

不同品种水稻糙米对 Cd Cu Zn 积累特性的研究

殷敬峰^{1,2}, 李华兴¹, 卢维盛¹, 谢斯斯¹, 骆海雄¹, 黄杏媛¹

(1.华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2.肇庆工商职业技术学院, 广东 肇庆 526020)

摘要:以酸性矿山废水污染的含有多种重金属的农田土壤为供试土壤,通过盆栽实验,研究不同水稻品种,不同类型、不同遗传背景水稻糙米重金属 Cd、Cu、Zn 的积累差异。结果表明,供试水稻糙米 Cd 含量为 0.006~0.092 mg·kg⁻¹,最高值和最低值相差 15 倍; Cu 含量为 6.712~27.117 mg·kg⁻¹,最高值和最低值相差 4 倍; Zn 含量为 28.390~43.296 mg·kg⁻¹,最高值和最低值相差不到 1 倍。常规稻和杂交稻糙米的 Cd、Cu、Zn 含量差异不明显。三系杂交稻的糙米 Cd、Cu 含量极显著高于二系杂交稻,而二系杂交稻糙米中 Zn 含量则显著高于三系杂交稻。不同遗传背景水稻品种糙米 Cd、Cu、Zn 含量也存在明显差异。相关分析结果表明,糙米中 Cu、Cd 含量间呈极显著正相关, Cu、Zn 含量之间存在显著负相关,而 Cd、Zn 含量间的相关性不明显。

关键词: Cd; Cu; Zn; 水稻

中图分类号: X503.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)05-0844-07

Variations of Cd, Cu, Zn Accumulation Among Rice Cultivars

YIN Jing-feng^{1,2}, LI Hua-xing¹, LU Wei-sheng¹, XIE Si-si¹, LUO Hai-xiong¹, HUANG Xing-yuan¹

(1.College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2.Zhaoqing Business Technology Institute, Zhaoqing 526020, China)

Abstract: Heavy metal contaminated paddy soils resulted from irrigation with acid mine drainage were used in pot experiment to study the accumulation differences of Cd, Cu and Zn in brown rice of 21 rice cultivars, between conventional variety and hybrid rice variety, between three and two line hybrid rice, between rice with different genetic backgrounds. The results showed that concentrations of Cd, Cu and Zn in brown rice of 21 rice cultivars varied within the range of 0.006~0.092 mg·kg⁻¹ (more than 15-fold), 6.712~27.117 mg·kg⁻¹ (more than 4-fold), 28.39~43.296 mg·kg⁻¹, respectively. There was no significant difference in Cd, Cu, Zn concentration in brown rice between conventional rice and hybrid rice. The concentrations of Cd and Cu in brown rice of three line hybrid rice were significantly higher than those of two line hybrid rice. However, the concentrations of Zn in brown rice of three line hybrid rice were significantly lower than those of two line hybrid rice. There were also significantly different in Cd, Cu and Zn concentration in brown rice between rice with different genetic backgrounds. The correlation analysis results showed there was significant and positive correlation between Cu and Cd concentration, significant and negative correlation between Cu and Zn concentration in brown rice. However, there was no significant correlation between Cd and Zn concentration.

Keywords: Cd; Cu; Zn; rice (*Oryza sativa* L.) variation

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。2000 年我国水稻种植面积 1.56×10⁸ hm²,约占农作物播种面积的 20%,而在南方这个比例更大,一些地区达到 90%以上^[1]。已有研究表明,

水稻品种间对重金属的吸收积累存在显著差异^[2-6]。因此,可以通过筛选重金属富集能力低的品种,来降低重金属污染土壤糙米中重金属含量,从而消除品种间的差异带来的人类健康风险效应。目前,人们对水稻糙米对重金属积累差异及品种筛选进行了大量的研究,但大多是研究不同水稻品种对某一重金属吸收积累的差异,而且供试土壤一般都是人为模拟土壤污染,而对多种重金属复合污染土壤上水稻对重金属积累能力差异研究比较少。本文以重金属污染的农田土壤为供试土壤,以广东省种植水稻品种为研究对象,

收稿日期:2009-09-26

基金项目:广东省“十五”农业科技计划重大专项(2004A20402001);中山市科技计划项目“中山市水稻土壤重金属污染评价与修复技术研究”

作者简介:殷敬峰(1982—),男,山东东平人,硕士研究生。

E-mail: jfyinjf@126.com, jfyin@yahoo.com.cn

通讯作者:卢维盛 E-mail: lws2869@scau.edu.cn

通过室内盆栽试验,研究不同水稻品种之间,不同类型、不同遗传背景水稻糙米重金属的积累差异,为重金属污染地区水稻品种选择和抗性品种的遗传育种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种

供试水稻品种 21 个,其中常规稻品种 8 个,杂交稻品种 13 个(二系杂交稻 5 个,三系杂交稻 8 个),种子来自华南农业大学农学院、广东省农业科学院水稻研究所、增城优质米基地公司等。品种如下:华新占、丰华占、丰新占、茉莉软占、象牙香占、泰丰占、黄华占、九七香、培杂泰丰、培杂青珍、培杂 130、培杂航七、培杂 128、华优 128、华优 8305、华优 8830、天优 372、天优 368、天优 428、深优 152、特优 524。

在以上 21 个品种中,依遗传背景的差异性,抽取其中 16 个品种,归为 5 类:分别是丰华占系、丝苗系、培杂系、华优系、天优系。详细情况见表 1。

表 1 不同遗传背景水稻品种系列

Table 1 Rice cultivars from different genetic background

系列	品种	来源	类型
丰华占系	华新占	粤丰占/丰华占	常规稻
	丰华占	丰八占 1 号/华丝占	常规稻
	黄华占	黄新占/丰华占	常规稻
丝苗系	象牙香占	香丝苗 126/象牙软占	常规稻
	九七香	香丝苗 2/青珍 8	常规稻
培杂系	培杂泰丰	培矮 64S/泰丰占	二系杂交稻
	培杂青珍	培矮 64S/青珍 8-2	二系杂交稻
	培杂 130	培矮 64S/航恢 130	二系杂交稻
	培杂航七	培矮 64S/航恢七号	二系杂交稻
	培杂 128	培矮 64S/航恢 128	二系杂交稻
华优系	华优 128	Y 华农 A/R128	三系杂交稻
	华优 8830	Y 华农 A/R8830	三系杂交稻
	华优 8305	Y 华农 A/华恢 305	三系杂交稻
天优系	天优 372	天丰 A/广恢 372	三系杂交稻
	天优 428	天丰 A/广恢 428	三系杂交稻
	天优 368	天丰 A/广恢 368	三系杂交稻

1.2 供试土壤

盆栽土壤取自广东省大宝山矿山废水污染的含有多重重金属的翁源县上坝村水稻土,土壤基本理化性质:土壤质地为重壤土,pH(土水比为 1:2.5)为 5.37,有机质含量为 $10.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮(N)为 $57.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷(P)为 $180.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾(K)为 $61.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd、Cu、Zn、Pb 全量分别为 0.32、178.72、

177.63 、 $118.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。具体分析方法参见《土壤农业化学分析方法》^[7]。

土壤自然风干后,过 5 mm 筛,装入瓷盆中,每盆 5 kg 土,同时每盆混入分析纯尿素 2.17 g、 KH_2PO_4 0.47 g、KCl 1.08 g,充分混匀,加水平衡两周后移栽秧苗。

1.3 盆栽试验

将不同品种的水稻种子,先用清水悬浮法去除不实粒,然后用 30% H_2O_2 浸种 30 min,用清水冲洗干净,然后继续用清水浸种 10 h,催芽。稻种催芽后先在育秧板上育秧,25 d 后将秧苗移栽到处理好的盆内,每盆 2 穴,每穴 1 株,每个水稻品种 4 盆,移栽后水稻全生育期土面保持 2~3 cm 水层。水稻生长期间追肥 2 次:分蘖期每盆施分析纯尿素 0.545 g、KCl 0.310 g;抽穗期每盆施分析纯尿素 0.545 g、 KH_2PO_4 0.235 g、KCl 0.310 g。

1.4 样品采集与分析

收获时将地上部与地下部分开,测定地上部生物量,然后先用自来水小心洗去根系上的泥土,用 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA-Na 洗去附着在根表面的重金属离子,最后用去离子水、高纯水清洗整个植株,用吸水纸纱布吸干表面水分,分为根、茎、叶、穗(谷粒)。谷粒风干后测定产量,再分别用自来水、去离子水、高纯水清洗,然后按农业部部颁标准《米质测定方法》(NY 147—1988)出糙。样品在 70°C 烘至恒重,然后磨碎、过 100 目筛、称重,用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4(4:1)$ 消化,用德国产原子吸收光谱仪测定 Cd、Cu、Zn 含量。在测定样品时,同时对植物标准物质 GSBW07604(GSV-3)测定,以进行实验室检测质量控制。重金属分析测定过程中所有用水均为高纯水。试验数据用 Excel 和 SPSS11.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同水稻品种的农艺性状

农艺性状是评价水稻在污染条件下生长情况的重要指标之一。由于土壤中重金属含量较低,再加上水稻生育期淹水管理,各水稻品种植株生长基本正常。不同水稻品种农艺性状表现出一定的差异性(表 2),水稻产量为 $30.3\sim 43.0 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$,地上部生物量为 $188.6\sim 280.7 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$,千粒重为 $16.6\sim 25.7 \text{ g}$,有效穗为 $14.5\sim 20.8$ 个,株高为 $99.3\sim 112.5 \text{ cm}$ 。

2.2 不同品种水稻糙米对 Cd、Cu、Zn 的积累

从表 3 可以看出,不同品种水稻的糙米中 Cd、Cu、Zn 的含量及积累量有很大差异。由于水稻全生育

表 2 不同水稻品种的农艺性状
Table 2 Agronomic trait of different rice cultivars

类型	品种	产量/g·pot ⁻¹	地上部生物量/g·pot ⁻¹	千粒重/g	有效穗/个	株高/cm
常规稻	华新占	43.0±2.6	245.8±7.7	19.5±0.2	15.5±0.6	99.8±0.9
	丰华占	35.5±1.1	231.6±4.0	19.6±0.2	17.8±0.6	110.3±1.7
	丰新占	37.9±2.1	263.2±4.5	20.3±0.4	20.0±1.6	99.3±3.0
	茉莉软占	34.1±2.9	244.9±14.5	17.0±0.1	15.8±0.9	102.5±3.0
	象牙香占	30.3±2.6	233.9±10.8	17.4±1.2	20.8±1.1	104.5±1.3
	九七香	31.8±0.8	253.2±1.5	16.6±0.4	17.5±0.6	108.8±1.3
	泰丰占	31.1±1.2	241.3±4.1	16.9±0.1	16.0±0.9	107.3±2.1
	黄华占	42.3±1.6	248.8±7.5	19.8±0.2	18.3±0.5	104.5±1.8
杂交稻	培杂泰丰	41.0±2.2	244.1±5.0	17.8±0.3	15.0±0.9	112.5±2.8
	培杂青珍	39.9±1.6	262.6±6.3	17.0±0.1	16.3±0.3	109.8±1.4
	培杂 130	38.7±4.1	280.7±11.4	17.1±0.3	17.5±0.6	108.5±4.0
	培杂航七	38.3±4.8	220.8±20.5	18.6±0.3	14.8±1.8	111.0±1.1
	培杂 128	43.6±3.9	252.1±9.7	18.5±0.7	14.5±0.3	108.3±1.7
	华优 128	42.5±1.0	267.3±4.2	20.2±0.2	19.3±1.0	108.5±2.9
	华优 8830	41.9±3.1	188.6±10.9	18.4±0.3	18.0±1.0	104.0±1.9
	华优 8305	39.2±4.7	218.3±21.1	17.0±0.3	14.5±1.4	106.3±2.3
	天优 372	46.4±1.3	271.1±5.4	20.8±0.2	20.0±0.8	102.0±1.7
	天优 428	35.8±3.2	255.4±11.1	21.5±0.2	17.8±0.8	106.3±4.3
	天优 368	43.8±1.7	247.6±4.7	20.9±0.4	19.0±0.9	104.0±0.8
	深优 152	42.8±1.7	266.5±7.2	23.2±0.2	17.0±1.1	107.8±1.4
	特优 524	41.8±1.9	269.5±5.2	25.7±0.5	15.0±0.0	105.8±3.3

注:表中数据为 4 次重复的平均值±标准误。

期淹水,而且土壤 Cd 含量较低,糙米中 Cd 平均含量(0.040 mg·kg⁻¹)不高,都没有超过国家规定糙米中 Cd 限定标准值 0.2 mg·kg⁻¹(GB 2762—2005),但不同水稻品种对 Cd 积累的差异性还是显著表现出来,糙米中 Cd 含量,品种间变化于 0.006~0.092 mg·kg⁻¹ 之间,最高值和最低值相差 15 倍多;糙米 Cu 含量在 6.712~27.117 mg·kg⁻¹ 范围内,最高值和最低值相差 4 倍以上,平均含量(11.622 mg·kg⁻¹)较高,超过国家规定糙米中 Cu 限定标准值 10 mg·kg⁻¹(GB15199—1994),其中 9 个品种超过 10 mg·kg⁻¹,超标率为 43%;不同品种糙米中 Zn 含量较为接近,其值在 28.390~43.296 mg·kg⁻¹ 之间,最高值是最低值的 1.5 倍,都没有超过国家食品卫生标准规定的限定值 50 mg·kg⁻¹(GB13106—1991)。

2.3 不同类型水稻糙米重金属积累特性

从图 1 可以看出,常规稻、杂交稻间糙米中 Cd、Cu、Zn 含量差异不显著(Cd: $t=0.054$, $P=0.957$;Cu: $t=1.429$, $P=0.157$;Zn: $t=1.625$, $P=0.111$),常规稻糙米 Cu、Zn 含量略高于杂交稻。

从图 2 可以看出,二系杂交稻与三系杂交稻间糙米中 Cd、Cu、Zn 含量有显著差异,三系杂交稻的糙米

表 3 不同水稻品种糙米重金属的含量(mg·kg⁻¹)
Table 3 Heavy metal concentration in brown rice(mg·kg⁻¹)

类型	品种	Cd	Cu	Zn
常规稻	华新占	0.018±0.002	26.880±2.851	28.390±0.968
	丰华占	0.025±0.005	12.079±0.811	31.653±1.163
	丰新占	0.038±0.006	9.363±0.973	43.296±1.599
	茉莉软占	0.040±0.008	13.176±1.171	34.033±1.374
	象牙香占	0.055±0.011	11.799±1.294	40.699±1.746
	九七香	0.052±0.007	9.855±0.302	40.060±1.049
	泰丰占	0.045±0.010	8.585±0.242	33.630±0.874
	黄华占	0.050±0.005	10.625±0.725	35.714±1.239
杂交稻	培杂泰丰	0.015±0.001	7.836±0.311	37.037±0.442
	培杂青珍	0.027±0.004	7.803±0.092	38.913±0.786
	培杂 130	0.017±0.001	6.712±0.504	34.093±1.457
	培杂航七	0.006±0.000	7.416±0.191	34.653±0.766
	培杂 128	0.014±0.003	13.001±0.823	32.786±0.747
	华优 128	0.039±0.004	8.087±0.15	32.877±0.570
	华优 8830	0.082±0.007	27.117±2.357	36.514±0.666
	华优 8305	0.038±0.003	13.780±0.292	29.216±0.788
	天优 372	0.055±0.007	7.812±0.466	32.813±0.806
	天优 428	0.092±0.019	17.601±0.158	34.523±0.530
	天优 368	0.052±0.004	8.136±0.423	30.976±0.780
	深优 152	0.035±0.006	8.140±0.194	37.271±1.059
	特优 524	0.021±0.003	8.269±0.345	33.752±1.710
	平均	0.040±0.003	11.622±0.648	34.900±0.449

注:表中数据为 4 次重复的平均值±标准误。

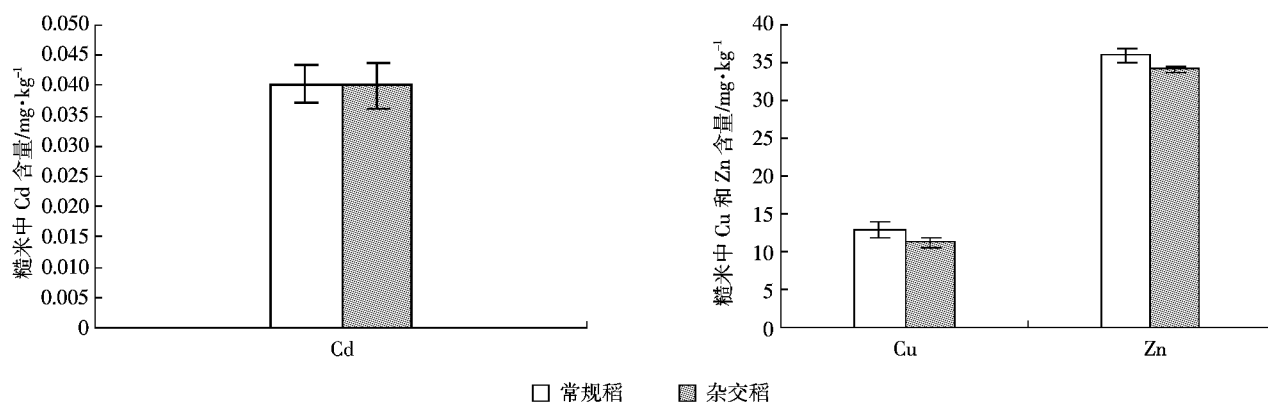


图 1 常规稻和杂交稻糙米重金属含量的差异

Figure 1 Difference of heavy metal concentration in brown rice between conventional rice and hybrid rice

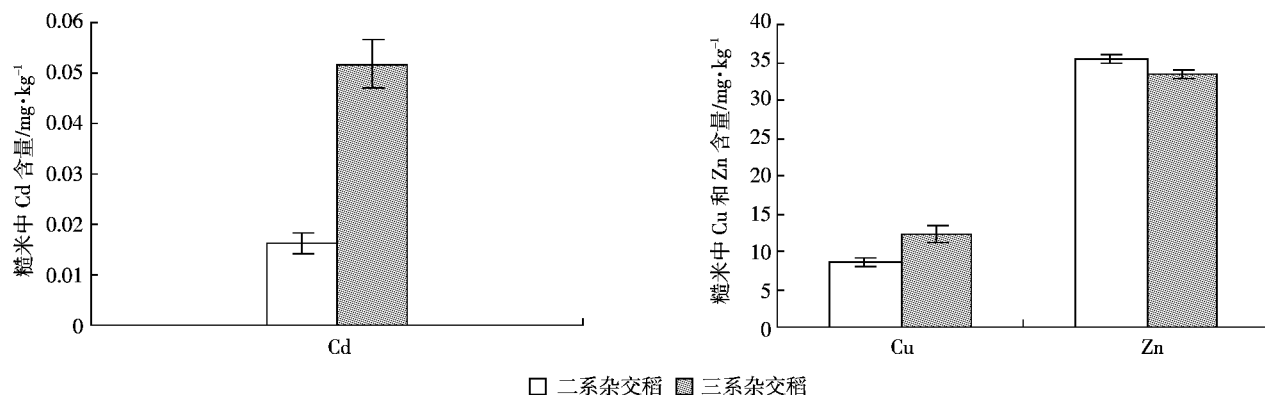


图 2 二系和三系杂交稻糙米重金属含量的差异

Figure 2 Difference of heavy metal concentration in brown rice between two-line hybrid rice and three-line hybrid rice

Cd、Cu 含量极显著高于二系杂交稻 ($\text{Cd}: t=-6.723, P=0.000$; $\text{Cu}: t=-2.889, P=0.006$), 而糙米中 Zn 含量二系杂交稻则显著高于三系杂交稻 ($t=2.400, P=0.020$)。

从图 3 可以看出, 不同遗传背景水稻品种间糙米 Cd、Cu、Zn 积累含量差异显著。糙米 Cd 含量, 华优系列、天优系列、丝苗系列显著高于丰华占系列和培杂系列, 华优系列、天优系列和丝苗系列之间差异不显著, 丰华占系列同培杂系列差异不显著; 糙米 Cu 含量, 丰华占系列、华优系列显著高于培杂系列、天优系列和丝苗系列, 而丰华占系列与华优系列之间无显著差异, 培杂系列、天优系列、丝苗系列间差异也不显著; 糙米 Zn 含量, 丝苗系列糙米 Zn 含量最高, 培杂系列次之, 二者之间差异显著, 且显著高于其他 3 个系列。

对于土壤重金属污染地区, 产量和糙米重金属含量是进行水稻品种选择的关键指标。对供试水稻各品种产量与糙米重金属 Cd、Cu、Zn 含量进行聚类分析, 可分为 5 类 (表 4): 第 I、III 类各 2 个品种, 第 II 类 3 个品种, 第 IV 类 4 个品种, 第 V 类 10 个品种。其中第

I 类和第 V 类产量较高, 第 I 类是高产高重金属, 分别为华新占和华优 8830; 第 V 类是高产低重金属, 主要有培杂泰丰、培杂 130、培杂航七、培杂 128、华优 128、天优 372、天优 368、深优 152、特优 524、黄华占。因此, 在重金属污染区进行品种选择时可以优先考虑第 V 类。

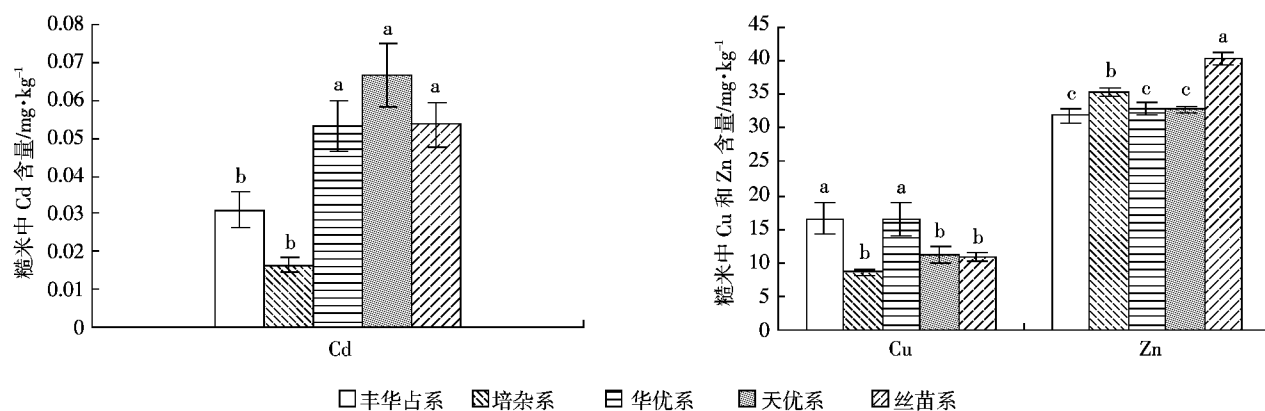
2.4 糙米重金属间的相关关系

分析糙米中 Cd、Cu、Zn 相互之间的关系, 见图 4、

表 4 不同水稻品种产量与糙米重金属含量聚类分析结果
Table 4 Outcome of clustering analysis of rice yield and heavy metal content of brown rice

类别	I	II	III	IV	V
产量/ $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$	42.44	31.04	38.91	36.15	42.12
糙米 Cd 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.050	0.051	0.032	0.049	0.030
糙米 Cu 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	26.999	10.080	8.583	14.159	8.603
糙米 Zn 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	32.452	38.130	41.104	32.356	34.197
品种个数	2	3	2	4	10

注: 数值为各类的平均值。



注:不同遗传背景间糙米重金属含量采用 Duncan 多重比较,不同字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

图 3 不同遗传背景水稻品种糙米重金属含量的差异

Figure 3 Difference of heavy metal concentration in brown rice among rice with different genetic background

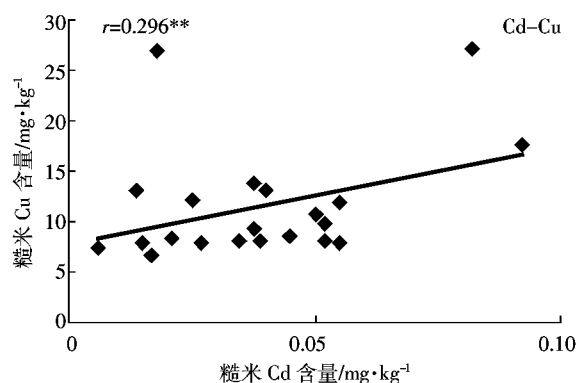
图 5。由图可见,糙米中 Cu、Cd 间呈极显著正相关($r=0.296$, $P=0.008$), Cu、Zn 之间存在显著负相关($r=-0.234$, $P=0.036$), 而 Cd、Zn 间相关性较差($r=0.157$, $P=0.164$)。这说明,对于同是二价阳离子的 Cu、Cd、Zn, 水稻对 Cu、Cd 的吸收积累表现出协同吸收,对 Cu、Zn 的吸收积累表现出拮抗作用,而对 Cd、Zn 的积累相互间关系不明显。

3 讨论

不同类型水稻品种糙米对重金属积累差异已有不少报道。王凯荣等^[8]、李正文^[9]、刘建国^[10]研究结果表明杂交稻比常规稻对 Cd 有更强的吸收转运能力;而李坤权等^[11]、仲维功等^[12]研究报道,常规稻品种籽粒对 Cd 的积累能力并不比杂交稻低。本试验结果表明,常规稻和杂交稻间差异不显著。本研究结果还表明,三

系杂交稻糙米 Cd 积累高于二系杂交稻,与曾翔等^[13]研究基本一致。因此,水稻对重金属的吸收积累,受品种类型和遗传背景的影响较大。通过遗传育种,筛选出对重金属具有优良耐性的基因品种,是污染区降低重金属摄入风险的重要途径之一。

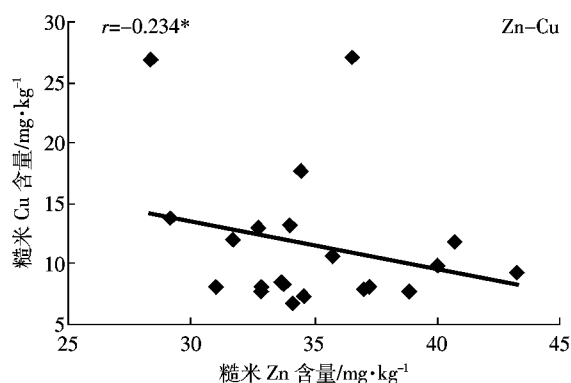
一般来说,土壤重金属污染大部分是多重金属元素的复合污染,元素之间的复合效应对重金属在植物体内的积累分布影响较大。周启星和高拯民^[14]研究玉米和大豆子实中 Cd、Zn 相互作用时,发现玉米子实中 Cd-Zn 表现为拮抗作用,而大豆中 Cd-Zn 表现为协同作用。本研究对糙米中 Cd、Cu、Zn 含量的相关性分析表明,糙米中 Cu、Cd 间呈极显著正相关, Cu、Zn 之间存在显著负相关,而 Cd、Zn 间相关性较差。说明在本试验条件下,水稻糙米在积累 Cd、Cu、Zn 过程中, Cu 和 Cd 间存在协同作用, Cu、Zn 间相互抑制吸



**表示相关性极显著, $P < 0.01$ 。

图 4 水稻糙米 Cu、Cd 含量间的相互关系

Figure 4 The correlation of the Cu and Cd concentration in brown rice



*表示相关性显著, $P < 0.05$ 。

图 5 水稻糙米 Cu、Zn 含量间的相互关系

Figure 5 The correlation of the Cu and Zn concentration in brown rice

收,而 Cd、Zn 间相互作用不明显。这与李正文等^[15]研究 57 个水稻品种常规栽培下水稻籽粒对同一土壤中 Cd、Cu、Se 的吸收与积累时,发现 Cu、Cd 间存在明显的正相关关系的结果基本一致。而本试验中 Cd、Zn 间相互关系不明显,与 Bingham 等^[16]、周启星等^[17]、龚伟群等^[18]报道的 Cd、Zn 之间有交互作用,Zn 有促进 Cd 向地上部迁移的作用不一致。周启星等^[17]、徐加宽等^[19]指出,土壤中不同重金属元素组合和浓度、不同供试品种和器官以及在不同供试条件下,重金属间的相互作用有不同的表现形式(协同作用或拮抗作用)。龚伟群等^[18]也发现水稻吸收重金属时重金属元素间的排斥作用依基因型而异。因此,对于水稻糙米吸收积累重金属过程中,重金属元素间的相互作用还要进一步证实。

4 结论

(1)供试水稻糙米 Cd 含量为 0.006~0.092 mg·kg⁻¹,最高值和最低值相差 15 倍;Cu 含量为 6.712~27.117 mg·kg⁻¹,最高值和最低值相差 4 倍;Zn 含量为 28.390~43.296 mg·kg⁻¹,最高值和最低值相差不到 1 倍。

(2)二系杂交稻与三系杂交稻糙米 Cd、Cu、Zn 含量差异显著,不同遗传背景水稻品种糙米 Cd、Cu、Zn 含量也存在较大差异,而常规稻和杂交稻间差异不明显。

(3)糙米中 Cu、Cd 含量间呈极显著正相关,Cu、Zn 含量之间存在显著负相关,而 Cd、Zn 含量间的相关性不明显。

参考文献:

- [1] 龚伟群,潘根兴. 中国水稻生产中 Cd 吸收及其健康风险的有关问题[J]. 科技导报, 2006, 24(5): 43-48.
- [2] GONG Wei-qun, PAN Gen-xing. Issues of grain Cd uptake and the potential health risk of rice production sector of China[J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(5): 43-48.
- [3] 吴启堂,王广寿,谭秀芳,等. 不同水稻、菜心品种和化肥形态对作物吸收累积镉的影响[J]. 华南农业大学学报, 1994, 15(4): 1-6.
- [4] WU Qi-tang, WANG Guang-shou, TAN Xiu-fang, et al. Effect of crop cultivars and chemical fertilizers on the cadmium accumulation in plants[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 1994, 15(4): 1-6.
- [5] 刘建国,李坤权,张祖建,等. 水稻不同品种对铅吸收、分配的差异及机理[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 291-294.
- [6] LIU Jian-guo, LI Kun-quan, ZHANG Zu-jian, et al. Difference of lead uptake and distribution in rice cultivars and its mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2): 291-294.
- [7] 程旺大,张国平,姚海根,等. 晚粳稻籽粒中砷、镉、铬、镍、铅等重金属含量的品种和粒位效应[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(3): 273-279.
- [8] CHENG Wang-da, ZHANG Guo-ping, YAO Hai-gen, et al. Effect of grain position in a panicle and varieties on As, Cd, Cr, Ni, Pb contents in grains of late japonica rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19(3): 273-279.
- [9] LI Zheng-weng, LI Lian-qing, PAN Gen-xing, et al. Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: Soil type versus genotype effects[J]. *Plant and Soil*, 2004: 1-9.
- [10] LIU Jian-guo, LIANG Jian-sheng, LI Kun-quan, et al. Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress[J]. *Chemosphere*, 2003, 52: 1467-1473.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [12] LU Ru-kun. Chemical analysis method of soil[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [13] 王凯荣,龚惠群. 两种基因型水稻对环境镉吸收与再分配差异性比较研究[J]. 农业环境保护, 1996, 15(4): 145-149, 176.
- [14] WANG Kai-rong, GONG Hui-qun. Comparative studies on the difference of the uptake and redistribution of environmental Cd by two genic rice[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(4): 145-149, 176.
- [15] 李正文. 镉处理下不同水稻品种对两种土壤中铅、镉的吸收及其生育动态[D]. 南京: 南京农业大学, 2003: 7-33.
- [16] LI Zheng-wen. Uptake of Pb and Cd by 2 rice cultivars in 2 soils differing in physico-chemical properties under spiked Cd treatment and its dynamics in growing period[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003: 7-33.
- [17] 刘建国. 水稻品种对土壤重金属镉铅吸收分配的差异及其机理研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2004: 1-121.
- [18] LIU Jian-guo. Variations among rice cultivars in the uptake and translocation of cadmium and lead from soil, and the mechanisms[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2004: 1-121.
- [19] 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.
- [20] LI Kun-quan, LIU Jian-guo, LU Xiao-long, et al. Uptake and distribution of cadmium in different rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(5): 529-532.
- [21] 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, 2001, 22(4): 331-338.
- [22] 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*, 2001, 22(4): 331-338.
- [23] 曾翔,张玉焄,王凯荣,等. 不同品种水稻糙米含镉量差异[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1): 67-69.
- [24] ZENG Xiang, ZHANG Yu-zhu, WANG Kai-rong, et al. Genotype difference of brown rices in Cd content[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(1): 67-69.
- [25] 周启星,高拯民. 作物子实中 Cd 与 Zn 的交互作用及其机理的研究[J]. 农业环境保护, 1994, 13(4): 148-151.
- [26] ZHOU Qi-xing, GAO Zheng-min. Interaction between Cd and Zn in

- seeds of crops and its mechanisms[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1994, 13(4):148-151
- [15] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄取风险[J]. 环境科学, 2003, 24(3):112-115. LI Zheng-wen, ZHANG Yan-ling, PAN Gen-xing, et al. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(3):112-115.
- [16] Bingham F T, Page A L, Strong J E. Yield and cadmium content of rice grain in relation to addition rates of cadmium, copper, nickel, and zinc with sewage sludge and liming[J]. *Soil Science*, 1980, 130:32-38.
- [17] 周启星, 吴燕玉, 熊先哲. 重金属 Cd-Zn 对水稻的复合污染和生态效应[J]. 应用生态学报, 1994, 5(4):438-441. ZHOU Qi-xing, WU Yan-yu, XIONG Xian-zhe. Compound pollution of Cd and Zn and its ecological effect on rice plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1994, 5(4):438-441.
- [18] 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]. *Environmental Science*, 2006, 27(8):1647-1653.
- [19] 徐加宽, 杨连新, 王余龙, 等. 水稻对重金属元素的吸收与分配机理的研究进展[J]. 植物学通报, 2005, 22(5):614-622. XU Jia-kuan, YANG Lian-xin, WANG Yu-long, et al. Advances in the study uptake and accumulation of heavy metal in rice and its mechanisms[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2005, 22(5):614-622.

致谢:华南农业大学农学院张建国高级实验师、广东省农业科学院水稻研究所周少川研究员、增城优质米基地公司夏奇峰总经理提供供试水稻种子。