

硫酸亚铁诱导根表铁膜形成对水稻吸收和转运铜锌的影响

吴明胤, 陶祥运, 李磊明, 刘小红*, 司友斌*

(安徽农业大学资源与环境学院, 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 合肥 230036)

摘要: 通过水培条件下添加硫酸亚铁诱导水稻根表铁膜的形成, 利用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠 (DCB) 溶液对根表铁膜进行提取后测定, 采用扫描电镜-能谱仪 (SEM-EDS) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 等手段对硫酸亚铁诱导产生的根表铁膜进行表征, 并分析根表铁膜对水稻吸收铜锌的影响。结果表明, 添加硫酸亚铁可以诱导根表铁膜在水稻根系表面产生, 未处理的水稻根表 Fe 含量为 $731 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Fe}^{2+}$ 处理下水稻根表 Fe 含量为 $53\,562 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; SEM-EDS 和 XRD 分析发现大量颗粒状含铁化合物附着于水稻根表。与未经硫酸亚铁处理相比, 有根表铁膜水稻的铁膜中, 其 Cu 含量最高增加 73.16%, Zn 含量最高增加 112.10%; 水稻根系 Cu 含量最高降低 31.15%, Zn 含量最高降低 13.02%; 水稻茎叶 Cu 含量最高降低 19.50%, Zn 含量最高降低 25.56%。土壤添加硫酸亚铁可以显著降低水稻对 Cu 和 Zn 的吸收与积累。

关键词: 硫酸亚铁; 水稻; 根表铁膜; 铜; 锌

中图分类号: S158.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2018)04-0650-07

Effects of ferrous sulfate induced iron plaque formation on root uptake and transport of copper and zinc in rice

WU Mingyin, TAO Xiangyun, LI Leiming, LIU Xiaohong, SI Youbin

(Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention,

School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: The iron plaque of rice root was induced by adding ferrous sulfate under the condition of hydroponics. The iron plaque of root surface was extracted by the dithionite-citrate-bicarbonate (DCB) solution. Afterwards, the iron plaque induced with ferrous sulfate was characterized by scanning electron microscopy (SEM) equipped with an energy dispersive spectrometer (EDS) and X-ray diffraction. And the effect of iron plaque on the absorption of copper and zinc in rice was studied. The results showed that the addition of ferrous sulfate could induce the formation of root iron plaque on the surface of rice roots. The Fe content in the surface of rice root without treatment and treated with $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ of Fe^{2+} was 731 and $53\,562 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The analyses of SEM-EDS and X-ray diffraction found a large number of granular iron-containing compounds attached to the rice root surface. Compared with no ferrous sulfate treatment, the the maximum increment of Cu and Zn contents could reach up to 73.16% and 112.10% in the iron plaque of rice root, correspondingly, whereas the highest reduction of Cu and Zn contents in the stem and leaf could reach up to 31.15%, 19.50% and 13.02%, 25.56%, respectively. The addition of ferrous sulfate could significantly reduce the uptake and accumulation of Cu and Zn in rice.

Key words: ferrous sulfate; rice (*Oryza sativa*); iron plaque; cooper; zinc

铜 (Cu) 和锌 (Zn) 是植物生长过程中必不可少的一类微量元素, 但是过量的铜和锌会对植物生长造成毒害, 人体中摄入过量的铜锌会对肝和胆造成严重负担。农田土壤中过高浓度的铜和锌会对作

物生长造成诸多不利影响, 并且会通过食物链途径影响人体健康^[1]。我国农田大量施用畜禽粪便有机肥, 由于畜禽粪便 Cu、Zn 等重金属含量超标, 会增加土壤中 Cu、Zn 的含量, 这是我国农田重金属

收稿日期: 2018-01-09

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2015BAD05B04-02)和国家重点研发计划课题 (2017YFD0801102) 共同资助。

作者简介: 吴明胤, 硕士研究生。E-mail: 993386809@qq.com

* 通信作者: 刘小红, 讲师。E-mail: liuxiaohong@ahau.edu.cn; 司友斌, 博士, 教授。E-mail: youbinsi@ahau.edu.cn

重要污染源之一^[2-3]。在 2014 年公布的全国土壤污染调查公报显示,铜和锌的污染点位超标率达到了 2.1% 和 0.9%,说明当前土壤铜和锌的污染情况较为严重。

水稻是我国重要的粮食作物之一,我国水稻的产量占全国粮食作物产量的一半以上,国人年平均消费大米近 100 kg。水稻由于长期生长于淹水环境,其根表面会自然生成铁氧化物胶膜(以下称铁膜)。当前认为铁膜产生的主要原因是水稻根系分泌的氧气和氧化性物质会氧化厌氧土壤中的二价铁离子,并使其沉积在水稻根表及其质外体形成铁膜^[4]。影响水稻根表铁膜形成的主要因素有:土壤环境中 Fe^{2+} 离子浓度,根系分泌的氧气和氧化性物质总量以及由此形成的微氧化环境、土壤中无机碳、可溶性盐、土壤有机质、阳离子交换量、碳酸盐含量、Eh 值、pH 值、淹水时间长短、温度和生长季节等^[5-8]。根表铁膜属于两性胶体,因此对于土壤中阴、阳离子都有一定程度的吸附作用。已有研究证实,水稻根表铁膜会影响水稻对多种元素的吸收与转运。水稻根表铁膜会阻碍水稻对镉(Cd)的吸收和转运,有铁膜的水稻对 Cd 的吸收明显低于没有铁膜的水稻^[9]。在赤泥条件下,水稻根表铁膜和根际铁膜厚度增加的同时也增加了对镉的吸附能力,减少了镉从地下到地上部分的转运^[10]。已有的研究表明,水稻根表铁膜对砷(As)具有很强的吸附性,水稻 As 主要会分布于根表铁膜中,铁膜会减少 As 从根系向上部运输,且铁膜对 As 的吸附能力与铁膜数量呈正比^[11]。Hu 等^[12]研究表明水稻根表铁膜会减少水稻吸收和转运铬(Cr)。

近年来,对于根表铁膜影响水稻吸收重金属的研究,大多集中于根表铁膜对 As 和 Cd 这两种元素的影响,并且多数研究根表铁膜在单一元素胁迫下对水稻吸收和转运重金属的影响,对于其他重金属元素研究较少。作者主要通过水培条件培养根表铁膜,研究 Zn、Cu 单一污染和复合胁迫下对水稻吸收和转运重金属的影响,并通过土壤盆栽试验进行验证,以期为农田重金属污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 水培试验

试验所用的水稻品种为淮稻 11 号,取自安徽农业大学农学院。挑选出颗粒饱满的水稻种子,用 30% 的 H_2O_2 溶液消毒 20 min,超纯水洗净后再用饱和 CaSO_4 溶液浸泡 6 h,最后在湿润滤纸上催芽。人工培养箱(无光照,30℃)萌发 5 d 后,挑选生长一致

的幼苗移入 1 L PVC 盆中,每盆种植 1 株水稻苗,每 3 d 更换一次营养液,培养 7 周。营养液配方^[13]: $0.091 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{KNO}_3$, $0.183 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $0.274 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{KH}_2\text{PO}_4$, $0.183 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$, $3 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{H}_3\text{BO}_3$, $3 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} (\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $3 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0.2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $0.06 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{Fe}(\text{II})\text{-EDDHA}$ 。用 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{KOH}$ 或 HCl 将 pH 调至 5.5。

培养 7 周后,挑选部分生长一致的水稻幼苗,分别供应含有 20、50 和 $80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{Fe}^{2+}(\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O})$ 的营养液,此时营养液中不再供应 Fe(II)-EDDHA 和 P。水稻生长 3 d 后,此时水稻根表已形成明显的红棕色铁膜,取出水稻待下一步检测。

选择 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{Fe}^{2+}$ 条件下有铁膜的水稻和无 Fe 培养下无铁膜的水稻。配置 Cu 和 Zn 复合胁迫营养液,分别以 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的形式向正常营养液加入 Cu (0、10、30 和 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 Zn (0、50、100 和 $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 共 12 个处理,即 Zn50Cu10、Zn50Cu30、Zn50Cu50、Zn100Cu10、Zn100Cu30、Zn100Cu50、Zn150Cu10、Zn150Cu30 和 Zn150Cu50。每个处理重复 3 次,共 72 盆。在重金属胁迫营养液中培养水稻 3 d 后,取出待下一步检测。

1.2 根表铁膜测定

先将水稻根系用自来水冲洗,后用去离子水洗净,用滤纸吸干水分后从基部将其剪下,取其一小部分进行冷冻烘干,用扫描电镜-能谱仪(SEM-EDS,日立 S-4800 型)和 X 射线衍射仪(XRD,法国 ARL EQUINOX 100 型)进行观察分析。剩余部分利用 DCB(dithionite-citrate-bicarbonate)溶液对水稻根表铁膜进行浸提,具体方法如下^[13]:将洗净的水稻根放入 50 mL 的烧杯中,置入 $0.03 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸三钠($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)和 $0.125 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠(NaHCO_3) 30 mL 的混合溶液中 10 min,后放入 1 g 保险粉,混合均匀后,在室温下(20~25℃)继续浸泡 1 h,然后将浸提液转入 100 mL 容量瓶中,并用去离子水冲洗根系 3 次后定容至 100 mL。浸提液过滤后用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES,美国 Thermo Fisher, iCAP 6300 Series 型号)测定其中的 Fe、Zn 和 Cu 浓度。将浸提后的水稻根系放入烘箱内,在 75℃ 下烘干至恒重,称量根的干重。采用 $\text{HNO}_3\text{-HCl}$ 消解法对样品进行消解,用 ICP-AES 测定 Fe、Zn 和 Cu 的含量。

1.3 土培试验

每盆装土 15 kg, 移栽水稻 6 株, 试验设 3 个处理: 空白对照 (CK), 即不施硫酸亚铁; 0.25%硫酸亚铁 (C1), 即硫酸亚铁与土的质量比为 0.25%; 0.5%硫酸亚铁 (C2), 即硫酸亚铁与土的质量比为 0.5%。每个处理重复 3 次, 共 9 盆。硫酸亚铁于 6 月 10 日以基肥施加盆中。水稻成熟后, 将其根、茎叶以

及籽粒分开收获, 用去离子水洗净, 在干燥箱中 105 °C 杀青 15 min, 75 °C 烘干至恒重, 称重。将样品置于聚乙烯消解管中, 植株重金属全量用 HNO₃-HCl 消煮, 消煮完毕后用去离子水定容至 25 mL, 过滤后用 ICP-AES 测定其中的 Fe、Zn 和 Cu 含量。

供试土壤理化性质按常规分析方法^[14]测得, 结果见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soil used in this research

项目 Item	有机质/g·kg ⁻¹ Organic matter	全氮/g·kg ⁻¹ Total nitrogen	速效钾/mg·kg ⁻¹ Available potassium	有效磷/mg·kg ⁻¹ Olsen-P	pH	全铜/mg·kg ⁻¹ Total copper	全锌/mg·kg ⁻¹ Total zinc
数值 Value	23.3	0.127	75.19	10.09	7.04	43.74	391.82

1.4 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel、Origin8.5 和 MDI Jade5.0 进行数据处理分析。数据显著性分析由 SPSS 22.0 统计软件完成。

2 结果与分析

2.1 根表铁膜形成及其表征

由图 1 可知, 水稻在 Fe²⁺ 诱导下可以在根系表面产生肉眼可见的红棕色物质。根系表面扫描电镜和能谱 (SEM-EDS) 分析显示, 水稻根系经过 50 mg·L⁻¹ Cu 和 150 mg·L⁻¹ Zn 处理后, 在水稻根系表面会同时存在 Fe、Cu 和 Zn, 表明水稻根表铁膜对 Cu 和 Zn 具有很强的吸附能力。并且通过 SEM 图片可以看出, 80 mg·L⁻¹ Fe²⁺ 处理下的水稻根系表面

会有明显的一层表面包裹物质。EDS 显示在 20 mg·L⁻¹ Fe²⁺ 处理的水稻根系中 Cu、Zn 和 Fe 分别占所扫描元素质量的 0.24%、2.02% 和 9.67%。由图 2 可知, 水稻根表铁膜的含量 (按 mg Fe·kg⁻¹ 根干重表示) 会随着培养液中 Fe²⁺ 浓度的增加而增加。水稻根表铁膜的 XRD 分析 (图 3) 显示, 水稻根表铁膜是由针铁矿、纤铁矿、磁铁矿和赤铁矿组成。由图 3 可知, 随着环境中 Fe 含量的增加, 水稻根表铁膜的针铁矿 (21.199° 和 26.311°)、纤铁矿 (27.08°)、磁铁矿 (21.166° 和 30.116°) 和赤铁矿 (24.136°) 的峰高会上升。已有研究显示, 水稻根表铁膜不同培养条件下成分不同, 但是针铁矿和水铁矿是众多研究者都发现的主要成分^[15-16]。

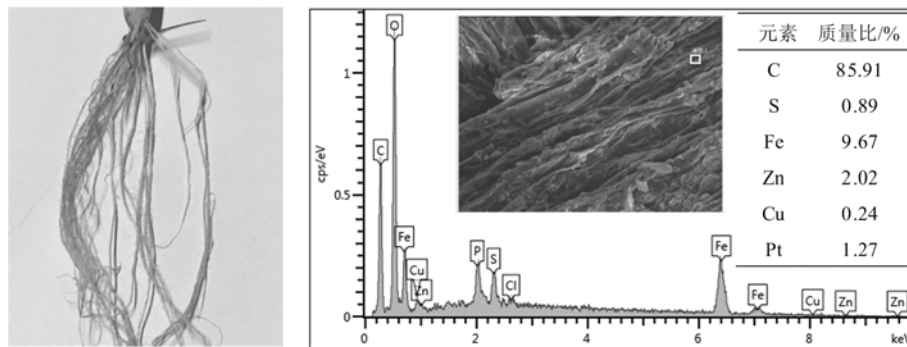


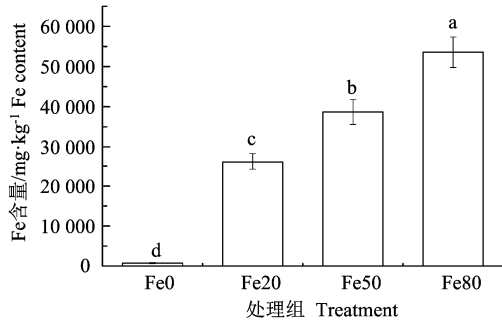
图 1 水稻根表铁膜照片和扫描电镜-能谱图

Figure 1 Iron plaque on rice root and scanning electron microscope and energy spectrum

2.2 根表铁膜对 Cu 和 Zn 的吸附固定

铁膜对水稻根表固定吸附 Cu 和 Zn 的影响见图 4。有铁膜的水稻铁膜上吸附的 Cu 和 Zn 含量显著高于无铁膜的水稻, 说明培养铁膜的水稻根表面可以固定吸附大量的 Cu 和 Zn。随着营养液中 Cu 和 Zn 的含量增加, 水稻铁膜对 Cu 和 Zn 的吸附越来越

越高。在本试验条件下, 铁膜对 Cu 的吸附会随着 Zn 的增加而减少, 但是减少的程度并不显著, 说明 Zn 会影响铁膜对 Cu 的吸附, 但是影响效果有限。在有铁膜条件下, 铁膜对 Zn 的吸附会随着 Cu 的增加而减少, 在无铁膜条件下, 铁膜对 Zn 的吸附随着 Cu 的增加变化不显著, 说明在一定范围内,



不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different letters indicate significant differences between treatments at the 5% level

图 2 不同培养条件下水稻根表铁膜 Fe 含量

Figure 2 Fe content in rice root iron plaque under different culture conditions

Cu 对铁膜吸附 Zn 的影响不大, 基本维持在一个稳定的水平。有铁膜水稻在铜锌交互作用下, 根表铁膜对 Cu 的吸附会随 Zn 含量增加而减少; 根表铁膜对 Zn 的吸附会随 Cu 含量增加而减少。无铁膜水稻在铜锌交互作用下, 根表铁膜对 Cu 吸附会随 Zn 含量的增加而减少; 根表铁膜对 Zn 吸附随 Cu 含量的

增加而变化不大。

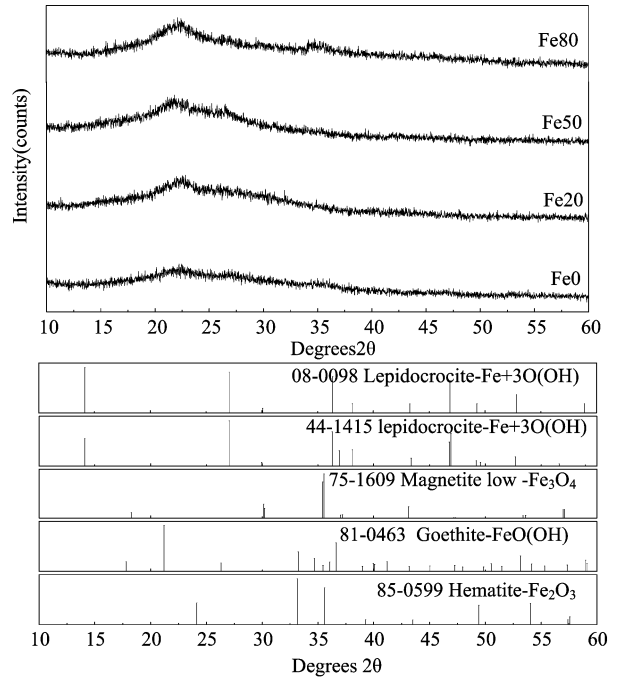


图 3 水稻根表铁膜 XRD 分析

Figure 3 XRD analysis of iron plaque on rice root surface

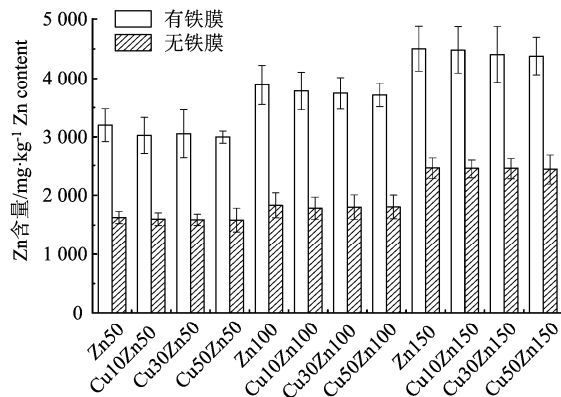
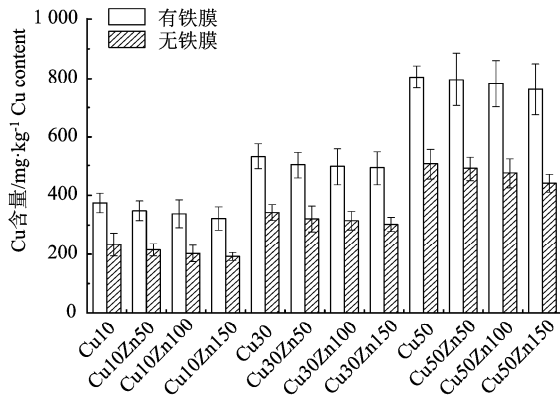


图 4 水稻根表铁膜对 Cu 和 Zn 的吸附

Figure 4 Adsorption of Cu and Zn on iron plaque in rice root

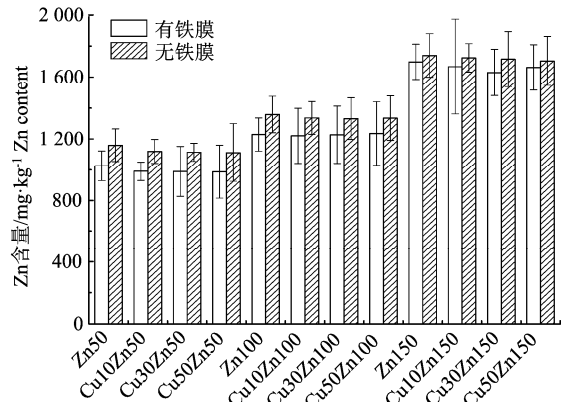
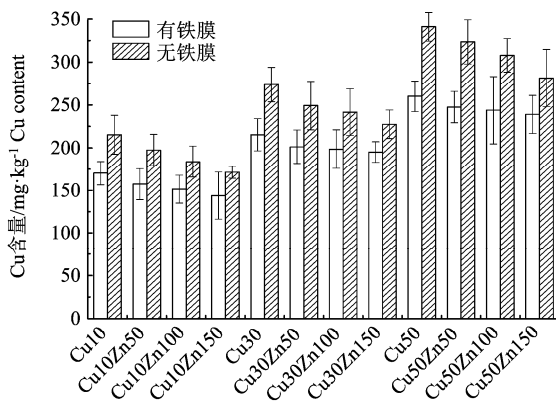


图 5 铁膜对水稻根系吸收 Cu 和 Zn 量的影响

Figure 5 Effect of iron plaque on the accumulation of Cu and Zn absorbed by rice roots

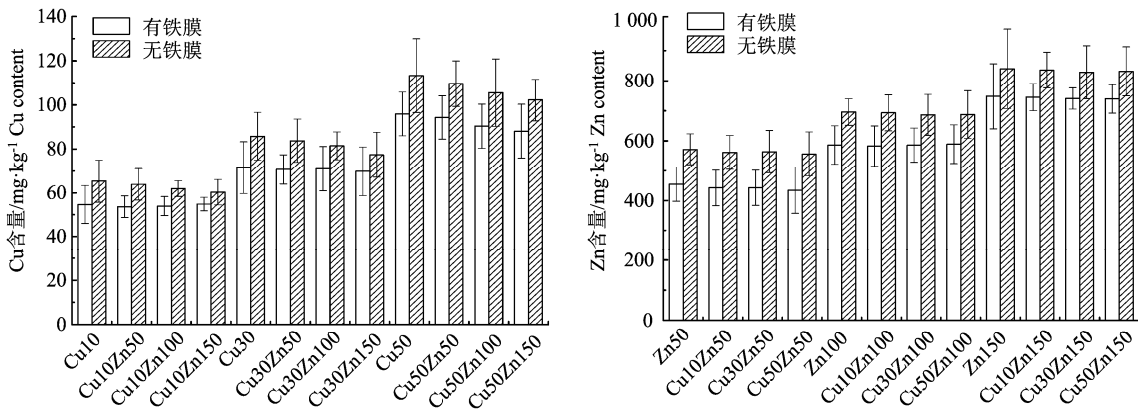


图 6 铁膜对水稻茎叶 Cu 和 Zn 累积量的影响

Figure 6 Effect of iron plaque on the accumulation of Cu and Zn in stem and leaf of rice

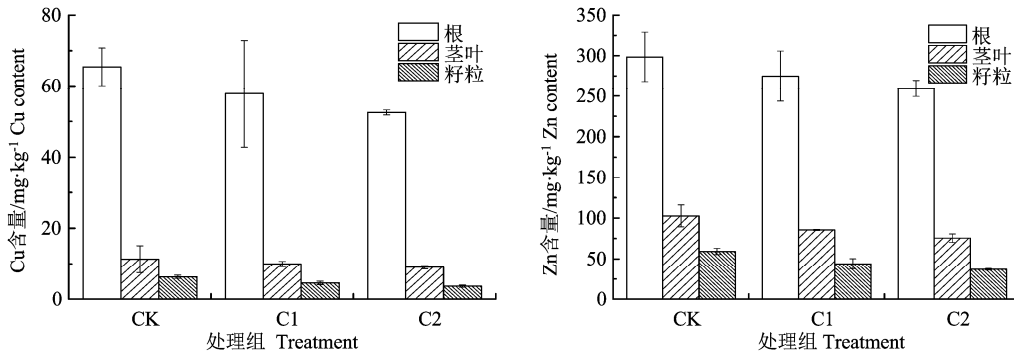


图 7 水稻各组织 Cu 和 Zn 的积累量

Figure 7 The accumulation of Cu and Zn in rice tissues

2.3 铁膜对水稻根系吸收 Cu 和 Zn 的影响

铁膜对水稻根系吸收 Cu 和 Zn 影响见图 5。有铁膜的水稻根系对 Cu 和 Zn 的吸收会显著低于无铁膜的水稻根系。由此可见铁膜可以显著降低水稻根系对 Cu 和 Zn 的吸收。单一 Cu 胁迫下，随着 Cu 含量增加，铁膜会增加对水稻根系降低吸收 Cu 的影响。在单一 Zn 胁迫下，随着 Zn 含量的增加，铁膜会减小对水稻根系降低吸收 Zn 的影响。在 Cu 和 Zn 交互作用下，有铁膜的水稻根系对 Cu 的吸收会随着 Zn 含量的增加有一个显著的降低过程，随着 Zn 含量增加，有铁膜的水稻根系对 Cu 的吸收会有所降低；无铁膜的水稻根系对 Cu 的吸收会随着 Zn 含量的增加有所降低，无铁膜水稻的降低效果比有铁膜的水稻要低。水稻根系对 Zn 的吸收随着 Cu 含量增加而降低但是降低程度很小，有铁膜和无铁膜的水稻根系对 Zn 吸收随 Cu 含量的增加变化不大，保持在一稳定水平。

2.4 铁膜对水稻茎叶累积 Cu 和 Zn 的影响

由图 6 可知，水稻上的铁膜可以显著降低水稻茎叶对 Cu 和 Zn 的累积。有铁膜的水稻随着 Zn 含量的增加，铁膜降低水稻茎叶对 Zn 累积的效果会

有所降低，这与铁膜对水稻根系的结果一致。在 Cu 和 Zn 交互作用下，有铁膜的水稻茎叶对 Cu 的累积会随着 Zn 含量的增加会有降低，并且会随着 Cu 含量的增加，降低作用越显著；无铁膜的水稻茎叶中，在 Cu10 和 Cu30 水平上，水稻茎叶中 Cu 含量基本保持在一定范围内，当 Cu 含量达到 50 mg·kg⁻¹ 时，水稻茎叶累积 Cu 会随着 Zn 的增加而有所降低。Cu 和 Zn 交互作用下，有无铁膜的水稻茎叶对 Zn 的累积，基本保持在一定范围内，随着 Cu 含量的增加，茎叶对 Zn 的累积并没有显著变化。

2.5 土壤施加硫酸亚铁对水稻各组织重金属含量影响

通过图 7 可以看出，与对照组相比，土壤中施加硫酸亚铁可以显著降低水稻根、茎叶和籽粒中 Cu 和 Zn 的积累量，且随着硫酸亚铁施加量的增加各组织 Cu 和 Zn 的积累量逐渐降低。其中 C2 处理组水稻籽粒中 Cu 和 Zn 的积累量最少，与对照组相比，分别降低了 41.9% 和 37.6%。

3 讨论与结论

根表铁膜可以显著减少水稻根、茎叶对 Zn 和

Cu 的吸收。有铁膜形成的根表中, 其 Zn、Cu 含量显著高于没有铁膜的根表, 表明根表铁膜吸附了大量的 Zn 和 Cu, 从而减少了水稻对 Zn 和 Cu 的吸收。Greipsson^[17]曾报道根表覆有铁膜的水稻对 Cu、Ni 和 Zn 毒性的忍受能力明显高于根表无铁膜的水稻, 氧化膜降低 Cu 毒害的原因可能是 Cu 在根皮层被 Fe 钝化。在水培条件下铁膜对于处于 Cu 胁迫的水稻具有明显的抵御效果^[18]。而随着 Zn 胁迫浓度的增加, 铁膜影响水稻吸收 Zn 的能力在减弱, 这之前研究认为植物根表铁膜对环境中阴、阳离子的吸附作用, 在很大程度上取决于铁膜的数量及外界环境条件相似。随着外界离子浓度的增加, 铁膜作为重金属的障碍层的能力会逐渐减弱, 甚至当超过阈值时, 会促进离子的吸收^[19-20]。

水稻根表由根表皮细胞组成, 细胞壁上则有养分通道, 故根表面兼有养分吸附和吸收的双重功能。根表铁膜较多时, 由于吸附在铁膜中的 Zn 要经过解吸和跨越铁膜等复杂过程才能到达根表, 因此铁膜会阻碍水稻吸收 Zn。通过 X 射线荧光显微断层图谱表明, 铁锰的氧化物及其水合物是根表铁膜的主要组成部分。铁膜属于两性胶体, 具有特殊的电学特性, 因此铁膜可以通过离子之间的氧化还原、吸附解吸、有机无机的络合等作用方式改变根际环境中重金属阴、阳离子的存在形态, 从而影响这些离子的生物有效性^[21-22]。铁膜对于植物减少或免受重金属毒害作用主要源于外在抗性机制和内在的耐受机制。外在抗性机制是指铁膜能吸收有毒元素或与之共沉淀, 将大量重金属滞留在根系表明; 而内在耐受机制是指大量的铁进入植株体内, 会与重金属竞争代谢敏感位点, 使重金属主要累积不在敏感部位, 从而增加耐性^[23]。

本研究条件下 Cu 和 Zn 的交互作用表现为, Zn 会降低水稻对 Cu 的吸收, 而 Cu 对 Zn 的影响较小。当前有关复合污染对植物产生影响具有不同的研究结论。如 Xu 和 Yu^[24]的研究表明, Zn 和 Cd 复合胁迫下对水稻植株金属含量的影响具有一定的交互作用, 但是不同的试验条件下, 结果也可能不尽相同。Huang 等^[23]研究发现, 当水稻处于 Se 和 Cd 复合条件下, 水稻对 Se 的吸收可以显著降低水稻对 Cd 的吸收。胡莹等^[13]研究 As、Pb 交互作用对水稻根表铁膜富集及根系吸收 As、Pb 的影响中发现, 添加 As 显著地促进了 Pb 由铁膜向根系中转运, 但是添加 Pb 对 As 在铁膜和根系中的转运影响不大。Yang 等^[25]对 Pb、Zn 复合污染下的湿地植物进行研究, 根表铁膜的存在可以显著降低湿地植物在

Pb、Zn 污染下对 Zn 的吸收, 并且 Pb、Zn 交互作用下, 在有铁膜条件下 Pb 可以提高湿地植物对 Zn 的吸收。金属复合污染, 尤其是 2 种及以上金属污染条件下, 各金属之间的交互作用很复杂, 这与水稻品种、复合污染金属的污染特性、污染程度和水稻生长环境等因素都有密切关系, 其交互作用机理仍待进一步深入研究。

土壤施加硫酸亚铁会降低水稻各组织对 Cu 和 Zn 的吸收。这是由于土壤施加硫酸亚铁后, 土壤中含有大量的铁离子, 且水稻长期生长于淹水环境, 根表易于生成铁膜, 阻止植物对 Cu 和 Zn 的吸收。此外, 铁膜形成的同时植物吸收大量 Fe, Fe 可与其他阳离子竞争吸收和运输的结合位点及在细胞中的代谢活性位点, 对植物吸收重金属 Cu、Zn 可能起到一定的拮抗作用, 这与一些研究结果相似^[26]。此外, 土壤施加硫酸亚铁可以诱导水稻根表铁膜的生成, 减少水稻对 Cu 和 Zn 吸收, 这些均与水培试验的研究结果一致。

综上所述, 水稻生长过程中, 添加硫酸亚铁可以诱导根表铁膜的产生, 且在一定添加比例范围内, 铁膜数量随环境中硫酸亚铁含量的增加而提高。根表铁氧化物膜属于两性胶体, 它既可以吸附阳离子, 又可以吸附阴离子, 因此, 水稻根表的铁膜能够聚集环境中重金属 Cu 和 Zn, 从而减少水稻对 Cu 和 Zn 的吸收。此外, 外源加硫酸亚铁诱导铁膜形成的过程中, 水稻对 Fe 的吸收也能抑制对 Cu 和 Zn 的吸收, 同时水稻组织中高浓度的 Fe 则能减轻有害元素对植株的伤害。

水稻根表铁膜的数量与环境中 Fe^{2+} 有密切关系, Fe^{2+} 浓度越高, 根表铁膜数量越多。根表铁膜吸附 Cu 和 Zn 的量与根表铁膜数量有显著正相关关系。

在单一 Cu、Zn 胁迫下, 水稻根表铁膜会减少水稻茎叶及根部对 Cu 和 Zn 的吸收及转运。在 Cu 和 Zn 复合胁迫下, 水稻根表铁膜同样会减少水稻茎叶及根部对 Cu 和 Zn 的吸收及转运。

在 Cu-Zn 交互作用下, 随着 Zn 浓度的增加会显著降低 Cu 进入水稻茎叶。而 Cu 浓度的增加对 Zn 影响较小。土壤施加硫酸亚铁, 可以降低水稻对 Cu 的吸收, 也可以在一定程度内降低水稻对 Zn 的吸收。

参考文献:

- [1] 刘晓宇, 梁琼, 高如泰, 等. 长期污灌条件下农田土壤重金属污染环境风险评价[J]. 生态与农村环境学报,

- 2015, 31(4): 572-578.
- [2] 高军侠, 党宏斌, 姜灵彦, 等. 矿区周围农田土壤重金属铜锌铅污染及生物效应分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(26): 137-141.
- [3] 许浩, 韩丽媛, 茹淑华, 等. 不同有机肥中 Cu、Zn 在农田土壤中的有效性与形态归趋[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 998-1009.
- [4] 杨旭健, 傅友强, 沈宏, 等. 水稻根表铁膜及其形成的形态、生理及分子机理综述[J]. 生态学杂志, 2014, 33(8): 2235-2244.
- [5] SIQUEIRA-SILVA A I, DA SILVA L C, AZEVEDO A A, et al. Iron plaque formation and morphoanatomy of roots from species of restinga subjected to excess iron[J]. Ecotox Environ Safe, 2012, 78(2): 265-275.
- [6] ZHOU X B, SHI W M, ZHANG L H. Iron plaque outside roots affects selenite uptake by rice seedlings (*Oryza sativa*, L.) grown in solution culture[J]. Plant Soil, 2007, 290(1/2): 17-28.
- [7] 刘文菊, 尹君, 李习平, 等. 根表铁膜对水稻吸收污灌土壤中的锌的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(4): 270-272.
- [8] 刘侯俊, 张俊伶, 韩晓日, 等. 根表铁膜对元素吸收的效应及其影响因素[J]. 土壤, 2009, 41(3): 335-343.
- [9] LIU H J, ZHANG J L, CHRISTIE P, et al. Influence of iron plaque on uptake and accumulation of cd by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in soil [J]. Sci Total Environ, 2008, 394(2/3): 361-368.
- [10] 杨俊兴, 郭庆军, 郑国砥, 等. 赤泥条件下水稻根际铁膜形成及镉吸收机理研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(4): 698-704.
- [11] LIU W J, ZHU Y G, SMITH F A, et al. Do phosphorus nutrition and iron plaque alter arsenate (As) uptake by rice seedlings in hydroponic culture?[J]. New Phytol, 2004, 162(2): 481-488.
- [12] HU Y, HUANG Y Z, LIU Y X. Influence of iron plaque on chromium accumulation and translocation in three rice (*Oryza sativa* L.) cultivars grown in solution culture[J]. Chem Ecol, 2014, 30(1): 29-38.
- [13] 胡莹, 段桂兰, 刘云霞, 等. 砷-铅交互作用对水稻根表铁膜富集及根系吸收砷铅的影响[J]. 环境化学, 2012, 31(12): 1968-1973.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] FROMMER J, VOEGELIN A, DITTMAR J, et al. Biogeochemical processes and arsenic enrichment around rice roots in paddy soil: results from micro-focused X-ray spectroscopy[J]. Eur J Soil Sci, 2011, 62(2): 305-317.
- [16] LIU W J, ZHU Y G, HU Y, et al. Arsenic sequestration in iron plaque, its accumulation and speciation in mature rice plants (*Oryza Sativa* L.)[J]. Environ Sci Technol, 2006, 40(18): 5730-5736.
- [17] GREIPSSON S. Effect of iron plaque on roots of rice on growth of plants in excess zinc and accumulation of phosphorus in plants in excess copper or nickel[J]. J Plant Nutr, 1995, 18(8): 1659-1665.
- [18] 余林, 辛亮, 曲东. 根际铁膜对铜胁迫下水稻叶片叶绿素及 MDA 质量摩尔浓度的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(10): 54-58.
- [19] 刘文菊, 尹君, 李习平, 等. 根表铁膜对水稻吸收污灌土壤中的锌的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(4): 270-272.
- [20] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 根表铁膜对水稻铅吸收转运的影响[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(1): 35-41.
- [21] HUANG Q Q, YU Y, WANG Q, et al. Uptake kinetics and translocation of selenite and selenate as affected by iron plaque on root surfaces of rice seedlings[J]. Planta, 2015, 241(4): 907-916.
- [22] 刘侯俊, 李雪平, 韩晓日, 等. 镉处理根表铁膜对水稻吸收镉、锰、铜、锌的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1356-1365.
- [23] HUANG Q Q, WANG Q, LUO Z, et al. Effects of root iron plaque on selenite and selenate dynamics in rhizosphere and uptake by rice (*Oryzasativa*) [J]. Plant Soil, 2015, 388(1/2): 255-266.
- [24] XU B, YU S. Root iron plaque formation and characteristics under N₂ flushing and its effects on translocation of Zn and Cd in paddy rice seedlings (*Oryza sativa*) [J]. Ann Bot-London, 2013, 111(6): 1189-1195.
- [25] YANG J X, MA Z L, YE Z H, et al. Heavy metal (Pb, Zn) uptake and chemical changes in rhizosphere soils of four wetland plants with different radial oxygen loss[J]. J Environ Sci-China, 2010, 22(5): 696-702.
- [26] 于志红, 周莉, 沈跃, 等. 铜污染棕壤中 6 种钝化材料对小油菜吸收铜的影响[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 239-244.