

谈宇荣, 徐晓燕, 丁永祯, 等. 旱稻吸收砷镉的基因型差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1436-1443.

TAN Yu-rong, XU Xiao-yan, DING Yong-zhen, et al. Genotypic variation of arsenic and cadmium uptake by upland rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1436-1443.

旱稻吸收砷镉的基因型差异研究

谈宇荣^{1,2}, 徐晓燕¹, 丁永祯^{2*}, 郑向群², 戴礼洪², 冯人伟², 师荣光², 周莉², 陈咄圳², 杨波²

(1.天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300384; 2.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:通过盆栽试验,比较了29种不同基因型旱稻对As、Cd的吸收与转运。研究表明:不同基因型旱稻在生物量和As、Cd吸收上均表现出显著差异,单株平均生物量和变异系数分别为23.57 g和15.8%。茎叶、颖壳和糙米As含量分别为1.022、0.177、0.050 mg·kg⁻¹,变异系数分别为25.1%、54.3%和39.7%;Cd含量分别为0.811、0.230、0.116 mg·kg⁻¹,变异系数分别为58.2%、38.9%和58.0%。旱稻不同器官对As、Cd累积的大小顺序均为糙米<颖壳<茎叶,Cd、As在三器官间的比值分别为1:1.9:6.7和1:3.5:20.4,说明不同器官间Cd转移系数高于As。相关性分析表明,茎叶与颖壳、茎叶与糙米、颖壳与糙米之间的相关系数:Cd分别为0.466($P<0.05$)、0.658($P<0.01$)和0.758($P<0.01$),As分别为0.437($P<0.05$)、0.290和0.611($P<0.01$)。旱稻对Cd的吸收与转运能力以及其基因型差异均较As大。29份不同基因型旱稻糙米As含量均达标(NY 5115—2002, 0.5 mg·kg⁻¹),82.8%的旱稻Cd达标(GB 2762—2012, 0.2 mg·kg⁻¹),糙米As、Cd含量均低于二分之一标准的基因型占37.9%,包括V2、V3、V6、V11、V12、V13、V15、V16、V19、V20和V25,表明通过筛选Cd、As低吸收的旱稻进行非淹水种植可保障稻米安全生产。

关键词:旱稻;砷;镉;基因型;筛选

中图分类号:S511.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)08-1436-08 doi:10.11654/jaes.2016-0334

Genotypic variation of arsenic and cadmium uptake by upland rice

TAN Yu-rong^{1,2}, XU Xiao-yan¹, DING Yong-zhen^{2*}, ZHENG Xiang-qun², DAI Li-hong², FENG Ren-wei², SHI Rong-guang², ZHOU Li², CHEN Pei-zhen², YANG Bo²

(1.College of Agriculture, Resources and Environmental Sciences, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 2.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: Arsenic(As) and cadmium(Cd) pollution is one of the major environmental problems in rice plantation in China. In this study, pot experiments were used to study As and Cd absorption and translocation in 29 different genotypic upland rice cultivars. The results showed that there are remarkable difference in the biomass and As and Cd uptake among upland rice cultivars. The average biomass per plant and the variation coefficients were 23.57 g and 15.8%, respectively. In shoot, husk and grain(brown rice), As element concentration were 1.022, 0.177 mg·kg⁻¹ and 0.050 mg·kg⁻¹ and the variation coefficients were 25.1%, 54.3% and 39.7%, respectively; Cd element concentration were 0.811, 0.230 mg·kg⁻¹ and 0.116 mg·kg⁻¹ and the variation coefficients were 58.2%, 38.9% and 58.0%, respectively. The concentration of As and Cd in plant tissues showed characteristics as follows:grain<husk<straw, and the Cd and As element content ratios in this three tissues were 1:1.9:6.7 and 1:3.5:20.4, respectively. The correlation coefficients of Cd concentration among different tissues were higher than that of As. Correlation analysis showed that, the correlation coefficients of Cd between straw and husk, straw and grain, husk and grain were 0.466($P<0.05$), 0.658($P<0.01$) and 0.758($P<0.01$), and that of As were 0.437($P<0.05$), 0.290 and 0.611($P<0.01$), respectively. The migration capability of Cd among different tissues were stronger than that of As, and the genotypes differences with capability to absorb and transport Cd were bigger than As. As element contents in the grain of all cultivars were less than the standard for food security(NY 5115—2002, 0.5 mg·kg⁻¹), and 82.8% of all cultivars contained the Cd contents in the grain less than the standards(GB 2762—2012, 0.2 mg·kg⁻¹),

收稿日期:2016-03-14

基金项目:国家自然科学基金项目(41101306,41471274);中国农科院科技创新工程,农业部生态环境保护项目

作者简介:谈宇荣(1988—),男,江西瑞昌人,硕士研究生,主要从事农田重金属污染防治工作。E-mail:tanyurong2013@163.com

*通信作者:丁永祯 E-mail:dinyongzhen@caas.cn

and 37.9% of all cultivars contained both Cd and As contents in the grain less than half of the standards, including V2, V3, V6, V11, V12, V13, V15, V16, V19, V20 and V25. This study showed that screening Cd lower absorption of upland rice varieties grown under non-flooded cultivation can guarantee safety production in China.

Keywords: upland rice; arsenic; cadmium; genotype; screening

我国农田土壤重金属污染日益严重,2014年环保护部、国土资源部联合发布的“全国土壤污染状况调查公报”显示^[1],土壤镉(Cd)、砷(As)污染问题最为突出,全国点位超标率分别为7.0%和2.7%。农业部对湖北、湖南、江西和四川四省重点污染区水稻田调查发现,镉、砷超标面积最大^[2]。在主要农作物中,水稻对Cd、As的吸收能力最强,稻米已成为我国Cd、As暴露的主要来源^[3-4]。如何控制水稻Cd、As吸收,是当前亟需解决的重要环境问题。

作物吸收重金属,主要取决于作物本身的遗传因素以及外界环境条件^[5-6]。遗传因素方面,作物吸收重金属存在显著的品种间差异^[7]。蒋彬和张慧萍^[8]发现,239份水稻品种籽粒镉含量在0.01~1.98 mg·kg⁻¹之间,砷含量在0.08~49.14 μg·kg⁻¹之间,品种间差异极显著。吴启堂等^[9]、刘志彦等^[10]和Mei等^[11]也发现不同水稻品种对镉、砷的耐性和吸收具有显著差异。选种镉、砷低吸收水稻品种是实现稻米重金属含量达标的重要途径之一。

水分管理是影响水稻镉、砷吸收最主要的外界环境因素之一,而且二者吸收量大小受田间水分的影响几乎完全相反:田间水分多,Cd吸收量少但As吸收量大^[12];田间水分少,Cd吸收量大但As吸收量小。研究表明^[13],糙米Cd含量在长期淹水下比间歇灌溉下降了41.3%,比湿润灌溉下降了70.7%。淹水条件下稻米总砷可达富氧条件下的10~15倍,籽粒无机砷是富氧条件下的2.6~2.9倍^[14]。针对南方大面积的镉、砷复合污染农田,如何进行水分管理确是一大难题。

旱稻是全球五大稻作类型之一,是一种抗旱性极强的栽培稻,其一生无需水层,种植旱稻可能会显著降低As的吸收。目前,有关旱稻吸收砷、镉的研究报道相对较少^[15-18],本研究拟以29份不同基因型旱稻为材料,研究非淹水条件下其对Cd、As的吸收与累积特征,以筛选出低As与低Cd吸收品种,为Cd与As污染农田稻米安全生产提供支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

29份旱稻材料由上海市农业生物基因中心提

供,其品种名称及类型见表1。这些旱稻资源收集于世界各地,具有较大的遗传差异背景。土壤采自湖南省郴州市某地,属石灰性土壤发育的水稻土(0~20 cm),经自然风干、过筛、去杂质和充分混匀后备用。土壤基本理化性状:pH 7.59、CEC 21.6 cmol·L⁻¹、有机质 15.25 g·kg⁻¹、碱解氮 35.47 mg·kg⁻¹、速效磷 21.58 mg·kg⁻¹、速效钾 35.23 mg·kg⁻¹,全As含量 82.6 mg·kg⁻¹,全Cd含量 1.35 mg·kg⁻¹,As、Cd分别是土壤环境质量标准(GB 15618—1995)的4.13、1.35倍。

表1 供试旱稻基本信息

Table 1 Basic information of the tested upland rice cultivars

编号 Number	品种名称 Variety name	类型 Type
V1	中旱3号-6	粳型常规
V2	超级旱稻2-9	籼型常规
V3	超级旱稻2-5	籼型常规
V4	IR442-2-58	粳型常规
V5	IR1487-372-4	粳型常规
V6	IR2061-522-6-9	粳型常规
V7	DALAWAN	粳型常规
V8	DOURADOAGULHA	籼型常规
V9	TRESMESES	籼型常规
V10	SERATASMALAM	粳型常规
V11	CARTUNA	籼型常规
V12	IR60080-46A	粳型常规
V13	六黄占	籼型常规
V14	IR65251-19-1-B	粳型常规
V15	IR75942-9	粳型常规
V16	MIGA	籼型常规
V17	KU10	籼型常规
V18	MONOLAYA	粳型常规
V19	SILEWAH	籼型常规
V20	NORIN24	籼型常规
V21	MRC172-9	籼型常规
V22	MILT1444	籼型常规
V23	IR45	粳型常规
V24	SINALOAA68	粳型常规
V25	BLUEBELLE	籼型常规
V26	KN96	粳型常规
V27	KN361-1-8-6	粳型常规
V28	旱恢53	粳型常规
V29	旱优1111	籼型常规

1.2 实验方法

试验于玻璃温室内进行,采用盆栽试验,每盆装风干土 6 kg,每种基因型重复 3 次,播种前按 N:P₂O₅:K₂O=1:1:1(质量比)施入基肥并浇水使土壤保持润湿,平衡 2 周。早稻直播,每盆播种 8~10 粒,在三叶期定植,每盆留 3 株。其他操作同常规大田生产。

早稻成熟后采样,收集地上部,先进行脱粒,用自来水洗净茎叶和稻谷,最后用去离子水润洗,用滤纸吸干表面水分,于 105 °C 杀青 30 min,70 °C 烘干至恒重后粉碎。稻谷风干后脱壳,分为颖壳和糙米两部分,分别烘干至恒重后粉碎过筛待测。

1.3 样品检测

样品用硝酸-高氯酸(4:1)混合消煮^[9]。As、Cd 使用 ICP-MS(Agilent 7700x,USA)测定,仪器检出限<0.01 μg·L⁻¹。分析过程中每隔 20 个样品随机选取 1 个样品进行重复测量,重复性偏差满足相关国家标准的要求,同时在测定过程中每 20 个样品回测 1 次标准溶液,回测偏差≤5%。使用国家标准物质大米粉(GBW 10010)进行质量控制,测定结果全部在定值范围内。

1.4 数据处理与分析

砷、镉在早稻不同器官间的转运系数按以下公式计算:

$$GH = \text{糙米含量} / \text{颖壳含量}$$

$$GS = \text{糙米含量} / \text{茎叶含量}$$

$$HS = \text{颖壳含量} / \text{茎叶含量}$$

数据用 Microsoft Excel 2013 处理,统计分析和差异显著性检验用 SPSS 22.0 统计软件,显著性差异水平为 $P < 0.05$ 。

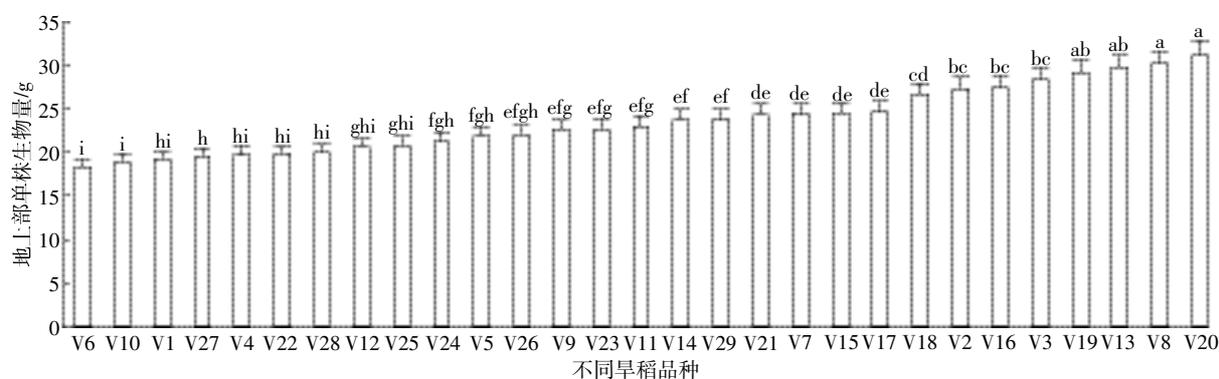
2 结果与分析

2.1 早稻生物量

由图 1 可以看出,As 和 Cd 复合污染土壤条件下,不同早稻品种间生物量差异显著。29 份不同基因型早稻平均单株地上部生物量为 23.57 g,变异系数为 15.8%。单株地上部生物量从小到大,排在前几位的是 V6、V10、V1、V27、V4、V22、V28 和 V12,排在后几位的是 V19、V13、V8 和 V20,最大者 V20 (31.09 g)是最小者 V6(18.21 g)的 1.7 倍,说明不同基因型早稻在生物量方面具有较大的差异。究其原因:一方面可能源于不同基因型早稻的遗传差异;另一方面,可能是由镉、砷胁迫的敏感程度不同而引起。

2.2 不同基因型早稻各器官 As、Cd 含量

不同基因型早稻各器官 As、Cd 含量见表 2。29 份基因型早稻茎叶 As 平均含量为 1.022 mg·kg⁻¹,变异系数为 25.1%,品种 V22、V24 含量最高,而品种 V8、V13、V16、V17 和 V19 含量较低,最高者 V22 (1.574 mg·kg⁻¹)是最低者 V19(0.569 mg·kg⁻¹)的 2.8 倍。颖壳 As 平均含量为 0.177 mg·kg⁻¹,变异系数为 54.3%,品种 V24 含量最高,品种 V8、V13、V16、V19、V22 和 V23 中含量较低,最高者 V24(0.515 mg·kg⁻¹)是最低者 V16(0.066 mg·kg⁻¹)的 7.8 倍。糙米中 As 平均含量为 0.050 mg·kg⁻¹,变异系数为 39.7%,品种 V7、V11、V17、V24、V25、V26 和 V29 含量较高,而品种 V8、V13、V16 和 V19 含量较低,最高者 V26(0.084 mg·kg⁻¹)是最低者 V8(0.014 mg·kg⁻¹)的 6.0 倍。



不同字母表示不同基因型早稻地上部单株生物量差异显著, $P < 0.05$

Values followed by different letters in a column are significantly different at $P < 0.05$

图 1 不同基因型早稻成熟期单株生物量

Figure 1 The biomass comparisons of different upland rice genotypes at maturation

表2 早稻不同器官 As、Cd 含量

Table 2 The content of As and Cd in different tissues of upland rice cultivars

品种 Varieties	As 含量 Arsenic content/mg·kg ⁻¹			Cd 含量 Cadmium content/mg·kg ⁻¹		
	茎叶 Straw	颖壳 Husk	糙米 Grain	茎叶 Straw	颖壳 Husk	糙米 Grain
V1	1.398bc	0.374b	0.068b	1.466ab	0.443a	0.290a
V2	1.202de	0.167efg	0.055cd	0.252j	0.235efg	0.094dfg
V3	1.256cd	0.161fg	0.048de	0.263j	0.165iklm	0.032i
V4	1.035fg	0.185ef	0.044ef	1.457ab	0.338b	0.141c
V5	0.911hi	0.274c	0.048de	0.365ij	0.313bc	0.130cd
V6	0.904hi	0.126gh	0.042ef	0.828efg	0.125mnop	0.078fgh
V7	1.118ef	0.258cd	0.079a	0.197j	0.279cde	0.112cdf
V8	0.639k	0.087i	0.014h	0.764fgh	0.285cd	0.104df
V9	1.201de	0.121gh	0.039ef	1.340bc	0.277cde	0.112cdf
V10	1.305cd	0.156fg	0.043ef	0.959def	0.275cde	0.125cd
V11	0.879hi	0.167efg	0.078a	0.962def	0.177hikl	0.027i
V12	1.191de	0.175efg	0.057cd	0.726fgh	0.187ghik	0.088fgh
V13	0.691k	0.074i	0.028gh	0.170j	0.102op	0.030i
V14	0.857i	0.155fg	0.034fg	0.771fgh	0.222fgh	0.136c
V15	0.971gh	0.153fg	0.049de	0.983def	0.153klmn	0.091dfg
V16	0.707jk	0.066i	0.021h	0.919efg	0.133lmnop	0.062ghi
V17	0.616k	0.203def	0.071ab	1.183cd	0.233efg	0.197b
V18	0.957ghi	0.182ef	0.065bc	0.914efg	0.184hik	0.101df
V19	0.569k	0.074i	0.027gh	0.175j	0.107nop	0.036i
V20	1.059fg	0.159fg	0.030fg	0.172j	0.100p	0.038i
V21	0.970gh	0.215de	0.040ef	1.045de	0.177hikl	0.110cdf
V22	1.574a	0.083i	0.031fg	1.462ab	0.306bc	0.288a
V23	1.002gh	0.088hi	0.038ef	1.313bc	0.202ghik	0.118cdf
V24	1.508ab	0.515a	0.078a	0.310j	0.253def	0.143c
V25	1.166def	0.167efg	0.083a	0.550hi	0.291bcd	0.076fgh
V26	0.890hi	0.141g	0.084a	0.687gh	0.208fghi	0.103df
V27	1.223de	0.122gh	0.047de	1.672a	0.235efg	0.203b
V28	0.843ij	0.172efg	0.041ef	1.385bc	0.456a	0.208b
V29	0.984gh	0.300c	0.076a	0.240j	0.219fgh	0.105df
平均值 Average	1.022	0.177	0.050	0.811	0.230	0.116
变异系数 Coefficient of variation/%	25.1	54.3	39.7	58.2	38.9	58.0

注:不同字母表示不同基因型早稻同一部位 Cd、As 含量差异显著($P<0.05$),下同。

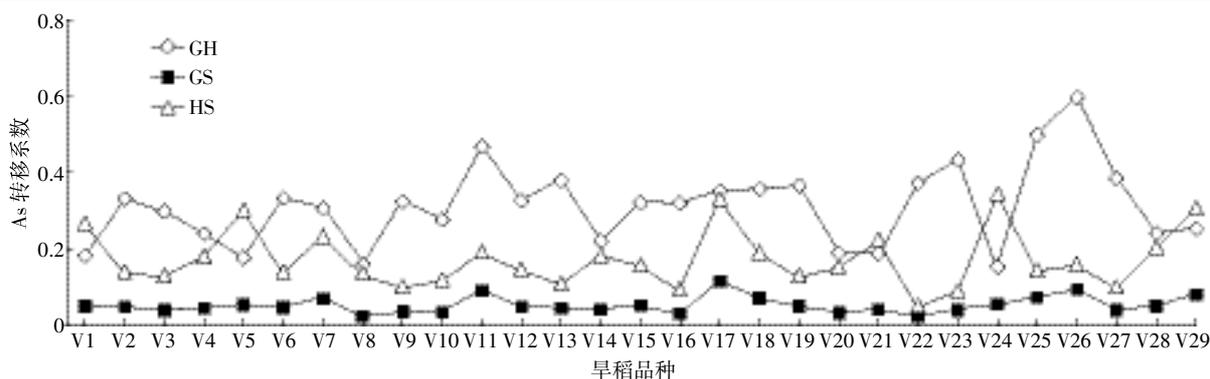
Note: Values followed by different letters in a column are significantly different at $P<0.05$, the same below.

不同早稻各部位 Cd 含量差异也非常大,茎叶 Cd 平均含量为 $0.811 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 58.2%,品种 V1、V4、V22 和 V27 的茎叶 Cd 含量较高,而 V2、V3、V5、V7、V13、V19、V20、V24 和 V29 茎叶 Cd 含量较低,最大者 V27($1.672 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)是最小者 V13($0.170 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的 9.8 倍。颖壳 Cd 平均含量为 $0.230 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 38.9%,品种 V1 和 V28 中含量最高,早稻品种 V6、V13、V16、V19 和 V20 中含量较低,最高者 V28($0.456 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)是最低者 V20($0.100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的 4.6 倍。糙米 Cd 平均含量为 $0.116 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数

为 58.0%,品种 V1 和 V22 含量最高,而品种 V3、V11、V13、V16、V19 和 V20 含量较低,最高者 V1($0.290 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)是最低者 V11($0.027 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的 10.7 倍。

2.3 不同基因型早稻 As、Cd 在茎叶、颖壳和糙米中的转运差异

不同基因型早稻 As 转运系数见图 2。29 份早稻品种之间存在较大的差异。GH 变化范围为 $0.151\sim 0.596$,平均值为 0.311,变异系数为 34.0%;GS 变化范围为 $0.020\sim 0.115$,平均值为 0.051,变异系数为 43.6%;HS 变化范围为 $0.053\sim 0.342$,平均值为 0.173,



GH: 糙米 As 含量/颖壳 As 含量, GS: 糙米 As 含量/茎叶 As 含量, HS: 颖壳 As 含量/茎叶 As 含量。下同
GH: the ratio of As in grain to husk, GS: the ratio of As in grain to straw, HS: the ratio of As in husk to straw. The same below

图2 不同基因型早稻 As 转运系数

Figure 2 As transport coefficients of different upland rice genotypes

变异系数为 43.4%。As 在不同器官间的转运系数差异大,说明早稻对 As 的吸收和转运存在较大的基因型差异。除个别品种外(V1、V5、V21、V24、V29),总体表现为 GH>HS>GS,说明 As 从颖壳转移到籽粒最容易,从茎叶转移到颖壳次之,从茎叶转移到籽粒最低。

不同基因型早稻 Cd 转运系数也存在较大的差异(图 3)。GH 变化范围为 0.153~0.941,平均值为 0.493, 变异系数为 37.5%;GS 变化范围为 0.028~0.569,平均值为 0.185,变异系数为 70.0%;HS 变化范围为 0.141~1.416,平均值为 0.420,变异系数为 75.4%。与 As 比较,Cd 转运系数的变异系数较大,说明早稻对 Cd 的吸收在不同品种间差异更大。总体来说,早稻茎叶向糙米 Cd 转移系数最低,部分基因型糙米转移到颖壳容易,部分从茎叶转移到颖壳容易,品种间的 Cd 转移系数较 As 转移系数更为复杂。

2.4 早稻吸收 As、Cd 的相关性分析

早稻对 Cd 和 As 吸收、累积的相关性如表 3。茎叶和糙米中,As 与 Cd 含量相关性不显著,说明茎叶

表 3 早稻器官 As、Cd 含量相关性

Table 3 The correlation coefficients among Cd and As content

	茎叶 As	颖壳 As	糙米 As	茎叶 Cd	颖壳 Cd	糙米 Cd
茎叶 As	1					
颖壳 As	0.437*	1				
糙米 As	0.290	0.611**	1			
茎叶 Cd	0.172			1		
颖壳 Cd		0.386*		0.466*	1	
糙米 Cd			0.091	0.658**	0.758**	1

注:* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

Note: *and **:significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

和籽粒累积 As、Cd 没有必然联系。但在颖壳中,As、Cd 含量相关系数为 0.386,呈显著正相关($P<0.05$),表明较高的 Cd 含量可能伴随着较高的 As 含量。

同种元素在不同器官间的相关性:As 表现为茎叶与颖壳相关系数 0.437,呈显著正相关($P<0.05$),颖壳与糙米相关系数 0.611,呈极显著正相关($P<0.01$),茎叶与糙米间相关性不显著;Cd 表现为茎叶与颖壳呈显

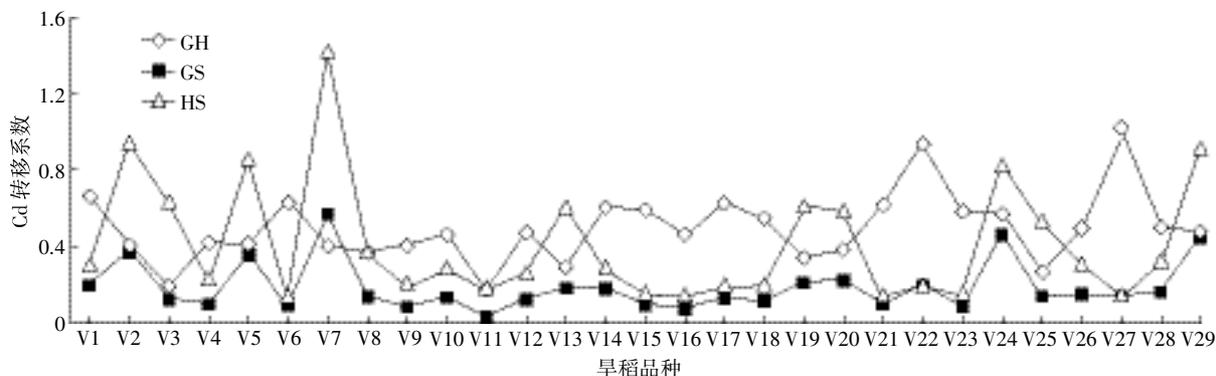


图3 不同基因型早稻 Cd 转运系数

Figure 3 Cd transport coefficients of different upland rice genotypes

著正相关,相关系数 0.466,颖壳与糙米、茎叶与糙米间均呈极显著正相关,相关系数分别为 0.758 和 0.658。Cd 在茎叶与糙米、颖壳与糙米间的相关系数都比对应的 As 高,说明 Cd 更易于在不同器官间迁移。

3 讨论

土壤 As、Cd 复合污染胁迫下,29 份不同基因型早稻生物量差异显著,单株地上部生物量最大值与最小值相差近 1 倍,差异大的原因主要在于早稻间本身的遗传差异,以及不同基因型早稻对镉、砷胁迫的耐性差异。

作物对重金属的吸收与转运差异,主要受遗传因素控制^[20],不同基因型早稻各器官对 As 或 Cd 的吸收、累积差异较大,茎叶、颖壳和糙米等部位含量的变异系数,As 分别为 25.1%、54.3%和 39.7%,Cd 分别为 58.2%、38.9%和 58.0%,显示出早稻对 As 或 Cd 的吸收存在显著的品种间差异。这与前人的研究结果一致^[21-23]。而且,Cd 的变异系数总体高于 As,与程旺大^[24]针对 31 份不同基因型水稻进行连续 3 年的重金属吸收差异结果一致。王林友等^[25]研究了 78 份水稻对 Cd、As 的吸收,也发现糙米 Cd 含量变异系数(40.5%)大于 As(17.7%)。张红振等^[26]通过文献大数据分析,亦得到相同的结论。但蒋斌和张慧萍^[8]比较的 239 份水稻品种中,精米 As 变异系数(51.8%)大于 Cd(39.8%)。本研究茎叶和籽粒 Cd 变异系数大于 As,但颖壳相反,在一定程度上说明不同基因型早稻对 Cd 的吸收差异更大。

所有基因型早稻对 Cd、As 器官间的吸收大小均表现为茎叶>颖壳>糙米,呈现自下而上递减的规律,与前人结果基本一致^[8,27]。As、Cd 在地上部不同器官间的转移系数不同,糙米、颖壳和茎叶中平均含量的比值,As 为 1:3.5:20.4,Cd 为 1:1.9:6.7。从颖壳到糙米,Cd 的转运能力是 As 的 1.8 倍;从茎叶到颖壳,Cd 的转运能力是 As 的 1.7 倍;从茎叶到籽粒,Cd 的转运能力是 As 的 3 倍。同时,Cd 含量在茎叶、颖壳和糙米不同部位间均具有显著正相关性,而且相应相关系数均大于 As,表明 Cd 不同器官间迁移性更强。程旺大等^[24]比较了 31 份不同基因型水稻对 Cd 和 As 的吸收,也发现 Cd 从茎叶转运到籽粒远大于 As。同时,就 As、Cd 在不同基因型早稻器官间的转移系数来说,3 种转运系数(GH、GS 和 HS)及其变异系数均表现为 Cd 高于 As。这些结果说明,Cd 在早稻不同器官间的迁移能力较 As 强,而且早稻转运 Cd 能力的基因型

差异也大于 As。

作物吸收重金属除受本身的遗传因素影响外,外界环境条件也是重要因素之一。不同基因型早稻种植在超过土壤环境质量标准(GB 15618—1995)4.13 倍砷污染土壤中,糙米 As 平均含量仅为 0.05 mg·kg⁻¹,远低于“无公害食品—大米”标准(NY 5115—2002)的 0.5 mg·kg⁻¹,而且糙米 As 最大值(0.084 mg·kg⁻¹)仅为标准的 16.8%。供试土壤 As 含量高,而早稻籽粒 As 含量极低的主要原因在于,旱作可显著降低土壤 As 活性,从而减少作物 As 吸收。土壤砷主要以无机态的 As(Ⅲ)和 As(V)存在,二者间的转化主要受氧化-还原电位所控制^[28]。富氧条件下,As(Ⅲ)氧化为 As(V),后者被吸附到粘粒矿物、铁锰氧化物及其水化氧化物和土壤有机质上,并且还可以和铁矿以磷酸铁的形式共沉淀,从而降低了其生物有效性。Xu 等^[14]研究表明,淹水条件下稻米总砷是富氧条件下的 10~15 倍。干湿交替条件下种植出的稻米 As 含量远低于较持续淹水条件^[29]。因此,早稻是降低 As 暴露风险、保障稻米质量安全的有利选择。

然而,旱作条件在降低糙米 As 含量的同时,可能会导致 Cd 含量的增加^[15]。旱作可使稻田土壤交换态、碳酸盐结合态 Cd 含量增加,从而促进 Cd 向植株的迁移和累积^[30-31]。29 份早稻品种糙米 Cd 含量与国标 0.2 mg·kg⁻¹(GB 2762—2012)相比,超标和接近超标的品种有 V1、V17、V22、V27 和 V28 共 5 份,占比 17.2%,另外 24 个品种均未超标,糙米 Cd 合格率的基因型达 82.8%。总体来说,在土壤 Cd 超标 1.35 倍的情况下,早稻 Cd 超标率相对较低,其原因可能是供试土壤属碱性土(pH 7.59),Cd 的有效态含量较低,导致植株吸收量较小。比较早稻与水稻之间的差异,本研究早稻 Cd 从茎叶向糙米的转移系数为 0.185,冯文强等^[32]研究的 20 个品种水稻,相应转运系数与本研究早稻相当(0.200),但李坤权等^[33]研究的 20 份水稻,相应转运系数比较小(0.030),说明早稻与水稻在 Cd 转运能力方面差异可能不大。但是,植物吸收转运重金属,与环境、遗传及环境与遗传交互作用有关^[5-6,34]。早稻与水稻对 Cd 的转运能力出现差异的原因还需进一步研究。

总体来说,所有早稻的糙米 As 含量远远低于无公害食品标准(NY 5115—2002),说明非淹水种植早稻可完全实现稻米 As 的安全控制。糙米 Cd 含量达标(0.2 mg·kg⁻¹)的基因型占 82.8%;糙米 Cd 含量不到

国标 50%的基因型占 37.9%,包括 V11(0.027 mg·kg⁻¹)、V13 (0.030 mg·kg⁻¹)、V3 (0.032 mg·kg⁻¹)、V19(0.036 mg·kg⁻¹)、V20(0.038 mg·kg⁻¹)、V16(0.062 mg·kg⁻¹)、V25 (0.076 mg·kg⁻¹)、V6 (0.078 mg·kg⁻¹)、V12(0.088 mg·kg⁻¹)、V15(0.091 mg·kg⁻¹)和 V2(0.094 mg·kg⁻¹);糙米 Cd 含量不到国标的 25%基因型占 17.2%。研究表明,完全可以通过筛选出具有 As、Cd 均低吸收的早稻品种,在非淹水富氧条件下种植,有效实现 Cd、As 复合污染情况下的稻米安全生产。

4 结论

(1)土壤 As、Cd 复合污染下,不同基因型早稻在生物量和 As、Cd 吸收量上均存在显著的基因型差异,而且早稻吸收 Cd 的基因型差异性较 As 更大。

(2)早稻不同器官对镉、砷积累量大小顺序均为茎叶>颖壳>糙米。早稻 As 转运系数整体表现为 GH>HS>GS,Cd 转运系数 GS 最低,GH 和 HS 大小因基因型差异而不同。结果表明,Cd 在早稻不同器官间的迁移能力较 As 强,而且早稻转运 Cd 能力的基因型差异也大于 As。

(3)供试早稻糙米 As 含量均远低于相关标准,糙米 Cd 含量达标的基因型占 82.8%,在国标 50%和 25%以下的基因型分别占 37.9%和 17.2%,表明在 Cd、As 复合污染情况下,通过筛选对镉和砷均低吸收的早稻品种进行非淹水种植可实现稻米安全生产。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014-04-17.
The Ministry of Environmental Protection, The Ministry of Land and Resources. Report on the national soil contamination survey[R]. 2014-04-17.
- [2] 方向禹,倪元锦. 我国局地土壤重金属超标惊人[N]. 经济参考报, 2014-12-08.
FANG Wen-yu, NI Yuan-jin. Heavy metal in soil alarmingly high in some parts of China[N]. Economic Information Daily, 2014-12-08.
- [3] 刘文菊,赵方杰. 植物砷吸收与代谢的研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(1):56-62.
LIU Wen-ju, ZHAO Fang-jie. A brief review of arsenic uptake and metabolism in plants[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(1):56-62.
- [4] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China; Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(2):750-759.
- [5] Gareth J N, Guilan D, Tapash D, 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 and Technology*, 2009, 43(21):8381-8386.
- [6] 段桂兰,张红梅,刘云霞,等. 水稻基因类型与生长环境对精米中砷积累的影响[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(2):156-162.
DUAN Gui-lan, ZHANG Hong-mei, LIU Yun-xia, et al. Impact of rice genotype and growing environment on arsenic accumulation in rice polished grains[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 8(2):156-162.
- [7] 刘维涛,周启星. 重金属污染预防品种的筛选与培育[J]. 生态环境学报, 2010, 19(6):1452-1458.
LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing. Selection and breeding of heavy metal pollution-safe cultivars[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(6):1452-1458.
- [8] 蒋彬,张慧萍. 水稻精米中铅镉砷含量基因型差异的研究[J]. 云南师范大学学报, 2002, 22(3):37-40.
JIANG Bin, ZHANG Hui-ping. Genotypic differences in concentrations of plumbum, cadmium and arsenic in polished rice grains[J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2002, 22(3):37-40.
- [9] 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.
WU Qi-tang, CHEN Lu, WANG Guang-shou. Differences on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1):104-107.
- [10] 刘志彦,陈桂珠,田耀武. 不同水稻品种幼苗对砷(Ar)的耐性、吸收及转运[J]. 生态学报, 2008, 28(7):3230-3235.
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):3230-3235.
- [11] Mei X Q, Ye Z H, Wong M H. The relationship of root porosity and radial oxygen loss on arsenic tolerance and uptake in rice grains and straw[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(8/9):2550-2557.
- [12] 纪雄辉,梁永超,鲁艳红,等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2007, 27(9):3930-3939.
JI Xiong-hui, LIANG Yong-chao, LU Yan-hong, et al. The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice growing in polluted paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9):3930-3939.
- [13] 邱丘. 菜心 Cd 累积的品种间差异及 Cd 污染控制方法研究[D]. 广州:中山大学, 2011.
QIU Qiu. Genotype variation of Cd accumulation and control methods for Cd pollution in Chinese flowering cabbage(*Brassica parachinensis*)[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2011.
- [14] Xu X Y, McGrath S P, Meharg A A, et al. Growing rice aerobically markedly decreases arsenic accumulation[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(15):5574-5579.
- [15] Hu P J, Ouyang Y N, Wu L H, et al. Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 27(1):225-231.
- [16] 丁永祯,刘潇威,宋正国,等. 砷污染稻作区发展早稻控制稻米砷暴露风险探讨[J]. 农业环境与发展, 2012, 29(2):57-60.
DING Yong-zhen, LIU Xiao-wei, SONG Zheng-guo, et al. Discussion on the control of arsenic exposure by planting upland rice in arsenic

- polluted farmland[J]. *Agro-Environment and Development*, 2012, 29(2):57-60.
- [17] 刘云霞,周益奇,董妍,等.接种丛枝菌根真菌(*Glomus mosseae*)对旱稻吸收砷及土壤砷形态变化的影响[J].生态毒理学报,2012,7(2):195-200.
LIU Yun-xia, ZHOU Yi-qi, DONG Yan, et al. Effect of inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus mosseae*) on As uptake of upland rice and transformation of As speciation in soil[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(2):195-200.
- [18] 罗方舟,向垒,李慧,等.丛枝菌根真菌对旱稻生长、Cd吸收累积和土壤酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(6):1090-1095.
LUO Fang-zhou, XIANG Lei, LI Hui, et al. Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) on growth and Cd accumulation of upland rice and soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(6):1090-1095.
- [19] 仲维功,杨杰,陈志德,等.水稻品种及其器官对土壤重金属元素Pb、Cd、Hg、As积累的差异[J].江苏农业学报,2006,22(4):331-338.
ZHONG Wei-gong, YANG Jie, CHEN Zhi-de, et al. Differences in accumulation and distribution of Pb, Cd, Hg and As in rice cultivars and their organs (*Oryza sativa* L.) [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 22(4):331-338.
- [20] 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.
- [21] 雷鸣,曾敏,王利红,等.湖南市场和污染区稻米中As、Pb、Cd污染及其健康风险评估[J].环境科学学报,2010,30(11):2314-2320.
LEI Ming, ZENG Min, WANG Li-hong, et al. Arsenic, lead, and cadmium pollution in rice from Hunan markets and contaminated areas and their health risk assessment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(11):2314-2320.
- [22] 段桂兰,王利红,陈玉,等.水稻砷污染健康风险与砷代谢机制的研究[J].农业环境科学学报,2007,26(2):430-435.
DUAN Gui-lan, WANG Li-hong, CHEN Yu, et al. Health risk from consumption of rice with elevated arsenic and studies of arsenic metabolism in rice plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):430-435.
- [23] 彭小燕,王茂意,刘凤杰,等.水稻砷污染及其对砷的吸收和代谢机制[J].生态学报,2010,30(17):4782-4791.
PENG Xiao-yan, WANG Mao-yi, LIU Feng-jie, et al. Arsenic contamination, uptake and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(17):4782-4791.
- [24] 程旺大.水稻籽粒有毒重金属含量的基因型和环境效应研究[D].杭州:浙江大学,2004:30-41.
CHENG Wang-da. Genotypic and environmental effect of toxic heavy metal concentration in rice grains[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004:30-41.
- [25] 王林友,竺朝娜,王建军,等.水稻镉、铅、砷低含量基因型的筛选[J].浙江农业学报,2012,24(1):133-138.
WANG Lin-you, ZHU Chao-na, WANG Jian-jun, et al. Screening for rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with lower Cd, Pb and As contents[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2012, 24(1):133-138.
- [26] 张红振,骆永明,章海波,等.水稻、小麦籽粒砷、镉、铅富集系数分布特征及规律[J].环境科学,2010,31(2):488-495.
ZHANG Hong-zhen, LUO Yong-ming, ZHANG Hai-bo, et al. Characterizing the plant uptake factor of As, Cd and Pb for rice and wheat cereal[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(2):488-495.
- [27] Sun, G X, Williams P N, Carey A M, et al. Inorganic arsenic in rice bran and its products are an order of magnitude higher than in bulk grain[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(19):7542-7546.
- [28] Zhu Y G, Yoshinaga M, Zhao F J, et al. Earth abides arsenic biotransformations[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2014, 42(1):443-467.
- [29] Somenahally A C, Hollister E B, Yan W G, et al. Water management impacts on arsenic speciation and iron-reducing bacteria in contrasting rice-rhizosphere compartments[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 45(19):8328-8335.
- [30] 纪雄辉,梁永超,鲁艳红,等.污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J].生态学报,2007,27(9):3930-3939.
JI Xiong-hui, LIANG Yong-chao, LU Yan-hong, et al. The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice grow in polluted paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9):3930-3939.
- [31] 李剑睿,徐应明,林大松,等.水分调控和钝化剂处理对水稻土镉的钝化效应及其机理[J].农业环境科学学报,2014,33(7):1316-1321.
LI Jian-rui, XU Ying-ming, LIN Da-song, et al. Immobilization of cadmium in a paddy soil using moisture management and amendments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7):1316-1321.
- [32] 冯文强,涂仕华,秦鱼生,等.水稻不同基因型对铅镉吸收能力差异的研究[J].农业环境科学学报,2008,27(2):447-451.
FENG Wen-qiang, TU Shi-hua, QIN Yu-sheng, et al. Uptake capacity of different rice genotypes for lead and cadmium from soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):447-451.
- [33] 李坤权,刘建国,陆小龙,等.水稻不同品种对镉吸收及分配的差异[J].农业环境科学学报,2003,22(5):529-532.
LI Kun-quan, LIU Jian-guo, LU Xiao-long, et al. Uptake and distribution of cadmium in different rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5):529-532.
- [34] Li H, Wu C, Ye Z H, et al. Uptake kinetics of different arsenic species in lowland and upland rice colonized with *Glomus intraradices*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 194:414-421.