

杨金辉, 童玉花, 王晓彤, 马永龙, 余冬雯, 李淑霞. 纳米 CeO<sub>2</sub> 浸种对干旱-盐碱胁迫下紫花苜蓿种子萌发及生理特性的影响[J]. 土壤学报, 2026,

YANG Jinhui, TONG Yuhua, WANG Xiaotong, MA Yonglong, YU Dongwen, LI Shuxia. Effects of Nano CeO<sub>2</sub> Seed Soaking on Seed Germination and Physiological Characteristics of Alfalfa Under drought-salinity stress [J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

# 纳米氧化铈浸种对干旱-盐碱胁迫下紫花苜蓿种子萌发及生理特性的影响\*

杨金辉, 童玉花, 王晓彤, 马永龙, 余冬雯, 李淑霞<sup>†</sup>

(宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021)

**摘要:** 干旱-盐碱地的水分与高盐双重胁迫严重抑制作物生长, 导致种子萌发和幼苗生长不良, 造成显著经济损失, 因此, 迫切需要可持续的农业策略以提升植物抗逆性。纳米浸种技术作为一种创新的种子处理方法, 具有经济、农艺及环境多方面的优势, 显示出广阔的应用前景。本研究旨在探讨氧化铈纳米颗粒 (CeO<sub>2</sub> NPs) 浸种对干旱-盐碱复合胁迫 (60 000 mg·L<sup>-1</sup> 聚乙二醇 (6% PEG) + 50 mmol·L<sup>-1</sup> 盐碱 (NaCl 与 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 摩尔比为 9: 4, NaHCO<sub>3</sub> 调节 pH)) 下紫花苜蓿种子萌发及早期幼苗生长的影响, 并阐明其调控机制。以 100 nm CeO<sub>2</sub> NPs 悬浊液对紫花苜蓿浸种 12 h (设 0、1.0、2.5、5.0、10.0、15.0、20.0 mg·L<sup>-1</sup> 共 7 个浓度梯度), 再进行 14 d 的干旱-盐碱胁迫处理。结果表明: 干旱-盐碱复合胁迫显著抑制了紫花苜蓿种子的发芽状况及成苗状况, 且随着 CeO<sub>2</sub> NPs 浓度的增加, 发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、根长、苗长和鲜物质量均呈现先升后降的趋势, 以上指标均在 5.0 mg·L<sup>-1</sup> 处理组达到峰值, 该浓度下的上述指标均显著高于单独复合胁迫组。5.0 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs 处理显著降低了复合胁迫下紫花苜蓿的相对电解质渗漏率 (REC)、丙二醛 (MDA) 和过氧化氢 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 含量, 同时提高了过氧化氢酶 (CAT) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性、脯氨酸 (Pro) 及可溶性糖 (SS) 含量。相关性分析显示: 生长指标间呈极显著正相关, 而与膜损伤指标 (MDA 和 REC) 呈显著负相关, 表明抗氧化系统与渗透调节物质协同作用有效缓解了膜损伤, 从而促进种子萌发和幼苗生长。综上所述, CeO<sub>2</sub> NPs 浸种处理可减轻干旱-盐碱复合胁迫对紫花苜蓿种子萌发与幼苗生长带来的负面影响, 其中 5.0 mg·L<sup>-1</sup> 处理效果最佳, 该研究为利用纳米技术提升作物在逆境条件下的建苗能力提供了理论依据和实践策略。

**关键词:** 干旱-盐碱胁迫; 氧化铈纳米颗粒 (CeO<sub>2</sub> NPs); 紫花苜蓿; 种子萌发; 浸种; 抗氧化作用

中图分类号: S541.9 文献标志码: A

## Effects of Nano CeO<sub>2</sub> Seed Soaking on Seed Germination and Physiological Characteristics of Alfalfa Under Drought-Salinity Stress

YANG Jinhui, TONG Yuhua, WANG Xiaotong, MA Yonglong, YU Dongwen, LI Shuxia<sup>†</sup>

(College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract: 【Objective】** In arid and semi-arid regions, the coexistence of drought and high salinity imposes severe constraints on crop establishment, impairing seed germination and early seedling growth, consequently causing substantial agricultural losses. Seed

\*国家自然科学基金项目 (U24A20426) 和宁夏自然科学基金项目 (2023AAC05019) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.U24A20426) and the Natural Science Foundation of Ningxia Hui Autonomous Region, China (No.2023AAC05019)

<sup>†</sup>通讯作者 Corresponding author, E-mail: lishuxia620@163.com

作者简介: 杨金辉 (2000—), 男, 甘肃宁县人, 硕士研究生, 主要研究方向牧草育种与栽培利用。E-mail: 1678026718@qq.com

收稿日期: 2025-10-29; 收到修改稿日期: 2026-02-05; 网络首发日期 (www.cnki.net):

priming with nanoparticles represents an emerging, economically viable, and environmentally sustainable approach to enhance crop performance under adverse conditions. Thus, harnessing this new approach in developing sustainable strategies to improve plant stress resilience is imperative. **【Method】** This study investigated the efficacy of cerium oxide nanoparticles ( $\text{CeO}_2$  NPs) as a seed priming agent in alleviating the detrimental effects of combined drought-salinity stress (simulated by 60 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  polyethylene glycol (6% PEG-6000) and 50  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  saline-alkali ( $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4=9:4$ , pH adjusted by  $\text{NaHCO}_3$ ) on alfalfa (*Medicago sativa* L.). Seeds were treated with  $\text{CeO}_2$ NP suspensions (0, 1.0, 2.5, 5, 10, 15, and 20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) for 12 h and subsequently subjected to stress conditions for 14 d. **【Result】** The results demonstrated that drought-salinity stress significantly suppressed germination and seedling growth. However, priming with  $\text{CeO}_2$  NPs notably mitigated these inhibitory effects in a concentration-dependent manner, with the most pronounced improvements observed at 5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . At this optimal concentration, significant enhancements were recorded in germination potential, germination rate, germination index, vigor index, root length, shoot height, and fresh biomass compared to the non-primed stress group. Also, 5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CeO}_2$ NP treatment also reduced membrane damage, as indicated by lower relative electrical conductivity (REC) and malondialdehyde (MDA) content, and decreased hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) accumulation under combined stress. Concurrently, it elevated the activities of antioxidant enzymes (catalase and ascorbate peroxidase) and the concentrations of osmoregulatory compounds (proline and soluble sugars). Correlation analysis revealed strong positive associations among growth parameters, which were negatively correlated with membrane injury indices. These findings suggest that  $\text{CeO}_2$  NP priming strengthens the synergistic interaction between the antioxidant system and osmotic adjustment, thereby preserving membrane integrity and promoting germination and seedling growth under combined stress. **【Conclusion】** In conclusion, seed priming with 5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CeO}_2$  NPs effectively improves alfalfa establishment under drought-salinity stress conditions, offering a promising nano-agronomic strategy for sustainable crop production in marginal environments.

**Key words:** Drought-salinity stress; Cerium oxide nanoparticles ( $\text{CeO}_2$  NPs); Alfalfa; Seed germination; Seed priming; Antioxidant activity

当前, 干旱叠加不合理灌溉等因素引发的土壤盐渍化已成为亟待解决的全球性环境问题。在全球农业生态系统中, 干旱与盐碱胁迫是制约植物生长、生物量积累及作物产量提升的核心非生物限制因素<sup>[1]</sup>。中国干旱区面积广阔, 约占国土总面积的三分之一, 且区内广泛分布着盐碱土<sup>[2]</sup>。盐碱地农业发展一直是提高土地利用效率和粮食产量的重要方向<sup>[3]</sup>, 合理开发利用这些土地对扩大耕地面积、保障粮食安全及满足不断增长的人口需求具有重要意义。

紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 享有“牧草之王”的美誉, 作为优质豆科牧草, 其不仅蛋白质含量高、富含维生素和矿物质、适口性优异, 是畜牧业的核心饲料作物<sup>[4]</sup>。紫花苜蓿还凭借发达的根系及固氮能力来改良土壤、防止水土流失, 兼具显著的经济与生态价值。种子发芽是植物生命周期中对环境最敏感的阶段, 在干旱与盐碱胁迫下, 该过程易受显著抑制, 而发芽后幼苗的建成质量直接决定了植被群落能否成功定植<sup>[5]</sup>。植物幼苗虽能通过调整株高、优化根系结构等策略响应环境胁迫, 但土壤干旱与盐渍化的双重制约, 仍会严重抑制作物生长并降低其生产潜力<sup>[6]</sup>。盐碱土壤中的可溶性盐离子会降低土壤渗透势, 既阻碍种子吸胀与根系吸水, 又破坏细胞离子平衡、干扰代谢活动, 进而削弱根系活力与光合作用能力, 最终造成牧草减产<sup>[7]</sup>。因此, 提升紫花苜蓿种子萌发期的抗逆性, 是实现干旱—盐碱区牧草成功建植的关键。

近年来, 纳米技术作为跨学科前沿领域, 推动了金属纳米颗粒 (NPs) 等纳米材料在农业中的应用, 这类材料可作为高效的作物生长促进剂与胁迫缓解剂<sup>[8]</sup>, 为可持续农业的发展提供了新途径<sup>[9]</sup>。种子引发是一种可显著促进种子萌发, 并对植株早期生长产生积极调控效应的预处理方式<sup>[10]</sup>。该方法具备多重优势, 可增强植株抗逆性、提高幼苗活力、改善弱勢种子发芽能力, 还能提升种子质量并增加作物产量<sup>[11]</sup>。研究表明, 使用聚丙烯酸包被的氧化铈纳米颗粒 ( $\text{CeO}_2$  NPs) 引发油菜种子, 可诱导水杨酸生物合成增强, 并提高活性氧 (ROS) 清除能力, 从而有效缓解盐胁迫<sup>[12]</sup>。同样, 经硅纳米颗粒 ( $\text{SiNPs}$ ) 引发处理后的弱勢幼苗表现出上调的抗氧化防御系统, 实现了早期活性氧的解毒, 增强了对盐胁迫的抗性<sup>[13]</sup>。此外, 研究<sup>[14]</sup>表明, 采用银纳米颗粒 ( $\text{Ag NPs}$ ) 进行播前种子处理, 可通过调控代谢途径并提升酶促与非酶促抗氧化水平, 显著改善植物的生长状态和抗逆能力。上述积极影响为提升紫花苜蓿种子的抗逆能力, 提供了一种切实有效的技术途径。

本研究通过干旱与盐碱混合处理模拟干旱区盐碱环境, 系统探究  $\text{CeO}_2$  NPs 浸种对干旱-盐碱复合胁迫

下紫花苜蓿种子萌发和幼苗生长的缓解效应。研究包括三方面：一是分析 CeO<sub>2</sub> NPs 对种子发芽状况及成苗状况的影响；二是确定其提升紫花苜蓿抗逆性的最佳浓度；三是评估其对相对电解质渗漏率、丙二醛（MDA）含量、渗透调节物质及抗氧化酶活性等生理指标的调控作用。本研究旨在为紫花苜蓿在干旱-盐碱区的栽培和高效生产利用提供新的技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

本试验所用“中苜 1 号”紫花苜蓿由宁夏大学牧草育种实验室保存，氧化铈（CeO<sub>2</sub>）纳米颗粒（粒径：70~100 nm，纯度 99.9%）来源于博华斯纳米科技（宁波）有限公司。

### 1.2 CeO<sub>2</sub> NPs 悬浊液的合成

用分析天平称取上述纳米 CeO<sub>2</sub> 颗粒，加入去离子水并充分振荡，随后置于超声波仪中超声 30 min，使其充分分散悬浊，最终配制成 0、1.0、2.5、5.0、10.0、15.0、20.0 mg·L<sup>-1</sup> 共 7 个浓度悬浊液，浸种备用。

### 1.3 萌发试验设计与处理

紫花苜蓿种子先经 75% (v:v) 无水乙醇消毒 30 s，蒸馏水冲洗 5 次；再用 4% (v:v) 次氯酸钠消毒 10 min，蒸馏水冲洗至无异味，随后用吸水纸吸干表面水分。之后分别用 0、1.0、2.5、5.0、10.0、15.0、20.0 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs 悬浊液浸种 12 h，取出后冲洗干净并吸干表面残留悬浊液。选取大小均一、颗粒饱满的种子，置于 120 mm 规格培养皿中，进行干旱-盐碱（60 000 mg·L<sup>-1</sup> 聚乙二醇（6% PEG）+ 50 mmol·L<sup>-1</sup> 盐碱）复合胁迫处理。其中，盐摩尔配比为 NaCl: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>=9: 4，用 NaHCO<sub>3</sub> 调节 pH 至 8.3，复合胁迫浓度通过前期预实验确定。各处理组命名如下：干旱-盐碱复合胁迫下不同浓度 CeO<sub>2</sub> NPs 浸种处理分别记为 SAP、SAP1、SAP2.5、SAP5、SAP10、SAP15 和 SAP20；以未进行干旱-盐碱复合胁迫且未用 CeO<sub>2</sub> NPs 浸种的处理为空白对照（CK），以未进行干旱-盐碱复合胁迫仅用 CeO<sub>2</sub> NPs 浸种的处理为单独浸种组。每个处理设 3 次重复，每培养皿放置 50 粒种子，置于 25 °C 恒温培养箱中萌发，培养期间保持滤纸持续湿润。以胚根露出长度达种子 1/2 为萌发判定标准，每日统计各处理发芽率，培养 7 d 统计终期发芽率，14 d 采集样品测定相关指标。

### 1.4 生长与生理指标测定

萌发试验中，每天统计各处理的发芽情况，按照文献[15]计算发芽势（Germination potential, GP）、发芽率（Germination rate, GR）、发芽指数（Germination index, GI）和活力指数（Vitality index, VI）。用刻度为 1 mm 的游标卡尺量取在培养皿中萌发 7 d 的种子根长（Root length, RL）和苗长（Sprout length, SL），用万分之一电子天平称取紫花苜蓿整株鲜物质量（Fresh biomass, FB）。相对电导率（Relative electrical conductivity, REC）的测定参照常静静<sup>[16]</sup>的方法，并稍有改动，具体步骤如下：取 0.2 g 叶片样品剪碎置于 50 mL 离心管中，加入 20 mL 去离子水浸没叶片。将离心管置于 25 °C 摇床振荡 1 h，随后在 20 °C~25 °C 条件下用电导率仪测定溶液电导率（C1）。将离心管置于沸水浴中煮沸 15 min 以杀死植物组织，取出后冷水冷却 10 min，再次在 20 °C~25 °C 条件下测定电导率（C2）。计算相对电解质渗漏率，公式如下：

$REC=C1/C2\times 100\%$ 。丙二醛（MDA）含量、过氧化氢（H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>）含量、抗坏血酸过氧化物酶（APX）活性、

过氧化氢酶（CAT）活性以及可溶性糖（SS）和脯氨酸（Pro）含量通过商品化试剂盒进行测定，以上所用试剂盒均购买于北京索莱宝科技有限公司。CAT 单位 U 的定义：每毫克组织蛋白在反应体系中每分钟催化 1 μmol H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解定义为一个酶活力单位。APX 活性单位 U 的定义：每克样本每分钟氧化 1 μmol 抗坏血酸（AsA）为 1 个酶活单位。

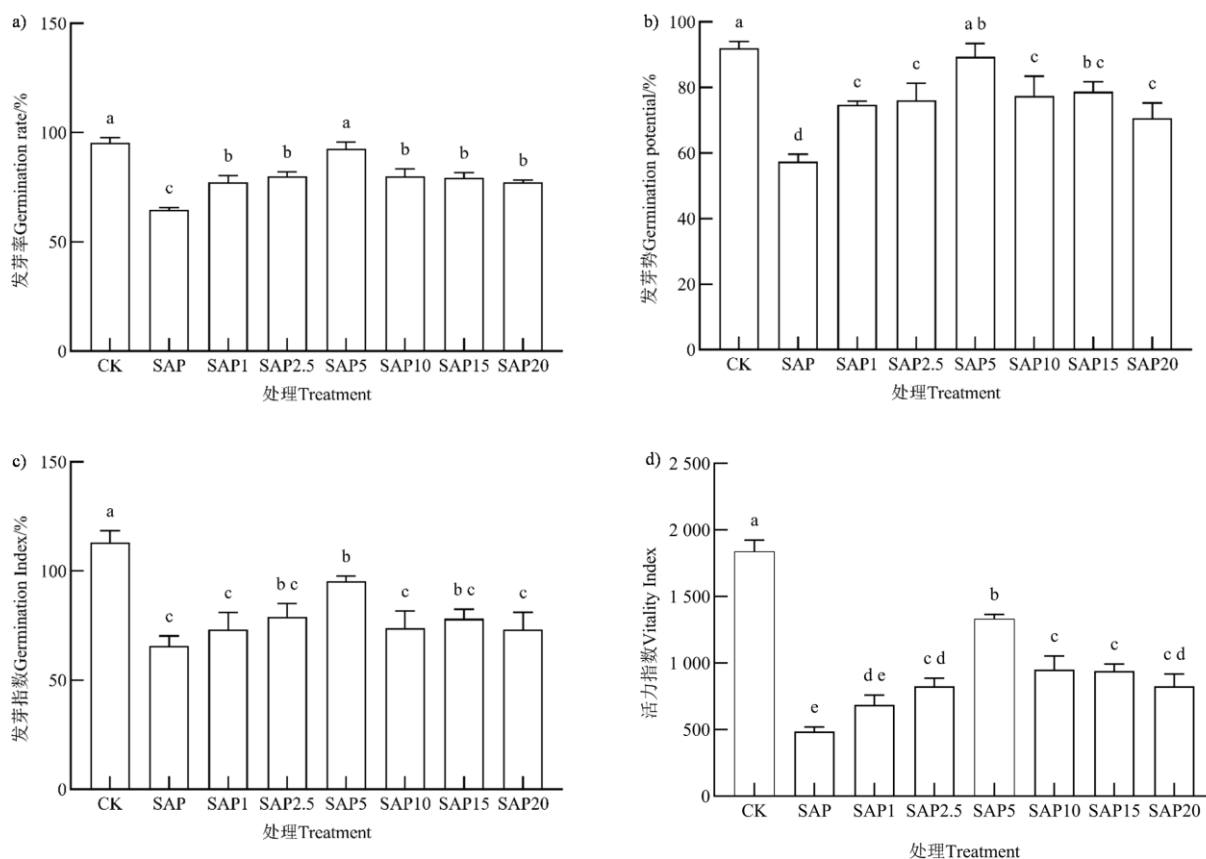
### 1.5 数据处理

采用 SPSS 19.0 统计软件进行数据分析，通过单因素方差分析（ANOVA）结合图基（Tukey）法进行多重比较，运用皮尔逊（Pearson）法分析各指标间相关性；使用 GraphPad Prism 10 与 Origin 2022 软件绘图。

## 2 结果

### 2.1 干旱-盐碱胁迫下不同浓度 CeO<sub>2</sub> NPs 浸种对紫花苜蓿种子发芽状态的影响

干旱-盐碱胁迫下紫花苜蓿种子萌发期试验结果显示：复合胁迫显著降低了紫花苜蓿种子的发芽势、发芽率、发芽指数及活力指数（图 1），CeO<sub>2</sub> NPs 浸种可显著提升上述指标，且随浓度升高呈先升后降趋势。其中 5.0 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs 处理时，各发芽指标均达最大值，与单独复合胁迫组（SAP）差异显著。综上，5.0 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs 浸种对复合胁迫下紫花苜蓿种子萌发有明显促进作用。



- 注：SAP、SAP1、SAP2.5、SAP5、SAP10、SAP15、SAP20 处理分别表示 0、1.0、2.5、5.0、10.0、15.0、20.0 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs 浸种后统一用复合胁迫（60 000 mg·L<sup>-1</sup> 聚乙二醇（6% PEG）+50 mmol·L<sup>-1</sup> 盐碱（NaCl 与 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 摩尔比为 9: 4，NaHCO<sub>3</sub> 调节 pH））处理。CK 为蒸馏水浸种后，用蒸馏水处理。图柱上不同的小写字母表示处理间差异显著（*P*<0.05）。下同。Note: Treatments SAP, SAP1, SAP2.5, SAP5, SAP10, SAP15, and SAP20 represent seed soaking with 0, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0, 15.0, and 20.0 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs, respectively, followed by uniform composite stress treatment (simulated by 60 000 mg·L<sup>-1</sup> polyethylene glycol (PEG-6000) and 50 mmol·L<sup>-1</sup> saline-alkali (NaCl: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>=9: 4, pH adjusted by NaHCO<sub>3</sub>)). CK refers to seeds soaked in distilled water and treated with distilled water. Lowercase letters on bars indicate significant differences among treatments (*P*<0.05). The same below.

图 1 干旱-盐碱胁迫下不同浓度氧化铈纳米颗粒（CeO<sub>2</sub> NPs）浸种对紫花苜蓿种子发芽状态的影响

Fig. 1 Effects of seed soaking with different concentrations of cerium dioxide nanoparticles (CeO<sub>2</sub> NPs) on alfalfa seed germination under drought-salinity stress

### 2.2 干旱-盐碱胁迫下不同浓度 CeO<sub>2</sub> NPs 浸种对紫花苜蓿种子成苗状态的影响

干旱-盐碱胁迫显著抑制了紫花苜蓿的根长、苗长和鲜物质量（图 2）。复合胁迫下，CeO<sub>2</sub> NPs 浸种可改善苜蓿种子成苗的状态，且各指标随浓度升高呈先升后降趋势，其中，浸种浓度为 5.0 mg·L<sup>-1</sup> 时效果最佳：较单独复合胁迫相比，根长、苗长和鲜物质量分别提升了 200.87%、89.06% 和 86.84%（*P*<0.05）。综上，CeO<sub>2</sub> NPs 浸种对复合胁迫下紫花苜蓿种子成苗状态的缓解效果较好。

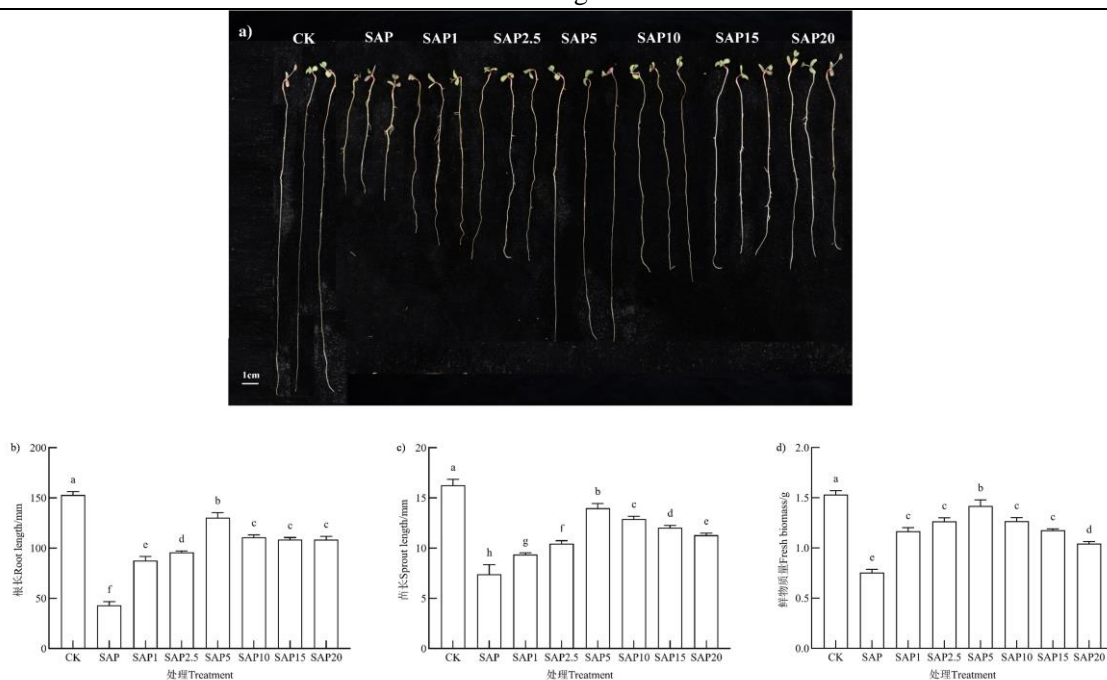


图 2 干旱-盐碱胁迫下不同浓度  $\text{CeO}_2$  NPs 浸种对紫花苜蓿种子成苗状态的影响

Fig. 2 Effects of seed soaking with different concentrations of  $\text{CeO}_2$  NPs on seedling establishment of alfalfa seeds under drought-salinity stress

### 2.3 干旱-盐碱胁迫下 $\text{CeO}_2$ NPs 浸种对紫花苜蓿细胞膜损伤与 $\text{H}_2\text{O}_2$ 积累的影响

基于前期萌发指标, 选取促进效果最显著的  $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CeO}_2$  NPs 浸种组进行后续生理指标测定。结果 (图 3) 表明: 与 CK 组相比, 单独  $\text{CeO}_2$  NPs 浸种对紫花苜蓿幼苗的相对电解质渗漏率、MDA 及  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量均无显著影响 ( $P>0.05$ ); 而干旱-盐碱胁迫显著升高了三者的含量, 较对照组分别增加了 124.28%、123.76%和 135.88%。 $\text{CeO}_2$  NPs 浸种可显著缓解复合胁迫造成的损伤, 相对电导率、MDA 及  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量较复合胁迫分别降低了 26.01%、33.57%和 39.77%。综上,  $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CeO}_2$  NPs 浸种能显著缓解干旱-盐碱胁迫引发的氧化胁迫。

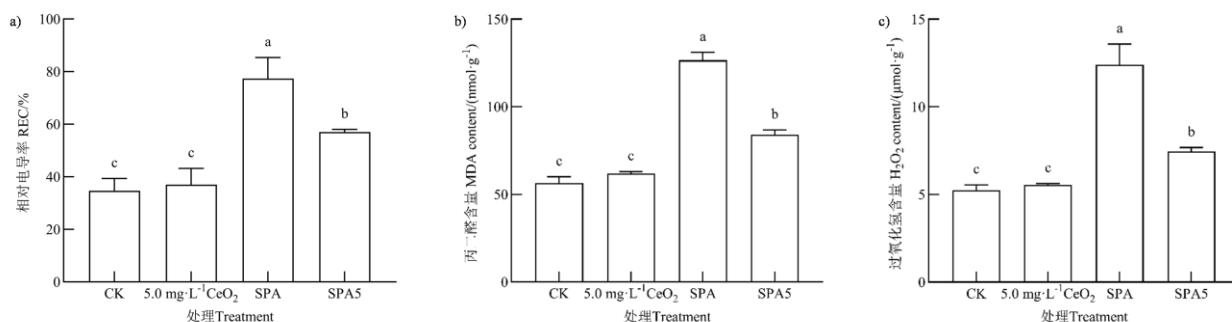


图 3 干旱-盐碱胁迫下  $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CeO}_2$  NPs 浸种对紫花苜蓿相对电导率 (REC)、丙二醛 (MDA) 和过氧化氢 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 含量的影响

Fig. 3 Effects of  $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CeO}_2$  NPs seed soaking on relative electrical conductivity (REC), malondialdehyde (MDA), and hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) content in alfalfa under drought-salinity stress

### 2.4 干旱-盐碱胁迫下 $\text{CeO}_2$ NPs 浸种对紫花苜蓿抗氧化酶系统的影响

在正常条件下, 单独  $\text{CeO}_2$  NPs 浸种对紫花苜蓿的 CAT 和 APX 活性无显著影响 ( $P>0.05$ ) (图 4)。干旱-盐碱胁迫显著提高了 CAT 和 APX 的活性, 较对照组分别增加了 89.99%和 203.13%, 而  $\text{CeO}_2$  NPs 浸种可进一步增强两种酶活性, 与单独复合胁迫相比分别提高了 73.18%和 27.32%。以上结果表明,  $\text{CeO}_2$  NPs 浸种可通过提升抗氧化酶活性缓解复合胁迫引发的氧化损伤。

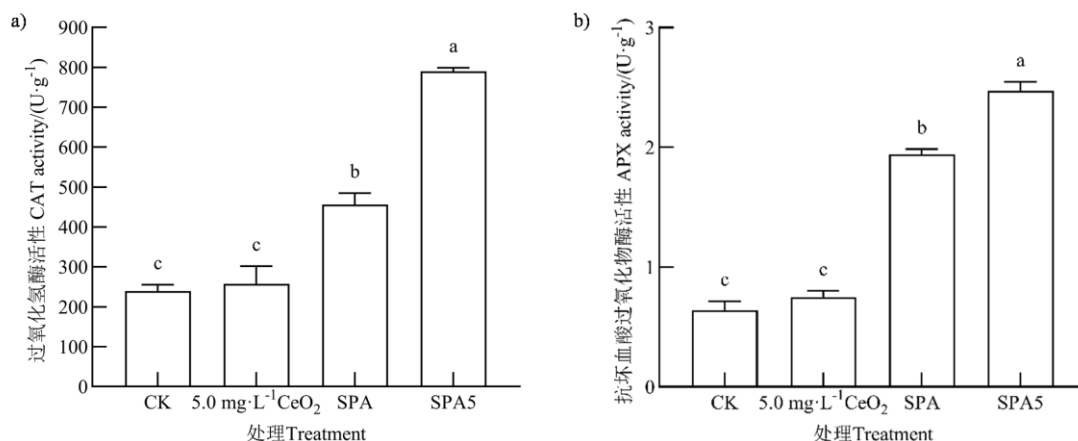


图4 干旱-盐碱胁迫下 5 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs 浸种对紫花苜蓿过氧化氢酶 (CAT) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性的影响

Fig. 4 Effects of seed soaking with 5 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs on catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) activities in alfalfa under drought-salinity stress

### 2.5 干旱-盐碱胁迫下 CeO<sub>2</sub> NPs 浸种对紫花苜蓿干旱调节物质的影响

在正常条件下, 单独 CeO<sub>2</sub> NPs 浸种对紫花苜蓿的可溶性糖和脯氨酸含量无显著影响 ( $P>0.05$ , 图 5)。在干旱-盐碱复合胁迫下, 可溶性糖和脯氨酸含量显著升高, 较对照组分别增加了 78.72% 和 27.59%, 而 CeO<sub>2</sub> NPs 浸种可进一步提升二者含量, 较单独复合胁迫相比, 可溶性糖和脯氨酸含量分别增加了 18.97% 和 34.41%, 表明 CeO<sub>2</sub> NPs 浸种可通过促进干旱调节物质的积累抵御干旱-盐碱胁迫。

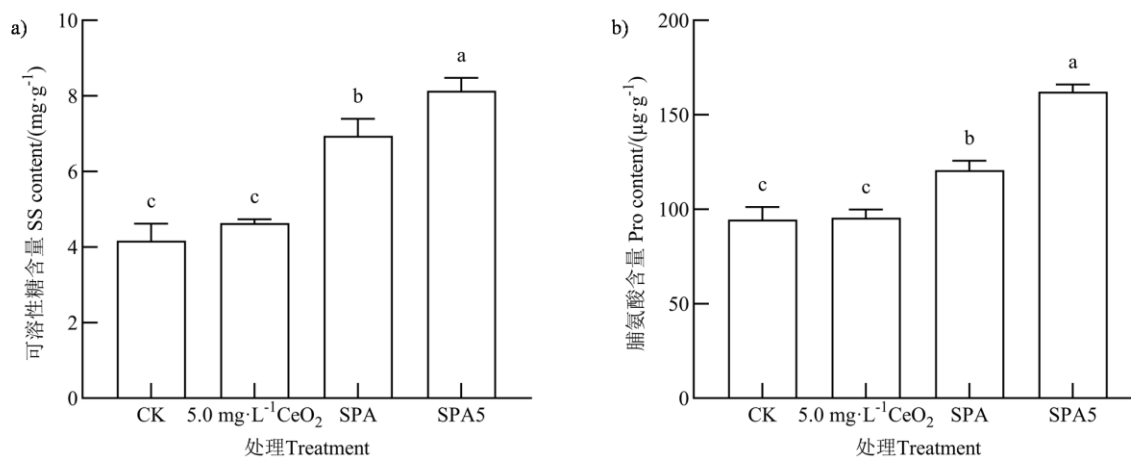
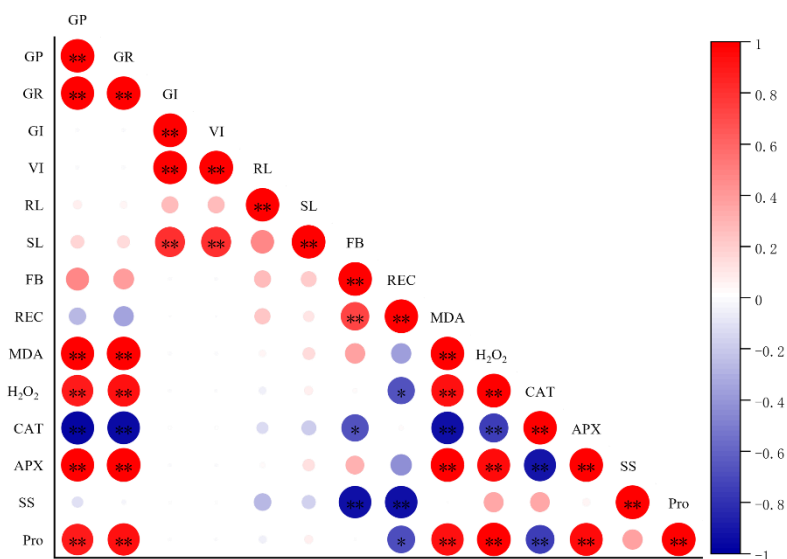


图5 干旱-盐碱胁迫下 5 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs 浸种对紫花苜蓿可溶性糖 (SS) 和脯氨酸 (Pro) 含量的影响

Fig. 5 Effects of 5 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs seed soaking on soluble sugar (SS) and proline (Pro) content in alfalfa plants under drought-salinity stress

### 2.6 干旱-盐碱胁迫下 CeO<sub>2</sub> NPs 浸种对各测定指标影响的相关性

通过对 CeO<sub>2</sub> NPs 浸种下紫花苜蓿各指标进行相关性分析 (图 6) 发现, 生长指标中 GP 与 GR、GI 与 VI 和 SL、VI 与 SL 呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 变化趋势高度同步; APX 与 Pro 呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 体现了抗氧化系统与干旱调节的协同性。膜损伤指标 REC 与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、Pro 显著负相关 ( $P<0.05$ ), MDA 与 CAT、CAT 与 APX 和 Pro 极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 表明抗氧化和干旱调节能力增强可显著降低膜损伤。



注: GP、GR、GI、VI、RL、SL、FB、REC、MDA、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、CAT、APX、SS、Pro 分别表示发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、根长、苗长、鲜物质量、相对电导率、丙二醛、过氧化氢、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶、可溶性糖、脯氨酸。\*  $P < 0.05$ 、\*\*  $P < 0.01$   
Note: GP, GR, GI, VI, RL, SL, FB, REC, MDA, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, CAT, APX, SS, Pro represent respectively germination energy, germination rate, germination index, vigor index, root length, shoot length, fresh biomass, relative electrical conductivity, malondialdehyde, hydrogen peroxide, catalase, ascorbate peroxidase, soluble sugar, proline. \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ .

图 6 干旱-盐碱胁迫下 5 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs 浸种对紫花苜蓿种子萌发和幼苗各指标之间的相关性

Fig. 6 Correlation among alfalfa seed germination parameters following 5 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs seed soaking under drought-salinity stress

### 3 讨论

干旱和盐碱等非生物胁迫会显著抑制植物种子萌发，干旱通过破坏水分吸收与激素平衡阻碍萌发，盐碱则经渗透胁迫、离子毒性及氧化应激延迟发芽并降低发芽率<sup>[17-18]</sup>。纳米技术是农业发展中一个前景广阔的领域，种子纳米引发作为其重要组成部分，有望推动农业向更加可持续的方向发展<sup>[19]</sup>。基于纳米材料的种子处理技术具有替代传统农用化学品的潜力，通过促进作物建苗、增强对生物及非生物胁迫的抗性，最终达到提升产量与农产品质量的目标<sup>[20]</sup>。本研究证实，在干旱-盐碱胁迫下紫花苜蓿的种子萌发和成苗状态均受到明显抑制，而采用 CeO<sub>2</sub> NPs 浸种处理可有效缓解复合胁迫对其造成的负面影响，其中 5.0 mg·L<sup>-1</sup> 的 CeO<sub>2</sub> NPs 在复合胁迫条件下对种子萌发和成苗状态的促进效果最佳（图 1）。

#### 3.1 CeO<sub>2</sub> NPs 对紫花苜蓿萌发呈现“低促高抑”的浓度效应

在本研究中，CeO<sub>2</sub> NPs 浸种处理对干旱-盐碱复合胁迫下的紫花苜蓿萌发与幼苗生长呈现出典型的浓度依赖效应，即“低促高抑”。具体而言，在 5.0 mg·L<sup>-1</sup> 的较低浓度下，CeO<sub>2</sub> NPs 显著缓解了复合胁迫对紫花苜蓿的抑制作用，使种子发芽和成苗指标达到峰值（图 1）。可能是因为铈纳米颗粒可作为种子必需微量元素铈的来源，可用于补充发芽种子中的铈<sup>[21]</sup>。然而，当浓度升高至 10.0~20.0 mg·L<sup>-1</sup> 时，则出现明显抑制，表明高浓度 CeO<sub>2</sub> NPs 可能产生毒性作用，这可能是由于组织中积累过量的铈产生了毒性<sup>[22]</sup>，不仅会阻碍植株对水分的吸收与运输，还会因颗粒附着于根系表面并侵入根际组织，扰乱植物对矿质养分的吸收与平衡，进而导致根系水流通量减少、水力传导能力受限，最终抑制紫花苜蓿根系的伸长生长<sup>[23]</sup>。该规律与多种纳米颗粒在不同作物胁迫响应中的结果高度一致：Gaafar 等<sup>[24]</sup>研究发现，在菜豆盐胁迫响应中应用氧化锌纳米颗粒（ZnO NPs）时，采用叶面喷施、纳米浸种及土壤施用（浓度 25~200 mg·L<sup>-1</sup>）三种方式，均能有效缓解盐胁迫对菜豆生长的抑制。其中，50 mg·L<sup>-1</sup> 的纳米浸种处理效果最显著，可明显改善菜豆鲜物质量、相对含水量、株高及叶绿素含量，并通过调节营养稳态与叶绿素荧光活性，减少活性氧生成。这与本研究中低浓度 CeO<sub>2</sub> NPs 的促进效应（图 2）一致。Almutairi 和 Arabia<sup>[25]</sup>的研究证实，银纳米颗粒

(Ag NPs) 对植物生长的影响同样呈现浓度依赖性, 1.5 mg·L<sup>-1</sup> 的 Ag NPs 能显著促进盐胁迫下番茄种子的萌发和根系生长, 浓度升高则转为抑制。本研究观察到的 CeO<sub>2</sub> NPs 对紫花苜蓿在复合胁迫下“低促高抑”的现象, 与 ZnO NPs 和 Ag NPs 纳米系统在其他作物和胁迫条件下的结果相互印证, 揭示了纳米颗粒在植物胁迫响应中具有普适性的浓度双重调控特性。

### 3.2 CeO<sub>2</sub> NPs 通过协同增强抗氧化系统与渗透调节减轻紫花苜蓿膜脂过氧化损伤

研究表明, 不同类型纳米颗粒在提升植物抗逆性方面具有显著潜力, 其作用机制通常涉及抗氧化能力增强、光合性能优化及激素平衡调节等多种途径。Alhammad 等<sup>[26]</sup>发现 ZnO NPs 与 24-表黄铁醇 (EBL) 联合使用可有效优化玉米在盐胁迫下的生理响应; Jui 等<sup>[27]</sup>、Rai-Kalal 等<sup>[28]</sup>和 Li 等<sup>[29]</sup>则分别证实二氧化钛纳米颗粒 (TiO<sub>2</sub> NPs)、二氧化硅纳米颗粒 (SiO<sub>2</sub> NPs) 和硅纳米颗粒 (Si NPs) 能够通过激活抗氧化系统、改善光合特性以及调节内源激素水平, 进而增强大豆、小麦和辣椒的耐逆能力。此外, Gonzalez-Garcia 等<sup>[30]</sup>和 Baz 等<sup>[31]</sup>的研究进一步指出, 碳纳米材料可通过提高抗氧化物质含量与叶绿素积累, 改善番茄和生菜在盐胁迫与高温胁迫下的生理状态。在上述机制中, 缓解氧化损伤被视为关键环节。过量活性氧 (ROS) 积累会导致细胞氧化损伤<sup>[32]</sup>, 其中, MDA 含量可作为膜脂过氧化程度的重要指标<sup>[33]</sup>。在本研究中, CeO<sub>2</sub> NPs 处理显著降低了紫花苜蓿中 MDA 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量, 同时提高了 APX 活性 (图 3, 图 4), 表明 CeO<sub>2</sub> NPs 通过增强 ROS 清除能力减轻了膜系统损伤。该结果与多项研究相一致: 如氧化镧纳米颗粒 (La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs) 缓解镉胁迫<sup>[34]</sup>、ZnO NPs 提升老化水稻种子中 SOD、CAT 与 APX 活性<sup>[35]</sup>, 以及多孔纳米碳 (PNC) 增强盐胁迫下 SOD 和 POD 活性等<sup>[36]</sup>。热图相关性分析 (图 6) 进一步揭示, 在 5.0 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs 处理下, 紫花苜蓿各生长指标间呈显著正相关; 抗氧化酶 (APX、CAT) 与渗透调节物质脯氨酸 (Pro) 协同上升, 且均与膜损伤相关指标 (REC、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、MDA) 呈显著负相关, 这说明 CeO<sub>2</sub> NPs 可能通过多系统协同作用缓解复合胁迫引起的氧化应激。综上所述, 适宜浓度的 CeO<sub>2</sub> NPs 可通过协同调控抗氧化酶活性与渗透调节物质, 有效减轻膜脂过氧化程度, 从而增强紫花苜蓿在复合胁迫环境下的抗逆能力。

植物对纳米颗粒的响应受基因型、生育阶段和胁迫类型显著影响, 存在明显的种间与品种差异。目前 CeO<sub>2</sub> NPs 促进紫花苜蓿早期生长的机制尚不明确, 代谢组学等系统方法已被建议用于解析相关代谢物变化及其表型调控作用<sup>[37-38]</sup>。后续将融合多组学手段, 开展全生命周期研究, 以系统阐明 CeO<sub>2</sub> NPs 与紫花苜蓿的互作机制, 支撑纳米材料在农业抗逆中的精准应用。

## 4 结论

本研究表明, 采用 0~20.0 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs 浸种紫花苜蓿种子, 可显著改善其在干旱-盐碱胁迫下的种子萌发与幼苗生长状态, 其中, 浓度为 5.0 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub> NPs 浸种处理的促进效果最佳。该浓度下, CeO<sub>2</sub> NPs 能通过上调 CAT、APX 等抗氧化酶活性, 增加可溶性糖、脯氨酸等渗透调节物质含量, 减轻膜脂过氧化与膜系统损伤, 进而提升种子在复合胁迫中的生理适应性。本研究为北方干旱半干旱盐碱地区种植紫花苜蓿提供了便捷、高效且环境友好的调控策略, 具有重要的应用潜力。

## 参考文献 (References)

- [1] Feng D, Zhang W J, Zheng C L, et al. Mechanisms of plant extracts in alleviating drought and saline-alkali stress in plants[J]. *Industrial Crops and Products*, 2025, 233: 121346.
- [2] Zhang Q, Huang J P, Yang J H, et al. Advances in research on climate change and its effects on the arid and semi-arid regions of China over the past century[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2025, 83(3): 699-715. [张强, 黄建平, 杨金虎, 等. 中国干旱、半干旱区气候变化及影响研究百年进展[J]. *气象学报*, 2025, 83(3): 699-715.]
- [3] Yang J S, Yao R J, Wang X P, et al. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1): 10-27. [杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. *土壤学报*, 2022, 59(1): 10-27.]
- [4] Feng C S, Lu X S. Characteristics and application of alfalfa, the king of forage[J]. *Bulletin of Biology*, 2008, 43(4): 21-22. [冯长松, 卢欣石. 牧草之王——紫花苜蓿的特性与应用[J]. *生物学通报*, 2008, 43(4): 21-22.]
- [5] Wei Q Q, Sun W X, Li T S, et al. Effect of sorbitol chelated calcium on seed germination of rapeseed under NaCl stress[J]. *Soils*, 2022, 54(2):

- 285-290. [魏倩倩, 孙文轩, 李腾升, 等. 山梨醇螯合钙对 NaCl 胁迫下油菜种子萌发的影响[J]. 土壤, 2022, 54(2): 285-290.]
- [6] Fang J, Zhao X Q, Shi G F, et al. Effects of drought stress on yields and soil characteristics in different spring wheat fields[J]. Soils, 2024, 56(6): 1231-1239. [方静, 赵小庆, 史功赋, 等. 干旱胁迫对不同春小麦田产量及土壤特性的影响[J]. 土壤, 2024, 56(6): 1231-1239.]
- [7] Sheteiwiy M S, Ulhassan Z, Qi W C, et al. Association of jasmonic acid priming with multiple defense mechanisms in wheat plants under high salt stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 886862.
- [8] Dragicevic V, Spasic M, Simic M, et al. Stimulative influence of germination and growth of maize seedlings originating from aged seeds by 2, 4-D potencies[J]. Homeopathy, 2013, 102(3): 179-186.
- [9] Khan M N, Fu C C, Li J Q, et al. Seed nanoprimer: How do nanomaterials improve seed tolerance to salinity and drought?[J]. Chemosphere, 2023, 310: 136911.
- [10] Fu Y F, Ma L, Li J C, et al. Factors influencing seed dormancy and germination and advances in seed priming technology[J]. Plants, 2024, 13(10): 1319.
- [11] Chen S Y, Lu Y, Wu S F, et al. Effects of seed soaking in Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticle on tomato seed germination and seedling protective enzyme system under saline stress[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(4): 1166-1178. [陈思远, 鲁尧, 武思凡, 等. 纳米级 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 分散液浸种对 NaCl 胁迫下番茄种子萌发及幼苗保护酶系统的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 1166-1178.]
- [12] Khan M N, Li Y H, Fu C C, et al. CeO<sub>2</sub> nanoparticles seed priming increases salicylic acid level and ROS scavenging ability to improve rapeseed salt tolerance[J]. Global Challenges, 2022, 6(7): 2200025.
- [13] Wang S B, Shen X, Guan X, et al. Nano-silicon enhances tomato growth and antioxidant defense under salt stress[J]. Environmental Science: Nano, 2025, 12(1): 315-324.
- [14] Magdy G, Aboelkassim E, Abd Elhaleem S M, et al. A comprehensive review on silver nanoparticles: Synthesis approaches, characterization techniques, and recent pharmaceutical, environmental, and antimicrobial applications[J]. Microchemical Journal, 2024, 196: 109615.
- [15] Jin M Y, Li X H, Li F Z, et al. Effects of mixed saline-alkali stress on germination of rice[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4): 566-574. [金梦野, 李中华, 李昉泽, 等. 盐碱复合胁迫对水稻种子发芽的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(4): 566-574.]
- [16] Chang J J. Identification of melatonin synthesis gene and the signal transduction mechanism of melatonin-regulated cold tolerance in watermelon[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2021. [常静静. 西瓜褪黑素合成基因鉴定及褪黑素调控抗冷性的信号传导机制[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.]
- [17] Gupta A, Rico-Medina A, Caño-Delgado A I. The physiology of plant responses to drought[J]. Science, 2020, 368(6488): 266-269.
- [18] Wang Q Z, Liu Q, Gao Y N, et al. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5565-5577. [王俭珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5565-5577.]
- [19] Usman M, Farooq M, Wakeel A, et al. Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities[J]. Science of the Total Environment, 2020, 721: 137778.
- [20] Shelar A, Singh A V, Chaure N, et al. Nanoprimers in sustainable seed treatment: Molecular insights into abiotic-biotic stress tolerance mechanisms for enhancing germination and improved crop productivity[J]. Science of the Total Environment, 2024, 951: 175118.
- [21] Siddiqui S A, Blinov A V, Serov A V, et al. Effect of selenium nanoparticles on germination of hordéum vulgáre barley seeds[J]. Coatings, 2021, 11(7): 862.
- [22] Sencan A, Kilic S, Kaya H. Stimulating effect of biogenic nanoparticles on the germination of basil (*Ocimum basilicum* L.) seeds[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 1715.
- [23] Guo H H, Liu Y, Chen J D, et al. The effects of several metal nanoparticles on seed germination and seedling growth: A meta-analysis[J]. Coatings, 2022, 12(2): 18.
- [24] Gaafar R M, Diab R H, Halawa M I, et al. Role of zinc oxide nanoparticles in ameliorating salt tolerance in soybean[J]. Egyptian Journal of Botany, 2020, 60(3): 733-747.
- [25] Almutairi Z M, Arabia S. Effect of nano-silicon application on the expression of salt tolerance genes in germinating tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings under salt stress[J]. Plant Omics, 2016, 9: 106.
- [26] Alhammad B A, Ahmad A, Seleiman M F, et al. Seed priming with nanoparticles and 24-epibrassinolide improved seed germination and enzymatic performance of *Zea mays* L. in salt-stressed soil[J]. Plants, 2023, 12(4): 690.
- [27] Jui K F, Mannan M A, Karim M A, et al. Enhancing soybean growth, yield, and seed protein by TiO<sub>2</sub> nanoparticles and *Brevibacterium sediminis* under drought stress[J]. Heliyon, 2025, 11(12): e43499.
- [28] Rai-Kalal P, Tomar R S, Jajoo A. Seed nanoprimer by silicon oxide improves drought stress alleviation potential in wheat plants[J]. Functional Plant Biology, 2021, 48(9): 905-915.
- [29] Li Y T, Zan T X, Li K K, et al. Silica nanoparticles promote the germination of salt-stressed pepper seeds and improve growth and yield of field pepper[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 337: 113570.
- [30] González-García Y, López-Vargas E R, Pérez-Álvarez M, et al. Seed priming with carbon nanomaterials improves the bioactive compounds of

- tomato plants under saline stress[J]. *Plants*, 2022, 11(15): 1984.
- [31] Baz H, Creech M, Chen J J, et al. Water-soluble carbon nanoparticles improve seed germination and post-germination growth of lettuce under salinity stress[J]. *Agronomy*, 2020, 10(8): 1192.
- [32] An Y M, Song L L, Liu Y R, et al. *De novo* transcriptional analysis of alfalfa in response to saline-alkaline stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 931.
- [33] Del Rio D, Stewart A J, Pellegrini N. A review of recent studies on malondialdehyde as toxic molecule and biological marker of oxidative stress[J]. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2005, 15(4): 316-328.
- [34] Gao J Z, Ding Y Z, Liu Y Z, et al. Effects of seed priming with La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on seed vigor of alfalfa (*Medicago sativa*) under salt stress[J]. *South African Journal of Botany*, 2025, 176: 1-11.
- [35] Sharma D, Afzal S, Singh N K. Nanopriming with phytosynthesized zinc oxide nanoparticles for promoting germination and starch metabolism in rice seeds[J]. *Journal of Biotechnology*, 2021, 336: 64-75.
- [36] Li Z Q, Zhu L, Zhao F M, et al. Plant salinity stress response and nano-enabled plant salt tolerance[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 843994.
- [37] Boyles M S P, Ranninger C, Reischl R, et al. Copper oxide nanoparticle toxicity profiling using untargeted metabolomics[J]. *Particle and Fibre Toxicology*, 2016, 13(1): 49.
- [38] Liu Y, Zhang W H, Elango D, et al. Metabolome and transcriptome analysis reveals molecular mechanisms of watermelon under salt stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2023, 206: 105200.

(责任编辑: 陈荣府)