

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.003

引用格式:胡新雨,李长然,李若鸿,等.纳米铁引发对盐胁迫下蒙古冰草种子发芽及幼苗生理特性的影响[J].草地学报,2026,34(3):770-778

HU Xin-Yu, LI Chang-ran, LI Ruo-hong, et al. Effects of Nano-Iron Priming on Seed Germination and Physiological Characteristics of Seedling of *Agropyron mongolicum* under Salt Stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):770-778

纳米铁引发对盐胁迫下蒙古冰草种子发芽及幼苗生理特性的影响

胡新雨,李长然,李若鸿,傅佳怡,毛培胜*

(中国农业大学草业科学与技术学院,北京 100193)

摘要:盐碱地的开发利用是我国草地改良的重点,提高乡土草种种子发芽能力是草地建设的关键环节。试验以蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)种子为材料,在 $175\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 混合盐溶液胁迫下($\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4=5:1$),探究不同浓度(25, 50, 75和 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)纳米铁颗粒悬浮液和不同时间(4 h和36 h)的引发处理对于蒙古冰草种子发芽、幼苗生长特性和抗氧化酶活性的影响,并利用多光谱成像技术快速直观地判定幼苗活力,筛选耐盐性强的引发处理。结果表明:在种子发芽和幼苗生长相关指标测定中,引发4 h效果显著优于36 h($P<0.05$)。4 h引发处理时不同浓度的纳米铁能显著提高蒙古冰草的发芽率和发芽指数($P<0.05$),平均发芽时间缩短,幼苗的苗长、鲜重、活力指数及幼苗中过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(Ascorbate peroxidase, APX)和单脱氢抗坏血酸还原酶(Monodehydroascorbate reductase, MDHAR)等抗氧化酶活性显著提高($P<0.05$),多光谱成像获取的归一化典型判别分析(nCDA)图像结果与上述生理生化指标变化趋势高度一致。综合分析,50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 纳米铁引发蒙古冰草种子4 h处理效果最佳,能有效增强蒙古冰草在盐胁迫下的发芽与生长性能,显著提升其耐盐性,为盐碱地植被恢复和生态修复提供了重要的科学依据。

关键词:蒙古冰草;耐盐性;种子引发;纳米铁

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-0770-09

Effects of Nano-Iron Priming on Seed Germination and Physiological Characteristics of Seedling of *Agropyron mongolicum* under Salt Stress

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

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

Abstract: The development and utilization of saline-alkali land is a key focus for grassland improvement in China, and enhancing the germination capacity of native grass seeds is a crucial step of this process. In this study seeds of Mongolian wheatgrass (*Agropyron mongolicum*) was used as the material to investigate the effects of nano-iron particle suspensions at different concentrations (25, 50, 75 and $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and different priming duration (4 h and 36 h) on seeds germination, seedling growth characteristics and antioxidant enzyme activities of seedling under $175\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ mixed salt solution stress ($\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4=5:1$). Multispectral imaging technology was also used to rapidly and visually assess seedling vigor and to screen for the most salt-tolerant priming treatments. The results showed that the priming treatment with 4 h significantly outperformed than the 36 h treatment according to the analysis of seed germination and seedling growth indexes ($P<0.05$). Nano-iron priming for 4 h at all concentrations significantly improved the germination percentage and germination index ($P<0.05$), reduced mean germination time, and increased seedling height, fresh weight, vigor index,

收稿日期:2025-04-22;修回日期:2025-06-08

基金项目:内蒙古自治区种业科技创新重大示范工程“揭榜挂帅”项目(2022JBGS0014)资助

作者简介:胡新雨(2002-),女,汉族,江西南昌人,硕士研究生,主要从事草类种子生理与生产研究, E-mail: huxy@cau.edu.cn; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: maops@cau.edu.cn

and antioxidant enzyme activities (e. g. POD, CAT, APX and MDHAR) in the seedlings ($P < 0.05$). The nCDA images from multispectral imaging were highly consistent with the trends of these physiological and biochemical changes. Among all the treatments, $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ nano-iron priming for 4 h was the most effective, significantly enhancing germinability and growth performance of Mongolian wheatgrass under salt stress and markedly improving its salt tolerance. These findings provide important scientific evidence for vegetation restoration and ecological rehabilitation in saline-alkali lands.

Key words: Mongolian wheatgrass; Salt tolerance; Seed priming; Nano-iron

蒙古冰草 (*Agropyron mongolicum*) 又称沙芦草, 禾本科小麦族冰草属多年生草本植物, 广泛分布于中国西北地区的盐碱化土地^[1]。该物种具有抗寒、抗旱、耐风沙、耐盐碱等优良特性, 在防风固沙、水土保持以及干旱半干旱区退化草地补播中发挥重要作用^[2]。然而土壤盐渍化日益加重, 盐胁迫已成为限制蒙古冰草种子萌发和幼苗建成的关键非生物胁迫因子^[3]。高盐环境通过引发渗透胁迫与离子毒害, 不仅阻碍种子吸水, 导致萌发延迟, 更严重抑制植物生长甚至造成植株死亡^[4]。因此, 深入探索提高蒙古冰草的耐盐性, 对于其在盐渍化生境中的成功定植与生态修复应用具有重要的理论价值和实践意义。

纳米引发是一项以纳米材料作为种子预处理剂, 使种子缓慢吸胀为萌发提前进行生理准备的新型种子处理技术^[5]。在种子表面或内部引入纳米材料, 能够调节种子的生理代谢活动, 促进储存物质的分解和转化^[6], 为种子萌发提供更多的能量和营养物质, 同时显著改善种子的吸水能力^[7]、酶活性和抗氧化能力^[8], 从而提高种子的发芽率和幼苗的抗逆性。纳米引发的效果受到种子本身质量、纳米颗粒类型和大小的影响, 还与纳米引发剂的浓度、引发时间密切相关^[9]。目前纳米引发的研究主要围绕作物展开, 比如在盐胁迫下玉米 (*Zea mays*) 种子发芽相关指标受到显著抑制, 而使用纳米引发处理后能够显著提高发芽率、活力指数以及幼苗的根长, 展现更好的耐盐能力^[10]; 以 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铁氧化物纳米颗粒进行水稻 (*Oryza sativa*) 种子引发, 能够增强种子发芽和幼苗活力, 可溶性糖及抗氧化酶活性显著上升^[11]; 盐胁迫下经过氧化锌纳米颗粒处理的小麦 (*Triticum aestivum*), 在植株生长、光合色素含量、光合效率以及叶片超微结构方面均得到有效缓解^[12]。而针对纳米引发在牧草种子中的应用研究较少, 其在盐胁迫下的作用机制尚不明确。

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, 通过捕捉不同波长的光谱信息检测物质的状态与组成, 具有简单易行、成本低廉等优点^[13]。近

年来多光谱成像技术已越来越多地被应用到了多个领域的种类识别和质量检验的过程中^[14], 包括例如水稻叶片的叶绿素和籽粒的氮素含量检测^[15]、玉米中真菌的检测^[16]、葡萄 (*Vitis vinifera*) 的甜度检测^[17]等。然而其在检测牧草种子活力等方面研究较少, 建立幼苗活力检测模型的可行性有待验证。

针对特定种子寻找适宜的纳米引发剂及其引发浓度、引发时间是引发成功与否的关键。本试验使用不同浓度的纳米铁颗粒悬浮液和不同引发时间处理蒙古冰草种子, 测定其在混合盐胁迫条件下种子发芽、幼苗生长特性和抗氧化酶活性的变化, 并结合多光谱成像技术对幼苗活力进行评价, 以期筛选出提升蒙古冰草耐盐性的最佳纳米铁引发处理, 为盐碱地植被恢复提供一定的技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为蒙古冰草种子, 收获时间为2022年, 购买于甘肃省酒泉市酒泉大业种业有限责任公司。种子保存于中国农业大学牧草种子实验室低温低湿储藏柜 (CZ-1000FC) 内, 储藏温度为 4°C , 湿度为 60%, 初始发芽率为 96%, 初始含水量为 7.3%。试验所用的纳米铁颗粒呈粉末状, 粒径 $\leq 100 \text{ nm}$, 纯度 $\geq 94\%$, 购买于甘肃谷硕纳米农业科技有限公司。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 纳米铁引发和盐胁迫处理

随机选取大小均匀、颗粒饱满的蒙古冰草种子 (调整含水量为 10%), 浸于 $25, 50, 75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}, 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的纳米铁颗粒悬浮液中, 分别标记为 Fe-M₂₅, Fe-M₅₀, Fe-M₇₅, Fe-M₁₀₀, 在 $25/15^{\circ}\text{C}$ 变温条件下分别引发 4 h 和 36 h, 每个处理重复 4 次, 试验设置两个对照: CK₀ 为未引发, CK₁ 为水引发。引发时间结束后将种子取出, 放入纱布中, 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。

设置 $175 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的混合盐溶液 (NaCl 与 Na_2SO_4 配比为 5:1) 进行盐胁迫处理。

1.3 发芽试验

参照草种子检验规程发芽试验 (GB/T 2930.4-2017)^[18], 使用纸床法进行蒙古冰草种子发芽试验。在培养皿中放入 3 层滤纸, 然后加入混合盐溶液 10 mL。选取饱满并均匀一致的蒙古冰草种子, 每皿放入 100 粒引发后种子, 盖上盒盖后称重, 4 次重复。将培养皿置于光照培养箱 (GXZ-380B-LED) 中, 在 25°C 光照 8 h 和 15°C 黑暗 16 h 条件下培养。从种子置床开始至第 14 d, 每天统计胚根突破种皮 2 mm 的种子数, 并称重补水以保持盐溶液浓度不变。发芽试验结束后, 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, 并随机取出 10 株正常种苗进行幼苗苗长、根长和鲜重的测定, 并按照下列公式计算发芽率、平均发芽时间、发芽指数和活力指数等^[19]。

发芽率 (%) = 发芽终期全部正常种苗数 / 供试种子数 $\times 100$; (1)

平均发芽时间 = $\sum nt / \sum n$ (2)

发芽指数 = $\sum (G_t / D_t)$ (3)

活力指数 = $\sum (G_t / D_t) \times \text{FW}$ (4)

式中, t 为统计时间; n 为在时间 t 时, 胚根突破种皮 2 mm 的种子数; G_t 为第 t 天的发芽数; D_t 为发芽天数 (d); FW 为幼苗鲜重 (g)。

1.4 生理生化指标测定

在第 14 d 发芽试验结束时, 从培养皿中取出正常幼苗用于生理生化指标测定。过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 活性测定参照 Cakmak 等的方法^[20], 过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性测定参照 Kar 等的方法^[21], 超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD) 活性通过检测 SOD 对 NBT 的光化学还原抑制能力来测定^[20], 谷胱甘肽还原酶 (Glutathione reductase, GR) 活性测定参照 Hossain 等的方法^[22], 单脱氢抗坏血酸还原酶 (Monodehydroascorbate reductase, MDHAR) 活性测定参照 Agrigoni 等的方法^[23], 抗坏血酸过氧化物酶 (Ascorbate peroxidase, APX) 活性测定参照 Nakano 等的方法^[24]。

1.5 多光谱成像技术评价幼苗的活力

在第 14 d 发芽试验结束时, 每个处理选取 5 株幼苗, 利用多光谱成像仪器 VideometerLab 4 (Videometer A/S, Herlev, Denmark) 采集幼苗图像。基于平均光谱反射率差异, 利用 VideometerLab 4 软件建立引发处理后蒙古冰草幼苗的 nCDA 模型, 快速判别幼苗活力水平。

1.6 数据统计分析

通过 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析, 并用 Duncan's 法 ($P < 0.05$) 进行多重比较, 采用 GraphPad Prism 8.0.2 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 纳米铁引发对盐胁迫下蒙古冰草种子发芽特性的影响

在盐胁迫条件下, 纳米铁引发处理对蒙古冰草种子的发芽能力影响不同。种子发芽率随着纳米铁引发时间的延长呈现下降的趋势, 不同浓度纳米铁引发 4 h 处理后种子发芽率显著高于引发 36 h (图 1a) ($P < 0.05$)。种子引发 4 h 时, 只有 Fe-M₅₀ 处理效果最佳, 种子发芽率最高, 且显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。引发 36 h 时, 不同浓度纳米铁处理未能提高种子发芽率, 且均显著低于 CK₀ ($P < 0.05$)。随着纳米铁引发时间的延长, 引发 4 h 和 36 h 间的种子平均发芽时间无显著差异 (图 1b)。不同浓度纳米铁引发种子的平均发芽时间均比 CK₀ 和 CK₁ 显著缩短 ($P < 0.05$), 其中在引发 4 h 时 Fe-M₅₀ 处理种子平均发芽时间最短, 较 CK₀ 和 CK₁ 分别缩短 15.5% 和 14.0%, 且与 Fe-M₂₅, Fe-M₇₅ 处理间有显著差异 ($P < 0.05$)。种子发芽指数随着纳米铁引发时间的延长呈现下降的趋势 (图 1c), 不同浓度纳米铁引发 4 h 处理后种子发芽指数显著高于引发 36 h ($P < 0.05$)。不同浓度纳米铁引发处理中, 引发 4 h 时, 发芽指数均比 CK₀ 显著提高 ($P < 0.05$), 其中 Fe-M₅₀ 处理的种子发芽指数最高, 也显著高于其他引发浓度处理 ($P < 0.05$)。但引发 36 h 时, 所有引发浓度处理的种子发芽指数均显著低于 CK₀ ($P < 0.05$)。

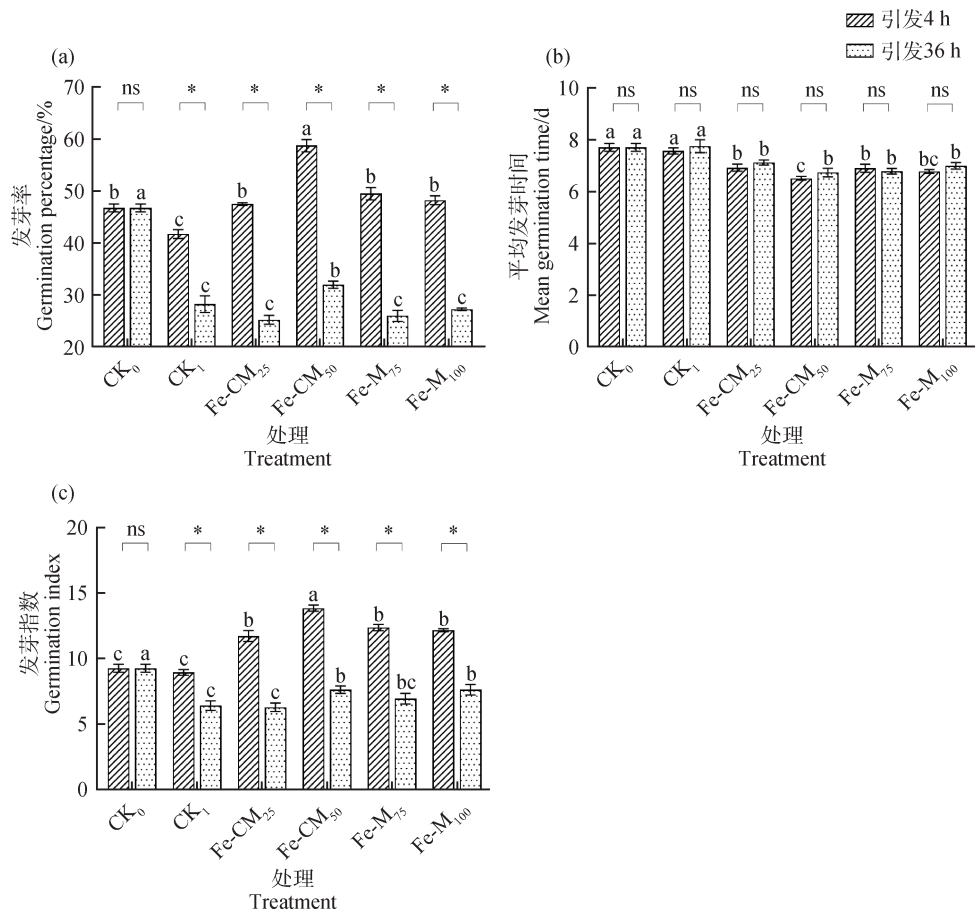


图1 纳米铁引发对盐胁迫下蒙古冰草种子发芽特性的影响

Fig. 1 Effects of Nano-iron priming on germination characteristics of Mongolian wheatgrass seeds under salt stress

注:(a)发芽率;(b)平均发芽时间;(c)发芽指数。CK₀—未处理种子;CK₁—水引发种子;Fe-M₂₅, Fe-M₅₀, Fe-M₇₅, Fe-M₁₀₀分别是指利用25, 50, 75, 100 mg·L⁻¹纳米铁引发蒙古冰草种子。不同小写字母表示相同引发时间下不同引发浓度在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,ns表示相同引发浓度下不同引发时间在0.05水平上差异不显著。下同

Note: (a) Germination percentage; (b) Mean germination time; (c) Germination index. CK₀-naked seeds; CK₁-Water-priming seeds; Fe-M₂₅, Fe-M₅₀, Fe-M₇₅, Fe-M₁₀₀-primed Mongolian wheatgrass seeds with 25, 50, 75, 100 mg·L⁻¹ nano-iron respectively. Different lowercase letters indicate that there is a significant difference at the 0.05 level at different priming concentrations at the same initiation time, * indicates that there is a significant difference at the 0.05 level at different priming times at the same concentration, ns indicates that there is no significant difference at the 0.05 level at different priming times at the same concentration. The same as below

2.2 纳米铁引发对盐胁迫蒙古冰草幼苗生长的影响

在盐胁迫条件下,纳米铁引发处理对于蒙古冰草幼苗生长特性的影响不同。幼苗根长随着纳米铁引发时间的延长呈现下降的趋势(图2a),但仅在Fe-M₅₀引发4 h处理后幼苗根长显著高于引发36 h ($P<0.05$)。引发4 h时,Fe-M₅₀处理的根长显著高于其他处理($P<0.05$),分别比CK₀和CK₁提高13.7%和28.3%,而其他处理间无显著差异。引发36 h时,不同浓度引发处理的根长都显著高于CK₁ ($P<0.05$),但Fe-M₂₅, Fe-M₅₀, Fe-M₇₅与CK₀无显著差异。苗长与根长有着类似的变化(图2b),仅Fe-M₅₀引发4 h处理后苗长显著高于引发36 h ($P<$

0.05)。引发4 h和36 h时,所有处理的苗长相对于CK₁均显著提高($P<0.05$),其中Fe-M₅₀效果最明显,分别提升66.7%和43.5%。引发4 h和36 h的幼苗鲜重之间无显著差异,都由Fe-M₅₀处理获得最大幼苗鲜重,分别比CK₁增重11.9%和11.3%(图2c)。引发4 h的活力指数均显著高于引发36 h ($P<0.05$),引发4 h时不同浓度纳米铁引发处理的活力指数均显著高于CK₀和CK₁,其中Fe-M₅₀显著高于其他处理($P<0.05$),分别比CK₀和CK₁提高51.5%和73.1%。引发时间为36 h时,所有处理组的活力指数均显著低于CK₀ ($P<0.05$),表明延长引发时间会普遍抑制幼苗活力(图2d)。

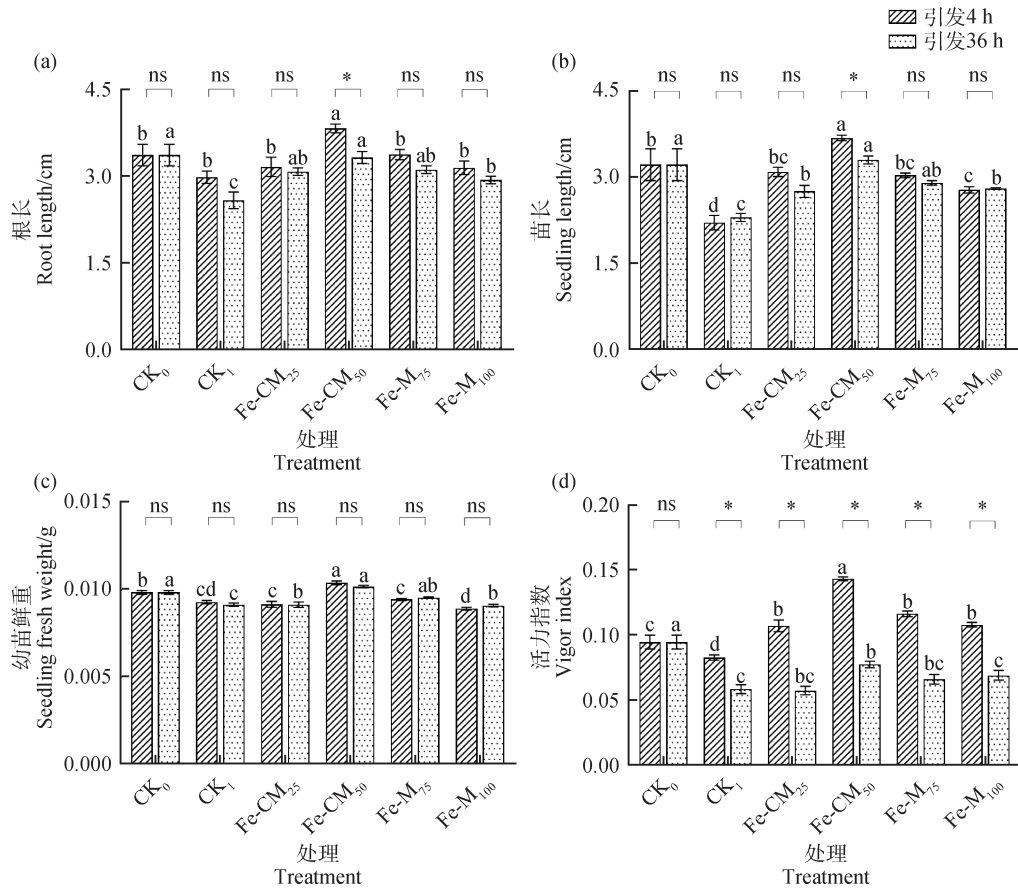


图2 纳米铁引发对盐胁迫下蒙古冰草幼苗生长的影响

Fig. 2 Effects of Nano-iron priming on the growth of Mongolian wheatgrass seedlings under salt stress

注:(a)根长;(b)苗长;(c)幼苗鲜重;(d)活力指数

Note:(a)Root length;(b)Shoot length;(c)Seedling fresh weight;(d)Vigor index

2.3 多光谱评价幼苗的活力

借助多光谱成像技术采集的RGB和nCDA图像表明,经不同纳米铁引发处理后幼苗的nCDA图像之间存在明显的区别(图3)。盐胁迫条件下,随着纳米铁引发时间的延长,引发4 h处理的幼苗平均光谱反射率与引发36 h有明显的差异。引发4 h后,不同纳米铁浓度处理的蒙古冰草幼苗较CK₀均

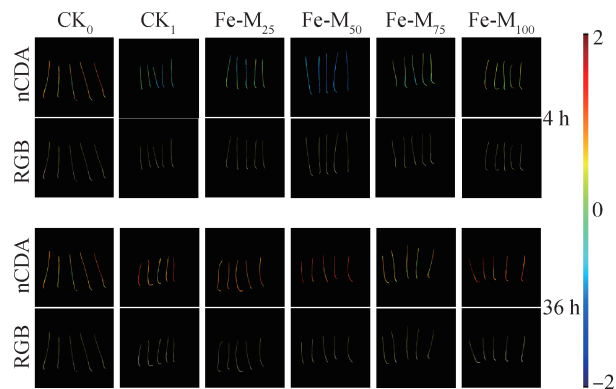


图3 纳米铁引发蒙古冰草幼苗的nCDA和RGB图像

Fig. 3 nCDA and RGB images of Mongolian wheatgrass seedlings primed with nano-iron

有变蓝趋势,其中Fe-M₅₀幼苗颜色最蓝,Fe-M₂₅次之。引发36 h后,不同浓度纳米铁引发处理的蒙古冰草幼苗与CK₀相比均呈现红色,其中Fe-M₂₅处理的幼苗颜色最红,其次为Fe-M₁₀₀处理。

2.4 纳米铁引发对盐胁迫蒙古冰草幼苗抗氧化酶活性的影响

纳米铁引发对蒙古冰草幼苗抗氧化酶活性测定结果显示,经Fe-M₅₀处理的幼苗POD活性较CK₀和CK₁显著增强($P < 0.05$),分别提高25.4%和43.2%(图4a)。所有纳米铁引发处理的CAT活性均显著提高($P < 0.05$),其中Fe-M₅₀提升效果最优,较CK₀提高51.4%,较CK₁提高18.8%(图4b)。纳米铁引发处理后的SOD活性均显著提高($P < 0.05$),但处理间无显著差异(图4c)。在APX与MDHAR活性方面,Fe-M₅₀处理均显著高于其他处理($P < 0.05$),与CK₀相比分别提升110.7%和120.2%(图4d、e)。而各处理对GR活性的影响相对有限(图4f),仅Fe-M₅₀处理较CK₁显著提高9.8%($P < 0.05$)。

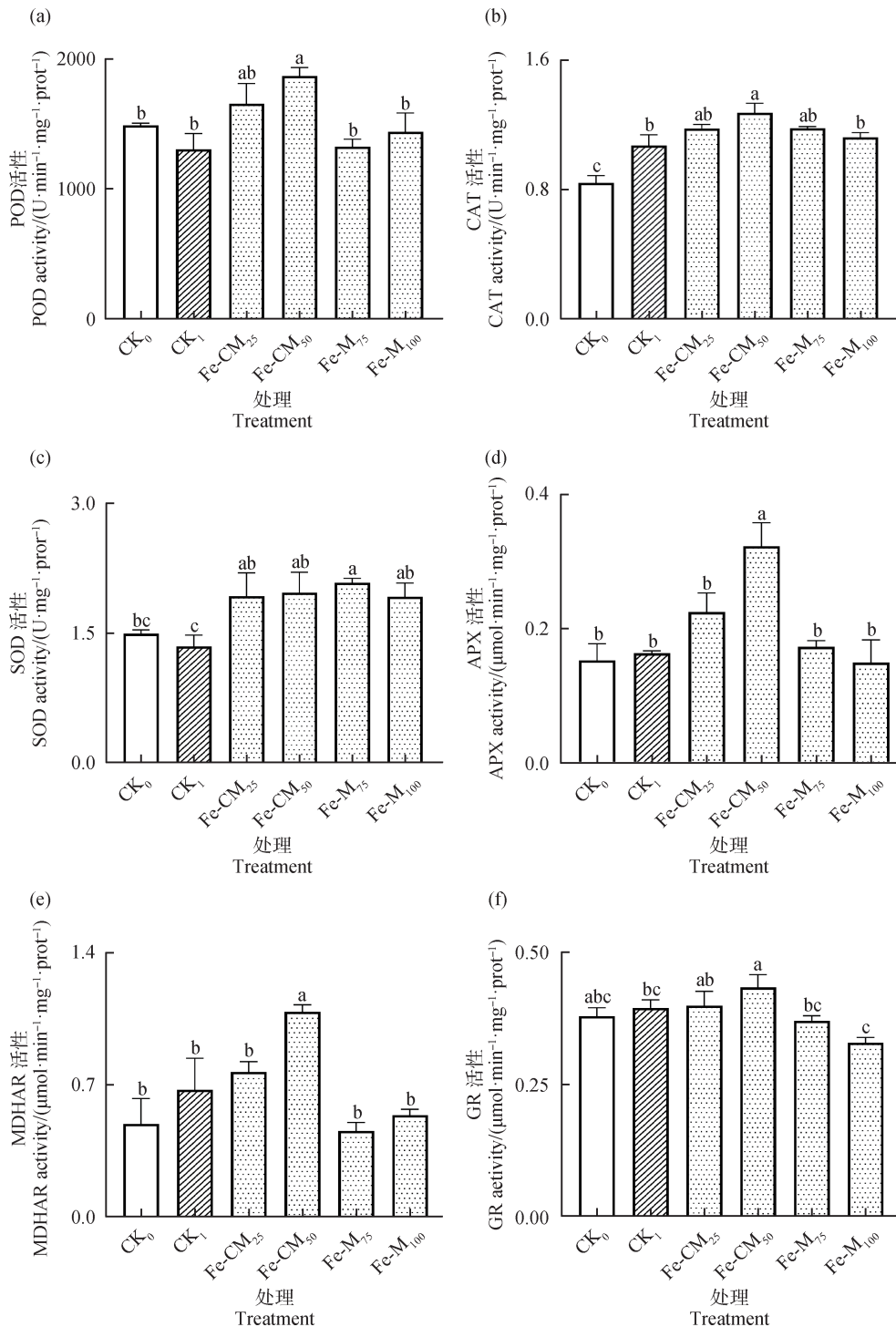


图4 盐胁迫下纳米铁引发处理对蒙古冰草幼苗酶促清除系统的影响

Fig. 4 Effects of nano-iron priming on enzymatic scavenging system of Mongolian wheatgrass seedlings under salt stress

注:(a)POD活性;(b)CAT活性;(c)SOD活性;(d)APX活性;(e)MDHAR活性;(f)GR活性

Note:(a)POD activity;(b)CAT activity;(c)SOD activity;(d)APX activity;(e)MDHAR activity;(f)GR activity

3 讨论

3.1 纳米铁引发对盐胁迫下蒙古冰草种子发芽特性和幼苗生长的影响

种子的萌发阶段对盐胁迫最为敏感,种子能在

盐胁迫下萌发出苗对于植株建成具有重要意义^[25]。大量研究表明盐胁迫会通过渗透胁迫和离子毒害等作用,引发生理干旱,从而影响种子吸水进而导致种子发芽率明显下降和萌发迟缓^[26]。本试验中利用纳米铁引发后蒙古冰草种子的发芽率较CK₀可

提升25.7%、发芽指数可提升49.3%,平均发芽时间有所缩短,表明纳米铁引发可以有效缓解盐胁迫给种子萌发带来的不利影响。种子萌发将大量消耗其内部的营养物质,有研究表明氧化铁纳米颗粒可以提高 α -淀粉酶活性,从而促进淀粉分解为种子萌发提供能量^[27]。同时纳米颗粒具有丰富的孔道结构,能够增加种子与水的结合,有效促进其对水分的吸收并维持渗透压平衡,最终改善种子的发芽表现^[28]。

引发处理后的蒙古冰草幼苗的根长较CK₀提升13.7%,苗长提升66.7%,鲜重提升5.6%,活力指数提升51.5%。纳米铁引发后种子内部的铁元素得到补充,而铁作为植物生长发育所需的重要矿质营养之一,影响植物的线粒体呼吸、光合作用和生物固氮等功能,是植物生长发育的重要限制性元素^[29]。且纳米铁颗粒本身具有微小尺寸(≤ 100 nm),能够被有效吸收并转移到子叶和胚根发挥作用^[30]。本试验中采用适中浓度的纳米铁引发蒙古冰草的效果最好,而利用25 nm的纳米氧化铜对豆类种子进行引发处理时,其幼苗生长指标在较低浓度下($1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)表现较好,中等浓度($100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和较高浓度下($1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)幼苗的生长受到抑制^[31]。植物对纳米材料的吸收和转运效率均会受到纳米材料的物理性质如尺寸、形状和表面积/体积比等特性的影响^[32],不同植物种类对不同纳米材料的响应效果不同,针对不同的胁迫和植物寻找适宜的纳米引发处理条件是未来需要重视的问题。

纳米铁引发的效果强烈依赖于浓度和时间,本试验中引发4 h的发芽率、发芽指数和活力指数等指标显著优于36 h且纳米铁引发浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 效果最佳($P<0.05$),浓度过高或时间过长效果反而下降甚至产生抑制。这一结果与于洋^[33]的研究结论一致,即在非生物胁迫下,利用不同浓度的纳米铁对燕麦(*Avena sativa*)种子进行18 h(吸胀第1阶段时间点)引发处理,其发芽率均高于相同纳米铁浓度引发30 h(吸胀第2阶段时间点)处理。这可能是因为短时且浓度适中的纳米铁引发恰好提供了抗氧化酶合成等生理反应所需的适量铁离子而不会造成过量积累,延长引发时间可能导致铁离子持续吸收并在细胞内积累,超过细胞稳态调控能力。

3.2 纳米铁引发对盐胁迫蒙古冰草幼苗抗氧化酶活性的影响

活性氧(ROS)是植物生长发育和代谢活动的

关键调控因子,在正常状态下ROS的产生与清除通常保持相对平衡,逆境胁迫下则可能会过度积累对植物造成伤害^[34]。植物的抗逆性与酶促抗氧化系统紧密相关,抗氧化酶系统包括SOD, POD, CAT, APX等,通过相互协调可以清除植物体内的氧化自由基,以减轻其对植物的毒性影响,确保细胞的正常生理功能,是植物抵御ROS毒性影响的重要保护机制^[35]。前人研究表明,在非生物胁迫条件中,对油菜(*Brassica napus*)种子进行 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 纳米氧化钙引发处理,能够提高油菜种子的CAT、POD和SOD活性,从而有效调节ROS稳态,减轻外界环境对油菜种子的伤害^[36]。本研究中, $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 纳米铁引发4 h的蒙古冰草幼苗的POD, CAT, APX与MDHAR活性较CK₀分别显著提高25.4%, 51.4%, 110.7%和120.2. % ($P<0.05$),表明纳米铁引发有效增强了蒙古冰草幼苗的抗氧化能力,减轻盐胁迫对其生长的不利影响,纳米铁引发增强抗氧化能力的机制可能是纳米材料可直接进入植物的种子、根系和叶片等核心部位,介导植物的生理与生化代谢过程,进而提升植物抵御生物及非生物胁迫的能力^[37],说明纳米铁引发在提高植物抗逆性方面存在巨大潜力。

3.3 多光谱评价纳米铁引发后幼苗的活力

多光谱成像技术可以获取纹理、颜色、形状、大小和化学成分等信息,本试验借助多光谱成像技术评价纳米铁引发后幼苗的活力,发现引发4 h不同纳米铁浓度引发处理的幼苗活力均高于引发36 h各引发浓度处理的幼苗活力,其中Fe-M₅₀处理颜色最蓝,这与发芽试验、酶活性测定结果较为一致,展现了多光谱成像技术在判别幼苗活力方面的可行性。事实上,多光谱成像技术在预测种子活力与健康度等方面已有一些研究,如Shetty等^[38]运用多光谱成像预测菠菜(*Spinacia oleracea*)种子的发芽能力与胚芽长度等。未来多光谱成像技术应该向着提升准确度和速率的方向努力,为快速无损鉴别幼苗活力提供支持。

4 结论

适宜浓度和时间的纳米铁引发处理能够缓解盐胁迫对蒙古冰草种子和幼苗的不利影响, $175\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 混合盐溶液($\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4=5:1$)胁迫下,

50 mg·L⁻¹纳米铁引发处理4 h效果最佳,能提高盐胁迫下种子的发芽率、发芽指数、幼苗的根长、苗长、鲜重、活力指数和POD,CAT,APX,MDHAR等抗氧化酶活性,缩短种子的平均发芽时间。

参考文献

- [1] 赵盼盼,邵文山,靳长青,等. 围封对荒漠草原沙芦草种群构件生物量分配特性的影响[J]. 生态环境学报,2017,26(12):2024-2029
ZHAO P P, SHAO W S, JIN C Q, et al. Effects of enclosure on biomass allocation characteristics of *Agropyron mongolicum* population in desert steppe[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(12):2024-2029
- [2] 李晓全,高有汉,刘扬,等. 我国北方9份旱生一沙生植物蒙古冰草遗传多样性研究[J]. 草业学报,2016,25(3):77-85
LI X Q, GAO Y H, LIU Y, et al. The genetic diversity of 9 populations of dry-desert *Agropyron mongolicum* collected in northern China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(3):77-85
- [3] 周璐璐,伏兵哲,许冬梅,等. 盐胁迫对沙芦草萌发特性影响及耐盐性评价[J]. 草业科学,2015,32(8):1252-1259
ZHOU L L, FU B Z, XU D M, et al. Effects of salt stress on germination characteristics of *Agropyron mongolicum* and salt-tolerance evaluation[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(8):1252-1259
- [4] 刘小岑,胡海骏,田野,等. 外源纳米硅对盐胁迫下辣椒种子萌发及生理指标的影响[J]. 种子,2025,44(4):26-33
LIU X C, HU H J, TIAN Y, et al. Effects of exogenous silicon nanosilicon on seed germination and physiological indicators of *Capsicum annuum* seeds under salt stress[J]. Seed, 2025, 44(4):26-33
- [5] FRACETO L F, GRILLO R, DE MEDEIROS G A, et al. Nanotechnology in agriculture: which innovation potential does it have?[J]. Frontiers in Environmental Science, 2016, 4:20
- [6] SRIVASTAVA P, BRAGANÇA J, RAMANAN S R, et al. Synthesis of silver nanoparticles using haloarchaeal isolate *Halo-coccus salifodinae* BK3 [J]. Extremophiles, 2013, 17(5):821-831
- [7] ANAND A, KUMARI A, THAKUR M, et al. Hydrogen peroxide signaling integrates with phytohormones during the germination of magnetoprimed tomato seeds[J]. Scientific Reports, 2019, 9:8814
- [8] CHUNG I M, REKHA K, RAJAKUMAR G, et al. Influence of silver nanoparticles on the enhancement and transcriptional changes of glucosinolates and phenolic compounds in genetically transformed root cultures of *Brassica rapa* ssp. *Rapa*[J]. Bio-process and Biosystems Engineering, 2018, 41(11):1665-1677
- [9] 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
- [10] ELKHATIB E, ATTIA M, MAHDY A, et al. Priming with mango peels nanoparticles enhances seed germination of maize (*Zea mays* L.) under salt stress [J]. Alexandria Science Exchange Journal, 2019, 40(4):767-780
- [11] AFZAL S, SHARMA D, SINGH N K. Eco-friendly synthesis of phytochemical-capped iron oxide nanoparticles as nano-priming agent for boosting seed germination in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(30):40275-40287
- [12] ABOU-ZEID H M, ISMAIL G S M, ABDEL-LATIF S A. Influence of seed priming with ZnO nanoparticles on the salt-induced damages in wheat (*Triticum aestivum* L.) plants [J]. Journal of Plant Nutrition, 2021, 44(5):629-643
- [13] 岳佳铭,丛晓翔,李曼莉. 多光谱成像技术在种子质量检测研究中的应用[J]. 种子,2021,40(10):129-135
YUE J M, CONG X X, LI M L. Application of multispectral imaging technology in seed quality detection[J]. Seed, 2021, 40(10):129-135
- [14] ELMASRY G, MANDOUR N, WAGNER M H, et al. Utilization of computer vision and multispectral imaging techniques for classification of cowpea (*Vigna unguiculata*) seeds [J]. Plant Methods, 2019, 15:24
- [15] 张浩,姚旭国,张小斌,等. 基于多光谱图像的水稻叶片叶绿素和籽粒氮素含量检测研究[J]. 中国水稻科学,2008,22(5):555-558
ZHANG H, YAO X G, ZHANG X B, et al. Measurement of rice leaf chlorophyll and seed nitrogen contents by using multi-spectral image[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2008, 22(5):555-558
- [16] 任林,刘伟,刘长虹,等. 基于多光谱成像技术的玉米赭曲霉菌无损检测[J]. 中国食品学报,2024,24(6):402-409
REN L, LIU W, LIU C H, et al. Non-destructive detection of *Aspergillus ochraceus* in corn based on multispectral imaging technology [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(6):402-409
- [17] 吴虹璋. 基于多光谱成像技术葡萄甜度检测技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2024:36-42
WU H Z. Research on grape sweetness detection technology based on multi-spectral imaging technology [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2024:36-42
- [18] 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 草种子检验规程 发芽试验:GB/T 2930.4—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017:1-22
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Grass seed testing procedures—Germination test: GB/T 2930.4—2017 [S]. Beijing:Standards Press of China, 2017:1-22
- [19] 段冰冰,魏张东,王琳. 重金属镉单独或与聚丙烯微塑料共同暴露对玉米种子萌发及幼苗生长的影响研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(8):83-88
DUAN B B, WEI Z D, WANG L. Analyzing the impacts of

- cadmium alone and in co-existence with polypropylene microplastics on seed germination and seedling growth of maize[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(8):83-88
- [20] CAKMAK I, MARSCHNER H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves[J]. *Plant Physiology*, 1992, 98(4):1222-1227
- [21] KAR M, MISHRA D. Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence[J]. *Plant Physiology*, 1976, 57(2):315-319
- [22] HOSSAIN Z, LÓPEZ-CLIMENT M F, ARBONA V, et al. Modulation of the antioxidant system in *Citrus* under waterlogging and subsequent drainage[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2009, 166(13):1391-1404
- [23] ARRIGONI O, DIPIERRO S, BORRACCINO G. Ascorbate free radical reductase, a key enzyme of the ascorbic acid system[J]. *FEBS Letters*, 1981, 125(2):242-244
- [24] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1981, 22(5):867-880
- [25] 申忠宝, 潘多锋, 王建丽, 等. 混合盐碱胁迫对5种禾草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *草地学报*, 2012, 20(5):914-920
- SHEN Z B, PAN D F, WANG J L, et al. Effects of saline-alkaloid stress on seed germination and seedling growth of grasses[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(5):914-920
- [26] 王仁汉, 胡海洲, 刘蕾, 等. 亚精胺对盐胁迫下甜菜种子萌发的影响[J]. *安徽农业科学*, 2025, 53(8):129-132
- WANG R H, HU H Z, LIU L, et al. Effects of exogenous spermidine on seed germination of sugar beet under salt stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2025, 53(8):129-132
- [27] 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[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021:22-26
- SUN Y F. Effects of nanoprimering with iron oxide (Ⅲ) on seed germination and drought resistance of switchgrass (*Panicum virgatum*) [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021:22-26
- [28] ZHAO D Q, FANG Z W, TANG Y H, et al. Graphene oxide as an effective soil water retention agent can confer drought stress tolerance to *Paeonia ostii* without toxicity[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(13):8269-8279
- [29] SONG H, GENG Q L, WU X, et al. The transcription factor MYC1 interacts with FIT to negatively regulate iron homeostasis in *Arabidopsis thaliana* [J]. *The Plant Journal*, 2023, 114(1):193-208
- [30] LEE C W, MAHENDRA S, ZODROW K, et al. Developmental phytotoxicity of metal oxide nanoparticles to *Arabidopsis thaliana* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2010, 29(3):669-675
- [31] DURAN N M, SAVASSA S M, DE LIMA R G, et al. X-ray spectroscopy uncovering the effects of Cu based nanoparticle concentration and structure on *Phaseolus vulgaris* germination and seedling development[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(36):7874-7884
- [32] SZŐLLŐSI R, MOLNÁR Á, KONDAK S, et al. Dual effect of nanomaterials on germination and seedling growth: stimulation vs. phytotoxicity[J]. *Plants*, 2020, 9(12):1745
- [33] 于洋. 基于纳米引发的耐UV-B型燕麦种子包膜技术研究[D]. 北京:中国农业大学, 2024:18-19
- YU Y. Research on nano-priming and film coating technology of oat seeds resistant to UV-B stress[D]. Beijing: China Agricultural University, 2024:18-19
- [34] DAS K, ROYCHOUDHURY A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2014, 2:53
- [35] NADARAJAH K K. ROS homeostasis in abiotic stress tolerance in plants[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(15):5208
- [36] 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 [J]. *South African Journal of Botany*, 2022, 151:889-899
- [37] DAM P, PARET M L, MONDAL R, et al. Advancement of noble metallic nanoparticles in agriculture: A promising future[J]. *Pedosphere*, 2023, 33(1):116-128
- [38] SHETTY N, OLESEN M H, GISLUM R, et al. Use of partial least squares discriminant analysis on visible-near infrared multi-spectral image data to examine germination ability and germ length in spinach seeds[J]. *Journal of Chemometrics*, 2012, 26(8/9):462-466

(责任编辑 刘婷婷)