

适于轻度 Cd、As 污染土壤种植的水稻品种筛选

叶新新^{1,2}, 周艳丽^{1,2}, 孙波^{1*}

(1.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:对重金属具有高耐性、低富集的水稻品种可用于轻度重金属污染的水稻土。采用温室盆栽试验研究 2 种水稻土(红泥田和黄泥田)中 Cd、As 污染对 9 种水稻生长的影响,分析不同水稻品种对 Cd、As 富集能力的差异。结果表明,As 污染处理下所有水稻品种的生物量均显著降低,在红泥田上,水稻生物量降低幅度为 29.4%~54.3%;在黄泥田上,降低幅度为 29.5%~53.3%。不同水稻品种对 As 耐性有显著差异($P<0.05$),晚粳 9707(粳稻)生物量降幅较小,耐性较高;浙 1500(籼稻)降幅较大,耐性较低。对于 Cd 污染处理,在 2 种类型土壤上 9 种水稻对 Cd 耐性差异不显著。不同水稻品种对土壤 Cd、As 的富集能力有显著差异($P<0.05$)。在 2 种类型土壤上,德农 2000(杂交稻)和浙 1500(籼稻)分别对 As、Cd 的富集系数最高,对 As、Cd 污染敏感;南粳 32(粳稻)对 Cd、As 的富集系数均较低,对 Cd、As 污染不敏感。在 9 个水稻品种中,南粳 32 对 Cd、As 的富集能力最低,并且对 As 耐性较高,适合在 Cd、As 轻度污染的水稻土上种植。

关键词:水稻品种;As;Cd;富集系数;红泥田;黄泥田

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)06-1082-07

Screening of Suitable Rice Cultivars for the Adaptation to Lightly Contaminated Soil with Cd and As

YE Xin-xin^{1,2}, ZHOU Yan-li^{1,2}, SUN Bo^{1*}

(1.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Pot experiments were carried out to study the effects of spiked As and Cd pollution on the biomass and accumulation of heavy metals by 9 rice cultivars (*Oryza sativa* L.) in two different types of paddy soils. The results indicated that the rice biomass significantly reduced in both soils when spiked with As. The reduction of biomass for 9 cultivars ranged from 29.4% to 54.3% in red paddy soil and from 29.5% to 53.3% in yellow paddy soil. There was a significant difference in the tolerance among 9 rice cultivars ($P<0.05$). The reduction of biomass for Wanjiang9707 (japonica) was the least, which indicated that it was the highest tolerant to As, while the reduction of biomass for Zhe1500 (indica) was the largest, which showed that it was the least tolerant to As. For Cd pollution treatment, there were no significant differences in the tolerance to Cd among 9 cultivars in two types of soils. Different rice cultivars showed a significant difference in accumulation capacity for Cd and As ($P<0.05$). Denong 2000 (hybrid rice) and Zhe 1500 (indica) were the most sensitive rice cultivar to As and Cd pollution, respectively, which had the highest bioaccumulation coefficient (BCF). The cultivar Nangeng32 (japonica) had a lower BCF for Cd and As and was more tolerant to As pollution. Among 9 rice cultivars, Nangeng32 was suitable for planting in the paddy soils with light contamination of Cd and As.

Keywords: rice cultivar; arsenic; cadmium; bioaccumulation coefficient; red paddy soil; yellow paddy soil

Cd、As 广泛存在于土壤、沉积物和水体中,并且长期累积会对植物、动物和人体产生毒害作用。近年来,由于化肥、农药、杀虫剂等大量施用以及污水和污

泥农用造成农田有毒重金属 Cd、As 污染呈急剧增加之势^[1-3],由此造成了土壤生产力下降、农产品污染以及生态环境破坏等严重问题。更为严重的是,土壤有毒重金属 Cd、As 可以通过植物吸收经食物链进入人体而威胁人体健康^[4-5]。

外源污染物进入土壤并开始累积,土壤存在着潜在危害,可认为属轻度污染(相当于国家二级标准);当污染物数量增加到一定程度后,土壤质量恶化,对

收稿日期:2011-12-08

基金项目:农业部公益性行业科研专项(200903015);质检公益性行业科研专项(200910201)

作者简介:叶新新(1982—),男,安徽滁州人,博士研究生,主要从事土壤环境化学研究。E-mail:xye@issas.ac.cn

* 通讯作者:孙波 E-mail:bsun@issas.ac.cn

受体产生明显危害,则属重度污染^[6]。国土资源部曾公开表示,中国每年有 1 200 万 t 粮食遭到重金属污染,直接经济损失超过 200 亿元^[7]。随着环境污染的日益加剧,湖南、广东、浙江等地都有 Cd 和 As 污染的相关报道^[8-9]。水稻种植在重金属污染土壤中,对其生长有不利影响,轻者植株矮化、发育不良,重者甚至绝产,因此在重金属污染区域,水稻的正常生长也是亟需解决的问题。已有研究表明,不同的水稻品种(基因型)对 Cd、As 的耐性不同^[10-11],并且对 Cd、As 的吸收和富集能力不同^[12-14],因此高耐性低吸收的水稻品种选取具有重要意义。

本研究采集了我国长江中下游 2 种典型水稻土,并选用长江流域及东南沿海地区种植面积较广的 9 个水稻品种。通过盆栽试验模拟水稻田间实际生长环境,研究了 Cd、As 对不同水稻品种生长的影响,对高耐性低积累、适合种植在 Cd、As 的轻污染区域的水稻品种进行了研究,为进一步合理选育高耐性低积累水稻品种提供重要的理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试水稻品种为长江流域和东南沿海地区常见品种。包括 3 个杂交稻品种:德农 2000、天协 6 号和冈优 118;3 个粳稻品种:晚粳 9707、宁粳 1 号和南粳 32;3 个籼稻品种:中育 1 号、特三矮 2 号和浙 1500。

供试土壤:(1)黄泥田,为普通铁聚水耕人为土,是冲积物母质所发育,采自江苏省常熟市(31°36'N, 120°35'E)。(2)红泥田,为普通铁聚水耕人为土,是第四纪红黏土母质所发育,采自江西省鹰潭市(28°12'N, 116°57'E)。

1.2 盆栽试验

采用温室盆栽试验的方法:土壤经自然风干、去杂质、磨碎后过 5 mm 筛,分别装入高 30 cm、底径 12.5 cm、口径 35 cm 的 PVC 盆,每盆装土 7 kg。重金属元素与土壤充分混合后装盆,土壤老化 3 个月后栽种水稻,老化期间保持田间持水量的 80%。设有两种

浓度处理,分别为对照、污染处理。我国土壤环境质量标准是基于多种农作物,选择其中最敏感的物种来建立的,而对本试验选择的水稻品种,其具体的敏感性尚不清楚,因此污染处理水平设置为我国土壤环境质量二级标准酸性土壤的 2 倍和 1.5 倍浓度(Cd:0.6 mg·kg⁻¹; As:45 mg·kg⁻¹),每处理均重复 3 次。Cd、As 分别以 CdSO₄·8/3H₂O 和 Na₃AsO₄·12H₂O 形式加入。整个生长过程每盆分别施入 1 g CO(NH₂)₂、0.28 g Ca(H₂PO₄)₂、0.7 g K₂SO₄。

水稻种子用 1% 的双氧水浸泡杀菌 30 min,用去离子水洗净,待其发芽后,播于装有无污染土壤的育秧盘中。两周后移苗至 PVC 盆中。插秧时每盆 3 穴、每穴 3 株,水稻生长始终保持淹水(在 PVC 盆中维持 2~3 cm 的水层)。

1.3 样品的采集与分析

成熟期收获水稻样品,籽粒风干后用精米机(LTJM-12,中国)脱壳,精米 60 °C 烘干后用高速粉碎机(FW-80,中国)粉碎,供化学分析用。

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⁻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 Cd 全量用 HF-HClO₄-HNO₃ 消化,土壤 As 全量用王水消化。为保证分析质量,用国家地球化学标准样品(GBW 07456)进行质量控制。稻米中 Cd、As 用硝酸-双氧水消煮。为保证分析质量,用生物标准物质(GBW 10010)进行质量控制。上述分析方法均参照《土壤农业化学分析方法》^[15]。土壤有效态 Cd 用 1:5 土/水比的 0.05 mol·L⁻¹ EDTA-2Na 振荡浸提^[16],土壤有效态 As 用 1:10 土/水比的 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 振荡浸提^[17]。石墨炉原子吸收(SpetrAA 220Z,澳大利亚)测定溶液(待测液)中 Cd 的含量,双道原子荧光光度计(AFS-230E,北京科创海光仪器有限公司)测定溶液(待测液)中 As 含量。

供试土壤基本理化性质分析结果见表 1。

1.4 数据分析

$$\text{相对生物量} = \frac{\text{重金属处理下整株干重}}{\text{对照处理下整株干重}} \times 100\%$$

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physico-chemical properties of the studied soils

土壤类型	pH	有机碳/g·kg ⁻¹	CEC/cmole·kg ⁻¹	铁氧化物/mg·kg ⁻¹	粘粒/%	Cd/mg·kg ⁻¹		As/mg·kg ⁻¹	
						全量	有效态	全量	有效态
红泥田	5.07	12.0	9.39	1.99	18.8	0.25	0.18	4.29	0.22
黄泥田	6.15	26.7	18.0	4.11	26.1	0.33	0.16	9.04	0.31

$$\text{富集系数} = \frac{\text{籽粒中重金属浓度}}{\text{土壤中重金属浓度}} \times 100\%$$

土壤中重金属浓度是土壤重金属全量(重金属污染土壤包括背景值和添加量)测定值。

实验数据采用 SPSS 16.0 及 Excel 2003 软件进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 As、Cd 单一污染对不同水稻品种生长的影响

从表 2 可以看出,随着土壤 As 浓度的增加,在两种土壤上不同水稻品种生物量有显著的降低。在红泥田上,水稻生物量降低幅度为 29.4%~54.3%;在黄泥田上,水稻生物量的降低幅度为 29.5%~53.3%。在两种土壤类型上,不同水稻品种的相对生物量存在显著的基因型差异($P < 0.05$)。在红泥田上,相对生物量的大小顺序为冈优 118>南粳 32>晚粳 9707>特三矮 2 号>德农 2000>中育 1 号>天协 6 号>宁粳 1 号>浙 1500,冈优 118 生物量降幅最小,对 As 的耐性最高;宁粳 1 号、浙 1500 生物量降幅最大,与前 7 个品种差异显著($P < 0.05$),说明土壤中 As 对宁粳 1 号、浙 1500 生长的阻碍最大,对 As 的耐性最低。在黄泥田上,相对生物量的大小顺序为特三矮 2 号>晚粳 9707>南粳 32>德农 2000>冈优 118>天协 6 号>宁粳 1 号>浙 1500>中育 1 号,特三矮 2 号生物量降幅最小,对 As 的耐性最高;中育 1 号生物量降幅最大,土壤中 As 对其生长的阻碍最大,对 As 的耐性最低。

综合考虑两种土壤上水稻的相对生物量显著差异可以得出,晚粳 9707 对 As 的耐性较高,浙 1500 对

As 的耐性较低。水稻种植在 As 污染土壤中,低浓度时植株矮化,发育不良,生长缓慢,枯黄死叶;浓度较高时植株不分蘖,地上部分发黄,生长发育严重恶化,甚至干枯致死^[18]。在土壤中添加 As 后,水稻生物量与对照相比明显减少,这可能是由于水稻株高以及有效分蘖数减少的缘故^[19]。Khan 等^[20]通过盆栽实验研究发现,当土壤添加 As 浓度为 10~20 mg·kg⁻¹ 时,水稻生物量明显降低。Rahman 等^[21]研究也发现,土壤中 As 浓度增加对水稻有明显的减产作用,当添加 As 的浓度超过 60 mg·kg⁻¹,水稻不能正常生长到成熟期;并且发现水稻生长和产量的降低与叶绿素含量有关,并呈显著正相关关系。有研究发现^[22]砷酸盐对植物体的毒性主要是通过 ADP 相结合,形成了砷酸盐-ATP,从而剥夺了细胞本身的能量来源,导致细胞的死亡。As 也是一种很强的呼吸抑制剂,在很低的浓度下就能抑制呼吸作用。高浓度的 As 对呼吸作用的抑制强烈,从而干扰植物的正常代谢,给植物造成毒害作用^[23]。

对 Cd 而言,随着土壤 Cd 浓度的增加,在两种土壤上不同水稻品种生物量变化不显著。在红泥田上,不同水稻品种的相对生物量差异不显著($P > 0.05$),而在黄泥田上,仅特三矮 2 号相对生物量较高,其他水稻品种的相对生物量差异不显著(表 3)。综合两种土壤上水稻的相对生物量可以得出,在土壤低 Cd 浓度条件下,9 种水稻对 Cd 耐性差异不显著。黄德乾等^[24]通过温室盆栽试验,研究表明土壤 Cd 添加量为 1.0 mg·kg⁻¹ 时,Cd 对水稻产量无明显影响,这与本试验相似。一般在土壤 Cd 总浓度超过 60 mg·kg⁻¹ 才可能引

表 2 9 个水稻品种在土壤 As 污染处理下的干重(g·盆⁻¹)和相对生物量(%)
Table 2 Dry weight(g·pot⁻¹) and relative biomass(%) of nine rice cultivars in soils spiked with As

品种	红泥田			黄泥田			
	对照	As 处理	相对生物量	对照	As 处理	相对生物量	
杂交稻	德农 2000	75.4ab	45.9ab	60.9ab	70.3bc	45.1c	64.2c
	天协 6 号	85.2a	43.1bc	50.5bc	78.2ab	45.9c	58.7de
	冈优 118	73.2ab	51.7a	70.6a	89.9 a	55.6a	61.8cd
粳稻	晚粳 9707	49.7c	33.7de	67.8a	51.7d	35.5de	68.8ab
	宁粳 1 号	76.1ab	37.4cde	49.1c	64.4bcd	35.5de	55.2de
	南粳 32	76.6ab	53.7a	70.2a	77.5ab	50.8b	65.5bc
籼稻	中育 1 号	70.4ab	41.4bcd	58.8abc	73.3bc	34.2e	46.7f
	特三矮 2 号	64.9bc	41.5bcd	64.0ab	54.3d	38.3d	70.5a
	浙 1500	67.2b	30.7e	45.7c	60.5cd	30.0f	49.7f
平均值	70.9	41.2	59.7	68.9	41.2	60.1	

注:用 LSD 法检验不同品种间差异,品种之间无共同字母表示差异达到 5%显著水平。下同。

起水稻生物量的明显下降。黄冬芬等^[10]采用土培盆栽方法, 研究土壤 Cd 处理对 3 种水稻品种产量的影响, 结果表明: 当土壤 Cd 浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 扬稻 6 号和扬粳 9538 的产量与对照相比变化不显著, 当 Cd 浓度超过 $120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时产量显著降低, 而武运粳 7 号在 Cd 浓度 60 时的产量较对照显著降低。Cd 胁迫下, 水稻净光合速率、蒸腾速率以及气孔导度都呈下降趋势, 细胞间隙 CO_2 浓度却上升。叶绿素含量下降, 叶绿素 a/b 值逐渐升高, 引起水稻生物量的降低^[25]。

2.2 品种和土壤类型对稻米 As、Cd 含量的影响

对稻米重金属含量进行分析发现, 添加外源 As 增加了稻米 As 的含量 (表 4)。在 As 处理下红泥田上, 3 种杂交稻水稻品种均超过国家食品卫生标准限值 ($0.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其他品种均不超标。其中, 生长在红泥田上的水稻稻米 As 含量显著高于黄泥田。其主要

原因是较低的土壤 pH 值可以增加土壤溶液中 As 的浓度^[26], 并且较高的铁氧化物含量会增加土壤对 As 的吸附^[27]。

对 Cd 而言, 外源 Cd 的加入显著增加了稻米 Cd 的含量, 在红泥田和黄泥田上分别有 5 种和 2 种水稻品种达到或超过国家食品卫生标准限值 ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 红泥田上的稻米 Cd 含量显著高于黄泥田 (表 4)。其主要原因是较低的 pH 值和有机碳含量使 Cd 在红泥田上有较高的生物有效性。

2.3 品种和土壤类型对籽粒 As、Cd 富集的影响

从图 1a 可以看出, 在两种土壤类型上不同水稻品种中籽粒 As 的富集系数 (Bioaccumulation coefficient, BCF) 存在显著差异 ($P < 0.05$)。对于 CK 处理, 红泥田上 As 的 BCF 变化范围是 0.028 4~0.062 4, 而在黄泥田上变化范围是 0.013 6~0.023 7; 对于 As 污染处理, 红泥田 As 的 BCF 变化范围是 0.004 9~0.020 9, 而

表 3 9 个水稻品种在土壤 Cd 污染处理下的干重 ($\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$) 和相对生物量 (%)
Table 3 Dry weight ($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$) and relative biomass (%) of nine rice cultivars in soils spiked with Cd

品种	红泥田			黄泥田		
	对照	Cd 处理	相对生物量	对照	Cd 处理	相对生物量
杂交稻	德农 2000	75.4ab	76.9a	102a	70.3bc	110ab
	天协 6 号	85.2a	73.8ab	86.6a	78.2ab	101b
	冈优 118	73.2ab	64.7abcd	88.3a	89.9 a	89.5b
粳稻	晚粳 9707	49.7c	52.3d	105a	51.7d	90.4b
	宁粳 1 号	76.1ab	65.9abc	86.7a	64.4bcd	96.3b
	南粳 32	76.6ab	68.6ab	89.6a	77.5ab	98.2b
籼稻	中育 1 号	70.4ab	64.1abcd	91.1a	73.3bc	90.1b
	特三矮 2 号	64.9bc	60.9bcd	93.9a	54.3d	123a
	浙 1500	67.2b	54.6cd	81.2a	60.5cd	95.1b
平均值	70.9	64.6	91.6	68.9	68.0	99.2

表 4 品种和土壤类型对稻米 As、Cd 含量的影响 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Table 4 Effects of cultivar and soil type on the uptake of As and Cd in rice ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

品种	红泥田				黄泥田			
	对照-As	As 处理	对照-Cd	Cd 处理	对照-As	As 处理	对照-Cd	Cd 处理
杂交稻	德农 2000	0.21b	0.99a	0.071b	0.21b	0.20a	0.039b	0.17b
	天协 6 号	0.25ab	0.89a	0.076b	0.17c	0.21a	0.037b	0.15b
	冈优 118	0.27a	1.03a	0.051c	0.20b	0.21a	0.029c	0.11c
粳稻	晚粳 9707	0.26ab	0.63b	0.052c	0.13d	0.18a	0.017d	0.12c
	宁粳 1 号	0.15c	0.42bc	0.016d	0.17c	0.13b	0.008 9d	0.090d
	南粳 32	0.12c	0.24c	0.017d	0.16c	0.12b	0.010d	0.055e
籼稻	中育 1 号	0.25ab	0.65b	0.068b	0.20b	0.19a	0.043b	0.16b
	特三矮 2 号	0.21b	0.61b	0.092a	0.33a	0.20a	0.052a	0.22a
	浙 1500	0.21b	0.43bc	0.094a	0.36a	0.23a	0.052a	0.23a
平均值	0.21	0.66	0.060	0.22	0.19	0.032	0.15	

在黄泥田上变化范围是 0.002 5~0.006 2。不同基因型籽粒中 As 的 BCF 变化大致趋势为:德农 2000、冈优 118、天协 6 号>中育 1 号、特三矮 2 号、浙 1500>晚粳 9707、宁粳 1 号、南粳 32。综合考虑两种土壤类型上不同水稻品种 BCF 的显著差异,德农 2000 对 As 富集能力较强,对 As 较为敏感,而南粳 32 对 As 富集能力较弱,对 As 不敏感。土壤类型对 BCF 影响也达到了显著的水平($P<0.05$),水稻植株中 As 的迁移能力在红泥田中强于黄泥田。

从图 1b 可以看出,在两种土壤类型上不同水稻品种中籽粒对土壤中 Cd 的富集能力存在显著差异($P<0.05$)。对于 CK 处理,红泥田上 Cd 的 BCF 变化范围是 0.065~0.374,而在黄泥田上的变化范围是 0.027~0.159;对于 Cd 污染处理,红泥田 Cd 的 BCF 变化范围是 0.155~0.419,而在黄泥田上的变化范围是 0.059~0.246。不同基因型籽粒中 Cd 的 BCF 变化大致趋势为:中育 1 号、特三矮 2 号、浙 1500>德农 2000、冈优 118、天协 6 号>晚粳 9707、宁粳 1 号、南粳 32。在两种土壤类型上,浙 1500 对 Cd 富集能力较强,对

Cd 较为敏感,而南粳 32 对 Cd 富集能力较弱,对 Cd 不敏感。土壤类型对 BCF 影响也达到了显著的水平($P<0.05$),水稻 Cd 迁移能力在红泥田上强于黄泥田。Cd 和 As 的生物有效性在红泥田上高于黄泥田。

综合分析可知(图 1a 和 b),不同基因型水稻对 Cd、As 富集能力差异显著,杂交稻对土壤中的 As 富集能力较强,而籼稻对 Cd 吸收能力较强。这一方面说明 Cd、As 高积累的水稻品种中,该种金属的转运蛋白基因可能具有较高的表达能力;另一方面也说明不同水稻类型对 Cd、As 富集能力的差异与其不同的运输通道有关。Cd 长距离运输机制可能与 Zn 相似,很可能以配合物或者螯合物的形式被载体运输,其在植物体中运输过程与植物的代谢有关。Lasat 等^[28]检测和克隆了 Zn 的载体蛋白基因(ZNT1),并证明该基因可以提高 Cd 在植物体内的运输。而 As 在植物体的运输与 Cd 不同,As(V)是通过磷酸盐吸收通道进入水稻根部,As(III)则是通过类似膜内嵌蛋白的水通道进入水稻根部,该通道又称作 Lsi1,它同时也是硅(Si)的吸收通道^[29]。Ma 等^[30]的研究表明,在水稻长期

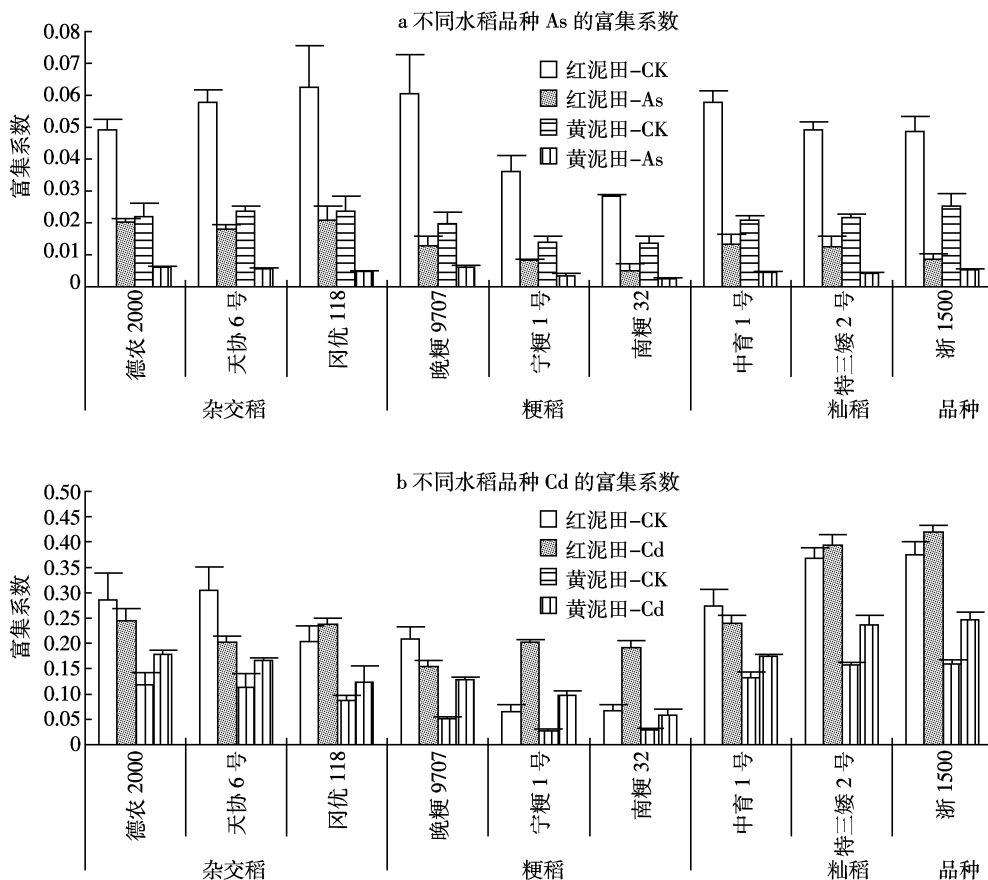


图 1 不同水稻品种 As 和 Cd 的富集系数

Figure 1 Bioaccumulation coefficients of As and Cd in different cultivars

的生长过程中,As(Ⅲ)能通过 Si 的卸载蛋白 Lsi2 向木质部卸载,这也是控制 As 向水稻茎叶和籽粒转运的关键步骤。

2.4 低富集、高耐性水稻品种筛选

在重金属污染浓度处理下,南粳 32 对于 Cd、As 污染均有较低富集能力(稻米 Cd、As 浓度没有超出国家食品安全卫生标准),并且对 As 污染处理具有较强的耐性。在筛选适合种植在轻度 Cd、As 污染稻田的水稻品种时,需要综合考虑水稻品种对重金属富集能力以及其生物量的变化。南粳 32 是这 9 个水稻品种中最适宜种植的品种,其稻米的污染风险最小。

对重金属污染土壤的治理方法有物理、化学方法及生物措施,但这些方法在有效性、持久性及经济性方面难以达到预期效果^[31]。通过品种选择,将作物可食部位的重金属浓度控制在允许范围内,已被认为是轻度污染地区治理污染的有效途径,并在向日葵和硬质小麦上成功应用^[32-33]。污染的土壤将会长期存在,限于高昂的治理成本目前无法修复所有遭受重金属污染的土壤,因此通过筛选和应用重金属低积累高耐性水稻品种将是一个减少重金属进入食物链、从而避免健康风险的有效方法。由于很多土壤重金属污染为复合型污染,需要加强培育和筛选对多种重金属低积累的水稻品种。

3 结论

在 As 污染($45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的土壤上,会引起水稻生物量的显著降低。不同基因型的水稻对 As 污染耐性有显著差异,晚粳 9707 生物量降幅较小,对 As 污染的耐性较高;而浙 1500 降幅较大,对 As 污染的耐性较低。在 Cd 污染($0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的土壤上,9 种水稻品种对 Cd 污染耐性的差异不显著。

不同水稻品种对土壤 Cd、As 的吸收富集能力有显著差异。在两种土壤类型上,德农 2000 对 As 富集能力较强,对 As 污染敏感;浙 1500 对 Cd 富集能力较强,对 Cd 污染敏感;而南粳 32 对 Cd、As 富集能力均较弱,对 Cd、As 污染不敏感,并且对 As 污染也有较高耐性。因此,南粳 32 更加适合种植在 Cd、As 轻度污染的稻田中,可降低对人体的健康风险。

参考文献:

- [1] Huang Y Z, Hu Y, Liu Y X. Combined toxicity of copper and cadmium to six rice genotypes (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(5):647-653.
- [2] Mandal B K, Suzuki K T. Arsenic round the world: A review[J]. *Talanta*, 2002, 58(1):201-235.
- [3] Zhu Y G, Williams P N, Meharg A A. Exposure to inorganic arsenic from rice: A global health issue?[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 154(2):169-171.
- [4] 郭朝晖,朱永官. 典型矿冶周边地区土壤重金属污染及有效性含量[J]. *生态环境*, 2004, 13(4):553-555.
GUO Zhao-hui, ZHU Yong-guan. Contamination and available contents of heavy metals in soils in the typical mining and smelting circumjacent districts[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4):553-555.
- [5] Li Z W, Li L Q, Pan G X, et al. Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: soil type versus genotype effects[J]. *Plant and Soil*, 2005, 271:165-173.
- [6] 夏家淇,骆永明. 我国土壤环境质量研究几个值得探讨的问题[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(1):1-6.
XIA Jia-qi, LUO Yong-ming. Several key issues in research of soil environmental quality in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(1):1-6.
- [7] 路子显. 粮食重金属污染对粮食安全、人体健康的影响[J]. *粮食科学与经济*, 2011, 36(4):14-17.
LU Zi-xian. The Influence of heavy metal pollution of grain on food security and human health[J]. *Grain Science and Technology and Economy*, 2011, 36(4):14-17.
- [8] 金银龙,梁超轲,何公理,等. 中国地方性砷中毒分布调查[J]. *卫生研究*, 2003, 32(6):519-540.
JIN Yin-long, LIANG Chao-ke, HE Gong-li, et al. Study on distribution of endemic arsenism in China[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2003, 32(6):519-540.
- [9] Wang M Y, Chen A K, Wong M H, et al. Cadmium accumulation in and tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) varieties with different rates of radial oxygen loss[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159:1730-1736.
- [10] 黄冬芬,王志琴,刘立军,等. 镉对水稻产量和品质的影响[J]. *热带作物学报*, 2010, 31(1):19-24.
HUANG Dong-fen, WANG Zhi-qin, LIU Li-jun, et al. Effect of cadmium on the rice yield and grain quality[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, 31(1):19-24.
- [11] 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.
- [12] 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 arsenicum in polished rice grains[J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2002, 22(3):37-40.
- [13] 龚伟群,李恋卿,潘根兴. 杂交水稻对 Cd 的吸收与籽粒积累:土壤和品种交互影响[J]. *环境科学*, 2006, 27(8):1647-1653.
GONG Wei-qun, LI Lian-qing, PAN Gen-xing. Cd uptake and accumulation in grains by hybrid rice in two paddy soils: Interactive effect of soil type and cultivars[J]. *Environment Science*, 2006, 27(8):1647-

- 1653.
- [14] Meharg A A. Arsenic in rice—understanding a new disaster for South-East Asia[J]. *Trends in Plant Science*, 2004, 9(9):415–417.
- [15] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京:科学出版社, 1983.
Agricultural Chemical Professional Committee in Soil Science Society of China. Soil agricultural chemical routine analysis method[M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [16] 李发生, 韩梅, 熊代群, 等. 不同浸提剂对几种典型土壤中重金属有效态的浸提效率研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6):704–706.
LI Fa-sheng, HAN Mei, XIONG Dai-qun, et al. Efficiency of some extractants for available heavy metals from several typical soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(6):704–706.
- [17] Olsen S R, Sommers L E. Methods of soil analysis[M]. Part 2. American Society of Agronomy, Inc., Madison, 1982.
- [18] 赵维钧. 砷污染对水稻的影响[J]. 云南环境科学, 1998, 17(3):17–19.
ZHAO Wei-jun. Influence of arsenic pollution to paddy rice[J]. *Yunnan Environmental Science*, 1998, 17(3):17–19.
- [19] 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.
- [20] Khan M A, Islam M R, Panaullah G M, et al. Accumulation of arsenic in soil and rice under wetland condition in Bangladesh [J]. *Plant and Soil*, 2010, 333:263–274.
- [21] Rahman M A, Hasegawa H, Rahman M M, et al. Effect of arsenic on photosynthesis, growth and yield of five widely cultivated rice (*Oryza sativa* L.) varieties in Bangladesh[J]. *Chemosphere*, 2007, 67(6):1072–1079.
- [22] Ullrich-Eberius C I, Sanz A, Novacky A J. Evaluation of arsenate and vandate-associated changes of electrical membrane potential and phosphate transport in *Lemna gibba* GI[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1989, 40:119–128.
- [23] 陈同斌, 刘更另. 砷对水稻生长发育的影响及其原因[J]. 中国农业科学, 1993, 26(6):50–58.
CHEN Tong-bin, LIU Geng-ling. Effect of arsenic on rice (*Oryza sativa* L.) growth and development and its mechanism[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1993, 26(6):50–58.
- [24] 黄德乾, 汪鹏, 王玉军, 等. 污染土壤上水稻生长及对 Pb、Cd 和 As 的吸收[J]. 土壤, 2008, 40(4):626–629.
HUANG De-qian, WANG Peng, WANG Yu-jun, et al. Growth and uptake of Pb, Cd and As of rice in polluted soils[J]. *Soils*, 2008, 40(4):626–629.
- [25] 曾翔. 水稻镉积累和耐性机理及其品种间差异研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2006.
ZENG Xiang. Studies on physiological mechanism in cadmium accumulation and tolerance and its difference among genotypic of rice[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2006.
- [26] 陈同斌. 土壤溶液中的砷及其与水稻生长效应的关系[J]. 生态学报, 1996, 12(6):147–153.
CHEN Tong-bin. Arsenic in soil solution and its effect on the growth of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 12(6):147–153.
- [27] Bogdan K, Schenk M K. Evaluation of soil characteristics potentially affecting arsenic concentration in paddy rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157:2617–2621.
- [28] Lasat M M, Pence N S, Garvin D F, et al. Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000(342), 51:71–79.
- [29] Ma J F, Tamai K, Yamaji N, et al. A silicon transporter in rice[J]. *Nature*, 2006, 440:688–691.
- [30] Ma J F, Yamaji N, Mitani N, et al. Transporters of arsenite in rice and their role in arsenic accumulation in rice grain[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2008, 105(29):9931–9935.
- [31] Wang K R. Tolerance of cultivated plants to cadmium and their utilization in polluted farmland soils[J]. *Acta Biotechnologica*, 2002, 22:189–198.
- [32] Penner G A, Clarke J, Bezte L J, et al. Identification of PAPD markers linked to a gene governing cadmium uptake in durum wheat [J]. *Genome*, 1995, 38:543–547.
- [33] Li Y M, Channey L R, Schneiter A A. Genotypic variation in kernel cadmium concentration in sunflower germplasm under varying soil conditions[J]. *Crop Science*, 1995, 35:137–141.