

DOI: 10.11686/cyxb2025331

http://cyxb.magtech.com.cn

李若鸿, 李长然, 傅佳怡, 等. 纳米铁引发和生物炭结壳包衣对中华羊茅种子萌发和幼苗生长耐盐性的影响. 草业学报, 2026, 35(8): 32—44.

LI Ruo-hong, LI Chang-ran, FU Jia-yi, *et al.* Effects of nano-iron priming and biochar encrusting on the salt tolerance of *Festuca sinensis* at the seed germination and seedling growth stages. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(8): 32—44.

纳米铁引发和生物炭结壳包衣对中华羊茅种子萌发和幼苗生长耐盐性的影响

李若鸿, 李长然, 傅佳怡, 胡新雨, 毛培胜*

(中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193)

摘要:我国内陆盐碱地的利用成为栽培草地建设和生态修复关注的热点问题, 提高盐碱胁迫条件下种子出苗率和幼苗抗逆性则是草地建设是否成功的关键。以中华羊茅种子为材料, 在 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 混合盐溶液 (NaCl 和 Na_2SO_4 溶液配比为 5:1) 胁迫下采用纳米铁颗粒悬浮液不同引发浓度 (50 、 75 、 100 和 $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和不同时间 (10 和 108 h) 处理, 结合生物炭结壳包衣 (每 5 g 裸种子添加 0.35 、 0.50 、 1.00 和 1.15 g) 处理, 分析比较中华羊茅种子发芽、幼苗生长特性和抗氧化酶活性的变化规律, 筛选确定最佳的耐盐处理方式。结果表明: 1) $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米铁引发 10 h 能有效提高中华羊茅种子的发芽率、发芽指数和活力指数, 每 5 g 裸种子添加 0.50 g 生物炭结壳包衣配方能有效提高种子的出苗率、出苗速度指数和幼苗根长, 多光谱成像获取的标准化典型判别分析 (nCDA) 图像结果与上述种子发芽特性变化一致; 两种处理均可显著提高幼苗的过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD)、单脱氢抗坏血酸还原酶 (MDHAR)、谷胱甘肽还原酶 (GR) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性, 表明中华羊茅幼苗活性氧 (ROS) 清除能力增强, 提高了幼苗在盐胁迫下的抗氧化能力。2) 引发和包衣组合处理未产生协同效应。将最优引发、包衣处理进行组合, 其对种子发芽特性和幼苗抗氧化能力提升效果并未显著优于相应单因素处理, 多光谱成像也未显示幼苗活力提高; 组合处理对提高中华羊茅抗盐性的效果不显著。综合分析, $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米铁引发 10 h 和每 5 g 裸种子添加 0.50 g 生物炭的结壳包衣均能有效提升中华羊茅在盐胁迫下的种子萌发与幼苗活力, 但二者组合处理未表现出协同增效作用。

关键词: 中华羊茅; 纳米铁引发; 生物炭; 盐胁迫

Effects of nano-iron priming and biochar encrusting on the salt tolerance of *Festuca sinensis* at the seed germination and seedling growth stages

LI Ruo-hong, LI Chang-ran, FU Jia-yi, HU Xin-yu, MAO Pei-sheng*

College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: The utilization of saline-alkali lands in China's inland regions has become a focal point in the development and construction of sown grasslands and in ecological restoration. Enhancing seed germination rates and seedling stress tolerance under saline-alkali stress conditions are important factors for successful grassland construction. In this study, *Festuca sinensis* seeds were treated with nano-iron particle suspensions at concentrations of 50 , 75 , 100 , and $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, for 10 or 108 h during saline-alkali stress (a $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ mixed salt solution of NaCl and Na_2SO_4 at a solution ratio of 5:1). In addition, four biochar crust coating treatments were applied (0.35 , 0.50 , 1.00 , and

收稿日期: 2025-08-14; 改回日期: 2025-11-03

基金项目: 由财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-34) 资助。

作者简介: 李若鸿 (2004—), 女, 湖南岳阳人, 在读硕士。E-mail: 1206691536@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: maops@cau.edu.cn

1.15 g biochar per 5 g bare seeds). We analyzed and compared the seed germination and seedling growth characteristics of *F. sinensis* seeds in the various treatments, as well as antioxidant enzyme activity, and determined the optimal conditions for tolerance to saline-alkali stress. The main results were as follows: 1) Treatment with 100 mg·L⁻¹ nano-iron for 10 h effectively enhanced the germination rate, germination index, and vitality index of *F. sinensis* seeds. Seeds with a biochar crust (0.50 g biochar per 5 g bare seeds) showed significantly improved seedling emergence rate, emergence speed index, and seedling root length. Multispectral imaging-derived normalized canonical discriminant analyses (nCDA) images correlated with these seed germination traits; the priming treatment (nano-iron particles) and coating treatment (biochar crust) significantly elevated the activities of catalase, peroxidase, monodehydroascorbate reductase, glutathione reductase, and ascorbate peroxidase activity in seedlings, indicating enhanced reactive oxygen species scavenging capacity and improved antioxidant capacity under salt stress. 2) The combination of priming and coating treatments did not have a synergistic effect. Combining the optimal priming and encrusting treatments did not significantly outperform the corresponding single-factor treatments in terms of enhancing seed germination characteristics or seedling antioxidant capacity. Multispectral imaging also failed to reveal further improvements in seedling vigor in the combined treatments compared with the single-factor treatments. The combined treatment showed no significant effect on enhancing the salt tolerance of *F. sinensis*. Among all the treatments, exposure to 100 mg·L⁻¹ nano-iron for 10 hours and biochar crust formation with 0.50 g biochar per 5 g bare seeds effectively enhanced the seed germination and seedling vigor of *F. sinensis* under salt stress. However, the combined treatment did not exhibit synergistic effects.

Key words: *Festuca sinensis*; nano-iron priming; biochar; salt stress

我国拥有约 36.7 万 hm² 的盐碱地,其中具有农业潜力的总面积约 12.3 万 hm²^[1]。土壤盐碱化不仅抑制作物生长,并且极易遭受风蚀和水蚀,加剧沙尘暴和荒漠化进程,对农业生产和生态治理造成困难。由于外来草种通常难以适应我国的自然条件,在退化草地修复中需要注重乡土草种种质资源的利用。中华羊茅(*Festuca sinensis*)是分布于我国青藏高原等地的优良牧草,为我国特有种,目前在退化草地治理中已得到重要应用^[2]。然而盐胁迫会导致植物体内离子失衡,对植物产生毒性,造成植物减产甚至死亡^[3],严重限制了中华羊茅种子萌发和幼苗建成。研究发现,相较于其他草种,中华羊茅在重度盐胁迫下的耐盐性较高^[4];盐离子对中华羊茅种子萌发及幼苗生长具有双重性,表现为低浓度促进、高浓度抑制^[5]。中华羊茅是改良天然草地、修复退化草地和进行生态建设的优良草种之一,因此提高中华羊茅耐盐性,对于其在盐渍化生境中的成功定植并应用于生态修复具有重要的理论价值和实践意义。

纳米材料是由尺寸为 1~100 nm 的单元组成的材料,在诸多领域都具有广泛的应用潜力^[6]。在农业方面,应用纳米材料引发种子可提高作物产量^[7];适宜浓度的纳米材料可作为生长调节剂促进植物生长、提高种子发芽率和生物量^[8]。纳米铁引发(nano-iron priming)作为一种纳米引发方法,已被用于多种植物的种子处理。研究表明,纳米铁引发能促进柳枝稷(*Panicum virgatum*)种子萌发并增强其抗寒性^[9];提高高粱(*Sorghum bicolor*)种子的萌发率及耐盐性^[10];提升红三叶(*Trifolium pratense*)种子的活力指数,促进幼苗生长^[11]。

生物炭(biochar, BC)是在低氧条件下生物质热解产生的多孔、低密度富碳材料^[12-13],其施用于土壤后有助于改善土壤结构、提高微生物活性,并缓慢释放植物所需的营养物质^[13]。近年来,生物炭因其高孔隙率、高持水能力和富含营养物质的特点,被广泛用作种衣剂的活性成分^[14]。研究表明,生物炭和有机材料结合包衣茄子(*Solanum melongena*)种子可提高其萌发率和幼苗成活率^[15];生物炭占比 5%~10% 的包衣处理能提升玉米(*Zea mays*)种子的发芽潜力及幼苗根系生长^[16];在包衣材料中添加适量生物炭处理水稻(*Oryza sativa*)种子能够提高种子出苗率并促进幼苗生长^[17]。

目前,关于纳米铁引发或生物炭结壳包衣处理中华羊茅种子的研究鲜有报道。本研究以中华羊茅种子为试

验材料,明确不同引发时间与浓度的纳米铁引发、不同生物炭添加量的结壳包衣处理在盐胁迫下对中华羊茅种子萌发、幼苗生长及抗氧化能力的影响,筛选确定最佳的耐盐处理方式,为提高中华羊茅在盐碱地中的定植能力、提高盐碱地区生态环境的改善和草地畜牧业经济提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的中华羊茅种子收获于2022年,购买于青海三江集团,净度99%,初始发芽率 $\geq 95\%$ 。纳米铁购买于甘肃谷硕纳米农业科技有限公司,材料呈粉末状,粒径 ≤ 100 nm,纯度 $\geq 94\%$ 。种子包衣材料黏合剂选用1.0%和1.5%羧甲基纤维素钠(carboxymethylcellulose sodium, CMC-Na)水溶液,购于国药集团化学试剂有限公司;惰性物质选用硬脂酸镁、皂土和滑石粉,购于山东科源生化有限公司;活性物质选用玉米秸秆生物炭,购于郑州绿航净水材料有限公司,粒径75 μm ,热解温度400~600 $^{\circ}\text{C}$, pH 8.0~10.0,碳含量80%~90%;包衣仪器使用5XW-110A型种子包衣机,购于现代农装科技股份有限公司。本试验于2024年9月至2025年3月在中国农业大学牧草种子实验室进行。

1.2 试验设计

1.2.1 纳米铁引发处理 引发前称取12.5 mg的纳米铁颗粒,20 $^{\circ}\text{C}$ 左右用蒸馏水经水浴超声分散1 h使其在水中均匀悬浮,并定容至100 mL,配置成125 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的母液,再将其稀释成不同浓度的悬浮液,室温保存。随机选取均匀一致且含水量为10%的中华羊茅种子,浸于50、75、100和125 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的纳米铁颗粒悬浮液中,分别用Fe-50、Fe-75、Fe-100和Fe-125标记,同时设置两个对照:未引发标记为CK,蒸馏水引发标记为Fe-0,在25 $^{\circ}\text{C}$ /15 $^{\circ}\text{C}$ 变温条件下分别引发10和108 h。引发结束后将种子取出放在纱布中,用蒸馏水冲洗3遍,用滤纸吸干表面水分,在室温条件下回干至原始重量。

1.2.2 种子结壳包衣方法 参考刘婧禹^[18]包衣制作方法,将每5 g中华羊茅种子进行结壳包衣并分为3层,第1层添加皂土与滑石粉作为隔离层;第2层添加硬脂酸镁、皂土和4种不同含量(0.35、0.50、1.00和1.15 g)生物炭,分别标记为BC_{0.35}、BC_{0.50}、BC_{1.00}和BC_{1.15};在第3层添加滑石粉作为保护层。未进行结壳包衣种子标记为CK₀,基础结壳包衣种子标记为CK₁。

1.3 发芽试验

按照国际种子检验协会(International Seed Testing Association, ISTA)的种子检验规程^[19]纸床法进行种子发芽试验,选取饱满并均匀一致的中华羊茅种子,培养皿中放入3层滤纸,然后分别加入10 mL NaCl和Na₂SO₄溶液配比为5:1、浓度为75 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的混合盐溶液,每皿放入100粒种子,盒盖后称重,并设4次重复。将培养皿放置于光照培养箱(GXZ-380B-LED,宁波江南仪器厂)中,在25 $^{\circ}\text{C}$ 光照8 h和15 $^{\circ}\text{C}$ 黑暗16 h条件下培养,初次计数为第7天,末次计数为第21天,每天进行称重补水以保持盐溶液浓度不变,计算发芽率。每天统计胚根突破种皮2 mm的种子数,计算平均发芽时间。统计正常种苗数、不正常种苗数、新鲜未发芽数、硬实种子数和死种子数,待发芽结束后,从培养皿中随机取出10株正常种苗进行幼苗苗长和根长的测定,计算发芽指数和活力指数。计算公式如下:

$$\text{发芽率}(\%) = \text{终期全部正常种苗数} / \text{供试种子数} \times 100$$

$$\text{平均发芽时间} = \sum n_t / \sum n$$

$$\text{发芽指数} = \sum (G_t / D_t)$$

$$\text{活力指数} = (\text{平均根长} + \text{平均苗长}) \times \text{发芽指数}$$

式中: t 为统计天数; n_t 为在第 t 天时萌发的种子数; $\sum n$ 是总萌发数; G_t 为第 t 天的萌发数; D_t 为萌发天数(d)。

对于结壳包衣处理后的种子选用砂床作为发芽介质。参照《草种子检验规程 发芽试验(GB/T 2930.4—2017)》^[20]进行种子砂床培养。在12 cm $\times$ 12 cm $\times$ 5 cm的透明培养皿中加入干砂400 g,参照刘婧禹^[18]的方法,在每皿中加入40 mL混合盐溶液,以保持砂床含水量在10%。每皿放入100粒种子,合盖后称重,每2 d称重补水,并设3次重复。将培养皿放置于光照培养箱中,温度条件设置与纸床法相同。每日统计出苗情况(禾草种子胚芽

破砂不超过 1 cm), 出苗结束后统计出苗率、出苗速度指数、平均出苗时间和根长相关指标, 随机取出 10 株正常种苗测量幼苗根长。计算公式如下:

$$\text{出苗率}(\%) = \text{出苗数} / \text{供试种子数} \times 100$$

$$\text{出苗速度指数} = \sum (G_t / D_t)$$

$$\text{平均出苗时间} = \sum n_t / \sum n$$

式中: t 为统计时间; G_t 为第 t 天时胚芽破砂数; D_t 为胚芽破砂天数(d); n_t 为在第 t 天时的胚芽破砂数; $\sum n$ 是总培养破砂数。

1.4 多光谱成像技术评价幼苗活力

多光谱成像技术(multispectral imaging, MSI)是一项将传统成像与光谱相结合的新型无损检测技术。发芽试验进行至第 21 天时, 从各处理中选取 5 株幼苗, 利用多光谱成像系统 VideometerLab 4 (Videometer A/S, Herlev, 丹麦) 获取其图像^[21]。主要采集参数如下: 样品置于仪器底座, 成像时积分球下降至与底座接触的 0 mm 位置, 该位置为相机的最佳对焦平面; 采用内置 LED 光源采集 365~970 nm 的 19 个光谱波段, 相机基础快门时间为 100000 μs , 增益为 0。图像通过软件内置的标准化典型判别分析(normalized canonical discriminant analyses, nCDA)模型进行活力评估。该模型通过多光谱相机获取幼苗在不同波段的反射率, 对原始光谱进行标准化, 使用已知活力等级的幼苗作为训练集, 通过典型判别分析找到能最有效区分不同活力类别的光谱线性组合。

1.5 生理生化指标测定

发芽试验结束时, 取出新鲜正常幼苗后液氮速冻, 研磨后称取 0.1 g 粉末装于 2 mL 离心管中, 加入 1.6 mL 预冷的 50 mmol·L⁻¹ pH 为 7.0 的磷酸缓冲液(含 0.1 mmol·L⁻¹ EDTA 和 1% pvp), 振荡混匀至匀浆。所得匀浆在 4 °C、11304 r·min⁻¹ 下离心 20 min, 上清液即为粗酶提取液, 用于抗氧化酶活性测定。

采用 Cakmak 等^[22] 的紫外分光光度法测定过氧化氢酶(catalase, CAT)活性; 采用 Kar 等^[23] 的可见分光光度法测定过氧化物酶(peroxidase, POD)活性; 通过检测超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)对氮蓝四唑的光化学还原抑制能力, 采用可见分光光度法^[24] 测定 SOD 活性; 采用 Arrigoni 等^[25] 的紫外分光光度法测定单脱氢抗坏血酸还原酶(monodehydroascorbate reductase, MDHAR)活性; 采用 Hossain 等^[26] 的紫外分光光度法测定谷胱甘肽还原酶(glutathione reductase, GR)活性; 采用 Nakano 等^[27] 的紫外分光光度法测定抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)活性。

1.6 数据统计分析

通过 SPSS 23.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA), 并用 Duncan's 法($P < 0.05$)进行多重比较, 除纸床发芽试验为 4 个重复以外, 所有试验均为 3 个重复, 采用 GraphPad Prism 10.5.0 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 纳米铁引发与生物炭结壳包衣对中华羊茅种子发芽特性的影响

混合盐溶液胁迫下, 纳米铁引发中华羊茅种子 10 h 提高发芽率、发芽指数和活力指数的效果比引发 108 h 好, 其中纳米铁悬浮液浓度为 100 mg·L⁻¹ (Fe-100) 的效果最好(图 1)。引发 10 h 后, 与 Fe-0 相比, 种子在盐胁迫下的发芽率随纳米铁悬浮液浓度的升高呈先上升后下降的趋势, 在 Fe-100 处理时达到最高值 49%, 显著($P < 0.05$)高于 CK 的 39%; 各纳米铁浓度处理引发 10 h 的发芽率均显著($P < 0.05$)高于 108 h (图 1A)。平均发芽时间在多数处理间无显著差异, 仅 Fe-100 引发 10 h 后显著($P < 0.05$)低于 CK (图 1B)。发芽指数在 Fe-100 引发 10 h 后较 CK 显著($P < 0.05$)提高了 16.14%, 其余纳米铁悬浮液浓度处理与 CK 比较无显著差异; 各浓度处理引发 10 h 的发芽指数均显著高于 108 h (图 1C)。活力指数在引发 10 h 后随纳米铁悬浮液浓度升高呈先上升后下降的趋势, 在 Fe-100 处理达到峰值, 与 CK 相比显著($P < 0.05$)提高了 89.85% (图 1D)。

混合盐溶液胁迫下, 使用每 5 g 裸种子添加 0.50 g 生物炭(BC_{0.50})结壳包衣处理的效果最好, 可显著($P < 0.05$)提高种子的出苗率、出苗速度指数和幼苗根长(图 2)。BC_{0.50} 处理的种子出苗率和出苗速度指数均显著($P < 0.05$)高于 CK₀, 分别提高了 10.26% 和 12.66%, 其余处理均显著($P < 0.05$)低于 CK₀ (图 2A 和 C)。所有包

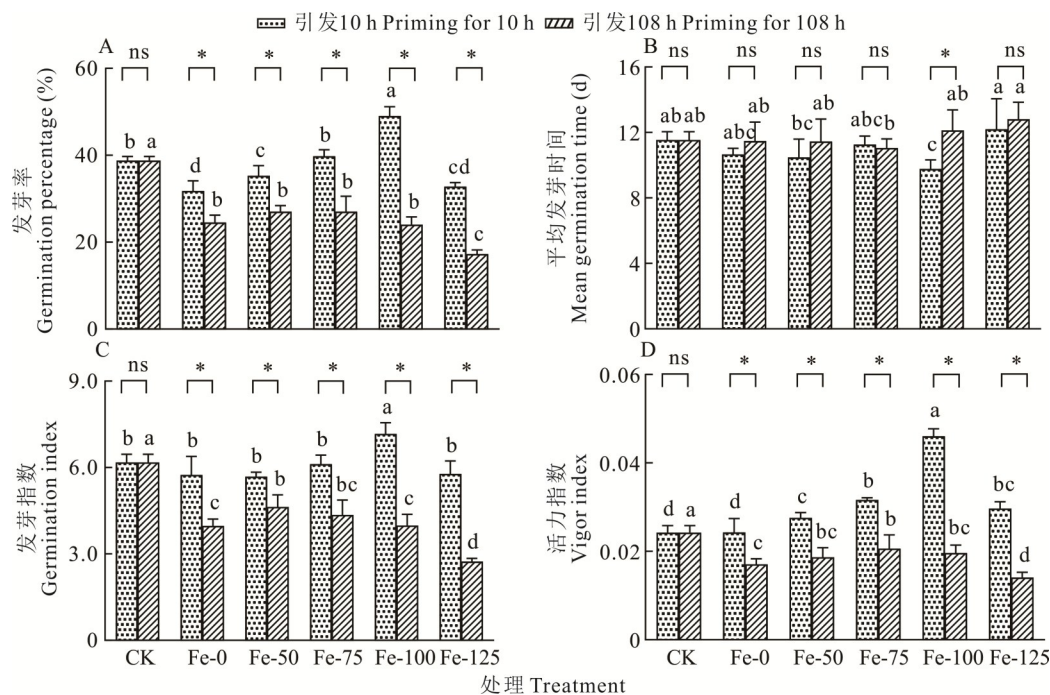


图1 纳米铁引发对盐胁迫下中华羊茅种子发芽特性的影响

Fig. 1 Effect of nano-iron priming on the germination characteristics of *F. sinensis* seeds under salt stress

不同小写字母表示同一引发时间不同引发浓度间在0.05水平上差异显著,*表示相同引发浓度下不同引发时间在0.05水平上差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level among different priming concentrations with the same priming time, and * indicates significant difference at the 0.05 level between different priming times under the same priming concentration.

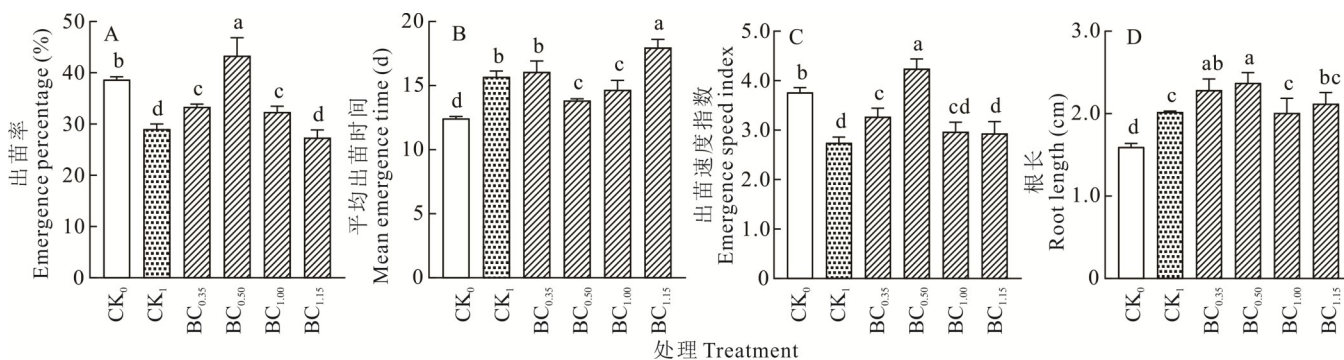


图2 生物炭结壳包衣对盐胁迫下中华羊茅种子发芽特性的影响

Fig. 2 Effect of biochar encrusting on the germination characteristics of *F. sinensis* seeds under salt stress

不同小写字母表示在0.05水平上差异显著,下同。Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level, the same below.

衣处理的种子平均出苗时间均显著($P < 0.05$)高于CK₀(图2B)。种子包衣处理后其根长均显著($P < 0.05$)高于CK₀,其中BC_{0.35}和BC_{0.50}处理的效果较好,由1.60 cm分别提升至2.29和2.37 cm(图2D)。

2.2 纳米铁引发与生物炭结壳包衣对中华羊茅幼苗酶促清除系统的影响

多光谱评价结果表明,盐胁迫条件下,nCDA图像中纳米铁引发10 h后的中华羊茅幼苗较CK均有变蓝趋势,其中Fe-100处理幼苗蓝色最深,Fe-125次之,Fe-50和Fe-75处理下的幼苗颜色较蓝,说明Fe-100处理下的中华羊茅幼苗活力最高(图3A)。

测定引发10 h时各引发浓度中华羊茅幼苗抗氧化酶活性的结果表明,CAT活性在CK、Fe-0和Fe-100中分别为0.32、0.34和0.56 $\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$,GR活性分别为0.04、0.05和0.07 $\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$;Fe-100处理的CAT与GR活性分别较CK显著提高75.11%和57.11%,较Fe-0提高62.96%和49.77%,其余处理则无显著差异(图3B和

F)。各纳米铁引发浓度均显著($P<0.05$)提高了 POD 活性,其中 Fe-100 和 Fe-125 的效果最好,与 CK 相比均提高了 84.11%(图 3C)。与 CK 相比,不同引发处理下的 SOD 活性无显著差异(图 3D)。MDHAR 活性在 Fe-100 处理下较 CK 显著($P<0.05$)提高 70.51%,其余处理与 CK 相比无显著差异(图 3E)。APX 活性在各纳米铁浓度处理下较 CK 和 Fe-0 均显著($P<0.05$)上升,其中 Fe-125 处理显著($P<0.05$)低于其他纳米铁浓度处理(图 3G)。

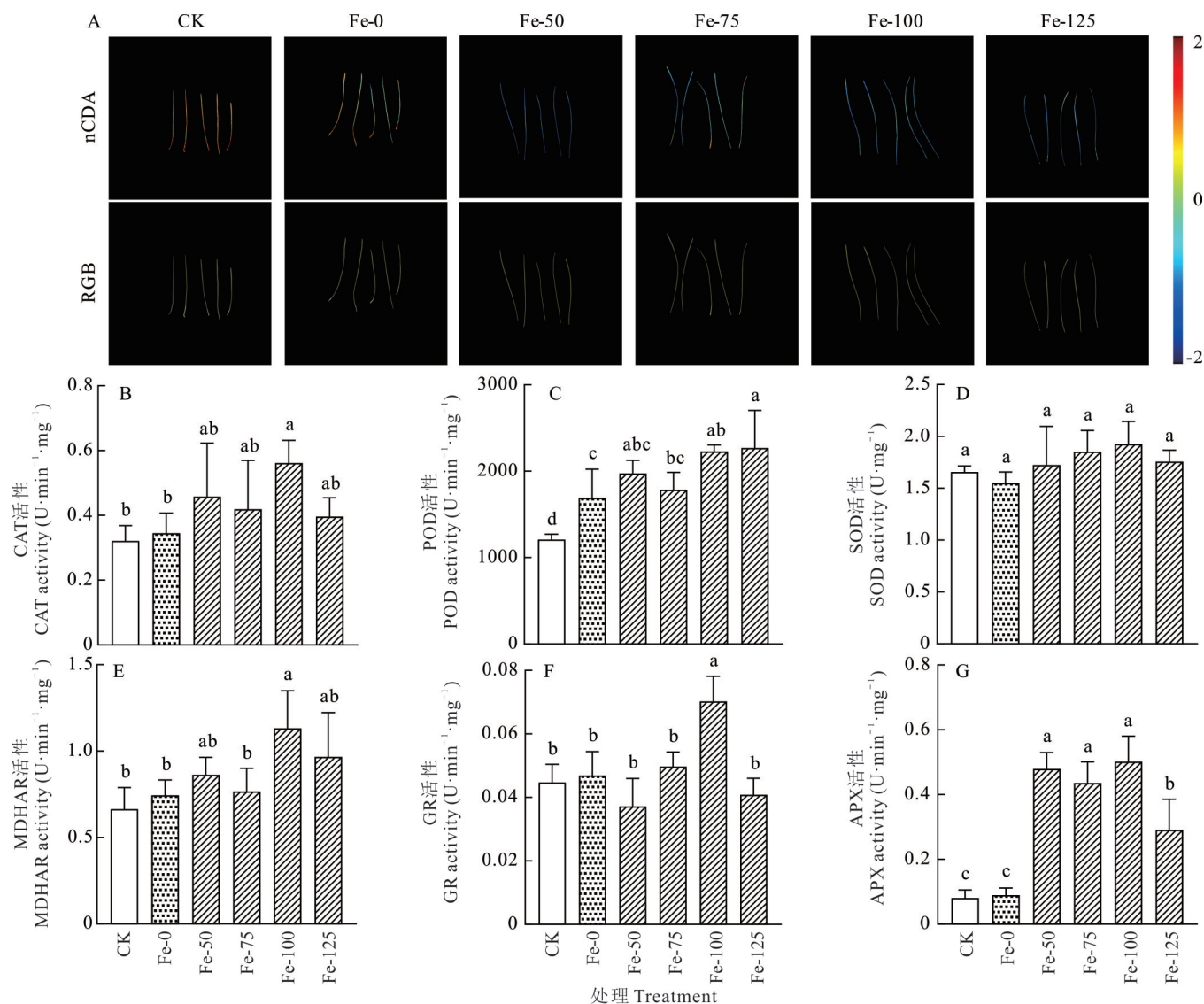


图 3 盐胁迫下纳米铁引发处理中华羊茅幼苗的多光谱成像及对酶促清除系统的影响

Fig. 3 Multispectral imaging of *F. sinensis* seedlings coated with nano-iron under salt stress and its effects on antioxidant enzyme system

nCDA 图像中,蓝色越深代表幼苗活力越高,红色越深代表幼苗活力越低,下同 In nCDA images, deeper shades of blue indicate higher seedling vigour, while deeper shades of red indicate lower seedling vigour, the same below.

多光谱评价结果表明,盐胁迫条件下 CK₀ 红色最深,生物炭结壳包衣 BC_{0.35} 和 BC_{1.15} 处理幼苗红色较浅;BC_{0.50} 蓝色最深,其次为 BC_{0.35}、BC_{1.00} 和 BC_{1.15};说明 BC_{0.50} 处理下的中华羊茅幼苗活力最高(图 4A)。

抗氧化酶活性测定表明,盐胁迫下与 CK₀ 相比,仅 BC_{0.50} 处理下中华羊茅幼苗 CAT 和 SOD 活性显著($P<0.05$)提高了 64.64% 和 73.29%,其余包衣处理均无显著差异(图 4B 和 D)。POD 活性在 CK₀、CK₁ 和 BC_{0.35} 处理之间,BC_{0.50}、BC_{1.00} 和 BC_{1.15} 处理之间无显著差异,且 BC_{0.50}、BC_{1.00} 和 BC_{1.15} 处理显著($P<0.05$)高于 CK₀、CK₁ 和

BC_{0.35}处理(图4C)。MDHAR活性在BC_{0.50}和BC_{1.00}处理下相较于CK₀和CK₁均显著($P<0.05$)提高,其中BC_{0.50}处理分别提高了43.54%和75.16%(图4E)。GR活性在BC_{0.50}和BC_{1.15}处理下较CK₁显著($P<0.05$)提高,其中BC_{0.50}提升效果最佳,提升了82.86%(图4F)。APX活性仅BC_{0.50}处理较CK₁显著($P<0.05$)提高,其余处理提升效果不佳(图4G)。

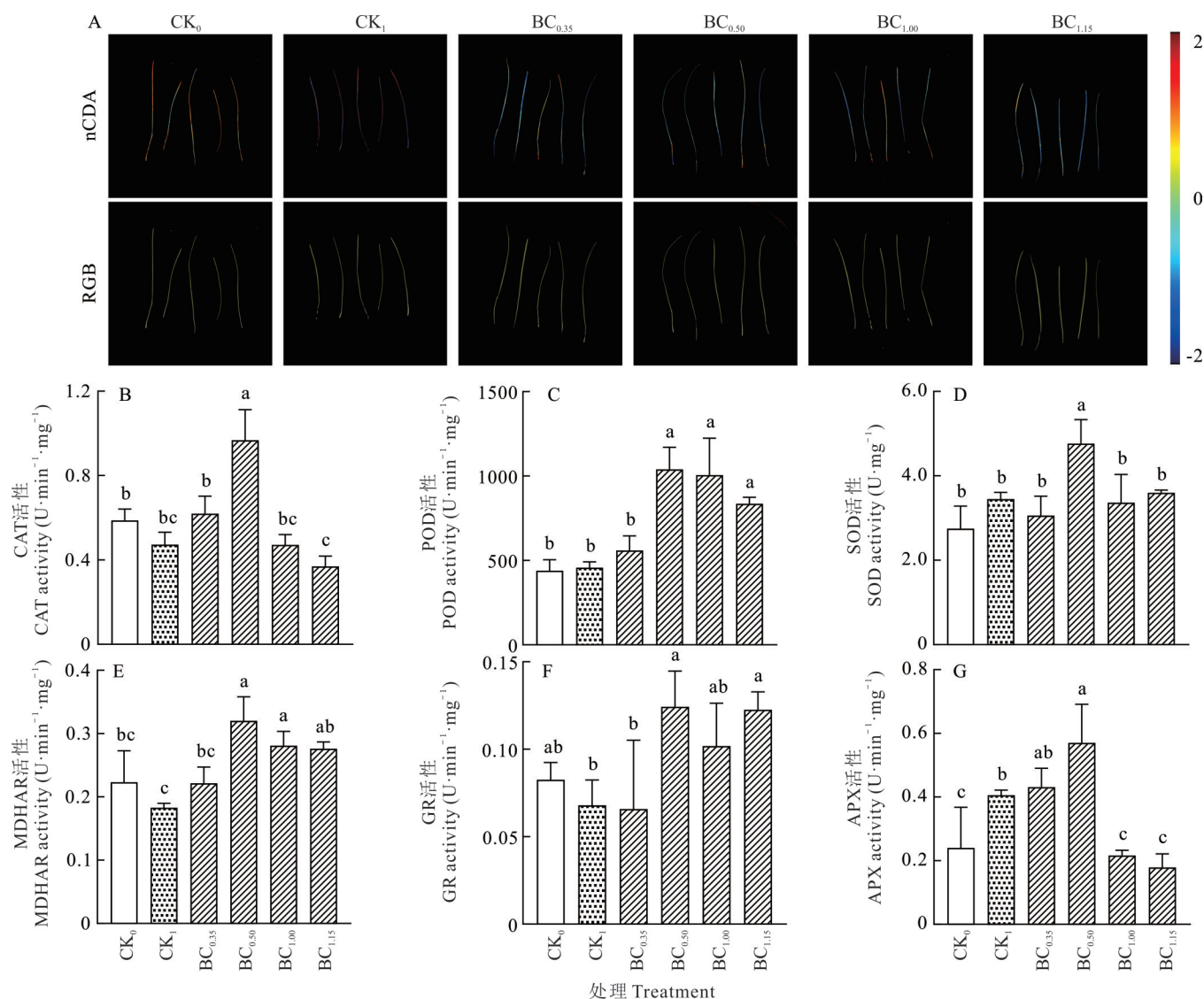


图4 盐胁迫下生物炭结壳包衣处理中华羊茅幼苗的多光谱成像及对酶促清除系统的影响

Fig. 4 Multispectral imaging of *F. sinensis* seedlings coated with biochar crusts under salt stress and its effects on antioxidant enzyme system

2.3 组合处理与单处理对中华羊茅种子影响的比较

纳米铁引发处理中100 mg·L⁻¹纳米铁引发10 h提升效果最优,生物炭结壳包衣处理中每5 g裸种子中添加0.50 g的生物炭结壳包衣配方提升效果最优,将最佳纳米铁引发与生物炭结壳包衣处理相结合的中华羊茅种子进行试验(图5)。结果表明,与CK相比,Fe-100、BC_{0.50}与Fe-BC处理均显著($P<0.05$)提高了中华羊茅种子的出苗率,从37%分别提高至43%、41%和44%,其中Fe-100和Fe-BC处理间无显著差异(图5A)。除Fe-100外,BC_{0.50}和Fe-BC处理相较于CK均显著($P<0.05$)延长了平均出苗时间(图5B)。BC_{0.50}和Fe-BC处理间的发芽指数无显著差异,两者均显著($P<0.05$)高于CK和Fe-100(图5C)。与CK相比,Fe-100、BC_{0.50}与Fe-BC处理的根长均显著($P<0.05$)提高,但三者之间无显著差异(图5D)。

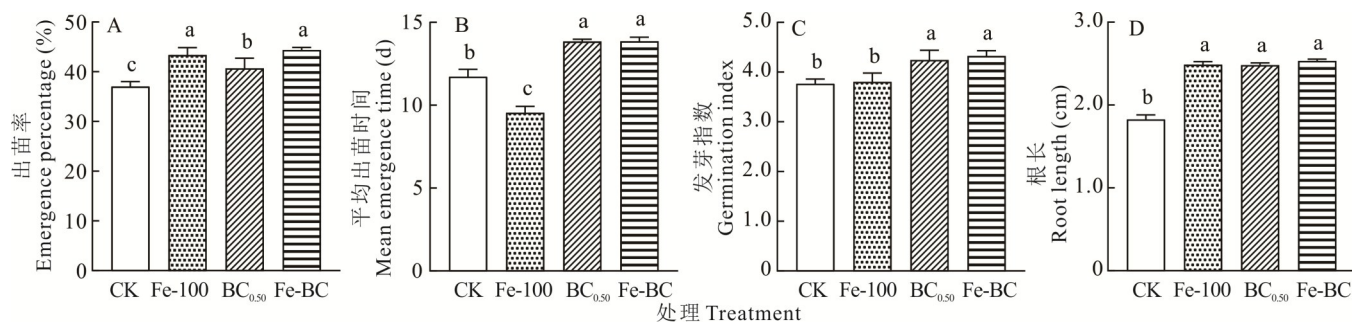


图5 盐胁迫下纳米铁引发与生物炭结壳包衣组合对中华羊茅种子发芽特性的影响

Fig. 5 Effect of nano-iron priming and biochar encrusting combination on the germination characteristics of *F. sinensis* seeds under salt stress

Fe-BC: 100 mg·L⁻¹ 纳米铁引发 10 h 与每 5 g 裸种子添加 0.50 g 生物炭的结壳包衣组合处理 The *F. sinensis* seeds treated with a combination of 100 mg·L⁻¹ nano-iron primed for 10 hours and 0.50 g of biochar added to every 5 g of bare seeds for encrusting.

多光谱评价结果表明,在盐胁迫下,与 CK 相比,中华羊茅种子在 Fe-100、BC_{0.50} 和 Fe-BC 处理下的幼苗颜色均呈蓝色,幼苗活力明显提高,但 3 种处理之间无明显差异(图 6A)。

抗氧化酶活性测定表明,相较于 CK, Fe-100、BC_{0.50} 和 Fe-BC 处理均显著($P < 0.05$)提高了中华羊茅幼苗的 CAT、SOD 和 GR 活性,且三者间无显著差异(图 6B、D 和 F)。POD 活性在各处理中均显著($P < 0.05$)高于 CK,其中 Fe-100 效果最佳,达 1509.36 U·min⁻¹·mg⁻¹,且显著($P < 0.05$)高于 BC_{0.50} 与 Fe-BC 处理(图 6C)。MDHAR 活性在 CK、BC_{0.50} 和 Fe-BC 处理间均无显著差异,且均显著($P < 0.05$)低于 Fe-100 处理(图 6E)。与 CK 相比,各处理的 APX 活性均显著($P < 0.05$)提高,其中 Fe-BC 处理显著($P < 0.05$)高于 Fe-100 和 BC_{0.50} 处理,分别提高了 145.22% 和 86.55%(图 6G)。

3 讨论

3.1 纳米铁引发与生物炭结壳包衣对中华羊茅种子萌发及幼苗生长的影响

铁元素是植物生长发育不可或缺的限制性矿质元素,影响植物的线粒体呼吸、光合作用和生物固氮等功能,也参与植物的氧化还原反应及其他关键生理过程^[22]。利用纳米材料处理种子可有效提升种子活力,增强其抗逆性^[7]。Zhang 等^[28]的研究发现,浓度为 10 mg·L⁻¹ 的纳米铁颗粒引发紫花苜蓿(*Medicago sativa*)种子 8 h,能够增加植株的光合能力与生物量,提高固氮作用、根际微生物群落组成。本研究结果显示,浓度为 100 mg·L⁻¹ 的纳米铁悬浮液引发处理 10 h,中华羊茅种子发芽率提高了 25.64%。有学者推测其原因是纳米铁颗粒提高了 β-淀粉酶活性,加速多糖向葡萄糖等的转化,为种子萌发提供能量基础^[29]。于洋^[30]的研究表明,在非生物胁迫下,不同浓度纳米铁引发燕麦(*Avena sativa*)种子 18 h(吸胀第一阶段时间点)的发芽率均高于相同纳米铁浓度引发 30 h(吸胀第二阶段时间点)。有学者推测原因是在种子吸胀过程中,尺寸微小的纳米铁颗粒能被有效吸收并转移到胚根细胞^[31],引发时间较长可能导致植物吸收过多的纳米颗粒,从而使自身受到毒害作用。以上研究表明,中华羊茅种子需要较短的纳米铁引发时间来提高其发芽特性和幼苗生长能力,纳米铁悬浮液浓度过高或引发时间过长会对种子产生负面效果。

生物炭是生物质热解的产物,具有比表面积大、孔隙率高、持水力强和环境稳定性高等特点,它在农业 and 环境保护等领域应用广泛^[32]。本试验结果显示,生物炭结壳包衣处理能够显著($P < 0.05$)提高盐胁迫下中华羊茅的种子出苗率和幼苗根长,与未结壳包衣种子相比,BC_{0.50} 处理种子出苗率提高了 13%,这与王乙富^[33]对盐胁迫下小麦(*Triticum aestivum*)种子的研究结果一致。有学者推测其原因是生物炭能够提高土壤自身的持水及供水能力,降低可溶性养分流失,进而改善植物根际微环境,缓解环境胁迫伤害^[34]。此外,本研究发现,所有包衣处理均延迟了中华羊茅种子的出苗时间,有学者认为包衣材料的透气性差,阻碍了种子的发芽速度,也可能是水分需要先将包衣材料渗透后才能被种子吸收,延缓了种子萌发进程^[35]。以上研究表明,生物炭结壳包衣能在盐胁迫条件下有效促进中华羊茅的种子出苗率和幼苗根长,但会延迟出苗时间。

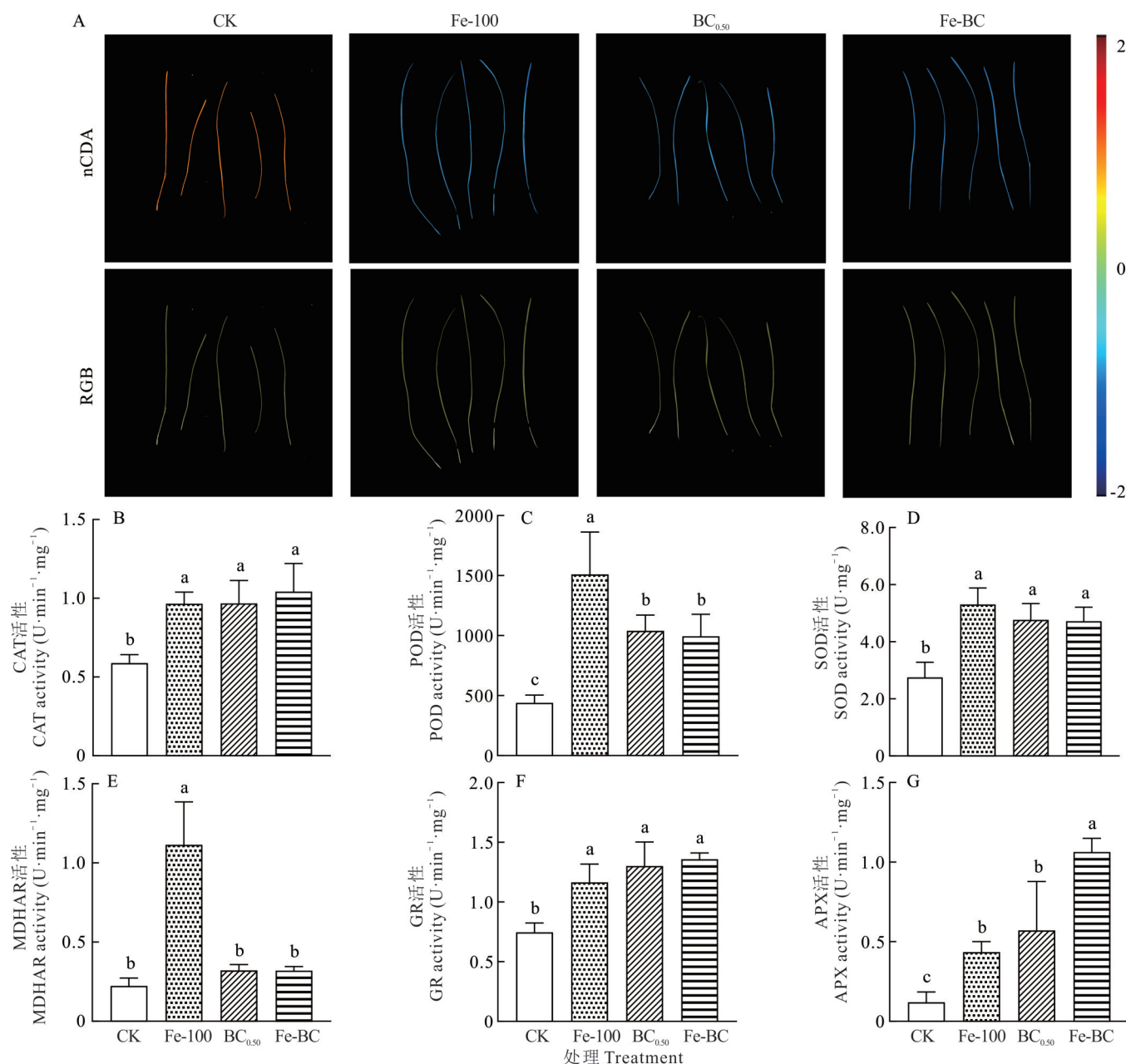


图6 盐胁迫下纳米铁引发与生物炭结壳包衣组合中华羊茅幼苗的多光谱成像及对酶促清除系统的影响

Fig. 6 Multispectral imaging of *F. sinensis* seedlings and their effects on antioxidant enzyme system under salt stress using the combined treatment of nano-iron priming and biochar encrusting

3.2 纳米铁引发与生物炭结壳包衣对中华羊茅幼苗抗氧化系统的影响

植物遭受盐胁迫时,体内活性氧(reactive oxygen species, ROS)加剧产生并积累,对核酸、蛋白、脂质等大分子造成氧化损伤,影响植物生长发育进程^[36]。酶促清除系统是植物应对逆境胁迫的保护系统之一,能够通过多种抗氧化酶的协同作用帮助植物清除过量的ROS。

研究表明,纳米材料能有效提升胁迫条件下植物的抗氧化酶活性:氧化钙纳米颗粒引发处理可提高干旱胁迫下油菜(*Brassica napus*)种子的CAT、POD和SOD活性^[37];纳米铜可增强盐胁迫下番茄(*Solanum lycopersicum*)SOD基因表达,促进植物生长^[38]。本研究结果显示,在盐胁迫下,与对照组相比,100 mg·L⁻¹纳米铁引发中华羊茅种子10 h能够显著($P < 0.05$)提高幼苗的CAT、POD、MDHAR、GR和APX活性。有学者认为纳米粒子主要通过胚根进入植物体,与细胞和亚细胞组分相互作用,影响植物的生化生理变化,从而调控其酶促清除系统^[39]。

基于生物炭的种子包衣能增强种子的抗氧化能力,从而促进早期幼苗生长。赵铁民等^[40]研究发现,在盐胁迫下对玉米施加适量生物炭后可提高幼苗叶片的CAT和POD活性;李长然等^[34]研究发现,在干旱胁迫下使用生物炭结壳包衣处理蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)种子能提高幼苗POD、CAT、SOD、APX、MDHAR和GR活性。本试验结果表明,与裸种子(CK₀)相比,生物炭结壳包衣中华羊茅种子能提高幼苗的抗氧化酶活性,且BC_{0.50}处理的效果最佳,其中CAT、SOD和APX活性分别提高了64.64%、73.29%和104.81%。以上结果表明,生物炭的多孔结构和高比表面积为养分吸附提供了丰富点位,能有效保留土壤中氮、磷等营养元素,减少养分流失,改善幼苗的生长环境,从而提高幼苗的抗氧化能力^[41]。

3.3 组合处理对中华羊茅种子的影响

有研究表明,镉胁迫下生物炭和纳米硅联合处理油菜的效果优于单个处理^[42];生物炭和纳米二氧化硅联合施用可显著提高油菜叶片的光合效率,促进植株生长^[43]。本试验结果表明,与CK相比,将最佳单处理(100 mg·L⁻¹纳米铁引发10 h处理和每5 g裸种子添加生物炭0.50 g的结壳包衣处理)组合使用可显著提高盐胁迫下中华羊茅种子的发芽特性、幼苗生长能力和酶促清除能力,但与单处理相比,组合处理在大部分指标上无显著优势,多光谱nCDA图像中不能显示组合处理对幼苗活力的显著效果,其中组合处理幼苗的POD和MDHAR活性不如单个处理,说明纳米铁引发和生物炭结壳包衣组合处理中华羊茅种子的效果并不优于单个处理,这与上述前人研究不同。对于组合处理效果不佳的现象,推测原因是生物炭的多孔结构吸附纳米铁颗粒,形成物理屏障,限制其与种子接触^[44];或是生物炭表面含氧官能团与纳米铁发生界面反应,降低纳米铁参与种子生理生化反应的效果^[45]。有相关研究报道,采用羊粪、黏土等作为丸粒化包衣材料时,多种物质相互制约导致多种牧草种子萌发启动延迟和发芽率降低^[46]。以上研究表明了材料组分搭配不当不仅无法促进种子萌发,严重时还会产生抑制效应。近年有研究选用预制的新型铁改性生物炭复合材料,该材料在制备过程中铁稳定负载于生物炭表面,有效避免了铁颗粒的团聚现象,能显著促进植物生长,并改善其根际微生态^[47]。为深入探索纳米材料和生物炭在种子抗逆中的应用潜力,建议后续研究采用预制复合材料,避免组分间的相互拮抗。

4 结论

纳米铁引发和生物炭结壳包衣处理能有效减缓盐胁迫对中华羊茅种子的不利影响。适宜的纳米铁引发处理可有效提高中华羊茅种子的发芽能力和幼苗活力,生物炭结壳包衣处理可有效改善种子的出苗特性和根系发育,同时多光谱成像获取的nCDA图像结果与种子发芽特性指标变化趋势一致。两种处理均可显著提高中华羊茅幼苗的抗氧化酶活性,幼苗ROS清除能力增强,提高了幼苗在盐胁迫下的抗氧化能力。100 mg·L⁻¹纳米铁引发10 h和每5 g裸种子添加生物炭0.50 g的结壳包衣配方为单处理中提升中华羊茅种子耐盐性效果最优,但组合处理未产生协同增效作用。本研究为盐碱地植物修复提供了可行的种子处理技术,未来可聚焦于材料改性或复合材料的利用,克服生态修复和可持续农业的发展限制。

参考文献 References:

- [1] Wang G Z, Ni G, Feng G, *et al.* Saline-alkali soil reclamation and utilization in China: Progress and prospects. *Frontiers of Agricultural Science & Engineering*, 2024, 11(2): 216—228.
- [2] Tian P, Kuang Y, Nan Z B. The characteristics of *Festuca sinensis* and its breeding potential. *Pratacultural Science*, 2015, 32(7): 1079—1087.
田沛, 旷宇, 南志标. 中华羊茅的优良特性以及利用内生真菌进行育种潜力浅析. *草业科学*, 2015, 32(7): 1079—1087.
- [3] Farooq M, Gogoi N, Hussain M, *et al.* Effects, tolerance mechanisms and management of salt stress in grain legumes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 118: 199—217.
- [4] Liu L, Zhang Y Q, Wang J, *et al.* Comparison of salt tolerance during the germination period of 12 grass species under severe salt stress. *Pratacultural Science*, 2019, 36(11): 2806—2819.
刘璐, 张跃群, 王婧, 等. 重度盐胁迫下12个地被草种萌发期的耐盐性比较. *草业科学*, 2019, 36(11): 2806—2819.
- [5] Gao M, Lin W H, Tian P. Effects of sodium stress on seed germination of *Festuca sinensis*. *Seed*, 2021, 40(5): 20—26, 32.

- 高敏, 蒯伟虎, 田沛. 钠盐胁迫对中华羊茅种子萌发的影响. 种子, 2021, 40(5): 20—26, 32.
- [6] Leonard S M, Xin H, Brown-brandl T M, *et al.* Effects of farrowing stall layout and number of heat lamps on sow and piglet production performance. *Animals*, 2020, 10(2): 348.
- [7] Ghafari H, Razmjoo J. Effect of foliar application of nano-iron oxidase, iron chelate and iron sulphate rates on yield and quality of wheat. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 2013, 4(11): 2997—3003.
- [8] Wang Y H, Tang L, Liu G Y, *et al.* Effect of nanomaterials on plant growth and development. *Agriculture of Jilin*, 2017(5): 62.
王钰涵, 唐乐, 刘桂芸, 等. 纳米材料对植物生长发育的影响. 吉林农业, 2017(5): 62.
- [9] Sun Y F. Effects of nanoprimering with iron oxide (Ⅲ) on seed germination and drought resistance of switchgrass (*Panicum virgatum*). Xianyang: Northwest Agriculture and Forestry University, 2022.
孙运府. 纳米铁引发对柳枝稷种子萌发特性及抗旱性的影响. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022.
- [10] Maswada H F, Djanaguiraman M, Prasad P V V. Seed treatment with nano-iron (Ⅲ) oxide enhances germination, seeding growth and salinity tolerance of sorghum. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2018, 204(6): 577—587.
- [11] Li Y C, Mo H F, Wang T, *et al.* Study on the response of red clover seeds to iron nanoparticles. *Agriculture and Technology*, 2023, 43(6): 1—5.
李羽超, 莫海凤, 王田, 等. 红三叶种子对纳米铁的响应研究. 农业与技术, 2023, 43(6): 1—5.
- [12] Li Y. Research progress of biochar preparation and performance. *Hans Journal of Chemical Engineering and Technology*, 2020, 10(5): 384—388.
李燕. 生物炭制备及其性能研究进展. 化学工程与技术, 2020, 10(5): 384—388.
- [13] Beesley L, Moreno-jiménez E, Gomez-eyles J L, *et al.* A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution*, 2011, 159(12): 3269—3282.
- [14] Zhang K K, Khan Z, Yu Q, *et al.* Biochar coating is a sustainable and economical approach to promote seed coating technology, seed germination, plant performance, and soil health. *Plants*, 2022, 11(21): 2864.
- [15] Elamparithi R, Sujatha K, Menaka C, *et al.* Impact of organic seaweed pelleting on seed quality and biochemical parameters in brinjal seeds. *The Pharma Innovation Journal*, 2021, 10(11): 1466—1469.
- [16] Dong J, Fu P P, Pan G X, *et al.* A novel agricultural seed coating agent prepared from biomass charcoal derived from agricultural waste and its preparation method: CN103053244A. 2014-12-10.
董娟, 付潘潘, 潘根兴, 等. 一种利用农业废弃物新型生物质炭制备的农作物种子包衣剂及其制备方法: CN103053244A. 2014-12-10.
- [17] Zhang K K, Khan Z, Liu J H, *et al.* Germination and growth performance of water-saving and drought-resistant rice enhanced by seed treatment with wood vinegar and biochar under dry direct-seeded system. *Agronomy*, 2022, 12(5): 1223.
- [18] Liu J Y. Study and evaluation on drought-resistant biochar encrusting technology of three grasses species. Beijing: China Agricultural University, 2024.
刘婧禹. 三种禾草生物炭抗旱壳衣技术研究与评价. 北京: 中国农业大学, 2024.
- [19] International Seed Testing Association. International rules for seed testing. Wallisellen: The International Seed Testing Association, 2023.
- [20] State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou University. Rules of seed testing for forage, turfgrass and other herbaceous plant—The germination test: GB/T 2930.4—2017. Beijing: Standards Press of China, 2017.
兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室. 草种子检验规程 发芽试验: GB/T 2930.4—2017. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [21] Shrestha S, Deleuran L C, Olesen M H, *et al.* Use of multispectral imaging in varietal identification of tomato. *Sensors*, 2015, 15(2): 4496—4512.
- [22] Cakmak I, Marschner H. Magnesium-deficiency and high light-intensity enhance activities of superoxide-dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione-reductase in bean-leaves. *Plant Physiology*, 1992, 98(4): 1222—1227.
- [23] Kar M, Mishra D. Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. *Plant Physiology*, 1976, 57(2): 315—319.
- [24] Charles B, Irwin F. Superoxide dismutase-improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 1971, 44(1): 276.
- [25] Arrigoni O, Dipierro S, Borraicino G. Ascorbate free-radical reductase, a key enzyme of the ascorbic-acid system. *Febs Letters*, 1981, 125(2): 242—244.

- [26] Hossain Z, López-Climent M F, Arbona V, *et al.* Modulation of the antioxidant system in citrus under waterlogging and subsequent drainage. *Plant Physiology*, 2009, 166(13): 1391—1404.
- [27] Nakano Y, Asada K. Hydrogen-peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach-chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 1981, 22(5): 867—880.
- [28] Zhang M X, Zhao L Y, He Y Y, *et al.* Potential roles of iron nanomaterials in enhancing growth and nitrogen fixation and modulating rhizomicrobiome in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Bioresource Technology*, 2024, 391(Pt B): 129987.
- [29] Xu S, Wu Y X, Li H Z, *et al.* Mechanisms of doped nanoceria seed priming enhanced cold tolerance in rapeseed. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.s.20250625.1017.002>
续坤, 吴懿鑫, 李宏卓, 等. 掺杂氧化铈纳米颗粒介导的种子引发提升油菜耐寒性机理. *农业环境科学学报*, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.s.20250625.1017.002>
- [30] Yu Y. Research on nano-priming and film coating technology of oat seeds resistant to UV-B stress. Beijing: China Agricultural University, 2024.
于洋. 基于纳米引发的耐 UV-B 型燕麦种子包膜技术研究. 北京: 中国农业大学, 2024.
- [31] Lee W, An Y, Yoon H, *et al.* Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiatus*) and wheat (*Triticum aestivum*): Plant agar test for water-insoluble nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, 27(9): 1915—1921.
- [32] Godlewska P, Ok Y S, Oleszczuk P, *et al.* Ecotoxicological aspects of biochar and biochar-amended soils. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123833.
- [33] Wang Y F. Chitosan-modified biochar promotes seed germination and seedling growth of wheat under salt stress. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(19): 6493—6499.
王乙富. 壳聚糖改性生物炭促进盐胁迫下小麦种子萌发和幼苗生长. *分子植物育种*, 2023, 21(19): 6493—6499.
- [34] Li C R, Liu J Y, Li R H, *et al.* Effects of biochar encrusting on drought resistance characteristics of *Agropyron mongolicum* during seed germination. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(3): 960—967.
李长然, 刘婧禹, 李若鸿, 等. 生物炭结壳包衣对蒙古冰草萌发期抗旱特性的影响. *草地学报*, 2025, 33(3): 960—967.
- [35] Ji L H, He A L, He F, *et al.* Screening of alfalfa seed coating materials and theirs effect on seed germination. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(8): 2728—2736.
吉凌鹤, 何傲蕾, 何峰, 等. 紫花苜蓿种子包衣材料筛选及其对种子萌发影响. *草地学报*, 2025, 33(8): 2728—2736.
- [36] Chen C, Yang K B. Effects of salt stress on plant growth and development. *Molecular Plant Breeding*, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250401.1657.006>
陈晨, 杨凯波. 盐胁迫对植物生长发育的影响. *分子植物育种*, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250401.1657.006>
- [37] Mazhar M W, Ishtiaq M, Maqbool M, *et al.* Seed priming with calcium oxide nanoparticles improves germination, biomass, antioxidant defence and yield traits of canola plants under drought stress. *South African Journal of Botany*, 2022, 151: 889—899.
- [38] Hernández-hernández H, González-morales S, Benavides-mendoza A, *et al.* Effects of chitosan—PVA and Cu nanoparticles on the growth and antioxidant capacity of tomato under saline stress. *Molecules*, 2018, 23(1): 178.
- [39] Ullah I, Toor M D, Basit A, *et al.* Nanotechnology: An integrated approach towards agriculture production and environmental stress tolerance in plants. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2023, 234(11): 666.
- [40] Zhao T M, Li Y B, Chen W F, *et al.* Effect of biochar on the physicochemical properties of coastal saline soil and the antioxidation system activity in maize seedlings. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 196—200.
赵铁民, 李渊博, 陈为峰, 等. 生物炭对滨海盐渍土理化性质及玉米幼苗抗氧化系统的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 196—200.
- [41] Xiang Y, Li Y Q, Zheng C Z, *et al.* Advances in the application of biochar in sandy soil remediation. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(4): 315—326.
向宇, 李玉强, 郑成卓, 等. 生物炭在沙质土壤修复中的应用研究进展. *中国沙漠*, 2024, 44(4): 315—326.
- [42] Li H T, Zhang Z D, Wen L Z, *et al.* Response of biochar and nano-silica in alleviating cadmium stress in rape. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2025, 31(3): 1—5, 11.
李海涛, 张召娣, 温立政, 等. 生物炭与纳米硅缓解油菜镉胁迫效应. *天津农业科学*, 2025, 31(3): 1—5, 11.
- [43] Wang Z M, Sheng Y K, Zhang Z D, *et al.* Effects of combined application of biochar and nano-silica on photosynthetic

fluorescence characteristics of oilseed rape. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(7): 127–134.

王子铭, 绳易坤, 张召娣, 等. 生物炭和纳米二氧化硅联合施用对油菜光合荧光特性的影响. *山东农业科学*, 2024, 56(7): 127–134.

- [44] Li H X, Lin Y, Zhou X B, *et al.* Research progress on heavy metals removal from wastewater by biochar-supported nano zero-valent iron. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(3): 787–793.

李华夏, 林毅, 周小斌, 等. 生物炭负载纳米零价铁去除废水中重金属的研究进展. *环境工程技术学报*, 2022, 12(3): 787–793.

- [45] Song P P, Ma W J, Wang J, *et al.* Preparation of iron-modified biochar and its application in heavy metal contaminated soils. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(12): 4018–4036.

宋佩佩, 马文静, 王军, 等. 铁改性生物炭的制备及其在重金属污染土壤修复技术中的应用进展. *环境工程学报*, 2022, 16(12): 4018–4036.

- [46] Lu G X, Li X L, Qiao Y M, *et al.* Effects of seed pelleting on seed germination and physiological indexes of forages. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(3): 451–457.

芦光新, 李希来, 乔有明, 等. 丸粒化处理对几种牧草种子萌发及生理特性的影响. *草地学报*, 2011, 19(3): 451–457.

- [47] Wang J Y, Riaz M, Babar S, *et al.* Iron-modified biochar alleviates salt-alkali stress in cotton by enhancing iron availability and rhizosphere microbiome-metabolite interactions. *Plant and Soil*, 2025, 516: 2101–2120.