

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第33卷 第14期 Vol.33 No.14 **2013**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 14 期      2013 年 7 月    (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

石鸡属鸟类研究现状..... 宋 森,刘迺发 (4215)

### 个体与基础生态

不同降水及氮添加对浙江古田山 4 种树木幼苗光合生理生态特征与生物量的影响.....  
..... 闫 慧,吴 茜,丁 佳,等 (4226)

低温胁迫时间对 4 种幼苗生理生化及光合特性的影响..... 邵怡若,许建新,薛 立,等 (4237)

不同施氮处理玉米根茬在土壤中矿化分解特性..... 蔡 苗,董燕婕,李佰军,等 (4248)

不同生育期花生渗透调节物质含量和抗氧化酶活性对土壤水分的响应.....  
..... 张智猛,宋文武,丁 红,等 (4257)

天山中部天山云杉林土壤种子库年际变化..... 李华东,潘存德,王 兵,等 (4266)

不同作物两苗同穴互作育苗的生理生态效应..... 李伶俐,郭红霞,黄耿华,等 (4278)

镁、锰、活性炭和石灰及其交互作用对小麦镉吸收的影响..... 周相玉,冯文强,秦鱼生,等 (4289)

CO<sub>2</sub> 浓度升高对毛竹器官矿质离子吸收、运输和分配的影响 ..... 庄明浩,陈双林,李迎春,等 (4297)

pH 值和 Fe、Cd 处理对水稻根际及根表 Fe、Cd 吸附行为的影响 ..... 刘丹青,陈 雪,杨亚洲,等 (4306)

弱光胁迫对不同耐荫型玉米果穗发育及内源激素含量的影响..... 周卫霞,李潮海,刘天学,等 (4315)

玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响..... 焦念元,宁堂原,杨萌珂,等 (4324)

不同林龄胡杨克隆繁殖根系分布特征及其构型..... 黄晶晶,井家林,曹德昌,等 (4331)

植被年际变化对蒸散发影响的模拟研究..... 陈 浩,曾晓东 (4343)

蝇蛹金小蜂的交配行为及雄蜂交配次数对雌蜂繁殖的影响..... 孙 芳,陈中正,段毕升,等 (4354)

西藏飞蝗虫粪粗提物的成分分析及其活性测定..... 王海建,李彝利,李 庆,等 (4361)

不同水稻品种对稻纵卷叶螟生长发育、存活、生殖及飞行能力的影响..... 李 霞,徐秀秀,韩兰芝,等 (4370)

### 种群、群落和生态系统

基于 *mtCOII* 基因对山东省越冬代亚洲玉米螟不同种群的遗传结构分析 .....  
..... 李丽莉,于 毅,国 栋,等 (4377)

太湖湿地昆虫群落结构及多样性..... 韩争伟,马 玲,曹传旺,等 (4387)

西江下游浮游植物群落周年变化模式..... 王 超,赖子尼,李新辉,等 (4398)

环境和扩散对草地群落构建的影响..... 王 丹,王孝安,郭 华,等 (4409)

黄土高原不同侵蚀类型区生物结皮中蓝藻的多样性..... 杨丽娜,赵允格,明 姣,等 (4416)

### 景观、区域和全球生态

基于景观安全格局的建设用地管制分区..... 王思易,欧名豪 (4425)

黑河中游湿地景观破碎化过程及其驱动力分析..... 赵锐锋,姜朋辉,赵海莉,等 (4436)

2000—2010 年青海湖流域草地退化状况时空分析 ..... 骆成凤,许长军,游浩妍,等 (4450)

基于“源”“汇”景观指数的定西关川河流域土壤水蚀研究 ..... 李海防,卫 伟,陈 瑾,等 (4460)

农业景观格局与麦蚜密度对其初寄生蜂与重寄生蜂种群及寄生率的影响 ... 关晓庆,刘军和,赵紫华 (4468)

CO<sub>2</sub> 浓度和降水协同作用对短花针茅生长的影响..... 石耀辉,周广胜,蒋延玲,等 (4478)

**资源与产业生态**

城市土地利用的生态服务功效评价方法——以常州市为例..... 阳文锐,李 锋,王如松,等 (4486)

城市居民食物磷素消费变化及其环境负荷——以厦门市为例..... 王慧娜,赵小锋,唐立娜,等 (4495)

**研究简报**

间套作种植提升农田生态系统服务功能..... 苏本营,陈圣宾,李永庚,等 (4505)

矿区生态产业评价指标体系 ..... 王广成,王欢欢,谭玲玲 (4515)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 308 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 32 \* 2013-07



**封面图说:** 古田山常绿阔叶林景观——亚热带常绿阔叶林是我国独特的植被类型,生物多样性仅次于热带雨林。古田山地处中亚热带东部,浙、赣、皖三省交界处,由于其特殊复杂的地理环境位置,分布着典型的中亚热带常绿阔叶林,是生物繁衍栖息的理想场所,生物多样性十分突出。中国科学院在这里建立了古田山森林生物多样性与气候变化研究站,主要定位于研究和探索中国亚热带森林植物群落物种共存机制,阐释生物多样性对森林生态系统功能的影响,以及监测气候变化对于亚热带森林及其碳库和碳通量的影响。

**彩图及图说提供:** 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201204200573

刘丹青,陈雪,杨亚洲,王淑,李玉姣,胡浩,张春华,葛滢. pH 值和 Fe、Cd 处理对水稻根际及根表 Fe、Cd 吸附行为的影响. 生态学报, 2013, 33 (14): 4306-4314.

Liu D Q, Chen X, Yang Y Z, Wang S, Li Y J, Hu H, Zhang C H, Ge Y. Effects of pH, Fe and Cd concentrations on the Fe and Cd adsorption in the rhizosphere and on the root surfaces of rice. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4306-4314.

## pH 值和 Fe、Cd 处理对水稻根际及 根表 Fe、Cd 吸附行为的影响

刘丹青<sup>1,2</sup>, 陈 雪<sup>1</sup>, 杨亚洲<sup>1</sup>, 王 淑<sup>1</sup>, 李玉姣<sup>1</sup>, 胡 浩<sup>1</sup>, 张春华<sup>3</sup>, 葛 滢<sup>1,2,\*</sup>

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095;

2. 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;

3. 南京农业大学生命科学实验中心, 元素与生命科学研究合作示范试验室, 南京 210095)

**摘要:**通过营养液-蛭石联合培养试验, 设置系列 pH 值(4.5—7.5)和 Fe、Cd 处理, 研究不同 pH 值及 Fe、Cd 浓度对水稻和蛭石表面 Fe、Cd 吸附的影响。结果表明, 不同 pH 值处理下的根际氧化还原电位和酸度不同, 0.9 mg/L Cd 处理下的根际氧化势低于 0.5 mg/L Cd, 50 mg/L Fe 处理下的根际酸度高于 30 mg/L Fe 处理。根表吸附 Fe、Cd 组分和数量都受根际 Eh、pH 值制约, 根表 Fe、Cd 吸附量在处理 pH 值 6.0 时最低, 并分别在处理 pH 值 7.5 和处理 pH 值 4.5 达到最高。但根系表面对 Fe、Cd 的吸附机制与蛭石表面不同, 蛭石吸附 Fe 主要为晶态 Fe, 占到总沉积 Fe 的 73%—87%; 水稻根表沉积 Fe 以非晶态 Fe 为主, 占总沉积 Fe 的 91%—95%; 与处理 pH 值和根际 Eh 间有显著的相关性(蛭石晶态 Fe:  $p_{\text{pH}}=0.011$ ,  $p_{\text{Eh}}=0.042$ ; 水稻根表非晶态 Fe:  $p_{\text{pH}}=0.050$ ,  $p_{\text{Eh}}=0.004$ )。蛭石表面交换态 Fe 及交换态 Cd 与处理 pH 值和 Eh 间存在显著的相关性(pH 值:  $p_{\text{Fe}}<0.001$ ,  $p_{\text{Cd}}=0.009$ ; Eh:  $p_{\text{Fe}}=0.016$ ,  $p_{\text{Cd}}=0.002$ ), 而根表交换态 Fe 及交换态 Cd 仅与处理 pH 值间有显著的相关性( $p_{\text{Fe}}=0.007$ ,  $p_{\text{Cd}}=0.048$ )。不同 Fe、Cd 浓度处理对根际 Eh、pH 值的升降和根表 Fe、Cd 吸附均有影响。与对照相比, 增 Cd 处理可以降低根际 Eh 和升高 pH 值, 减少溶液 Cd 浓度并增加根表 Cd 吸附量; 增 Fe 处理则可以升高根际 Eh 和降低 pH 值, 增加溶液 Fe、Cd 浓度并减少根表 Fe、Cd 吸附量。这是水稻应对 Fe、Cd 浓度胁迫的生理反应之一。

**关键词:**水稻; 根际; 根表; 铁; 镉; 吸附

## Effects of pH, Fe and Cd concentrations on the Fe and Cd adsorption in the rhizosphere and on the root surfaces of rice

LIU Danqing<sup>1,2</sup>, CHEN Xue<sup>1</sup>, YANG Yazhou<sup>1</sup>, WANG Shu<sup>1</sup>, LI Yujiao<sup>1</sup>, HU Hao<sup>1</sup>, ZHANG Chunhua<sup>3</sup>, GE Ying<sup>1,2,\*</sup>

1 College of Resource and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

3 Demonstration Laboratory of Elements and Life Science Research, Laboratory Centre of Life Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

**Abstract:** Cadmium (Cd) pollution in soils has become a serious environmental problem as this toxic metal may be easily absorbed by plants, leading to inhibition of plant growth and development. Rice is a global staple food crop, however, its

**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持续发展国家重点实验室开放基金项目(Y052010019); 国家级大学生创新训练计划项目(091030726); 南京农业大学本科生 SRT 项目(1007A14)

收稿日期: 2012-04-20; 修订日期: 2012-09-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yingge711@njau.edu.cn

quality may be threatened by the accumulation of Cd in grain. The risk to human health associated with Cd-tainted rice may be reduced by minimizing the Cd mobility from soil to rice root. So far, a large number of studies investigated the effects of soil pH, Eh and root iron plaque on Cd bioavailability. These factors may increase, decrease or have no effect on the Cd uptake by rice. However, the underlying mechanisms for these various effects still need further clarification. Thus, in this study, effects of pH (4.5—7.5), Fe and Cd concentrations on Fe and Cd adsorption in the rhizosphere and on the root surfaces of rice were studied using nutrient solution and vermiculite culture. The results showed that Eh and pH in rice rhizosphere differed among various treatments, and the oxidizing potential was lower at 0.9mg/L Cd than at 0.5mg/L Cd, while the acidity in the rhizosphere at 50 mg/L Fe was higher than at 30 mg/L Fe. Besides, the composition and amount of Fe/Cd on the rice root were controlled by the pH and Eh in the rhizosphere. The adsorbed Fe and Cd were lowest at pH 6.0 and respectively reached the maximum values at pH 4.5 and 7.5. However, the mechanisms of Fe/Cd adsorption on the rice root surface were different from those on the surfaces of vermiculite. On the vermiculite surfaces, crystallized Fe was the major form, accounting for 73% to 78% of total Fe adsorption, while on the rice root, noncrystalline Fe was the major form, accounting for 91% to 95%, both of which separately had significant relations with the treatment pH and Eh (crystallized Fe on the vermiculite surfaces:  $p_{\text{pH}}=0.011$ ,  $p_{\text{Eh}}=0.042$ ; noncrystalline Fe on the root surfaces:  $p_{\text{pH}}=0.050$ ,  $p_{\text{Eh}}=0.004$ ). Either EXC-Fe or EXC-Cd on vermiculite surfaces had significant relations with treatment pH and Eh (pH:  $p_{\text{Fe}}<0.001$ ,  $p_{\text{Cd}}=0.009$ ; Eh:  $p_{\text{Fe}}=0.016$ ,  $p_{\text{Cd}}=0.002$ ), while EXC-Fe and EXC-Cd on the surfaces of rice root just significantly correlated with pH ( $p_{\text{Fe}}=0.007$ ,  $p_{\text{Cd}}=0.048$ ). In addition, Fe and Cd treatments affected the adsorption of these two elements on the rice root. Compared with control, Cd addition decreased Eh and increased pH in the rhizosphere, leading to a decline of soluble Cd and a rise of Cd adsorbed on the root surfaces, while Fe application increased Eh and decreased pH in the rhizosphere, resulting in more soluble Fe/Cd and less adsorption of the two elements on the rice root surface. These were physiological reactions of rice to the stresses caused by excessive Fe and Cd.

**Key Words:** rice; rhizosphere; root surface; Fe; Cd; adsorption

控制稻田土壤 Cd 污染、减少土壤中 Cd 向水稻体内的迁移一直以来是国内外学者研究的热点问题。降低水稻根际 Cd 活性是解决稻田 Cd 污染物进入水稻体内的重要途径之一。以往研究表明,土壤 pH 值、Eh 值、有机质、微生物、其他重金属离子及根系分泌物等因素对土壤及水稻根际 Cd 的有效性具有重要影响<sup>[1-3]</sup>。例如,Chuan 等研究表明污染土壤中的重金属 Pb、Cd 和 Zn 的溶解性受土壤 pH 值和 Eh 值影响显著,碱性土壤(pH 值=8.0)条件下重金属溶解度降低,而在酸性土壤(pH 值=5.0、pH 值=3.3)中,重金属可溶性增加;并且随着氧化势的降低,重金属可溶性也增强<sup>[4]</sup>。Kashem 等在研究肥料施用对土壤重金属 Cd、Ni、Zn 的可溶性和生物有效性时发现,增施有机肥可显著降低土壤 pH 值,增强土壤溶液中重金属可溶性,促进可溶性重金属进入植株体内,但其效应随土壤、植株类型和重金属含量的不同而不同<sup>[5]</sup>。

除此之外,长期处于淹水条件下的水稻根系表面形成的大量铁膜也是影响水稻 Cd 有效性的重要因素之一,并且根系氧化作用和根际 Fe(II) 浓度是水稻根表铁膜形成的两个重要条件<sup>[6-7]</sup>。铁膜与水稻对 Fe、Cd 的吸收密切相关,但在不同条件下其影响并不一致。例如,在水培试验中,刘敏超等发现,不同水稻基因型根膜 Fe 含量与 Fe 膜富集的 Cd 含量、根部和地上部 Cd 含量显著正相关,说明根表 Fe 膜可以促进 Cd 的吸收<sup>[8]</sup>;而 Liu 等研究则发现 Fe 膜可以减少根部 Cd 含量,但 Fe 膜富集的 Cd 含量较低,因此阻挡作用有限,根部组织是富集 Cd 的主要器官<sup>[9]</sup>。在土培试验中,有研究表明水稻根表形成的铁膜会成为土壤 Cd 进入水稻根系的重要屏障,进而减少地上部对 Cd 的吸收<sup>[10]</sup>;而也有研究表明根表铁膜对水稻根部和地上部 Cd 吸收的影响很小<sup>[11]</sup>。Weiss 等、纪雄辉等、陈莉娜等的试验结果表明,植物根表吸附沉积 Fe(即根表 Fe 膜)的组成和数量与根际土壤 Eh、pH 值有显著的相关性<sup>[12-14]</sup>,根表 Fe 膜对 Cd 的吸附也与根际 pH 值显著相关<sup>[14]</sup>。由此看来,在水稻基因型、根际 Eh、pH 值条件、以及 Fe<sup>2+</sup> 浓度等因素的影响下,水稻根表铁膜对水稻根系 Cd 吸附和吸收的

影响可以表现为促进、抑制或者影响不大,但是产生这些不同效应的具体机制仍需深入探讨。

因此,本试验采用蛭石-营养液联合培养,利用蛭石模拟水稻根际环境,测定并分析 Fe、Cd 在水稻根表、蛭石表面的形态分布与含量,研究不同 pH 值及 Fe、Cd 处理下,水稻根系和蛭石表面对 Fe、Cd 的吸附以及水稻对 Fe、Cd 吸收的规律,并比较蛭石表面吸附与水稻根表吸附机制的差异,以期阐明水稻根际性状对 Fe、Cd 有效性的影响机理。

## 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 N07-63。

### 1.2 试验设计

晒种后选取健康饱满的种子用 15%  $\text{H}_2\text{O}_2$  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 °C 破胸 20 h,32 °C 催芽。待芽鞘长至 2 cm 左右时,开始光照(日 12 h,32 °C;夜 12 h,27—28 °C)。两周左右后转移到温室培养,等水稻苗长至 4 叶期时将其转移至营养液-蛭石联合培养的塑料盆钵内培养两周。盆钵中部为尼龙网袋(300 目),内装 200 g 蛭石代表根际,网袋外为营养液,代表非根际。为探讨不同 pH 值和 Fe、Cd 浓度对根表铁膜形成及铁膜对 Fe、Cd 吸附吸收的影响,设对照、增 Cd 和增 Fe 3 组处理:

(1) 对照 pH 值 4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5 的完全营养液+Cd1+Fe1

(2) 增 Cd pH 值 4.5、5.5、6.5、7.5 的完全营养液+Cd2+Fe1

(3) 增 Fe pH 值 4.5、5.5、6.5、7.5 的完全营养液+Cd1+Fe2

其中 Fe1 和 Fe2 为 30 mg/L 和 50 mg/L  $\text{FeSO}_4$  溶液,Cd1 和 Cd2 为 0.5 mg/L 和 0.9 mg/L  $\text{CdCl}_2$  溶液。完全营养液成分(单位 mg/L)为:Ca( $\text{NO}_3$ )<sub>2</sub>·4 $\text{H}_2\text{O}$  20;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  10;  $\text{K}_2\text{SO}_4$  20;  $\text{CaCl}_2$ ·2 $\text{H}_2\text{O}$  40;  $\text{MgSO}_4$ ·7 $\text{H}_2\text{O}$  40;  $\text{MnCl}_2$ ·4 $\text{H}_2\text{O}$  0.5; ( $\text{NH}_4$ )<sub>6</sub>· $\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ ·4 $\text{H}_2\text{O}$  0.05;  $\text{H}_3\text{BO}_3$  0.2;  $\text{ZnSO}_4$ ·7 $\text{H}_2\text{O}$  0.01;  $\text{CuSO}_4$ ·5 $\text{H}_2\text{O}$  0.01; Fe- $\text{Na}_2\text{EDTA}$  2.0;  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ·9 $\text{H}_2\text{O}$  0.1。每个处理 3 个重复,处理过程中每隔 2d 换 1 次营养液。在每次换营养液前后,记录下每个盆钵的重量,计算蒸腾量。加 Fe 处理 1 周后进行 Cd 处理。Cd 处理 1 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

水稻样品收获前测定蛭石内的 pH 值和 Eh。pH 值和 Eh 值用复合电极和铂电极-甘汞电极在 PHS-3C 型酸度计测定,每次 pH 值和 Eh 测定前,先用 pH 值标准溶液校正仪器,同时对铂电极作脱膜处理,再用新鲜配制的 zorbell 溶液对电极进行校正,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,一部分测定水稻地上部和根部的鲜重、根长、株高,另一部分在 90 °C 下杀青 15 min,70 °C 下烘干至恒重,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

将水稻收获后的蛭石混匀,取 1.0 g 左右的蛭石于 100 mL 离心管中。形态提取方法是在参照 Weiss 等<sup>[15]</sup>和 Salirian 等<sup>[16]</sup>的方法基础上有所改进,采用表 1 中所列提取条件进行 Fe、Cd 交换态、非晶态和晶态 3 种形态的逐级提取。振荡条件均设为 125 r/min、30 min,离心条件为 2500 r/min、20 min。Fe、Cd 含量采用 ICP-AES(Perkin Elmer Optimal 2100 DV)测定。

#### 1.3.3 水稻根表 Fe、Cd 分级提取及含量测定

取 1.0 g 左右的水稻根(生物量较少的取 0.5 g 左右)于 100 mL 离心管中,采用表 1 中所列的提取条件进行 Fe、Cd 交换态和非晶态两种形态的逐级提取。振荡条件设为 125 r/min、30 min,离心条件为 2500 r/min、20 min。Fe、Cd 含量采用 ICP-AES(Perkin Elmer Optimal 2100 DV)测定。

表 1 蛭石表面和水稻根表 Fe、Cd 连续提取步骤

Table 1 Sequential extraction procedures for Fe and Cd on the surface of vermiculite and rice root surface

|                             | 提取步骤<br>Extraction step | 提取态<br>Extracted fraction | 提取条件<br>Extract condition                    |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------------------------|
| 蛭石表面<br>Vermiculite surface | 1                       | 交换态                       | 15 mL 1.0 mol/L $MgCl_2$ (pH 值=5.0) 溶液提取 1 h |
|                             | 2                       | 非晶态                       | 40 mL 0.2 mol/L 盐酸溶液避光提取 4 h                 |
|                             | 3                       | 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        |
| 水稻根表 Root surface           | 1                       | 交换态                       | 15 mL 1.0 mol/L $MgCl_2$ (pH 值=5) 溶液提取 1 h   |
|                             | 2                       | 非晶态                       | 40 mL 0.2 mol/L 盐酸溶液避光提取 4 h                 |

### 1.3.4 水稻根部和地上部的 Fe、Cd 含量测定

将水稻根部和地上部在 90 ℃ 下杀青 15 min, 70 ℃ 下烘干至恒重, 剪碎。称 0.100 g 左右干样粉末于消煮管内, 加 2 mL 浓硝酸, 采用微波内插管法进行消煮。Fe、Cd 含量采用 ICP-AES (Perkin Elmer Optimal 2100 DV) 测定。

### 1.4 数据分析

采用 SPSS13.0 统计分析软件进行数据分析及差异显著性检验, 采用 SigmaPlot10.0 进行数据分析与绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对水稻根际氧化还原状况及幼苗生长的影响

水稻根系分泌的有机酸和新生态氧通过改变根际 pH 值、Eh、pe + pH 值而影响根际氧化还原状况。图 1 表明, 根际 pH 值与处理 pH 值间有显著的线性关系。当处理 pH 值由 4.5 上升到 7.5 时, 水稻根际 pH 值由 2.92 上升到 3.12, 各处理间差异在  $P < 0.05$  的置信区间内不显著 ( $P = 0.595$ )。由此说明在水稻培养期, 水稻根际酸度比培养液酸度更强。除此之外, 根际 Eh、pe + pH 与处理 pH 值间存在显著的二次回归关系。当处理 pH 值从 4.5 上升到 5.5 或 6.5 时, Eh 由 550 mV 左右上升到 610 mV 左右, pe + pH 由 13.8 上升到 14.8 左右; 随 pH 值继续增大, Eh 和 pe + pH 逐渐下降到 500 mV 和 13.1。这说明水稻根际泌氧在 pH 值为 5.5—6.5 时最多。

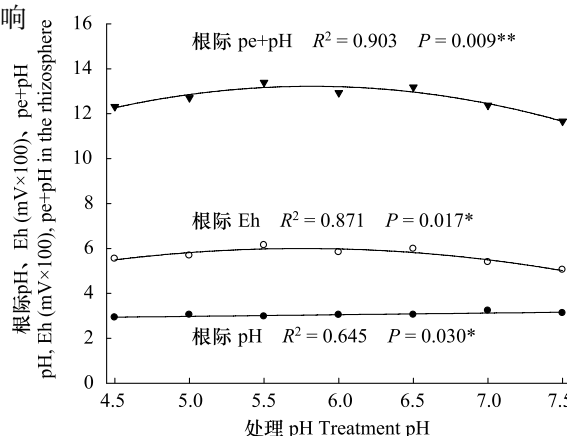


图 1 不同 pH 值对水稻根际 pH 值、Eh 和 pe+pH 的影响

Fig. 1 Effects of pH on pH, Eh and pe+pH in the rhizosphere of rice

营养液中的 Fe、Cd 浓度也影响着水稻根际 pH 值、Eh 和 pe + pH。由材料与方法中可知, 增 Cd 和增 Fe 处理分别设置了 4 个 pH 值, 但是由于 pH 值对水稻的生长效应影响并不显著 ( $P > 0.05$ ), 而增 Cd, 增 Fe 的效应比较显著, 表 2 中所列的对照, 增 Cd 和增 Fe 处理下各指标值是 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 这 4 个 pH 值下观测值的平均值。表 2 表明, 与对照相比, 增 Cd 可以降低水稻根际 Eh 和提高根际 pH 值, 但差异不显著; 增 Fe 可以极显著地提高水稻根际 Eh 和降低根际 pH 值。与对照相比, 增 Cd 和增 Fe 处理后, 水稻株高、地上部干重、地下部干重和蒸腾量均有所降低。这说明在水稻正常养分供应水平上, 不同 pH 值处理下, 增加 Fe、Cd 浓度均会对水稻生长产生胁迫作用。

### 2.2 不同处理对蛭石 Fe、Cd 吸附的影响

蛭石是具有表面电荷的硅酸盐矿物, 有着良好的离子吸附性和交换性。图 2 表明, 蛭石表面吸附有晶态 Fe、非晶 Fe、交换 Fe 及非晶 Cd、交换 Cd, 与此同时, 晶态 Fe、交换 Fe、非晶 Cd 和交换 Cd 既与溶液 pH 值有显著的二次回归关系, 又与水稻根际 Eh 间存在相应的线性回归和二次回归关系。

蛭石表面吸附的晶态 Fe 含量在 13.38—16.11 mg/kg 之间,在处理 pH 值 6.0 时最低,在处理 pH 值 7.5 时最高,占蛭石吸附 Fe 总量的 78%—87%,并与根际 pe + pH 有显著的相关性( $r=0.753^*$ )。pH 值越趋近于 6.0,晶态 Fe 和交换 Fe 含量越低;而非晶 Fe 含量越高。

表 2 培养液不同 Cd, Fe 处理对水稻根际 pH 值, Eh 及生长效应的比较

| 处理<br>Treatment | 根际 pH<br>pH in the<br>rhizosphere | 根际 Eh<br>Eh in the<br>rhizosphere/mV | 株高<br>Shoot height<br>/cm | 根长<br>Root length<br>/cm | 地上部干重<br>Shoot dry weight<br>/(g/盆) | 地下部干重<br>Root dry weight<br>(g/盆) | 蒸腾量<br>Transpiration<br>/(mL/盆) |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 对照              | 3.01±0.09                         | 568±49.56                            | 33.47±1.38                | 14.61±0.42               | 1.58±0.11                           | 0.13±0.02                         | 560±6.09                        |
| 增 Cd            | 3.05±0.13                         | 560±26.98                            | 32.21±1.35                | 13.57±0.44               | 1.45±0.09                           | 0.12±0.01                         | 546±6.16                        |
| 增 Fe            | 2.70±0.12                         | 610±26.20                            | 30.33±1.11                | 13.41±1.16               | 1.20±0.18                           | 0.10±0.01                         | 511±12.66                       |
| 对照与增 Cd         | ns                                | ns                                   | *                         | * * *                    | * *                                 | ns                                | ns                              |
| 对照与增 Fe         | * * *                             | * * *                                | * * *                     | * *                      | * * *                               | * *                               | * * *                           |

\* \* \* 表示不同处理间差异极显著 ( $P<0.001$ ) ; \* \* 表示差异极显著 ( $P<0.01$ ) ; \* 表示差异显著 ( $P<0.05$ ) ; ns 表示差异不显著

蛭石表面没有吸附晶态 Cd,非晶 Cd 含量在 5.83—7.70 mg/kg 之间,在处理 pH 值 5.5 时最低,在处理 pH 值 7.5 时最高,占沉淀 Cd 总量的 93%—98%。它与非晶态 Fe 不一样,与处理 pH 值、Eh 都有较好的相关性,它们可能是一些吸附较弱的  $M(OH)_2$ 、 $MCO_3$  化合物。

蛭石表面的交换 Fe 含量为 0.102—0.203 g/kg 之间,约占总 Fe 量的 0.6%—1.1%;交换 Cd 含量为 0.096—0.603 g/kg 之间,约占总 Cd 量的 1.6%—7.3%。它们与处理 pH 值都有很好的相关性( $p_{Fe}=0.002$ ,  $p_{Cd}=0.023$ ),由于它们同与根际 Eh 显著相关,由此看来,交换 Fe 和交换 Cd 除受蛭石表面的电性引力吸附外,还可能受表面氧化 Fe 吸附沉积的影响。

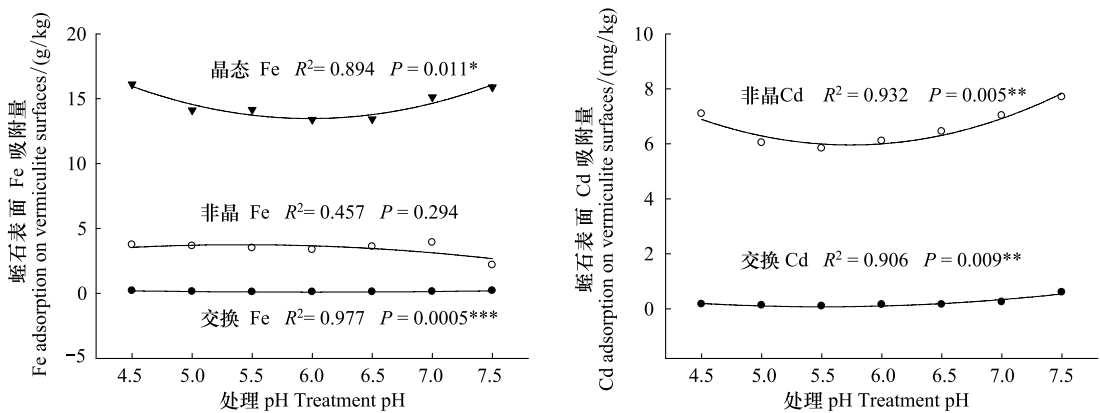


图 2 不同处理 pH 值对蛭石 Fe、Cd 吸附的影响

Fig. 2 Effects of pH on the Fe, Cd adsorption on the surfaces of vermiculite

不同 Fe、Cd 浓度对蛭石表面 Fe、Cd 吸附也有一定的影响。如表 3 所示,与对照相比,增 Cd 处理后蛭石表面交换态 Cd,占主要形态的非晶态 Cd 和总 Cd 含量均降低,其中非晶态 Cd 和总 Cd 含量下降显著 ( $P<0.05$ );增 Fe 处理后蛭石表面交换态 Fe,非晶态 Fe 均增加,而晶态 Fe、总 Fe 和总 Cd 含量稍有减少。由于营养液增 Cd 处理的 0.9 mg/L Cd 浓度高于原始浓度 0.5 mg/L 的 4/5,增 Fe 处理的 50 mg/L Fe 浓度高于原始浓度 30 mg/L 的 2/3,而固体表面对溶液离子的吸附数量在一定范围内随溶液浓度增加而增高,直至两者达到平衡为止,因此增 Fe、增 Cd 后蛭石中减少的吸附量可能一部分被根表所截获,另一部分被水稻所吸收。

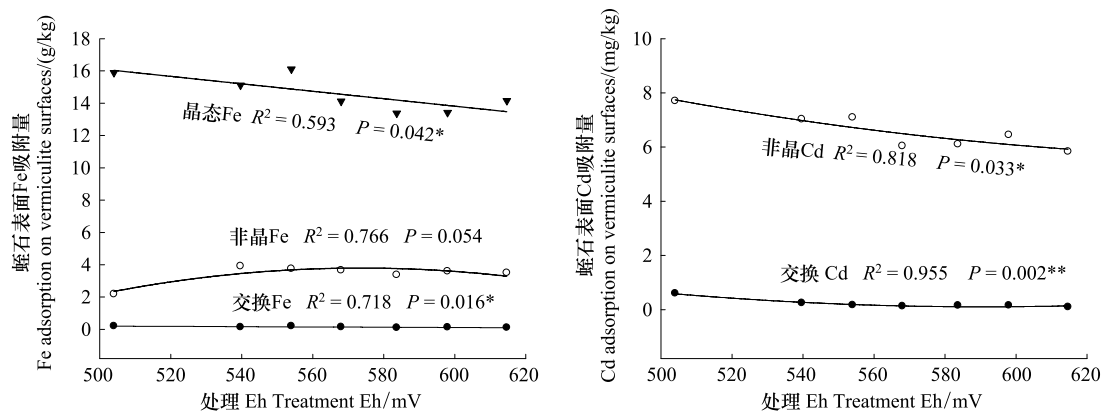


图 3 不同处理 Eh 对蛭石 Fe、Cd 吸附的影响

Fig. 3 Effects of Eh on the Fe, Cd adsorption on the surface of vermiculite

表 3 Cd、Fe 处理对蛭石表面 Cd、Fe 吸附的影响

Table 3 Effects of Cd, Fe addition on Cd, Fe adsorption on vermiculite surfaces

| 处理<br>Treatment | Cd 含量 Cd content/(mg/kg) |                             |                  | Fe 含量 Fe content/(g/kg) |                             |                         |                  |
|-----------------|--------------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------|
|                 | 蛭石表面 Vermiculite surface |                             |                  |                         |                             |                         |                  |
|                 | 交换态 Cd<br>EXC-Cd         | 非晶态 Cd<br>Noncrystalline Cd | 总 Cd<br>Total Cd | 交换态 Fe<br>EXC-Fe        | 非晶态 Fe<br>Noncrystalline Fe | 晶态 Fe<br>Crystalline Fe | 总 Fe<br>Total Fe |
| 对照              | 0.29±0.22                | 6.77±0.81                   | 7.06±0.98        | 0.17±0.04               | 3.25±0.72                   | 14.90±1.32              | 18.32±1.24       |
| 增 Cd            | 0.05±0.00                | 5.87±0.49                   | 5.92±0.48        | 0.08±0.03               | 3.03±0.88                   | 12.98±0.92              | 16.09±1.28       |
| 增 Fe            | 0.13±0.11                | 6.17±0.60                   | 6.30±0.51        | 0.20±0.05               | 3.63±0.35                   | 13.89±1.44              | 17.72±1.77       |
| 对照 vs 增 Cd      | ns                       | *                           | *                | ns                      | ***                         | ***                     | **               |
| 对照 vs 增 Fe      | ns                       | ns                          | ns               | ns                      | ***                         | ***                     | ns               |

### 2.3 不同处理对水稻根系表面 Fe、Cd 吸附的影响

图 4 显示了不同处理 pH 值、Eh 下水稻对根表 Fe、Cd 吸附的影响。试验表明,水稻根表吸附沉积有交换 Fe、非晶 Fe 和交换 Cd。其中,非晶 Fe 含量为 35.07—47.65 g/kg,约占根表吸附总 Fe 量的 90%—95%,它在处理 pH 值 4.5 时含量最高,在处理 pH 值 6.0 时含量最低;同时它与处理 pH 值间有显著的二次曲线相关,与 Eh 间有很好的线性关系。这些相关关系与蛭石表面吸附的晶态 Fe 一样,表明根表吸附的非晶 Fe 也是一种氧化沉积。根表交换 Fe 含量为 2.41—5.05 g/kg,交换 Cd 含量为 52.97—94.59 mg/kg,它们与处理 pH 值间也有显著的回归关系,说明它们也是根表的电性吸附。对比水稻根表与蛭石表面的 Fe、Cd 吸附行为,就不难看出两者间有着类似的机制,同受根际氧化还原状况和 pH 值影响。不过,与蛭石表面不同的是根系表面上没有晶态 Fe 和非晶 Cd 的沉积,根表交换 Fe 和交换 Cd 也与根际 Eh 没有显著相关性,这些不同显然与根系表面的生物学性质及功能有关。

不同 Fe、Cd 浓度对水稻根表 Fe、Cd 吸附的影响见表 4。与对照相比,培养液增 Cd 处理可显著增加根表交换态 Cd,增 Fe 处理可显著增加根表交换态 Fe,降低非晶 Fe,总 Fe 和交换态 Cd 含量。这些差异反映了根际 Eh、pH 值对 Fe、Cd 浓度的影响。由于培养液的 Fe、Cd 离子是随质流经过氧化态根际(Eh 在 558 mV 以上),然后再在根表富集,与对照比较,增 Cd 处理使根际 Eh 降低,pH 值增高,蛭石表面总 Cd 吸附量减少;增 Fe 处理使 Eh 升高,pH 值降低,蛭石表面总 Fe 吸附量减少(表 2,表 3)。前者可降低根际溶液 Cd 浓度并增加根表 Cd 的吸附量,对溶液 Fe 浓度和根表吸附量影响不大;后者可增加溶液 Fe 浓度,而降低根表吸附量。这些结果反映了 Fe、Cd 胁迫作用下水稻的应对机理。

### 3 讨论

在水稻培养期,水稻根际酸度比培养液酸度更强,这与前人所报道的相一致。如,陈莉娜等水稻水培试验

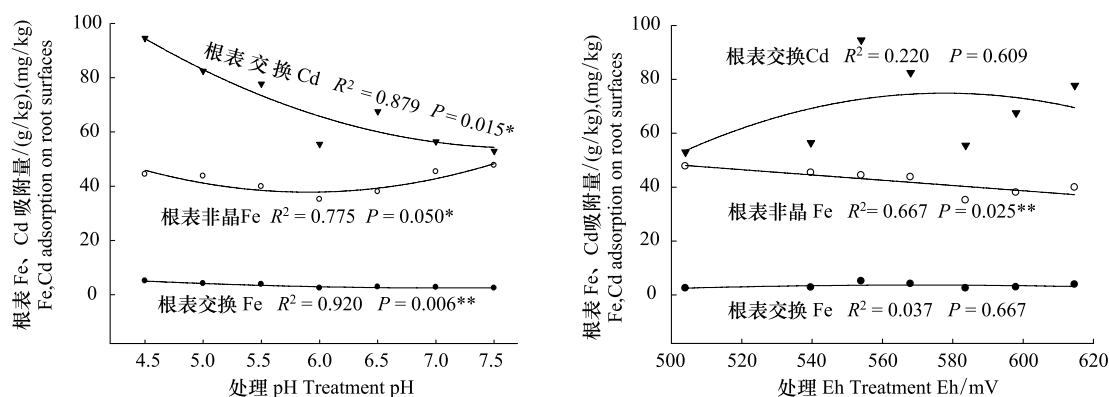


图4 不同 pH 值、Eh 对根表 Fe、Cd 吸附的影响

Fig. 4 Effects of pH, Eh on Fe, Cd adsorption on root surfaces

表4 Cd、Fe 处理对根系表面 Cd、Fe 吸附的影响

Table 4 Effects of Cd, Fe addition on their adsorption on root surfaces

| 处理<br>Treatment | Cd 含量<br>Cd content/(mg/kg) | Fe 含量<br>Fe content/(g/kg) |                             |                  |
|-----------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------|
|                 | 交换态 Cd<br>EXC-Cd            | 交换态 Fe<br>EXC-Fe           | 非晶态 Fe<br>Noncrystalline Fe | 总 Fe<br>Total Fe |
| 对照              | 78.03±0.39                  | 3.51±1.18                  | 43.54±4.06                  | 46.17±4.01       |
| 增 Cd            | 101.00±0.00                 | 3.90±1.28                  | 46.95±4.04                  | 50.85±4.49       |
| 增 Fe            | 49.63±6.66                  | 4.83±1.72                  | 38.23±6.76                  | 43.05±5.86       |
| 对照与增 Cd         | *                           | ns                         | ns                          | ns               |
| 对照与增 Fe         | ns                          | *                          | ns                          | ns               |

表明,不同 pH 值处理下降低的根际 pH 值达 1.5—4.3 个单位,增加的 Eh 可多达 100 mV 以上<sup>[14]</sup>。影响植株根际酸化的原因可能有 3 个:(1)植物根系对阴阳离子的吸收速率有差异;(2)根系呼吸产生 CO<sub>2</sub>;(3)有机酸、H<sup>+</sup>、氨基酸等物质的分泌<sup>[17-19]</sup>。大量水培和土培试验表明,植物根系会分泌大量的低分子量有机酸,如苹果酸、柠檬酸和草酸等<sup>[20-21]</sup>。这些有机酸将有利于植株对营养元素的吸收(如 Fe, P 等元素)和重金属解毒(如 Al),有利于缓解植株根系环境的厌氧胁迫,有利于增加矿化和微生物富集<sup>[22-24]</sup>。

从根系与蛭石两表面吸附行为的比较中可以看出,根系表面对 Fe、Cd 的吸附作用与矿物表面物化反应类似,吸附物的组分和数量既受根际 Eh、pH 值制约,又受根际 Fe、Cd 浓度的影响。蛭石对根际溶液 Fe 的吸附是一种物理化学吸附,它与蛭石表面电化学性质及溶液离子的化学性质有关。结合表 3、4、5 可知,非晶态 Fe 是蛭石和根系表面吸附的主要形态,增 Cd, 增 Fe 处理对蛭石表面非晶态 Fe 的影响显著高于根系表面;而 pH 处理对根系表面交换态 Fe, 交换态 Cd 的影响显著高于其对蛭石表面的影响。这些不同反映了两个表面性质的差异。根系表面能分泌有机酸和新生态氧,不同处理影响着分泌物的成分和数量,由此影响着根际溶液的 Eh、pH 值(图 1),继而影响根际 Fe、Cd 浓度,所以说,两个表面间的溶液 Fe、Cd 浓度和 Eh、pH 值都是由根系表面控制。同时,溶液浓度与表面吸附量依存于吸附平衡的关系,这样,处于同一根际的两个表面,就会因为吸附性质的不同而带来吸附组分和数量的差别,也就导致增 Cd 和增 Fe 效应产生明显的差异。

蛭石表面是含铁镁硅酸盐矿物断面,对溶液 Fe、Cd 离子有高的吸附结合能,因此在它的表面上能形成紧密吸持的晶态 Fe 和吸附态非晶态 Cd,而这些组分没有在根表生成。有研究表明水稻根系有泌氧和泌酸的能力,在根际微区域可形成一个氧化态根圈,由此带来根际溶液的 pe + pH 高于土壤溶液,而 pH 值则低于土壤溶液<sup>[25]</sup>。因此可以推测,本实验中模拟根际环境的蛭石表面氧化势和酸度也始终低于根表面,且离根表越远降低程度越大。这就导致与蛭石表面吸附作用平衡的溶液 Fe、Cd 浓度(活度)低于根表溶液浓度(活度)。

表 5 不同处理对根表和蛭石表面的 Fe、Cd 吸附影响的比较

Table 5 Comparisons of different treatment effects on Fe, Cd adsorption to rice root and vermiculite surfaces

| 处理<br>Treatment        | 根系表面 Root surface |                          |                  | 蛭石表面 Vermiculite surface |                          |                      |                  |                          |
|------------------------|-------------------|--------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|------------------|--------------------------|
|                        | 交换态 Fe<br>EXC-Fe  | 非晶态 Fe<br>Noncrystalline | 交换态 Cd<br>EXC-Cd | 交换态 Fe<br>EXC-Fe         | 非晶态 Fe<br>Noncrystalline | 晶态 Fe<br>Crystalline | 交换态 Cd<br>EXC-Cd | 非晶态 Cd<br>Noncrystalline |
|                        | /(g/kg)           | Fe/(g/kg)                | /(mg/kg)         | /(g/kg)                  | Fe/(g/kg)                | Fe/(g/kg)            | /(mg/kg)         | Cd/(mg/kg)               |
| F <sub>增 Cd</sub>      | 2.404             | 3.552                    | 36.598 **        | 1.922                    | 268.315 **               | 187.726 **           | 0.394            | 12.503 **                |
| F <sub>增 Fe</sub>      | 21.355 **         | 0.402                    | 0.092            | 1.75                     | 261.777 **               | 178.171 **           | 3.294            | 5.021 *                  |
| F <sub>pH</sub>        | 14.428 **         | 2.293                    | 8.952 **         | 0.697                    | 0.074                    | 0.97                 | 3.998 *          | 0.098                    |
| F <sub>增 Cd × pH</sub> | 0.633             | 0.254                    | 8.836 **         | 1.016                    | 0.896                    | 1.2                  | 0.312            | 6.038 **                 |
| F <sub>增 Fe × pH</sub> | 4.228 *           | 3.225                    | 6.004 **         | 1.058                    | 1.01                     | 0.835                | 1.038            | 6.803 **                 |

根表面由根表皮细胞组成,细胞壁上有多种官能团,细胞膜上则有养分通道,故根表面兼有养分吸附和吸收的双重功能。水稻为应对不同的根际环境,可在不同 Fe、Cd 浓度处理下,通过根系分泌物改变根际 Eh、pH 值和调控溶液 Fe、Cd 浓度,使溶液 Fe、Cd 既可在氧化势和酸度较强的根表吸附沉积,又能随质流进入根内。对照中水稻地上部和根内 Fe 积累量分别为(5.79±0.48)、(7.47±0.58) mg/盆,增 Cd 处理分别为(4.48±1.25)、(7.05±1.03) mg/盆,增 Fe 处理分别为(3.98±0.79)、(6.73±0.41) mg/盆。对照中水稻地上部和根内 Cd 积累量分别为(12.09±1.18)、(2.88±0.37) μg/盆,增 Cd 处理分别为(11.76±1.28)、(2.71±0.59) μg/盆,增 Fe 处理分别为(8.66±0.96)、(1.64±0.14) μg/盆。结合根表吸附数据(表 4)可知,增 Cd 处理比对照增加了 Cd、Fe 在根表的吸附、并减少 Cd、Fe 的摄入;增 Fe 处理则在降低根表面 Fe、Cd 吸附的同时减少 Fe、Cd 吸收。这些结果与水稻根表面应对 Fe、Cd 胁迫的功能有关。

#### 4 结论

**4.1** 水稻根际 pH 值, Eh 和 pe + pH 与处理 pH 值间分别存在显著的线性和二次回归关系。处理 pH 值在 5.5—6.5 时, Eh 和 pe + pH 分别达到 600 mV 和 14.8 的最高值,氧化性最强。营养液不同 Fe、Cd 浓度也影响着根际的 pH 值、Eh,与对照相比,增 Cd 处理可降低 Eh 和提高 pH 值,增 Fe 处理可增加 Eh 和降低 pH 值。

**4.2** 根表与蛭石对 Fe、Cd 的吸附机制不同。蛭石表面吸附 Fe 以晶形 Fe 为主,占到总沉积 Fe 的 73%—87%,水稻根表沉积 Fe 以非晶 Fe 为主,占总沉积 Fe 的 91%—95%,它们与处理 pH 值、根际 Eh 和 pe + pH 均有显著的二次或线性线回归关系。

**4.3** 不同浓度处理通过根际 Eh、pH 值的升降来影响根表 Fe、Cd 吸附。与对照相比,增 Fe 和增 Cd 处理都对水稻生长产生胁迫。增 Cd 处理表现为降低根际 Eh 和升高 pH 值来降低溶液 Cd 浓度,在增加根表 Cd 吸附量的同时减少 Cd 的吸收;增 Fe 处理升高根际 Eh 和降低 pH 值,虽带来溶液 Fe、Cd 浓度的增加,但由于 H<sup>+</sup> 的竞争作用,根表 Fe、Cd 吸附量和水稻 Fe、Cd 的吸收量都有所减少。这是水稻应对 Fe、Cd 浓度胁迫的生理反应。

#### References:

- [ 1 ] Zheng S J, Hu A T. Effects of flooding on the transformation of cadmium fractions in contaminated soils. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15 (2): 142-147.
- [ 2 ] Wei S Q, Qing C L, Mu Z J. Transport of cadmium in purple soil under simulated submerging conditions and the influencing factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(6): 600-700.
- [ 3 ] Ge Y, Li Y C, Zhou C S, Zong L G. Preliminary investigation on adsorption and desorption of Cd in soil with different reduction states. *Ecology and Environment*, 2006, 15(4): 73-734.
- [ 4 ] Chuan M C, Shu G Y, Liu J C. Solubility of heavy metals in a contaminated soil: effects of redox potential and pH. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1996, 90(3/4): 543-556.
- [ 5 ] Kashem M A, Singh B R. The effect of fertilizer additions on the solubility and plant-availability of Cd, Ni and Zn in soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 62(3): 287-296.
- [ 6 ] Crowder A A, Macfies S M. Seasonal deposition of ferric hydroxide plaque on roots of wetland plants. *Canadian Journal of Botany*, 1986, 64(9):

2120-2124.

- [ 7 ] Fu Y Q, Yu Z W, Cai K Z, Shen H. Mechanisms of iron plaque formation on root surface of rice plants and their ecological and environmental effects: a review. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1527-1534.
- [ 8 ] Liu M C, Li H F, Xia L J, Yang L S. Differences of cadmium uptake by rice genotypes and relationship between the iron oxide plaque and cadmium uptake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(5): 592-596.
- [ 9 ] 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. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(3): 314-320.
- [ 10 ] Liu J G, Cao C X, Wong M H, Zhang Z J, Chai Y H. Variations between rice cultivars in iron and manganese plaque on roots and the relation with plant cadmium uptake. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(7): 1067-1072.
- [ 11 ] Liu H J, Zhang J L, Peter C, Zhang F S. Influence of iron plaque on uptake and accumulation of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in soil. *Science of the Total Environment*, 2008, 394(2/3): 361-368.
- [ 12 ] Weiss J V, Emerson D, Megonigal J P. Rhizosphere iron (III) deposition and reduction in a *Juncus effusus* L.-dominated wetland. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1861-1870.
- [ 13 ] Ji X H, Liang Y C, Lu Y H, Liao Y L, Nie J, Zheng S X, Li Z J. The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice growing in polluted paddy soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3930-3939.
- [ 14 ] Chen L N, Ge Y, Zhang C H, Zhou Q S. Effect of submergence on the bioavailability of Cd in a Red Soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11): 2333-2337.
- [ 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. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 48(1): 89-100.
- [ 16 ] Salirian R C, Leigh A S, Edward D B, Richard T B. A sequential extraction procedure for acid sulfate soils: partitioning of iron. *Geoderma*, 2010, 155(3/4): 224-230.
- [ 17 ] Tao S, Chen Y J, Xu F L, Cao J, Li B G. Changes of copper speciation in maize rhizosphere soil. *Environmental Pollution*, 2003, 122(3): 447-454.
- [ 18 ] Song A L, Li Z J, Zhang J, Xue G F, Fan F L, Liang Y C. 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. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(1): 74-83.
- [ 19 ] Zeng F R. Physiological and Molecular Mechanisms of Chromium Stress and Tolerance in Rice [D]. Zhejiang: Zhenjiang University, 2010.
- [ 20 ] Ma J F, Zheng S J, Matsumoto H. Specific secretion of citric acid induced by Al stress in *Cassia tora* L. *Plant Cell Physiology*, 1997, 38(9): 1019-1025.
- [ 21 ] Zhu X F, Zheng C, Hu Y T, Jiang T, Liu Y, Dong N Y, Yang J L, Zheng S J. Cadmium-induced oxalate secretion from root apex is associated with cadmium exclusion and resistance in *Lycopersicon esulentum*. *Plant Cell and Environment*, 2011, 34(7): 1055-1064.
- [ 22 ] David L J. Organic acids in the rhizosphere—a critical review. *Plant and Soil*, 1998, 205(1): 25-44.
- [ 23 ] Felix D D, Donald A P. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil*, 2002, 245(1): 35-37.
- [ 24 ] Uren N C. Types, Amounts, and Possible Functions of Compounds Released into the Rhizosphere by Soil-Grown Plants. *The Rhizosphere*: CRC Press, 2007: 1-21.
- [ 25 ] Li Q K. Paddy Soils in China. Beijing: Science Press, 1992: 413-421.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 郑绍建, 胡霁堂. 淹水对污染土壤镉形态转化的影响. *环境科学学报*, 1995, 15(2): 142-147.
- [ 2 ] 魏世强, 青长乐, 木志坚. 模拟淹水条件下紫色土镉的释放特征及影响因素. *环境科学学报*, 2002, 22(6): 600-700.
- [ 3 ] 葛滢, 李义纯, 周权锁, 宗良纲. 淹水还原作用下土壤 Cd 的吸附与解吸特征的初步探讨. *生态环境*, 2006, 15(4): 73-734.
- [ 7 ] 傅友强, 于智卫, 蔡昆争, 沈宏. 水稻根表铁膜形成机制及其生态环境效应. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1527-1534.
- [ 8 ] 刘敏超, 李花粉, 夏立江, 杨林书. 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. *环境科学学报*, 2000, 20(5): 592-596.
- [ 13 ] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 郑圣先, 李兆军. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理. *生态学报*, 2007, 27(9): 3930-3939.
- [ 14 ] 陈莉娜, 葛滢, 张春华, 周权锁. 淹水还原作用对红壤 Cd 生物有效性的影响. *农业环境科学学报*, 2009, 28(11): 2333-2337.
- [ 19 ] 曾凡荣. 水稻铬毒害和耐性的生理与分子机理研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2010.
- [ 25 ] 李庆逵. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992: 413-421.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 14 Jul. ,2013 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

A review of the researches on *Alectoris* partridge ..... SONG Sen, LIU Naifa (4215)

### Autecology & Fundamentals

Effects of precipitation and nitrogen addition on photosynthetically eco-physiological characteristics and biomass of four tree seedlings in Gutian Mountain, Zhejiang Province, China ..... YAN Hui, WU Qian, DING Jia, et al (4226)

Effects of low temperature stress on physiological-biochemical indexes and photosynthetic characteristics of seedlings of four plant species ..... SHAO Yiruo, XU Jianxin, XUE Li, et al (4237)

Decomposition characteristics of maize roots derived from different nitrogen fertilization fields under laboratory soil incubation conditions ..... CAI Miao, DONG Yanjie, LI Baijun, et al (4248)

The responses of leaf osmoregulation substance and protective enzyme activity of different peanut cultivars to non-sufficient irrigation ..... ZHANG Zhimeng, SONG Wenwu, DING Hong, et al (4257)

Interannual variation of soil seed bank in *Picea schrenkiana* forest in the central part of the Tianshan Mountains ..... LI Huadong, PAN Cunde, WANG Bing, et al (4266)

Physiological & ecological effects of companion-planted grow seedlings of two crops in the same hole ..... LI Lingli, GUO Hongxia, HUANG Genghua, et al (4278)

Effects of magnesium, manganese, activated carbon and lime and their interactions on cadmium uptake by wheat ..... ZHOU Xiangyu, FENG Wenqiang, QIN Yusheng, et al (4289)

Effects of increased concentrations of gas CO<sub>2</sub> on mineral ion uptake, transportation and distribution in *Phyllostachys edulis* ..... ZHUANG Minghao, CHEN Shuanglin, LI Yingchun, et al (4297)

Effects of pH, Fe and Cd concentrations on the Fe and Cd adsorption in the rhizosphere and on the root surfaces of rice ..... LIU Danqing, CHEN Xue, YANG Yazhou, et al (4306)

Effects of low-light stress on maize ear development and endogenous hormones content of two maize hybrids (*Zea mays* L.) with different shade-tolerance ..... ZHOU Weixia, LI Chaohai, LIU Tianxue, et al (4315)

Effects of maize || peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize ..... JIAO Nianyuan, NING Tangyuan, YANG Mengke, et al (4324)

Cloning root system distribution and architecture of different forest age *Populus euphratica* in Ejina Oasis ..... HUANG Jingjing, JING Jialin, CAO Dechang, et al (4331)

Impact of vegetation interannual variability on evapotranspiration ..... CHEN Hao, ZENG Xiaodong (4343)

Mating behavior of *Pachycrepoides vindemmiae* and the effects of male mating times on the production of females ..... SUN Fang, CHEN Zhongzheng, DUAN Bisheng, et al (4354)

Component analysis and bioactivity determination of fecal extract of *Locusta migratoria tibetensis* (Chen) ..... WANG Haijian, LI Yili, LI Qing, et al (4361)

Effects of different rice varieties on larval development, survival, adult reproduction, and flight capacity of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) ..... LI Xia, XU Xiuxiu, HAN Lanzhi, et al (4370)

### Population, Community and Ecosystem

Genetic structure of the overwintering Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Guenée) collections in Shandong of China based on *mtCOII* gene sequences ..... LI Lili, YU Yi, GUO Dong, TAO Yunli, et al (4377)

The structure and diversity of insect community in Taihu Wetland ..... HAN Zhengwei, MA Ling, CAO Chuanwang, et al (4387)

Annual variation pattern of phytoplankton community at the downstream of Xijiang River ..... WANG Chao, LAI Zini, LI Xinhui, et al (4398)

Effect of species dispersal and environmental factors on species assemblages in grassland communities ..... WANG Dan, WANG Xiao'an, GUO Hua, et al (4409)

- Cyanobacteria diversity in biological soil crusts from different erosion regions on the Loess Plateau: a preliminary result ..... YANG Lina, ZHAO Yunge, MING Jiao, et al (4416)

### **Landscape, Regional and Global Ecology**

- Zoning for regulating of construction land based on landscape security pattern ..... WANG Siyi, OU Minghao (4425)
- Fragmentation process of wetlands landscape in the middle reaches of the Heihe River and its driving forces analysis ..... ZHAO Ruifeng, JIANG Penghui, ZHAO Haili, et al (4436)
- Analysis on grassland degradation in Qinghai Lake Basin during 2000—2010 ..... LUO Chengfeng, XU Changjun, YOU Haoyan, et al (4450)
- Research on soil erosion based on Location-weighted landscape index (LWLI) in Guanchuanhe River basin, Dingxi, Gansu Province ..... LI Haifang, WEI Wei, CHEN Jin, et al (4460)
- Effects of host density on parasitoids and hyper-parasitoids of cereal aphids in different agricultural landscapes ..... GUAN Xiaoqing, LIU Junhe, ZHAO Zihua (4468)
- Effects of interactive CO<sub>2</sub> concentration and precipitation on growth characteristics of *Stipa breviflora* ..... SHI Yaohui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (4478)

### **Resource and Industrial Ecology**

- Eco-service efficiency assessment method of urban land use: a case study of Changzhou City, China ..... YANG Wenrui, LI Feng, WANG Rusong, et al (4486)
- Changes in phosphorus consumption and its environmental loads from food by residents in Xiamen City ..... WANG Huina, ZHAO Xiaofeng, TANG Lina, et al (4495)

### **Research Notes**

- Intercropping enhances the farmland ecosystem services ..... SU Benying, CHEN Shengbin, LI Yonggeng, et al (4505)
- Assessment indicator system of eco-industry in mining area ..... WANG Guangcheng, WANG Huanhuan, TAN Lingling (4515)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 骆世明

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 14 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 14 (July, 2013)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                 |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编           | 王如松                                                                                                                | Editor-in-chief | WANG Rusong                                                                                                                                                                     |
| 主 管           | 中国科学技术协会                                                                                                           | Supervised by   | China Association for Science and Technology                                                                                                                                    |
| 主 办           | 中国生态学学会<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                 |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                        |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail:journal@cspg.net                          | Distributed by  | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel:(010)64034563<br>E-mail:journal@cspg.net                                                |
| 订 购           | 全国各地邮局                                                                                                             | Domestic        | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                 |
| 国外发行          | 中国国际图书贸易总公司<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China                                                                                      |
| 广告经营<br>许 可 证 | 京海工商广字第 8013 号                                                                                                     |                 |                                                                                                                                                                                 |



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元