

# 不同时期施铁对水稻根表铁胶膜中铁镉含量及根系含镉量的影响

史 焜<sup>1,2</sup>, 张福锁<sup>1</sup>, 刘学军<sup>1</sup>, 张旭东<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学植物营养系, 北京 100094; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程开放实验室, 辽宁 沈阳 110015)

**摘要:** 采用镉污染土壤-河砂-营养液联合培养的方法, 研究了不同时期施铁对水稻根表铁胶膜中铁、镉含量的影响。选择水稻的分蘖、拔节、孕穗和灌浆 4 个时期, 进行分期和各生育时期都施加铁的处理, 在每个处理时期, 设 4 个亚铁( $\text{Fe}^{2+}$ )水平分别为 0、30、50 和  $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 研究根表施铁浓度与水稻根表铁胶膜数量和吸附镉量之间的关系。结果表明, 生长过程中取样测定的水稻根表铁胶膜铁含量, 除个别处理外, 都表现为施加铁的根表铁胶膜铁含量高于未施加铁的根表铁胶膜铁含量, 尤其是孕穗期, 随着施铁量的增加根表铁胶膜铁含量增加。成熟时测定, 灌浆期处理的水稻根表铁胶膜铁的含量变化比较大, 分蘖期和拔节期变化比较小。各生育时期都处理的根表铁胶膜铁含量以施加  $\text{Fe}^{2+} 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  最高。水稻根系的含镉量, 生长期间测定的结果是前期处理高于后期处理, 而收获时测定的结果是前期和后期处理的根系含镉量趋于一致。各生育期都处理的根系含镉量以施加  $\text{Fe}^{2+} 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  最高, 与根表铁胶膜中含铁量相符。

**关键词:** 根表铁胶膜; 镉污染土壤; 水稻生育时期; 吸镉量

**中图分类号:** X171.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-2043(2004)01-0006-07

## Effects of Different Periods Applied $\text{Fe}^{2+}$ and Concentrations on Fe and Cd Contents in Iron Plaque on Rice Root

SHI Kun<sup>1,2</sup>, ZHANG Fu-suo<sup>1</sup>, LIU Xue-jun<sup>1</sup>, ZHANG Xu-dong<sup>2</sup>

(1. Department of Plant Nutrition, CAU, Beijing 100094, China; 2. Lab. of Terrestrial Ecology. Process, Inst. of Applied Ecology, CAS, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** The effects of different  $\text{Fe}^{2+}$  concentrations (0, 30, 50 and  $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) on Fe and Cd contents in iron plaque of rice root at different growth stages (tillering, jointing, booting and filling) individually and continually were studied by a combined culture system of Cd-polluted soil-sand-nutrient solution. The results showed that Fe contents in iron plaque in the treatments receiving  $\text{Fe}^{2+}$  in nutrient solution culture were greater than that in control treatment ( $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) in solution culture, especially at both booting stage during rice growing period and after harvest. The change of Fe contents in iron plaque in the treatments at filling was greater than that in treatment at both tillering and jointing periods. The Cd contents in iron plaque of rice followed the similar trend like iron. Fe contents in iron plaque in the treatments at all stages from tillering to filling were the highest at  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  of  $\text{Fe}^{2+}$  concentration compared with other  $\text{Fe}^{2+}$  concentrations. Cd contents in rice root in the treatment at all stages from tillering to filling were well in accordance with Fe contents in iron plaque.

**Keywords:** iron plaque; Cd-polluted soil; growth period of rice; Cd content; Fe content

镉是一种毒性很高的重金属元素, 土壤中的镉主要来源于矿山开采、工业污水污泥不合理排放以及重

复施用含镉量较高的磷、锌等化学肥料。土壤被镉污染后可引起作物尤其是水稻体内镉的积累<sup>[1]</sup>。稻米作为人类食物的直接来源, 是人体摄入镉的主要途径, 高含镉量的稻米——镉米通过食物链会严重危害人体健康<sup>[2]</sup>。因此, 在镉污染土壤上通过适当的方法限制镉从土壤进入水稻根系、控制水稻对镉的吸收是十

收稿日期: 2003-04-04

基金项目: 农业部开放实验室资助项目

作者简介: 史 焜(1958—), 博士, 教授, 从事作物栽培学与环境地学教学与科学研究。现工作单位为沈阳化工学院环境与生物工程学院。E-mail: skshikun@sohu.com

分必要的。控制污染土壤中的镉从植物渠道进入食物链的途径有两条<sup>[3]</sup>：一是控制植物对土壤镉的吸收；另一途径是限制已进入植物体内的镉向可食用部分的转移和积累。目前关于镉污染土壤的控制研究多集中在降低污染土壤中镉的有效性<sup>[4, 5]</sup>，很少有人研究水稻根表铁胶膜铁含量与水稻吸收镉量的关系<sup>[6]</sup>。有人利用小麦研究缺铁与加铁对镉富集有影响<sup>[8]</sup>，但没有研究施加铁的量。有人还研究根表铁氧化物在有铁时根分泌物对水稻吸镉的影响及与水稻不同基因型之间的关系<sup>[5, 6]</sup>。这些研究用的都是营养液而且只研究了苗期，离生产应用还有很大距离。本文通过对水稻重要生长时期根表铁氧化物铁含量和根中镉含量的研究，试图找到根表铁膜厚度与水稻吸收镉之间的关系，为通过铁膜限制镉进入水稻体内提供理论依据，向在生产上应用这项技术迈出可行的一步。

## 1 材料与方 法

供试水稻品种为粳稻沈农 606。播种前采用 250 倍的 25% 多菌灵消毒、催芽，然后用早育秧形式提供移栽水稻秧苗。供试土壤采自沈阳张士灌区中区的粘棕壤。装盆前，进行风干过筛处理，并测定其基本化学性状，见表 1。

表 1 供试土壤基本化学性状

Table 1 Chemical properties of experimental soil sampled from Zhangshi Irrigation Region of Shenyang City

pH	全 Cd	有机质	全 N	有效 P	有效 K
(H <sub>2</sub> O)	/mg · kg <sup>-1</sup>	/%	/%	/mg · kg <sup>-1</sup>	/mg · kg <sup>-1</sup>
4.1	5.1	1.8	0.11	6.0	108

试验用盆为瓦氏 8 kg 白瓷盆，高 25 cm、内径 14 cm、外径 15 cm。盆中央放置封底的尼龙网袋(孔径 30 μm, 直径 7.5 cm、高 15 cm)，网内装 500 g 冲洗干净的河砂，网袋外装 7 500 g 过 4 mm 筛的镉污染土壤(风干)。装土前将氮磷钾肥与土壤充分混匀，施肥量依次为硫酸 0.75 g · kg<sup>-1</sup> 土、过磷酸钙 0.5 g · kg<sup>-1</sup> 土、氯化钾 0.8 g · kg<sup>-1</sup> 土。试验开始后往每盆尼龙网袋内移入 3 株水稻苗，按常规方式淹水种稻。

试验处理分两个因素，一为施加铁的时期，依次为分蘖期、拔节期、孕穗期、灌浆期和全生育期；二为施加铁的数量，按营养液中 Fe<sup>2+</sup> 浓度分别设 0、30、50 和 70 mg · L<sup>-1</sup> 4 个水平。所有处理重复 3 次。在水稻分蘖、拔节、孕穗和灌浆期，将根系装入根袋的水稻，移入不同含铁浓度的营养液中生长 4 d。营养液配方<sup>[1, 2]</sup>为：NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 2.86 × 10<sup>-3</sup> mol · L<sup>-1</sup>；NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> ·

H<sub>2</sub>O 0.32 × 10<sup>-3</sup> mol · L<sup>-1</sup>；K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1.02 × 10<sup>-3</sup> mol · L<sup>-1</sup>；CaCl<sub>2</sub> 1.0 × 10<sup>-3</sup> mol · L<sup>-1</sup>；MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 1.67 × 10<sup>-3</sup> mol · L<sup>-1</sup>；MnCl<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O 9 × 10<sup>-6</sup> mol · L<sup>-1</sup>；(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub> 5.2 × 10<sup>-8</sup> mol · L<sup>-1</sup>；H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 1.2 × 10<sup>-5</sup> mol · L<sup>-1</sup>；CuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O 1.56 × 10<sup>-7</sup> mol · L<sup>-1</sup>；ZnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 1.5 × 10<sup>-7</sup> mol · L<sup>-1</sup>。FeSO<sub>4</sub> 按处理浓度加入，移入时即向营养液中持续通入氮气，并每天更换营养液，使其产生不同厚度的铁膜。然后，再移回原有盆钵中生长 7 d，再加铁膜 4 d。每个处理时期总计加铁膜 2 次，共计 8 d；而全生育期处理的总计加铁膜 8 次，共计 32 d。

试验期间共进行 4 次采样测定，分别为水稻分蘖期、拔节期、孕穗期和灌浆期，测定水稻根表铁镉含量、根系含镉量和地上部含镉量。植物样收获后，迅速用 105 °C 杀青 1 h，然后用 80 °C ~ 100 °C 烘干至平衡重，取出测定生物产量。采用混合酸(高氯酸:硝酸 = 1:1, 体积比)消煮，用原子吸收分光光度计测定植株镉和铁含量。根表铁膜的测定采用 DCB 法<sup>[18]</sup>提取，具体方法为收获后的植物根系用去离子冲洗干净后放入 250 mL 白塑料瓶中，加入 0.3 mol · L<sup>-1</sup> Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub> · 2H<sub>2</sub>O 40 mL、1 mol · L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 5 mL 和 5 g Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 浸提根表铁胶膜铁和镉量。然后，在 25 °C 280 r · min<sup>-1</sup> 的摇床上振动 3h，溶液转移至 150 mL 容量瓶中定容，然后用原子吸收分光光度计测定铁和镉含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同时期施铁对水稻生长期根表铁膜含铁量的影响

图 1 列出了水稻不同生育期施加不同浓度亚铁并在土培中生长 2 ~ 3 周后根表铁膜含铁量的情况。从图 1 中可以看出，尽管有灌浆期的 50 和 70 mg · L<sup>-1</sup> 处理根表铁含量低于其未施用 FeSO<sub>4</sub> 的处理(0 mg · L<sup>-1</sup>)，但总的趋势是施加铁的高于未施用铁的，特别是孕穗期的根表铁胶膜含铁量，随施加铁量的增

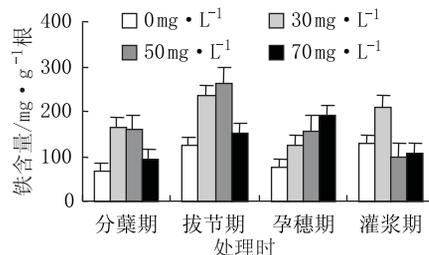


图 1 不同时期根表氧化物胶膜含铁量

Figure 1 Fe concentrations in iron plaque on root surface

加而增加,与设计用铁量有很好的相关关系。同时也说明营养液中施加的铁膜,即使放回土壤基质一段时间后仍能基本保持原有的铁膜梯度。

### 2.1.1 分蘖期施加铁对水稻根表铁胶膜含铁量的影响

从图1中还可以看出,除未施加铁的根表氧化物胶膜含铁量最低外,其余处理变化规律是随着施加铁量的增加,根表铁胶膜含铁量减少。这主要是由于分蘖时水稻根量少,根吸收和附着铁的位置有限,而多余的铁又有团聚作用,因而造成了 $70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理中根表铁胶膜铁含量显著低于 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的结果。

### 2.1.2 拔节期施加铁对水稻根表铁胶膜含铁量的影响

随着水稻根系的生长,拔节期施加铁对根表铁胶膜含铁量的变化规律与分蘖期趋势相同,但施加 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理根表铁胶膜含铁量增加。说明随着根系生长量的增加,根表吸收和附着铁的位置增加,故根表铁胶膜铁的含量增加。施加 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 由于铁量满足不了吸收与吸附的位置而居于次席,施加 $70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 由于根系没有吸收与附着铁的位置,再加上多余铁的团聚作用而居于第3位。未施加铁的由于只靠土壤供铁源而吸收和附铁量最少。

### 2.1.3 孕穗期施加铁对水稻根表铁胶膜含铁量的影响

随着水稻根系量的进一步增加,吸收与吸附铁的位置增加,根表铁胶膜含铁量随施加铁量的增加而增加。土壤提供铁的作用居于次席,而没有多余铁的团聚作用。

### 2.1.4 灌浆期施加铁对水稻根表铁胶膜含铁量的影响

灌浆期施加铁对水稻根表铁胶膜铁含量的变化比较复杂,以土壤提供铁量与施加低浓度铁量水稻根表铁胶膜含铁量最大而施加铁量多的处理可能抑制了水稻根系的泌氧能力,进而抑制了铁膜厚度的增加。故施加 $50$ 和 $70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 根表铁胶膜含铁量反而最少。

## 2.2 不同时期施铁对水稻成熟时根表铁胶膜含铁量的影响

从图2可以看出,灌浆期处理的水稻根表铁胶膜含铁量变化比较大,分蘖期和拔节期变化比较小,孕穗期和各生育期都处理的变化居中。差异显著性分析表明,各处理时期和各水平之间的差异极显著。从铁

膜积累铁看,未施加铁的处理与生长中测定的结果比,总趋势是根表铁胶膜含铁量增加。但灌浆期未施加的高于 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,孕穗期未施加的高于 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,拔节期高于所有施加铁的处理。造成这种现象的可能原因是随着水稻氧根系量的增大,根表吸收土壤中铁的能力增强,随着时间的推移,土壤中的铁占水稻根表铁氧化物胶膜铁的份额逐渐增大。在施加铁的3个水平中,分为3种类型,一是随着施加铁浓度的增加,根表铁胶膜含铁数量减少(分蘖期处理);二是随着施加铁量的增加,先减少,再增加(拔节期和灌浆期处理);三是随着施加铁量的增加,先增加再减少(孕穗期和各生育期处理)。究其原因可能与施加铁时根吸收表面积与提供铁的浓度有关。

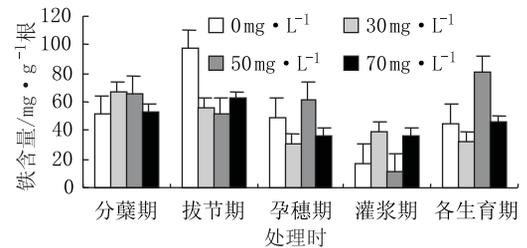


图2 成熟时根表氧化物胶膜含铁量

Figure 2 Fe concentrations in iron plaque on root surface

### 2.2.1 分蘖期施加铁对水稻成熟时根表铁胶膜含铁量的影响

水稻成熟时测定的根表铁胶膜含铁量与分蘖期测定的结果变化趋势一致,各处理浓度之间虽然差异仍然显著,但差异数值减小。这可能是由于随着根系生长量的增加,根系按提供铁的浓度均匀吸收吸附铁造成的。即根表提供铁的浓度大,水稻吸收铁量增加,而留出的空缺环境及时补给。

### 2.2.2 拔节期施加铁对水稻成熟时根表铁胶膜含铁量的影响

成熟时测定的水稻根表铁胶膜的含铁量与拔节时测定的结果正好相反。这可能是由于水稻旺盛生长对铁需求过大造成的。土壤提供的铁源源不断补充,满足这种需要,就造成了拔节期测定根表铁胶膜含铁量少的成熟时根表铁胶膜含铁量多、拔节期测定根表铁胶膜含铁量多的成熟时根表铁胶膜含铁量少的现象。

### 2.2.3 孕穗期施加铁对水稻成熟时根表铁胶膜含铁量的影响

孕穗期未加铁膜的处理,由前期吸收、吸附的铁量比较少,成熟时吸收、吸附土壤铁比较多,表现出根

表铁胶膜有很多铁滞留。而孕穗期根表铁胶膜含铁量高的  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理, 由于水稻孕穗生长需铁量高, 土壤环境污染又补充不及时, 造成根表铁胶膜含铁量下降。  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的变化趋势, 成熟时的孕穗期与拔节期的一致, 原因可能也与拔节期的一样。

### 2.2.4 灌浆期施加铁对水稻成熟时根表铁胶膜含铁量的影响

灌浆期处理成熟时测定的根表铁胶膜含铁量与灌浆时测定的结果变化趋势基本一致, 只是未施加铁的处理对根表铁胶膜含铁量的作用变小。

### 2.2.5 各生育期都施加铁对水稻成熟时根表铁胶膜含铁量的影响

分蘖-拔节-孕穗-灌浆期都施加铁的各处理中, 施加铁浓度为  $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时的根表铁胶膜含铁量是分蘖期、拔节期、孕穗期和灌浆期未加铁膜处理的平均值, 反映出水稻根表氧化物胶膜吸收和吸附土壤中铁的能力, 不因在营养液中生长时间长而增加和减少。施加铁浓度为  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的根表铁胶膜含铁量先增后减, 与张西科等<sup>[21]</sup>用水稻苗期在营养液中得出的结论相似, 即在铁离子浓度小时, 随着铁离子浓度的增加, 水稻根表氧化物胶膜吸收和吸附铁量增加, 但增加到一定含量, 再增加铁离子浓度, 水稻根表铁胶膜的含铁量就不再增加。

### 2.3 不同生育期施加铁对水稻生长期间根表铁胶膜中含镉量的影响

从图3可以看出, 在水稻生长的分蘖、拔节、孕穗和灌浆4个时期施加铁后, 随着水稻生育时期的进行, 水稻根表铁胶膜含镉量逐渐减少, 未施加铁的根表铁胶膜含镉量高于施加铁的根表铁胶膜含镉量。3个施铁的处理在4个生育时期中表现3种类型: 既随着施铁量的增加而增加(拔节期和灌浆期)、随着施铁量的增加而减少(分蘖期)和随着施铁量的增加, 先增加到一定程度不再增加, 而后是减少(孕穗期)。原因主要是由施加铁的不同时期及其数量和水稻对镉吸

收和吸附不同造成的。

#### 2.3.1 分蘖期施加铁对水稻根表铁胶膜含镉量的影响

分蘖期水稻根表氧化物胶膜的含镉量, 随着施加  $\text{Fe}^{2+}$  的浓度增加而减少。未加铁膜的水稻铁膜含镉量最高为  $8.71 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 极显著高于  $50$  和  $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的含镉量 ( $4.70$  和  $3.90 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 也显著高于  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的含镉量 ( $7.81 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )。除未施加铁的外, 与分蘖期测定根表氧化物胶膜铁含量的结果趋势一致。说明铁确有减少根表氧化物胶膜富集镉的作用, 而且还有数量效应。

#### 2.3.2 拔节期施加铁对水稻根表铁胶膜含镉量的影响

拔节期水稻根表铁氧化物含镉量与分蘖期的不同, 以施加  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的含镉量最低, 只有  $1.51 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  镉。这时是水稻旺盛生长期, 根表铁胶膜吸收和富集的镉开始进入水稻根系, 所以, 3个施加  $\text{Fe}^{2+}$  处理随着施加铁量的增加根表铁胶膜含镉量也增加。各处理之间差异都达到显著水平。而不加铁膜的处理, 由于没有铁膜的限制<sup>[17-19, 22]</sup>, 植株吸收镉比较容易, 故其根表铁胶膜含镉量也比较高。由此可见, 拔节期是水稻加铁膜的最佳时期, 以加  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  为最佳, 根表氧化物胶膜含镉量低, 水稻吸收的镉量就少, 对水稻毒害作用就小。与分蘖期测定根表铁胶膜铁含量趋势基本一致, 但施加  $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  铁的根表铁胶膜的低含铁量似乎有富集镉的作用。

#### 2.3.3 孕穗期施加铁对水稻根表铁胶膜含镉量的影响

孕穗和灌浆期, 由于水稻根系生长量比较大, 根吸收镉的数量增加, 根表铁胶膜含镉相对量减少, 对水稻生长的作用也减弱。但由于绝对量的增大, 对水稻籽粒的含镉作用比较大。孕穗期处理的水稻根表铁胶膜的含镉量, 未加铁的显著高于施加铁  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的镉含量, 与  $50$  和  $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的镉含量差异不显著。可见施加铁有抑制根表富集镉的作用。在3个施加铁的处理中, 以施加  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  抑制镉富集效果最佳, 其次是  $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 最后是  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这与孕穗期根表铁胶膜含铁量的结果相悖, 根表铁胶膜含镉量没有随含铁量的增加而增加, 而是随含铁量增加而减少。造成这种现象的原因可能与根表铁胶膜吸收和吸附金属离子的位置被铁离子占据有关。

#### 2.3.4 灌浆期施加铁对水稻根表铁胶膜含镉量的影响

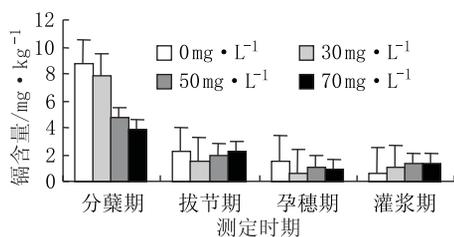


图3 根表氧化物胶膜含镉量

Figure 3 Cd concentrations in iron plaque on root surface

研究发现, 灌浆期水稻根表铁胶膜的含镉量, 随着施加  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的增加而增加。这与生长中根表铁胶膜含铁量的结论不一致, 主要是镉补足了根表铁胶膜中铁空缺的位置。

## 2.4 成熟时测定施加铁对水稻根表铁胶膜含镉量的影响

成熟时水稻根表铁胶膜的含镉量是对水稻构成潜在威胁的镉量, 也是水稻吸收剩余的镉量。从水稻生产来看, 剩余的越多, 水稻吸收的越少; 从环境保护角度来看, 剩余的越多, 可能从土壤中带出的镉越多, 对土壤修复越有利。

由于未施加铁的处理处于无镉营养液的时期和时间长短不同, 使本应具有相同剩余镉量未施加铁的处理也有了差异, 趋势是随着处理时间的后延和处理时间的延长, 剩余镉量减少。

从图4中可以看出, 施加铁的3个处理表现为2种类型, 即随着施加铁量的增加而剩余镉量增加(分蘖期和各生育期); 另一种是随着施加铁量先增加, 到一定水平后停止, 再增加铁量, 剩余镉量减少(拔节期、孕穗期和灌浆期)。

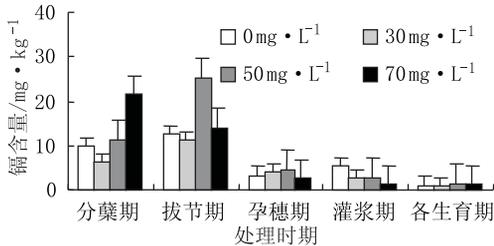


图4 成熟时根表氧化物胶膜含镉量

Figure 4 Cd contents in iron plaque in root surface

成熟时分蘖期施加铁的处理根表铁胶膜含镉量随着根表铁胶膜含铁量的减少而增加。类似的还有拔节期和灌浆期。造成这种现象的主要原因是镉补充了根表铁胶膜铁的位置。

孕穗期表现根表铁胶膜含镉量与含铁量表现相同的趋势。这主要是由于孕穗期是水稻营养生长和生殖生长共进时期, 水稻吸收铁和镉的量都比较大, 因而剩余的量差异较大。各生育期都施加铁的处理, 由于施加铁的次数增加, 表现规律性也是多种形式的。30 mg · L<sup>-1</sup> 和 50 mg · L<sup>-1</sup> 处理根表铁胶膜含镉的变化规律与孕穗期相同, 70 mg · L<sup>-1</sup> 处理根表铁氧化物含镉量变化与分蘖期相同。

## 2.5 生长中施加铁对水稻根系含镉量的影响

从图5可以看出, 水稻根系含镉量表现前期和后期含镉量高, 而中间含镉量低的形式。未施加铁的平均

均根吸收镉量高于施加铁的, 施加铁确有降低根吸收镉量的作用。前期测定的结果显示, 随着施加铁量的增加水稻根吸收镉量增加, 增加到一定程度再增加施加铁量, 根吸收镉量不增加, 反而减少。后期则表现随着施加铁量的增加, 根吸镉量增加。

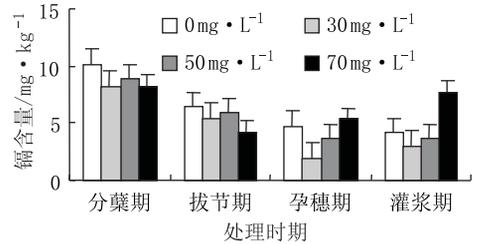


图5 生长中水稻根含镉量

Figure 5 Cd contents in rice root in during growth period

### 2.5.1 分蘖期施加镉对水稻根含镉量的影响

分蘖期是4个处理时期中根含镉最多的时期, 也是施加铁降低水稻吸收镉量最有效的时期。施加铁虽有降低水稻根含镉量的作用, 但各处理浓度之间还是有很大的差距, 以施加 30 mg · L<sup>-1</sup> 效果最佳, 施加 70 mg · L<sup>-1</sup> 的次之。效果最差的为施加 50 mg · L<sup>-1</sup>。出现这种结果的原因可能是由根表铁氧化物胶膜含镉量造成的。但施加 30 mg · L<sup>-1</sup> 的处理不支持以上结论。铁占据镉在根表铁胶膜的位置从而降低镉进入根中支持这个结论。

### 2.5.2 拔节期施加铁对水稻根含镉量的影响

拔节期的根含镉量与分蘖期变化趋势相同, 只是由于“生物稀释效应”<sup>[3,4]</sup> 根含量的数值小一些。基本符合拔节时的根表铁胶膜的含镉量, 只是施加 70 mg · L<sup>-1</sup> 的处理根含镉量低。这可能是由于水稻对高浓度镉的选择性吸收造成。与拔节期的根表铁胶膜含铁量有很好的相符关系, 即根表铁胶膜含铁量高根吸收镉量也高。但未施加铁的处理不符合这样的结论, 可能是由以土壤铁形成的根表铁胶膜的铁特性决定。符合当根表铁胶膜含铁量低时, 根吸收镉量高的结论。

### 2.5.3 孕穗期施加镉对水稻根含镉量的影响

孕穗期的根吸收镉量出现了未施加铁的处理低于施加 70 mg · L<sup>-1</sup> 的现象。这主要是由于水稻旺盛对铁需要量增加造成的。从3个施加铁的处理也可得到证明, 即随着施加铁量的增加, 水稻根吸收镉量也增加。与根表铁胶膜含镉量相比, 施加 70 mg · L<sup>-1</sup> 处理根吸收镉明显增加, 可能是由于水稻营养生长与生殖生长并进需要大量金属元素造成的。

### 2.5.4 灌浆期施加铁对水稻根含镉量的影响

灌浆期根含镉量与孕穗期根含镉量变化趋势完全一致,只是根的含镉量数值明显加大。表明这时水稻地上部的生长对金属元素的需要相对减弱。与根表铁胶膜含镉量变化趋势基本一致,只是未施加铁的处理根吸收镉量增加了一些,可见自然形成的根表铁胶膜对镉的吸收有一定抑制作用。与施加铁处理相比,铁与镉之间似乎有互补作用<sup>[15]</sup>。即根表铁氧化胶膜含铁量高,水稻根吸收镉量少,反之亦然。

## 2.6 成熟时测定施加铁对水稻根含镉量的影响

从图 6 中可以看出,成熟时水稻根的含镉量变化比较复杂,除去各生育时期都加铁的,其它 4 个未施加铁的平均水稻根含镉量高于施加铁的平均根含镉量。而各生育时期都处理的由于处于无镉的营养液中时间较长降低了对镉的吸收。施加铁的各处理前期(分蘖期和拔节期)表现随着施加铁量增加而减少,再增加施铁量水稻吸收镉量增加的趋势;后期(孕穗期和灌浆期)和各生育期施加铁膜的处理根含镉量都表现为随着施铁量的增加而增加,增加到一定程度后反而减少。

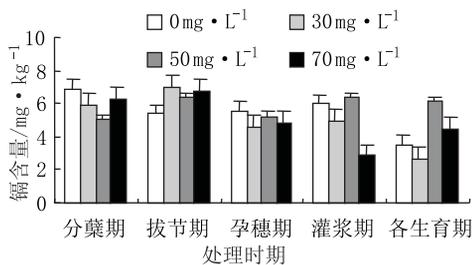


图 6 成熟时水稻根含镉量

Figure 6 Cd contents in rice root in maturity stage

从降低水稻吸收镉量来看,分蘖期施加铁的效果最佳,以施加 50 mg · L<sup>-1</sup> 的最合适,只有 5.07 mg · kg<sup>-1</sup> 比未施铁的 6.89 mg · kg<sup>-1</sup> 降低了 1.82 mg · kg<sup>-1</sup>, 降低了 35.9%, 差异极显著; 也显著低于施加 30 mg · L<sup>-1</sup> 和 70 mg · L<sup>-1</sup> 的根含镉量 5.90 mg · kg<sup>-1</sup> 和 6.25 mg · kg<sup>-1</sup>。与分蘖期根表铁胶膜的含镉量比,施加 30 mg · L<sup>-1</sup> 的处理,水稻对镉的吸收似有逆浓度梯度的趋势。

拔节期的水稻根含镉量施加铁处理的变化趋势与分蘖期的变化趋势类似,但含镉数值增大,彼此的差异减小。未施加铁的只有 5.40 mg · kg<sup>-1</sup>, 极显著低于施加铁的处理。这可能是由于铁刺激了镉的吸收,与根表铁胶膜的镉量呈完全互补的趋势。

孕穗期的水稻根含镉量未施加铁的显著高于施加 50 mg · L<sup>-1</sup> 的 5.24 mg · kg<sup>-1</sup>, 极显著高于 30

mg · L<sup>-1</sup> 和 70 mg · L<sup>-1</sup> 的 4.59 mg · kg<sup>-1</sup> 和 4.80 mg · kg<sup>-1</sup>。施加铁在孕穗期降低镉吸收的作用似乎更明显。与孕穗期根表铁胶膜含镉量的变化趋势一样,根表铁胶膜的含量与根的吸收镉量相适应,而未施加铁的处理有从土壤中直接吸收镉的能力。

灌浆期的水稻根含镉虽低于施加 50 mg · L<sup>-1</sup> 处理,但显著高于 30 mg · L<sup>-1</sup> 的 5.00 mg · kg<sup>-1</sup>, 极显著高于施加 70 mg · L<sup>-1</sup> 的 2.85 mg · kg<sup>-1</sup>。说明施加铁确有降低水稻吸收镉的作用, 施加 50 mg · L<sup>-1</sup> 可能是由于环境中的镉含量高造成的, 变化趋势与根表铁胶膜含镉量的变化趋势相同。

各生育期都施加铁的处理,由于处于无镉营养液中时间长,再加上根表铁胶膜含镉量低,所以,未施加铁的处理根吸收的镉数量少,但它仍显著高于施加 30 mg · L<sup>-1</sup> 的 2.71 mg · kg<sup>-1</sup>。看来进行多次施加铁可用低浓度,降低水稻对镉的吸收。而施加铁量大的 70 mg · L<sup>-1</sup> 的根含镉量 4.44 mg · kg<sup>-1</sup>, 显著高于未施加铁的 3.52 mg · kg<sup>-1</sup>。铁在高浓度时确有增加镉吸收的能力,也与根表铁氧化胶膜含镉量相符。施加 50 mg · L<sup>-1</sup> 的处理,水稻根含镉量 6.14 mg · kg<sup>-1</sup> 极显著高于未施加铁和施加 30 mg · L<sup>-1</sup>, 显著高于施加铁 70 mg · L<sup>-1</sup>。施加铁浓度与根表铁胶膜供应镉量适中加重根对镉的吸收。

## 3 讨论

### 3.1 铁对根表铁胶膜的作用

施加铁有增加水稻根表铁胶膜含铁量的作用。在处理后就取样测定的作用更加显著(即生长过程中的测定结果),与张西科等做的苗期营养的结果一致<sup>[16-9,21]</sup>,但随着时间的推移,后期处理和成熟时测定作用不明显。根表铁胶膜对铁的富集并不完全表现随着施加铁量的增加而增加,而因水稻的生长时期和根表铁胶膜的负荷能力及铁离子自身的性质而表现出:(1)随着施加铁的浓度增加而增加;(2)随着施加铁的浓度增加,先增加,到一定程度停止,再增加浓度反而减少;(3)随着施加铁浓度的增加,根表铁胶膜含铁量先有所减少,再增加施加铁浓度,根表铁胶膜含铁量增加。这种复杂的作用形式,决定了进行根表铁胶膜深入研究的必要性。

### 3.2 根表铁胶膜对镉的富集作用

施加铁有降低根表铁胶膜富集镉的作用。但这种作用没有富集铁明显。在处理时期上,分蘖期和孕穗期表现的比较明显;前期比后期表现的明显;处理次

数少比处理次数多的表现的明显。施加铁数量与根表铁胶膜含镉的关系,除与根表铁胶膜含铁量的3种关系相同外,还有分蘖期的根表铁胶膜的含镉量,随着施加铁量的增加而富集镉量减少的变化。造成这些复杂的变化,除3.1解释的原因外,可能还与铁和镉在根表铁胶膜中吸收/吸附位点的协同和竞争有关。孕穗期施加铁对降低根表铁胶膜富集镉比较有利,是施加铁的有利时期,以施加  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  为最佳。

### 3.3 施加铁对水稻吸收镉的作用

施加铁对水稻根系含镉量的作用比对根表铁胶膜含镉量的作用弱,但表现的趋势类同。以孕穗期施加铁对降低镉吸收量最大,以施加  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的效果最佳,这与已往的研究结果不一致<sup>[6-9, 21]</sup>。原因在于本研究采用的是镉污染土壤、全生育期处理的结果,而已往的研究采用营养液添加镉的方法只研究了苗期。多次施加铁也有降低水稻根含镉的作用,但比较费事,也增加了降低镉吸收量的成本。本试验结果表明,分蘖-拔节-孕穗-灌浆期都施加铁的以施加  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降低水稻吸收镉量最多,为  $2.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,比土壤含镉量  $5.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  低了  $2.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  降低了 46.9%。施加铁降低镉污染土壤水稻含镉量确有很大的潜力,但施用时期和施用量一定要慎重考虑,才可能用最小的投入,获得最大的经济效益。

### 参考文献:

[1] 王凯荣. 镉对不同基因型水稻生长毒害影响的比较研究[J]. 农村生态环境, 1996, 12(3): 18-23.

[2] 吴启堂, 陈 卢, 王广寿. 水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 104-107.

[3] 王凯荣, 龚惠群. 两种基因型水稻对环境镉吸收与再分配差异性比较研究[J]. 农业环境保护, 1996, 15(4): 145-149, 176.

[4] 马朝红, 曾德生. 土壤中镉对水稻生长的影响[J]. 湖北农业科学, 1992, 2: 26-30.

[5] 刘文菊, 张西科, 张福锁. 根表铁氧化物和缺铁根分泌物对水稻吸收镉的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(4): 463-468.

[6] 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胶膜的关系[J]. 环境科学学报, 2000, 20(5): 592-596.

[7] 李花粉, 郑志宇, 张福锁, 等. 铁对小表吸收不同形态镉的影响[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 170-173.

[8] 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.

[9] Greipsson S and Crowder A A. Amelioration of copper and nickel toxicity by iron plaque on roots of rice (*Oryza sativa*) [J]. *Can J Bot*, 1992, 70: 824-830.

[10] Kuo S. Concurrent sorption of phosphate and zinc, cadmium, or calcium by a hydrous ferric oxide [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1986, 50: 1412-1419.

[11] Marschner H, Römheld V and Kissel M. Different strategies in higher plants in mobilization and uptake of iron [J]. *Journal of plant nutrition*, 1986, 9(3-7): 695-713.

[12] Peacock S and Rimmer D L. The suitability of an iron oxide-rich gypsum by-product as a soil amendment [J]. *J Environ Qual*, 2000, 29: 1969-1975.

[13] Rodecap K D, Tingey D T and Lee E H. Iron nutrition influence on cadmium accumulation by *Arabidopsis thaliana* (*L.*) *heyne* [J]. *J Environ Qual*, 1994, 23: 239-246.

[14] Römheld V and Marschner H. Evidence for a specific uptake system for iron phytosiderophores in roots of grasses [J]. *Plant Physiol*, 1986, 80: 175-180.

[15] Smolders A J P and Roelofs J G M. The roles of internal iron hydroxide precipitation, sulphide toxicity and oxidizing ability in the survival of *Stratiotes aloides* roots at different iron concentrations in sediment pore water [J]. *New phytol*, 1996, 133: 253-260.

[16] St-Cyr L and Growder A A. Iron oxide deposits on the roots of *Phragmites australis* related to the iron bound to carbonates in the soil [J]. *Journal of plant nutrition*, 1988, 11(6-11): 1253-1261.

[17] Taylor G J, Crowder A A and Rodden R. Formation and morphology of iron plaque on the roots of *typha latifolia* [J]. *Grown in solution culture Amer J Bot*, 1984, 71(5): 666-675.

[18] Treeby M, Marschner H and Römheld V. Mobilization of iron and other micronutrient cations from a calcareous soil by plant-borne, microbial, and synthetic metal chelators [J]. *Plant and soil*, 1989, 114: 217-226.

[19] Xike Zhang, Fusuo Zhang and Daru Mao. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa L.*): Phosphorus uptake [J]. *Plant and soil*, 1999, 209: 187-192.

[20] Xike Zhang, Fusuo Zhang and Daru Mao. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa L.*): Zinc uptake by Fe-deficient rice [J]. *Plant and soil*, 1998, 202: 33-39.

[21] Ye Z H, Baker A J M, Wong M H and Willis A J. Copper and nickel uptake, accumulation and tolerance in *Typha latifolia* with and without iron plaque on the root surface [J]. *New Phytol*, 1997, 136: 481-488.

[22] Zhang F S, Treeby M, Römheld V and Marschner H. Mobilization of iron by phytosiderophores as affected by other micronutrients [J]. *Plant and Soil*, 1991, 130: 173-178.