

华南地区不同品系水稻积累砷特征及其影响因素

董 飞^{1,2}, 卢 瑛^{1*}, 王兴祥², 闫秋艳², 张 琳¹, 潘 琦¹

(1.华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要:选用华南地区较为常见的杂交稻、优质常规稻 2 个水稻品系, 16 个水稻品种, 通过土壤盆栽试验, 待其成熟收获后, 分析水稻根表、根部、秸秆、糙米中砷含量及相关影响元素的含量, 旨在研究不同水稻品系(种)对砷吸收、转运和积累规律以及其影响因素, 为低积累、高耐性水稻品系(品种)的选择及相应的农业措施提供科学的理论依据。结果表明, 砷在水稻中的分布情况为根表>根部>秸秆>糙米; 供试的糙米中砷含量为 0.18~0.47 mg·kg⁻¹, 均符合国家卫生标准(GB 4810—1994)。水稻根表铁锰膜中砷含量随根表中铁、锰的增加而富集, 相关分析表明, 根表铁锰膜形成可以有效降低糙米砷积累, 而秸秆磷可以有效降低秸秆中砷的积累。杂交稻各部位的砷含量及转移系数均高于常规稻, 且秸秆和糙米砷含量差异达到显著水平; 天优 122 的糙米砷积累能力高于其他品种, 美香占 2 号低于其他品种。

关键词:砷积累; 不同品系; 水稻; 盆栽试验; 华南地区

中图分类号: X503.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)02-0214-06

Characteristics of Arsenic Accumulation in Different Rice(*Oryza sativa* L.) Cultivars and Its Influencing Factors in South China

DONG Fei^{1,2}, LU Ying^{1*}, WANG Xing-xiang², YAN Qiu-yan², ZHANG Lin¹, PAN Qi¹

(1.College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Sixteen conventional and hybrid rice(*Oryza sativa* L.) cultivars, which are widely planted in South China, were used in a soil pot experiment to study arsenic absorption, transfer and accumulation and its influencing factors. The results showed that arsenic concentrations in rice tissue decreased in the order of root surface>root>straw>grain. Arsenic content in rice grain, ranged from 0.18 to 0.47 mg·kg⁻¹, met national hygienic standard(GB 4810—1994); Arsenic content in iron and manganese plaques on root surface increased with the increase of root surface Fe and Mn contents, indicating that the formation of iron and manganese plaques could reduce grain arsenic accumulation; in addition, phosphorus levels could effectively reduce arsenic accumulation in straw. Arsenic content and transfer coefficient in different parts of hybrid rice were higher than those of conventional rice, with arsenic content in straw and grain reaching significant difference. Grain arsenic accumulation in Tianyou 122 was higher than other cultivars, whereas Meixiangzhan 2 was lower than others. The results suggested that arsenic concentration in rice grain could be decreased by means of screening rice cultivars with low arsenic accumulation and increasing P concentration in rice straw.

Keywords: arsenic accumulation; different rice strains; rice; pot experiment; South China

砷污染已成为全球危害十分严重的环境问题之一^[1]。世界卫生组织公布, 全球至少有 5 000 多万人口正面临着地方性砷中毒的威胁, 其中大多数为亚洲国

家, 而中国正是受砷中毒最为严重的国家之一, 砷污染的实际危害程度比预想的要大^[2]。砷在土壤中积累不仅影响农作物的生长和发育, 导致农作物减产, 而且可以被农作物吸收, 影响农产品质量, 并导致砷通过食物链进入人体, 对人类的生存和健康构成威胁^[3-4]。在淹水土壤条件下, 由于土壤 pH 和 Eh 改变, As(V)被还原为活性高的 As(III), 铁锰等氧化物/氢氧化物结合的 As 因铁锰还原释放, As 化合物的溶解度增加,

收稿日期: 2010-08-10

基金项目: 广东省科技计划项目(2009B020311011)

作者简介: 董 飞(1983—), 男, 硕士研究生, 从事土壤质量与环境研究。E-mail: yqyadf@163.com

* 通讯作者: 卢 瑛 E-mail: luying@scau.edu.cn

土壤中砷生物有效性、移动性大大增加,导致种植的水稻籽粒中积累更多的砷^[5]。水稻是我国第一大粮食作物,全国60%以上的人口以稻米为主食,每年稻米消费量占口粮消费总量的55%左右。水稻也是广东省种植面积最广的作物,全省全年水稻种植面积为200多万 hm^2 。而水稻在砷污染的土壤中种植,或用砷污染水源灌溉使得稻米中砷的累积量可能超出国家食品卫生标准,将严重影响当地居民的身体健康。虽然在其他地区已有学者做过相关的研究,但由于稻米中砷的积累量随稻米的产区、品种和生长季节等因素的不同而差异明显,且不同地区种植水稻品种差异也较大^[6-7]。针对广东省的主要种植品种的土壤-水稻体系中砷的研究较少,本研究选用广东及华南地区较为常见的杂交稻、优质常规稻2个水稻品系,通过盆栽试验模拟水稻实际田间生长环境,旨在研究水稻对砷吸收、转运和积累的相关规律,以对砷污染地区的水稻种植提供理论支持;同时讨论不同品系水稻之间对砷吸收的差异,为低积累、高耐性水稻品系(品种)的选择提供科学的理论依据。

1 材料和方法

1.1 盆栽试验设计

盆栽试验土壤采自华南农业大学农场铁聚水耕人为土耕层(0~20 cm),土壤pH为6.02;有机质 $23.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,CEC为 $8.88 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $66.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,电导率 $297 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,有效硅 $93.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,游离铁、锰分别为 $18.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $63.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,粘粒含量($<2 \mu\text{m}$)33.6%,砷含量 $18.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

将取回的土壤风干、磨碎,过5 mm筛后分别装入高15.6 cm,底径12.5 cm,口径15 cm的PVC盆,每盆装土1.75 kg;为保证水稻生长养分充足,整个生长过程每盆分别施入 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 KH_2PO_4 (N、P、K施用量分别为140、80、100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),充分拌匀后淹水,高出土面约2 cm,平衡2周,备用。

供试水稻品种由广东省农科院水稻研究所和华南农业大学提供。包括8个杂交稻品种:天优998、丰优丝苗、天优122、金稻一号、汕优122、汕优82、优优998、培杂泰丰;8个优质常规稻品种:银晶软占、美香占2号、黄华占、粤香占、华航丝苗、粤晶丝苗2号、玉香油占、桂农占。所选水稻品种在广东省均有较大种植面积,且早晚稻均比较适宜。

水稻种子用30%的双氧水浸泡杀菌15 min,用去离子水洗净,待其在培养皿中发芽后,播于装有供试

土壤的育秧盘中。两周后于2009年3月28日移苗至PVC盆中,每盆2株,每个品种3个重复,模拟自然条件下水稻田的水分管理模式调控每盆的水分(在培养钵中维持2 cm左右的水层),在淹水条件下培养至成熟(中间有多次晒田)。移栽后的水稻植株放置在网室中,温度为22~35 $^{\circ}\text{C}$,光照为自然光,相对湿度为65%~85%。

1.2 样品采集和预处理

生长约130 d后,水稻籽粒成熟,分别收获水稻植株的不同部位。稻穗用去离子水清洗后自然风干,经砻谷机去壳后将糙米用不锈钢的粉碎机磨碎备用;秸秆用去离子水冲洗干净后放入鼓风干燥箱中70 $^{\circ}\text{C}$ 烘干。干燥后的秸秆样品用不锈钢的粉碎机粉碎后备用。水稻根部用去离子水冲洗干净后用DBC混合液(连二亚硫酸钠-碳酸氢钠-柠檬酸钠)浸提,以提取根表铁锰膜中的砷、铁、锰;浸提后的根系放入70 $^{\circ}\text{C}$ 鼓风干燥箱中烘干后,粉碎待测。

1.3 样品分析

植物中Si的测定采用瓷干锅灰化-钼蓝比色测定;植株砷的测定用 HNO_3 - H_2O_2 消煮,使用双道原子荧光光度计(AFS-8130,北京吉天仪器有限公司)测定其中砷含量。植株磷的测定采用 H_2SO_4 - H_2O_2 消煮-钒钼黄比色法。土壤pH按水土比2.5:1电位法测定,土壤颗粒组成采用吸管法测定,CEC用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵(pH 7.0)交换法测定,土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定,土壤速效磷采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,土壤有效硅采用柠檬酸浸提-硅钼蓝比色法测定,土壤游离铁、锰用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠缓冲液提取后,原子吸收分光光度计测定其中游离铁、锰含量。上述分析方法均参照《土壤农业化学分析方法》^[8]。

根表铁氧化物的浸提与测定^[9]:水稻植株收获后,新鲜根系上的铁膜用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠(DCB)浸提。DCB浸提液由以下3种化合物组成: $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ 的混合液和固体的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ (连二亚硫酸钠,俗称保险粉)。收获后的水稻新鲜根系用去离子水冲净,放到100 mL的烧杯中,加入 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 $0.125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ 的混合液30 mL,1.0 g $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$,混合均匀后,在室温下(20~25 $^{\circ}\text{C}$)浸提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。取出的根系在70 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重,称干重。分别用原子荧光光度计

和原子吸收分光光度计测定 DCB 浸提液中根表砷及铁、锰含量。

在上述程序测定过程中,均同时做 2~3 个空白和标准样品溶液一同测定,以确保消煮及以后测定的准确性。

1.4 数据分析

利用转移系数(水稻地上部 As 含量与根部 As 含量的比值)、富集系数(水稻各器官砷含量与土壤砷含量的比值)等来说明砷在土壤-水稻系统中的迁移情况。

不同品种之间的差异显著性利用 SAS 8.1 软件采用 DMRT 多重比较法进行分析;相关性分析及作图采用 Excel2003、SPSS11.5 软件进行(Pearson 相关分析);采用 SPSS11.5 进行 *t* 检验分析。

2 结果分析

2.1 水稻根表铁膜中砷与铁锰的关系

盆栽试验的分析结果表明水稻根表铁膜中砷与铁、锰含量呈显著和极显著正相关,相关系数分别为($r=0.586^*$, $n=16$), ($r=0.630^{**}$, $n=16$)(图 1);即根表铁膜中砷含量随根表中铁、锰的增加而富集。

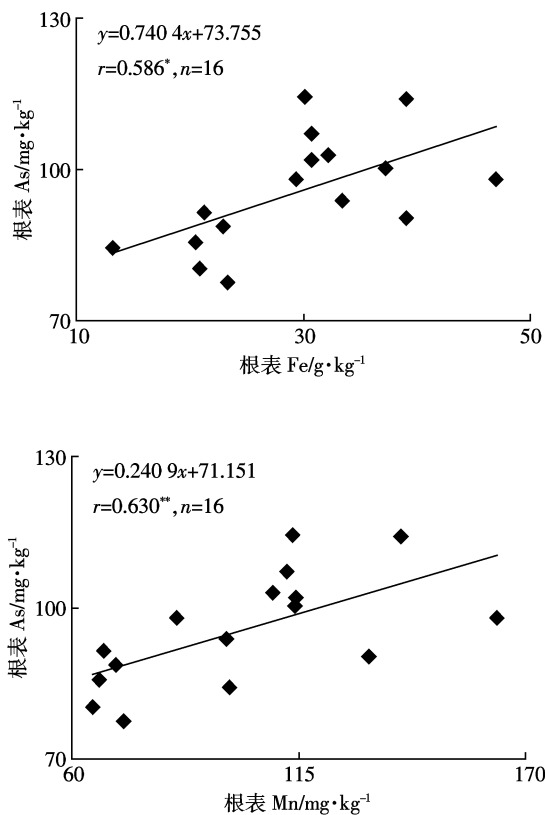


图 1 根表铁膜中砷与铁、锰的关系

Figure 1 The relationship between DCB-As and DCB-Fe, DCB-Mn

2.2 水稻各器官砷含量情况分析

分析结果表明(表 1),供试水稻根表的砷含量变幅较大,为 $77.46\sim 114\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,根系的砷含量变幅为 $50.47\sim 94.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,水稻秸秆砷含量在 $9.32\sim 17.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间;糙米中的砷含量在 $0.18\sim 0.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间;稻根中砷的含量显著大于秸秆和糙米,砷在水稻中的分布情况为根表>根部>秸秆>糙米。

表 1 水稻各器官的砷含量

Table 1 The distribution of arsenic in different parts of rice plant

植株部位	样品数	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差	百分比/%
糙米	16	0.18	0.47	0.30	0.077	0.2
秸秆	16	9.32	17.88	13.38	2.49	7.6
稻根	16	50.47	94.76	65.77	11.13	37.6
根表	16	77.46	114	95.56	11.05	54.6

2.3 不同品系(种)水稻吸收砷的差异分析

由表 2 可知,杂交稻各部位的砷含量及转移系数均高于常规稻,且秸秆和糙米砷含量差异达到显著水平,根表、根部中砷含量均差异不明显。

表 2 不同品系水稻砷含量差异

Table 2 The difference of arsenic content in different rice strains

品系	根表/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	根部/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	秸秆/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	糙米/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
杂交稻	96.3 ± 4.02	67.8 ± 4.51	15.2 ± 0.46	0.349 ± 0.026
常规稻	$94.8\pm 4.04\text{ns}$	$63.7\pm 3.42\text{ns}$	$11.5\pm 0.68^{**}$	$0.256\pm 0.016^{**}$

注:*t* 检验表示杂交稻与常规稻之间的显著性差异; $P<0.05$ (*), $P<0.01$ (**), $P>0.05$ (ns); $n=8$ 。

由表 3 可知,天优 122 的糙米转移系数和糙米富集系数均显著高于其他品种;美香占 2 号的糙米富集系数显著低于其他品种,同时其糙米转移系数也显著低于其他品种(除丰优丝苗)。综上所述,天优 122 的糙米砷积累能力高于其他品种,美香占 2 号低于其他品种。

2.4 根表铁膜对水稻砷积累的影响

相关分析表明(图 2),供试水稻根表铁膜中根表铁、锰与根表砷的摩尔比均与糙米砷呈显著负相关,相关系数分别为($r=-0.577^*$, $n=16$)和($r=-0.565^*$, $n=16$);这说明根表铁膜中铁、锰可以有效降低糙米砷积累。

2.5 秸秆中磷硅等元素对糙米砷吸收的影响

由图 3 可以看出,秸秆砷与秸秆磷呈显著负相关($r=-0.516^*$, $n=16$),即秸秆砷含量随秸秆中磷含量的增加而降低。相关分析表明秸秆硅与秸秆砷的相关性没有达到显著水平。

表 3 不同品种水稻的转移系数和富集系数

Table 3 Transfer coefficient and concentration coefficient of the different rice cultivars

品种	转移系数		富集系数		
	秸秆	糙米	根	秸秆	糙米
银晶软占	0.26±0.004a	0.006 1±0.000 47c	2.8±0.31h	0.73±0.093cd	0.017±0.003 0bcd
美香占 2 号	0.16±0.021e	0.003 0±0.000 20h	3.6±0.32d	0.58±0.023e	0.010±0.000 12f
黄华占	0.14±0.003ef	0.003 2±0.000 23hg	3.9±0.30c	0.55±0.031e	0.013±0.000 20def
粤香占	0.26±0.013ab	0.004 0±0.000 38def	2.7±0.31h	0.68±0.045d	0.012±0.000 30cdef
华航丝苗	0.13±0.003f	0.003 4±0.000 23fgh	4.2±0.26b	0.54±0.030e	0.014±0.000 31cdef
粤晶丝苗 2 号	0.16±0.005e	0.005 2±0.000 50de	3.5±0.40de	0.55±0.032e	0.016±0.002 9cde
玉香油占	0.16±0.010e	0.005 2±0.000 32de	3.2±0.20f	0.51±0.020e	0.014±0.000 43cdef
桂农占	0.23±0.011c	0.004 0±0.000 30efgh	3.5±0.28e	0.77±0.029bcd	0.012±0.000 18def
天优 998	0.23±0.011c	0.004 3±0.000 52def	3.8±0.30c	0.86±0.030ab	0.017±0.003 2bc
丰优丝苗	0.15±0.008ef	0.003 0±0.000 10h	4.9±0.19a	0.75±0.061cd	0.013±0.000 24def
天优 122	0.23±0.006c	0.008 1±0.000 30a	3.2±0.32f	0.73±0.091cd	0.025±0.001 3a
金稻一号	0.24±0.003bc	0.006 4±0.000 32bc	3.5±0.32e	0.82±0.062bc	0.021±0.003 0ab
汕优 122	0.27±0.014a	0.005 4±0.000 49cd	3.6±0.22de	0.93±0.033a	0.018±0.003 2bc
汕优 82	0.20±0.006d	0.004 2±0.000 58defg	3.9±0.46c	0.78±0.084bc	0.018±0.003 7bc
优优 998	0.28±0.011a	0.007 2±0.000 32ab	3.0±0.33g	0.82±0.056bc	0.021±0.003 2ab
培杂泰丰	0.26±0.012a	0.004 2±0.000 70defg	3.2±0.28f	0.83±0.041bc	0.014±0.002 3cdef

注:表中数值为平均值±标准误,字母表示不同品种之间的差异显著性分析,采用 DMRT 多重比较法,具有相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著(P<0.05)。

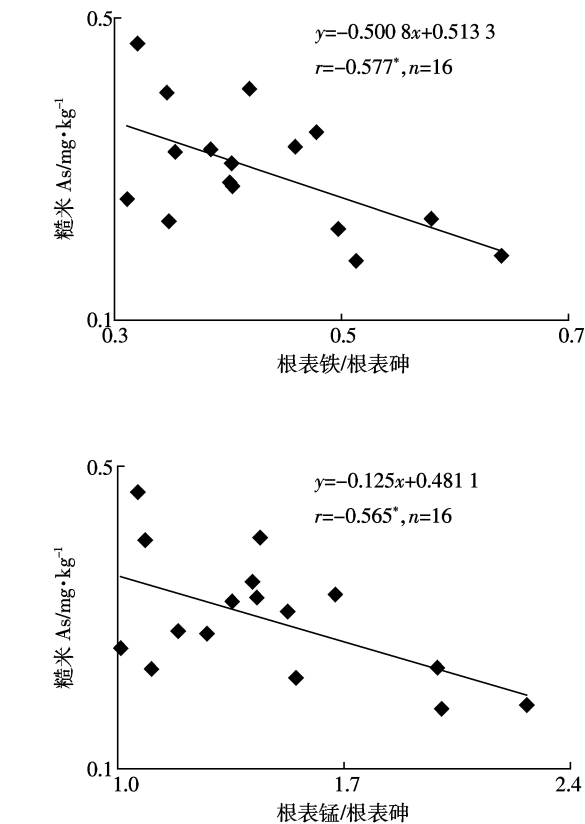


图 2 水稻根表铁膜中铁/砷、锰/砷摩尔比与糙米砷的相关性
Figure 2 The relationship between the arsenic of grain and DCB-Fe/DCB-As, DCB-Mn/DCB-As molar ratio in root surface

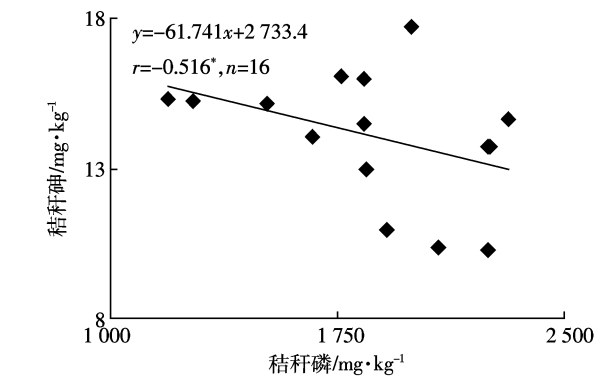


图 3 秸秆磷与秸秆砷的相关性
Figure 3 The relationship between the arsenic and P in straw

3 讨论

供试盆栽水稻土砷含量为 18.7 mg·kg⁻¹, 大于全国土壤环境背景值(10 mg·kg⁻¹)^[10];也高于国家土壤环境质量一级标准(15 mg·kg⁻¹),但未超过国家土壤环境质量二级标准 (30 mg·kg⁻¹, pH<6.5)(GB 15618—1995)^[11]。利用单因子污染指数法求得供试土壤的砷污染指数为 P=0.62,即供试水稻土壤未受到砷污染。

水稻是一种典型的湿地植被,根表包裹的红棕色铁氧化物膜是其适应还原环境的必然结果;已有的研究表明,水稻根表沉积的铁氧化物对其周围

阴离子有很强的亲和力;根表铁氧化物中砷与铁之间存在正相关关系^[9];砷进入土壤后,作物可通过根系代谢吸收土壤中的砷,被水稻吸收的砷大部分储存在根表铁膜或者根细胞中^[12]。本研究也表明,根表铁膜中的铁、锰可以有效降低糙米砷积累。

国内外一些研究已经报道^[6-7,13,15],水稻对砷的积累能力,不同品种间存在很大差异。本研究表明,供试天优 122 的糙米砷积累能力高于其他品种,美香占 2 号低于其他品种。刘志彦等研究表明^[16],不同品系的水稻幼苗砷吸收差异明显。2007 年广东省早稻种植面积为 98.83 万 hm^2 , 其中杂交稻为 52.39 万 hm^2 , 占总面积的 52.48%, 常规优质稻为 43.17 万 hm^2 , 占总面积的 43.25%; 杂交稻中天优 122 的种植面积为 2.23 万 hm^2 , 优质常规稻美香占 2 号的种植面积为 1.98 万 hm^2 , 在全省均有较大的种植面积。因此,本研究为广东省抗砷水稻品种筛选提供了一定的参考,但还需要进一步田间试验进行验证。

本研究供试秸秆砷含量在 9.32~17.88 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间;由于通常用秸秆来饲养牲畜,砷可以通过植物-动物-人的食物链在人体内富集,对人体造成潜在的危害^[3];按照澳大利亚现有食品健康标准指导值 1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (鲜重)计算,假设水稻秸秆中水分占 90%,水稻秸秆中砷的限制值就是 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,若以秸秆作为动物饲料则应评价其潜在危害。籽粒是水稻的可食部分,籽粒中砷的累积程度直接关系到人体健康。根据卫生部颁布的食品中砷限量卫生标准(GB 4810—1994)^[17]和农业部颁布的粮食中砷限量标准(NY 861—2004)^[18],大米砷限量均为 0.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,供试的糙米中砷含量均符合国家标准。砷在水稻中的分布为根表>根部>秸秆>糙米,这与前人研究结果一致^[7,13-15]。

秸秆砷含量随秸秆中磷含量的增加而降低;和前期大田研究结果一致^[15,19]。已有研究表明,水稻根系通过磷吸收通道吸收五价砷[As(V)],水通道(aquaporins)吸收三价砷[As(III)]^[20],因此磷是控制水稻吸收和转运砷的关键因子之一。水培试验表明,磷营养状况能对水稻吸收和转运五价砷产生显著影响,磷能竞争性抑制水稻对五价砷的吸收,随营养液中磷浓度的增加,水稻地上部和地下部五价砷含量、单位根干重砷吸收量(根系砷吸收能力)均显著降低^[21]。研究发现^[22],加入到砷毒土壤的大量磷会与砷在根际表面产生竞争从而减轻砷毒。水稻是典型的 Si 积累植物,叶中的 Si 浓度可达其干重的 10%~15%,有充分的证据表明 Si 对于水稻生产的稳产和高产是必需的。在

砷污染的土壤中添加外源硅可显著地抑制水稻对砷的吸收^[23]。土壤施加 Si 不同程度地降低了 As 在水稻各部位地积累^[24],有研究表明叶施纳米氧化硅溶胶可以显著抑制水稻对砷的吸收积累,缓解水稻砷毒害,同时可以抑制 Cd、Pb 等重金属向水稻籽粒转移^[25-26],为稻田砷污染防治提供了一条新思路。但在本研究中秸秆硅和秸秆砷的相关性没有达到显著水平,这可能与土壤砷和硅的含量以及所种植的水稻品种有关,需要进一步的盆栽及田间试验进行验证分析。

4 结论

(1)水稻根表铁膜中砷含量随根表中铁、锰的增加而富集。根表铁锰膜的形成可以有效降低糙米砷积累。

(2)供试的糙米中砷含量均符合国家标准,砷在水稻中的分布情况为根表>根部>秸秆>糙米;秸秆砷可以有效抑制秸秆中砷的积累。

(3)杂交稻各部位的砷含量及转移系数均高于常规稻,且秸秆和糙米砷含量差异达到显著水平;天优 122 的糙米砷积累能力高于其他品种,美香占 2 号低于其他品种。

参考文献:

- [1] Naidu R, Smith E, Owens G, et al. Managing arsenic in the environment: From soil to human health [M]. Australia: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Press, 2006: 1-85.
- [2] Berg M, Tran H C, Nguyen T C, et al. Arsenic contamination of ground water and drinking water in Vietnam: A human health threat[J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35: 2621-2626.
- [3] Abedin J M, Cresser M S, Merharg A A, et al. Arsenic accumulation and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(5): 962-968.
- [4] Rahman M A, Hasegawa H, Rahman M M, et al. Arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.): Human exposure through food chain[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2008, 69: 317-324.
- [5] Williams P N, Villada A, Deacon C, et al. Greatly enhanced arsenic shoot assimilation in rice leads to elevated grain levels compared to wheat & barley[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(19): 6854-6859.
- [6] 刘志彦, 杨俊兴, 陈桂珠, 等. 砷污染土壤对不同品种水稻生长的影响[J]. *生态环境*, 2007, 16(6): 1700-1704.
LIU Zhi-yan, YANG Jun-xing, CHEN Gui-zhu, et al. Influence of arsenic in soil on the growth of different rice (*Oryza sativa* L.) varieties[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6): 1700-1704.
- [7] 王玲梅, 韦朝阳, 杨林生, 等. 两个品种水稻对砷的吸收富集与转化特征及其健康风险[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(4): 832-840.
WANG Ling-mei, WEI Chao-yang, YANG Lin-sheng, et al. Arsenic

- accumulation and speciation in two rice varieties and related health risks[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(4):832-840.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 1999:12-315.
- LU Ru-kun. Analytical methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 1999:12-315.
- [9] 刘文菊, 朱永官, 胡莹, 等. 来源于土壤和灌溉水的砷在水稻根表及其体内的富集特性[J]. 环境科学, 2008, 29(4):862-868.
- LIU Wen-ju, ZHU Yong-guan, HU Ying, et al. Effects of arsenic from soil and irrigation-water on As accumulation on the root surfaces and in mature rice plants (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(4):862-868.
- [10] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京:科技出版社, 2005:240.
- CHEN Huai-man. Environmental soil science [M]. Beijing:China Science and Technology, 2005:240.
- [11] 中华人民共和国环境保护局. 土壤环境质量标准(GB 15618—1995)[S]. 北京:中国标准出版社, 1995.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Environment quality standard for soils(GB 15618—1995)[S]. Beijing:Standards Press of China, 1995.
- [12] 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]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40 (18):5730-5736.
- [13] Rahman M A, Hasegawa H, Rahman M M, et al. Accumulation of arsenic in tissues of rice plant (*Oryza sativa* L.) and its distribution in fractions of rice grain[J]. *Chemosphere*, 2007, 69(6):942-948.
- [14] Williams P N, M Lei, G-X Sun, et al. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(3):637-642.
- [15] Lu Ying, Dong Fei, Deacon Claire, et al. Arsenic accumulation and phosphorus status in two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars surveyed from fields in South China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158:1536-1541.
- [16] 刘志彦, 陈桂珠, 田耀武. 不同水稻品种幼苗对砷(As)的耐性、吸收及转运[J]. 生态学报, 2008, 28(7):3228-3235.
- LIU Zhi-yan, CHEN Gui-zhu, TIAN Yao-wu. Arsenic tolerance, uptake and translocation by seedlings of three rice cultivars[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7):3228-3235.
- [17] 中华人民共和国卫生部. 食品中砷限量卫生标准(GB 4810—1994)[S]. 北京:中国标准出版社, 1994.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. Tolerance limit of arsenic in foods(GB 4810—1994)[S]. Beijing:Standards Press of China, 1994.
- [18] 中华人民共和国农业部. 粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量(NY 861—2004)[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Limits of eight elements in cereals, legume, tubes and its products(NY 861—2004)[S]. Beijing:Standards Press of China, 2005.
- [19] 董飞, 卢瑛, 张建国, 等. 珠江三角洲稻田土壤砷及其向水稻籽粒迁移特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6):2137-2140.
- DONG Fei, LU Ying, ZHANG Jian-guo, et al. Soil arsenic concentration in paddy fields and its transfer to rice (*Oryza sativa* L.) grain in Pearl River Delta[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6):2137-2140.
- [20] Meharg A A, Jardine L. Arsenite transport into paddy rice (*Oryza sativa*) roots[J]. *New Phytologist*, 2003, 157:39-44.
- [21] 陈玉, 段桂兰, 朱永官, 等. 不同磷浓度下水稻短根突变体与野生型对五价砷吸收和转运的差异[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(4):464-469.
- CHEN Yu, DUAN Gui-lan, ZHU Yong-guan, et al. Differences in arsenic uptake and translocation by short-root rice mutant and wild-type treated with different phosphate concentrations[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(4):464-469.
- [22] 谢正苗, 黄昌勇, 何振立. 土壤中砷的化学平衡[J]. 环境科学进展, 1998, 6(1):22-37.
- XIE Zheng-miao, HUANG Chang-yong, HE Zhen-li. Chemical equilibria of arsenic in soils[J]. *Advances in Environmental Science*, 1998, 6(1):22-37.
- [23] 郭伟, 朱永官, 梁永超, 等. 土壤施硅对水稻吸收砷的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(7):1393-1397.
- GUO Wei, ZHU Yong-guan, LIANG Yong-chao, et al. Effect of application of silicon on arsenic uptake by rice seedlings in soil[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(7):1393-1397.
- [24] 石孟春. 硅对水稻砷吸收与毒害的影响效应研究[D]. 南宁:广西大学硕士学位论文, 2008:32-55.
- SHI Meng-chun. Effects of Silicon on arsenic uptake and toxicity to rice plants (*Oryza sativa* L.)[D]. Nanning:Guangxi University, 2008:32-55.
- [25] Liu Chuan-ping, Li Fang-bai, Luo Chun-ling, et al. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2-3):1466-1472.
- [26] 王世华, 罗群胜, 刘传平, 等. 叶面喷硅对水稻籽实重金属积累的抑制效应[J]. 生态环境, 2007, 16(3):875-878.
- WANG Shi-hua, LUO Qun-sheng, LIU Chuan-ping, et al. Effects of leaf application of nanometer silicon to the accumulation of heavy metals in rice grains[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3):875-878.