

陈雅玲, 杜亚楠, 梅怡然, 等. 水铁矿对小麦和水稻种子萌发的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 814-820.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.04.002

水铁矿对小麦和水稻种子萌发的影响

陈雅玲¹, 杜亚楠¹, 梅怡然¹, 张奇², 冉炜¹, 张振华², 沈其荣¹

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院/江苏省固体有机废弃物资源化利用高新技术研究重点实验室, 江苏 南京 210095; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 为比较水铁矿(HF)、螯合铁(CI)和硫酸亚铁(FS)3种铁素对小麦和水稻2种作物种子萌发的影响, 利用小麦和水稻发芽试验, 通过测定不同铁质量浓度(0 mg/L、10 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、200 mg/L)下小麦和水稻种子的发芽率、发芽指数、活力指数、芽长和根长, 比较HF、CI和FS对小麦和水稻种子发芽的影响。结果表明: 与无添加铁的对照相比, 低质量浓度(10 mg/L)HF处理显著提高了小麦种子的发芽率13.81%、活力指数20.07%、发芽指数17.12%、芽长6.47%和根长32.92%; 高质量浓度(200 mg/L)的CI和FS处理降低了小麦种子的发芽指数和活力指数, 抑制了芽和根的伸长量。3种铁素在低(10 mg/L)、中(50 mg/L)质量浓度时均显著地提高了水稻种子的发芽指数和活力指数, 但对水稻发芽率无显著作用; 高质量浓度FS处理对水稻种子发芽指数、根长和芽长产生抑制作用。其中, 50 mg/L HF处理的水稻种子发芽指数和活力指数相比于对照分别提高了12.89%和103.24%, 促进作用最为明显; 200 mg/L FS处理的水稻种子发芽率、发芽指数和活力指数相比于对照分别降低了12.66%、62.5%和4.96%, 抑制作用最为明显。可见, 低质量浓度铁素浸种对小麦和水稻的种子萌发起显著的促进作用, 高质量浓度铁素浸种则有抑制作用, HF对小麦和水稻种子萌发的促进作用优于CI和FS。

关键词: 小麦; 水稻; 水铁矿; 螯合铁; 硫酸亚铁; 种子萌发

中图分类号: S512.104.1; S511.041 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)04-0814-07

Effects of ferrihydrite on seed germination of wheat and rice

CHEN Ya-ling¹, DU Ya-nan¹, MEI Yi-ran¹, ZHANG Qi², RAN Wei¹, ZHANG Zhen-hua², SHEN Qi-rong¹

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory for Solid Organic Waste Utilization/College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: The aim of this study was to compare the effects of ferrihydrite (HF), chelate iron (CI) and ferrous sulfate (FS) on seed germination of wheat and rice. The germination rate, germination index, vigor index, bud length and root length of wheat and rice seeds were measured under different iron contents (0 mg/L, 10 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L and 200 mg/L). The results showed that the germination rate, vigor index, germination index, bud length and root length in the treatment of 10 mg/L HF were significantly increased by 13.81%, 20.07%, 17.12%, 6.47% and 32.92%. High mass concentration (200 mg/L) of CI and FS reduced germination index and vigor index of wheat seeds and inhibited the elongation of buds and roots. For rice, the three iron treatments at low (10 mg/L) and medium (50 mg/L) mass concentrations significantly increased the germination index and vigor index of seeds, but had no significant effect on the germination rate.

High mass concentration of FS inhibited germination index, root length and bud length of rice seeds. Compared with the control, germination index and vigor index of rice seeds in the treatment of 50 mg/L HF increased by 12.89% and 103.24%, while the germination rate, germination index and vigor index of rice seeds in the treat-

收稿日期: 2020-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671294)

作者简介: 陈雅玲 (1995-), 女, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 研究方向为土壤矿物与新型肥料。(E-mail) cyling1234@163.com

通讯作者: 冉炜, (E-mail) ranwei@njau.edu.cn

ment of 200 mg/L FS decreased by 12.66%, 62.5% and 4.96%. It can be seen that the seed germination of wheat and rice is significantly promoted by low mass concentration of iron, but inhibited by high mass concentration of iron. The promoting effect of HF on seed germination of wheat and rice is better than that of CI and FS.

Key words: wheat; rice; ferrihydrite; chelate iron; ferrous sulfate; seed germination

铁是所有生物生长发育必需的矿质元素,植物缺铁会影响植物生理活性、养分吸收等,人体缺铁导致的营养不均衡更为严重^[1]。因此,施加外源铁肥,提高土壤铁的有效性对于治理和改善植物缺铁症和促进人类健康有重大意义^[2-3]。水铁矿(HF)广泛存在于自然界,是一种天然纳米铁矿物,具有巨大的比表面积和高表面活性,控制和影响着环境中某些污染物质和营养元素的形态、迁移和转化^[4-6]。硫酸亚铁(FS)是一种良好的铁肥,但在空气中容易氧化。FS与腐殖酸类或脂肪酸类物质螯合可制成螯合铁(CI),不易在空气中氧化,能为植物提供可利用的铁养分^[7-8]。作物种子萌发率对农业生产十分重要,提高作物种子萌发率是提高粮食产量的前提。近年来,纳米铁矿物的研究和应用越来越受到重视。纳米铁氧化物在促进作物生长方面有明显的效果^[9-10]。本课题组前期研究结果表明,低质量浓度的HF(20 mg/L),对玉米种子的萌发促进作用最明显,可以完全替代EDTA-Fe,起到促进植株生长的作用,但高浓度的HF对玉米生长却有抑制作用^[11]。虽然FS和CI作为铁肥在国内外已有大量研究,但在农业生产中作物苗期缺铁现象也十分普遍,常见的农作物花生常因缺铁而引发“黄化病”等。长期以来,矫正植物缺铁失绿症一直是个难题。在碱性土壤中采用施用硫磺粉和石膏等酸性化合物的方法降低土壤pH,以及在土壤中施用无机铁肥、螯合铁肥,可以改良土壤,提高土壤中铁的有效性;铁肥浸种,叶面喷施铁肥,通过喷灌水施铁肥,果树茎干注射和包埋铁肥溶液等可以有效减轻植株缺铁失绿症状^[12-13]。但是,目前市场上仍然缺乏能有效克服缺铁症的铁肥产品。小麦和水稻是中国最重要的2种粮食作物,水铁矿对小麦和水稻种子萌发的研究尚未见报道。本研究比较研究水铁矿、螯合铁和硫酸亚铁对小麦和水稻种子萌发的影响,期望筛选出具有应用潜力的铁肥肥源。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试小麦品种:常规品种苏麦188,具有分蘖

强、穗数足、产量高、适应广等特点;供试水稻品种:常规品种C两优513,具有生育期短、穗数足、结实率高等特点。两种作物品种种子均购自江苏省农业科学院。所用试剂硫酸亚铁、硝酸铁和氢氧化钾等均为分析纯,购自江苏科铭生物技术有限公司。

HF制备:称取40 g $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 溶于500 ml去离子水中,加入330 ml KOH溶液(1 mol/L),最后20滴逐滴加入,调节pH至7~8,剧烈搅拌,然后迅速离心(8 000 r/min),将得到的固体物质用去离子水洗涤4~5次,以去除电解质,常温下晾干至恒质量,含铁量58%。用玛瑙研钵将制得的HF研磨至粉末状备用。

CI制备:由1 L FS溶液(314 g/L)中加入10 ml大豆脂肪酸制成。

铁素溶液制备:将HF溶液、CI溶液和FS悬浮液分别置于200 ml广口塑料瓶中,拧紧瓶盖,超声波振荡15 min,分别制成铁含量为0 mg/L(对照)、10 mg/L、50 mg/L、100 mg/L和200 mg/L的铁素溶液。

1.2 试验设计

先将小麦、水稻种子放入烧杯中用3% H_2O_2 进行种子表面消毒5 min,去离子水冲洗4~5次,洗去杂物。然后分别用3种不同类型(HF、CI和FS)的4个不同铁含量(10 mg/L、50 mg/L、100 mg/L和200 mg/L)铁素溶液浸泡种子0.5 h,共12个处理,每个处理3个重复。对照为不加铁的清水,试验重复3次。每个处理均挑选大小一致、形态饱满的种子,用去离子水清洗后,放在垫有双层洁净定性中性滤纸培养皿中,每个培养皿中放入15粒种子,每12 h补充铁素溶液10 ml,记录发芽情况。培养皿在生化培养箱中遮光培养72 h后,从每个培养皿中随机选择10粒种子统计发芽率、根长和芽长,计算平均值和标准差。

1.3 测定方法

以幼根至少达到种子长度、幼芽达到种子1/2长度作为发芽标准,处理72 h后,用游标卡尺测定根长、芽长(最长根长、芽长)。发芽率、活力指数和发芽指数采用以下公式进行计算:发芽率=处理种

子发芽数/处理种子总数^[14], 活力指数=发芽率×平均幼苗长度(根长+芽长)^[15], 发芽指数=(处理的发芽数/空白对照的发芽数)×[(处理的根长均值/空白对照的根长均值)]×100^[16]。

1.4 数据处理

采用 Excel2007 和 SPSS19.0 软件进行数据处理和差异显著性分析, 样本之间的差异性分析采用单因素方差分析法(ANOVA), Duncan's 法检验处理间的差异。采用 GraphPad Prim 8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同类型铁素各浓度处理对小麦种子萌发的影响

由图 1 可知, 添加了铁素的处理与对照组相比, 小麦种子发芽率都有不同程度的提高。其中, HF 处理铁素质量浓度在低于 100 mg/L 时, 对小麦种子发芽率具有促进作用, 且与 CK 有显著差异, 当质量浓度达到 200 mg/L 时与 CK 差异不显著; CI 与 FS 处理中, 除 FS (50 mg/L) 处理的发芽率显著高于 CK 外, 其余处理与 CK 相比均无显著差异。不同类型铁素各质量浓度处理的小麦种子发芽率优异度表现为: HF 10 mg/L>HF 50 mg/L>HF 100 mg/L>HF 200 mg/L>CK、CI 50 mg/L>CI 10 mg/L>CI 200 mg/L>CI 100 mg/L>CK 和 FS 50 mg/L>FS 10 mg/L>FS 200 mg/L>FS 100 mg/L>CK。由此可以看出, HF (10 mg/L) 对小麦种子发芽率的促进效果最佳。

HF 处理的小麦种子发芽指数随质量浓度增加有降低的趋势, 当铁质量浓度为 10 mg/L 时, 发芽指数与 CK 有显著差异; CI 与 FS 处理中, 当质量浓度为 200 mg/L 时, 均出现显著的抑制现象, 其他质量浓度处理与 CK 并无显著差异。不同类型铁素各质量浓度处理的小麦种子发芽指数优异度表现为: HF 10 mg/L>HF 50 mg/L>HF 200 mg/L>CK>HF 100 mg/L、CI 10 mg/L>CK>CI 50 mg/L>CI 100 mg/L>CI 200 mg/L 和 FS 50 mg/L>FS 100 mg/L>FS 10 mg/L>CK>FS 200 mg/L。由此可以看出, 适宜低质量浓度的铁素处理可以提高小麦发芽指数; 高质量浓度 FS、CI 处理会降低小麦的发芽指数, 而高质量浓度 HF 处理的小麦种子发芽指数与对照相比差异不显著, 表明其安全性相对较高。

HF 处理的种子活力指数与铁素质量浓度呈一定程度的负相关关系。10 mg/L HF 处理与 CK 具

有显著差异, 对小麦种子活力指数的促进效果明显; CI 与 FS 处理中, 当铁素含量为 200 mg/L 时, 与 CK 存在显著差异, 对小麦种子活力有明显的抑制作用。不同类型铁素各质量浓度处理小麦种子活力指数优异度表现为: HF 10 mg/L>HF 50 mg/L>HF 100 mg/L>HF 200 mg/L>CK、CI 10 mg/L>CI 50 mg/L>CI 100 mg/L>CK>CI 200 mg/L 和 FS 10 mg/L>FS 50 mg/L>FS 100 mg/L>CK>FS 200 mg/L。由此可以看出, 适宜低质量浓度的铁素处理可以提高小麦种子活力指数; 高质量浓度 FS、CI 处理会抑制小麦种子活力指数, 而高质量浓度 HF 处理的小麦种子活力指数与对照相比差异不显著, 同样表明其安全性相对较高。

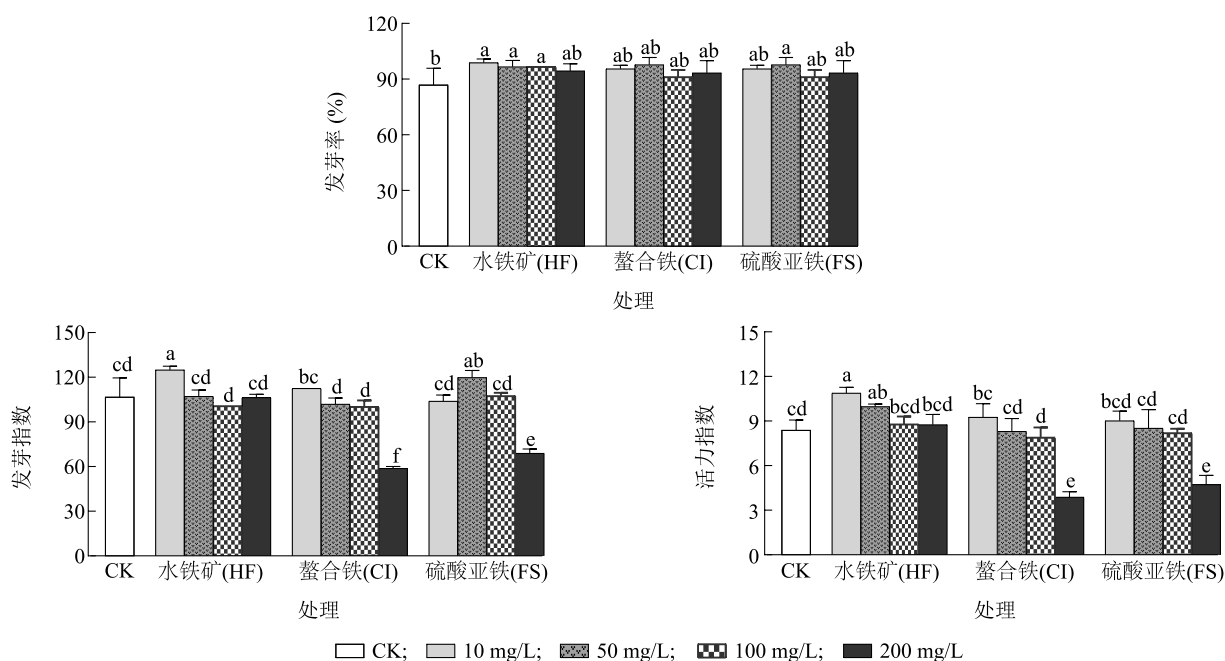
综上所述, 对小麦种子萌发促进效果最好的是 10 mg/L HF 处理。当 CI、FS 铁素质量浓度达到 200 mg/L 时, 对小麦种子萌发具有显著的抑制效果。

由图 2 可知, HF 处理小麦芽长随着铁素质量浓度的增加呈现逐渐下降的趋势。HF 10 mg/L 处理的芽长最长, 显著长于对照; HF 100 mg/L 处理的芽长最短, 显著短于对照。CI 处理的芽长随着铁素质量浓度的增加也呈现逐渐下降的趋势, 当质量浓度达到 200 mg/L 时出现显著的抑制现象。FS 处理的小麦芽长随着铁素质量浓度的增加呈现先上升后下降的趋势, FS 50 mg/L 处理的芽长最长, 长于对照, 但差异不显著; FS 200 mg/L 处理的芽长最短, 短于对照, 差异显著。

HF 处理的小麦根长与铁素质量浓度呈现一定程度的负相关关系, HF 10 mg/L 处理根长最长, 显著长于对照; HF 200 mg/L 处理根长最短, 短于对照, 差异不显著。CI 处理根长随着铁素质量浓度的增加而降低, CI 10 mg/L 处理根长最长, 长于对照, 但差异不显著, 当质量浓度达到 200 mg/L 时出现显著的抑制现象。FS 处理的小麦根长随着铁素质量浓度的增加呈现先上升后下降的趋势, FS 50 mg/L 处理根长最长, 显著长于对照, FS 200 mg/L 处理根长最短, 显著短于对照。这个结果表明, 适宜低质量浓度的铁素处理有利于小麦芽与根的生长, 促进小麦幼苗生长发育, 高质量浓度铁素施入则会对小麦生长产生抑制作用。

2.2 不同类型和浓度铁素对水稻种子萌发的影响

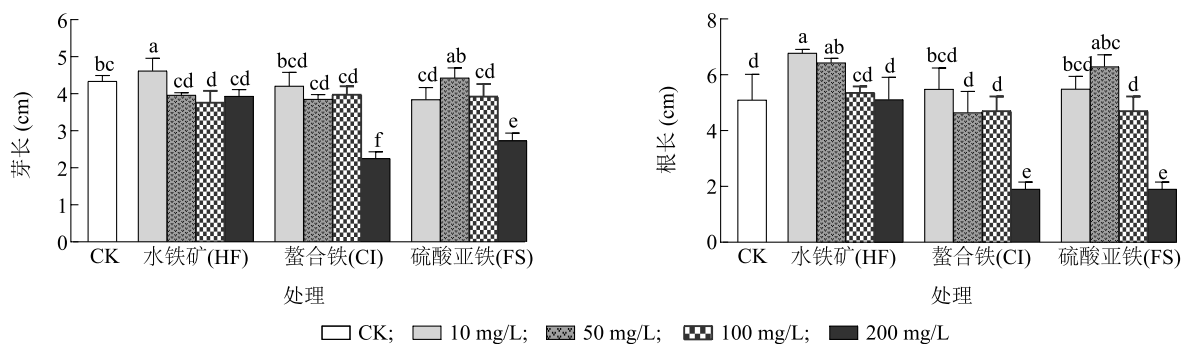
由图 3 可知, 各处理的水稻种子发芽率与对照相比差异均不显著, 施加铁素对水稻发芽率无显著促进



不同小写字母表示差异达到 0.05 显著水平。

图 1 不同类型铁素各质量浓度处理对小麦种子发芽率、发芽指数和活力指数的影响

Fig.1 Effects of different treatments on germination rate, germination index and vigor index of wheat seeds



不同小写字母表示差异达到 0.05 显著水平。

图 2 不同类型铁素各质量浓度处理对小麦种子芽长和根长的影响

Fig.2 Effects of different treatments on bud length and root length of wheat seeds

作用。3 种不同类型铁素处理相比较而言, HF 不同质量浓度处理与对照差异最小, 作用效果较为平稳。

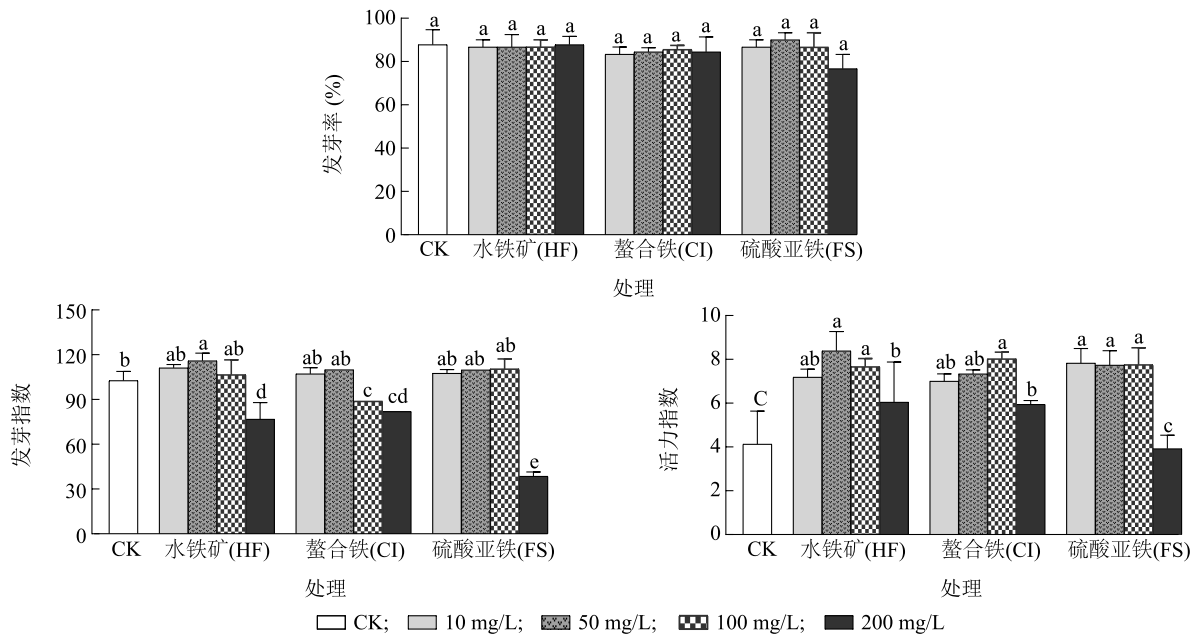
在铁素质量浓度为 10 mg/L 时, 3 种不同类型铁素处理的发芽指数均高于对照, 大小顺序为: HF>CI>FS。在质量浓度为 50 mg/L 时, HF 处理的发芽指数高于对照, 差异显著; CI 与 FS 处理的发芽指数高于对照, 差异不显著。在质量浓度为 100 mg/L 时, FS 处理的发芽指数高于对照, 差异不显著; CI 处理的发芽指数低于对照, 出现显著的抑制现象。在质量浓度为 200 mg/L 时, 3 种不同类型铁素处理的发芽指数均低

于对照且差异显著。不同类型铁素各质量浓度处理的发芽指数优异度表现为: HF 50 mg/L>HF 10 mg/L>HF 100 mg/L>CK> HF 200 mg/L, CI 50 mg/L>CI 10 mg/L>CK> CI 100 mg/L> CI 200 mg/L 和 FS 100 mg/L>FS 50 mg/L>FS 10 mg/L>CK> FS 200 mg/L。由此可以看出适宜低质量浓度的铁素处理可以提高水稻种子发芽指数, 而高质量浓度 (200 mg/L) 铁素处理时水稻的发芽指数下降, 影响种子萌发。

除 200 mg/L FS 处理的水稻种子活力指数低于对照外, 其他处理均显著高于对照。其中, 在铁素质

量浓度为 50 mg/L 时,水稻种子的活力指数大小顺序为:HF>FS>CI。不同类型铁素各质量浓度处理活力指数优异度表现为:HF 50 mg/L>HF 100 mg/L>HF 10 mg/L>HF 200 mg/L>CK、CI 100 mg/L>CI 50 mg/L>CI 10 mg/L>CI 200 mg/L>CK 和 FS 10 mg/L>FS 50 mg/L>FS 100 mg/L>CK>FS 200 mg/L。

由此可以看出,适宜质量浓度的 HF 处理可以提高水稻种子活力指数;不同铁素对于水稻种子活力指数的影响不同,50 mg/L (HF)、100 mg/L (CI)、10 mg/L (FS) 为各类型铁素促进水稻种子活力指数增加的最适质量浓度,在所有处理中 50 mg/L HF 处理促进效果最好。



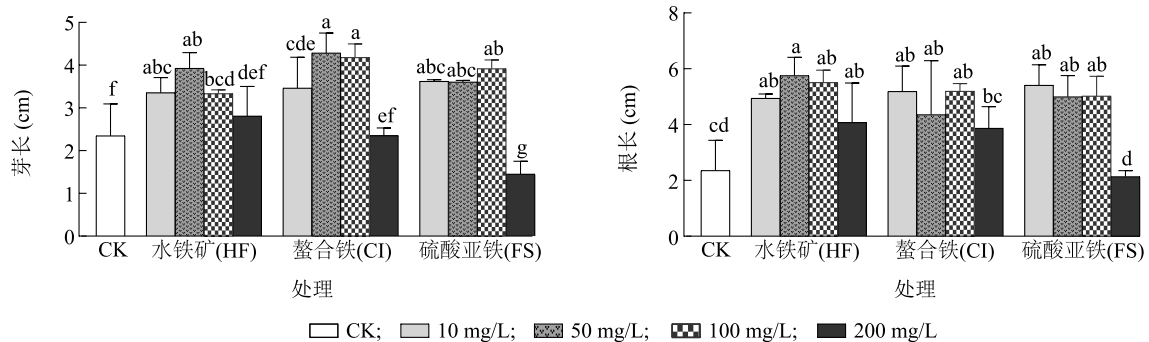
不同小写字母表示差异达到 0.05 显著水平。

图 3 不同类型铁素各质量浓度处理对水稻种子发芽率、发芽指数和活力指数的影响

Fig.3 Effects of different treatments on germination rate, germination index and vigor index of rice seeds

由图 4 可知, HF、CI、FS 3 种铁素处理的水稻芽长均随铁素质量浓度的增加呈先上升后下降的趋势。HF 铁素质量浓度为 10 mg/L、50 mg/L 时对水稻种子芽长的促进效果显著, 当质量浓度超过 50 mg/L 时, 芽长开始有所下降, 但未出现抑制现象。

CI 和 FS 除质量浓度为 200 mg/L 时对水稻芽长产生抑制现象外, 其他处理均对水稻芽长有显著的促进作用, CI (50 mg/L) 和 FS (100 mg/L) 处理芽长增加效果最明显。



不同小写字母表示差异达到 0.05 显著水平。

图 4 不同类型铁素各质量浓度处理对水稻种子芽长和根长的影响

Fig.4 Effects of different treatments on bud length and root length of rice seeds

HF、CI、FS 3 种铁素各质量浓度处理均未对水稻根长产生显著的抑制作用。其中 HF 各质量浓度处理均显著促进水稻根长增加,质量浓度为 50 mg/L 时效果最好,较对照根长增加了近 2 倍;CI 处理中质量浓度为 10 mg/L 时促进效果最明显;FS 处理的水稻根长与质量浓度的增加呈一定程度的负相关关系,当质量浓度为 200 mg/L 时水稻根长相对于对照有所降低,但无显著差异。

以上结果表明,与对照相比,适宜低质量浓度的铁素处理有利于水稻芽与根的生长,可促进水稻幼苗生长发育。与铁素对小麦芽长的影响不同的是:高质量浓度 HF、CI 铁素施入不会对水稻芽长产生明显的抑制作用,而高质量浓度 FS 处理则会对水稻芽长产生抑制作用。各处理中对水稻根长及芽长生长促进效果最佳的为 50 mg/L HF 处理。

3 讨论

本研究结果表明,低质量浓度水铁矿对小麦和水稻种子萌发具有良好的促进作用。由于水铁矿本身为三价铁的氧化物,克服了螯合铁和硫酸亚铁在应用时会氧化的问题,因此具有在农业生产实践中应用的潜力。

种子萌发期是植物生活史中对盐胁迫十分敏感的时期,植物能否在盐碱环境中生存,首先取决于它能否发芽、发芽率的高低以及发芽速度^[17]。发芽率是衡量种子在铁素浸种条件下萌发能力的重要指标。李威等研究结果表明,3 种铁素絮凝剂处理的小麦种子发芽率与其浓度呈负相关关系^[18]。周建荣研究发现,不同浓度的 EDTA-Fe 存在时种子发芽均受到明显的抑制,随着 EDTA-Fe 浓度的增大,抑制作用呈现由强变弱的趋势^[19]。本研究发现,与对照相比,HF (10 mg/L、50 mg/L、100 mg/L) 和 FS (50 mg/L) 处理可显著提高小麦种子发芽率;与小麦不同的是,3 种铁素对水稻种子发芽率无显著影响。

活力指数是种子发芽速率与生长量的综合反映,能够反映种子是否发芽和发芽是否整齐。在一定盐浓度范围内,种子可以萌发但生长会受到抑制,导致种子活力指数降低^[20]。发芽指数是反应种子品质好坏的一个重要参数。适宜浓度的铁氧化物可以显著提高柞树种子活力指数,促进柞树种子萌发^[21]。Lixia 等研究结果表明,夏枯草种子在 NaCl+

Na₂CO₃与 Na₂SO₄混合盐胁迫条件下,发芽指数随着盐浓度的升高而降低^[22]。本研究结果表明,HF、CI 和 FS 3 种铁素在低浓度时均显著地提高了小麦的发芽指数与活力指数,在高浓度时降低了小麦的活力指数和发芽指数。不同铁素对于水稻种子活力指数的影响不同,HF 和 CI 在低、中质量浓度时对水稻种子萌发的促进作用相比于 FS 更加明显,高质量浓度的 CI、FS 处理对于水稻种子发芽指数产生了显著的抑制作用,这可能是因为过量供给的游离铁使作物体内自由基生产过剩而引起水稻铁中毒^[23],但高质量浓度的 HF 处理对于水稻发芽指数和活力指数没有产生显著的抑制作用,这表明 HF 处理相比于 CI 和 FS 处理,其安全性更高。

根长和芽长受生长基质的影响很大,因此根长和芽长常作为一个较为敏感的种子萌发指标^[24]。陈增明等研究发现,FS、EDTA-Fe 和氨基酸螯合铁,在低浓度时可以促进小麦幼苗根和芽的生长,而高浓度时则抑制小麦幼苗根和芽的生长^[25]。本研究结果表明,HF、CI 和 FS 3 种铁素在低质量浓度时显著地促进小麦和水稻芽和根的生长,高质量浓度时抑制小麦、水稻芽和根的生长,其原因可能是高质量浓度的铁素溶液渗透压高于水稻、小麦种子,导致水稻、小麦种子中自由水含量降低,其自身的养分代谢受到抑制。

4 结论

低(10 mg/L)、中(50 mg/L)质量浓度的 HF、CI、FS 对小麦和水稻种子萌发起到促进作用,综合表现优劣顺序为:HF>CI>FS。高浓度(200 mg/L)的 CI 和 FS 处理会对小麦、水稻种子萌发产生抑制作用。总体来看,HF 对小麦和水稻种子萌发的促进作用优于 CI 和 FS,有矫正作物缺铁和促进作物生长的潜力。

参考文献:

- [1] KOBAYASHI T, NISHIZAWA N K. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2012, 63(1):131-152.
- [2] ZUO Y, REN L, ZHANG F, et al. Bicarbonate concentration as affected by soil water content controls iron nutrition of peanut plants in a calcareous soil[J]. Plant Physiology & Biochemistry, 2007, 45(5):357-364.
- [3] 汪李平. 植物的铁素营养及缺铁症的防治[J]. 安徽农业大学

- 学报,1995,32(1):17-22.
- [4] FORTIN D, LANGLEY S. Formation and occurrence of biogenic iron-rich minerals[J]. *Earth Science Reviews*, 2005, 72(1/2):1-19.
- [5] LI W, JOSHI S R, HOU G, et al. Characterizing phosphorus speciation of chesapeake bay sediments using chemical extraction, ^{31}P NMR, and X-ray absorption fine structure spectroscopy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(1):203-211.
- [6] BRAND-KLIBANSKI S, LITAOR M I, SHENKER M. Overestimation of phosphorus adsorption capacity in reduced soils: An artifact of typical batch adsorption experiments[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(4):1128-1136.
- [7] KOBAYASHI T, NISHIZAWA N K. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants[J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2012, 63(1):131-152.
- [8] MA C, TANABE K, ITAI A, et al. Iron deficiency induced changes in chlorophyll and ferric reductase activity Asian pear rootstocks (*Pyrus* spp.) with hydroponics[J]. *Environmental Control in Biology*, 2005, 43(3):173-180.
- [9] ALIDOUST D, ISODA A. Effect of $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles on photosynthetic characteristic of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]: Foliar spray versus soil amendment[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35(12):3365-3375.
- [10] PARIONA N, MARTINE A I. Effect of magnetite nanoparticles on the germination and early growth of *Quercus macdougalii*[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 575:869-875.
- [11] 古芸,郑赛,曲峰龙,等.水铁矿对玉米生长及其抗氧化系统的影响[J].*南京农业大学学报*,2018,41(5):860-866.
- [12] 郑枫蔚,马垚.生物铁肥的研究进展与展望[J].*现代农业科技*,2018(13):187-190.
- [13] 高树仁.植物的铁营养及其遗传改良的研究进展[J].*杂粮作物*,2006(5):351-352.
- [14] LI Y, WANG T, MENG Y, et al. Air atmospheric dielectric barrier discharge plasma induced germination and growth enhancement of wheat seed[J]. *Plasma Chemistry & Plasma Processing*, 2017, 37(6):1-14.
- [15] PARK Y, OH K S, OH J, et al. The biological effects of surface dielectric barrier discharge on seed germination and plant growth with barley[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2018, 15(2):41-48.
- [16] 陈增明,王彬彬,聂俊华,等.氨基酸螯合铁与 FeSO_4 、EDTA-Fe 对小麦发芽影响的对比研究[J].*土壤通报*,2011(2):443-447.
- [17] FORTIN D, LANGLEY S. Formation and occurrence of biogenic iron-rich minerals[J]. *Earth Science Reviews*, 2005, 72(1/2):1-19.
- [18] 李威,周启星.铁盐絮凝剂与金属镉对小麦种子发芽与根伸长的毒性效应[J].*农业环境科学学报*,2008,27(2):420-424.
- [19] 周建荣.干旱和铁盐胁迫对油松种子萌发影响[J].*内蒙古农业大学学报*,2010,31(4):294-296.
- [20] LU Y M. Effects of different salt stress on seed germination and seedling growth of *Trifolium repens*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(4):123-129.
- [21] PARIONA N. Effect of magnetite nanoparticles on the germination and early growth of *Quercus macdougalii*[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 575:869-875.
- [22] LIXIA Z, QINGSHAN C, XIAOGAI H, et al. Effects of sodium salt stress on seed germination of *Prunella vulgaris*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(3):177-186.
- [23] WU L B, UEDA Y, LAI S K, et al. Shoot tolerance mechanisms to iron toxicity in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Plant Cell & Environment*, 2016, 40(4):570-584.
- [24] 孙菊,杨允菲.盐胁迫对赖草种子萌发及其胚生长的影响[J].*四川草原*,2006(3):17-20.
- [25] 陈增明,王谦,王彬彬,等.三种铁素对小麦幼芽的生长及生理生化特征的影响[J].*华北农学报*,2009,24(12):159-162.

(责任编辑:张震林)