

缺 Fe 预处理对 Fe、Cd 根际吸附与水稻吸收和转运的影响

刘丹青^{1,2}, 陈雪¹, 葛滢^{1,3*}

(1.南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2.上海市环境监测中心, 上海 200030; 3.中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

摘要:采用蛭石-营养液联合培养试验,测定并比较了缺 Fe 预处理和正常 Fe 营养供应下水稻根际 pH 值、Eh、根际蛭石和根表吸附的 Fe、Cd 数量,及根系分泌的低分子量有机酸(LMWOAs)种类与数量,探讨了缺 Fe 预处理下的根际性状和 LMWOAs 对根际 Fe、Cd 吸附与水稻吸收转运的影响。结果表明,缺 Fe 预处理后水稻根际酸度增加,根际还原性增强,稻根分泌的低分子量有机酸降低;根际蛭石表面吸附的 Fe 变化不大,而稻根表面吸附沉积的 Fe 减少,根际蛭石非结晶态 Cd 含量增加,根表 Fe 膜中的 Cd 含量升高但不显著,水稻根系 Cd 含量和积累量上升,说明缺 Fe 减少了两种元素在根际和根表吸附位点的竞争,但由于 Fe 膜对 Cd 的阻挡作用有限,促进了水稻对 Cd 的吸收。不过,缺 Fe 导致水稻根部向地上部转运的 Cd、Fe 下降,可能与根内低分子量有机酸载体数量的下降有关。

关键词:水稻;缺铁;根际;铁;镉;吸附;吸收;转运

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)02-0224-07 doi:10.11654/jaes.2014.02.003

Adsorption of Iron and Cadmium in Rhizosphere of and Their Uptake and Translocation in Rice Pretreated with Iron Deficiency

LIU Dan-qing^{1,2}, CHEN Xue¹, GE Ying^{1,3*}

(1.College of Resource and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200030, China; 3.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Cadmium (Cd) accumulation in rice poses a serious risk to human health. Cadmium bioavailability may be affected by the chemistry of iron (Fe) in rice rhizosphere. Here we investigated the effects of rhizospheric conditions and low molecular weight organic acids (LMWOAs) secreted from rice roots with iron deficiency pretreatment on Cd and Fe adsorption on the vermiculite/root surface and their uptake and translocation by rice using nutrient solution-vermiculite culture. Pretreatment with Fe deficiency increased acidity and reducing condition in the rhizosphere, but decreased amount of LMWOAs. Iron deficiency had little influence on Fe adsorption on the surface of vermiculite, but decreased that on the rice root. Compared with normal Fe, Fe deficiency caused increases in non-crystalline Cd on the vermiculite, whereas had no impact on Cd in the Fe film. Enhanced concentration and accumulation of Cd in rice root suggested that Fe deficiency resulted in less competition of these two elements in the rhizosphere and on the roots. Iron plaque on rice roots showed limited shielding effect on Cd uptake by rice, leading to increased Cd absorption by rice. However, Fe deficiency decreased the Cd and Fe translocation from roots to shoots, maybe due to declined LMWOA carriers in rice roots.

Keywords: rice; iron deficiency; rhizosphere; iron; cadmium; adsorption; uptake; translocation

收稿日期:2013-05-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30700479);教育部高等学校博士点基金资助项目(20090097110035,20110097110004);中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(Y052010019)

作者简介:刘丹青,女,江苏靖江人,硕士研究生,从事重金属污染控制研究。

*通信作者:葛滢 E-mail:yingge711@njau.edu.cn

镉污染稻田土壤中的Cd的生物有效性受到土壤性状以及水稻生理活动等多种因素的影响。例如,稻田土壤在水稻生育前期淹水、中后期则转变为落干,土壤含水量的下降带来土壤性状如pH值、Eh的变化,同时也降低了Fe的有效性,甚至形成缺Fe胁迫^[1-2]。研究表明,水稻对Cd的吸收与Fe的丰缺程度密切相关。Nakanishi等^[3]通过营养液培养,发现缺Fe可导致水稻根系Fe(Ⅱ)转运蛋白IRT基因表达增加,根部对Cd的吸收和积累增加;而在稻田土壤中,由于水稻根系泌氧的作用,根际Eh高于非根际土壤,导致随质流进入根圈的Fe(Ⅱ)在根际土壤和稻根表面被氧化形成铁氧化物(又称Fe膜),可对水稻Cd的吸收产生促进、抑制等不同影响^[4-7]。不过,缺Fe如何影响根际和根表Fe膜的数量和活性,进而如何影响水稻对Cd的吸收和转运,目前还没有明确的结论,需要进一步研究。

水稻吸收Cd还与根系分泌的低分子量有机酸(Low Weight Molecule Organic Acids, LWMOAs)有关,作为根系分泌物的重要组成部分,LWMOAs对植物根际Cd吸附及根系吸收有重要的影响。低分子量有机酸一方面可以通过吸附-解吸作用增加或减少根际土壤Cd的吸附,另一方面可以通过络合作用形成“Cd-有机酸”螯合物,影响植物对Cd的吸收与转运^[8-10]。酸性紫色土吸附-解吸Cd的研究中表明,低浓度的低分子量有机酸限制了Cd²⁺的解吸;而高浓度的有机酸增加了Cd²⁺的解吸,如柠檬酸或乙酸在高浓度时极大地提高了Cd²⁺的解吸,其次为苹果酸和酒石酸^[11]。对高Cd积累植物东南景天的研究发现,植株根系中草酸和酒石酸的浓度较高,这些物质与Cd²⁺的络合能力较强,可以降低Cd²⁺与生物酶络合的机会^[12]。水培试验表明,高Cd积累型苋菜根系会分泌更多有机酸,其含量表现为柠檬酸>苹果酸>乙酸>丙酸>丁酸,以柠檬酸和苹果酸为主^[13]。在土培试验中,高Cd品种小麦根系会分泌更多有机酸,且不同生育期均表现为柠檬酸>酒石酸>丙酸>乙酸^[14]。由此可见,植株体内Cd积累量可能与根系分泌的低分子量有机酸有关。但是有关缺Fe胁迫下,水稻根系分泌的LWMOAs种类、含量及其对水稻根际Cd吸附与根系Cd吸收的影响还鲜有报道。因此,有必要结合水稻根系分泌的LWMOAs种类和含量,来进一步阐述缺Fe对水稻根际Cd吸附以及根系吸收与转运的影响。

本研究采用蛭石-营养液联合培养试验,测定并比较缺Fe预处理和正常营养条件下水稻根际pH、

Eh、根际根表Fe、Cd吸附量和根系分泌LMWOAs的种类与数量,探讨缺Fe胁迫下的水稻根际性状与LMWOAs等因素对水稻Cd、Fe吸收和转运的影响,为调控污染稻田土壤中的Cd活性、减少水稻对Cd的吸收和积累提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种为嘉兴市农业科学院培育的粳稻品种N 07-63。

1.2 试验设计

晒种后选取健康饱满的种子用15% H₂O₂溶液消毒30 min,用自来水和去离子水充分洗净浸泡24 h后,平铺于塑料框中并置于盛去离子水的中转箱上。38℃破胸20 h,32℃催芽。待芽鞘长至2~3 cm时,开始光照[日12 h,(32±1)℃,光照强度为65.2 μmol·m⁻²·s⁻¹;夜12 h,(28±1)℃],全营养液培养两周后转移到室外培养。待水稻幼苗长至六叶期时将其转移至营养液-蛭石联合培养的塑料桶(上口直径21 cm,下口直径17 cm,高24 cm)内培养3周,每桶4穴,每穴10株。桶内架有塑料篓(上口直径20 cm,下口直径14 cm,高18 cm)以固定300目的尼龙网袋,网袋内装1 kg蛭石,代表根际;网袋外为营养液,代表非根际。为探讨缺Fe预处理对水稻根系分泌物的影响及其对水稻根表铁膜形成和Fe、Cd吸附吸收的影响,本试验共设置了两组处理。

(1)水稻六叶期幼苗缺Fe营养液(全营养液配方中去除了铁盐)预培7 d,然后进行Fe、Cd处理:全营养液(pH值4.5)+FeSO₄+CdCl₂培养7 d。

(2)水稻六叶期幼苗全营养液预培7 d,然后进行Fe、Cd处理:全营养液(pH值4.5)+FeSO₄+CdCl₂培养7 d。

Fe浓度为30 mg·L⁻¹(以FeSO₄形式),Cd浓度为0.9 mg·L⁻¹(以CdCl₂形式)。按照国际水稻研究所常规营养液配方进行配制,完全营养成分为:188.7 mg·L⁻¹(NH₄)₂SO₄、43.95 mg·L⁻¹ KH₂PO₄、61.0 mg·L⁻¹ K₂SO₄、110.8 mg·L⁻¹ CaCl₂、405.7 mg·L⁻¹ MgSO₄·7H₂O、1.801 mg·L⁻¹ MnCl₂·4H₂O、0.092 mg·L⁻¹ (NH₄)₆·Mo₇O₂₄·4H₂O、1.144 mg·L⁻¹ H₃BO₃、0.044 mg·L⁻¹ ZnSO₄·7H₂O、0.039 mg·L⁻¹ CuSO₄·5H₂O、9.96 mg·L⁻¹ FeSO₄·7H₂O、14.76 mg·L⁻¹ Na₂EDTA·2H₂O、28.42 mg·L⁻¹ Na₂SiO₃·9H₂O。每组处理3个重复,处理过程中每隔2 d换1次营养液。水稻缺Fe和正常Fe营养预培1周后再进行Fe和Cd胁迫处理。处理两周后收获样品并进行

相关指标测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根际环境指标及水稻生物量测定

在水稻样品收获前,采用复合电极和铂电极-甘汞电极在 PHS-3C 型酸度计测定营养液(非根际)-蛭石(根际)培养体系内的 pH 值和 Eh。每次测定前,先用 pH 值标准溶液(pH 值 6.86 和 pH 值 4.00)进行仪器校正,同时对铂电极作脱膜处理;然后用新鲜配制的 Zorbell 标准液(氧化还原性标准液)对电极进行氧化还原电位校正。将 0.140 8 g $K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$, 0.109 8 g $K_3Fe(CN)_6$ 和 0.745 6 g KCl 溶解并定容至 100 mL,用以配制 Zorbell 标准液,储存于 4 ℃备用。测定时将电极插入蛭石-水体系中平衡 20 min,待读数稳定后再取测定值。样品收获后 90 ℃杀青 15 min,70 ℃烘干至恒重,计算根部和地上部的含水率。

1.3.2 蛭石表面 Fe、Cd 分级提取及含量测定

将水稻根系与蛭石小心分离,收获整株水稻幼苗,并将根系周围的蛭石混匀后装入自封袋内。取 1.0 g 左右的蛭石鲜样于 100 mL 离心管中进行形态提取;另称取定量的蛭石鲜样于培养皿内,90 ℃烘干,用于测定蛭石含水量。形态提取方法参照 Weiss 等^[15]和 Salirian 等^[16]的方法并有所改进,采用表 1 中所列提取条件进行交换态、非结晶态和晶态 3 种形态 Fe、Cd 的逐级提取。振荡条件均设为 125 r·min⁻¹、30 min,离心条件为 2500 r·min⁻¹、20 min。Fe、Cd 含量采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES, Perkin Elmer Optimal 2100 DV)测定。

1.3.3 水稻根表铁膜提取及 Fe、Cd 含量测定

为减少 DCB(连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠)法提取根表铁膜时带来的水稻根细胞受损,本试验参照 Taylor 等^[17]、Otte 等^[18]和 Liu 等^[19]的冷 DCB 法进行 DCB-Fe、DCB-Cd 的提取。将洗净的 40 株水稻根置于 250 mL 锥形瓶中,加入 80 mL 0.03 mol·L⁻¹ 柠檬酸钠,0.125 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠和 1.6 g 连二亚硫酸钠进行提取。振荡条件设为 200 r·min⁻¹,20 ℃,2 h。振荡结束后将提取液过滤转移至 100 mL 容量瓶内,定

容。Fe、Cd 含量采用 ICP-AES (Perkin Elmer Optimal 2100 DV)测定。

1.3.4 水稻根部和地上部的 Fe、Cd 含量测定

将烘干后的水稻样品剪碎,称 0.100 g 左右干样粉末于消煮管内,加 2 mL 硝酸,采用 ETHOS T 内插管微波消煮系统(Milestone Ethos T, Italy)进行消煮,内设 ATC-400-CE 自动控温系统,APC-55E 自动压力调节系统和 TFM 微波消煮管。微波约持续 40 min,等其冷却至室温后,将消煮后的样品采用去离子水稀释并定容至 25 mL。Fe、Cd 含量采用 ICP-AES(Perkin Elmer Optimal 2100DV)进行测定。本试验采用的标准物质是灌木枝叶 GBW07603(GSV-2),该标样 Cd 和 Fe 的回收率分别为 92.1%和 95.4%。

1.3.5 根系分泌低分子量有机酸的收集与测定

根系分泌物的收集方法参照 Li 等^[20]试验中收集小麦根系分泌物的方法。把每桶内的 40 株苗小心取出后放入自来水中洗去根部蛭石,用蒸馏水小心清洗,然后用滤纸吸干根表面水分,把根放入 0.5 mmol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液中收集。2 h 后,将收集的根系分泌物抽滤去除杂质。将含根系分泌物的溶液或提取物先通过装有 5 g Amerlite IR-120B 型(H+ form, Murocachi hemical, Tokyo, Japan)阳离子树脂的层析柱(16 mm×14 cm),再通过装有 2 g Dowex 1×8 型(100-200 mesh, formate form)阴离子树脂的层析柱(16 mm×14 cm),有机酸吸持在阴离子树脂上,然后用 15 mL 1 mol·L⁻¹ HCl 将有机酸从阴离子树脂柱中洗脱下来。采用加热式冷冻干燥法将样品浓缩至干。提前配制 8 个标酸和一系列浓度的混酸,采用高效液相色谱仪测定有机酸含量。8 种标酸分别是草酸、甲酸、酒石酸、乙酸、乳酸、柠檬酸、丁二酸和苹果酸。

1.4 数据分析

所有数据均采用 3 次重复的平均值±标准偏差来表示。采用 SPSS 13.0 统计分析软件在 95%的置信区间下作一维方差分析进行差异显著性检验。不同处理间的差异显著性采用配对样本进行评价。采用 SigmaPlot 10.0 进行数据分析与绘图。

表 1 蛭石表面 Fe、Cd 连续提取步骤

Table 1 Sequential extraction procedures for Fe and Cd on vermiculite surface

提取步骤 Extraction step	提取态 Extracted fraction	提取条件 Extract condition
1	交换态	15 mL 1.0 mol·L ⁻¹ MgCl ₂ (pH=5.0)溶液提取 1 h
2	非结晶态	40 mL 0.2 mol·L ⁻¹ 盐酸溶液避光提取 4 h
3	结晶态	40 mL DCB(连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠)溶液提取 16 h

2 结果与分析

2.1 缺 Fe 预处理对水稻根际 pH 值、Eh 和根系分泌低分子量有机酸的影响

正常 Fe 营养和缺 Fe 预处理下水稻非根际 pH 值分别为 6.11 和 5.98, 均显著高于营养液 pH 值 4.5 (表 2)。缺 Fe 预处理下根际 pH 值显著低于非根际 pH 值,而正常 Fe 营养处理下,根际 Eh 显著高于非根际 Eh。与正常 Fe 营养处理相比,缺 Fe 预处理下水稻根际 pH、Eh 都显著降低;而非根际 Eh 显著增加,非根际 pH 值变化不大。草酸、酒石酸、甲酸、苹果酸、乙酸、乳酸和柠檬酸是缺 Fe 预处理下的主要低分子量有机酸(LMWOAs),并且缺 Fe 预处理下的 LMWOAs 总量显著低于正常 Fe 营养处理(表 3)。与正常 Fe 营养处理相比,缺 Fe 预处理下草酸、酒石酸、甲酸、乳酸、乙酸和柠檬酸这 6 种酸含量显著降低,而苹果酸和丁二酸含量显著增加。甲酸是缺 Fe 预处理下的主要 LMWOA,约占该处理下有机酸总量的 32%;而酒石酸是正常 Fe 营养处理下的主要 LMWOA,约占其总量的 35%。

2.2 缺 Fe 预处理对水稻根际蛭石表面和根表铁膜 Fe、Cd 含量的影响

缺 Fe 预处理下水稻根际蛭石表面有非结晶态和结晶态 Fe, 两种形态各占 Fe 提取总量的一半左右;非结晶态 Cd 为主要形态,约占总 Cd 含量的 66%,其

次是交换态 Cd。与正常 Fe 营养处理相比,缺 Fe 预处理下两种形态的 Fe、交换态 Cd 的变化都不显著,而非结晶态 Cd 显著增加(图 1)。

2.3 缺 Fe 预处理对水稻根表铁膜 Fe、Cd 含量的影响

缺 Fe 预处理和正常 Fe 营养处理下水稻根表铁膜中 Fe 吸附量均显著高于 Cd 吸附量。与正常 Fe 营养处理比,缺 Fe 预处理下水稻根表铁膜 Fe 含量显著降低;而根表铁膜 Cd 含量有所增加,但是差异并不十分显著(图 2)。根表吸附的 Fe 比蛭石表面吸附的 Fe 要少许多,然而 Cd 刚好相反,根表吸附的要远大于蛭石表面吸附的数量(图 1、图 2)。

2.4 缺 Fe 预处理对水稻 Fe、Cd 吸收与转运的影响

表 4 数据显示,与正常 Fe 营养相比,缺 Fe 预处理下水稻根部 Cd、Fe 含量和积累量增加,而地上部 Cd 含量与积累量降低,Fe 含量与积累量变化不显著,Cd 和 Fe 的转移率(地上部 Cd、Fe 含量/地下部 Cd、Fe 含量,表示为 S/R)分别为 6.85%和 11.62%,显著低于正常 Fe 营养处理下的 Cd、Fe 转移率(19.74%和 18.59%)。

3 讨论

稻田土壤 Fe 的活性受到水分管理等农艺措施的影响,例如土壤淹水带来 Fe 氧化物的还原溶解,活性增加,土壤排水落干则导致 Fe(II)的重新氧化,活性降低;另一方面,水稻根际氧化圈也使得溶解的 Fe 被氧化为 Fe 膜,降低 Fe 的活性。但这些因素如何影响

表 2 正常 Fe 营养和缺 Fe 预处理水稻根际和非根际 pH 和 Eh 值
Table 2 pH and Eh in rhizosphere and nonrhizosphere of rice pretreated with normal and deficient Fe

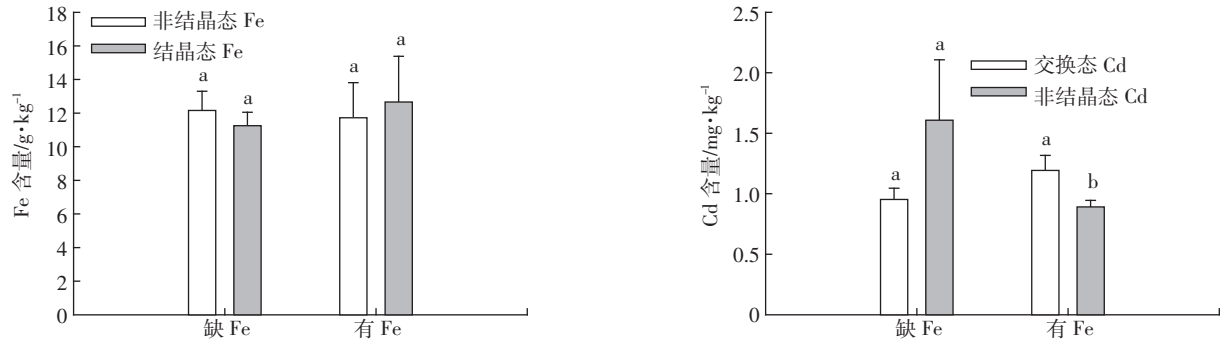
处理 Treatments	根际 pH 值 pH in the rhizosphere	非根际 pH 值 pH in the non-rhizosphere	根际 Eh 值 Eh in the rhizosphere	非根际 Eh 值 Eh in the non-rhizosphere
正常 Fe 营养 normal Fe nutrition	6.11±0.04	6.19±0.04	267±2.04	226±3.51
缺 Fe 预处理 Fe deficiency pretreatment	5.98±0.03	6.17±0.02	246±5.97	248±2.08
	**	ns	**	**

注:*表示不同处理间差异显著($P<0.05$),**表示不同处理间差异较显著($P<0.01$),***表示不同处理间差异极显著($P<0.001$),ns表示差异不显著。下同。

*Indicates significant differences among treatments($P<0.05$);**Indicates significant differences among treatments($P<0.01$);***Indicates significant differences among treatments($P<0.001$);ns indicates no significant differences among treatments($P>0.05$). Same below.

表 3 正常 Fe 营养和缺 Fe 预处理水稻根系分泌的低分子量有机酸浓度($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$)
Table 3 LMWOAs excreted by rice roots under normal Fe nutrition and Fe deficiency pretreatment($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$)

处理 Treatments	草酸 Oxalic acid	酒石酸 Tartaric acid	甲酸 Formic acid	苹果酸 Malic acid	乳酸 Lactic acid	乙酸 Acetic acid	柠檬酸 Citric acid	丁二酸 Succinic acid	总量 Total
正常 Fe 营养 normal Fe nutrition	1.05±0.00	12.02±1.41	11.35±0.00	0.84±0.00	4.56±0.00	4.33±0.97	0.64±0.27	nd	34.79±0.94
缺 Fe 预处理 Fe deficiency pretreatment	0.15±0.02	4.28±0.44	6.32±0.00	1.73±0.32	2.72±0.15	3.31±0.45	0.48±0.12	0.46±0.10	19.46±0.48
	***	***	***	**	***	ns	ns	***	***



图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different treatments. The same as below

图 1 正常 Fe 营养和缺 Fe 预处理水稻根际蛭石表面结晶态和非结晶态 Fe、交换态和非结晶态 Cd 含量

Figure 1 Crystalline and non-crystalline Fe and exchangeable and non-crystalline Cd on the vermiculite surface in rice roots under normal Fe nutrition and Fe deficiency pretreatment

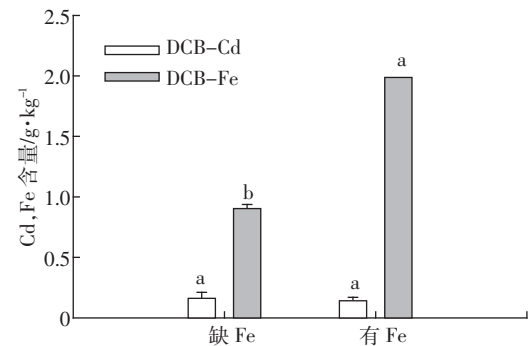


图 2 正常 Fe 营养和缺 Fe 预处理水稻根表铁膜中 Fe、Cd 含量

Figure 2 Fe and Cd contents in iron plaque on rice root pretreated with under normal Fe nutrition and Fe deficiency

水稻对 Cd 的吸收和转运尚不十分清楚^[21]。因此,本实验采用蛭石-营养液联合培养,比较研究缺 Fe 和正常 Fe 营养下 Fe 和 Cd 的化学行为以及水稻低分子量有机酸的分泌数量,以期揭示 Fe 活性变化对水稻 Cd 吸收和转运的影响机制。

pH 值、Eh 是影响土壤、根际环境 Cd、Fe 活性及

其生物有效性的重要因素。在本试验中,缺 Fe 预处理下水稻根际 pH 值、Eh 均显著降低。已往研究表明,造成根际酸化的原因可能有三个:植物根系对阴阳离子的吸收速率有差异,根系呼吸产生 CO₂,有机酸、H⁺、氨基酸等物质的分泌^[22-24];而影响 Eh 的因素则主要是氧化性和还原性物质的数量^[21]。缺 Fe 条件下,稻根低分子量有机酸的分泌量下降(表 3),因此水稻根际 pH 值下降可能是根际 Fe(Ⅱ)氧化产生 H⁺导致的。本试验采用蛭石-营养液联合培养,根际和非根际的 Eh 值均在 225 mV 以上,处于氧化状态,因此尽管缺 Fe 预处理使得根际氧化还原电位降低,但 Eh 对 Fe、Cd 活性的影响要小于 pH 值的影响。

根际蛭石表面非结晶态与结晶态 Fe 的比例均在 50%左右,而 Cd 的主要形态是交换态和非结晶态(图 1),说明本实验条件下,营养液中的 Fe、Cd 随质流进入根际,沉积在蛭石表面,部分吸附的 Fe 发生了老化转变为结晶态,而 Cd 的活性仍然较高。这与以往报道类似,例如 Lin 等^[25]发现,根际土壤中 Fe 主要是非结晶态(66%±7%),Cd 主要是交换态。Fe、Cd 的高活

表 4 正常 Fe 营养和缺 Fe 预处理水稻地上部和地下部 Fe、Cd 含量和积累量								
Table 4 Fe and Cd content and accumulation in aboveground and root parts of rice under normal Fe nutrition and Fe deficiency pretreatments								
处理 Treatments	地上部 Cd Cd in the shoots		地下部 Cd Cd in the roots		地上部 Fe Fe in the shoots		地下部 Fe Fe in the roots	
	含量/ mg·kg ⁻¹	积累量/ μg·pot ⁻¹	含量/ mg·kg ⁻¹	积累量/ μg·pot ⁻¹	含量/ g·kg ⁻¹	积累量/ mg·pot ⁻¹	含量 /g·kg ⁻¹	积累量/ mg·pot ⁻¹
缺 Fe 预处理 Fe deficiency pretreatment	18.33±6.29	53.88±5.48	267.71±11.10	139.21±14.88	0.71±0.10	2.88±0.72	6.11±0.48	1.75±0.09
正常 Fe 营养 Normal Fe nutrition	45.51±6.60	244.61±27.18	230.54±10.21	109.88±14.20	1.03±0.20	3.81±2.15	5.54±0.81	1.27 ±0.01
	**	**	*	*	ns	ns	**	**

性与根际土壤所特有的物理、化学和生物特征有关^[26]。缺Fe预处理并未使蛭石表面的Fe数量和形态发生显著变化,但非结晶态Cd显著增加,交换态Cd略有下降,Cd吸附总量增加。两者不同的变化趋势一方面是由于Fe的数量远大于Cd,另一方面则是因为Fe与Cd在根际存在竞争性吸附。

Fe膜是水稻根表Fe氧化还原反应的产物,本实验中根表Fe膜的数量显著低于蛭石表面吸附的Fe(图1、2),而且缺Fe导致根表Fe膜的数量显著下降(图2),与蛭石表面Fe吸附量变化很小(图1)形成鲜明对比。这种差异说明,无论缺Fe与否,大部分进入根际的Fe(II)沉积在蛭石表面,其数量可能已接近蛭石的吸附容量,导致缺Fe的效应主要体现在水稻根表Fe膜显著降低(图2)。Fe膜数量的减少提高了DCB-Cd的含量(图2),但增幅并不显著,说明缺Fe预处理虽减少了两种元素在根表吸附位点的竞争,但Cd的吸附并没有显著增加,更多的Cd随质流进入了根内(表4)。这与Liu等^[5,7]的结论相同,即根表Fe膜对Cd的阻挡作用是有限的。

缺Fe预处理下水稻根内Cd、Fe含量和积累量均显著增加,但地上部Cd含量和积累量降低,地上部Fe含量和积累量变化不显著(表4)。这说明缺Fe促进了Cd的吸收,但降低了Cd的转运。除了Fe与Cd之间的竞争效应外,水稻对两种元素的吸收还与LMWOAs的分泌量有关。与正常Fe营养处理相比,缺Fe预处理下草酸、酒石酸、甲酸、乳酸、乙酸和柠檬酸这6种LMWOAs的分泌总量显著降低,而苹果酸和丁二酸含量显著增加(表3)。这与以往报道有些不同,如有研究表明,在低有效态Zn和P胁迫下,水稻根系分泌的LMWOAs显著增加,其中草酸和柠檬酸(特别是对于低有效态Zn胁迫)都表现出很重要的作用^[27]。这些差异可能是由于本实验缺Fe时间不长造成的。除LMWOAs外,缺Fe还可诱导水稻分泌麦根酸类物质,但这类物质分泌量少且持续时间短,因此缺Fe预处理下水稻根系分泌的麦根酸类物质几乎可以忽略不计^[28]。LMWOAs可以影响土壤中Cd的释放速率,通过络合作用形成“Cd-LMWOAs”络合物,增强土壤中可溶态Cd含量^[29]。但是与络合态Fe、Cd相比,自由态Fe、Cd更易于被水稻根系所吸收,因此本试验中水稻根系分泌LMWOAs含量的减少会降低络合态Fe、Cd含量,从而使缺Fe预处理条件下根际活性较高的Fe、Cd被水稻根系吸收。此外本研究还发现,缺Fe虽导致水稻根系Cd吸收增加,但向茎叶部的转

运并没有随之升高。这种现象与Nakanishi等^[3]报道的结果是一致的,Cd与Fe可能通过相同的途径向地上部转运^[3],而上述LMWOAs可能是两种元素在水稻体内运输的载体,缺Fe导致其分泌量下降,从而带来水稻地上部Cd、Fe的含量和积累量下降,不过其具体机制还有待深入研究。

4 结论

(1)与正常Fe营养处理相比,缺Fe预处理水稻根际的酸度增加,还原性增强,根际蛭石表面吸附的Fe变化不大,但Cd吸附量上升,根表Fe膜数量下降,降低了Fe与Cd在根表铁膜中吸附位点的竞争,但Fe膜中Cd含量差异不显著,说明Fe膜对Cd的阻挡作用有限。

(2)缺Fe预处理下水稻根系分泌的LMWOAs总量显著低于正常Fe营养处理,与此同时,缺Fe预处理下水稻根内Cd、Fe含量和积累量均显著增加,但地上部Cd含量和积累量降低,Fe含量和积累量变化不显著。稻根LMWOAs分泌量的减少增加了水稻根系对Cd的吸收,但降低了Cd向地上部的转运。

参考文献:

- [1] 郑绍建,胡霭堂.淹水对污染土壤镉形态转化的影响[J].环境科学学报,1995,15(2):142-147.
Zheng S J, Hu A T. Effects of flooding on the transformation of cadmium fractions in contaminated soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15(2):142-147.
- [2] 葛 滢,李义纯,周权锁,等.淹水还原作用下土壤Cd的吸附与解吸特征的初步探讨[J].生态环境,2006,15(4):730-734.
Ge Y, Li Y C, Zhou Q S, et al. Preliminary investigation on adsorption and desorption of Cd in soil with different reduction states[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(4):730-734.
- [3] Nakanishi H, Ogawa I, Ishimaru Y, et al. Iron deficiency enhances cadmium uptake and translocation mediated by the Fe^{2+} transporters OsIRT1 and OsIRT2 in rice[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52(4):464-469.
- [4] 刘敏超,李花粉,夏立江,等.不同基因型水稻吸镉差异及其与根表铁氧化物胶膜的关系[J].环境科学学报,2000,20(5):592-596.
Liu M C, Li H F, Xia L J, et al. Differences of cadmium uptake by rice genotypes and relationship between the iron oxide plaque and cadmium uptake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(5):592-596.
- [5] Liu H J, Zhang J L, Zhang F S. Role of iron plaque in Cd uptake by and translocation within rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in solution culture[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(3):314-320.
- [6] 刘敏超,李花粉,夏立江,等.根表铁锰氧化物胶膜对不同品种水稻吸镉的影响[J].生态学报,2001,21(4):598-602.
Liu M C, Li H F, Xia L J, et al. Effect of Fe, Mn coating formed on roots

- on Cd uptake by rice varieties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(4): 598–602.
- [7] 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]. *The Science of the Total Environment*, 2008, 394(2–3): 361–368.
- [8] 高彦征, 贺纪正, 凌婉婷. 有机酸对土壤中镉的解吸及影响因素[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 731–737.
- Gao Y Z, He J Z, Ling W T. Effect of organic acids on cadmium desorption from soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 361–368.
- [9] Quartacci M F, Baker A J M, Navari-Izzo F. Nitrotriacetate- and citric acid-assisted phytoextraction of cadmium by Indian mustard (*Brassica juncea* (L.) Czernj. *Brassicaceae*) [J]. *Chemosphere*, 2005, 59: 1249–1255.
- [10] Nigam R, Srivastava S, Prakash S, et al. Cadmium mobilisation and plant availability: The impact of organic acids commonly exuded from roots[J]. *Plant and Soil*, 2001, 230: 107–113.
- [11] 周鑫斌, 黄建国, 赖凡. pH和有机酸对酸性紫色土吸附-解吸镉的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 139–142.
- Zhou X B, Huang J G, Lai F. Effects of pH, organic acids on cadmium adsorption-desorption from acidic purple soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6): 139–142.
- [12] 朱艳霞. 东南景天 (*Sedum alfredii* Hance) 对镉的超积累与有机酸含量变化的关系[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- Zhu Y X. The relation of organic acids and Cd accumulation in *Sedum alfredii* Hance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [13] 范洪黎, 王旭, 周卫. 不同镉积累型苋菜 (*Amaranthus mangostanus* L.) 根际低分子量有机酸与镉吸收的关系[J]. 中国农业科学, 2007, 40(12): 2727–2733.
- Fan H L, Wang X, Zhou W. Low molecular weight organic acids in rhizosphere and their effects on cadmium accumulation in two cultivars of amaranth (*Amaranthus mangostanus* L.) [J]. *Agricultural Science in China*, 2007, 40(12): 2727–2733.
- [14] 万敏, 周卫, 林葆. 不同镉积累类型小麦根际土壤低分子量有机酸与镉的生物积累[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 331–336.
- Wan M, Zhou W, Lin B. Low-molecular-weight organic acids in rhizosphere soil and their effect on cadmium accumulation in two cultivars of wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3): 331–336.
- [15] Weiss J V, Emerson D, Megonigal J P. Geochemical control of microbial Fe(III) reduction potential in wetlands: Comparison of the rhizosphere to non-rhizosphere soil[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 48(1): 89–100.
- [16] Salirian R C, Leigh A S, Edward D B, et al. A sequential extraction procedure for acid sulfate soils: Partitioning of iron[J]. *Geoderma*, 2010, 155(3–4): 224–230.
- [17] Taylor G J, Crowder A A. Use of the DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plants[J]. *American Journal of Botany*, 1983, 70(8): 1254–1257.
- [18] Otte M L, Rozema J, Koster L, et al. Iron plaque on roots of *Aster-tripolium* L.: Interaction with zinc uptake[J]. *New Phytologist*, 1989, 111: 309–317.
- [19] Liu J G, Cao C X, Wong M H, et al. Variations between rice cultivars in iron and manganese plaque on roots and the relation with plant cadmium uptake[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(7): 1067–1072.
- [20] Li S, Yu J L, Zhu M J, et al. Cadmium impairs ion homeostasis by altering K^+ and Ca^{2+} Channel activities in rice root hair cells[J]. *Plant Cell and Environment*, 2012, 35(11): 1–16.
- [21] Zhang C H, Ge Y, Yao H, et al. Iron oxidation-reduction and its impacts on cadmium bioavailability in paddy soils: A review [J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2012, 6(4): 509–517.
- [22] Tao S, Chen Y J, Xu F L, et al. Changes of copper speciation in maize rhizosphere soil[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122(3): 447–454.
- [23] Song A L, Li Z J, Zhang J, et al. Silicon-enhanced resistance to cadmium toxicity in *Brassica chinensis* L. is attributed to Si-suppressed cadmium uptake and transport and Si-enhanced antioxidant defense capacity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(1): 74–83.
- [24] 曾凡荣. 水稻铬毒害和耐性的生理与分子机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- Zeng F R. Physiological and molecular mechanisms of chromium stress and tolerance in rice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [25] Lin Q, Chen Y X, Chen H M, et al. Chemical behavior of Cd in rice rhizosphere[J]. *Chemosphere*, 2003, 50(6): 755–761.
- [26] Weiss J V, Emerson D, Megonigal J P. Rhizosphere iron(III) deposition and reduction in a *Juncus effusus* L.-dominated wetland[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1861–1870.
- [27] Hoffland E, Wei C, Wissuwa M. Organic anion exudation by lowland rice (*Oryza sativa* L.) at zinc and phosphorus deficiency[J]. *Plant and Soil*, 2006, 283(1–2): 155–162.
- [28] 刘文菊, 张西科, 张福锁. 根分泌物对根际难溶性镉的活化作用及对水稻吸收、运输镉的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 448–451.
- Liu W J, Zhang X K, Zhang F S. The mobilization of root exudates on CdS in rice rhizosphere and their effect on Cd uptake and transport[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 448–451.
- [29] Krishnamurti G S R, Cieslinski G, Huang P M, et al. Kinetics of cadmium release from soils as influenced by organic acids implication in cadmium availability[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 271–277.