

Fe-Mg 纳米颗粒引发对盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响

陈川燕¹ 宋志文¹ 李玉祥¹ 郝全有^{2,*} 朱岚^{1,*}

(¹石河子大学 农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003; ²新疆生产建设兵团第三师农业科学研究所, 新疆 图木舒克 843900; *通信作者, email: haoqy@live.cn; zhulan@shzu.edu.cn)

Effects of Fe-Mg Nano-priming on Germination of Rice Seeds and Seedling Growth Under Salt Stress

CHEN Chuanyan¹, SONG Zhiwen¹, LI Yuxiang¹, HAO Quanyou^{2,*}, ZHU Lan^{1,*}

(¹Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture of Xinjiang Production Construction Corps / Agricultural College, Shihezi University, Shihezi 832003, China;

²Agricultural Science Research Institute, Third Production and Construction Corps of Xinjiang, Tumxuk 843900, China; *Corresponding author, email: haoqy@live.cn; zhulan@shzu.edu.cn)

Abstract: 【Objective】 This study aims to investigate the effects of nano-priming technology on rice seed germination under salt stress, in order to provide technical support for rice cultivation in saline-alkali soils. 【Method】 The *japonica* rice variety, Ningjing 47, was used as the experimental material. Salt stress treatments (0 and 150 mmol/L NaCl) were applied, and five concentrations of Fe-Mg nanoparticles (0, 50, 100, 200, and 400 mg/L) were tested under 150 mmol/L NaCl stress. The effects on seed germination, seedling growth, and physiological characteristics were examined. 【Result】 The results showed that salt stress significantly inhibited rice seed germination and seedling growth. Nano-priming did not significantly affect germination percentage or germination potential but enhanced seedling growth. It increased the activities of superoxide dismutase (by 27.78%–76.39%), peroxidase (by 14.05%–38.71%), and catalase (by 18.67%–120.00%), as well as the content of ascorbic acid (by 4.40%–225.79%), soluble sugars (by 63.08%–145.96%), proline (by 10.33%–16.88%), and chlorophyll (by 45.38%–105.31%). It also reduced malondialdehyde content (by 16.94%–32.41%) and enhanced the selective transport coefficient for K⁺ over Na⁺. 【Conclusion】 The concentration of 200 mg/L Fe-Mg nanoparticles was identified as optimal for alleviating salt stress and promoting rice germination and seedling growth.

Keywords: rice; Fe-Mg nano-particle; seed priming; salt stress

摘 要: 【目的】探究纳米引发技术对盐胁迫下水稻种子萌发的影响,为盐碱地水稻种植提供技术参考。【方法】以宁粳47号水稻为供试材料,设置盐胁迫处理(0、150 mmol/L NaCl),并在150 mmol/L NaCl胁迫下,设置0、50、100、200、400 mg/L 5种浓度的Fe-Mg纳米颗粒处理,研究纳米引发对盐胁迫下水稻种子萌发、幼苗生长及生理特性的影响。【结果】盐胁迫显著抑制了水稻种子萌发和幼苗生长。纳米引发对水稻种子的发芽率和发芽势没有显著影响,但能促进幼苗生长,显著提高超氧化物歧化酶(27.78%~76.39%)、过氧化物酶(14.05%~38.71%)和过氧化氢酶(18.67%~120.00%)活性及维生素C(4.40%~225.79%)、可溶性糖(63.08%~145.96%)、脯氨酸(10.33%~16.88%)、叶绿素(45.38%~105.31%)含量,降低丙二醛含量(16.94%~32.41%),提高钾离子选择交换系数。【结论】200 mg/L Fe-Mg纳米颗粒引发是缓解盐胁迫,促进水稻萌发和幼苗生长的最适浓度。

关键词: 水稻; Fe-Mg 纳米颗粒; 种子引发; 盐胁迫

盐胁迫是制约作物生长发育的主要非生物胁迫因素之一,在种子萌发及幼苗建成期的高盐暴露会诱发源库运输障碍与产量构成因子衰退,造成不可逆的产量损失^[1]。据统计,我国盐碱地面积为

9.9×10^7 hm²,其中仅有约9.39%在耕地红线以内,大面积的盐碱地无法耕种,严重限制了我国农业生产的发展^[2]。水稻作为沿海滩涂和盐碱地改良的先锋粮食作物,深入解析其耐盐碱机制并提高耐盐能

收稿日期: 2025-06-17; 修改稿收到日期: 2025-10-05。

基金项目: 石河子大学青年人才培育项目(PYZK202412); 国家自然科学基金资助项目(32360527)。

力,对保障国家粮食安全和推进盐碱地资源可持续利用具有战略意义^[3]。因此,解决盐胁迫下水稻萌发、出苗困难的问题是实现扩大水稻种植面积和盐碱地开发利用的关键。

种子引发(seed priming)是一种通过可控渗透压环境诱导种子完成缓慢吸胀吸水过程,同步启动萌发前期关键代谢活动、修复 DNA 断裂、调节水合物含量并促进膜系统修复与重构^[4-6],从而提升植株抗逆性的种子预处理策略,兼具经济可行性与环境可持续性。纳米颗粒(nano-particles, NPs)因其独特的理化性质,能够促进植物种子萌发、生长和提高抗逆性及防治植物疾病等。因此,近年来,纳米引发(nanopriming)技术开始受到关注^[7]。研究表明,不同的纳米材料处理能促进水稻种子萌发^[8]、幼苗生长和淀粉代谢^[9]、增强水稻抗旱性^[10]、调控水稻的抗病能力、抑制稻瘟病的发生^[11]、缓解水稻受到的砷胁迫^[12]与镉胁迫^[13]。

目前,关于纳米材料缓解作物盐胁迫的研究主要集中于单一金属纳米材料,而针对双金属复合纳米材料的研究较少,其对盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长发育的调节机制尚不完全明确。鉴于纳米材料的生物效应普遍存在剂量依赖性,本研究采用 Fe-Mg 纳米颗粒(Fe-Mg NPs)对水稻种子进行引发处理,旨在分析并揭示其在盐胁迫下对水稻萌发和幼苗生长的影响及缓解水稻盐胁迫的作用机制,并筛选出适宜的处理浓度,为推广水稻盐碱地种植及纳米材料在农业生产中的应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 NaCl 浓度处理试验

供试水稻为宁粳 47 号,由新疆农业科学院粮食作物研究所提供。将 NaCl 溶液配制成为 0 mmol/L 和 150 mmol/L 两种浓度。选取籽粒饱满、大小一致的水稻种子,经 1%次氯酸钠溶液消毒 5~10 min 后,用去离子水冲洗 3~5 次,室温晾干。种子均匀放置于发芽盒(12 cm×12 cm×5.4 cm),加入 15 mL 相应浓度 NaCl 溶液,每盒 30 粒。置于光照培养箱中培养,光强 4000 lx,光周期 12 h/d,昼夜温度 28℃/20℃,定期补充水分。每个处理重复 3 次,采用完全随机设计。

1.2 Fe-Mg NPs 引发试验

参考已有文献^[14-15]并通过预实验确定盐胁迫及纳米引发液浓度,在 150 mmol/L NaCl 胁迫背景下,设 0 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、200 mg/L 和

400 mg/L 5 个不同浓度 Fe-Mg NPs 溶液处理,水溶液引发为对照(0 mg/L)。种子消毒处理同前。晾干后,将种子置于不同浓度 Fe-Mg NPs 引发液中,密封后于遮光条件下以 70 r/min 振荡 12 h。引发结束后,用去离子水冲洗种子 3 次,回干至初始含水量。种子均匀放置于发芽盒中,加入 15 mL 150 mmol/L NaCl 溶液,每盒放入 30 粒,每个处理重复 3 次。培养条件同上。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 种子萌发指标

以胚根伸出种皮 2 mm 为发芽标准,待种子全部萌发后终止试验,逐日统计发芽数并通过下面公式^[16]计算种子萌发的相关指标。

发芽率(%)=(发芽种子数/供试种子数)×100; (1)

发芽势(%)=(发芽高峰期的发芽种子数/供试种子数)×100; (2)

发芽指数(GI)= $\sum (G_t/D_t)$; (3)

活力指数(VI)=GI×S; (4)

式(3)、(4)中, G_t 表示时间 t 内发芽数, D_t 表示对应发芽的天数; S 表示试验结束时胚根的长度(cm)。

1.3.2 幼苗形态指标

在萌发试验第 7 天,选取长势一致的幼苗测定根数,将幼苗分为地上部和地下部,分别称取鲜质量。利用扫描仪(Epson V500, 美国)扫描,将获取的水稻幼苗根系扫描成图像文件,用图像分析软件(WinRHIZO, 加拿大)分析计算根系特征指标。105℃下杀青 15 min, 85℃烘至恒重,称量并记录干物质量。

1.3.3 幼苗生理指标

幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性和可溶性糖含量、脯氨酸含量、叶绿素含量均参照王学奎^[17]的方法测定,丙二醛(MDA)含量参照郝建军^[18]等的方法测定,维生素 C(VI)含量用钼蓝比色法测定。 Na^+ 、 K^+ 含量用火焰光度计法^[19]测定,并按下列公式^[20]计算离子选择交换系数:

$\text{SK/Na} = \frac{\text{叶}([\text{K}^+]/[\text{Na}^+])}{\text{根}([\text{K}^+]/[\text{Na}^+])}$; (5)

式(5)中,SK/Na 值越大表示根系控制 Na^+ ,促进 K^+ 向叶片运输的能力越强,根系积累的 Na^+ 越多,即植物抗盐性越强。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2019 对数据进行录入和处理,运用 SPSS Statistics 26 软件进行统计分析,用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差法(LSD)进行差异显著性检验,Origin 2024 软件绘图。显著水

表 1 盐胁迫对水稻种子萌发的影响

Table 1. Effects of salt stress on the germination of rice seeds

NaCl 浓度	发芽势	发芽率	发芽指数	活力指数
NaCl concentration(mmol/L)	Germination potential(%)	Germination rate(%)	Germination index	Vigor index
0	90.83±3.26 a	97.92±2.08 a	32.02±1.73 a	193.09±10.54 a
150	66.67±7.14 b	90.00±3.33 b	17.45±2.86 b	48.86±3.65 b

同列数据后不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。
Different letters within a column indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

表 2 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻种子萌发的影响

Table 2. Effect of Fe-Mg NPs priming on seed germination of rice under salt stress

Fe-Mg NPs 浓度	发芽势	发芽率	发芽指数	活力指数
Fe-Mg NPs concentration(mg/L)	Germination potential(%)	Germination rate(%)	Germination index	Vigor index
0	82.78±4.99 a	93.89±4.95 a	27.82±3.46 b	113.23±14.07 b
50	83.89±7.55 a	93.89±4.95 a	27.04±3.29 b	122.92±14.96 b
100	85.00±4.92 a	95.56±2.46 a	30.81±0.92 ab	135.11±4.03 b
200	86.67±3.97 a	96.11±3.51 a	34.86±4.54 a	175.55±22.86 a
400	80.56±6.07 a	93.89±4.35 a	27.45±3.51 b	114.51±14.65 b

平为 $P<0.05$ ，试验结果均用平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对水稻种子萌发的影响

与 0 mmol/L NaCl 处理相比，150 mmol/L NaCl 处理显著抑制了水稻种子的萌发($P<0.05$)。种子的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数分别降低 26.60%、8.09%、45.50%和 72.81% ($P<0.05$ ，表 1)。同时，与 0 mmol/L NaCl 处理相比，150 mmol/L NaCl 处理显著抑制了水稻幼苗的生长。其中，生物量参数(地上部鲜质量、根系鲜质量和总干质量)分别显著降低 32.43%、21.91%和 44.00%；形态参数(苗长、根长和根数)分别显著降低 19.28%、53.57%和 44.00%；根系特征参数(根投影面积、根表面积、根系直径和根系体积)分别显著降低 42.16%、44.95%、10.00%和 46.67%。叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和叶绿素总含量分别降低 50.00%、83.33%、61.90%，类胡萝卜素含量没有显著差异；抗氧化酶 SOD、POD 和 CAT 活性分别显著降低 27.42%、23.70%和 31.90%，VC 含量显著减少 72.69%而 MDA 含量显著增加 159.56%；可溶性糖和脯氨酸含量分别增加 17.07%和 37.06%；地上部与根系 Na^+ 含量分别增加 1461.90%、311.10%， K^+ 含量分别降低 22.05%、25.49%， Na^+ 地上部-根系转运系数增加 288.46%， K^+ 选择交换系数降低 54.73% (附表 1)。

2.2 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻萌发的影响

适宜浓度的 Fe-Mg NPs 引发可促进盐胁迫下水

稻种子的萌发。随着引发剂浓度的增加，发芽指标呈先增后降趋势(表 2)。发芽势和发芽率在不同处理浓度间无显著差异($P>0.05$)，均保持较高水平，分别稳定在 80.56%~86.67%和 93.89%~96.11%。发芽指数和活力指数表现出浓度依赖性，在 200 mg/L 时表现最佳，发芽指数和活力指数均达峰值，较 0 mg/L 分别显著增加 25.31%、55.04%；而当浓度增至 400 mg/L 时，则表现出抑制，其数值回落至 0 mg/L 水平。随着引发剂浓度的增加，萌发速率呈先增后降趋势(图 1)。与 0 mg/L 相比，100 mg/L 表现最优，显著提高种子萌发速率；其次是 200 mg/L，其萌发速率仅比 100 mg/L 低 7.09%；然而，当浓度增至

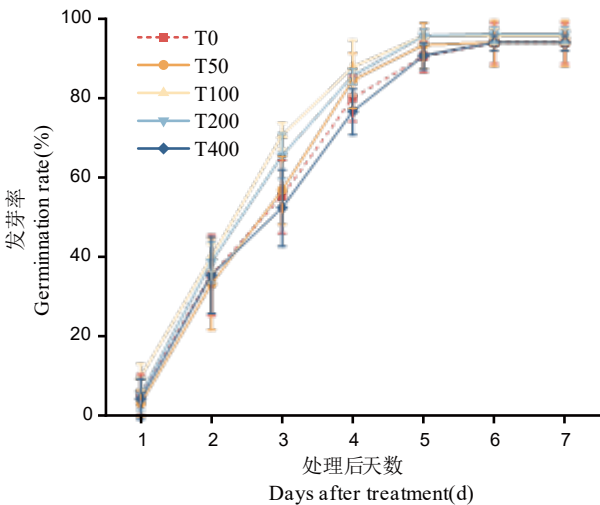


图 1 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻种子发芽率的影响
Fig. 1. Effect of Fe-Mg NPs priming on the germination rate of rice seeds under salt stress



图 2 盐胁迫下不同浓度 Fe-Mg NPs 处理 6 d 后的水稻种子

Fig. 2. Rice seeds treated with different concentrations of Fe-Mg NPs under salt stress for 6 days

400 mg/L 时, 种子萌发速率降低。

2.3 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗生长的影响

不同浓度的 Fe-Mg NPs 引发水稻种子, 在盐胁迫下生长 6 d 后长势呈显著差异(图 2)。其中, 在 0 mg/L, 根长缩短、分支稀疏; 随着处理浓度升高, 50~100 mg/L 处理下根系和地上部生长逐步改善, 200 mg/L 表现最优, 根长增加、根毛增多, 苗高显著提升; 而当浓度增至 400 mg/L 时, 根长缩短、苗高降低。值得注意的是, 与 0 mg/L 相比, 其他处理

浓度根系根毛明显增多, 这可能是 Fe-Mg NPs 引发提升水稻耐盐性的关键形态学基础。

适宜浓度的 Fe-Mg NPs 引发可显著促进盐胁迫下水稻幼苗的生长($P<0.05$)。随着引发剂浓度的上升, 生物量参数(包括地上部鲜质量、根系鲜质量、总干质量)和形态参数(苗长和根长)均呈先增后降趋势(图 3)。其中, 200 mg/L 表现最优, 各指标均达峰值, 较 0 mg/L 分别显著提高 50.59%、39.83%、21.75%、23.30%和 31.88%; 然而, 当浓度增至 400 mg/L 时, 表现出抑制效应。

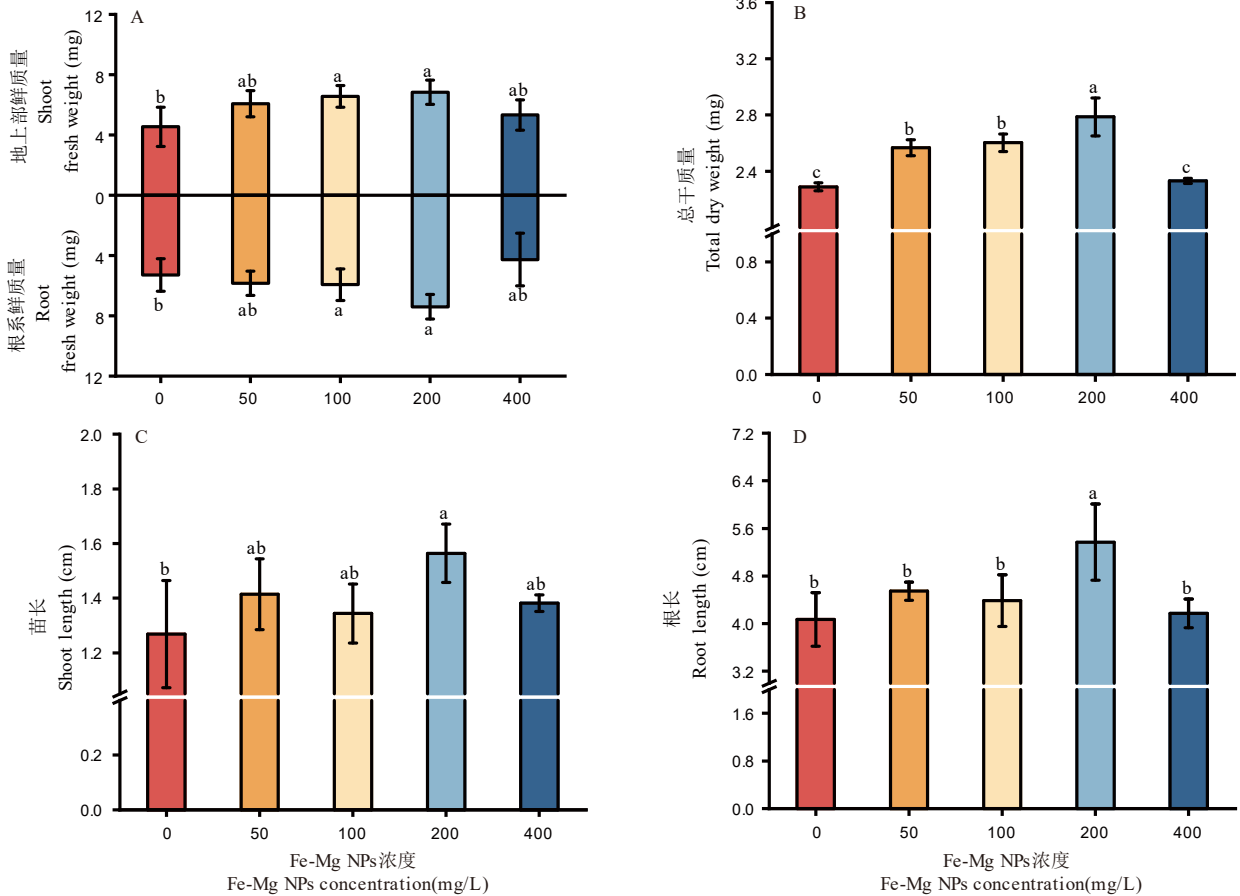


图 3 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗地上部鲜质量和根系鲜质量(A)、总干质量(B)、苗长(C)及根长(D)的影响

Fig. 3. Effects of Fe-Mg NPs on shoot fresh weight and root fresh weight (A), total dry weight (B), shoot length (C), and root length (D) of rice seedlings under salt stress

表 3 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗根系特征的影响

Fe-Mg NPs 浓度 Fe-Mg NPs concentration(mg/L)	根数 Root number	根投影面积 Root projected area(cm ²)	根表面积 Root surface area(cm ²)	根系直径 Root diameter(mm)	根系体积 Root volume(cm ³)
0	2.47±0.37 b	3.54±0.36 b	11.11±1.14 b	0.26±0.01 a	0.09±0.01 bc
50	2.91±0.34 b	3.89±0.25 ab	12.23±0.79 ab	0.27±0.02 a	0.10±0.01 abc
100	3.07±0.23 b	4.17±0.43 ab	13.09±1.34 ab	0.28±0.02 a	0.12±0.01 ab
200	3.84±0.23 a	4.54±0.92 a	14.27±2.89 a	0.28±0.01 a	0.12±0.03 a
400	2.84±0.41 b	3.49±0.39 b	10.79±1.00 b	0.27±0.03 a	0.08±0.01 c

2.4 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗根系特征的影响

适宜浓度的 Fe-Mg NPs 引发可显著促进盐胁迫下水稻幼苗根系的生长($P<0.05$), 随着引发剂浓度的增加, 根系特征参数(包括根数、根投影面积、根表面积及根系体积)均呈先增后降趋势(表 3)。其中, 200 mg/L 表现最佳, 各指标均达到峰值, 较 0 mg/L 分别显著增加 55.47%、28.25%、28.44%和 33.33%; 然而, 当浓度增至 400 mg/L 时, 各指标均出现明显回落。值得注意的是, 各处理对根直径无显著影响, 这表明 Fe-Mg NPs 主要通过促进根系伸长和根毛伸长(而非增粗)来增强水稻幼苗的耐盐性。

2.5 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗叶片中叶绿素含量的影响

适宜浓度的 Fe-Mg NPs 引发可显著提高盐胁迫下水稻幼苗叶片中叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量和叶绿素总含量($P<0.05$)。随着引

发剂浓度的上升, 均呈先增后降的趋势。200 mg/L 较 0 mg/L 下均显著增加, 叶绿素 a 含量增加 82.93% (图 4-A), 叶绿素 b 含量增加 187.48% (图 4-B), 类胡萝卜素含量增加 43.56% (图 4-C), 叶绿素总含量增加 105.31% (图 4-D)。

2.6 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗叶片中抗氧化酶活性、MDA 及 VC 含量的影响

Fe-Mg NPs 引发可显著提高盐胁迫下水稻幼苗叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性。随着引发剂浓度的增加, 均呈先增后降的趋势。50、100、200、400 mg/L 下, 三种酶活性均显著高于 0 mg/L, 其中 SOD 活性分别增加 27.78%、76.39%、40.28%、36.11% (图 5-A); POD 活性分别增加 18.09%、26.61%、38.71%、14.05% (图 5-B); CAT 活性分别增加 18.67%、70.93%、120.00%、32.00% (图 5-C)。水稻幼苗叶片中 MDA 含量变化趋势与 SOD、POD、CAT 活性变化趋势相反, 随着引发剂浓度的增加, 呈先降后增的趋势。

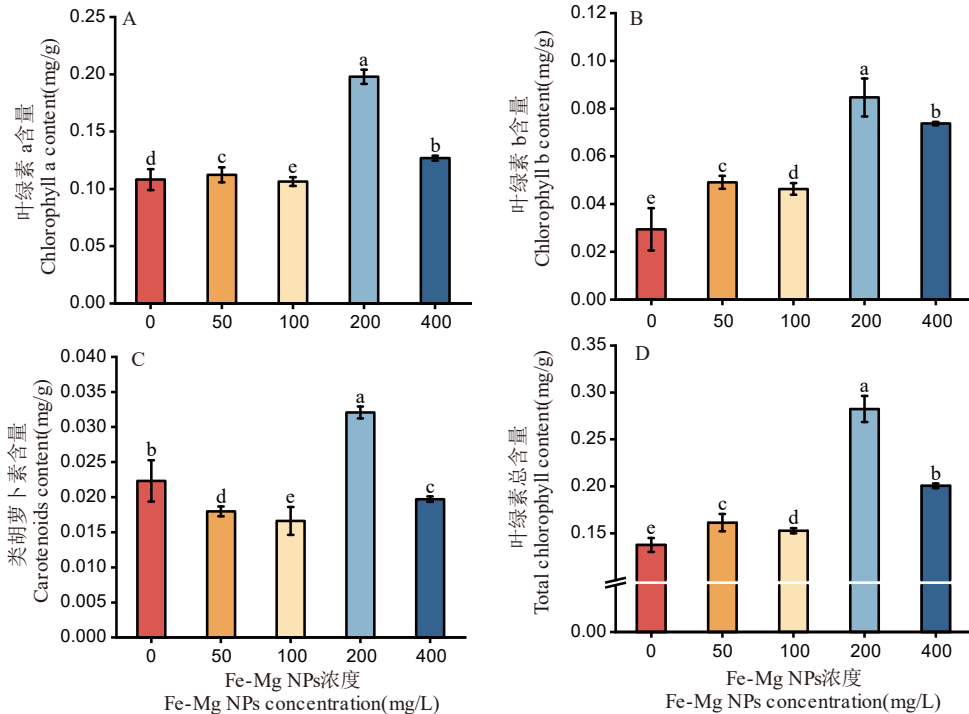


图 4 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗叶片叶绿素含量的影响

Fig. 4. Effects of Fe-Mg NPs on chlorophyll content in rice seedling leaves under salt stress

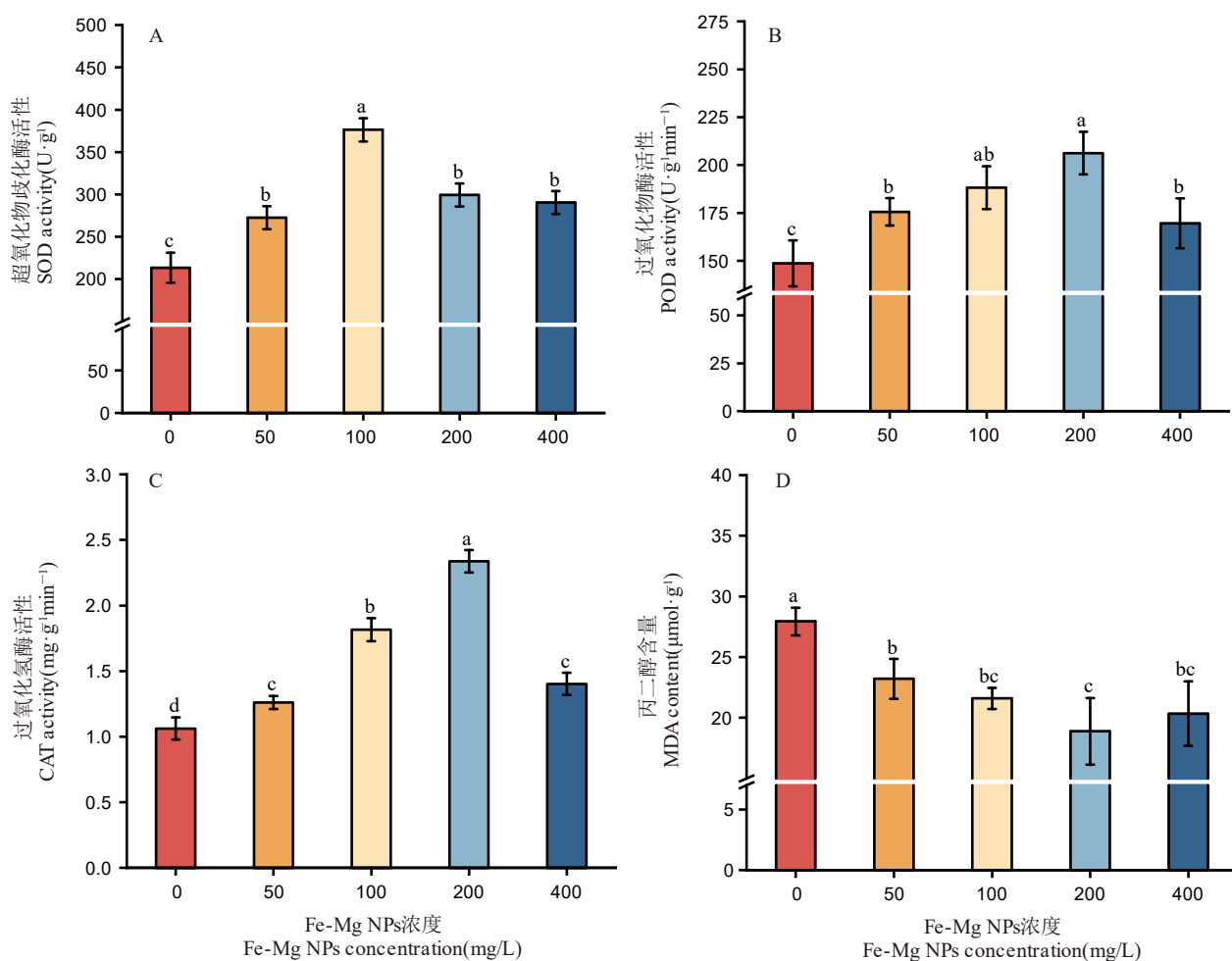


图 5 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗叶片 SOD (A)、POD (B)、CAT (C) 活性及 MDA (D) 含量的影响

Fig. 5. Effects of Fe-Mg NP priming on SOD (A), POD (B) and CAT (C) activities and MDA content (D) in rice seedling leaves under salt stress

且 50、100、200、400 mg/L 均显著低于 0 mg/L, 分别降低 16.94%、22.69%、32.41%、27.18% (图 5-D)。

Fe-Mg NPs 引发可显著增加盐胁迫下水稻幼苗叶片中维生素 C 含量 ($P < 0.05$)。随着引发剂浓度的增加, 幼苗叶片维生素 C 含量呈先增后降趋势。50、100、200、400 mg/L 均显著高于 0 mg/L, 分别增加 32.70%、143.40%、225.79%、4.40%, 在 200 mg/L 达到峰值 (图 6)。

2.7 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗叶片中可溶性糖及脯氨酸含量的影响

适宜浓度的 Fe-Mg NPs 引发可显著增加盐胁迫下水稻幼苗叶片中可溶性糖含量 ($P < 0.05$)。随着引发剂浓度的上升, 呈先增后降趋势。与 0 mg/L 相比, 100、200 mg/L 分别显著增加 145.96%、104.55% (图 7-A), 两者间无显著差异。脯氨酸含量变化与可溶性糖含量变化趋势一致。与 0 mg/L 相比, 100、200 mg/L 分别显著增加 10.33%、16.88%, 且均显

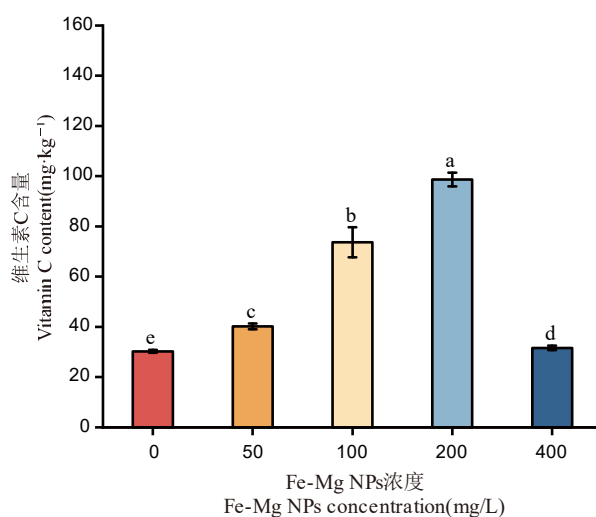


图 6 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗叶片维生素 C 含量的影响

Fig. 6. Effects of Fe-Mg NPs on vitamin C content in rice seedling leaves under salt stress

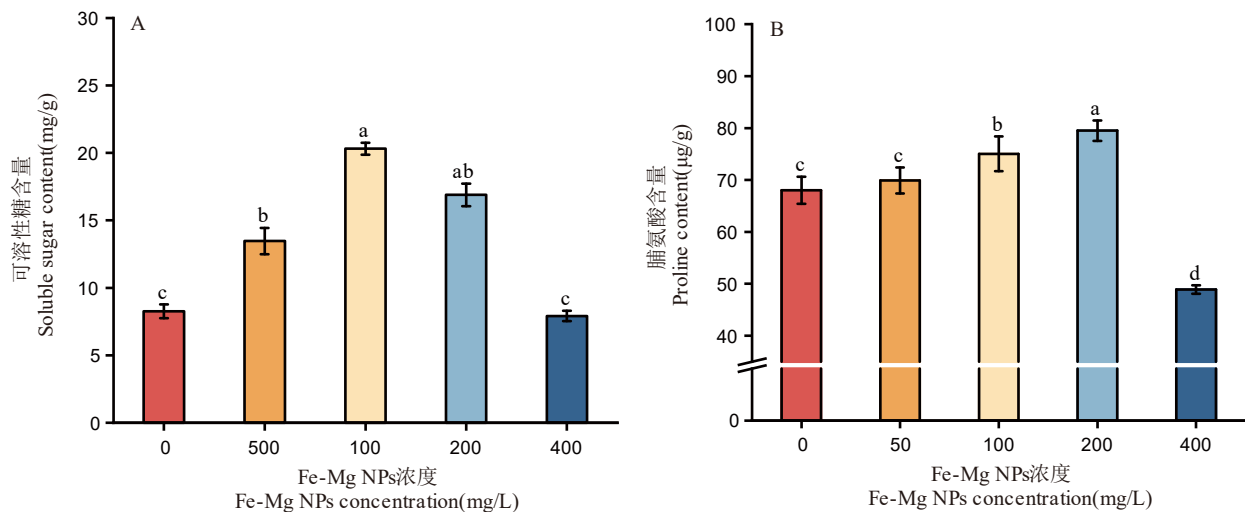


图 7 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗叶片可溶性糖含量(A)及脯氨酸含量(B)的影响
Fig. 7. Effects of Fe-Mg NPs priming on soluble sugar content (A) and proline content (B) in rice seedling leaves under salt stress

表 4 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗中钠钾离子含量的影响

Table 4. Effect of Fe-Mg NPs on sodium and potassium ion content in rice seedlings under salt stress

指标 Index	Fe-Mg NP 浓度 Fe-Mg NP concentration				
	0 mg/L	50 mg/L	100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L
地上部 Na ⁺ 含量 SNC(μg/mL)	36.03±0.15 d	37.43±0.31 c	38.47±0.25 b	34.43±0.06 e	43.30±0.20 a
根系 Na ⁺ 含量 RNC(μg/mL)	42.27±0.51 e	50.93±1.15 b	44.30±0.78 d	53.53±0.86 a	44.50±0.50 c
地上部 K ⁺ 含量 SKC(μg/mL)	9.17±0.06 a	8.97±0.06 b	8.43±0.06 d	8.83±0.06 c	8.43±0.06 e
根系 K ⁺ 含量 RKC(μg/mL)	3.03±0.06 c	3.17±0.06 b	3.03±0.06 d	3.50±0.10 a	2.97±0.06 e
Na ⁺ 地上部/根系 NS/R	0.85±0.01 c	0.74±0.02 d	0.87±0.01 b	0.64±0.01 e	0.97±0.01 a
离子选择交换系数 SK/Na	3.55±0.09 c	3.85±0.05 b	3.20±0.05 d	3.93±0.19 a	2.92±0.05 e

SNC, Shoot Na⁺ content; RNC, Root Na⁺ content; SKC, Shoot K⁺ content; RKC, Root K⁺ content; NS/R, Shoot-to-root Na⁺ translocation factor; SK/Na, Leaf([K⁺]/[Na⁺])/Root([K⁺]/[Na⁺]).

著高于其他引发处理。然而,当引发剂浓度增至 400 mg/L 时,脯氨酸含量比 0 mg/L 显著降低 28.06% (图 7-B)。

2.8 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗中钠钾离子含量的影响

适宜浓度的 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗中钠钾离子吸收与运输有显著影响($P<0.05$)。随着处理浓度的增加,地上部 Na⁺含量呈上升趋势(表 4),200 mg/L 时出现显著下降,400 mg/L 时达到峰值。与之相反,根系 Na⁺含量在 200 mg/L 时达最高水平,但其 Na⁺地上部/根系转运系数最低;地上部 K⁺含量呈下降趋势,根系 K⁺含量在 200 mg/L 时增至最大;离子选择交换系数呈先增后降趋势,在 200 mg/L 时,达到最大值,与 0 mg/L 相比,显著增加 38.00%。然而,当浓度增至 400 mg/L 时,下降至最低水平。

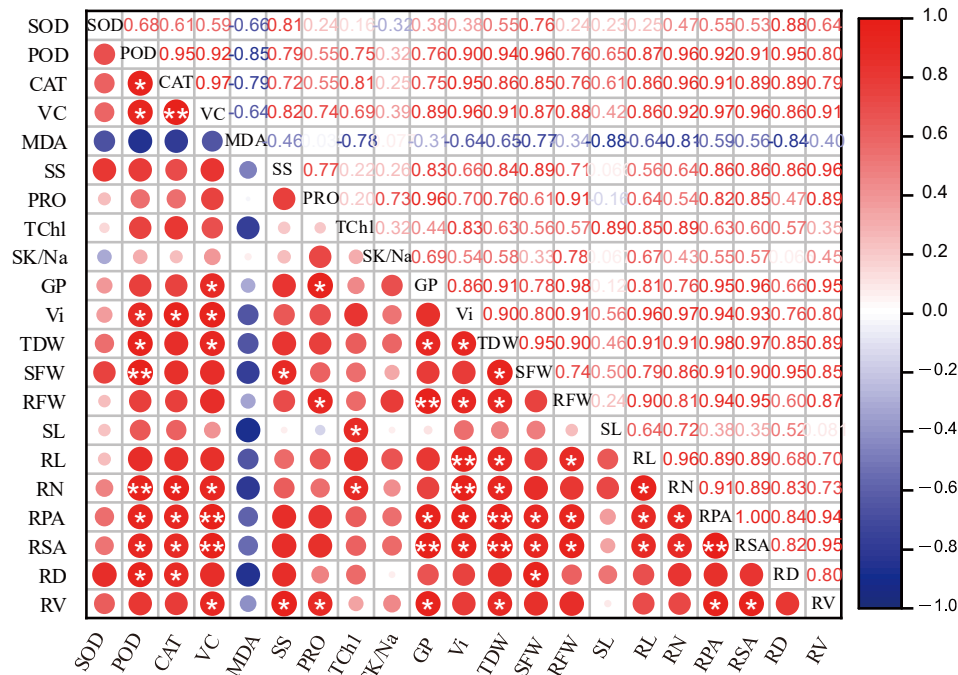
2.9 Fe-Mg NPs 引发对盐胁迫下水稻幼苗生理效应的相关性分析

相关性分析表明(图 8),POD、CAT 活性、VC 含量与根数、根投影面积、根表面积、根系直径显

著或极显著正相关,可溶性糖和脯氨酸含量与根系体积显著正相关,表明抗氧化能力的增强和渗透调节物质的增加共同促进根系扩展、减少细胞损伤;可溶性糖与地上部鲜质量呈显著正相关,提示可溶性糖是维持地上部渗透平衡和碳源供应^[21]的关键因素;根长、根数、根投影面积及根系体积间显著或极显著正相关,而根系直径与其他参数相关未达显著,印证 Fe-Mg NPs 通过增加根分支或延伸而非增粗根系来提高水稻耐盐性;发芽势、活力指数与总干质量、根系鲜质量、根长、根数、根投影面积及根系体积显著或极显著正相关,表明生物量积累和根系发育共同促进种子萌发、提高种子活力;总叶绿素含量与苗长、根数显著正相关;MDA 含量与所有生长指标负相关,证实膜脂过氧化程度限制盐胁迫下植物的生长发育。

3 讨论

纳米引发种子处理技术操作简便,但其内在机



GP、Vi 表示发芽势和活力指数; SFW、RFW、TDW、SL、RL 分别代表地上部鲜质量、根系鲜质量、总干质量、苗长、根长; RN、RPA、RSA、RD、RV 分别代表根数、根投影面积、根表面积、根系直径、根系体积; SS、PRO 分别表示可溶性糖含量、脯氨酸含量; TChl 表示总叶绿素含量。
*, **分别表示在 0.05, 0.01 水平上显著相关。
GP and Vi represent germination potential and vigor index, respectively; SFW, RFW, TDW, SL, and RL represent shoot fresh weight, root fresh weight, total dry weight, shoot length, and root length, respectively; RN, RPA, RSA, RD, and RV denote root number, root projected area, root surface area, root diameter, and root volume, respectively; SS and PRO stand for soluble sugar content and proline content, respectively; TChl stands for total chlorophyll content. *, ** indicate significant correlations at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

图 8 水稻幼苗长势与生理指标的相关性分析
Fig. 8. Correlation analysis of growth status and physiological indicators of rice seedlings

理却极为复杂。种子萌发的初始阶段发生吸胀作用, 种子通过吸水迅速膨胀, 导致种皮结构与渗透性发生改变。与此同时, 由于纳米颗粒具有极小的尺寸, 使其能在此过程中穿透种皮屏障, 进入种子内部^[22]。Kasote 等^[23]发现 Fe NPs 可吸附于西瓜种皮并随后移向胚乳; Yan 等^[24]报道了 Ag NPs 在水稻胚中优先富集; Naseer 等^[25]则通过微区分析技术证实了种子内部存在 Fe NPs。以上研究表明, 纳米颗粒可以穿透种皮屏障进入种子内部, 但其在种子内部的运输动力与精确路径尚不明确, 需进一步的研究。

种子萌发和幼苗生长作为植物生命周期的起点, 是植物初次感知并响应非生物胁迫的敏感阶段及作物后续生长发育潜力、生物量积累的基础^[26]。该阶段植株遭遇盐胁迫会导致其生理代谢发生变化, 出现萌发受阻、相对生长速率降低、叶绿素含量下降等不良症状。在本研究中, 150 mmol/L NaCl 胁迫显著抑制了水稻种子的萌发和幼苗生长。施加引发处理可不同程度地缓解盐胁迫的抑制作用, 与

水引发(0 mg/L)相比, 200 mg/L Fe-Mg NP 处理能提高盐胁迫下的种子发芽率和发芽势, 并显著增加其活力指数和发芽指数。这表明, Fe-Mg NPs 引发可缓解盐胁迫对种子萌发的抑制作用, 促进种子萌发, 但未达显著水平。本研究发现, 在盐胁迫下, 适宜浓度 Fe-Mg NPs 引发促进了水稻幼苗地上部鲜质量、根系鲜质量、总干质量、苗长和根长的增加及根系的发育。这表明 Fe-Mg NPs 引发能缓解盐胁迫对水稻幼苗生长的抑制, 促进生物量积累及养分吸收效率, 从而提升水稻幼苗的耐盐性, 这与孙露莹等^[27]及张雅茹等^[28]研究结果一致。本研究中, 200 mg/L 处理浓度显著增加了水稻幼苗叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量及叶绿素总含量, 说明 Fe-Mg NPs 引发能增加光合色素含量, 增强植株光合作用的强度。这与李俊鹏等^[29]研究结果一致。此外, 刘涛等^[30]研究发现, 低浓度 Nano-CuO (10 mg/L)溶液提高了水稻幼苗根系活力, 高浓度 Nano-CuO (100 mg/L)溶液对水稻的发芽率、根长、芽长和生物量有抑制作用。本研究中, 更高的引发

剂浓度(400 mg/L), 会抑制水稻幼苗的生长。这表明水稻对金属氧化物纳米颗粒溶液存在剂量依赖效应, 即在低浓度下表现出促进作用, 但在高浓度下会出现抑制的现象^[31]。

盐胁迫对植物的危害机制分为三个阶段: 渗透胁迫、离子毒害、次生胁迫(氧化胁迫)^[32-33]。在渗透胁迫初期, 植物通过积累渗透调节物质(如可溶性糖和脯氨酸)来应对逆境^[34]。赵玲玉等^[35]研究表明, Fe NPs 促进了可溶性糖和脯氨酸在紫花苜蓿根叶中的积累, 缓解了盐胁迫对紫花苜蓿生长的抑制。Thoirion 等^[36]研究指出, 纳米二氧化钛可提高玉米的脯氨酸含量, 减轻盐胁迫对玉米种子萌发和幼苗生长的抑制。Mahakham 等^[37]认为纳米引发可提高 α -淀粉酶活性, 使种子中淀粉水解速率加快, 增加可溶性糖含量。本研究中, Fe-Mg NPs 引发显著提高了水稻幼苗中可溶性糖和脯氨酸含量, 增强了水稻的耐盐性, 可能是因为纳米引发提升了相关代谢酶类的活性, 加快渗透调节物质的形成, 从而增强细胞的渗透调节能力, 维持细胞水分平衡。

在盐胁迫下, 植株通过增强根系对 K^+ 等必需离子的吸收, 并利用离子区隔化将 Na^+ 转运于特定组织, 从而缓解 Na^+ 毒害^[20, 38]。本研究中, 不同浓度引发处理下, 水稻幼苗中 Na^+ 浓度表现为地下部分大于地上部分, 说明水稻应对盐胁迫是通过将 Na^+ 大量区隔在根部以减轻危害。在 200 mg/L 时, Na^+ 地上部/根系转运系数最低, K^+ 选择交换系数最大, 表明该引发浓度下, 植株能有效地将吸收的 Na^+ 截留于根部, 并优先将 K^+ 转运至地上部, 从而减轻盐害。而在 400 mg/L 时, 这种区隔化机制可能已达到饱和或失效, 导致 Na^+ 自由向上运输, 盐害加剧。这与穆逸雪^[39]的研究一致。因此, 适宜浓度的纳米引发处理能增强 K^+ 选择性运输, 保障其向地上部等关键生长部位的优先供给, 这是其提升植株耐盐性的重要机制之一。

在氧化胁迫阶段, 种子内的抗氧化系统发挥重要作用^[40], 能及时清除过量的活性氧(ROS)和MDA, 抑制脂膜过氧化^[41]。本研究中, 纳米引发显著提高了水稻幼苗叶片中SOD、POD、CAT活性和VC含量, 降低了MDA含量, 这与Mahakham等^[37]研究一致。表明Fe-Mg NPs引发能通过增强水稻的抗氧化能力, 清除由盐胁迫导致的ROS积累, 减少脂质过氧化物的发生, 从而缓解盐胁迫引起的氧化损伤。值得注意的是, 处理浓度为400 mg/L时, 盐胁迫与引发的胁迫协同效应可能刺激了幼苗的保护酶系统, 使抗氧化酶活力提高, 但过量的纳米颗

粒导致氧化还原稳态失衡, 最终抑制幼苗生长。此外, Chen 和 Arora^[42]指出种子引发作为一种适度胁迫过程, 会导致活性氧积累^[43]。本研究中, Fe-Mg NPs 引发能提高盐胁迫下幼苗叶片抗氧化酶活性, 降低MDA含量, 进而增强其耐盐性, 可能是因为引发造成的胁迫刺激了保护酶系统, 当种子萌发和幼苗生长阶段再次遇到逆境时, 引发的种子具有强应激胁迫的能力, 从而增强植株的耐受性。

4 结论

本研究结果表明, Fe-Mg NPs 引发表现出剂量依赖性, 其中 200 mg/L Fe-Mg NPs 作为种子引发剂, 通过协同增强抗氧化防御、调节渗透平衡、维持离子稳态及优化根系形态的多重机制减轻了水稻盐胁迫损伤。而 400 mg/L 处理因破坏该协同作用, 从而抑制植株生长。因此, 采用 Fe-Mg NPs 引发种子是一种提高水稻耐盐性的有效策略。

在线辅助性信息: 附表 1 请见《中国水稻科学》网站(<http://www.ricesci.cn>)。

参考文献:

- [1] 李润枝, 靳晴, 李召虎, 王晔, 彭真, 段留生. 水杨酸提高甘草种子萌发和幼苗生长对盐胁迫耐性的效应[J]. 作物学报, 2020, 46(11): 1810-1816.
Li R Z, Jin Q, Li Z H, Wang Y, Peng Z, Duan L S. Salicylic acid improved salinity tolerance of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch during seed germination and seedling growth stages[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(11): 1810-1816. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王洋, 张瑞, 刘永昊, 李荣凯, 葛建飞, 邓仕文, 张徐彬, 陈英龙, 韦还和, 戴其根. 水稻对盐胁迫的响应及耐盐机理研究进展[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(2): 105-117.
Wang Y, Zhang R, Liu Y H, Li R K, Ge J F, Deng S W, Zhang X B, Chen Y L, Wei H H, Dai Q G. Rice response to salt stress and research progress in salt tolerance mechanism[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(2): 105-117. (in Chinese with English abstract)
- [3] 程式华. 中国水稻育种百年发展与展望[J]. 中国稻米, 2021, 27(4): 1-6.
Cheng S H. One-hundred years' development and prospect of rice breeding in China[J]. *China Rice*, 2021, 27(4): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [4] 赵玥, 辛霞, 王宗礼, 卢新雄. 种子引发机理研究进展及牧草种子引发研究展望[J]. 中国草地学报, 2012, 34(3): 102-108.
Zhao Y, Xin X, Wang Z L, Lu X X. Research progress and prospects in the mechanism of seed priming[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(3): 102-108. (in Chinese with English abstract)
- [5] 马唯一, 朱济邹, 朱旺, 耿孝宇, 张翔, 刁刘云, 汪璐

- 璐, 孟天瑶, 高平磊, 陈英龙, 戴其根, 韦还和. 盐害和干旱对稻米品质形成的影响及生理机制研究进展[J]. 中国水稻科学, 2025, 39(2): 156-170.
- Ma W Y, Zhu J Z, Zhu W, Geng X Y, Zhang X, Diao L Y, Wang L L, Meng T Y, Gao P L, Chen Y L, Dai Q G, Wei H H. Research progress in effects of salt and drought stresses on rice quality formation and associated physiological mechanisms[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2025, 39(2): 156-170. (in Chinese with English abstract)
- [6] Bohnert H J, Shen B. Transformation and compatible solutes[J]. *Scientia Horticulturae*, 1998, 78(1/2/3/4): 237-260.
- [7] 尤沛, 何学青. 种子纳米引发的研究进展[J]. 草业科学, 2020, 37(8): 1548-1557.
- You P, He X Q. Recent progress in seed nanoprimer research[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(8): 1548-1557. (in Chinese with English abstract)
- [8] Guha T, Ravikumar K V G, Mukherjee A, Mukherjee A, Kundu R. Nanoprimer with zero valent iron (nZVI) enhances germination and growth in aromatic rice cultivar (*Oryza sativa* cv. *Gobindabhog* L.)[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 127: 403-413.
- [9] Mahakham W, Sarmah A K, Maensiri S, Theerakulpisut P. Nanoprimer technology for enhancing germination and starch metabolism of aged rice seeds using phytosynthesized silver nanoparticles[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8263.
- [10] 谢不凋. 铁酸锰纳米材料增强水稻抗旱机制的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- Xie B D. The mechanism of Manganese ferrate nanomaterials enhancing drought resistance in rice [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [11] Hafeez R, Guo J, Ahmed T, Ibrahim E, Ali M A, Rizwan M, Ijaz M, An Q, Wang Y, Wang J, Li B. Integrative transcriptomic and metabolomic analyses reveals the toxicity and mechanistic insights of bioformulated chitosan nanoparticles against *Magnaporthe oryzae*[J]. *Chemosphere*, 2024, 356: 141904.
- [12] 方清, 晏士玮, 崔彩云, 周彩玲, 吴凡, 李育键, 叶文玲. 纳米氧化铜对砷胁迫下水稻种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(5): 826-831.
- Fang Q, Yan S W, Cui C Y, Zhou C L, Wu F, Li Y J, Ye W L. Effects of copper oxide nanoparticles on germination and growth of rice seeds exposed to arsenic stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2020, 47(5): 826-831. (in Chinese with English abstract)
- [13] 江海燕, 何平, 焦洪鹏, 冯先翠. 纳米羟基磷灰石系列材料对水稻吸收镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(10): 2240-2247.
- Jiang H Y, He P, Jiao H P, Feng X C. Effects of hydroxylapatite-series materials on cadmium adsorption in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(10): 2240-2247. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘鹏, 毕江涛, 罗成科, 惠治兵, 李文兵, 肖国举, 王静. 耐盐菌对盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(2): 246-256.
- Liu P, Bi J T, Luo C K, Hui Z B, Li W B, Xiao G J, Wang J. Effects of salt-tolerant bacteria on rice seed germination and seedling growth under salt stress[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 41(2): 246-256. (in Chinese with English abstract)
- [15] 崔灿, 王梦琦, 赵琬璐, 刘新颖, 鉴晶晶, 严俊鑫. 胺鲜酯浸种对 NaCl 胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(6): 46-58.
- Cui C, Wang M Q, Zhao W L, Liu X Y, Jian J J, Yan J X. The effect on seed germination and seedling growth of soaking seeds with diethyl aminoethyl hexanoate in alfalfa under NaCl stress[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2025, 34(6): 46-58. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李艳娟, 庄正, 刘青青, 尚天赦, 黄钦忠, 邹嘉勇, 刘博. 纳米 TiO₂ 对杉木种子萌发和幼苗生长及生理的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1259-1264.
- Li Y J, Zhuang Z, Liu Q Q, Shang T S, Huang Q Z, Zou J Y, Liu B. The effects of nano-TiO₂ on seed germination, seedling growth and physiology of Chinese fir[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(5): 1259-1264. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Wang X K. The Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry Experiment[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [18] 郝建军, 康宗利, 于洋. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- Hao J J, Kang Z L, Yu Y. Plant Physiology Experimental Techniques [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [19] 陈一西. 大麦耐盐种质筛选及萌发期盐胁迫响应机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.
- Chen Y Y. Study on salt-tolerant germplasm selection and mechanism of response to salt stress during germination in barley[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024. (in Chinese with English abstract)
- [20] 袁泽, 王艳, 闫敏, 周晓凤, 蒲小秋, 闫浩宇, 苑恒州, 吴翠云. 盐碱胁迫对骏枣养分吸收、积累及运转的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(3): 44-52.
- Yuan Z, Wang Y, Yan M, Zhou X F, Pu X Q, Yan H Y, Yuan H Z, Wu C Y. Effects of saline and alkaline stress on nutrient uptake, accumulation and transportation in 'Junzao' Jujube[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(3): 44-52. (in Chinese with English abstract)
- [21] 俞施龙, 张明静, 王光华, 赵金标, 陈远杰, 陈宇琪, 黄丽芬. 高温下减氮对水稻化学计量特征和非结构性碳水化合物分配的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(3): 71-84.
- Yu S L, Zhang M J, Wang G H, Zhao J B, Chen Y J, Chen Y Q, Huang L F. Effect of nitrogen reduction under high temperature on the stoichiometric characteristics and non-structural carbohydrate allocation in rice[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(3): 71-84. (in Chinese with English abstract)
- [22] 康召, 赵丽娟. 纳米种子处理技术: 提高作物气候韧性的有效途径[J]. 中国生态农业学报, 2024, 32(5): 745-754.
- Kang Z, Zhao L J. Nano-enabled seed treatment technology: An efficient strategy to enhance climate resilience of crops[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(5): 745-754. (in Chinese with English abstract)
- [23] Kasote D M, Lee J H J, Jayaprakash G K, Patil B S. Seed priming with iron oxide nanoparticles modulate

- antioxidant potential and defense-linked hormones in watermelon seedlings[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(5): 5142-5151.
- [24] Yan X, Chen S, Pan Z Y, Zhao W C, Rui Y K, Zhao L J. AgNPs-triggered seed metabolic and transcriptional reprogramming enhanced rice salt tolerance and blast resistance[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(1): 492-504.
- [25] Naseer M, Zhu Y, Li F M, Yang Y M, Wang S, Xiong Y C. Nano-enabled improvements of growth and colonization rate in wheat inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 295: 118724.
- [26] 孙亚莉, 刘红梅, 徐庆国. 镉胁迫对不同水稻品种种子萌发特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(4): 425-431.
Sun Y L, Liu H M, Xu Q G. Effects of cadmium stress on rice seed germination characteristics[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2017, 31(4): 425-431. (in Chinese with English abstract)
- [27] 孙露莹, 宋凤斌, 李向楠, 朱先灿, 刘胜群, 王洋, 齐晓宁. 纳米氧化锌对玉米种子萌发及根系碳代谢的影响[J]. 土壤与作物, 2020(1): 40-49.
Sun L Y, Song F B, Li X N, Zhu X C, Liu S Q, Wang Y, Qi X N. Effects of ZnO nanoparticles on seed germination and root carbon metabolism in maize(*Zea mays* L.)[J]. *Soils and Crops*, 2020(1): 40-49. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张雅茹, 颜建明, 张婧, 杨旭珍, 吴志国. 叶面喷施纳米铁对菠菜生长及品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(12): 2696-2704.
Zhang Y R, Xie J M, Zhang J, Yang X Z, Wu Z G. Effect of foliar spraying of iron nanoparticles on the growth and quality of spinach[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2024, 36(12): 2696-2704. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李俊鹏, 孙心慧, 何亚洲, 陈晓峰. 纳米三氧化二铁对黄瓜发芽和叶片光合特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2025, 64(7): 101-104, 113.
Li J P, Sun X H, He Y Z, Chen X F. The effects of nano-Fe₂O₃ on the germination of cucumber and the photosynthetic characteristics of cucumber leaves[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2025, 64(7): 101-104, 113. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘涛, 向垒, 余忠雄, 莫测辉, 李彦文, 赵海明, 蔡全英, 李慧. 水稻幼苗对纳米氧化铜的吸收及根系形态生理特征响应[J]. 中国环境科学, 2015, 35(5): 1480-1486.
Liu T, Xiang L, Yu Z X, Mo C H, Li Y W, Zhao H M, Cai Q Y, Li H. Responses of morphological and physiological characteristics in rice (*Oryza sativa* L.) seedling roots to its uptake of CuO nanoparticles[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(5): 1480-1486. (in Chinese with English abstract)
- [31] 高梦迪, 盛茂银, 傅籍锋. 纳米材料对植物生长发育的影响[J]. 生物技术通报, 2019, 35(7): 172-180.
Gao M D, Sheng M Y, Fu J F. Effects of nanomaterials on plant growth and development[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35(7): 172-180. (in Chinese with English abstract)
- [32] Sharif R, Xie C, Zhang H Q, Arnao M B, Ali M, Ali Q, Muhammad I, Shalmani A, Nawaz M A, Chen P, Li Y. Melatonin and its effects on plant systems[J]. *Molecules*, 2018, 23(9): 2352.
- [33] van Zelm E, Zhang Y, Testerink C. Salt tolerance mechanisms of plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2020, 71: 403-433.
- [34] 寇江涛. 外源2, 4-表油菜素内酯诱导紫花苜蓿幼苗耐盐性的生理响应[J]. 华北农学报, 2020, 35(6): 133-140.
Kou J T. Physiological response of salt tolerance of *Medicago sativa* seedlings induced by exogenous 2, 4-epibrassinolide[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(6): 133-140. (in Chinese with English abstract)
- [35] 赵玲玉. FeNPs对紫花苜蓿生长、固氮及耐盐性的生物学效应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
Zhao L Y. Biological effects of FeNPs on growth, nitrogen fixation and salt tolerance of alfalfa [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [36] Shah T, Latif S, Saeed F, Ali I, Ullah S, Abdullah Alsahli A A, Jan S, Ahmad P. Seed priming with titanium dioxide nanoparticles enhances seed vigor, leaf water status, and antioxidant enzyme activities in maize (*Zea mays* L.) under salinity stress[J]. *Journal of King Saud University - Science*, 2021, 33(1): 101207.
- [37] Mahakham W, Theerakulpisut P, Maensiri S, Phumying S, Sarmah A K. Environmentally benign synthesis of phytochemicals-capped gold nanoparticles as nanoprimer agent for promoting maize seed germination[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 573(15): 1089-1102.
- [38] Dong Q Y, Wallrad L, Almutairi B O, Kudla J. Ca²⁺ signaling in plant responses to abiotic stresses[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2022, 64(2): 287-300.
- [39] 穆逸雪. 盐胁迫下不同种子引发处理对直播稻种子萌发和幼苗生长的影响[D]. 海口: 海南大学, 2023.
Mu Y X. Effects of different Seed priming techniques on seed germination and seedling growth of direct-seeding rice (*Oryza sativa* L.) under salt stress [D]. Haikou: Hainan University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [40] Zheng M, Tao Y, Hussain S, Jiang Q, Peng S, Huang J, Cui K, Nie L. Seed priming in dry direct-seeded rice: Consequences for emergence, seedling growth and associated metabolic events under drought stress[J]. *Plant Growth Regulation*, 2016, 78(2): 167-178.
- [41] 苏小茜, 许宇捷, 魏健, 王光野. 盐胁迫对种子萌发的影响及作用机制研究进展[J]. 现代农业科技, 2024(22): 57-61.
Su X X, Xu Y J, Wei J, Wang G Y. Research progress on effect of salt stress on seed germination and its mechanisms[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2024(22): 57-61. (in Chinese with English abstract)
- [42] Chen K, Arora R. Priming memory invokes seed stress-tolerance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 94: 33-45.
- [43] Boucelha L, Djebbar R, Abrous-Belbachir O. *Vigna unguiculata* seed priming is related to redox status of plumule, radicle and cotyledons[J]. *Functional Plant Biology*, 2019, 46(6): 584-594.