

# 纳米硒对棉花的促生与抗病作用

王雨萌<sup>1,2</sup>, 蒋文明<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>重庆化工职业学院, 制药工程学院与环境与质量检测学院, 重庆

<sup>2</sup>西南大学生命科学学院, 重庆

<sup>3</sup>重庆市江北区疾病预防控制中心, 重庆

收稿日期: 2024年3月15日; 录用日期: 2024年5月8日; 发布日期: 2024年5月20日

## 摘要

为了研究纳米硒在植物保护中的作用, 本研究利用一株植物内生菌合成纳米硒, 并将其用于棉花抗病黄萎病的研究。体外抑菌实验表明, 纳米硒对大丽轮枝菌的生长有抑制作用。促生实验表明, 亚硒酸钠浓度达到50 mg/L时, 植株叶片明显枯萎发黄, 根长、茎长、鲜重和干重相较对照组显著降低( $p < 0.05$ ); 但随着纳米硒浓度的升高, 棉花的生长变得旺盛; 50 mg/L纳米硒处理组的根长、茎长、鲜重和干重显著增加( $p < 0.05$ )。接种大丽轮枝菌后, 随着纳米硒浓度的升高, 植株体内叶绿素含量升高, 而脯氨酸含量降低。抗氧化结果表明, 随着SeNPs浓度的升高, 患病棉花的抗氧化酶活性逐渐增大; 相比对照组, 50 mg/L SeNPs处理组叶片中的CAT、GSH、SOD显著提高; 而 $H_2O_2$ 、MDA、POD的活性随着SeNPs浓度的升高显著降低; 这说明棉花在经过SeNPs处理后, 受病原菌胁迫程度减弱。因此, SeNPs可以提高植物体内的抗氧化酶活性, 从而提高植株对大丽轮枝菌的抗病性。

## 关键词

纳米硒, 植物促生, 抗氧化, 抗菌

# Effect of Nano Selenium on the Growth Promotion and Disease Resistance of Cotton

Yumeng Wang<sup>1,2</sup>, Wenming Jiang<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>School of Pharmaceutical Engineering & School of Environmental and Quality Testing, Hongqing Chemical Industry Vocational College, Chongqing

<sup>2</sup>School of Life Sciences, Southwest University Chongqing, Chongqing

<sup>3</sup>Chongqing Jiangbei District Disease Control Center, Chongqing

Received: Mar. 15<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 8<sup>th</sup>, 2024; published: May 20<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 王雨萌, 蒋文明. 纳米硒对棉花的促生与抗病作用[J]. 植物学研究, 2024, 13(3): 280-288.

DOI: 10.12677/br.2024.133031

## Abstract

To investigate the role of nano selenium in plant protection, this study utilized a plant endophytic bacterium to synthesize nano sized selenium (SeNPs) and applied it to the study of cotton resistance to *Verticillium wilt*. *In vitro* antibacterial experiments have shown that SeNPs have an inhibitory effect on the growth of *Verticillium dahlia* (*V. dahlia*). Plant growth promotion experiments have shown that sodium selenite can inhibit the growth and development of cotton. But when the concentration reached 50 mg/L, the leaves of the plant significantly wither and turn yellow. The root length, stem length, fresh weight, and dry weight of the plant were significantly reduced compared to the control group ( $p < 0.05$ ). As the concentration of SeNPs continues to increase, the growth of cotton becomes vigorous. Compared with the control group and the 50 mg/L sodium selenite treatment group, the root length, stem length, fresh weight, and dry weight of the 50 mg/L SeNPs treatment group were significantly increased ( $p < 0.05$ ). The antioxidant results indicate that as the concentration of SeNPs increases, the antioxidant enzyme activity of diseased cotton gradually increases. Compared with the control group, the 50 mg/L SeNPs treatment group significantly increased CAT, GSH, and SOD in the leaves. On the contrary, the activities of  $H_2O_2$ , MDA, and POD significantly decreased with the increase of SeNPs concentration, which indicates that after treatment with SeNPs, the degree of stress on cotton by pathogenic bacteria decreases. Therefore, SeNPs can enhance the activity of antioxidant enzymes in plants, thereby enhancing their resistance to *V. dahlia*.

## Keywords

Nano Selenium, Plant Growth Promotion, Antioxidant, Antibacterial

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

硒元素是植物生长的必需元素, SeNPs 能够提高植物的营养品质, 在农作物的生长过程中添加适量的 SeNPs 能够提高谷物中的糖和粗蛋白[1], 提高水培生菜茎叶的产量, 以及还原糖、总糖、叶绿素和维生素 C 的含量[2] [3]。在喷洒了 SeNPs 的番茄, 鹰嘴豆及西兰花植株的种子中, 黄酮类化合物的含量都显著高于没有喷洒 SeNPs 的对照组[4] [5]; 此外, SeNPs 还能提高紫萼菖花青苷的含量[6]。当植物受到病原菌的侵害时, 通常会产生活性氧(ROS)自由基从而导致细胞膜以及膜上的蛋白质等大分子物质遭到破坏。SeNPs 是许多抗氧化酶的重要组成部分, 如谷胱甘肽过氧化物酶和硫氧还蛋白还原酶, 并且 SeNPs 还能提高超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶的活性; 因此, 硒参与了体内氧化还原反应, 清除脂质过氧化物等自由基, 从而防止植物细胞受到氧化损伤[7] [8]。综上, SeNPs 可以通过调节植物的光合作用、促进植物生长、提高植物体抗氧化酶活等来增强植物的抗逆性。植物黄萎病主要是由大丽轮枝菌等所引起的植物根、枝、叶等植物维管束病害。此病原菌通过危害植物维管束, 对植物的株高、果实的生长产生严重影响[9]。这种病害对于棉花这种重要的经济作物来说就是“癌症”一般的存在, 它会致使棉花大幅减产, 棉蕾大量脱落, 严重可致其全株死亡, 难以控制[10]。在此, 本研究首次利用五味子植株体内分离出的高浓度亚硒酸钠耐受菌 SRB6 生物合成 SeNPs, 研究 SeNPs 的促生作用以及体外抑菌性; 再利用大丽轮枝菌对棉花幼苗进行处理, 探讨 SeNPs 对植株抗病的影响以及相关的抗氧化机理。

本研究旨在为 SeNPs 在植物抗病中的应用提供一定的理论基础。

## 2. 材料方法

### 2.1. SeNPs 的制备与表征

从北五味子中分离出高浓度耐受的霍氏肠杆菌(*Enterobacter hormaechei*)菌株 SRB6 接种于 5 mM 亚硒酸钠的培养基中(1%, v/v); 于 37°C、pH 7、150 rpm 下培养 48 h。培养结束后 10,000 g 离心 10 min。沉淀采用 0.9% (w/v) NaCl 洗涤 3 次, 再将其重悬于 20 mL Tris-HCl 缓冲液(50 mM, pH 8.2)中。然后, 将重悬液超声 10 min。10,000 g 离心 30 min 分离破碎细胞后; 再 22,500 g 离心 30 min 收集纯化的 SeNPs; 超纯水洗涤 2 次后重悬于去离子水中。样品经过冷冻干燥后用扫描电子显微镜观察。

### 2.2. SeNPs 体外抗菌活性

将 *V. dahlia* 生长状况良好的培养基, 用 5 mm 的打孔器沿着菌落的边缘取下菌饼, 分别接种于不同浓度纳米硒(5、25、50 mg/L) PDB 培养基中, 并将菌株接种在不含纳米硒颗粒的培养基上作为对照组。在黑暗条件下 28°C、150 rpm、培养 14 天后, 取出烘干称重。

### 2.3. 植物促生研究

将健康棉花种子消毒[11]; 之后将其种植在花盆中; 在 25°C、8000 lux 光照 16 h、黑暗 8 h 条件下培养。待植株长成为大小均匀的幼苗后(4~5 片完整叶子), 移栽至花盆中。以叶片不喷洒 SeNPs 的植株作为对照组, 实验组植株叶片分别喷洒不同浓度的亚硒酸钠或 SeNPs; 每组五个重复, 每 1~2 天重复喷洒一次。在 25°C、光照 16 h/d 的培养箱中培养。每两天浇一次无菌水以保证土壤湿度。45 天后拍照并测量生长指标。

### 2.4. 植株抗病测试

配制浓度为  $1 \times 10^7 \text{ mL}^{-1}$  的 *V. dahlia* 孢子悬液。将实验组幼苗的根部浸入其中 3 h; 随后移栽到花盆中。其中, 对照组不经悬液处理, 也不添加纳米硒颗粒; 实验组幼苗经过孢子悬液浸根处理, 叶片分别喷洒不同浓度的纳米硒颗粒(0、5、25 和 50 mg/L)。将植株置于 25°C、光照 16 h/d、相对湿度 60% 的培养箱中培养。每 1~2 天将孢子悬浮液接种于病原组和实验组的根部。每两天浇一次灭菌水以保证土壤湿度。待病原组植物叶片发生明显病变后, 开始测定各组参数。

### 2.5. 生长指标测定

在处理 45 天后, 收集棉花植株, 并用蒸馏水清洗干净, 使用滤纸吸干水分。测定植物根长、茎长、叶片数、鲜重, 之后置于 65°C 烘箱烘干至恒重, 测定植株的干重。

### 2.6. 叶绿素含量的测定

叶绿素含量的测定法参考了李合生的方法[12]。0.2 g 叶片剪碎, 放置于烧杯中, 再加入 10 mL 丙酮和无水乙醇(1:1)混合液, 放置在黑暗条件下 24 h 避光处理, 待叶片变成白色时, 用分光光度计在 663 nm 和 645 nm 下测定吸光度值。利用公式 1~4 计算叶绿素含量。

$$Ca = 12.72 \times A_{663} - 2.59 \times A_{645} \quad (1)$$

$$Cb = 22.88 \times A_{645} - 4.67 \times A_{633} \quad (2)$$

$$C(a + b) = 20.30 \times A_{645} + 8.04 \times A_{633} \quad (3)$$

$$\text{叶绿素含量}(\text{mg/g}) = (C \times V) / (1000 \times M) \quad (4)$$

C: 叶绿素浓度 mg/L; V: 叶绿素溶液总体积 mL, M: 叶片鲜重 g。

## 2.7. 脯氨酸含量测定

脯氨酸活性的测定法参照 White 的方法[13]。脯氨酸含量的测定方法如下: 0.1 g 新鲜叶加入 5 mL 3% 磺基水杨酸溶液中, 沸水浴 10 min 后冷却, 4℃ 离心(10,000 rpm, 15min)。将 2 mL 的上清液、2 mL 2.5% 茚三酮和 2 mL 冰醋酸混合, 沸水浴 1 h。冷却后加入 4 mL 甲苯萃取, 取上层液体 4℃ 离心(3000 rpm, 5 min), 在 520 nm 处测定吸光度, 根据脯氨酸标准曲线计算植物脯氨酸的含量。

## 2.8. 活性测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定法参照李合生的方法[12]。过氧化物酶(POD)活性的测定法参照熊庆娥的方法[14]。过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)水平按照 Verma 等人所述的方法测量上清液中的含量[15]。过氧化氢酶(CAT)活性与脯氨酸活性的测定法参照 White 的方法[13]。丙二醛(MDA)活性的测定法参照熊庆娥的方法[14]。还原性谷胱甘肽(GSH)采用阿米达生物科试剂盒测定。

## 2.9. 数据分析

所有的数据均用平均值 ± 标准差表示, 用 SPSS 19.0 对数据进行单因素方差分析和 Duncan 多重比较法(P < 0.05)等统计学分析。使用作图软件 Origin 2021 进行作图。

## 3. 结果与分析

### 3.1. SeNPs 的表征

在自然界中, 有许多细菌可以将亚硒酸钠的还原成具有一定大小和形状的硒纳米颗粒。本研究利用植物内生菌制备了 SeNPs, 由扫描电镜的结果图中可以看出(图 1), 菌株产生纳米颗粒大小的单质硒, 其呈现大小均匀的圆形。

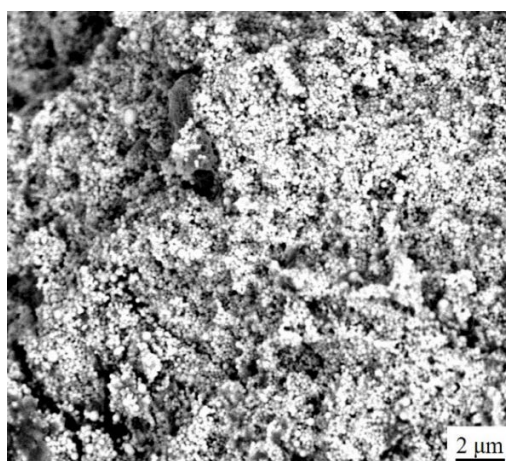


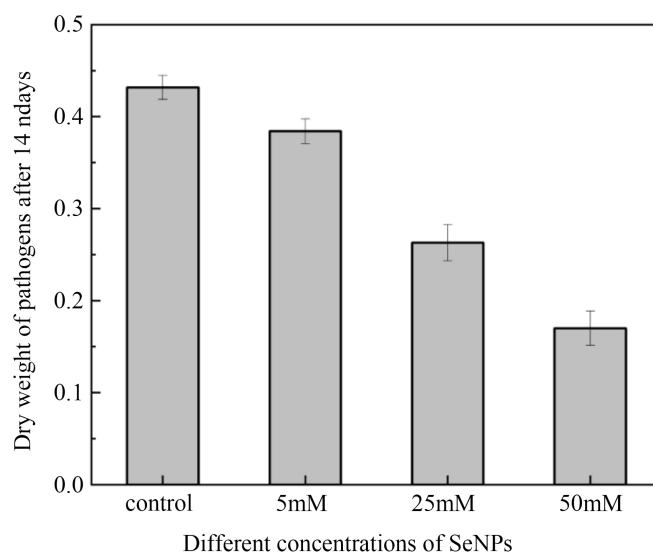
Figure 1. SEM characterization of SeNPs

图 1. SeNPs 的 SEM 表征

### 3.2. SeNPs 对病原菌的抗性

为了探究生物合成的 SeNPs 的抗菌潜力, 在不同浓度 SeNPs 的培养基中接种大丽轮枝菌, 并观察它

的生长情况。结果如图 2 所示。与对照组相比, 随着 SeNPs 浓度不断升高, 病原菌在培养 14 天后, 干重越来越低。由此可知, 高浓度的 SeNPs 对病原菌的生长有抑制作用。



**Figure 2.** Growth of *V. dahliae* at different concentrations of SeNPs  
**图 2.** 不同 SeNPs 浓度下大丽轮枝菌的生长情况

### 3.3. SeNPs 的促生作用

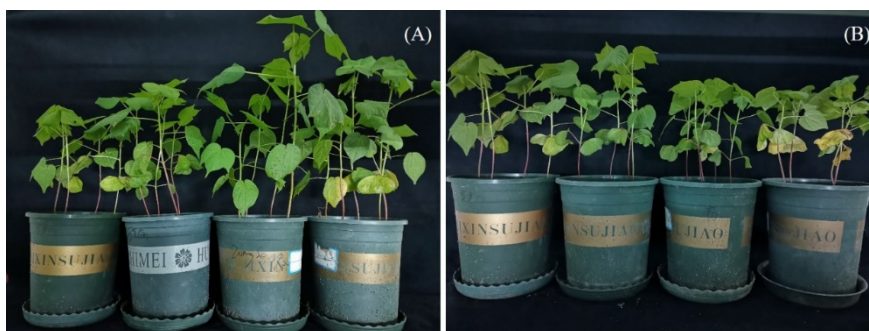
如表 1 所示, SeNPs 的应用提高了棉花的营养品质, 包括根长、茎长、生长程度、鲜重和干重。这些生长指标也随着纳米硒(5、25 和 50 mg/L)浓度的增加而逐渐增加。并且, 与对照组和亚硒酸钠处理组相比, 50 mg/L SeNPs 处理组的根茎长度、鲜重和干重均有显著增加。在不同的处理组中, 叶片数量无明显变化。

**Table 1.** Cotton growth indicators

**表 1.** 棉花生长指标

处理组(mg/L)	根长(cm)	茎长(cm)	叶数	鲜重(g)	干重(g)
对照	17.85 ± 1.53	21.88 ± 1.14	6 ± 0.83	3.09 ± 0.32	0.81 ± 0.09
5 mg SeNPs	14.25 ± 1.60	25.13 ± 0.65	7 ± 0.83	3.01 ± 0.94	0.53 ± 0.06
20 mg SeNPs	18.50 ± 0.71	26.88 ± 1.39	7 ± 0.50	4.39 ± 0.59	1.01 ± 0.28
50 mg SeNPs	27.50 ± 1.22	32.25 ± 1.75	6 ± 0.43	4.58 ± 0.53	1.11 ± 0.18
5 mg Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub>	12.63 ± 0.74	19.50 ± 1.27	6 ± 0.71	2.17 ± 0.49	0.42 ± 0.09
20 mg Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub>	18.88 ± 0.74	19.88 ± 0.65	5 ± 0.43	2.21 ± 0.48	0.53 ± 0.10
50 mg Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub>	15.25 ± 1.15	20.75 ± 0.75	6 ± 0.43	1.95 ± 0.38	0.56 ± 0.12

相比于 50 mg/L SeNPs 处理组, 其他低浓度的 SeNPs 对植物也有一定促进生长效果; 说明了随着 SeNPs 浓度的不断增加, 植物的生长越来越旺盛(图 3(A))。同时, 相比于亚硒酸钠处理组, 低浓度的 SeNPs 对植物没有毒副作用, 也不抑制植株生长。但随着亚硒酸钠浓度的不断增高(5、25 和 50 mg/L), 植物的生长也受到了一定的抑制作用, 并且也出现了枯萎发黄现象(图 3(B))。

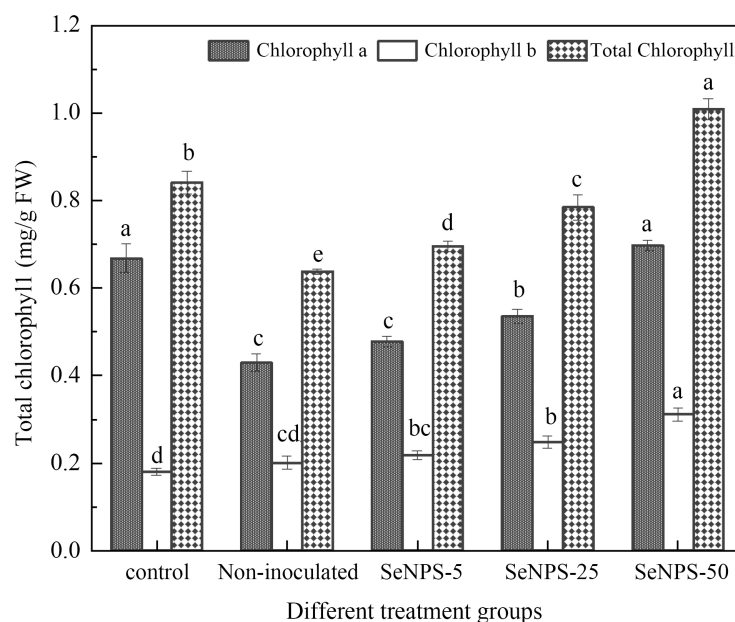


**Figure 3.** The growth status of cotton plants; (A) from left to right: Control group, 5, 25, and 50 mg/L SeNPs treatment group; (B) From left to right are: control group, 5, 25, and 50 mg/L sodium selenite treatment group

**图 3.** 棉花植株的生长情况; (A)从左到右依次是: 对照组, 5、25、50 mg/L 的 SeNPs 处理组; (B)从左到右依次是: 对照组, 5、25、50 mg/L 的亚硒酸钠处理组

### 3.4. SeNPs 对叶绿素的影响

叶绿素是植物光合色素之一, 它的含量可以有效的体现出植物生长状态。本研究测定不同浓度(0、5、25、50 mg/L)的 SeNPs 对接种 *V. dahliae* 棉花中叶绿素含量的影响; 对照组不接种 *V. dahliae*, 也不经过 SeNPs 处理。由图 4 可以看出, 随着 SeNPs 浓度的升高, 处理组中叶绿素含量逐渐升高。相比对照组, 50 mg/L SeNPs 处理组的总叶绿素含量上升最为显著; SeNPs-0 处理组的总叶绿素含量最低。五个处理组中, 叶绿素 b 的含量变化相对较小。



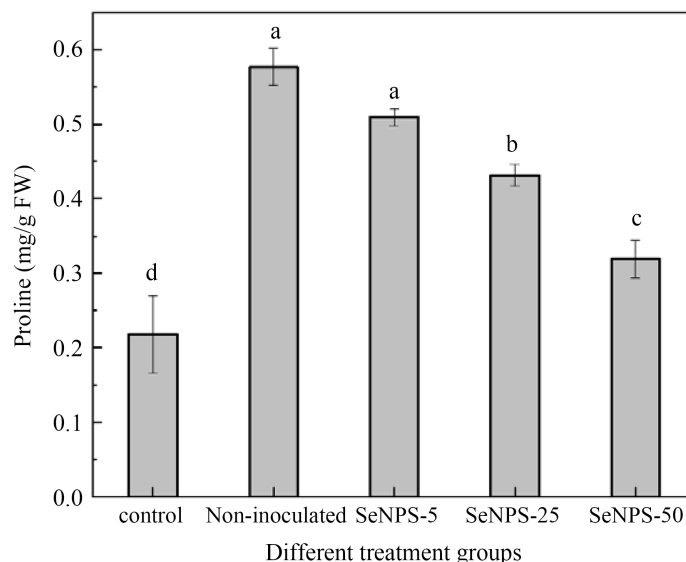
**Figure 4.** Chlorophyll content of cotton plants in different treatment groups

**图 4.** 不同处理组中棉花植株的叶绿素含量

### 3.5. SeNPs 脯氨酸的影响

脯氨酸是植物受到逆境胁迫的信号; 其可以保护植物免受环境胁迫和 ROS 的破坏作用。本研究检测不同浓度(0、5、25、50 mg/L) SeNPs 对 *V. dahliae* 胁迫棉花植株中脯氨酸的影响; 对照组不接种 *V. dahliae*,

也不经过 SeNPs 处理。结果如图 5 所示。随着 SeNPs 浓度的升高, 脯氨酸的浓度逐渐降低。相比对照组, 未喷洒 SeNPs 处理组(SeNPs-0)的脯氨酸含量最大, 说明植物受到了大丽轮枝的胁迫, 导致游离的脯氨酸大量累积。SeNPs-50 处理组的脯氨酸含量相对较低, 表明 SeNPs 缓解了病原菌对植株的胁迫作用。



**Figure 5.** Proline content of cotton plants in different treatment groups  
**图 5.** 不同处理组中棉花植株的脯氨酸含量

### 3.6. SeNPs 对抗氧化酶活的影响

CAT、GSH、SOD、POD 是植物抗过氧化系统中主要的抗氧化酶; 这些抗氧化酶可以有效地提升植物的抗逆境胁迫的能力, 从而提高植物抵抗病原菌的能力; 其中,  $H_2O_2$  与 MDA 是植物机体抗氧化的重要参数。

如图 6(A)所示, 在接种病原菌的处理组中, CAT 含量随着 SeNPs 浓度的升高而升高。50 mg/L SeNPs 处理组的 CAT 含量比 SeNPs-0 处理组(未经 SeNPs 处理)高出了 83.67%; 相比对照组降低了 12.50%; 这说明经过高浓度 SeNPs 处理的棉花植物具有较强的抵御病原菌侵害的能力。

如图 6(B)所示, GSH 的含量随着 SeNPs 浓度的升高不断升高。50 mg/L SeNPs 处理组的 GSH 含量比未喷洒 SeNPs 的处理组(SeNPs-0)高出了 46.63%; 而 5 和 25 mg/L SeNPs 处理组的 GSH 含量分别高出 28.38%, 32.72%。相比对照组, 50 mg/L SeNPs 处理组 GSH 含量仅降低 20%。

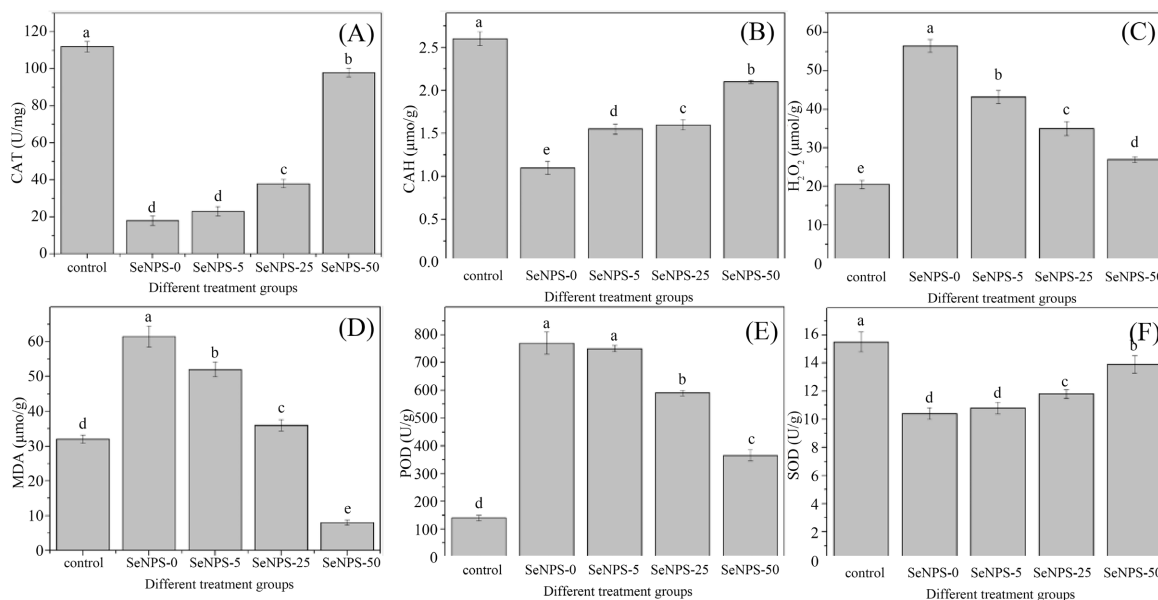
从图 6(C)可以看出, 接种病原菌后, 随着 SeNPs 浓度的升高,  $H_2O_2$  水平有着显著降低( $P < 0.05$ )。50 mg/L SeNPs 处理组的  $H_2O_2$  水平比未喷洒处理组(SeNPs-0)降低 54.38%; 而 SeNPs 的 5 和 25 mg/L 处理组分别降低 24.56%, 38.60%。对照组中  $H_2O_2$  的含量最低; 与 SeNPs-0 处理组相比降低了 64.91%。

如图 6(D)所示, 随着 SeNPs 浓度的升高, 植株中 MDA 的含量逐渐降低。SeNPs-50 处理组与对照组和未喷洒 SeNPs (SeNPs-0)处理组相比, MDA 的含量分别降低 5.84% 和 86.92%。在 50 mg/L SeNPs 的处理组中达到最低。SeNPs-0 处理组的 MDA 的含量最高, 达到了  $61.28 \mu\text{mol/g}$  样品。

如图 6(E)所示, 在接种相同量的病原菌条件下, 随着 SeNPs 浓度的不断升高, 植株体内 POD 的含量逐渐降低。未喷洒 SeNPs 时, 植株在受到外源病菌胁迫后, 导致 POD 的含量大幅上升; 而对照组 POD 的含量最低。与 SeNPs-0 处理组相比, SeNPs-50 处理组 POD 的含量降低了 53.50%。

SOD 在植物遇到外来病原菌的侵入时, 起着保护酶的作用, 以消除各种活性氧对生物体的危害。

处理结果如图 6(F)所示。未喷洒 SeNPs 处理组的 SOD 的活性与 SeNPs-5、SeNPs-25、SeNPs-50 处理组相比, 分别降低了 5.94%、16.37%和 26.68%与对照组相比, SeNPs-50 处理组的 SOD 的含量也仅降低 10.65%。



**Figure 6.** Antioxidant activity of plants (A: CAT; B: GSH; C: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; D: MDA; E: POD; F: SOD)

**图 6.** 植株的抗氧化活性(A: CAT; B: GSH; C: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; D: MDA; E: POD; F: SOD)

## 4. 讨论

元素硒具有促进植株发育的效果[16]; 此外, 还具有抗氧化和抗菌作用[17] [18]。真菌细胞质膜的麦角甾醇在接触元素硒时, 会导致质壁分离, 从而产生抗菌作用[19]。本研究表明, SeNPs 具有促进植物生长和抑制病原菌的效果。

亚硒酸钠是硒的一个来源, 但超过一定浓度就会导致植物硒中毒, 并造成细胞死亡[20]。例如, 265~530 μmol/L 的纳米硒能够显著促进烟草愈伤组织的生长, 但同浓度下的亚硒酸钠却完全产生了抑制作用[21]。本研究喷洒不同浓度的亚硒酸钠溶液对植物的生长并没有起到促进作用, 反而导致植物更易得病, 且生长缓慢。然而相同处理的纳米硒随着浓度的升高, 对植物的促生长作用越来越显著, 叶绿素的含量远高于未喷洒 SeNPs 的处理组。

植株在受到病原菌侵染时, 通常会产生 ROS, 但会导致植物体内大分子物质遭到破坏。SeNPs 是许多抗氧化酶的重要组成部分, 可以提高抗氧化酶的活性, 从而防止植物细胞受到氧化损伤[7]。本研究棉花植株在喷洒不同浓度的 SeNPs 后, 各项生理指标都发生了一定的变化。高浓度 SeNPs 处理下, 脯氨酸与 MDA 的含量显著降低, 这表明棉花植株耐受性得到了提高。接种病原菌的处理组, CAT、GSH、SOD 等抗氧化酶的活性随着 SeNPs 浓度的升高不断提高, 这表明 SeNPs 能够显著提高植株抵御自身氧化的机制, 并且有效降低病原菌对植株的伤害。

## 5. 结论

本研究利用五味子内生菌合成 SeNPs 以用于棉花植株抗病。体外抑菌实验表明 SeNPs 对 *V. dahliae* 生长有一定的抑制作用。促生实验表明, 亚硒酸钠处理后的植株叶片枯萎发黄现象较为明显; 根长、茎长、鲜重和干重较对照组显著降低。然而, 随着 SeNPs 浓度不断升高, 棉花的生长越来越旺盛; 并且与对照



组相比, 根长、茎长、鲜重和干重显著提高。在受到病原菌胁迫时, SeNPs 能够提高叶绿素含量, 并降低植株体内脯氨酸浓度。抗氧化结果表明, 随着 SeNPs 浓度的升高, 患病棉花的抗氧化酶活性逐渐增大。相比对照组, 50 mg/L SeNPs 处理组的棉花叶片中 CAT、GSH、SOD 显著提高了; 并且 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、MDA、POD 的活性随着 SeNPs 浓度的升高显著降低; 因此, SeNPs 可以提高植物体内的抗氧化酶活性, 从而提高植株的抗病性。本研究为 SeNPs 在植物抗病中的应用提供一定的理论基础。

## 基金项目

重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202204503)。

## 参考文献

- [1] 王永会, 周大迈, 张爱军, 等. 外源硒对谷子抗氧化酶活性及其品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(4): 112-117.
- [2] 尚庆茂, 高丽红, 李式军. 硒素营养对水培生菜品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 1998(3): 67-71.
- [3] 冯两蕊, 杜慧玲, 王曰鑫. 叶面喷施硒对生菜富硒量及产量与品质的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2007, 27(3): 291-294.
- [4] Guardado-Felix, D., Serna-Saldivar, S.O., Cuevas-Rodriguez, E.O., *et al.* (2017) Effect of Sodium Selenite on Isoflavonoid Contents and Antioxidant Capacity of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Sprouts. *Food Chemistry*, **226**, 69-74. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.046>
- [5] Tian, M., Xu, X., Liu, Y., *et al.* (2016) Effect of Se Treatment on Glucosinolate Metabolism and Health-Promoting Compounds in the Broccoli Sprouts of Three Cultivars. *Food Chemistry*, **190**, 374-380. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.098>
- [6] Liu, H., Xu, H. and Huang, K. (2017) Selenium in the Prevention of Atherosclerosis and Its Underlying Mechanisms. *Metallomics*, **9**, 21-37. <https://doi.org/10.1039/C6MT00195E>
- [7] Kursvietiene, L., Mongirdiene, A., Bernatoniene, J., *et al.* (2020) Selenium Anticancer Properties and Impact on Cellular Redox Status. *Antioxidants*, **9**, Article 80. <https://doi.org/10.3390/antiox9010080>
- [8] Balakhnina, T.I. and Nadezhkina, E.S. (2017) Effect of Selenium on Growth and Antioxidant Capacity of *Triticum aestivum* L. during Development of Lead-Induced Oxidative Stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, **64**, 215-223. <https://doi.org/10.1134/S1021443717010022>
- [9] 温晨阳. 马铃薯黄萎病生防木霉菌的筛选及防治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [10] 张绪振, 张树琴, 陈吉棣, 等. 我国棉花黄萎病原菌“种”的鉴定[J]. 植物病理学报, 1981, 11(3): 13-18.
- [11] Rizvi, A. and Khan, M.S. (2018) Heavy Metal Induced Oxidative Damage and Root Morphology Alterations of Maize (*Zea mays* L.) Plants and Stress Mitigation by Metal Tolerant Nitrogen Fixing *Azotobacter chroococcum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **157**, 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.063>
- [12] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [13] White, P.J., Bowen, H.C., Parmaguru, P., *et al.* (2004) Interactions between Selenium and Sulphur Nutrition in *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Experimental Botany*, **55**, 1927-1937. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh192>
- [14] 熊庆娥, 主编. 植物生理学实验教程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2002: 72.
- [15] Verma, S. and Mishra, S.N. (2005) Putrescine Alleviation of Growth in Salt Stressed *Brassica juncea* by Inducing Antioxidative Defense System. *Journal of Plant Physiology*, **162**, 669-677. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.08.008>
- [16] 胡万行, 赵博思, 石玉, 等. 生态纳米硒对紫色马铃薯生长及光合特性的影响[J]. 北方农业学报, 2019, 47(3): 64-69.
- [17] 李晓红, 句荣辉, 李振星, 等. 硒对植物的双重生物效应研究进展[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(11): 9-13.
- [18] 程水源. 硒学导论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [19] Douglas, L.M. and Konopka, J.B. (2014) Fungal Membrane Organization: The Eisosome Concept. *Annual Review of Microbiology*, **68**, 377-393. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-091313-103507>
- [20] 汪志君, 蒋士龙, 李式军. 麦芽富硒及其生化特性的研究[J]. 扬州大学学报, 2002, 23(2): 74-78.
- [21] Domokos-Szabolcsy, E., Marton, L., Sztrik, A., *et al.* (2012) Accumulation of Red Elemental Selenium Nanoparticles and Their Biological Effects in *Nicotinia tabacum*. *Plant Growth Regulation*, **68**, 525-531. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9735-x>