

单天宇, 刘秋辛, 阎秀兰, 等. 镉砷复合污染条件下镉低吸收水稻品种对镉和砷的吸收和累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10):1938–1945. SHAN Tian-yu, LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, et al. Cd and As absorption and transport characteristics of rice in a paddy field co-contaminated by Cd and As [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10):1938–1945.

镉砷复合污染条件下镉低吸收水稻品种对镉和砷的吸收和累积特征

单天宇^{1,2,3}, 刘秋辛^{1,2,3}, 阎秀兰^{1,2*}, 邵金秋^{1,2,3}, 廖晓勇^{1,2}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所环境损害与污染修复北京市重点实验室, 北京 100101; 2.中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为探索镉(Cd)、砷(As)复合污染稻田下不同水稻品种对 Cd、As 的吸收和累积特征,选取 4 个低 Cd 吸收品种(金优 463、金优 268、金优 433 和株两优 189)和 2 个当地主栽品种(五丰优 111 和 马坝油粘),在广东韶关红壤区 Cd、As 复合污染稻田开展大田试验,调查和测定水稻的生长状况以及对 Cd、As 的吸收与转运情况。结果表明,参试 6 个水稻品种产量存在显著差异,2 个当地主栽品种产量显著高于 4 个低 Cd 吸收品种。当地主栽品种马坝油粘籽粒 Cd 含量显著高于其他品种且超过国家污染物限量标准值($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其余品种 Cd 含量均未超标;6 个品种 As 含量均超过国家标准值($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其中金优 268 籽粒 Cd、As 含量均为最低值,分别为 0.05 、 $0.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。相关分析表明,品种间对 Cd、As 的富集能力和各部位的转运能力存在差异,其中低 Cd 吸收品种体内 Cd 从颖壳向籽粒的转运能力较低。因此,为同时降低 Cd、As 复合污染土壤中水稻籽粒 Cd、As 含量,在开展低重金属吸收品种选择研究时,需要同时考虑低 Cd 和低 As 两种因素。

关键词:水稻;品种;镉;砷;复合污染

中图分类号:S511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672–2043(2017)10–1938–08 **doi:**10.11654/jaes.2017–0462

Cd and As absorption and transport characteristics of rice in a paddy field co-contaminated by Cd and As

SHAN Tian-yu^{1,2,3}, LIU Qiu-xin^{1,2,3}, YAN Xiu-lan^{1,2*}, SHAO Jin-qiu^{1,2,3}, LIAO Xiao-yong^{1,2}

(1.Beijing Key Laboratory of Environmental Damage Assessment and Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2.Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Beijing 100101, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To explore safe methods to produce rice grown in paddy soil contaminated by Cd and As, this study selected six varieties of rice (four with low Cd absorption and two local varieties), and carried out field experiments in paddy soil contaminated by Cd and As in the red soil region of Shaoguan, Guangdong Province. The growth trends and characteristics of Cd and As absorption and transfer in low-absorption varieties and local varieties were evaluated. The results showed significant differences of yield among the different kinds of rice; the yields of the local varieties were significantly higher than those of the low-absorption varieties. Cd content in the low-absorption varieties was signifi-

收稿日期:2017-03-24 录用日期:2017-06-15

作者简介:单天宇(1992—),男,硕士研究生,主要从事场地污染评估与修复研究。E-mail:shantianyu@igsrr.ac.cn

* 通信作者:阎秀兰 E-mail:yanxl@igsrr.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41571309);国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA06A206);中国公益性行业(农业)科研专项(201403015)

Project supported: National Natural Science Foundation of China(41571309); National High-tech R&D Program(863 Program)(2013AA06A206); China's Public Welfare Industry Special(Agriculture) Research(201403015)

cantly lower than in the local varieties, and As content of all the varieties was higher than the national standard ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Cd and As content ($0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively) were lowest in variety Jinyou268. Correlation analysis showed that the transport ability from shell to grain for low-absorption varieties was lower than that for the local varieties. Therefore, to reduce Cd and As content in rice which is growing in Cd- and As-contaminated paddy soil, it is important to select rice varieties with low Cd as well as low As absorption capacities.

Keywords: rice; varieties; cadmium; arsenic; co-contamination

随着经济的发展和城市化进程的加快,人类活动导致了大面积农田尤其是稻田受到有害重金属的污染。Cd和As是土壤污染中常见的有毒元素,全国首次土壤污染普查结果显示,As的点位超标率为2.7%,重金属Cd污染加重,全国土地Cd的点位超标率为7.0%^[1]。广东大宝山矿区周围存在以Cd、As为主的多金属复合污染,矿区部分稻田中Cd、As的平均浓度的最大超标倍数都超出土壤环境二级标准值10倍以上^[2]。水稻具有富集重金属Cd的特点,是吸收Cd能力最强的大宗谷类作物之一^[3];受稻田的淹水条件和水稻自身性质的影响,As在水稻茎叶和籽粒中的吸收累积显著高于其他粮食作物^[4]。水稻是我国主要的粮食作物,长期食用重金属超标的稻米,将会对人体健康造成很大的威胁。

在稻田土壤中,Cd和As的化学性质相对,Cd以阳离子的形式存在,具有失去电子的趋向,As主要以阴离子的形式存在,有得到电子的趋向,因此在Cd、As复合污染稻田中同时控制水稻籽粒中的Cd、As污染是目前的研究难题。研究发现,不同的水稻品种对Cd、As的吸收和累积能力存在显著差异。国内外水稻Cd低吸收品种筛选与遗传改良的研究较多^[5-6]。已有研究发现在9个水稻品种中,南粳32对Cd的富集能力最低^[6];另有研究发现水稻品种Jarjan无论是在Cd污染土壤或是无污染土壤中生长,其籽粒Cd含量高于Nipponbare品种5~34倍^[7]。Zavala等^[8]检测204个水稻品种,其籽粒样品As含量范围为5~710 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;Norton等^[9-11]测定了不同水稻主产国家的300多个品种的籽粒As浓度,发现不同品种间变幅可达3.5~35倍;Biswas等^[12]发现水稻品种Shatabdi的籽粒As含量在0.69~0.78 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,超过其他品种1倍以上。应用低重金属吸收品种控制水稻对Cd、As的吸收是有效措施之一,目前国内已经有比较成熟的Cd低吸收品种。在Cd、As复合污染情况下,水稻Cd低吸收品种对As的吸收特性鲜有报道。Liao等^[13]在水稻品种筛选实验中发现,Teyou 524籽粒Cd含量最低,As含量却显著高于其余14个品种。因此,揭示水

稻Cd低吸收品种对As的吸收累积机制对于探索Cd、As复合污染稻田稻米安全生产意义重大。

本研究选取广东省大宝山矿区典型Cd、As复合污染稻田土壤,种植4个Cd低吸收水稻品种(金优263、金优433、金优268、株两优189)和2个当地主栽品种(五丰优111和马坝油粘),研究Cd低吸收品种和当地主栽品种Cd、As吸收累积特征,以期为Cd、As复合污染稻田稻米安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验田位于广东省韶关市水楼下村(33.27°N , 114.26°E)。供试稻田土壤pH 5.01,有机质 $33.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态Cd、As浓度分别为 0.47 、 $1.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳离子交换量(CEC) $10.00 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $11.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效氮 $21.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全Cd、As的浓度分别为 0.51 ~ $1.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 7.5 ~ $94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试的水稻:金优268、株两优189(购自湖南希望种业科技股份有限公司的Cd低吸收品种),金优463、金优433(购自湖南北大荒种业科技有限责任公司),五丰优111、马坝油粘(购自广东韶丰种子有限公司当地常用品种)。

供试水稻于2015年3月19日播种育秧,4月5日插秧,株行距 $27.3 \text{ cm} \times 27.3 \text{ cm}$,7月16日收获早稻。采用随机区组设计,每个品种4次重复,小区面积为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 9 \text{ m}^2$,小区用垄沟隔开,其他田间管理与常规稻田一致。

1.2 样品采集

在水稻成熟期采集水稻及其根际土壤样品。在每个小区避开小区边际,按五点取样法采样。在每个小区内采取5个样点的样品组成1个混合样,每样点1株,共5株。连根拔起(注意茎、叶、穗部的完整性),用塑料纸包扎好。植株从茎基部将根剪掉,样品自然干燥后取出籽粒,带回室内后用去离子水冲洗干净,提取完植株根表铁膜后,按照根、茎叶、颖壳、籽粒分开,于 105°C 下杀青30 min,然后在 65°C 下烘至恒重,粉

碎后备用。土壤样品混合均匀后阴干,用玛瑙研钵研磨后,分别过20目、100目筛,分别测定土壤Cd、As有效态和总量。

1.3 分析方法

1.3.1 总镉和总砷测定

称取0.5000 g植物样品,加入10 mL HNO₃和2 mL H₂O₂,利用微波消解仪消解,超纯水定容至50 mL;称取100目土壤样品0.5000 g,加入5 mL浓HNO₃,5 mL HF,3 mL HClO₄在电热板上缓慢加热,中间经常摇动坩埚,加快反应速度,若酸快蒸干,补加2~3次酸,冷却,用超纯水定容至25 mL。用ICP-MS测定总Cd、As浓度^[14]。样品分析中所用试剂均为优级纯,并添加国家标准参比物质(植物:GBW-07603;土壤:GBW-07404)控制分析质量,保证分析误差均在允许范围内。

1.3.2 根表铁膜提取

将水稻根系放入30 mL的混合溶液中(0.03 mol·L⁻¹ Na₃C₆H₅O₇·2H₂O,0.125 mol·L⁻¹ NaHCO₃和0.6 g Na₂S₂O₄),在室温下(20~25 °C)静置浸泡60 min,然后用去离子水冲洗根系3次,将冲洗液一并转移至50 mL刻度试管中,并定容至100 mL,随后用ICP-MS测定其Cd、As含量^[15]。

1.3.3 土壤镉和砷有效态

AB-DTPA(碳酸氢铵-二乙三胺五乙酸)提取法:准确称取10.00 g过2 mm筛的风干土样,放置在离心管中,加入20 mL浸提液25 °C振荡15 min(180 r·min⁻¹),浸提剂成分为pH=7.6的1 mol·L⁻¹碳酸氢铵(NH₄HCO₃)和0.005 mol·L⁻¹二乙基三胺五乙酸(DT-PA)。然后用定量滤纸过滤并收集滤液;在三角瓶中加入0.25 mL浓硝酸,再小心加入2.5 mL滤液,振荡15 min(不加塞)以去除CO₂。碳酸氢铵和DTPA均为优级纯^[16]。

1.3.4 土壤pH值

用pH计测定土壤pH(水土比为2.5:1)值。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2010进行数据分析和作图,SPSS 12.0进行统计分析,采用LSD多重比较法($P < 0.05$ 和 $P < 0.01$)进行统计分析。

富集系数计算:生物重金属富集系数=植物体内重金属含量/土壤(或沉积物)中重金属含量×100%。

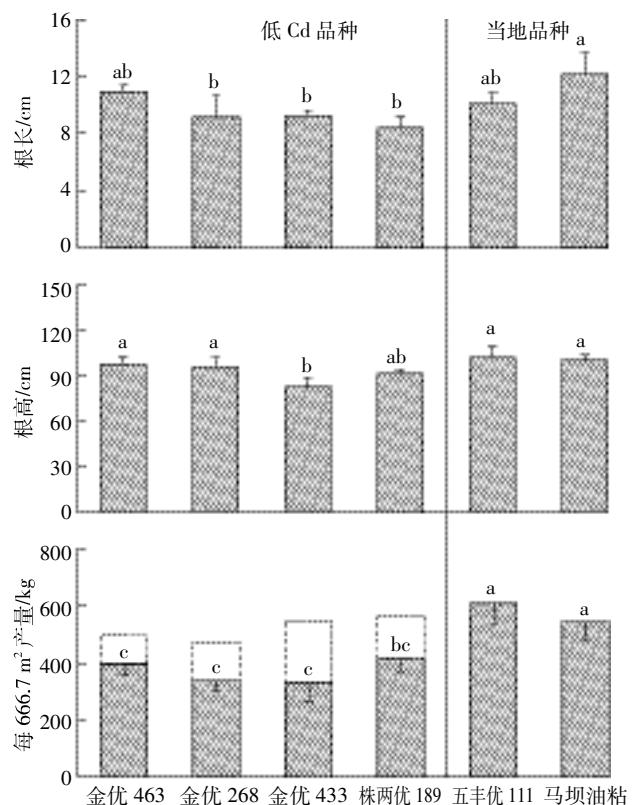
2 结果与讨论

2.1 不同水稻品种的生长状况

根长、株高以及产量是衡量水稻生长状况的常规

指标,图1给出了成熟期各水稻品种的根长、株高及产量。结果表明,对于水稻根长,当地主栽品种马坝油粘的根系最长,并显著高于金优268、金优433和株两优189,可以达到12.5 cm;低Cd品种金优463根长次之,为11 cm;而金优268、金优433和株两优189的根长较短,株两优189的根长仅为9.5 cm。从株高看,当地主栽品种五丰优111和马坝油粘最高,分别可达103.25、99.8 cm,其他4个低Cd品种的株高均低于100 cm,和其在原产地(湖南)的株高特征保持一致。

Cd、As复合污染情况下水稻不同品种产量存在显著性差异($P < 0.05$),2个当地主栽品种产量显著高于低Cd品种,低Cd品种水稻产量差异不显著($P < 0.05$)。其中,当地主栽品种五丰优111和马坝油粘每666.7 m²产量分别为606.7、544.6 kg,金优463、金优268、金优433和株两优189每666.7 m²产量分别为396.44、339.11、328.82、414.96 kg,4个低Cd品种来源地为湖南省,其每666.7 m²产量与来源地相比降幅分别达



虚线表示与低Cd品种来源地相比的产量降幅;不同字母表示不同品种间存在显著性差异($P < 0.05$)。来源地产量数据来自于中国农业科学院作物科学研究所和中国水稻研究所^[18]

图1 水稻的根长、株高和产量

Figure 1 Root length, plant height and yield of rice

到 100、136、180、105 kg(图 1 虚线所示)。

水稻产量是衡量水稻品质的重要指标之一。周歆等通过测定同一种植条件下 33 个水稻品种的产量和重金属含量发现,产量较高的品种 H28 优 9113,其糙米中 As 的累积量较低;产量低的 Q 优 6 号和源优 285,则分别属于 Pb 和 Cd 的高吸收水稻品种^[7]。然而,本研究中低 Cd 品种(金优 463、金优 268、金优 433 和株两优 189)的产量显著低于当地主栽品种。这是由多种因素共同作用导致,气候条件是导致品种产量差异的主要原因之一。湖南省为大陆性亚热带季风湿润气候,年平均降水量在 1200~1700 mm 之间,广东省属于东亚季风区,试验区域为中亚热带气候,平均日照时数较湖南省有所增加,年平均降水量在 1300~2500 mm 之间,当地主栽品种在广东韶关经过多年种植和培育,其产量和品质较为稳定。在田间试验期间,试验基地所在的韶关市遭遇多次大暴雨,其中 7 月中上旬的多次降雨导致部分已成熟稻粒脱落或发芽,4 个低吸收型品种的生长期较当地品种短 10 d 左右。这也可能是造成本研究中水稻产量减少的原因之一。

2.2 不同水稻品种不同部位镉和砷含量

图 2 给出了水稻 5 个部位(根表铁膜、根系、茎叶、壳和籽粒)的 Cd、As 含量。对于籽粒,本研究中 4 个低 Cd 品种在广东韶关 Cd、As 复合污染稻田中仍表现出良好的低 Cd 吸收特性,籽粒 Cd 含量远低于我国《食品中污染物限量标准》^[9]。金优系列表现最佳,金优 268 籽粒 Cd 含量最低,为 0.05 mg·kg⁻¹,金优 433 和金优 463 籽粒 Cd 含量为 0.07 mg·kg⁻¹ 和 0.06 mg·kg⁻¹,均显著低于当地主栽品种五丰优 111 和马坝油粘。当地主栽品种五丰优 111 的籽粒 Cd 含量也较低,为 0.18 mg·kg⁻¹,而马坝油粘籽粒 Cd 含量达到 0.32 mg·kg⁻¹。对于 As 而言,所有供试品种的籽粒 As 含量均超出《食品中污染物限量标准》^[9],其中低 Cd 品种五丰优 111 的籽粒 As 含量最高,达到 0.47 mg·kg⁻¹;而低 Cd 品种金优 268 和当地主栽品种马坝油粘的籽粒 As 含量低于其余 4 个品种,籽粒 As 含量分别低至 0.31、0.34 mg·kg⁻¹。对于水稻根表铁膜和根系,不同品种之间 Cd 含量差异不显著,As 含量差异显著。

对于水稻颖壳,不同品种之间 Cd 含量差异不显著,金优 433 颖壳 As 含量显著低于其余品种。对于水稻茎叶,马坝油粘 Cd 含量显著高于其余品种,为 0.63 mg·kg⁻¹,金优 433 Cd 含量显著低于其余品种,为 0.26 mg·kg⁻¹,其余 4 个品种之间 Cd 含量无差异;五

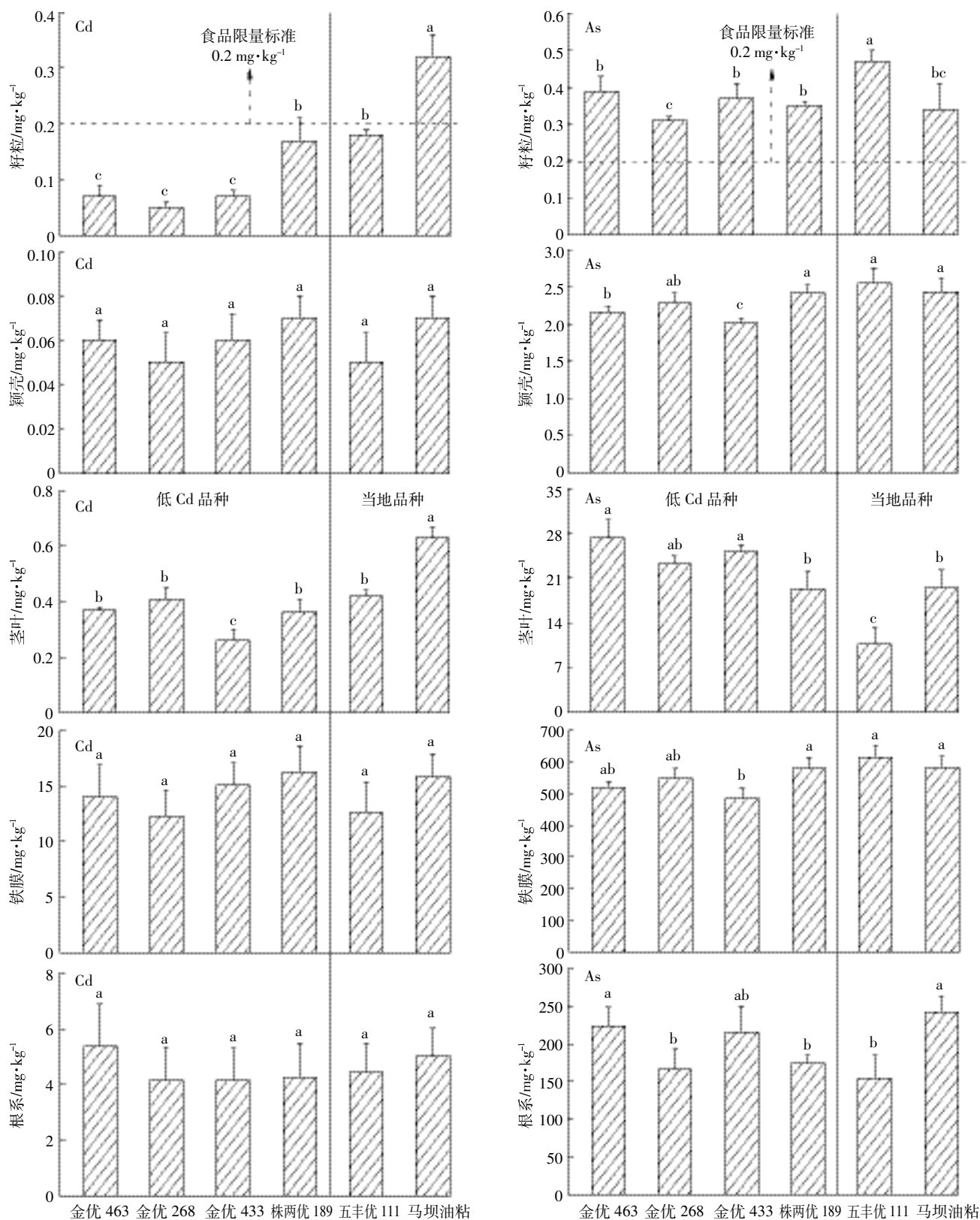
丰优 111 茎叶 As 含量显著低于其余品种,为 10.64 mg·kg⁻¹。

对于 Cd,其从茎叶-颖壳-籽粒的转运过程是导致品种间籽粒 Cd 含量差异的重要原因。本研究中所有品种根部对土壤中 Cd 的吸收和富集能力无显著区别,但低 Cd 品种中 Cd 从颖壳向籽粒的转运系数显著低于当地主栽品种。对于 As,通过 *t* 检验发现,不同水稻品种根系对 As 的吸收能力不同,并且各部位对 As 的转运能力也存在差别。水稻品种的根部 As 含量在 484.65~613.79 mg·kg⁻¹ 范围内,富集系数 ≥ 8.97。进入植株体内的 As 从根系向上迁移至地上部,茎部的 As 含量为 16.16~20.46 mg·kg⁻¹,各品种间差异较小。As 进一步向上迁移至颖壳后,As 含量减少至 2.02~2.56 mg·kg⁻¹,最终进入籽粒的 As 含量为 0.31~0.47 mg·kg⁻¹。

根据图 2 可知,成熟期水稻各部分的 Cd 含量分布规律为根表铁膜>根系>茎叶>籽粒>颖壳,As 含量分布为根表铁膜>根系>茎叶>颖壳>籽粒。水稻铁膜、根系、茎叶及颖壳的 Cd 含量都显著低于 As 含量,而在籽粒中 2 种元素的含量差异较小,主要是水稻对 As 和 Cd 的转运能力不同导致。表 1 和表 2 给出了水稻对 Cd 和 As 的富集系数和转运系数。由表 1 可知,水稻根部对 Cd 的吸收和富集能力较弱,富集系数最高仅为 0.30,最低为 0.23,然而 Cd 从颖壳向籽粒的转运能力很强,其转运系数在 1.00~4.57 之间;由表 2 可知,水稻根部对 As 的吸收和富集能力较强,富集系数 8.97~11.36,转运系数仅为 0.14~0.18。在所有品种中五丰优 111 的籽粒 As 含量最高(0.47 mg·kg⁻¹),其根部富集系数(11.36)和各部位转运系数(茎/根 0.02,颖壳/茎 0.24,籽粒/颖壳 0.18)也显著高于其余品种,表明水稻根部具有很强的 As 吸收和富集能力;金优 268 和马坝油粘的籽粒 As 含量最低,分别为 0.31、0.34 mg·kg⁻¹。

2.3 不同水稻品种根际土壤中镉和砷有效态含量

图 3 给出了不同品种水稻根际土壤 Cd、As 有效态含量。对于 Cd,与原土相比,不同品种土壤有效态 Cd 含量差异均不显著($P < 0.05$),其中金优 463 的有效态 Cd 含量最高,为 0.51 mg·kg⁻¹,而金优 268 的有效态 Cd 含量最低,为 0.42 mg·kg⁻¹。对于 As,金优 268 和五丰优 111 的根际土壤有效态 As 含量较高,分别为 1.81、1.76 mg·kg⁻¹,分别高于原土 0.19、0.14 mg·kg⁻¹;而金优 463 的有效态 As 显著低于原土,且在各个品种中含量最低,仅为 1.38 mg·kg⁻¹。水稻根部会分泌有



不同字母表示同一部位,不同品种间存在显著性差异($P<0.05$);
大米中 Cd、As 含量限值均为 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 《食品中污染物限量标准》(GB 2762—2012)

图 2 水稻不同部位 Cd、As 含量

Figure 2 Cd, As contents in different parts of rice

表1 水稻对 Cd 的富集系数和转运系数

Table 1 Cd bioconcentration factors and transfer coefficient of rice

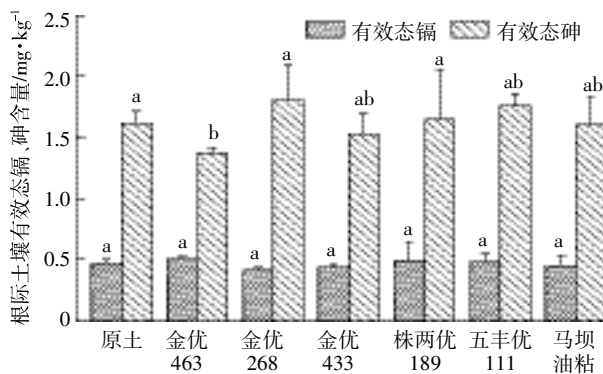
水稻品种	富集/转运系数			
	根/土壤	茎/根	颖壳/茎	籽粒/颖壳
金优 463	0.26±0.06a	0.03±0.00a	0.16±0.04b	1.17±0.01d
金优 268	0.23±0.02a	0.03±0.01a	0.12±0.02b	1.00±0.03d
金优 433	0.28±0.05a	0.02±0.00a	0.23±0.05a	1.17±0.02d
株两优 189	0.30±0.07a	0.02±0.00a	0.19±0.04a	2.43±0.07c
五丰优 111	0.23±0.02a	0.03±0.00a	0.12±0.03b	3.60±0.07b
马坝油粘	0.29±0.03a	0.04±0.02a	0.11±0.01b	4.57±0.08a

注:不同字母表示同一部位、不同品种间存在显著性差异($P<0.05$)。下同。

表2 水稻对 As 的富集系数和转运系数

Table 2 As bioconcentration factors and transfer coefficient of rice

水稻品种	富集/转运系数			
	根/土壤	茎/根	颖壳/茎	籽粒/颖壳
金优 463	9.62±0.65ab	0.05±0.01a	0.08±0.02b	0.18±0.03a
金优 268	10.17±0.35ab	0.04±0.01ab	0.10±0.03c	0.14±0.04b
金优 433	8.97±0.48b	0.05±0.01a	0.08±0.02b	0.18±0.05a
株两优 189	10.75±0.82ab	0.03±0.00ab	0.12±0.04b	0.14±0.02b
五丰优 111	11.36±0.49a	0.02±0.00b	0.24±0.03a	0.18±0.06a
马坝油粘	10.81±0.66ab	0.03±0.01ab	0.12±0.01b	0.14±0.05b



原土指的是未种植水稻的土壤;不同字母对于同一指标表示不同品种间存在显著性差异($P<0.05$)

图3 水稻根际土壤有效态 Cd、As 含量

Figure 3 Contents of bioavailable Cd, As in rhizosphere soils of rice

机酸^[20],环境变酸 pH 值降低有利于根际土壤中的 As 的稳定^[21]。虽然酸性物质会促使 Cd 活化,但土壤中有有效态 Cd 变化并不显著。这可能是由于水稻田为淹水状态,还原条件会促使 Cd 与 S^{2-} 形成沉淀,从而降低 Cd 的有效性^[22]。

2.4 水稻各部位镉和砷含量的相关性分析

对铁膜中 Cd、As、Fe 含量,根系、铁膜和籽粒 Cd

含量,以及土壤有效态 Cd、As、Fe 含量进行相关性分析(图4和图5),结果表明铁膜 Fe 含量与铁膜 Cd 含量、铁膜 As 含量呈极显著正相关, $R^2_{(Fe-As)}=0.2691$, $R^2_{(Fe-Cd)}=0.2835$ ($P<0.01, n=24$),表明根表铁膜可以吸附土壤环境中的 Cd 和 As,且 Fe 含量越高越容易吸附。本研究结果表明籽粒 Cd 含量与铁膜中 Cd 含量呈负相关关系($P<0.05$),与胡莹等^[23]相似,其发现水稻成熟期根表铁膜数量与茎叶和籽粒 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。土壤中有有效态 As 含量与有效态 Fe 呈极显著的负相关关系, $R^2_{(As-Fe)}=0.2337$,表明增加土壤中有有效态 Fe 含量可导致有效态 As 减少,从而有助于降低水稻对土壤中 As 的吸收。胡莹等^[24]的研究结果表明,在 As 含量较低的土壤中,水稻根表铁膜的存在可成为根系 As 的障碍层,阻止 As 向地上部转运。

3 结论

(1)供试的6个水稻品种中,2个当地主栽品种五丰优111和马坝油粘产量显著高于其余4个低Cd品种,4个低Cd吸收品种水稻产量与来源地湖南省相比大幅度下降。

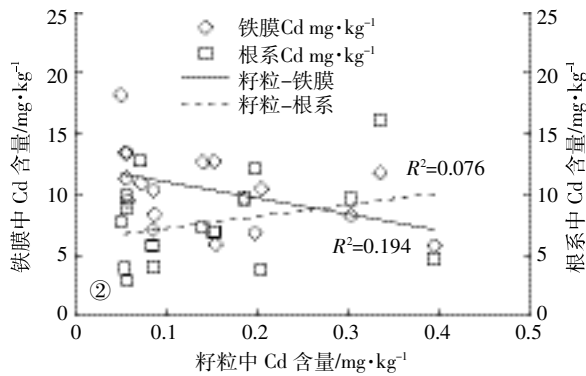
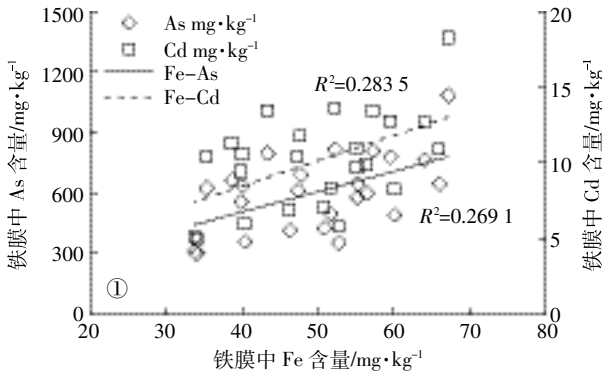


图 4 水稻各部位 Cd、As 含量的相关性分析

Figure 4 Correlation analysis of content of Cd, As of different parts of rice

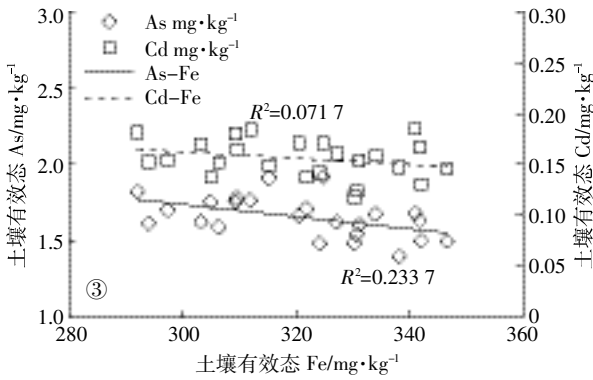


图 5 土壤有效态 Cd、As 和 Fe 含量相关性分析

Figure 5 Correlation analysis of bioavailable Cd, As and Fe contents in soil

(2)水稻各部位 Cd 为根表铁膜>根系>茎叶>籽粒>颖壳, As 含量分布规律为根表铁膜>根系>茎叶>颖壳>籽粒。品种间对土壤中 Cd 的富集能力无显著区别, 而低 Cd 吸收品种体内 Cd 从颖壳向籽粒的转运能力较低; 品种间对 As 的富集能力和各部位的转运能力存在差异。

(3)金优 463、金优 268、金优 433、株两优 189 和五丰优 111 品种籽粒 Cd 含量均低于国家标准限值 ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 所有水稻品种籽粒 As 含量均高于国

家标准限值 ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。其中低 Cd 品种金优 268 籽粒 Cd、As 含量在所有品种中均达到最低, 分别为 0.05 、 $0.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(4)本研究中通过低 Cd 吸收品种可以有效控制稻米 Cd 含量, 但 As 含量仍超标, 通过低 Cd 品种耦合其他安全生产技术从而降低稻米 As 含量值得进一步研究。

参考文献:

[1] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/W020140417558995804588.pdf>
Ministry of Environmental Protection of PRC, Ministry of Land and Resources of PRC. The investigation communique of soil pollution condition of China[EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/W020140417558995804588.pdf>

[2] 周建民, 党志, 司徒粤, 等. 大宝山矿区周围土壤重金属污染分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1172-1176.
ZHOU Jian-min, DANG Zhi, SITU-yue, et al. Distribution and characteristic of heavy metals contaminations in soils from Dabaoshan mine area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6): 1172-1176.

[3] Chaney R L, Reeves P G, Ryan J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. *Biometales*, 2004, 17(5): 549-553.

[4] Williams P N, Villada A, Deacon C, et al. Greatly enhanced arsenic shoot assimilation in rice leads to elevated grain levels compared to wheat and barley[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(19): 6854-6859.

[5] Uruguchi S, Fujiwara T. Cadmium transport and tolerance in rice: Perspectives for reducing grain cadmium accumulation[J]. *Rice*, 2012, 5(1): 5.

[6] 叶新新, 周艳丽, 孙波. 适于轻度 Cd、As 污染土壤种植的水稻品种筛选[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6): 1082-1088.
YE Xin-xin, ZHOU Yan-li, SUN Bo. Screening of suitable rice cultivars for the adaptation to lightly contaminated soil with Cd and As[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6): 1082-1088.

[7] Ueno D, Koyama E, Yamaji N, et al. Physiological, genetic, and molecular characterization of a high-Cd-accumulating rice cultivar, Jarjan[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(7): 2265-2272.

[8] Zavala Y J, Duxbury J M. Arsenic in rice: I. Estimating normal levels of total arsenic in rice grain[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(10): 3856-3860.

[9] Norton G J, Duan G, Dasgupta T, et al. Environmental and genetic control of arsenic accumulation and speciation in rice grain: Comparing a range of common cultivars grown in contaminated sites across Bangladesh, China, and India[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(21): 8381-8386.

- [10] Norton G J, Pinson S R M, Alexander J, et al. Variation in grain arsenic assessed in a diverse panel of rice (*Oryza sativa*) grown in multiple sites[J]. *New Phytologist*, 2012, 193(3):650-664.
- [11] Norton G J, Douglas A, Lahner B, et al. Genome wide association mapping of grain arsenic, copper, molybdenum and zinc in rice (*Oryza sativa* L.) grown at four international field sites[J]. *PLoS One*, 2014, 9(2): e896852.
- [12] Biswas A, Biswas S, Lavu R V S, et al. Arsenic-prone rice cultivars: A study in endemic region[J]. *Paddy and Water Environment*, 2014, 12(3):379-386.
- [13] Liao G, Wu Q, Feng R, et al. Efficiency evaluation for remediating paddy soil contaminated with cadmium and arsenic using water management, variety screening and foliage dressing technologies[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 170:116-122.
- [14] Chen T B, Huang Z C, Huang Y Y, et al. Distributions of arsenic and essential elements in pinna of arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L.[J]. *Science in China Series C-Life Sciences*, 2005, 48(1):18-24.
- [15] 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.
- [16] 陈燕芳, 刘晓端, 谭科艳. AB-DTPA 提取法在重金属污染土壤修复模拟试验中的应用可行性[J]. 岩矿测试, 2010, 29(2):131-135.
CHEN Yan-fang, LIU Xiao-duan, TAN Ke-yan. The application feasibility of AB-DTPA extraction in remediation simulation experiments of heavy metal contaminated soils[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2010, 29(2):131-135.
- [17] 周 歆, 周 航, 胡 森, 等. 不同杂交水稻品种糙米中重金属 Cd、Zn、As 含量的差异研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(11):145-150.
ZHOU Xin, ZHOU Hang, HU Miao. The Difference of Cd, Zn and As accumulation in different hybrid rice cultivars[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(11):145-150.
- [18] 中国农业科学院作物科学研究所, 中国水稻研究所. <http://www.ricedata.cn/variety/>.
Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences. China National Rice Research Institute. <http://www.ricedata.cn/variety/>.
- [19] 田洪芸, 任雪梅, 冯 炜, 等. GB 2762—2012《食品安全国家标准食品中污染物限量》的解读[J]. 中国科技博览, 2013(25):295-296.
TIAN Hong-yun, REN Xue-mei, FENG Wei, et al. GB 2762—2012 National food safety standards of food contaminants[J]. *Zhongguo Keji Bolan*, 2013(25):295-296.
- [20] 刘立军, 常二华, 熊溢伟, 等. 水稻根系分泌物有机酸、多胺与稻米蒸煮品质及蛋白质组分的关系[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2014(3):48-53.
LIU Li-jun, CHANG Er-hua, XIONG Yi-wei et al. Relationships of organic acid and polyamines exudated from roots with grain cooking quality and protein components in rice[J]. *Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Editon)*, 2014(3):48-53.
- [21] 钟松雄, 尹光彩, 陈志良, 等. Eh、pH 和铁对水稻土砷释放的影响机制[J]. 环境科学, 2017(6):1-10.
ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, et al. Influencing mechanism of Eh, pH and iron on the release of arsenic in paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2017(6):1-10.
- [22] 宋文恩, 陈世宝, 唐杰伟. 稻田生态系统中镉污染及环境风险管理[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9):1669-1678.
SONG Wen-en, CHEN Shi-bao, TANG Jie-wei. Cadmium pollution and its environmental risk management in rice ecosystem[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9):1669-1678.
- [23] 胡 莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 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 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):432-437.
HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, et al. Formation of iron plaque on root surface and its effect on Cd uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) at different growth stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3):432-437.
- [24] 胡 莹, 黄益宗, 刘云霞. 砷污染土壤中不同水稻根表铁膜的形成及其对砷吸收和转运影响[J]. 生态毒理学报, 2013(6):923-930.
HU Ying, HUANG Yi-zong, LIU Yun-xia. Genotypic differences in iron plaque formation on root surface and their effect on arsenic uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) grown in arsenic contaminated soil[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013(6):923-930.