

不同地区土壤中分蘖期水稻根表铁氧化物的形成及其对砷吸收的影响

郭伟^{1,2}, 林咸永³, 程旺大⁴

(1. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029; 4. 浙江省嘉兴市农业科学研究院, 嘉兴 314016)

摘要 通过土壤盆栽试验研究了 14 种不同土壤中种植水稻后, 其根表铁膜形成量的情况, 及其对苗期水稻吸收和转运砷的影响。结果表明, 生长在不同土壤中的水稻其根表铁膜的形成量有显著的差异, 铁膜形成量最大为 61.97 mg/g, 最小仅为 1.15 mg/g, 分析表明土壤中非晶质态氧化铁含量的不同是其主要的影响因素之一。同时测定了根表铁膜中砷的含量, 铁膜上吸附的砷浓度最大为 1 376 mg/kg, 最小低于检测限, 其与根表铁膜形成量之间存在着显著的正相关性 ($r = 0.85, n = 14, p < 0.05$), 而与土壤溶液中有效态的砷浓度无显著的相关性。水稻植株地上部砷浓度 (0.400 ~ 12.98 mg/kg) 和地下部砷浓度 (3.860 ~ 576.2 mg/kg) 与根表铁膜的形成量之间也都存在着显著的正相关性 ($r = 0.88, n = 14, p < 0.05$; $r = 0.91, n = 14, p < 0.05$), 与土壤溶液中有效态的砷浓度无显著的相关性; 水稻根系对砷的吸收能力 (SAU, 0.005 ~ 0.670 mg/g) 与根表铁膜形成量之间也为显著的正相关性 ($r = 0.91, n = 14, p < 0.05$); 根表铁膜形成量与砷的转运之间无显著的相关性。结果表明, 在此次试验中土壤的非晶质态氧化铁的含量是水稻根表铁膜形成的影响因素之一, 根表铁膜的存在成为了根际砷的富集库, 起到了促进根际砷吸收的作用, 但对砷的转运没有显著的影响。

关键词 水稻; 铁膜; 砷; 吸收; 转运

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: D250-3301(2010)02-0496-07

Effect of Iron Plaque Formation of Root Surface on As Uptake by Rice Seedlings Grown on Different Types of Soils

GUO Wei^{1,2}, LIN Xian-yong³, CHENG Wang-da⁴

(1. College of Environmental and Resource Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 4. Jiaxing Academy of Agricultural Sciences, Jiaxing 314016, China)

Abstract The objective of study was to investigate the effect of the amount of iron plaque of root surface on As uptake by rice seedlings grown on 14 types of soils. These results indicated that there were significant differences in the amounts of iron plaque (1.15-61.97 mg/g) formed on rice root surface among different soils. The amount of non-crystallloid Fe oxide in different submerged soils is one of main influencing factors. There was a significant positive correlation between As concentrations in iron plaque (0-1 376 mg/kg) and the amount of iron plaque ($r = 0.85, n = 14, p < 0.05$), but no significant correlation with the extractable As concentration of 14 types of soils. There were also significant positive correlation between As concentrations in shoot (0.400-12.98 mg/kg) and root (3.860-576.2 mg/kg) and the amounts of iron plaque respectively but not significant correlation with the extractable As concentrations of 14 types of soils ($r = 0.88, n = 14, p < 0.05$; $r = 0.91, n = 14, p < 0.05$). Moreover, there was a significant positive correlation between specific arsenic uptake (0.005-0.670 mg/g) and the amount of iron plaque ($r = 0.91, n = 14, p < 0.05$). However, there was no significant correlation between shoot-As% and the amount of iron plaque. These results showed that the iron plaque on root surface was the pool of As in rhizosphere and increased As uptake but did not affect As transportation from rice root to shoot.

Key words rice; iron plaque; arsenic; uptake; transportation

水稻是我国最主要的粮食作物之一, 在农业生产中占有重要的地位。水稻也是一种典型的湿地植被, 长期生长在渍水条件下, 为了适应其缺氧环境, 在进化过程中形成了发达的通气组织, 可以通过叶片将大气中的氧气输送到根系, 使渍水土壤中存在的大量还原性物质 Fe^{2+} 在根际由于连续的氧化作用而在根表及根质外体被氧化形成明显可见的红色

铁氧化物、氢氧化物胶膜状包被(铁膜)。近年来, 水体及土壤中砷污染日益严重, 并通过食物链给人体

收稿日期: 2009-03-13; 修订日期: 2009-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(40861018); 内蒙古自然科学基金项目(20080404MS0611)

作者简介: 郭伟(1976~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为土壤污染的控制与治理技术, E-mail: guowei-1976-z@hotmail.com

健康带来严重的危害^[1,2]. 铁氧化物及氢氧化物对以阴离子形式存在的五价砷和三价砷都具有较强的亲和力^[3~5],铁膜又是在湿地作物水稻根表客观存在的,是砷等污染物进入植物体内的必经门户. Liu 等^[5~8]和 Chen 等^[9] 分别在不同的实验条件下研究了水稻根表铁膜的存在对其吸收、转运砷的影响. 水稻根表铁膜形成的程度与数量主要取决于 2 个条件:植物生长土壤中可溶性 Fe^{2+} 的供应量;植物根际局部氧化状态的生存环境. 不同地区、类型的土壤,上述 2 个条件存在很大的差异,这些直接影响到水稻根表铁膜的形成,从而可能影响到水稻根系对砷的吸收和转运. 本试验旨在研究生长在我国水稻主产区 14 种不同土壤中分蘖期水稻根表铁膜形成量的差异、可能的影响因素及其对砷吸收、转运的影响;从而为利用土壤和农作物自身的特性减少或减缓污染物向植物体内的转移,尤其是向可食部位的迁移提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤与植物

供试的水稻品种来自湖南省农业厅的威优 77,是一种常见的南方晚稻品种;供试用的 14 种土壤的来源、名称、编号见表 1.

表 1 供试土壤的采样地点及编号

Table 1 Names and serial numbers of 14 types of soils

土壤编号	土壤采样地点
1	嘉兴市农科院试验场水稻土
2	嘉兴市秀洲区王江泾镇双桥村水稻土
3	嘉兴市秀城区余新镇金星村水稻土
4	桐乡市崇福镇芦母村水稻土
5	平湖市新埭镇莘贞村水稻土
6	嘉善县丁栅镇界泾港村水稻土
7	南京江宁水稻土
8	湖州水稻土
9	乌栅常熟水稻土
10	南京麒麟水稻土
11	杭州水稻土
12	紫大泥
13	黄筋泥
14	红砂田

1.2 盆栽试验方法

(1) 植株培养 挑选均匀饱满的水稻种子若干粒,用 10% 的双氧水浸泡 10 min,然后用蒸馏水完全洗净,均匀放入湿润的珍珠岩中发芽,定期浇水,保持珍珠岩的湿润. 在珍珠岩中生长 3 周后,将水稻幼苗移入 1/3 强度的营养液中继续培养 1 周,营养

液配方见文献[10]. 水稻育苗期间的生长条件:28℃/14 h光照和 20℃/10 h黑暗,光照强度为 260 ~ 350 mol·(m²·s)⁻¹,相对湿度为 60% ~ 70%.

(2) 土培试验 供试的 14 种土壤风干后磨碎,全部过 2 mm 筛. 并在其中每 kg 的土中加入 10 mL 的砷溶液($\text{Na}_3\text{AsO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 2 g/L),同时在每 kg 的供试土壤中分别混入氮 0.2 g [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$]、磷 0.15 g (CaHPO_4)、钾 0.2 g (KCl),以保证水稻生长过程中足够的矿质营养供应,将土壤完全搅拌均匀. 将混好的供试土壤装盆:首先将大约 150 g 左右的供试土壤装入到根袋中(孔径 37 μm 的尼龙网,直径 7.5 cm,高 11 cm),将其放入底部已铺上一层同种供试土壤的塑料培养钵中,然后在尼龙袋和培养钵之间的空隙处再填充此种土壤,大约 600 g 左右,每盆土壤的总重量是 750 g. 在移苗前,将装好盆的供试土壤淹水老化平衡 7 周. 挑选生长一致的水稻幼苗移栽到根袋中,每袋 1 株幼苗. 移栽后的水稻植株放置在温室中生长,温度控制在 22 ~ 35℃,光照强度是 500 ~ 1 100 mol·(m²·s)⁻¹. 在整个试验期间,罐内的土壤始终保持淹水状态,每个处理重复 4 次,每天随机调整盆钵的位置,使所有处理受光均匀. 水稻在温室中生长一个月后收获(分蘖期). 小心从根袋中取出水稻根系,用蒸馏水将整株苗完全洗净,自茎叶基部剪开根和叶,根系提取根表铁膜后,将地上部和地下部放入烘箱中在 70℃ 下烘干 72h,称重.

(3) 根表铁膜的浸提与测定 植株收获后,水稻新鲜根系上的铁膜用 dithionite-citrat-bicarbonate (DCB) 的方法浸提,此方法是在文献[11,12]的基础上改进的. DCB 浸提液由以下 3 种化合物组成 0.03 mol/L $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 0.125 mol/L NaHCO_3 的混合液,固体的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ (连二亚硫酸钠,又称保险粉). 收获后的水稻新鲜根系用蒸馏水冲净,放到 50 mL 的烧杯中,加入 0.03 mol/L $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 0.125 mol/L NaHCO_3 的混合液 30 mL,0.5 g $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$,混合均匀后,在室温下(20 ~ 25℃)浸提 0.5 h,然后将浸提液转入 50 mL 容量瓶中,并用蒸馏水冲洗根系 3 次后定容至 50 mL. 铁氧化物膜的数量用 DCB 浸提液中铁含量与水稻根干重之比来表示(mg/kg).

(4) 植物样品的制备与分析 收获后的植株样品烘干后称干重,然后用玻璃研钵磨碎备用. 样品的分析采用微波消解法,称取均匀的 0.25 g 干燥的样品放入 100 mL 干燥且干净的聚四氟乙烯消解罐中,加入 5 mL 优级纯的浓硝酸,装罐后放入微波加速

反应系统中 (MARS5, CEM Microwave Technology Ltd. USA) 进行消解. 消解程序为 :15 min 升温到 180℃ ,在此温度下保持 15 min ,然后 20 min 的降温过程. 空白和标准样品 (GBW07605 国家标准物质研究中心) 同时消煮, 以确保消煮及以后测定的准确度和用于回收率的计算. 消煮过程结束后, 消煮液用超纯水 (Easy-pure, Dubuque, IA, USA) 稀释至 50 mL, 然后过滤到经酸泡过的干净的 PE 塑料瓶中. 用 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, Optima 2000 DV, Perkin Elmer, USA) 和原子荧光分光光度计 (AFS 2202E, 北京海光分析仪器公司) 测定 DCB 浸提液和消煮液中砷、铁的浓度.

(5) 土壤样品基本理化性质测定方法 采用重铬酸钾氧化-比色法测定土壤有机质的含量 ;土壤有效性磷的含量采用碳酸氢钠法测定 ;土壤阳离子交换量采用乙酸铵法测定 ;土壤中的氨态氮和硝态氮采用 2 mol/L 的氯化钾提取然后用连续流动分析仪测定 ;土壤中游离氧化铁和游离氧化铝的含量采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠提取法测定 ;土壤中非晶质态氧化铁和非晶质态氧化铝的含量采用酸性草酸铵提取法测定. 所有采用的方法见文献 [13].

(6) 土壤有效态砷的测定方法 水稻苗收获后, 将土壤自然风干, 磨碎过 1 mm 的筛. 采用碳酸氢钠做提取剂, 水土比为 20: 1, 在 20 ~ 25℃ 下振荡 30 min, 然后离心过滤. 用原子荧光分光光度计

(AFS 2202E, 北京海光分析仪器公司) 测定提取液中的砷浓度.

2 数据分析

DCB 浸提液、水稻植株地上部及地下部中各元素浓度的计算都是在干重的基础上进行的.

水稻根系对砷的吸收能力用 specific arsenic uptake (SAU) 来表示.

$$SAU = T_{As}/Root_{Biomass}$$
$$= (T_{Root-As} + T_{Shoot-As})/Root_{Biomass}$$

式中, $T_{Root-As} = c_{Root-As} \times Root_{Biomass}$; $T_{Shoot-As} = c_{Shoot-As} \times Shoot_{Biomass}$;水稻砷的转运 : $Shoot-As\% = (T_{Shoot-As}/T_{As}) \times 100$; $Shoot_{Biomass}$: 水稻植株地上部生物量 ; $Root_{Biomass}$: 水稻植株地下部生物量 ; $c_{Shoot-As}$: 水稻植株地上部砷浓度 ; $c_{Root-As}$: 水稻植株地下部砷浓度 ; $T_{Shoot-As}$: 水稻植株地上部总砷含量 ; $T_{Root-As}$: 水稻植株地下部总砷含量 ; T_{As} : 水稻植株地上部和地下部的总砷含量.

3 结果与讨论

3.1 土壤的基本理化性质

14 种土壤的 pH 、有机质含量 (OM%) 、有效性磷 (Olsen-P) 、阳离子交换量 (CEC) 、铵态氮 ($NH_4^+ -N$) 、硝态氮 ($NO_3^- -N$) 、非晶质氧化铁、游离氧化铁、非晶质氧化铝和游离氧化铝等基本理化性质的测定结果见表 2.

表 2 供试土壤的基本理化性质
Table 2 Selected physical and chemical properties of 14 types of soils

土壤 编号	pH	OM/%	Olsen-P /mg · kg ⁻¹	CEC /cmol · kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg · kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg · kg ⁻¹	非晶质氧化铁 /mg · kg ⁻¹	游离氧化铁 /mg · kg ⁻¹	非晶质氧化铝 /mg · kg ⁻¹	游离氧化铝 /mg · kg ⁻¹
1	5.75	4.03	85.19	41.68	26.90	6.820	2.687	43.607	272.3	6.576
2	6.12	5.33	6.920	30.83	26.32	9.240	3.447	42.939	460.2	5.725
3	6.02	2.91	31.01	36.50	25.41	7.350	3.411	42.490	490.5	6.413
4	6.29	2.76	51.80	32.15	24.91	9.450	3.142	42.286	387.8	8.135
5	5.87	4.23	200.5	60.18	32.32	17.62	3.501	42.002	313.9	5.382
6	5.91	4.15	449.6	44.61	31.24	10.80	3.520	42.281	391.6	7.633
7	6.19	4.30	20.80	68.99	31.73	30.68	3.157	42.410	479.2	8.243
8	4.85	5.35	28.91	15.74	32.45	12.79	2.651	35.309	280.4	2.840
9	6.78	5.48	35.72	60.67	33.55	11.08	3.366	34.278	345.8	5.616
10	6.80	2.90	45.15	58.18	35.00	13.69	3.504	34.942	409.5	8.044
11	4.92	1.94	224.0	14.29	36.46	13.03	1.879	39.028	294.1	2.628
12	6.46	4.01	4.730	80.33	37.91	8.270	729.8	37.069	307.6	3.274
13	5.45	2.35	12.10	50.75	39.36	23.19	3.048	37.066	299.0	917.7
14	5.75	2.08	4.720	47.73	40.81	10.92	2.317	31.717	283.1	732.5

壤中非晶质态氧化铁和游离态氧化铁的含量,其中非晶质态氧化铁的含量更为重要.从实际测定的结果也可以看出,根表铁膜形成量最小的紫大泥其非晶质态氧化铁的含量也是所有供试土壤中含量最低的(见表2),同时其土壤 pH 值也相对较高;但是供试土壤中非晶质态氧化铁的含量最高的6号嘉善水稻土其形成铁膜的量却不是最多的,这是因为铁膜的形成还要受到淹水条件下土壤的 Eh 和 pH 值的影响,相比较来说具有中等非晶质态氧化铁含量和最低土壤 pH 值的8号湖洲水稻土其水稻根表铁膜的形成量为最大.因此,从目前的结果也可以看出,水稻根表铁膜的形成量是这几个因素综合影响的结果.此外,本研究结果还显示根表铁膜的形成量与土壤中游离氧化铁含量的相关性不大.

试验中还测定了 DCB 浸提液中的砷浓度(见表4),这部分砷是被吸附在根表铁膜中的. X-射线荧光显微断层图谱表明,根表铁氧化物胶膜主要组成为铁的氧化物及其水合物^[16],它有特殊的电化学特性,属两性胶体.作为两性胶体,铁氧化物及其水合氧化物的表面也可以吸附土壤中的阴离子,从而在一定程度上改变了这些阴离子的生物有效性.铁氧化物对五价砷和三价砷都有较强的吸附能力^[3~5],因此本研究分析了根表铁膜中砷的浓度和根表铁膜量之间的相关性(见图1),结果表明两者之间有着很好的正相关性($r = 0.85, n = 14, p < 0.05$).这一结果与 Otte 等^[12]的发现相同,他们在盐生植物碱菀根际氧化状态和砷吸收关系的研究中发现根中砷的浓度与铁膜及根中铁的浓度相关系数分别达到 0.868、0.969.同时,本研究还测定了土壤中有效态砷的浓度(见表4),分析结果表明在此次试验中根表铁膜上吸附的砷浓度与土壤中有效态砷之间没有

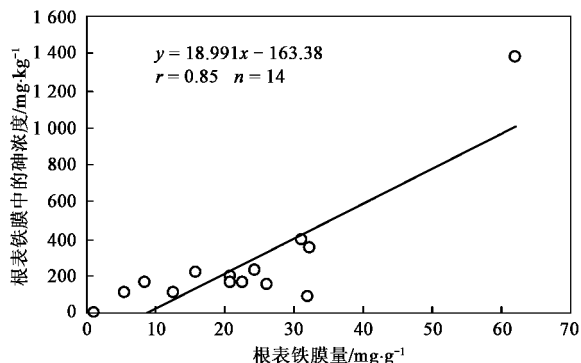


图1 根表铁膜中吸附的砷浓度与根表铁膜量之间的相关性分析($p < 0.05$)

Fig.1 Correlation between As concentration in Fe plaque and the amount of Fe in plaque of root surface

呈现显著的相关性.铁膜对砷具有较强吸附能力的特性,对于根系吸收砷有着十分重要的影响.因为,一方面铁膜可以在一定条件下将砷吸附在其上,从而减少了根对砷的吸收,起到了屏障的作用;另一方面,在根表附近的砷又能从铁氧化物上解吸下来,铁膜的富砷作用使得铁膜上的砷浓度远远高于周围土壤溶液中的,成为根际砷的富集库.这两方面的作用,到底那一方面占主要作用取决于很多因素,如铁膜的厚度、铁膜的老化程度、土壤的 pH 值、土壤溶液中有效态砷浓度和铁膜中吸附的砷浓度等,有关这些因素在铁膜对砷吸收、转运的影响中所起的作用,还需要进一步的深入研究.

3.4 水稻根表铁膜对其吸收、转运砷的影响

生长在14种不同供试土壤中的水稻植株地上部和地下部的砷浓度有着显著的差异(见表4).本研究进一步分析了它们与根表铁膜形成量及土壤有效态砷之间的相关性(见图2),结果表明,无论是地上部砷浓度还是地下部砷浓度都与根表铁膜的形成量呈显著正相关性($r = 0.88, n = 14, p < 0.05$; $r = 0.91, n = 14, p < 0.05$),也与根表铁膜上砷的浓度呈显著的正相关,但是二者与土壤中有效态砷浓度之间却没有显著的相关性.比较试验数据可以看出,对于有效态砷含量相对较低的8号土壤来说,因其根表铁膜的形成量最高,其根砷和叶砷的浓度也最高;但对于有效态砷含量比较高的12号土壤来说,因其根表铁膜的形成量最小,其根砷和叶砷的浓度也最低.对水稻砷的转运(shoot-As%)数据分析表明,其与根表铁膜形成量之间无显著的相关性(见表4),表明根表铁膜的存在没有对砷的转运产生显著的影响.水稻根系对砷的吸收能力(SAU)数据分析表明,其与根表铁膜形成量之间也成显著的正相关性(见图3, $r = 0.91, n = 14, p < 0.05$).从以上这些结果来看,根表铁膜的存在起到了富砷的作用,使得铁膜上的砷浓度远远高于周围土壤溶液中的,根表铁膜的存在促进了水稻植株根系对砷的吸收.与本研究结果相反,刘文菊等^[17]对水稻的整个生长季节进行研究表明,砷由根表向根内的吸收过程受到了铁氧化物膜的阻碍.同样,Chen 等^[9]的动力学试验也得到了相似的结果.这些研究表明,在不同生长期水稻根表铁膜的存在可能对于砷的吸收发挥着不同的作用.这是因为水稻根表存在的铁氧化物膜对于砷的吸收存在“两面性”,主要取决于铁膜的厚度及污染物在铁膜上的空间分布结构和与之发生相互作用的方式^[18].因此,作为根系吸收污染物质的门户,具有

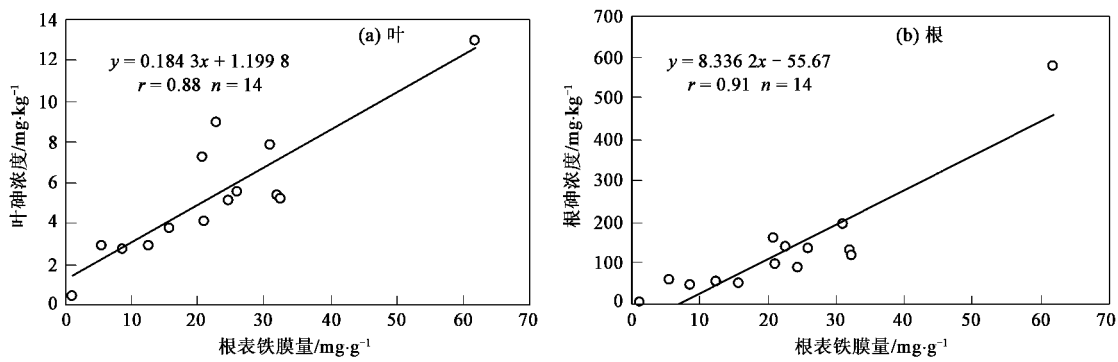


图2 叶和根中的砷浓度与根表铁膜量之间的相关性分析 ($p < 0.05$)

Fig.2 Correlation between shoot and root As concentration and the amounts of iron plaque of root surface

不同厚度和处于不同老化程度的铁氧化物膜在一定条件下可以钝化污染物的活性^[19,20],使其吸附在铁膜中,从而成为减少根系吸收污染物的屏障;当条件有所改变后,铁氧化物膜还可以活化污染物,或由于其对污染物的吸附富集作用,从而成为根际污染物的储蓄库,促进植物对污染物的吸收和积累.

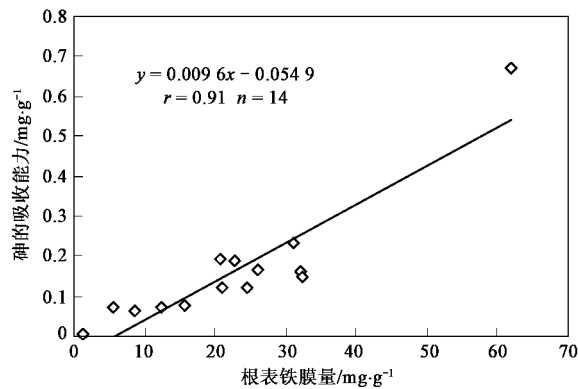


图3 砷的吸收能力与根表铁膜量之间的相关性分析 ($p < 0.05$)

Fig.3 Correlation between specific arsenic uptake and the amounts of iron plaque of root surface

4 结论

此次试验证明了不同土壤条件下水稻根表铁膜的形成会存在显著的差异,土壤中非晶质态氧化铁的含量是影响铁膜形成数量的主要影响因素之一.在水稻生长的分蘖期,根表铁膜的存在成为根际砷的富集库,促进了水稻植株对砷的吸收,但对砷的转运没有显著的影响.

参考文献:

[1] Xie Z X, Huang C Y. Control of arsenic toxicity in rice plants grown on an arsenic-polluted paddy soil [J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 1998, 29 (15) :2471-2477.

[2] Meharg A A, Rahman M. Arsenic contamination of Bangladesh

paddy soils: Implication for rice contribution to arsenic consumption [J]. Environ Sci Technol, 2003, 37 (2) : 229-234.

[3] Dixit S, Hering J G. Comparison of arsenic(V) and arsenic(III) sorption onto iron oxide minerals: implications for arsenic mobility [J]. Environ Sci Technol, 2003, 37 (18) :4182-4189.

[4] 梁美娜,朱义年,刘海玲,等. 氢氧化铁对砷的吸附研究[J]. 水处理技术,2006,32(7) 32-35.

[5] 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.

[6] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A, et al. Do phosphorous nutrition and iron plaque alter arsenate (As) uptake by rice seedlings in hydroponic culture? [J]. New Phytol, 2004, 162 :481-488.

[7] 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]. J Exp Bot, 2004, 55 :1707-1713.

[8] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A. Effect of iron and manganese plaque on arsenic uptake by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture supplied with arsenate and arsenite [J]. Plant Soil, 2005, 277 :127-138.

[9] Chen Z, Zhu Y G, Liu W J, et al. Direct evidence showing the effect of root surface iron plaque on arsenite and arsenate uptake into rice (*Oryza sativa* L.) roots [J]. New Phytol, 2005, 165 : 91-97.

[10] Hewitt E J. Sand and waterculture methods used in the study of plant nutrition [M]. UN: Commonwealth Agriculture Bureau, 1966.

[11] Taylor G J, Crowder A A. Use of DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plants [J]. Am J Bot, 1983, 70 :1254-1257.

[12] Otte M L, Dekker M J, Rozema J, et al. Uptake of arsenic by *Aster tripolium* in relation to rhizosphere oxidation [J]. Can J Bot, 1991, 69 :2670-2677.

[13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.

- [14] Ando T, Yashida S, Nishiyama I. Nature of oxidizing power of rice roots [J]. *Plant Soil*, 1983, **72** :57-71.
- [15] 何春娥, 刘学军, 张福锁. 植物根表铁膜的形成及其营养与生态环境效应[J]. *应用生态学报*, 2004, **15** (6) :1069-1073.
- [16] Hansel C M, Fendorf S, Sutton S, *et al.* Characterization of Fe plaque and associated metals on the roots of minewaste impacted aquatic plants [J]. *Environ Sci Technol*, 2001, **35** (19) :3863-3868.
- [17] 刘文菊. 根表铁膜对水稻吸收和转运砷的影响机制研究[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心, 2005.
- [18] 张西科, 尹君, 刘文菊, 等. 根系氧化能力不同的水稻品种磷锌营养状况的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, **8** (1) :54-57.
- [19] Greipsson S. Effect of plaque on roots of rice on growth and metal concentration of seeds and plant tissues when cultivated in excess Cu [J]. *Commun Soil Plant Anal*, 1994, **25** (15-16) :2761-2769.
- [20] Greipsson S, Crowder A A. Amelioration of copper and nickel toxicity by iron plaque on roots of rice (*Oryza sativa*) [J]. *Can J Bot*, 1992, **70** (44) :824-830.