陈野, 寇德正, 商龙臣, 等. 葛仙米多糖纳米硒结构表征及其体外抗氧化、抑制癌细胞活性 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 120−129. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050233

CHEN Ye, KOU Dezheng, SHANG Longchen, et al. Structure Characteristic, *in Vitro* Antixodant and Anticancer Activityof Polysaccharide of *Nostoc sphaeroides* Kützing Nano-Selenium Particles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 120−129. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050233

·研究与探讨·

# 葛仙米多糖纳米硒结构表征及其体外抗氧化、抑制癌细胞活性

陈　野[1,2], 寇德正[2], 商龙臣[2], 李　伟[2], 程　超[1,2,*]

（1.硒资源研究与生物应用湖北省重点实验室（湖北民族大学）, 湖北恩施 445000;
2.湖北民族大学生物与食品工程学院, 湖北恩施 445000）

**摘　要:** 目的：探究葛仙米多糖（Polysaccharide of *Nostoc sphaeroides* Kützing，PNSK）对纳米硒（Nano-Selenium Particles，SeNP）的稳定修饰作用机制及修饰前后生理活性的变化。方法：以 PNSK 为原料，采用亚硒酸钠（$Na_2SeO_3$）-抗坏血酸（$V_C$）氧化还原法制备葛仙米多糖纳米硒（Polysaccharide of *Nostoc sphaeroides* Kützing Nano-Selenium Particles，PNSK-SeNP），通过紫外可见光谱、高效液相色谱、X 射线衍射、红外光谱、X 射线光电子能谱等对 PNSK 及 PNSK-SeNP 的结构进行了表征，并对比分析了 PNSK 及 PNSK-SeNP 的抗氧化、抑制癌细胞活性。结果：PNSK-SeNP 的硒含量为 52.03±0.20 mg/g，粒径为 166.83±4.51 nm，PNSK-SeNP 制备前后的单糖摩尔比变化不显著。PNSK-SeNP 的 X 射线光电子能谱图中具有 Se 3d 信号峰，硒元素以 0 价态存在，红外光谱和 X 射线光电子能谱图均表明 PNSK-SeNP 中葛仙米多糖的主要结构和官能团未发生变化，纳米硒与 PNSK 间未形成新的化学键。抗氧化测定发现，PNSK 和 PNSK-SeNP 对羟自由基（·OH）的半抑制浓度（Half maximal inhibitory concentration，$IC_{50}$）分别为 4.45 和 0.55 mg/mL，对 2,2-联氮-二（3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸）二铵盐自由基（$ABTS^+$）的 $IC_{50}$ 值分别为 4.58 和 0.79 mg/mL，对 A549 肺癌细胞的 $IC_{50}$ 分别为 0.87 和 0.06 mg/mL，同时 PNSK-SeNP 可以有效抑制 A549 肺癌细胞迁移，诱导其凋亡。相关性分析发现 PNSK-SeNP 的硒含量与其抗氧化、抑癌作用具有显著相关性。结论：PNSK 可有效稳定纳米硒，且 PNSK-SeNP 的体外抗氧化、抑制癌细胞活性较 PNSK 均显著增加。

**关键词:** 葛仙米多糖, 纳米硒, 结构表征, 抗氧化, 抑制癌细胞

**中图分类号:** TS201.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0120−10

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025050233　　本文网刊:

# Structure Characteristic, *in Vitro* Antixodant and Anticancer Activity of Polysaccharide of *Nostoc sphaeroides* Kützing Nano-Selenium Particles

**CHEN Ye[1,2], KOU Dezheng[2], SHANG Longchen[2], LI Wei[2], CHENG Chao[1,2,*]**

（1.Hubei Key Laboratory of Selenium Resource Research and Biological Application (Hubei Minzu University), Enshi 445000, China;
2.College of Biological and Food Engineering, Hubei Minzu University, Enshi 445000, China）

**Abstract:** Objective: To explore the stabilization and modification mechanisms of Polysaccharide of *Nostoc sphaeroides* Kützing (PNSK) on nano-selenium particles (SeNP), and the changes in biological activity before and after modification. Method: Using polysaccharide of PNSK as the raw material, Polysaccharide of *Nostoc sphaeroides* Kützing nano-selenium

**收稿日期:** 2025−05−26

**基金项目:** 国家自然科学基金（31560434）;硒资源研究与生物应用湖北省重点实验室（湖北民族大学）开放课题（PT10202304）。

**作者简介:** 陈野（2001−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品化学, E-mail: 1297175142@qq.com。

*** 通信作者:** 程超（1976−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学, E-mail: chengchaolw@126.com。

particles (PNSK-SeNP) was prepared by the sodium selenite ($Na_2SeO_3$) and ascorbic acid ($V_C$) redox method. The structure of PNSK and PNSK-SeNP were characterized by UV-Vis spectroscopy, high-performance liquid chromatography, X-ray diffraction, infrared spectroscopy, and X-ray photoelectron spectroscopy. The antioxidant and anticancer activity of PNSK and PNSK-SeNP were comparatively analyzed. Results: The selenium content of PNSK-SeNP was 52.03±0.20 mg/g and the particle size was 166.83±4.51 nm. No obvious difference was observed in the molar ratio of monosaccharides of PNSK-SeNP before and after preparation. The presence of a Se 3d signal peak in the X-ray photoelectron spectroscopy of PNSK-SeNP, and the selenium element existed in the 0-valent state. Both infrared spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy indicated that the main structure and functional groups of PNSK were preserved in PNSK-SeNP, and no new chemical bonds were formed between SeNP and PNSK. The antioxidant assay found that the $IC_{50}$ of PNSK and PNSK-SeNP for hydroxyl radical (·OH) were 4.45 and 0.55 mg/mL, respectively, and for 2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), diammonium salt radicals ($ABTS^+$) were 4.58 and 0.79 mg/mL, respectively, and for the A549 lung cancer cells were 0.87 and 0.06 mg/mL, respectively. Meanwhile, the migration of A549 lung cancer cells could be effectively inhibited by PNSK-SeNP, and apoptosis could also be induced. A significant correlation between the selenium content of PNSK-SeNP and its antioxidant and anticancer effects were revealed by correlation analysis. Conclusion: Nano-selenium can be effectively stabilized by PNSK, and the *in vitro* antioxidant and anti-cancer activities of PNSK-SeNP can be significantly enhanced compared with PNSK.

**Key words:** polysaccharide of *Nostoc sphaeroides* Kützing; nano-selenium; structure characteristic; antixodant; anticancer

硒是人体必需的微量营养元素之一，对维持机体正常生命活动至关重要[1]。纳米硒（Selenium nanoparticles, SeNP）是硒的一种新形式，具有较好的生物相容性和较低的毒性，因此众多科研工作者聚焦纳米硒的制备及活性研究。目前常用抗坏血酸（$V_C$）还原亚硒酸盐来制备 SeNP，然而 SeNP 在常温下不稳定，因此需要加入稳定剂来提高 SeNP 的稳定性。多糖的长链或支链结构可以为单质硒原子簇提供有利微环境，使单质硒沿链形成多糖纳米硒，因此多糖是 SeNP 理想的修饰剂和稳定剂[2]。与此同时，多糖与纳米硒的互补性结合，提高了多糖纳米硒（Polysaccharide-SeNP）的生物学活性，如靶向肿瘤细胞、智能调控血糖、提高机体的抗氧化能力等[2]。

不同来源的多糖修饰纳米硒的方式不同。如猴头菇多糖可通过-OH、-C=O 等基团与纳米硒结合[3]，黄精多糖可与纳米硒形成新的亚硒酸酯键[4]，霍山石斛多糖与纳米硒形成 Se-O 键[5]，龙须菜多糖和纳米硒之间通过物理吸附作用相结合[6]，而岩藻多糖的-OH 通过共轭效应与硒结合修饰稳定分散纳米硒[7]。此外超支化葡聚糖酸化处理后会自聚形成规则的球形颗粒，将亚硒酸钠（$Na_2SeO_3$）包裹在内部空腔中，经 $V_C$ 原位还原形成纳米硒，而天然超支化多糖是由 $V_C$ 边还原边将纳米硒进行包裹[8]。此外，多糖纳米硒结合产物的生物活性较天然多糖的变化也有差异，如猴头菇多糖纳米硒对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基（DPPH）的清除能力是多糖的 4 倍[3]；8 mg/mL的霍山石斛多糖纳米硒对羟自由基的清除能力是天然多糖的 8 倍[5]；桔梗多糖纳米硒对 MGC-803 和 BGC-823 胃癌细胞的抑制率是天然多糖的 2 倍[9]。

葛仙米（*Nostoc sphaeroides* Kützing）是一种低等单细胞蓝藻，多糖含量为 47.56%[10]。莫开菊[11]发现葛仙米多糖主要以多分支的柔性长链、无分支或分支较少的刚性支链等形态存在，部分支链具有单螺旋结构，且具有一定的抗氧化和抑制肿瘤细胞生长的能力。Tang 等[12] 发现葛仙米多糖（Polysaccharide of *Nostoc sphaeroides* Kützing, PNSK）可有效清除超氧阴离子自由基、羟自由基等，且资料报道多糖纳米硒的抗氧化和抑制癌细胞活性均较天然多糖有所提高[3,5,9]，但 PNSK 是否对 SeNP 具有修饰稳定效果且修饰后的葛仙米多糖纳米硒功能如何尚属未知，因此本文以 PNSK 为原料，采用 $Na_2SeO_3$-$V_C$ 氧化还原法制备多糖纳米硒，通过对其结构表征来初步明确葛仙米多糖对纳米硒的修饰稳定方式，并对比分析葛仙米多糖和葛仙米多糖纳米硒（Polysaccharide of *Nostoc sphaeroides* Kützing Nano-Selenium Particles, PNSK-SeNP）的体外抗氧化和抑制癌细胞活性，探究 SeNP 对 PNSK 生物活性的影响，从而进一步丰富稳定修饰纳米硒的多糖来源，同时也为葛仙米资源的深度开发利用奠定基础。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料与仪器

葛仙米　购于恩施市享买乐超市；正丁醇、亚硒酸钠、硝酸、硼氢化钾、三氯化铁、无水醋酸钠、冰醋酸、碳酸氢钠、过硫酸钾、乙酸铵、溴化钾、碘化丙啶、过氧化氢　分析纯（AR），国药集团化学试剂有限公司；胰蛋白酶（1∶250）　美国 Amresco；鲁米诺（GR）　西格玛奥德里奇（上海）贸易有限公司；2,2-联氮-二（3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸）二铵盐自由基（ABTS）、2,4,6-三（2-吡啶基）-1,3,5-三嗪（TPTZ）　梯希爱（上海）化成工业发展有限公司；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基（DPPH）　成都西亚化工股份有限公司；人肺癌细胞 A549　中国科学院细胞库公司。

UV9000S 紫外可见分光光度计　上海元析仪器有限公司；FD8-8 冷冻干燥机　瑞士布奇公司；AFS-

930d原子荧光光度仪　北京吉天仪器有限公司；Nicolet is5傅里叶红外光谱仪、K-alpha X 射线光电子能谱仪　美国赛默飞世尔科技有限公司；LabRAM HR Evolution 拉曼光谱仪　日本 HORIBA 集团；D8 Advance X 射线衍射仪　德国 Bruker 科技有限公司；Nano-ZS ZEN3600 纳米粒度分析仪　英国 Malvern 仪器有限公司。

### 1.2　实验方法

1.2.1　PNSK 的制备　以蒸馏水为溶剂，固液比 1∶100，浸提温度 100 ℃，浸提时间 1 h 的条件提取 PNSK，使用 200 目尼龙布过滤，收集滤液，滤渣相同条件重复提取一次，收集滤液，两次滤液混合后，10000 r/min 离心 12 min，收集上清液，浓缩、醇沉（乙醇最终浓度为 80%），冷冻干燥得葛仙米粗多糖。而后按多糖∶Sevage=4∶1 除蛋白，充分振摇 20~30 min，蛋白质与三氯甲烷、正丁醇生成凝胶物而分离，随后离心，分去水层和溶剂层交界处的变性蛋白质[10]。重复上述操作直至无蛋白层，冷冻干燥。

1.2.2　PNSK-SeNP 的制备　将 10 mL、20 mmol/L 亚硒酸钠与 10 mL、8 mmol/L 的 $V_C$ 溶液混合，然后缓慢滴入 50 mL 质量浓度为 2.0 mg/mL 的 PNSK 溶液和 30 mL 蒸馏水，40 ℃ 磁力搅拌反应 4 h，用 3 kDa 透析袋透析，直到用抗坏血酸法检测不到游离亚硒酸钠（反应溶液由红色变为无色）[13]，冷冻干燥。

1.2.3　硒含量测定　采用原子荧光分光光度法[14] 测定硒含量。配制 50 μg/mL 硒标液，而后稀释成不同浓度硒溶液，取各稀释液 1 mL 分别置于消解管中，分别加入 8 mL 浓硝酸及 2 mL 高氯酸，石墨消解炉中消解，消解完全后在 140 ℃ 赶酸至 1 mL，添加 5 mL 50% 的盐酸，100 ℃ 继续加热至溶液剩余 1 mL，定容至 25 mL，使用原子荧光分光光度仪进行测定，以硒含量（μg/mL）为横坐标，以荧光强度 A 为纵坐标绘制标准曲线。拟合得回归方程为：y=131.4x−20.639，$R^2$=0.9998。配制 1 mg/mL 的 PNSK、PNSK-SeNP 溶液，充分溶解后，取 1 mL 放入消解管中，按标准曲线的方式进行消解和测定，硒含量按照公式（1）计算。

$$\text{硒含量(mg/g)}=\frac{A+20.639}{131.4\times1000\times M}\times V \qquad \text{式（1）}$$

式中：V：样品总体积（mL）；M：样品重量（g）。

1.2.4　总糖含量测定　采用苯酚-硫酸法[15] 测定总糖含量。配制 0.1 mg/mL 的标准葡萄糖溶液，吸取不同体积的标准葡萄糖溶液于具塞试管中，加蒸馏水补至 1 mL，后分别加入 2 mL 6% 苯酚溶液和 5 mL 浓硫酸，充分混匀后，沸水浴 20 min，冷却后于 490 nm 处测定吸光值。以标准葡萄糖含量（mg/mL）为横坐标，$A_{490}$ 吸光值为纵坐标绘制标准曲线，拟合得回归方程：y=0.7371x+0.0014，$R^2$=0.9994。分别配制 0.1 mg/mL 的 PNSK、PNSK-SeNP 的溶液，取 1 mL 溶液按标准曲线的方法测定。总糖含量按照公式（2）计算。

$$\text{总糖含量(\%)}=\frac{A_{490}-0.0014}{0.7371\times M}\times V\times100 \qquad \text{式（2）}$$

式中：V：样品总体积（mL）；M：样品重量（mg）。

1.2.5　糖醛酸含量测定　采用间羟基联苯法[16] 测定糖醛酸含量。配制 0.1 mg/mL 的葡萄糖醛酸标准溶液，吸取不同体积的此标准溶液于具塞试管中，添加蒸馏水至 1 mL，预冷后加入四硼酸钠-硫酸溶液 6 mL，充分混匀，沸水浴 15 min，冷却至室温后加入 0.15% 间羟基联苯 80 μL 混匀，静置 30 min，于 525 nm 处测定吸光值，以葡萄糖醛酸含量（mg/mL）为横坐标，以吸光值 $A_{525}$ 为纵坐标绘制标准曲线。拟合得回归方程为：y=0.8078x-0.0016，$R^2$=0.9997。分别配制 0.1 mg/mL 样品溶液，取 1 mL 按标准曲线的方法进行测定。糖醛酸含量按照公式（3）计算。

$$\text{糖醛酸含量(\%)}=\frac{A_{525}+0.0016}{0.8078\times M}\times V\times100 \qquad \text{式（3）}$$

式中：V：样品总体积（mL）；M：样品重量（mg）。

1.2.6　单糖组成分析　将 100 μL 质量分数为 5 mg/mL 样品溶液与 100 μL 浓度为 4 mol/L 的三氟乙酸混合，110℃ 水解 5 h。将水解后的样品和单糖标准品按照莫开菊[11] 的方法进行衍生，然后利用高效液相色谱仪进行检测。

HPLC 分析条件：色谱柱：$C_{18}$ 柱（250 mm×4.6 mm，5 μm）；流动相：A 相乙腈，B 相 50 mmol/L 乙酸铵；0~60 min：梯度洗脱，流速 1 mL/min，进样量 10 μL，检测波长 250 nm，柱温为 30 ℃[11]。以摩尔浓度为横坐标，峰面积为纵坐标绘制标准曲线，单糖物质的量按照公式（4）计算。

$$n=\frac{S-b}{a\times M}\times0.01 \qquad \text{式（4）}$$

式中：n 为单糖物质的量；S 为单糖峰面积；b 为纵截距；a 为斜率；M 为摩尔质量。

1.2.7　PNSK 和 PNSK-SeNP 的结构表征

1.2.7.1　粒径分布测定　配制 1 mg/mL 样品溶液，充分溶解后，采用纳米粒度仪测定其粒度分布[5]。

1.2.7.2　紫外光谱扫描　配制 1 mg/mL 样品溶液，使用紫外-可见分光光度计进行 200~800 nm 波长扫描[17]。

1.2.7.3　拉曼光谱分析　使用拉曼光谱仪进行扫描，测试条件：波长 633 nm，波长范围 0~4000 nm，间隔 5 μm，分辨率 2 $cm^{-1}$，采光时间 1 s，激光功率 10%[18]。

1.2.7.4　傅里叶红外光谱分析　KBr 压片法：将少量样品与 KBr 混合，研磨均匀后压片，在 4000~400 $cm^{-1}$ 范围内扫描[19]。

1.2.7.5　X 射线衍射（XRD）分析　X 射线衍射仪测试条件：Cu-k$\alpha$ 辐射，2$\theta$ 为 5°~40°，管流 40 mA、管压 40 kV，扫描速率 4°/min[20]，结晶度计算见式（5）。

$$结晶度(\%)=\frac{A}{A+B}\times 100 \qquad 式（5）$$

式中：A 为结晶区面积；B 为无定形区面积。

1.2.7.6　X 射线光电子能谱（XPS）测定　称取适量多糖样品进行 X 射线光电子能谱测定，以 Mg K$\alpha$ 线作为激发源，能量为 29.35 eV，样品仓压力为 $2.67\times10^{-7}$ Pa，电压为 15 kV，功率为 200 W，结合能测试精度为 0.3 eV，定标物为碳[21]。

1.2.8　PNSK 和 PNSK-SeNP 的抗氧化活性

1.2.8.1　PNSK 和 PNSK-SeNP 对羟自由基的清除能力　采用流动注射发光法[22]，分别配制 0.1 mmol/L 鲁米诺-碳酸盐缓冲溶液、$4\times10^{-8}$ mol/L 的 $FeSO_4$ 和 0.15% 的 $H_2O_2$ 溶液，1、2、3、4、5 mg/mL 的 PNSK 和 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 的 PNSK-SeNP 溶液。将 $FeSO_4$∶$H_2O_2$ 溶液按 1∶1（V∶V）混合即·OH 产生溶液。通过副蠕动泵通道将鲁米诺-碳酸盐缓冲溶液和·OH 产生溶液输入混合、分析系统，基线稳定后，主蠕动泵分别将蒸馏水、样品溶液泵入，混合器混合后测定其发光强度，以鲁米诺-$H_2O_2$-$FeSO_4$-蒸馏水发光强度为空白。参数：点压 400 V，增益 1，频率 50 Hz，频次 20 次/s。按式（6）计算清除率。

$$清除率(\%)=\frac{F_a-F_b}{F_a}\times 100 \qquad 式（6）$$

式中：$F_a$ 表示空白发光强度；$F_b$ 表示样品发光强度。

1.2.8.2　PNSK 和 PNSK-SeNP 对 $ABTS^+$自由基的清除能力　将 7 mmol/L ABTS 溶液和 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液等体积混合，室温避光反应 12~16 h，得 $ABTS^+$自由基储备液，使用磷酸盐缓冲液（10 mmol/L，pH7.4）将储备液稀释至 734 nm 处吸光值为 0.70±0.02，得 $ABTS^+$自由基工作液。配制 1、2、3、4、5 mg/mL 的 PNSK 和 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 的 PNSK-SeNP 溶液，分别取此样品溶液 1 mL，加入 3 mL $ABTS^+$自由基工作液，暗处反应 5 min，测定 $A_{734}$[23]，按式（7）计算清除率。

$$清除率(\%)=\left(1-\frac{A_i-A_j}{A_0}\right)\times 100 \qquad 式（7）$$

式中：$A_i$ 为样品组吸光度；$A_j$ 为空白组的吸光度；$A_0$ 为 $ABTS^+$自由基工作液吸光度。

1.2.8.3　PNSK 和 PNSK-SeNP 的总还原力　总还原力通过铁离子还原法（FRAP）测定，将 300 mmol/L、pH3.6 醋酸缓冲液、10 mmol/L 的 TPTZ 溶液、20 mmol/L 的 $FeCl_3$ 溶液以 10∶1∶1（V∶V∶V）配制成 FRAP 工作液，分别取 50、100、200、400、600、800 和 1000 μmol/mL Trolox 溶液 0.1 mL 于试管中，加入 2.9 mL FRAP 工作液、37 ℃ 水浴 10 min，测定 593 nm 吸光度，同时以 0.1 mL 蒸馏水加入 2.9 mL FRAP 工作液作对照[23]，以 Trolox 浓度为横坐标，$A_{593}$ 吸光值为纵坐标绘制 Trolox 标准曲线，标准曲线为 y=0.0034x+0.0055，$R^2$=0.9991；配制 1、2、3、4、5 mg/mL 的 PNSK 和 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 的 PNSK-SeNP 溶液，分别取此样品溶液 0.1 mL，加入 2.9 mL FRAP 工作液，37 ℃ 水浴 10 min，测定 $A_{593}$。根据吸光度计算 Trolox 当量（Trolox equivalent antioxidant activity，TEAC），以 TEAC 值表示 FRAP，μmol/mL。

1.2.9　PNSK 和 PNSK-SeNP 的抑制癌细胞活性测定

1.2.9.1　A549 肺癌细胞悬液制备　将长势良好的 A549 肺癌细胞配成 $2\times10^4$ cells/mL 细胞悬液备用。

1.2.9.2　PNSK 和 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞增殖抑制效果　取 100 μL A549 肺癌细胞悬液加入 96 孔培养板，培养箱培养 24 h（37 ℃，5% $CO_2$），而后分别加入用完全培养基配制 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 的 PNSK 和 0.05、0.1、0.2、0.4、0.6 mg/mL 的 PNSK-SeNP 溶液，继续孵育 24 h。将CCK-8∶培养基=1∶9 配制成工作液，每孔加入 100 μL 工作液，在培养箱内孵育 30 min（37 ℃，5% $CO_2$），用酶标仪测定 450 nm 处的吸光度[24]。

1.2.9.3　PNSK 和 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞迁移效果　取 2 mL A549 肺癌细胞悬液加入 6 孔培养板中，培养箱培养 24 h（37 ℃，5% $CO_2$），在细胞汇合度为 90% 后，用枪头在六孔板中划痕，用预冷的磷酸缓冲盐溶液（PBS）洗掉细胞碎片，而后分别加入不同浓度样品溶液，拍照并标记划痕观察点。而后在培养箱中继续培养，隔 12、24 h 在固定划痕位置拍照，并测量划痕宽度计算细胞迁移率[24]。

1.2.9.4　PNSK 和 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞凋亡影响　取 A549 肺癌细胞悬液 2 mL 加入 6 孔培养板中，在培养箱预培养 24 h（37 ℃，5% $CO_2$）。分别加入不同浓度的样品溶液处理 24 h，胰酶消化离心后，用预冷的 PBS 洗两次后，加 1 mL Binding buffer 重悬细胞，重悬液中吸取 100 μL 先加入 5 μL AnnexinV-FITC 染液，再加入 5 μL 碘化丙啶（Propidium iodide，PI）染液，在室温下避光染色15 min。充分混匀后上机检测细胞的凋亡情况，统计早期凋亡、晚期凋亡的细胞比例计算凋亡率[24]。

### 1.3　数据处理

所有实验均重复 3 次，实验结果采用平均值±标准差表示，并通过 SPSS26.0 软件进行显著性检验，显著性差异水平设为 $P$<0.05。利用 Origin2025、Flowjo-v10.8.1 和 MestReNova-11.0.4等软件绘图。

## 2　结果与分析

### 2.1　PNSK 和 PNSK-SeNP 的硒含量、化学成分、单糖组成及粒径

原子荧光分光光度计测定发现 PNSK 不含硒元素，PNSK-SeNP 的硒含量为 52.03±0.20 mg/g，说明

表 1 PNSK 和 PNSK-SeNP 的化学成分及单糖组成摩尔比

Table 1 Contents of chemical components and molar fractions of monosaccharide of PNSK and PNSK-SeNP

| 样品 | 总糖(%) | 糖醛酸(%) | 甘露糖 | 葡萄糖醛酸 | 葡萄糖 | 半乳糖 | 阿拉伯糖 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PNSK | 69.94±3.75 | 17.08±0.75 | 0.22 | 0.06 | 0.40 | 0.21 | 0.12 |
| PNSK-SeNP | 71.93±1.16 | 17.57±0.73 | 0.20 | 0.07 | 0.40 | 0.21 | 0.13 |

纳米硒颗粒引入到多糖中。由表 1 及图 1 可以看出，PNSK-SeNP 与 PNSK 的主要化学成分差异不显著，单糖组成与比例差异不明显，说明纳米硒制备过程中并未改变多糖的单糖组成，这与 Wang 等[25] 研究的枯草芽孢杆菌壳聚糖纳米硒与枯草芽孢杆菌壳聚糖具有相似的单糖组成而在含量方面略有差异的结果一致。另外，粒度仪测定 PNSK 粒径为 350.23±12.03 nm，PNSK-SeNP 粒径为 166.83±4.51 nm，PNSK-SeNP 粒径仅为 PNSK 的 47.63%，说明 PNSK-SeNP 的稳定性高于 PNSK。

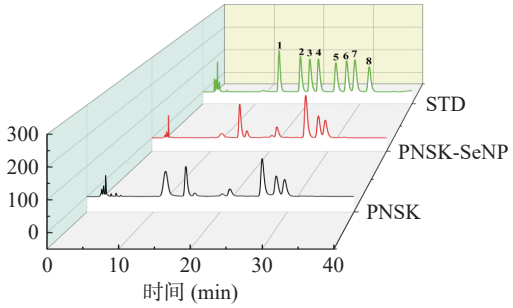



图 1 PNSK 和 PNSK-SeNP 的色谱洗脱曲线

Fig.1 Chromatographic elution profiles of PNSK and PNSK-SeNP

注：STD：单糖标准品混合物；1.甘露糖 2.鼠李糖 3.葡萄糖醛酸 4.半乳糖醛酸 5.葡萄糖 6.半乳糖 7.阿拉伯糖 8.岩藻糖。

## 2.2 PNSK 和 PNSK-SeNP 的结构表征

2.2.1 PNSK 和 PNSK-SeNP 的紫外可见光谱和拉曼光谱分析 PNSK 和 PNSK-SeNP 的紫外可见和拉曼光谱如图 2、图 3 所示，图 2 发现 PNSK-SeNP 在 253 nm 出现了明显吸收峰，表明纳米硒与 PNSK 发生了相互作用[8]。在图 3 的 PNSK 和 PNSK-SeNP 的拉曼光谱中也发现 PNSK-SeNP 中增加了 258 $cm^{-1}$ 吸收峰，这是硒单质的标记带[26]，说明 PNSK-SeNP 中以硒单质形式存在。

2.2.2 PNSK 和 PNSK-SeNP 的红外光谱分析 通

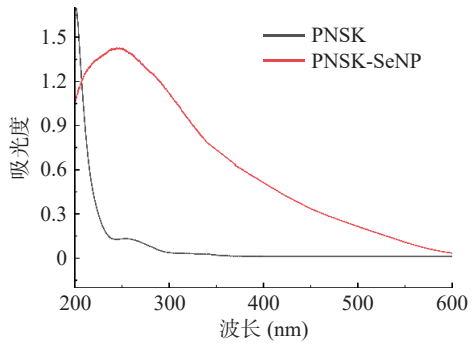



图 2 PNSK 和 PNSK-SeNP 的紫外可见光谱

Fig.2 Ultraviolet visible spectrum of PNSK and PNSK-SeNP

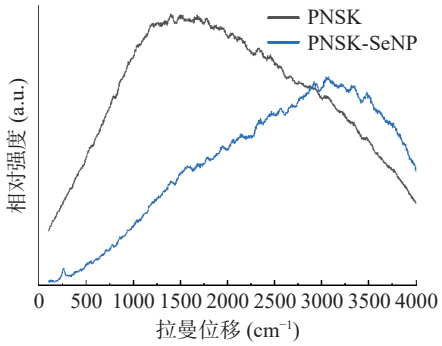



图 3 PNSK 和 PNSK-SeNP 的拉曼光谱

Fig.3 Raman spectrum of PNSK and PNSK-SeNP

过红外光谱研究了 PNSK 与 PNSK-SeNP 的相互作用机制。如图 4 所示，与 PNSK 相比，PNSK-SeNP 中未出现新的吸收峰，仅部分峰发生轻微移动，表明 PNSK 的主要结构和官能团未发生变化，PNSK 与 PNSK-SeNP 未形成新的化学键[4]。PNSK 中约 3358 $cm^{-1}$ 处的强吸收峰归因于 O-H 伸缩振动，PNSK-SeNP 中的 -OH 基团的吸收波长红移到 3277 $cm^{-1}$，此外，PNSK 中 1606 $cm^{-1}$ 处的 C=O 吸收峰在 PNSK-SeNP 中红移到 1596 $cm^{-1}$，1041 $cm^{-1}$ 附近的 C-O-H 吸收峰红移到 1038 $cm^{-1}$，与 PNSK 相比，O-H 特征吸收峰的红移较大，约为 81 $cm^{-1}$，说明多糖中的-OH 受纳米硒的诱导作用最大[14,27]，PNSK-SeNP 的傅里叶变换红外光谱吸收峰较 PNSK 发生红移，可能是由于 PNSK 与纳米硒颗粒之间以物理吸附或弱化学作用如氢键、静电吸引等为主，陈博文等[7] 也发现岩藻多糖纳米硒的部分吸收峰红移，二者结果相似。

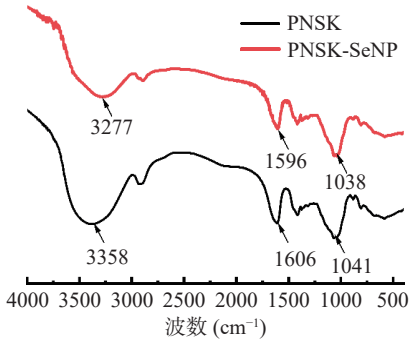



图 4 PNSK 和 PNSK-SeNP 的红外光谱

Fig.4 Infrared spectrum of PNSK and PNSK-SeNP

2.2.3 PNSK 和 PNSK-SeNP 的 X 射线衍射分析 通过计算发现 PNSK、PNSK-SeNP 的结晶度分别为 13.65%、8.31%，同时图 5 的 X-射线衍射结果显示二者均为宽泛的衍射峰，PNSK 在 2$\theta$ 为 19°处衍射峰

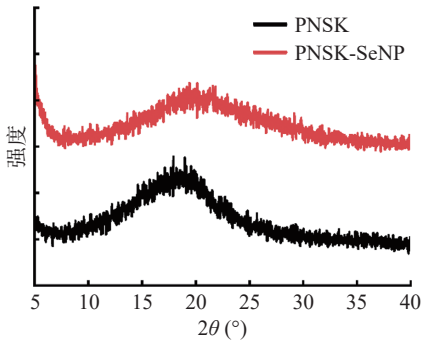



图 5　PNSK 和 PNSK-SeNP 的 X-射线衍射图

Fig.5　XRD pattern of PNSK and PNSK-SeNP

明显。与 PNSK 相比，PNSK-SeNP 的 XRD 图更为平缓，表明 PNSK-SeNP 结晶度小于 PNSK，主要以无定形态为主。同样 Wang 等[28] 也发现甜玉米芯多糖纳米硒的衍射峰增宽、结晶度下降。

2.2.4　PNSK 和 PNSK-SeNP 的 X 射线能谱（XPS）

通过 XPS 进一步表征 PNSK-SeNP 中硒元素的价态以及 PNSK 与纳米硒之间的相互作用。图 6A 的 XPS 全谱扫描发现，PNSK-SeNP 中出现了 Se 3d 信号峰[15,29]，表明硒元素已成功引入 PNSK 中，并且 PNSK-SeNP 的全谱在 55.02 eV 处出现了新增峰，表明 PNSK-SeNP 中的硒元素是以 0 价态存在，此外，在 PNSK-SeNP 全能谱 59.1 eV 处未观察到电子结合峰，说明反应体系中的所有 $Se^{4+}$均被还原为 $Se^{0}$[30]。同时图 6B 的硒谱也可看出，PNSK 中并未出现 Se 3d 信号峰，但 PNSK-SeNP 在 54.88 eV 和 55.48 eV 分别出现了 Se 3d 5/2 和 Se 3d 3/2 的信号峰[28]。

为了分析 SeNP 与 PNSK 之间的相互作用，研究了 O 1s 光谱。如图 6C 所示，PNSK 中的 O 1s 结合能为 532.38 eV，反应后 PNSK-SeNP 的 O 1s 结合能（532.38 eV）并未发生改变，所以在 PNSK-SeNP 中纳米硒并未与 PNSK 之间形成新的化学键[31]，PNSK 可能与纳米硒颗粒是物理吸附。同时 PNKS 和 PNSK-SeNP 的 C 1s 光谱中观察到多个能量状态的碳（图 6D），PNSK 的 C 1s 光谱拟合出三个峰，分别位于 287.58 eV、286.08 eV 和 284.48 eV，分别对应 C-H、C-OH 和 C=O 的光电子发射[19]。与 PNSK 相比，PNSK-SeNP 三个峰并未发生明显变化，说明纳米硒与多糖并未形成新的化学键，这与傅里叶变换红外光谱的分析结果一致。

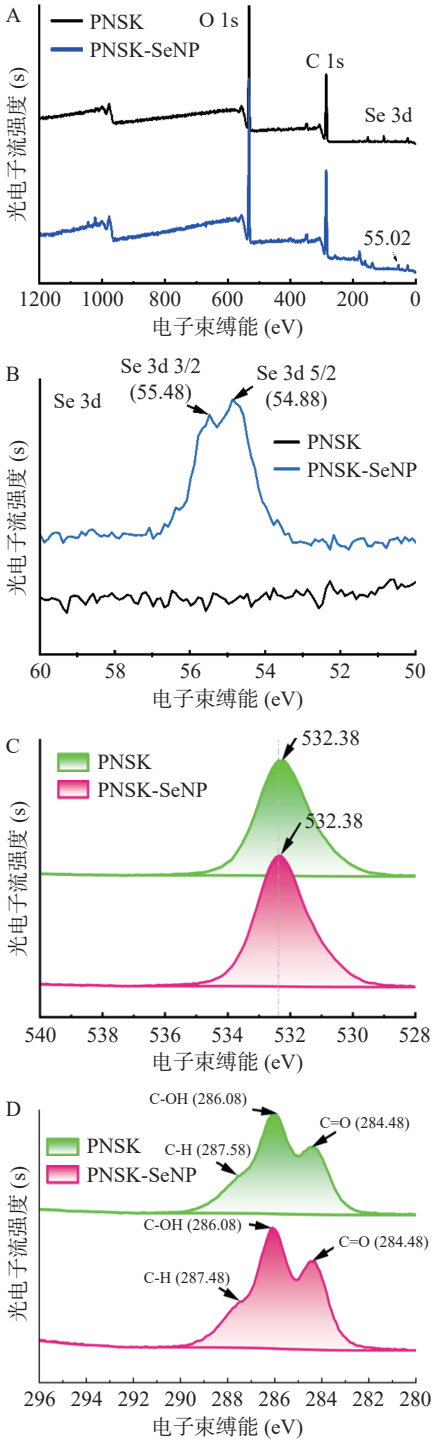



图 6　PNSK 和 PNSK-SeNP 的 X 射线能谱图

Fig.6　XPS diagram of PNSK and PNSK-SeNP

注：A 为全谱图；B 为硒谱；C 为 O 1s 图；D 为 C 1s 图。

## 2.3　PNSK 和 PNSK-SeNP 的体外抗氧化活性分析

实验对比分析了 PNSK 和 PNSK-SeNP 对羟自由基和 $ABTS^{+}$自由基的清除能力，同时比较了二者的总还原力，结果见图 7。由图 7 可以看出，PNSK 和 PNSK-SeNP 的体外抗氧化活性均具有剂量效应关系，且 PNSK-SeNP 的体外抗氧化活性强于 PNSK。当二者浓度为 1.0 mg/mL 时，PNSK 和 PNSK-SeNP 对·OH 的清除率分别为 7.28%±0.52% 和 68.69%±1.63%，对 $ABTS^{+}$自由基的清除率分别为 20.60%±1.24% 和 69.71%±5.02%，总还原力 TEAC 值分别为 2.23±0.27 和 75.07±4.82 μmol/mL。PNSK 和 PNSK-SeNP 对·OH 清除的 $IC_{50}$ 值分别为 4.45 和 0.55 mg/mL，对 $ABTS^{+}$自由基清除的 $IC_{50}$ 值分别为 4.58 和 0.79 mg/mL，PNSK-SeNP 对·OH 和 $ABTS^{+}$自由基的清除活性是 PNSK 的 8.09 和 5.80 倍。此外，PNSK、PNSK-SeNP 的 TEAC10（TEAC 值为 10 μmol/mL 时的样品浓度）分别为 3.26 和 0.22 mg/mL，PNSK-SeNP 的还原力是 PNSK 的 14.39 倍。说明 PNSK 与纳米硒结合成为 PNSK-SeNP 后，能够显著提高其抗氧化能力，这与硫磺菌多糖纳米硒能

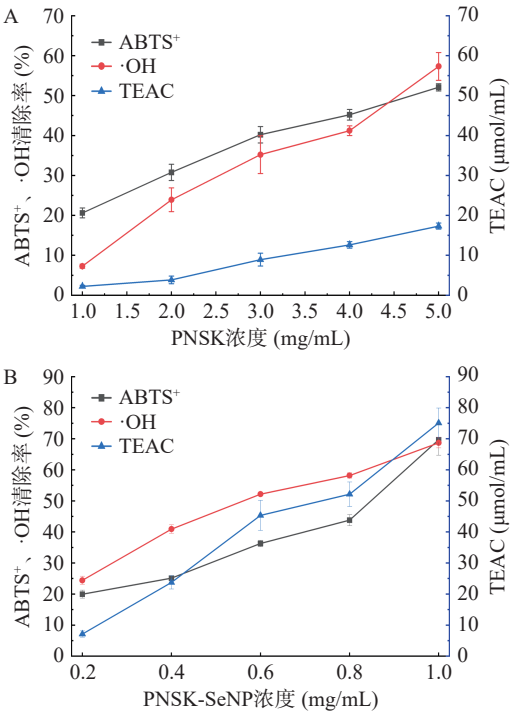



图 7　PNSK 和 PNSK-SeNP 的体外抗氧化活性

Fig.7　*In vitro* antioxidant activity of PNSK and PNSK-SeNP

注: A. PNSK; B. PNSK-SeNP。

显著提高天然多糖抗氧化能力[32] 的结果一致。

## 2.4　PNSK 和 PNSK-SeNP 的抑制癌细胞活性分析

2.4.1　PNSK 和 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞的抑制效果　不同浓度 PNSK 及 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞的抑制率如图 8 所示，由图 8 可以看出，PNSK 和 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞的抑制能力具有剂量效应关系，且 PNSK-SeNP 的抑制癌细胞

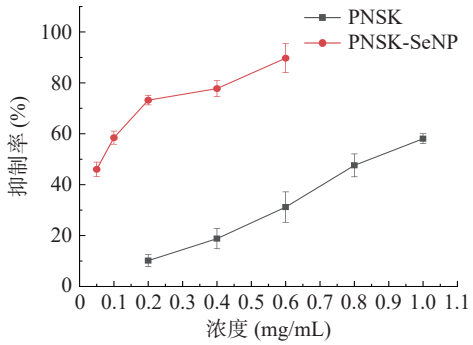



图 8　PNSK 和 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞抑制率

Fig.8　Inhibition rate on A549 lung cancer cells of PNSK and PNSK-SeNP

活性强于 PNSK。0.60 mg/mL 的 PNSK 及 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞抑制率分别为 31.19%±5.97% 和 89.71%±5.70%，PNSK 和 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞的抑制的 $IC_{50}$ 值分别为 0.87 mg/mL 和 0.06 mg/mL，而 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞的抑制率是 PNSK 的 14.5 倍。

2.4.2　PNSK 和 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞的迁移抑制效果　如图 9 所示，不同浓度的 PNSK 及 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞迁移均表现出抑制作用。对照组随处理时间延长，A549 癌细胞迁移率逐渐上升，在 12 h 和 24 h 的细胞迁移率分别为 48.22% 和 69.65%。经 200 μg/mL PNSK 处理 12 h 和 24 h 后，细胞迁移率分别降至 37.55% 和 52.67%，相应的细胞迁移抑制率达到 22.12% 和 24.38%。而采用 50 μg/mL PNSK-SeNP 处理相同时间后，A549 癌细胞迁移率显著($P$<0.05)降低，分别为 6.56%(12 h)和 27.36%(24 h)，抑制率分别高达 86.39% 和 60.71%。

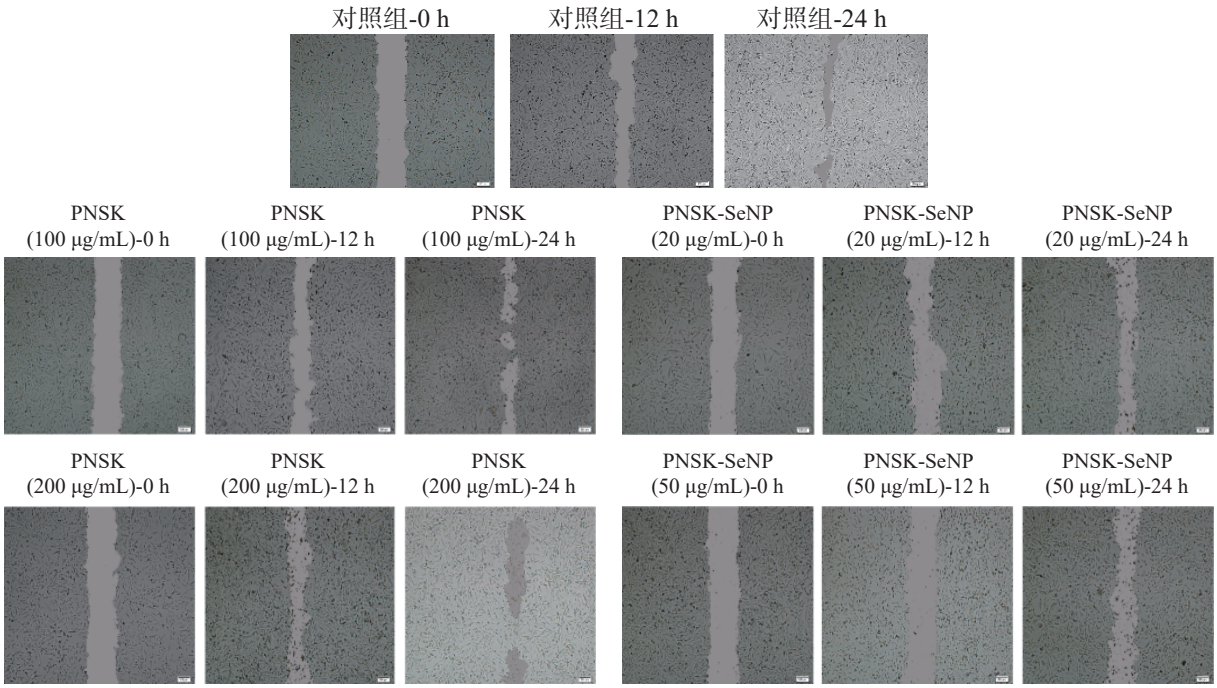



图 9　PNSK 和 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞迁移的抑制效果(200 μm)

Fig.9　Mobility of A549 lung cancer cells by PNSK and PNSK-SeNP (200 μm)

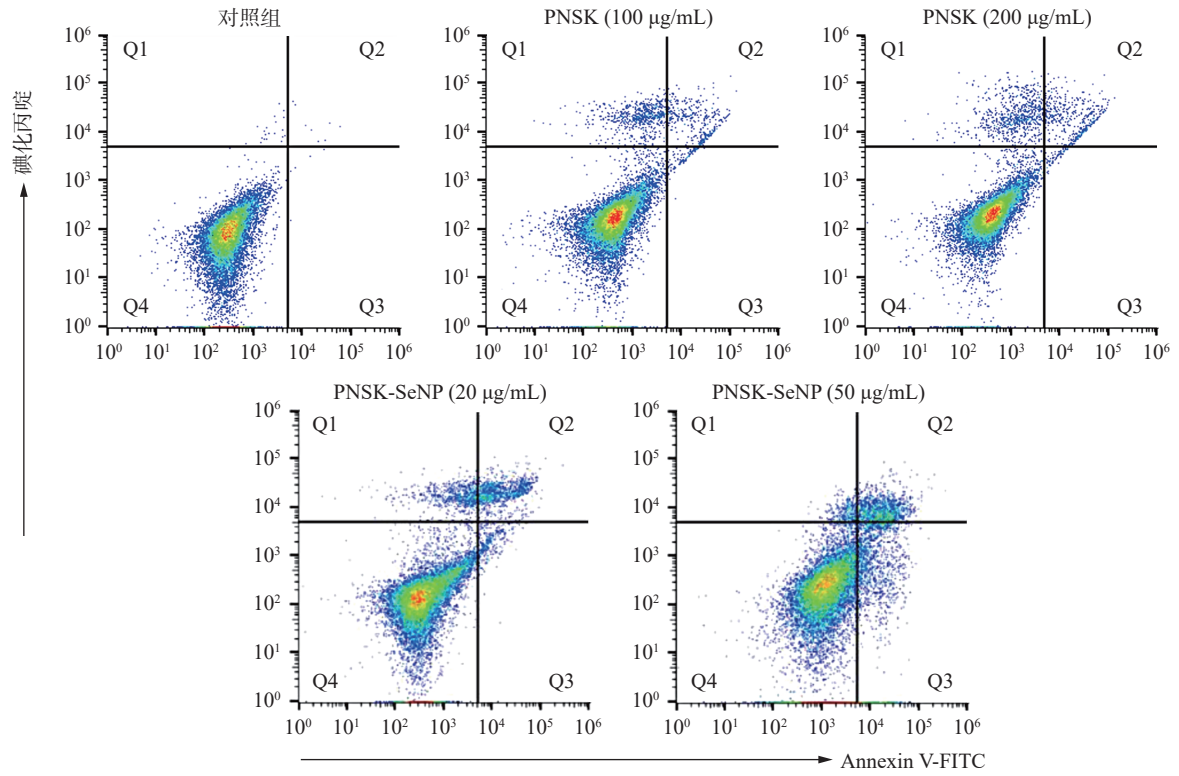



图 10　PNSK 和 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞凋亡的影响

Fig.10　Effect of PNSK and PNSK-SeNP on apoptosis of A549 cells

结果表明，低浓度 PNSK-SeNP 即可显著抑制 A549 细胞迁移，其效果明显优于 PNSK。该发现与陈雪花等[33] 报道一致，即硫酸软骨素纳米硒对 Hela 宫颈癌细胞迁移的抑制作用强于硫酸软骨素本身。

2.4.3　PNSK 和 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞凋亡影响　采用流式细胞术探讨了 PNSK 和 PNSK-SeNP 对 A549 肺癌细胞凋亡的影响，结果见图 10。在对照组中，99.8% 的细胞正常生长，0.04% 的细胞处于细胞凋亡初期，0.05% 的细胞处于细胞凋亡晚期。200 μg/mL PNSK 处理组中 2.65% 的细胞处于凋亡初期，5.85% 的细胞处于凋亡晚期，凋亡率为 8.50%，显著（$P$<0.05）高于对照组。50 μg/mL 的 PNSK-SeNP 处理组早期、晚期凋亡细胞比例分别为 21.6% 和 5.94%，凋亡率为 27.54%。

### 2.5　PNSK 和 PNSK-SeNP 成分及表征与其抗氧化、抑制癌细胞活性的相关性分析

葛仙米纳米硒多糖的成分与其抗氧化活性、抑制癌细胞活性之间的关系趋势见图 11。由图 11 可以看出，PNSK-SeNP 的硒含量对 $ABTS^+$自由基抑制率 $IC_{50}$、肺癌细胞抑制率的 $IC_{50}$、TEAC10 具有显著负影响（$P$<0.05），说明随着硒含量增加，对 $ABTS^+$自由基清除率、肺癌细胞抑制率的 $IC_{50}$ 越小，其抗氧化能力越大，总还原力越强。同时 Se 含量对细胞凋亡率、细胞迁移抑制率具有显著正影响，此外 PNSK-SeNP 的硒含量还显著影响其结晶度（$P$<0.05），随着纳米硒中硒含量增加，多糖纳米硒的结晶度会越小。

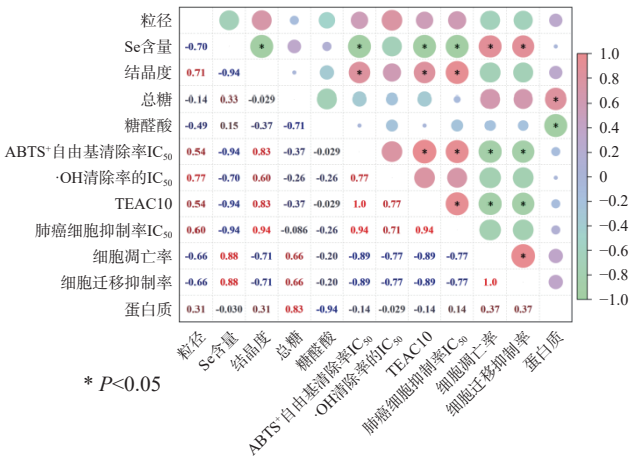



图 11　PNSK 和 PNSK-SeNP 的抗氧化、抑制癌细胞活性相关趋势分析

Fig.11　Correlation trend analysis between antioxidant and anticancer activitity of PNSK and PNSK-SeNP

## 3　结论

本研究采用 $Na_2SeO_3/V_C$ 氧化还原法，以 PNSK 作为稳定剂成功构建了 PNSK-SeNP。实验结果发现，所制备的 PNSK-SeNP 硒含量达 52.03±0.20 mg/g，粒径为 166.83±4.51 nm。单糖组成分析说明，多糖纳米硒制备前后单糖摩尔占比无显著差异，但 PNSK-SeNP 结晶度仅为 8.31%，较 PNSK 显著降低。X 射线光电子能谱图清晰呈现 Se 3d 信号峰，确证硒元素以 0 价态稳定存在。红外光谱及 X 射线光电子能谱图联合证实，PNSK-SeNP 中多糖主体结构与官能团未发生改变，纳米硒与 PNSK 间可能未形

成新的化学键。

在抗氧化活性评估中，PNSK-SeNP 对·OH、$ABTS^+$自由基的清除活性分别达 PNSK 的 8.09 倍与 5.80 倍，抗氧化性能显著提升。针对 A549 肺癌细胞的抑制实验显示，其抑制率是 PNSK 的 14.5 倍，并且 PNSK-SeNP 能显著抑制 A549 肺癌细胞迁移，诱导细胞凋亡。斯皮尔曼相关性分析进一步深化研究揭示 PNSK-SeNP 的硒含量与 $ABTS^+$自由基清除率、还原力、对 A549 肺癌细胞抑制的 $IC_{50}$ 呈显著负相关，而与 A549 肺癌细胞凋亡率和迁移抑制率呈显著正相关，这一发现为优化其功能应用提供了关键量化依据。

综上所述，PNSK 可以有效地稳定纳米硒，并且 PNSK-SeNP 的体外抗氧化、抑制癌细胞活性均有明显提升，丰富了稳定纳米硒的多糖来源，但 PNSK-SeNP 的其他生理活性、体内稳定性、体内抗氧化、抑制癌细胞活性机制仍需进一步探索。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

## 参考文献


[1] 单荣, 许晓义, 尹永奎, 等. 多糖纳米硒制备和生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 376−383. [SHAN R, XU X Y, YIN Y K, et al. Research progress in the preparation and biological activity of polysaccharide nano-selenium[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(18): 376−383.]

[2] 钟泽梁, 洪碧红, 肖美添, 等. 多糖纳米硒的制备、功能和在食品领域应用的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 308−319. [ZHONG Z L, HONG B H, XIAO M T, et al. Preparation, functions and food application of solysaccharide-selenium nanoparticles: A review[J]. Food Science, 2023, 44(19): 308−319.]

[3] 郝雨, 王慧, 杨文娟, 等. 猴头菇多糖-纳米硒的制备、结构表征及其生物活性研究[J]. 陕西科技大学学报, 2024, 42(02): 53−61. [HAO Y, WANG H, YANG W J, et al. Study on preparation, structural characterization and biological activity of selenium nanoparticles conjugated with *Hericium erinaceus* polysaccharides[J]. Journal of Shaanxi University of Science, 2024, 42(2): 53−61.]

[4] 赵新悦, 王清玉, 王柏璇, 等. 硒化黄精多糖的制备、结构表征及体外抗氧化活性分析[J]. 食品科学, 2025, 46(11): 1−10. [ZHAO X Y, WANG Q Y, WANG B X, et al. Preparation, structural characterization and *in vitro* antioxidant activity of selenized *Polygonatum sibiricum* polysaccharides[J]. Food Science, 2025, 46(11): 1−10.]

[5] 牛超飞. 霍山石斛多糖结构表征及其纳米硒产物制备和生物活性研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2024. [NIU C F. Structural characterization, selenium nanoparticles preparation of polysaccharide from *Dendrobium huoshanense* and their bioactivities identification[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.]

[6] 唐丽. 龙须菜多糖纳米硒的制备、表征及生物活性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022. [TANG L. Synthesis, characterization and biological activity of selenium nanoparticles decorated with polysaccharides of *Gracilaria lemaneiformis*[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022.]

[7] 陈博文, 陈建平, 黄文浩, 等. 岩藻多糖纳米硒的制备及其抑制肿瘤细胞增殖的研究[J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35: 2117−2126. [CHEN B W, CHEN J P, HUANG W H, et al. Preparation of selenium nanoparticles decorated by *Fucoidan* and its inhibition effect on tumor cells growth[J]. Natural Product Research and Development, 2023, 35: 2117−2126.]

[8] 曹芳. 虎奶菇及其超支化多糖合成纳米硒的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [CAO F. Study on synthesis of nanoselenium by using edible Mushroom *Pleurotus tuber-regium* and the derived hyperbranched polysaccharide[J]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]

[9] 董晓丹. 桔梗多糖结构、纳米硒修饰及抗肿瘤活性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022. [DONG X D. The structural characteristics, selenium nanoparticles modification and antitumor activity of *Platycodon grandiflorus* polysaccharides[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022.]

[10] 莫开菊, 谢笔均, 汪兴平, 等. 葛仙米多糖的提取、分离与纯化技术研究[J]. 食品科学, 2004, 25(10): 103−108. [MO K J, XIE B J, WANG X P, et al. Sduty on extraction, seperation and Purification of *Nostoc sphaeroides* kützing polysaccharide[J]. Food Science, 2004, 25(10): 103−108.]

[11] 莫开菊. 葛仙米多糖的分离提取及功能性质研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011. [MO K J. Study on the extraction and function properties of *Nostoc sphaeroides* kützing polysaccharides[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.]

[12] TANG J, HU Z Y, CHEN X W. Free radical scavenging and antioxidant enzymes activation of polysaccharide extract from *Nostoc sphaeroides*[J], The American Journal of Chinese Medicine, 2007, 35(05): 887−896.

[13] WANG L, LI X Y, WANG B B. Synthesis, characterization and antioxidant activity of selenium modified polysaccharides from *Hohenbuehelia serotina*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 1362−1358.

[14] GAO Z, ZHANG C, TIAN C Y, et al. Characterization, antioxidation, anti-inflammation and renoprotection effects of selenized mycelia polysaccharides from *Oudemansiella radicata*[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 181: 1224−1234.

[15] CUI W T, ZHENG Y Y, ZHANG Q B, et al. Low-molecular-weight fucoidan protects endothelial function and ameliorates basal hypertension in diabetic Goto-Kakizaki rats[J]. Laboratory Investigation, 2014, 94(4): 382−393.

[16] 张睿聪. 海参多糖的提取纯化、理化性质及活性的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020. [ZHANG R C. Study on extraction, purification, physicochemical properties and bioactivity of Holothurian polysaccharide[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2020.]

[17] ZHAI C, LIN Y C, MAO C L, et al. Construction, characterization, antioxidant activity and effects on properties *in vitro* digestion of selenium nanoparticles decorated with *Cyperus esculentus* polysaccharides[J]. Food Bioscience, 2024, 59: 104062.

[18] LI K, LI J, ZHANG S S, et al. Amorphous structure and crystal stability determine the bioavailability of selenium nanoparticles[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 465: 133287.

[19] DOU Z M, ZHANG Y L, TANG C Y, et al. Construction of blackberry polysaccharide nano-selenium particles: Structure features and regulation effects of glucose/lipid metabolism in HepG2 cells[J]. Food Research International, 2024, 187: 114428.

[20] ZENG R, FAROOQ M U, ZHANG G, et al. Dissecting the potential of selenoproteins extracted from selenium-enriched rice on

physiological, biochemical and anti-ageing effects *in vivo*[J]. Biological Trace Element Research, 2020, 196(1): 119−130.
[21] BAI K K, HONG B H, TAN J L, et al. Selenium nanoparticles-embedded chitosan microspheres and their effects upon alcohol-induced gastric mucosal injury in rats: Rapid preparation, oral delivery, and gastroprotective potential of selenium nanoparticles[J]. International Journal Nanomedicine, 2020, 15: 1187−1203.
[22] 周贵华. 葛仙米藻蓝蛋白、多糖及其降解产物生理活性研究[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2022. [ZHOU G H. Study on physiological activities of phycocyanin, polysaccharide and its degradation products of *Nostocs phaeroides* Küting[D]. Enshi: Hubei Minzu University, 2022.]
[23] 梅邢, 王广, 田瑞, 等. 5 种不同纯度藻蓝蛋白的抗氧化特性[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 17−23. [MEI X, WANG G, TIAN R, et al. Antioxidant properties of five phycocyanins with different purities[J]. Food Science, 2021, 42(5): 17−23.]
[24] 周贵华, 田瑞, 冯佳, 等. 不同纯度藻蓝蛋白对 A549 和 HCCLM3 的抗癌活性比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(16): 5144−5152. [ZHOU G H, TIAN R, FENG J, et al. Comparison of anticancer activities of phycocyanin with different purities against A549 and HCCLM3[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(16): 5144−5152.]
[25] WANG F Q, DU M, KAI L X, et al. Exopolymer-Functionalized nanoselenium from bacillus subtilis SR41: Characterization, monosaccharide analysis and free radical scavenging ability[J]. Polymers, 2022, 14(17): 3523.
[26] 朱燕云. 水生拉恩氏菌 Rahnella aquatilis HX2 生物转化纳米硒的调节机制及纳米颗粒特征分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. [ZHU Y Y. Characteristics and biotransformation of selenium nanoparticles in *Rahnella aquatilis* HX2[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.]
[27] WANG L B, WEI F M, GAO Y Z, et al. Construction and characterization of selenium nanoparticles stabilized by cranberry polyphenols with protective effects on erythrocyte hemolysis[J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104925.
[28] WANG X, WANG J Y, XIU W Y, et al. Selenium nanoparticles stabilized by sweet corncob polysaccharide inhibit hypoglycemia *in vitro* and alleviate symptoms in type 2 diabetes mice[J]. Journal of Functional Foods, 2024, 112: 105920.
[29] CHEN Y Z, ZHU F F, CHEN J P, et al. Selenium nanoparticles stabilized by *Sargassum fusiforme* polysaccharides: Synthesis, characterization and bioactivity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 269: 132073.
[30] 赵猛, 丁子康, 李欣悦, 等. 低分子量坛紫菜多糖纳米硒的制备、表征及其体外抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 170−178. [ZHAO M, DING Z K, LI X Y, et al. Preparation, characterization and *in vitro* antioxidant activity of low molecular weight *Porphyra haitanensis* Polysaccharides Nano-selenium[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 170−178.]
[31] ZHU J X, YU C, HAN Z, et al. Comparative analysis of existence form for selenium and structural characteristics in artificial selenium-enriched and synthetic selenized green tea polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 154: 1408−1418.
[32] QU Y H, ZHANG P P, ZHAO B Y, et al. Preparation, structural characterization and biological activities of *Laetiporus sulphureus* polysaccharide and its stabilized selenium nanoparticles[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2024, 11(1).
[33] 陈雪花, 陈建平, 罗宝浈, 等. 硫酸软骨素纳米硒的结构表征及其对 Hela 细胞迁移和侵袭的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(3): 73−79. [CHEN X H, CHEN J P, LUO B Z, et al. Structural characterization of selenium-chondroitin sulfate nanoparticles and its effect on migration and invasion of Hela cells[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(3): 73−79.]