

不同生育期水稻根表铁膜的形成及其对水稻吸收和转运 Cd 的影响

胡莹, 黄益宗*, 黄艳超, 刘云霞

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 采用盆栽试验, 研究不同生育期水稻根表铁膜的形成及其对水稻吸收和转运 Cd 的影响。结果表明, 水稻根表铁膜的形成受到不同品种和不同生育期影响。随着生育期的延长, 两种水稻(YD6 和 NK57)根表铁膜形成量均呈下降趋势。与分蘖期相比, YD6 和 NK57 根表铁膜量孕穗期分别减少 82.9% 和 44.4%, 成熟期分别减少 85.2% 和 82.52%。两种水稻根系和茎叶 Cd 含量随着水稻生育期的延长而增加。YD6 籽粒 Cd 含量显著高于 NK57。Cd 在水稻植株的富集系数和分配比率随着不同品种和生育期产生较大变化。YD6 品种从根表铁膜和根系向籽粒转运 Cd 的能力显著大于 NK57。水稻成熟期, 根表铁膜量与茎叶和籽粒 Cd 含量呈极显著的负相关($P < 0.01$), 说明根表铁膜形成可抑制 Cd 向水稻地上部转运。研究结果暗示可通过不同生育期的管理调节水稻根表铁膜的形成, 减少 Cd 向稻谷中转运, 从而降低 Cd 对人体健康的危害。

关键词: 水稻; 生育期; Cd; 根表铁膜; 土壤

中图分类号: X503.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)03-0432-06 doi:10.11654/jaes.2013.03.004

Formation of Iron Plaque on Root Surface and Its Effect on Cd Uptake and Translocation by Rice (*Oryza sativa* L.) at Different Growth Stages

HU Ying, HUANG Yi-zong*, HUANG Yan-chao, LIU Yun-xia

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Formation of iron plaque on root surface and its effect on Cd uptake and translocation by rice at different growth stages were investigated in pot experiment. The results showed that the formation of iron plaque on root surface was affected by different rice cultivars and growth stages, the amount of iron plaque of two rice cultivars (YD6 and NK57) decreased with the increase of growing stages. Compared to tillering stage, the amount of iron plaque for YD6 and NK57 decreased 82.9% and 44.4% at booting stage, and 85.2% and 82.52% at maturing stage, respectively. Both Cd concentration in root and shoot of the two rice cultivars increased with the increase of growing stages. Cd concentration in grain of YD6 was significant higher than that of NK57. Bio-accumulation factor and distribution ratio of Cd varied with different rice cultivars and growing stages. The capacity of Cd translocation from iron plaque and root to grain for YD6 was significant greater than that for NK57. At maturing stage, there was a significant negative correlation between the amount of iron plaque and Cd concentration in shoot or in grain ($P < 0.01$), indicating that the formation of iron plaque could inhibit Cd transferring from root to shoot and grain. The results implied that Cd transfer to rice grain could be reduced by regulating the formation of iron plaque at different growing stages, and Cd damage to human health would be mitigated.

Keywords: rice; growth stage; Cd; iron plaque; soil

收稿日期: 2013-01-10

基金项目: 国家重金属污染治理专项“广西环江县大环江流域土壤重金属污染治理工程项目”、中国科学院院地合作项目“江西省典型矿区及周边土壤重金属污染特征及其联合修复技术研发”; 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-001-05)

作者简介: 胡莹(1963—), 女, 吉林公主岭人, 助理研究员, 主要从事环境生物学研究。E-mail: huying@rcees.ac.cn

* 通信作者: 黄益宗 E-mail: hyz@rcees.ac.cn

随着工农业的快速发展,人为活动导致 Cd 等重金属大量地被释放到环境中,这主要包括工业废水的排放、污泥农用、废水灌溉、污染粉尘沉降、化肥和农药的施用等造成农田土壤 Cd 等有毒重金属含量急剧增加。土壤重金属不易被微生物分解,但可被带电的土壤胶体颗粒所吸附,因此表现为持久性的污染特征^[1]。中国是水稻的主要生产区,也是大米的消费区,全国 60%以上的人口以稻米为主食,Cd 通过食物链进入人体而对人体健康产生危害已成为全球非常突出且急需解决的环境问题之一。

水稻长期生长在淹水环境中,其根表可自然形成铁膜^[2-3],普遍认为铁膜形成的机理是由于在厌氧土壤中二价铁离子(Fe^{2+})被水稻根系分泌的氧气和氧化性物质氧化成三价铁并沉积在水稻根表及质外体而形成铁氧化膜^[4]。影响水稻根表铁形成的因素主要包括:土壤溶液中 Fe^{2+} 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、pH 值、Eh 值、生长季节、温度和淹水时间长短等^[5-6]。此外,铁氧化细菌和甲烷氧化细菌对于根表铁膜的形成也起到了一定的作用^[7]。根表铁氧化膜属于两性胶体,能够通过吸附和共沉淀等作用影响阴、阳离子在土壤中的化学行为和生物有效性,因此根表铁膜对植物吸收和转运 As 等重金属的影响研究受到了广泛的关注^[8-10]。

近年来,关于水稻根表铁膜对 Cd 的吸收积累研究也有一些报道^[11-14],但这些研究均主要关注于水稻的某一个生育期,大多只进行水稻苗期的研究。本研究探讨水稻整个生育期不同生长阶段根表铁膜的形成及其对水稻吸收和转运 Cd 的影响,为重金属污染地区水稻的安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试水稻

两种水稻(*Oryza sativa* L.)品种 YD6 和 NK57 来自南京农业大学。挑选籽粒饱满、均匀的水稻种子用 30%的 H_2O_2 消毒 10 min,再用去离子水清洗 2~3 次后播种到湿润的珍珠岩中培养 3 周。选取生长一致的水稻苗移栽到装有 1/3 强度营养液的 PVC 管(直径 7.5 cm,高 14 cm)中,每盆种植一株水稻苗,每周换一次营养液。营养液配方:5.0 mmol·L⁻¹ NH_4NO_3 ,2.0 mmol·L⁻¹ K_2SO_4 ,4.0 mmol·L⁻¹ CaCl_2 ,1.5 mmol·L⁻¹ $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,1.3 mmol·L⁻¹ KH_2PO_4 ,50.0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{Fe}(\text{II})$ -EDTA,10.0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_3BO_3 ,1.0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$

$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,1.0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$,5.0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$,0.5 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,0.2 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。用 0.1 mol·L⁻¹ KOH 或 HCl 将 pH 调至 5.5。待水稻苗生长至 5 片叶时,选取生长一致的水稻苗进行盆栽试验。

1.2 供试土壤

土壤采自湖南省株州市新马村 Cd 污染稻田,土壤经风干、研磨、过 2 mm 筛,保存备用。土壤基本理化性质及土壤中重金属含量见表 1,土壤中 Cd 的含量超过了国家土壤环境质量二级标准。土壤中 Cd 和 Fe 全量采用王水-高氯酸消煮,ICP-OES(Perkin Elmer Optima 2000 DV)测定。空白和标准物质 GBW07402(国家标准物质中心)的处理与样品同步进行,以确保测定的准确度。

表 1 供试土壤的基本理化性质及重金属含量

Table 1 Basic physical and chemical properties and total Fe, Cd concentrations in the tested soil

土壤性质	测定值
pH 值(H_2O)	5.80
有机质 OM/g·kg ⁻¹	4.43
阳离子交换容量 CEC/cmole·kg ⁻¹	4.23
总铁含量/g·kg ⁻¹	23.20
总镉含量/mg·kg ⁻¹	1.03

1.3 试验处理

两个水稻品种:YD6 和 NK57,每个品种种植 12 盆,共 24 盆。每盆装土 4 kg,淹水老化平衡 4 周。水稻移栽前,按每公斤土 200 mg N 的尿素、133 mg K_2O 的 K_2SO_4 及 150 mg P 的 CaHPO_4 施用底肥。挑选生长一致的水稻幼苗移栽到盆中,每盆种植 2 株水稻苗。水稻置于人工气候室中培养,生长条件:光/暗为 14/10 h,温度为 28/20 $^{\circ}\text{C}$,光照强度为 260~350 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,相对湿度为 60%~70%。在整个试验期间,盆内土壤始终保持淹水状态。在水稻分蘖期、孕穗期和成熟期中,每种水稻分别收获 4 盆用于样品的分析和测定。

1.4 样品的制备与分析

植株收获后,水稻根系上的铁膜用 DCB(dithionite-citrate-bicarbonate)法浸提:首先将水稻根系用自来水洗净,吸干水分后从基部将根剪下,放到 100 mL 的烧杯中,置入 0.03 mol·L⁻¹ 柠檬酸钠($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)和 0.125 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠(NaHCO_3)30 mL 的混合溶液中 10 min,再放入 1 g 保险粉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$),混合均匀后,在室温下(20~25 $^{\circ}\text{C}$)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 ICP-OES (Perkin Elmer Optima 2000 DV) 测定其中的 Fe 浓度, ICP-MS (Agilent 7500a) 测定样品中 Cd 浓度。

经 DCB 浸提后的根系、水稻茎叶和籽粒于 70 ℃ 烘干至恒重, 然后将水稻茎叶、根系和籽粒分别磨碎、混匀。称取 0.25 g 左右的样品放入 100 mL 的聚四氟乙烯消解罐中, 加入 5 mL 优级纯的浓硝酸后, 放入微波加速反应系统中 (MARS5, CEM Microwave Technology Ltd. USA) 进行消解。具体消解程序: 首先加热至 120 ℃, 保持 5 min, 然后将温度升至 160 ℃, 保持 15 min。同时加入标准物质 (GBW07605 国家标准物质中心) 对整个消化过程和分析测试过程进行质量控制。消化好的样品用高纯水定容至 25 mL, 过滤后用 ICP-MS (Agilent 7500a) 测定 Cd 浓度。

1.5 数据分析

水稻根表铁膜、根系和茎叶向籽粒转移 Cd 的能力用转运系数 (TF) 表示。

$$TF_x = C_{\text{seed-Cd}} / C_{x-\text{Cd}}$$

式中: x 分别代表 DCB、root 和 shoot, TF_x 分别表示 DCB、根系和茎叶向籽粒转移 Cd 的系数, $C_{\text{seed-Cd}}$ 表示籽粒中 Cd 浓度, $C_{x-\text{Cd}}$ 分别表示 DCB、根系和茎叶中 Cd 浓度。

植物对 Cd 的富集能力用富集系数 (BAF) 表示。

$$BAF_y = C_{y-\text{Cd}} / C_{\text{soil-Cd}}$$

式中: y 分别代表 DCB、root、shoot 和 seed, BAF_y 分别表示 DCB、根系、茎叶和籽粒 Cd 的富集系数, $C_{y-\text{Cd}}$ 分别表示 DCB、根系、茎叶和籽粒 Cd 浓度, $C_{\text{soil-Cd}}$ 表示土壤中 Cd 浓度。

使用统计软件 SPSS11.5 对试验数据进行方差分析和多重比较。

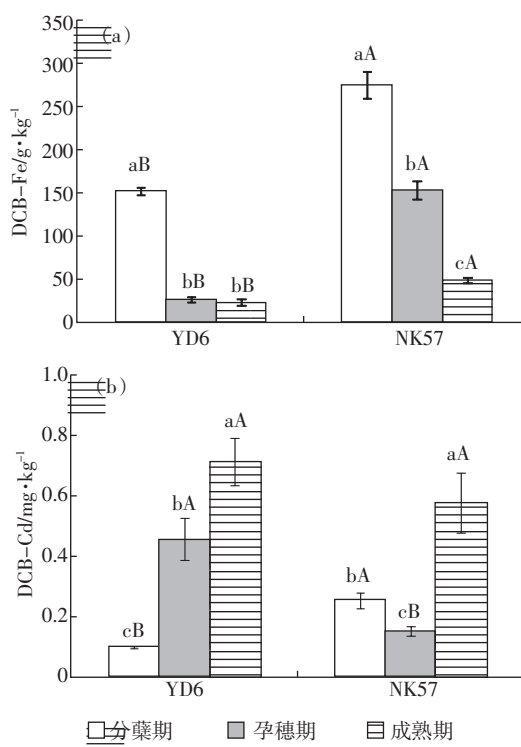
2 结果与分析

2.1 水稻根表铁膜形成及其吸附的 Cd 量

水稻根表铁膜形成量 (以 DCB-Fe 含量表示) 在不同生育期、不同品种之间差异显著 ($P < 0.05$)。图 1a 显示, 随着生育期的延长, 两种水稻根表铁膜形成量均呈现出下降趋势。水稻品种 YD6 根表铁膜量在孕穗期和成熟期分别比分蘖期减少 82.9% 和 85.2%, NK57 分别减少 44.4% 和 82.52%。品种 YD6 根表铁膜形成量在孕穗期和成熟期没有显著差异, 而 NK57 根表铁膜量在三个不同生育期 (分蘖期、孕穗期和成熟期) 之间差异显著 ($P < 0.05$)。两种水稻品种形成根表铁膜差异较大, NK57 在三个生育期 (分蘖期、孕穗

期和成熟期) 中根表铁膜形成量均显著高于 YD6 ($P < 0.05$), 分别是 YD6 的 1.8、5.9 倍和 2.2 倍。

水稻根表铁膜吸附 Cd 量在不同生育期、不同品种间差异显著 ($P < 0.05$, 图 1b)。比较不同的生育期, YD6 品种铁膜吸附 Cd 量大小为: 成熟期 > 孕穗期 > 分蘖期; NK57 品种铁膜吸附 Cd 量: 成熟期 > 分蘖期 > 孕穗期。比较不同的水稻品种, 分蘖期: NK57 品种铁膜吸附 Cd 量高于 YD6; 孕穗期: YD6 高于 NK57; 成熟期: YD6 虽然高于 NK57, 但差异不显著。



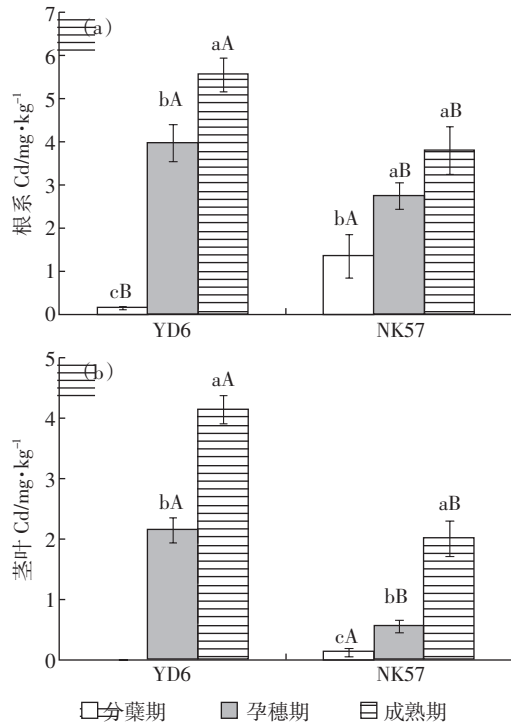
不同小写字母表示同一品种不同生育期 $P < 0.05$ 差异显著, 不同大写字母表示同一生育期不同品种 $P < 0.05$ 差异显著
Different small letters refer to significant differences at $P < 0.05$ level between growth stages, different capital letters refer to significant differences at $P < 0.05$ level between cultivars

图 1 不同生育期水稻根表铁膜的 Fe 和 Cd 含量

Figure 1 Concentrations of Fe, Cd in iron plaque at different growth stages of rice

2.2 水稻根系和茎叶 Cd 含量

生长在重金属污染土壤的水稻, 其根系吸收积累 Cd 量随着水稻生育期的延长而增加 (图 2a)。对于不同品种, YD6 根系吸收积累 Cd 的增长率要大于 NK57, 前一品种孕穗期和成熟期根系 Cd 含量分别比分蘖期增加 27.5 倍和 38.8 倍, 后一品种分别增加 1.0 倍和 1.8 倍。分蘖期 NK57 根系 Cd 含量显著高于



不同小写字母表示同一品种不同生育期 $P<0.05$ 差异显著,
不同大写字母表示同一生育期不同品种 $P<0.05$ 差异显著

Different small letters refer to significant differences between growth stages, different capital letters refer to significant differences at $P<0.05$ level between cultivars

图 2 不同生育期水稻根系(a)和茎叶(b)中的 Cd 含量

Figure 2 Concentrations of Cd in root(a) and shoot(b) at different growth stages of rice

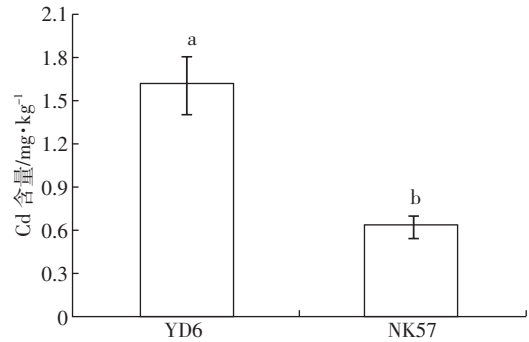
YD6 ($P<0.05$), 到了孕穗期和成熟期, YD6 根系 Cd 含量却显著高于 NK57 ($P<0.05$)。

不同生育期水稻茎叶积累 Cd 的变化趋势与根系相似, 即随着水稻生育期的延长而增加(图 2b)。水稻品种 YD6 茎叶 Cd 含量从分蘖期未检测到 Cd ($0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 增加到孕穗期 $2.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 和成熟期 $4.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd。品种 NK57 茎叶 Cd 含量增加幅度比 YD6 低, 从分蘖期 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 到孕穗期 $0.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 和成熟期 $2.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd。对于不同品种, 分蘖期 NK57 茎叶 Cd 含量显著高于 YD6 ($P<0.05$), 而到了孕穗期和成熟期, YD6 茎叶 Cd 含量却显著高于 NK57 ($P<0.05$)。

2.3 Cd 从水稻根表铁膜、根系和茎叶向籽粒中的转运

图 3 显示, 在重金属污染土壤中种植的水稻, 其籽粒 Cd 含量在不同品种之间差异较大。其中, YD6 籽粒中 Cd 含量显著高于 NK57 ($P<0.05$), 是后者的 2.6 倍。

水稻根表铁膜、根系和茎叶向籽粒转运 Cd 的能力可用转运系数表示(表 2)。经统计分析表明, YD6



不同小写字母表示不同品种 $P<0.05$ 差异显著

Different small letters refer to significant differences between cultivars

图 3 水稻籽粒中的 Cd 含量

Figure 3 Concentrations of Cd in grain of rice

表 2 Cd 由水稻根表铁膜、根系和茎叶向籽粒转运的系数

Table 2 Translocation factors of Cd from iron plaque, root and

shoot to seed in mature stage

转运系数	YD6	NK57
TF_{DCB}	$2.54 \pm 0.02a$	$1.12 \pm 0.09b$
TF_{root}	$0.29 \pm 0.04a$	$0.17 \pm 0.01b$
TF_{shoot}	$0.39 \pm 0.06a$	$0.33 \pm 0.06a$

注: 不同小写字母表示不同品种 $P<0.05$ 差异显著。

Note: Different small letters refer to significant differences between cultivars.

根表铁膜和根系向籽粒转运 Cd 的能力均显著高于 NK57 ($P<0.05$), 但由茎叶向籽粒转运 Cd 的能力品种间差异不显著。

2.4 Cd 在水稻不同部位的富集和分配比率

计算 Cd 在水稻铁膜、根系、茎叶和籽粒的富集系数(表 3)。从表中看出水稻各部位不同生育期富集

表 3 Cd 在水稻不同部位的富集系数

Table 3 Bio-accumulation factor of Cd in iron plaque, root, shoot and grain of different growth stages

部位	生育期	YD6	NK57
铁膜	分蘖期	$0.09 \pm 0.00b$	$0.25 \pm 0.03a$
	孕穗期	$0.49 \pm 0.06ba$	$0.15 \pm 0.02b$
	成熟期	$0.69 \pm 0.00a$	$0.56 \pm 0.09a$
根系	分蘖期	$0.14 \pm 0.03b$	$1.31 \pm 0.48a$
	孕穗期	$3.59 \pm 0.47a$	$2.66 \pm 0.29b$
	成熟期	$5.39 \pm 0.37a$	$3.69 \pm 0.52b$
茎叶	分蘖期	$0.00 \pm 0.00b$	$0.12 \pm 0.06a$
	孕穗期	$2.08 \pm 0.21a$	$0.54 \pm 0.09b$
	成熟期	$4.02 \pm 0.22a$	$1.95 \pm 0.29b$
籽粒	成熟期	$1.56 \pm 0.19a$	$0.60 \pm 0.07b$

注: 不同小写字母表示不同品种 $P<0.05$ 差异显著。

Note: Different small letters refer to significant differences between cultivars.

Cd 的大小为:成熟期>孕穗期>分蘖期(除品种 NK57 在铁膜中为成熟期>分蘖期>孕穗期外)。比较水稻不同部位的 Cd 富集系数,基本趋势为:根系>茎叶>籽粒>铁膜。对于不同品种,分蘖期 YD6 铁膜、根系和茎叶富集 Cd 均低于 NK57,而在孕穗期和成熟期则相反,表现为 YD6 铁膜、根系和茎叶富集 Cd 大于 NK57。另外,YD6 籽粒富集 Cd 的能力也显著高于 NK57($P<0.05$),约为 NK57 的 2.6 倍。

Cd 在水稻铁膜、根系、茎叶和籽粒中的分配比率见表 4。比较水稻不同生育期,铁膜中 Cd 的分配比率在分蘖期最高,根系中孕穗期最高和成熟期最低,而茎叶中成熟期最高和分蘖期最低;比较水稻不同部位,成熟期和孕穗期 Cd 的分配比率大小顺序:根系>茎叶>籽粒>铁膜,而分蘖期表现为:根系>铁膜>茎叶。比较两个水稻品种,在 3 个生育期中 NK57 根系 Cd 分配比率(53.7%~80.7%)显著高于 YD6(47.1%~59.6%)($P<0.05$),而在孕穗期和成熟期茎叶 Cd 分配比率则为 YD6(33.9%~35.3%)显著高于 NK57(14.8%~29.5%)($P<0.05$),籽粒 Cd 分配比率也表现为 YD6 显著高于 NK57($P<0.05$),前者为后者的 1.5 倍。

表 4 Cd 在水稻不同部位的分配比率(%)

Table 4 Distribution ratio of Cd in iron plaque, root, shoot and grain at different growth stages(%)

部位	生育期	YD6	NK57
铁膜	分蘖期	42.6±6.38a	18.8±4.18b
	孕穗期	8.19±0.40a	4.47±0.33b
	成熟期	5.94±1.98a	8.09±0.87a
根系	分蘖期	57.3±6.38b	75.6±3.19a
	孕穗期	59.6±3.11b	80.7±1.49a
	成熟期	47.1±2.85b	53.7±3.41a
茎叶	分蘖期	0.00±0.00b	5.58±1.80a
	孕穗期	33.9±2.41a	14.8±1.35b
	成熟期	35.3±2.76a	29.5±3.55b
籽粒	成熟期	13.6±1.52a	8.79±0.34b

注:不同小写字母表示不同品种 $P<0.05$ 差异显著。

Note: Different small letters refer to significant differences between cultivars.

3 讨论

本研究结果表明,两个水稻品种分蘖期根表铁膜的形成量均显著高于孕穗期和成熟期(图 1),可能是分蘖期是水稻营养生长的主要时期,水稻生长旺盛根系泌氧量大,导致根表铁膜形成量较大,而随着生育期的延长,水稻根系供应氧能力下降,其形成铁氧化

物被还原,或根系老化分解导致铁膜退化的原因造成^[15]。NK57 形成的铁膜量在三个生育期中分别是 YD6 的 1.8、5.9 倍和 2.2 倍,说明不同水稻品种根表铁膜的形成量具有很大差异,这与以往的文献报道结果相一致^[16-17]。

成熟期水稻根表铁膜量显著低于分蘖期(图 1a),但铁膜中 Cd 含量在成熟期却显著高于分蘖期(图 1b),说明铁膜对 Cd 的吸附不仅仅由铁膜量决定,可能还与铁膜的老化程度有关。图 2 显示,分蘖期 NK57 根系和茎叶 Cd 含量显著高于 YD6 ($P<0.05$),而到了孕穗期和成熟期,YD6 却显著高于 NK57 ($P<0.05$)。通过对不同生育期水稻根表铁膜量与根系、茎叶和籽粒中 Cd 含量的相关性分析(表 5),表明水稻分蘖期根表铁膜量与根系和茎叶 Cd 含量呈显著的正相关关系($r=0.848、0.758,P<0.05$),而孕穗期和成熟期水稻根表铁膜量与茎叶 Cd 含量呈显著的负相关关系($r=-0.890、-0.946,P<0.01$),水稻根表铁膜量与籽粒 Cd 含量也呈显著的负相关性($r=-0.839,P<0.05$)。说明分蘖期根表铁膜形成促进了水稻根系和茎叶 Cd 的积累,而孕穗期和成熟期则抑制了 Cd 向地上部的转运。

比较 2 种水稻不同部位 Cd 的富集系数和分配比率,成熟期和孕穗期表现为:根系>茎叶>籽粒>铁膜(表 3 和表 4),说明铁膜并不是水稻吸收和积累 Cd 的最主要部位。Liu 等^[12]研究表明,根表铁膜较多的水稻其根系和茎叶 Cd 含量低于根表铁膜较少的水稻,但由于铁膜中 Cd 的分配比率只占 0.7%~15.6%,而根系中占 47.5%~72.8%,所以根系和茎叶中 Cd 含量的减少并不能仅仅归功于铁膜的作用,这与本研究的结果相一致。NK57 根系中 Cd 的分配比率(53.7%~80.7%)显著高于 YD6(47.1%~59.6%)($P<0.05$),而其籽粒中 Cd 的分配比率却显著低于 YD6($P<0.05$)。另外 YD6 由铁膜、根系和茎叶向籽粒中转运 Cd 的能力均大于 NK57(表 2),导致 YD6 籽粒中 Cd 含量显著大于 NK57

表 5 不同生育期水稻根表铁膜量与根系、茎叶和籽粒中 Cd 含量的相关性

Table 5 Correlation between amount of iron plaque and Cd in root, shoot and grain at different growth stages of rice

不同生育期铁膜量		根系-Cd	茎叶-Cd	籽粒-Cd
分蘖期	DCB-Fe	0.848**	0.758*	—
孕穗期	DCB-Fe	-0.481	-0.890**	—
成熟期	DCB-Fe	-0.717	-0.946**	-0.839*

* 表示 $P<0.05$ 差异显著,** 表示 $P<0.01$ 差异显著, $n=8$ 。

(图3)。说明水稻吸收积累Cd并不主要取决于铁膜量的多少,而主要与水稻品种对Cd的富集和转运能力有关。前人通过溶液培养试验得出,根系是阻碍水稻吸收和转运Cd的关键所在^[11,18]。但也有报道认为,在土壤中添加 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd时,根表铁膜成为Cd的缓冲层从而减少水稻根系对Cd的吸收^[13],Ye等^[14]的研究表明,在高Cd的溶液中,铁膜的存在抑制了香蒲对Cd的吸收及由根系向茎叶的转运。

4 结论

(1)水稻不同品种和不同生育期可影响根表铁膜的形成,随着生育期的延长,两种水稻(YD6和NK57)根表铁膜形成量均呈现出下降趋势。YD6根表铁膜量在孕穗期和成熟期分别比分蘖期减少82.9%和85.2%,NK57分别减少44.4%和82.5.2%。两种水稻的根表铁膜在成熟期均比分蘖期吸附更多的Cd。

(2)两种水稻根系和茎叶Cd含量随着水稻生育期的延长而增加。除了分蘖期外,孕穗期和成熟期中YD6根系和茎叶Cd含量均显著高于NK57,导致成熟期YD6籽粒Cd含量显著高于NK57。

(3)不同生育期,Cd在水稻不同部位的分配比率差异较大。YD6分蘖期Cd主要积累在水稻的根系(57.3%)和铁膜(42.6%)中,孕穗期积累在根系(59.6%)和茎叶(33.9%)中,成熟期也主要积累在根系(47.1%)和茎叶(35.3%)中。同样在NK57也可以看出相类似的规律。水稻成熟期中,根表铁膜量与茎叶和籽粒Cd含量呈极显著的负相关,说明根表铁膜形成可抑制Cd向地上部转运。

参考文献:

- [1] 肖相芬,张经廷,周丽丽,等. 中国水稻重金属镉与铅污染 GAP 栽培控制关键点分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(21): 130-136.
- [2] XIAO X F, ZHANG J T, ZHOU L L, et al. Analysis on key points for controlling cadmium and lead contamination during rice production[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(21): 130-136.
- [3] Bacha R E, Hossner L R. Characteristics of coating formed on rice roots as affected by Fe and Mn additions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41: 931-935.
- [4] Chen C C, Dixon J B, Turner F T. Iron plaque on rice roots, morphology and models of development[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44: 1113-1119.
- [5] Sundby B, Vale C, Cacador I, et al. Metal-rich concretions on the roots of salt marsh plants: mechanism and rate of formation[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43: 245-252.
- [6] 刘文菊,朱永官. 湿地植物根表的铁锰氧化物膜[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 358-363.
- [7] LIU W J, ZHU Y G. Iron and Mn plaques on the surface of roots of wet-land plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 358-363.
- [8] 刘侯俊,张俊伶,韩晓日. 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, HAN X R, et al. Influences of iron plaque on element uptake by plants and its affecting factors[J]. *Soil*, 2009, 41(3): 335-343.
- [10] Emerson D, Weiss J V, Megonigal J P. Iron-oxidizing bacteria are associated with ferric hydroxide precipitates (Fe-plaque) on the roots of wet land plants[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, 65(6): 2758-2761.
- [11] 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.
- [12] Zhang X K, Zhang F S, Mao D R. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa* L.): Phosphorus uptake[J]. *Plant and Soil*, 1999, 209: 187-192.
- [13] 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 Phytologist*, 2004, 162: 481-488.
- [14] 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: 314-320.
- [15] 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]. *Science of the Total Environment*, 2008, 394: 361-368.
- [16] 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.
- [17] Ye Z H, Cheung K C, Wong M H. Cadmium and nickel adsorption and uptake in cattail as affected by iron and manganese plaque on the root surface [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, 34: 2763-2778.
- [18] 傅友强,于智卫,蔡昆争,等. 水稻根表铁膜形成机制及其生态环境效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1527-1534.
- [19] FU Y Q, YU Z W, CAI K Z, et al. Mechanisms of iron plaque formation on root surface of rice plants and their ecological and environmental effects: A review [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1527-1534.
- [20] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A, et al. Do iron plaque and genotypes affect arsenate uptake and translocation by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture? [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(403): 1707-1713.
- [21] 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: 5730-5736.
- [22] Ye Z H, Bakera A J M, Wong M H, et al. Zinc, lead and cadmium accumulation and tolerance in *Typha latifolia* as affected by iron plaque on the root surface [J]. *Aquatic Botany*, 1998, 61: 55-67.