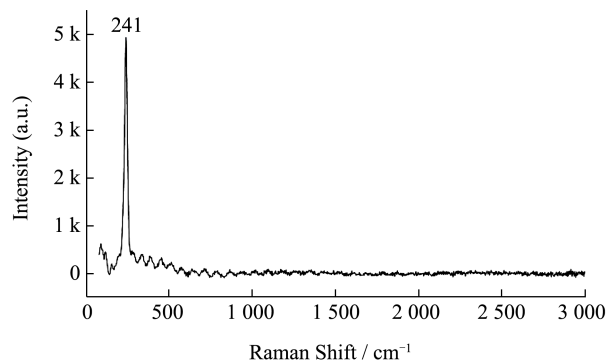


图 7 WL 介导合成的 SeNPs 的拉曼图谱

Fig.7 Raman spectrum of SeNPs mediated-synthesis by WL

借助 XRD 分析可知 SeNPs 样品是否具有晶型结构。结果如图 6 所示, 测试发现 20~60 ° 范围内

存在两个宽峰, 且无任何单一尖锐的布拉格反射, 可能是由于西瓜皮热浸出物介导还原的 SeNPs 粒径较小, 对 X 射线的弥散现象严重, 峰强变弱, 峰变宽, 表现出无定形的非晶结构。事实上, 已有研究表明^[25]生物还原的大多数 SeNPs 通常都是无定形的。拉曼光谱是一种对晶型和非晶形材料都敏感的光谱技术, 广泛应用于材料研究领域。SeNPs 样品的拉曼光谱如图 7 所示, 拉曼光谱是一种对晶型和非晶形材料都敏感的光谱技术, 广泛应用于材料研究领域。前人研究结果^[26,27]表明, 无定形态是 Se 的一种非晶体结构, 其在拉曼光谱中的特征峰位于 250 cm^{-1} 左右, 其归因为 Se-Se 的伸缩振动。本研究中, $80\sim 3\,000\text{ cm}^{-1}$ 扫描范围内, 西瓜皮热浸出物介导生成的 SeNPs 在 241 cm^{-1} 处显示出一个单一强峰, 其应为无定形元素 Se 的特征峰, 进一步佐证了 Se^{4+} 已成功转化为 Se^0 。

2.5 抗氧化活性分析

抗氧化活性分析主要考察了合成的 SeNPs 对 ABTS^+ 、DPPH 自由基的清除率 (图 8、9)。结果表明, SeNPs 对 ABTS^+ 、DPPH 自由基的清除率表现出质量浓度依赖, 随着 SeNPs 质量浓度的上升, 对 ABTS^+ 、DPPH 自由基的清除率显著上升 ($P < 0.05$)。在 $31.25\sim 500\text{ }\mu\text{g/mL}$ 的质量浓度范围内, 同样质量浓度的 SeNPs 对 DPPH 自由基的清除率较 ABTS^+ 自由基的清除率高。当 SeNPs 质量浓度为 $500\text{ }\mu\text{g/mL}$ 时, SeNPs 对 ABTS^+ 、DPPH 的清除率最高, 分别为 83.80% 、 94.34% 。番木瓜果实提取物合成的 SeNPs 在质量浓度为 $80\text{ }\mu\text{g/mL}$ 时, 对 ABTS^+ 、DPPH 自由基的清除率已与 Vc 相当^[2]。余甘果提取物合成的 SeNPs 对 DPPH 和 ABTS^+ 自由基清除活性的 EC_{50} (抑制 50% 自由基所需的有效质量浓度) 分别为 15.67 和 $18.84\text{ }\mu\text{g/mL}$ ^[28]。利用藏黄连多糖合成的硒纳米颗粒平均粒径为 101.96 nm , 其质量浓度为 10 mg/mL 时对 DPPH 和 ABTS^+ 自由基清除能力分别为 66.85% 和 84.92% ^[23]。研究显示^[29]SeNPs 中的 Se 基团可以激活异构化碳的 H 原子, 从而提高对自由基的清除能力。SeNPs 的抗氧化能力与粒径有关^[30]。颗粒越小, SeNPs 的比表面积就越大, 单位重量下可以提供更多的自由基反应位点, 则其表现出更强的抗氧化能力。进一步的, SeNPs 的抗氧化活性还取决于它们的均匀性^[31]。本次获得的 SeNPs

样品平均粒径为 211.4 nm , 加之 SeNPs 的团聚情况, 可能是造成其抗氧化能力减弱的原因。

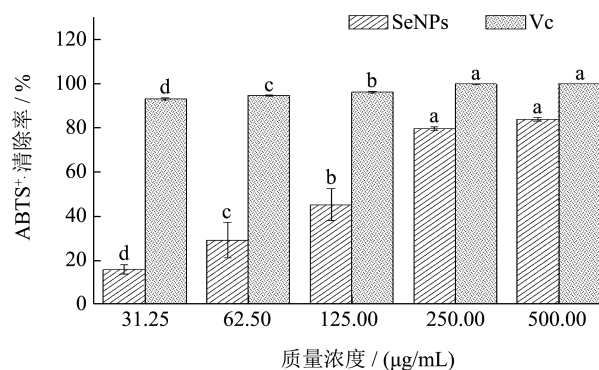


图 8 WL 介导合成的 SeNPs 对 ABTS^+ 自由基的清除率

Fig.8 The scavenging rate of ABTS^+ of SeNPs mediated-synthesis by WL

注: 图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

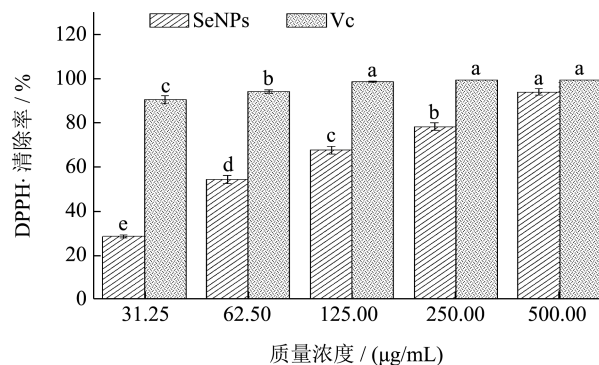


图 9 WL 介导合成的 SeNPs 对 DPPH 自由基的清除率

Fig.9 The scavenging rate of DPPH of SeNPs mediated-synthesis by WL

3 结论

本文以西瓜皮热浸提物合成纳米硒粒子, 并对其合成的纳米硒粒子进行表征和抗氧化活性分析。结果表明, 西瓜皮热浸出物能够还原 Na_2SeO_3 合成平均粒径为 211.4 nm 的非结晶态球形纳米硒粒子, 粒子表面有蛋白质、酚类、醇类等大分子物质包覆。当纳米硒质量浓度为 $500\text{ }\mu\text{g/mL}$ 时, 其对 ABTS^+ 、DPPH 自由基清除率分别为 83.80% 、 94.34% 。本研究丰富了纳米硒生物合成的途径, 并为其抗氧化活性情况提供了一定的理论参考。进一步的研究中将西瓜皮的热浸物的主要成分做深入分析, 解析不同化学成分对纳米硒表征和抗氧化能力的影响。

参考文献

- [1] XIAO X, DENG H, LIN X, et al. Selenium nanoparticles: Properties, preparation methods, and therapeutic applications [J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2023, 378: 110483.
- [2] VUNDELAS R, KALAGATURN K, NAGARAJ A, et al. Multi-Biofunctional properties of phytofabricated selenium nanoparticles from *Carica papaya* fruit extract: antioxidant, antimicrobial, antimycotoxin, anticancer, and biocompatibility [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 12: 769891.
- [3] MANJUNATHA C, PRERAN R P, BHARDWAJ P, et al. New insights into synthesis, morphological architectures and biomedical applications of elemental selenium nanostructures [J]. *Biomedical Materials*, 2020, 16(2): 22010.
- [4] HUSSAIN A, LAKHAN M N, HANAN A, et al. Recent progress on green synthesis of selenium nanoparticles-a review [J]. *Materials Today Sustainability*, 2023, 23: 100420.
- [5] NAYAK V, SINGH K R B, SINGH A K, et al. Potentialities of selenium nanoparticles in biomedical science [J]. *New Journal of Chemistry*, 2021, 45(6): 2849-2878.
- [6] PYRZYNSKA K, SENTKOWSKA A. Biosynthesis of selenium nanoparticles using plant extracts [J]. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 2022, 12(4): 467-480.
- [7] REGUENGO L M, SALGACO M K, SIVIERI K, et al. Agro-industrial by-products: Valuable sources of bioactive compounds [J]. *Food Research International*, 2022, 152: 110871.
- [8] ZIA S, KHAN M R, SHABBIR M A, et al. An update on functional, nutraceutical and industrial applications of watermelon by-products: A comprehensive review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 114: 275-291.
- [9] ALVI G B, IQBAL M S, GHAITH M M S, et al. Biogenic selenium nanoparticles (SeNPs) from citrus fruit have antibacterial activities [J]. *Sci Rep*, 2021, 11: 4811.
- [10] HOSSEINI F, HADIAN M, LASHANI E. et al. Simultaneous bioreduction of tellurite and selenite by *Yarrowia lipolytica*, *Trichosporon cutaneum*, and their co-culture along with characterization of biosynthesized Te-Se nanoparticles [J]. *Microb Cell Fact*, 2023, 22: 193.
- [11] KORA A J, RASTOGI L. Bacteriogenic synthesis of selenium nanoparticles by *Escherichia coli* ATCC 35218 and its structural characterization [J]. *Iet Nanobiotechnology*, 2017, 11(2): 179-184.
- [12] ADIBIAN F, GHADERI R S, SABOURI Z, et al. Green synthesis of selenium nanoparticles using *Rosmarinus officinalis* and investigated their antimicrobial activity [J]. *BioMetals*, 2022, 35: 147-158.
- [13] HASSAN H U, RAJA N I, ABASI F, et al. Comparative study of antimicrobial and antioxidant potential of *Olea ferruginea* fruit extract and its mediated selenium nanoparticles [J]. *Molecules*, 2022, 27: 5194.
- [14] VYAS J, RANA S. Antioxidant activity and green synthesis of selenium nanoparticles using allium sativum extract [J]. *International Journal of Phytomedicine*, 2017, 9(4): 634.
- [15] KAPUR M, SONI K, KOHLI K. Green synthesis of selenium nanoparticles from broccoli, characterization, application and toxicity [J]. *Advanced Techniques in Biology & Medicine*, 2017, 5: 1-7.
- [16] SAFADAR M, ASLAM S, AKRAM M, et al. *Bombax ceiba* flower extract mediated synthesis of Se nanoparticles for antibacterial activity and urea detection [J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2023, 39(3): 80.
- [17] NAEMI S, MESHKINI A. Phytosynthesis of graphene oxide encapsulated selenium nanoparticles using *Crocus sativus* petals' extract and evaluation of their bioactivity [J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2023, 81: 104286.
- [18] HASHEM A H, SAIED E, ALI O M, et al. Pomegranate peel extract stabilized selenium nanoparticles synthesis: promising antimicrobial potential, antioxidant activity, biocompatibility, and hemocompatibility [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2023, 195: 5753-5776.
- [19] YILMAZ M T, TSIRLI H, TAYLAN O, et al. A green nano-biosynthesis of selenium nanoparticles with *Tarragon* extract: Structural, thermal, and antimicrobial characterization [J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2021, 141: 110969.
- [20] TRUNG D B, HANH G T H, BA LONG DO, et al. Green orange peel-mediated bioinspired synthesis of nanoselenium and its antibacterial activity against methicillin-resistant staphylococcus aureus [J]. *ACS Omega*, 2022, 7(40): 36037-36046.
- [21] MOODLEY J S, KRISHNA S B N, PILLAY K, et al. Green synthesis of silver nanoparticles from *Moringa oleifera* leaf extracts and its antimicrobial potential [J]. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2018, 9(1): 015011.
- [22] GOMATHI M, PRAKASAM A, RAJKUMAR P V. Green synthesis, characterization and antibacterial activity of silver nanoparticles using *Amorphophallus paeoniifolius* leaf extract [J]. *Journal of Cluster Science*, 2019, 30(4): 995-1001.
- [23] 高飞, 李友英, 范潇, 等. 藏黄连多糖-硒纳米颗粒的制备、结构表征及体外抗炎活性[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(11): 175-184.
- [24] MICHAEL N, NOAH N M, ANDALA D M, et al. Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using *Citrullus lanatus* fruit rind extract [J]. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2017, 1: 8108504.
- [25] WU Z, REN Y, LIANG Y, et al. Synthesis, Characterization, immune regulation, and antioxidative assessment of yeast-derived selenium nanoparticles in cyclophosphamide-induced rats [J]. *ACS Omega*, 2024, 38: 24585-24594.

- [26] SANS S, GALLARDOB C, MELO F, et al. A comparative study of the synthesis and characterization of biogenic selenium nanoparticles by two contrasting endophytic selenobacteria [J]. *Microorganisms*, 2023, 11(6): 1600.
- [27] TUGAROVA A V, MAMCHENKOVA P V, DYATLOVA Y A, et al. FTIR and Raman spectroscopic studies of selenium nanoparticles synthesised by the bacterium *Azospirillum thiophilum* [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2018, 192: 458-463.
- [28] GUNTI L, DASS R S, KALAGATUR N K. Phytofabrication of selenium nanoparticles from *Emblica officinalis* fruit extract and exploring its biopotential applications: antioxidant, antimicrobial, and biocompatibility [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 931.
- [29] GAO P, BIAN J, XU S, et al. Structural features, selenization modification, antioxidant and anti-tumor effects of polysaccharides from alfalfa roots [J]. *International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions*, 2020, 149: 207-214.
- [30] TANG L, LUO X, WANG M, et al. Synthesis, characterization, *in vitro* antioxidant and hypoglycemic activities of selenium nanoparticles decorated with polysaccharides of *Gracilaria lemaneiformis* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 193: 923-932.
- [31] SENTKOWSKA A, PYRZYNSKA K. The influence of synthesis conditions on the antioxidant activity of selenium nanoparticles [J]. *Molecules*, 2022, 27(8): 2486.