

# 珠江三角洲稻田土壤砷及其向水稻籽粒迁移特征

董飞<sup>1</sup>, 卢瑛<sup>1\*</sup>, 张建国<sup>2</sup>, 闫秋艳<sup>3</sup>, 尹伟<sup>1</sup>, 陈春霞<sup>1</sup>, 张朝<sup>1</sup>

1. 华南农业大学资源环境学院, 广东 广州, 510642; 2. 华南农业大学农学院, 广东 广州, 510642;

3. 华南农业大学园艺学院, 广东 广州, 510642

**摘要:** 采集珠江三角洲区域水稻(*Oryza sativa* L.)植株的根系、秸秆、稻谷和对应的耕层土壤(0~15 cm)样品, 分析土壤和水稻植株中砷含量, 初步研究土壤砷与土壤基本理化性质的关系及砷在土壤—水稻系统中的迁移规律。结果表明, 土壤砷含量在 1.83~18.14 mg·kg<sup>-1</sup>之间, 土壤砷与土壤有机质、砂粒含量呈显著负相关, 与土壤粉粒含量呈显著正相关。糙米中的砷含量在 0.21~0.43 mg·kg<sup>-1</sup>之间, 均未超过国家食品卫生标准(0.7 mg·kg<sup>-1</sup>), 砷在水稻植株中的分布规律为根>秸秆>颖壳>糙米。糙米砷含量与秸秆砷含量呈极显著正相关, 与秸秆中 P/As、Si/As 摩尔比呈极显著负相关, 因此, 降低秸秆中 As 的积累、增加秸秆中 P、Si 的积累可降低水稻籽粒中的砷含量。

**关键词:** 珠江三角洲; 土壤; 砷; 水稻; 迁移; 磷; 硅

**中图分类号:** X131.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5906(2009)06-2137-04

砷及其化合物是剧毒污染物, 可致畸、致癌、致突变, 是对人类健康危害最严重的污染物之一<sup>[1]</sup>。由于工业的排放(采矿、冶炼等)、含砷化学品(农药、肥料等)的使用和含砷废水或地下水的灌溉, 各种含砷化学物质不断进入土壤。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<sup>[1,2]</sup>。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, 土壤中砷生物有效性、移动性大大增加, 这就导致种植的水稻籽粒中能积累更多的砷<sup>[3]</sup>。水稻(*Oryza sativa* L.)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。在我国一些矿区的研究表明<sup>[4,5]</sup>, 土壤和水稻籽粒中已受到不同程度的砷污染, 影响到人体健康。珠江三角洲是我国经济发达地区之一, 人口密度大, 水稻是该区域种植的主要粮食作物, 刘志彦等<sup>[6]</sup>利用琼脂培养基模拟水稻生长的厌氧环境, 研究了 As 对该区域不同水稻品系幼苗生长的影响以及 As 在其体内的积累及转运特性, 但有关珠江三角洲及其周边地区稻田土壤砷状况、砷在土壤—水稻系统中的迁移规律和影响砷在水稻籽粒中积累的因素鲜见报道。本研究目的就是初步探讨土壤砷含量与土壤基本理化性质关系、砷在水稻植株不同部位的分布以及水稻

籽粒中砷积累与植株中磷、硅含量的关系, 为稻田土壤管理、降低水稻籽粒中砷积累和提高稻米质量提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

2008年7月早稻收获期在珠江三角洲及其周边地区(广州、东莞、惠州、江门和清远)取水稻样 12 个, 水稻品种为在该区域有一定种植面积的优质杂交稻培杂泰丰; 同时采集对应的耕层土壤(0~15 cm)样品。每个样品是由同一田块 3~5 个点样品混合而成。土样在室内风干, 磨碎, 过 2 mm 和 0.15 mm 尼龙网筛备用。水稻秸秆和根用去离子水清洗后烘干粉碎备用; 稻米用去离子水清洗风干, 人工去壳后将糙米和颖壳分别磨碎备用。

### 1.2 测定方法<sup>[7]</sup>

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 mol·L<sup>-1</sup> 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 mol·L<sup>-1</sup> 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, 土壤及植株砷在样品经过 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后, 使用 ICP-MS (Agilent 7500c) 测定, 植物样品中 Si 的测定采用瓷干锅灰化—硅钼蓝比色法。

### 1.3 数据统计

采用 Microsoft Excel2003 和 SPSS11.5 统计分析软件进行数据分析。

**基金项目:** 广东省科技计划项目(2007A020100002-7)

**作者简介:** 董飞(1983年生), 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(1966年生), 男, 副教授。E-mail: luying@scau.edu.cn

**收稿日期:** 2009-09-30

## 2 结果分析

### 2.1 土壤砷与土壤基本理化性质的关系

分析结果表明(表1),土壤中砷含量差异较大,变幅为1.83~18.14 mg·kg<sup>-1</sup>,有7个样品土壤砷含量大于广东省土壤环境背景值(10 mg·kg<sup>-1</sup>);有3个样品大于国家土壤环境质量一级标准(15 mg·kg<sup>-1</sup>)(GB15618-1995),但均未超过国家土壤环境质量二级标准(30 mg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[8]</sup>。土壤砷处于较安全的水平,满足绿色食品生产的土壤环境条件标准。

表1 土壤基本理化性质

Table 1 The physiochemical properties of studied soils

项目	pH	EC/ ( $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	CEC/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	砂粒/% (50~2000 $\mu\text{m}$ )	粉粒/% (2~50 $\mu\text{m}$ )	粘粒/% ( $<2 \mu\text{m}$ )	有效硅 (mg·kg <sup>-1</sup> )	砷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
最小值	4.48	64.5	12.0	19.8	3.79	8.00	24.0	20.0	23.3	1.83
最大值	6.72	245	58.0	115	10.1	52.0	68.0	24.0	104	18.1
平均值±标准误差	5.52±0.19	135±17.5	24.1±3.75	54.6±7.78	5.86±0.48	47.7±4.4	22.3±0.6	30.0±4.3	58.8±6.0	10.2±1.8

粒含量均呈现一定负相关,但相关性均未达到显著水平。Wang 和 Mulligan 结果表明<sup>[9]</sup>,有机质促进土壤砷释放进入土壤溶液,增加土壤砷淋溶进入地下水,这可能是土壤砷含量与有机质含量呈显著负相关的原因,但仍需要进一步研究。

### 2.2 砷在水稻各器官的分布规律

分析结果表明(表2),水稻根系的砷含量在24.5~240 mg·kg<sup>-1</sup>之间。已有研究表明根系能富集大量砷,主要是由于根表铁膜的形成;在水稻生育后期,铁膜主要起到缓冲层作用,使砷主要富集在根

表2 水稻各部位的含砷分布状况

Table 2 The distribution of arsenic in different parts of rice plant

植株部位	样品数	最小值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	最大值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	平均值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	标准差 SD	各部位/ %
糙米	12	0.205	0.431	0.295	0.077	0.228
颖壳	12	0.306	1.28	0.716	0.388	0.552
秸秆	12	1.66	18.0	6.64	4.83	5.12
稻根	12	24.5	240	122	77.6	94.1

土壤中砷含量除与母质砷含量密切相关外,还受到人为作用和土壤性质的影响,进入土壤的砷会被土壤吸附、固定,砷的吸附、固定与解吸、溶解等受土壤因素的影响。相关分析结果表明,土壤砷含量与有机质含量呈显著负相关( $r = -0.612^*$ ,  $n=12$ );与土壤粉粒含量呈显著正相关( $r=0.691^*$ ,  $n=12$ ),而与土壤砂粒含量呈极显著负相关( $r = -0.719^{**}$ ,  $n=12$ );土壤砷与土壤pH、有效硅均呈现一定正相关,与土壤电导率、土壤有效磷、土壤粘

表而减少向体内运输<sup>[10,11]</sup>。

水稻秸秆和颖壳砷含量分别在1.66~18.0 mg·kg<sup>-1</sup>和0.306~1.28 mg·kg<sup>-1</sup>之间。秸秆和颖壳经常作为牲畜饲料,其中的砷会通过食物链而对人体健康产生潜在的威胁,因此,若将秸秆和颖壳作为饲料时,应评估其潜在风险。

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。糙米中的砷含量在0.21~0.43 mg·kg<sup>-1</sup>之间;根据我国卫生部颁布的食品中砷限量卫生标准(GB4810-94)<sup>[12]</sup>,大米砷限量为0.7 mg·kg<sup>-1</sup>,供试的糙米中砷含量均符合国家食品卫生标准。

总之,稻根中砷的含量显著大于秸秆、颖壳和糙米,砷在水稻中的分布情况为根>秸秆>颖壳>糙米,这与前人的研究结果一致<sup>[13]</sup>。

相关分析结果表明,水稻根部砷与土壤砷呈显著正相关( $r = 0.597^*$ ,  $n=12$ );糙米及颖壳中总砷含量均与秸秆总砷含量呈极显著正相关(图1)。水稻秸秆砷含量与根的砷含量也呈一定正相关,但没

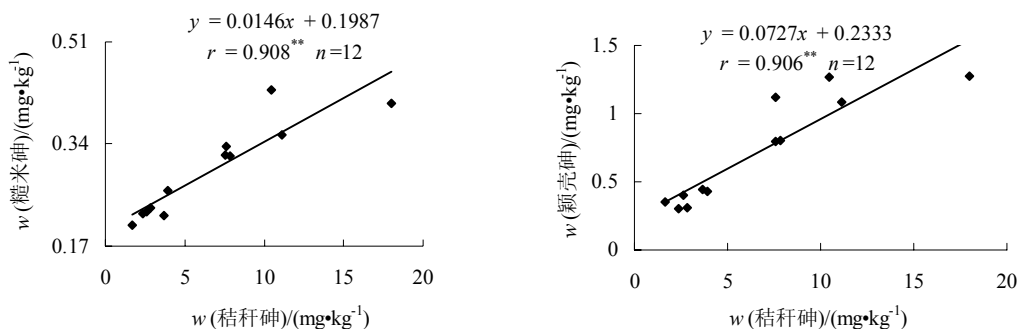


图1 水稻糙米和颖壳砷含量与秸秆砷含量的关系

Fig.1 The relationship between arsenic in rice grain, husk and arsenic in rice straw

有达到显著水平。水稻根部砷累积量随土壤砷含量增加而增多；糙米中的砷含量随水稻秸秆砷含量增加而增多。

### 2.3 影响砷在水稻籽粒中积累的因素

由图 2 可知，糙米砷含量与水稻秸秆中硅砷摩尔比达到极显著负相关 ( $r = -0.826^{**}$ ,  $n=12$ ), 与磷砷的摩尔比也呈极显著负相关 ( $r = -0.863^{**}$ ,  $n=12$ ), 即糙米中砷累积量随秸秆中硅、磷含量的增加而减少。这是由于磷(P)和砷(As)属同族元素, 化学性质相似, 在土壤溶液中两者均主要以阴离子的形式存在。研究表明<sup>[11]</sup>砷酸根是通过和磷酸根共用细胞膜上的转运通道被植物吸收的, 两者在根系吸收方面存在拮抗效应。Ma 等<sup>[14]</sup>研究表明当水稻体内的硅外排转运体发生突变时, 即水稻中硅含量增加时, 亚砷酸盐在水稻秸秆和糙米中的转运和积累都显著降低。郭伟<sup>[15]</sup>等研究证实了在砷污染的土

科学, 1993, 26(6): 50-58.

CHEN Tongbin, LIU Linggeng. Effect of arsenic on rice (*Oryza Sativa* L) growth and development and its mechanism[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1993, 26(6): 50-58.

[3] 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.

[4] 谢华, 廖晓勇, 陈同斌, 等. 污染农田中植物的砷含量及其健康风险评估-以湖南郴州邓家塘为例[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 151-159. XIE Hua, LIAO Xiaoyong, CHEN Tongbin, et al. Arsenic in plants of farmland and its healthy risk: a case study in an as-contaminated site in Deng Jiatang, Chenzhou City, Hunan province[J]. Geographical Research, 2005, 24(1): 151-159.

[5] 张秀武, 王起超, 郑冬梅, 等. 葫芦岛锌厂周围土壤砷污染空间格局和风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1769-1773. ZHANG Xiuyu, WANG Qichao, ZHENG Dongmei, et al. Spatial pattern and risk assessment of soil arsenic around huludao zinc

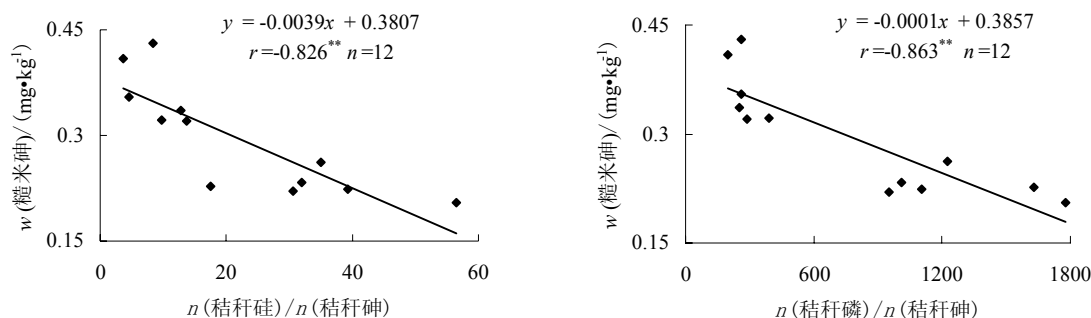


图 2 水稻糙米砷含量与秸秆 Si/As 和 P/As 摩尔比的关系

Fig.2 The relationship between arsenic concentration in rice grain and Si/As, P/As molar ratio in straw

壤中添加外源硅可显著地抑制水稻对砷的吸收。

### 3 结论

(1) 供试的珠江三角洲稻田土壤中砷含量满足绿色食品生产的土壤环境条件标准。土壤砷与有机质、砂粒含量呈显著或极显著负相关, 与土壤粉粒呈显著正相关。

(2) 供试的糙米中砷含量符合国家食品卫生标准, 砷在水稻中的分布为根>秸秆>颖壳>糙米。糙米中砷含量与秸秆砷含量呈极显著正相关。

(3) 糙米中砷含量与水稻秸秆中 Si/As 和 P/As 摩尔比均呈现极显著负相关, 因此在农业生产中可以采取增加秸秆中磷和硅含量的措施, 减少糙米中砷的积累。

### 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] 陈同斌, 刘更另. 砷对水稻生长发育的影响及其原因[J]. 中国农业

plant[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(5): 1769-1773.

[6] 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 Zhiyan, CHEN Guizhu, TIAN Yaowu. Arsenic tolerance, uptake and translocation by seedlings of three rice cultivars[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3228-3235.

[7] 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, 1999: 147-211.

LU Rukun. Analytical Methods of Soil and Agricultural Chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 147-211.

[8] 中华人民共和国环境保护局. 土壤环境质量标准(GB15618-1995)[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(GB15618-1995)[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995.

[9] WANG S L, MULLIGAN C N. Effect of natural organic matter on arsenic release from soils and sediments into groundwater[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2006, 28(3): 197-214.

[10] 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.
- [11] ABEDIN M J, CRESSER M S, MEHARG A A, et al. Arsenic accumulation and metabolism in rice(*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(5): 962-968.
- [12] 中华人民共和国卫生部. 食品中砷限量卫生标准(GB4810-94)[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 (GB4810-94)[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [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] MA J F, YAMAJI N, MITANI N, et al. Transporters of arsenite in rice and their role in arsenic accumulation in rice grain[J]. USA: Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(29): 9931-9935.
- [15] 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 Yongguan, LIANG Yongchao, et al. Effect of application of silicon on arsenic uptake by rice seedlings in soil[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(7): 1393-1397.

## Soil arsenic concentration in paddy fields and its transfer to rice (*Oryza sativa* L.) grain in Pearl River Delta

DONG Fei<sup>1</sup>, LU Ying<sup>1\*</sup>, ZHANG Jianguo<sup>2</sup>, YAN Qiuyan<sup>3</sup>, YIN Wei<sup>1</sup>, CHEN Chunxia<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>

1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

3. College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

**Abstract:** The rice (*Oryza sativa* L.) root, straw, grain and corresponding surface soils (0-15cm) were collected in paddy fields of Pearl River Delta area, the arsenic concentrations in soils and different parts of rice plant were analyzed, and the correlations between soil arsenic and basic soil properties, arsenic transfer in soil-rice system were studied in this paper. The results indicated that soil arsenic concentrations ranged from 1.83 to 18.14 mg·kg<sup>-1</sup>, soil arsenic negatively correlated with soil organic matter, sand content, positively correlated with soil silt content. The arsenic concentrations in rice grain ranged from 0.21 to 0.43 mg·kg<sup>-1</sup>, met the requirement of the national food hygiene standards (0.7 mg·kg<sup>-1</sup>). The distribution of arsenic in different parts of rice plant was root > straw > husk > rice grain. Arsenic concentrations in rice grain had significantly positive correlation with rice straw, whereas significantly negative correlation with Si/As molar ratio, P/As molar ratio, which suggested decreasing As accumulation, and increasing Si and P accumulation in rice straw can decrease As concentration in rice grain.

**Key words:** Pearl River Delta; soil; arsenic; rice (*Oryza sativa* L.); transfer; P; Si