

田间试验条件下不同基因型水稻对 Cd 和 Pb 的吸收分配特征

杨祥田¹, 周 翠¹, 何贤彪¹, 胡亮亮², 唐建军²

(1.浙江省台州市农业科学研究院, 浙江 临海 317000; 2.浙江大学生命科学院, 杭州 310058)

摘 要: 准确阐明重金属污染土壤中不同基因型水稻品种生长和重金属吸收与积累特征是实现安全生产的保障。以浙江省主栽的 11 个单季杂交晚稻和常规晚稻为供试品种, 在台州温岭 Cd、Pb 污染土壤上种植, 研究了不同基因型水稻对 Cd、Pb 元素吸收积累的差异。结果表明, 不同基因型水稻糙米 Cd、Pb 含量存在较大差异, 其中秀水 09、黄华占、秀优 5 号和绍糯 9714 糙米 Cd 含量未超标, 钱优 8704 和黄华占糙米 Pb 含量未超标。Cd、Pb 在不同器官间的分配存在差异, 总体上 Cd 浓度表现为根>茎>叶、糙米, Pb 浓度表现为根>叶>茎>糙米。水稻不同亚种和杂交组合各器官对 Cd、Pb 积累存在差异, 糙米和茎、根 Cd 含量与水稻类型关系密切, 糙米 Cd 浓度的顺序为籼型杂交稻>粳型杂交稻>常规籼稻>常规粳稻。除稻根外, 其他器官 Pb 浓度与水稻类型无关。亲本不育系不同的杂交组合 F1 代的重金属积累存在差异, 故可通过筛选重金属低积累的亲本, 从遗传上加以改良, 培育重金属吸收少、分配安全的杂交稻组合。

关键词: 水稻; 品种; Cd; Pb; 积累; 器官间分配

中图分类号: X503.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)03-0438-07 **doi:** 10.11654/jaes.2013.03.005

Uptake and Partition of Cd and Pb Among Rice Genotypes in Contaminated Paddy Soil

YANG Xiang-tian¹, ZHOU Cui¹, HE Xian-biao¹, HU Liang-liang², TANG Jian-jun²

(1. Taizhou Institute of Agricultural Science, Linhai 317000, China; 2. College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To test whether rice genotypes varied in response to heavy metal polluted soil, a field experiment was conducted by using 11 rice genotypes in a heavy metal contaminated paddy soil in Wenling, Zhejiang Province. Uptake and partitioning of Cd and Pb in the 11 rice genotypes were investigated. The concentrations of Cd and Pb in grain, leaf, stem and root of rice plants significantly varied among the 11 rice genotypes in this experiment. The concentration of Cd in brown rice of Xiushui09, Huanghuazhan, Xiyou5 and Shaonuo9714 did not exceed the maximum permissible concentration(MPC) of heavy metals in the edible parts of crops(GB 2762—2005), while the concentration of Pb in brown rice of Qianyou8704 and Huanghuazhan did not exceed the MPC. The partitioning pattern of Cd and Pb in various parts of rice plants was similar among the genotypes. The distribution pattern of Cd concentration in various parts of rice plants was in the order of root>stem>leaf and brown rice. For Pb, the pattern was in the order of root>leaf>stem>brown rice. The data analysis showed that Cd concentration in brown rice, stem and root highly related to rice subspecies. Indica hybrid rice had highest Cd concentration in its brown rice, and then japonica hybrid and indica. The japonica rice had lowest Cd concentration in its brown rice. For Pb, however, only concentration in root showed to relate with rice subspecies. Results from this experiment also indicated a significant difference of heavy metal accumulation among various male sterile lines. This result suggested that using male sterile lines with low heavy-metal-uptake trait in hybrid breeding could be an important approach for food production safety in the metal contaminated paddy soil.

Keywords: rice(*Oryza sativa* L.), genotype, Cd, Pb, uptake, partitioning

收稿日期: 2012-08-20

基金项目: 台州市科技项目(08KY08)

作者简介: 杨祥田(1962—), 男, 浙江临海人, 高级农艺师, 主要从事作物栽培方面研究工作。E-mail: yxt9197@163.com

重金属是农业环境和农产品的一个重要污染物质,Cd、Pb等重金属污染已成为世界范围内的环境问题。我国土壤重金属污染形势非常严峻,全国受重金属污染的农业土地约2500万 hm^2 ,不同程度受Cd、Cr和Pb等重金属污染的耕地面积接近2000万 hm^2 ,约占全国耕地总面积的20%^[1]。另据农业部污灌区调查,在约140万 hm^2 的污水灌溉区中,遭受重金属污染的土地面积占污水灌溉区面积的64.8%,其中87.04%为中、轻度污染土壤类型^[2-3]。我国要用占世界7%的耕地养活占世界22%的人口。因此,发挥这些中、轻度重金属污染土地的生产潜力,对农业和人类社会的可持续发展具有重要战略意义。

水稻(*Oryza sativa*)是我国乃至世界的主要粮食作物^[4]。稻米生产安全性及其相关的人体健康风险已经成为全球关注的焦点^[5-9]。目前,有效降低稻米中重金属含量的途径主要包括选育重金属低积累型水稻品种(相同条件下,不同水稻品种对重金属积累差异较大^[10-15])、降低土壤重金属的生物有效性(如通过农艺措施或施用土壤改良剂,从而达到降低重金属活性,降低重金属生物有效性^[16-18])以及稻米深层加工技术(重金属在水稻籽粒中的空间分布极不均匀,适度精加工可显著减少籽粒中重金属含量^[19])等。

不同植物种类和同一植物种类不同基因型对不同元素的摄收与分配形式存在着显著的差异^[20]。通过选育重金属富集能力低的水稻品种并通过科学的栽培管理方式来降低稻米重金属含量,是被实践证明了的最经济有效的途径之一。例如蒋彬等^[21]、吴启堂等^[22]筛选出了一系列低铅或低镉或低砷的品种。一般认为,不同水稻类型对重金属的累积能力,按大类为杂交水稻>常规水稻。但对20世纪90年代以后育出的高产品种的相关研究相对缺乏^[23],对浙江目前主栽品种的研究更是鲜见。为此,本研究旨在筛选适宜浙江种植的Cd、Pb低积累的高产水稻品种。

1 材料与方法

1.1 材料与试验设计

供试水稻品种11个,主要为本地推广种植的不同类型的单季杂交晚稻和常规晚稻,分别为常规粳糯

(秀水09、绍糯9714)、常规籼稻(黄华占、天丝香)、粳型杂交稻(甬优12号、秀优5号)、籼型杂交稻(协优8704、钱优8704、中浙优8号、两优培九和甬优9号)。种子由临海市种子公司提供。试验于2011年在浙江温岭泽国镇某电子垃圾拆解村进行,土壤基本理化性质见表1。Cd、Pb污染程度如以浙江温黄地区土壤环境背景上限值(Cd 0.232 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb 42.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)作为评价参考标准,则分别达到重度污染和中度污染,如以GB15612—1995土壤环境质量国家二级标准值 $\text{pH}<6.5$ (Cd 0.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb 250 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)为参考标准,则分别为中度污染和未污染。试验小区面积为9 m^2 (3 $\text{m}\times 3$ m),3次重复,随机区组排列。区组间隔40 cm,小区间隔30 cm。6月2日播种,6月21日移栽,行距30 cm,株距20 cm,拉线定距插秧,确保株距、行距基本一致。杂交晚稻每穴1本,常规晚稻每穴4本。施肥管理按一般大田高产要求进行,每公顷施纯氮150 kg,磷、钾肥按 $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=1:0.3:0.6$ 比例配施。氮肥以基肥:分蘖肥:穗肥=2:2:1比例施用,磷肥作基肥一次性施用,钾肥按分蘖肥和穗肥各占50%。

1.2 分析测定项目和方法

于水稻成熟期调查各小区10丛有效穗数,收获前各小区取代表性样品5丛带回,室内考查每穗总粒数、每穗实粒数和千粒重,计算理论产量。将用于考查的5丛植株地上部与地下部分开,测定地上部生物量(干重)。实际产量以小区实收稻谷晒干、扬净,据实际称得的稻谷重量,折算成每公顷产量。

先用自来水清洗水稻根、茎、叶和谷粒,用去离子水清洗干净。谷粒风干后先按农业部部颁标准《米质测定方法》(NY 147—1988)出糙,其余样品先在105℃杀青30 min,再在70℃烘干至恒重,研磨过100目尼龙筛,用浓 HNO_3 于微波消化炉(MUTI WAVE 3000)消化,再用感应耦合等离子体/质谱(ICP-MS/G3271A)测定Cd、Pb全量。

1.3 数据分析

通过运用Saaty的两两对比法将不同水稻类型进行量化,再用SPSS13.0进行两两相关性分析。方差分析用DPS v3.01 Duncan新复极差法,其他试验数据用Excel 2003进行统计分析。

表1 土壤基本理化性质

Table 1 The physical and chemical characteristics of soil for field experiment

土壤	质地	pH	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
水稻土	壤土	5.29	59.3	271	21.6	60.0	0.88	95.96

2 结果与分析

2.1 水稻不同基因型产量及农艺性状

虽然在重金属污染土壤上种植,但水稻的生长没有受到明显影响。从表 2 可见,各品种产量差异达到极显著水平,以甬优 12 号最高,为 9.52 t·hm⁻²;绍糯 9714 最低,为 6.09 t·hm⁻²。总体而言,杂交稻产量显著高于常规稻,其平均产量分别为 8.40、6.66 t·hm⁻²。但常规籼稻黄华占产量相对较高,且米质优。

2.2 水稻不同基因型糙米对 Cd、Pb 的积累差异

2.2.1 Cd 的积累

由图 1、表 3 可见,水稻不同基因型对 Cd 积累差异达到极显著水平,其值变化于 0.10~0.50 mg·kg⁻¹ 之间,最大值和最小值相差 5 倍。虽然土壤中 Cd 含量较高,但秀水 09、黄华占和秀优 5 号的糙米 Cd 含量较低,仅 0.1 mg·kg⁻¹,绍糯 9714 的糙米 Cd 含量为 0.15 mg·kg⁻¹,均低于国家规定的糙米中 Cd 限定标准值 0.2

mg·kg⁻¹(GB 2762—2005),属于安全的糙米。

2.2.2 Pb 的积累

由图 2、表 3 可见,糙米 Pb 含量在 0.12~0.73 mg·kg⁻¹ 范围内,最大值和最小值相差 6 倍左右,差异达到极显著水平。虽然糙米中 Pb 超标率较高,但仍有一些品种的糙米 Pb 含量较低,其中钱优 8704 和黄华占糙米中 Pb 含量低于限定标准值 0.2 mg·kg⁻¹(GB 2762—2005)。基于精米加工过程中的研磨和重金属元素在种子内的分布特征,能够加工生产出食用安全精米的品种可能更多些。

2.3 Cd、Pb 在水稻植株不同器官之间的分配差异

从图 1、2 可见,Cd 在水稻中的浓度是根>茎>叶、糙米,且含量差异很大,说明根系吸收的 Cd 在向地上部各器官的运输过程中受到根茎的“截留”,最后能达到叶片和谷粒的量很少,因为 Cd 容易被限制在细胞壁的活性化合物交换位,能参与长距离运输的数量是很有限的^[24]。水稻不同器官 Pb 浓度相比根>叶>茎>

表 2 水稻不同基因型的农艺性状
Table 2 Agronomic traits of different rice genotypes

类型	品种	地上部生物量/t·hm ⁻²	每穗总粒数	每穗实粒数	有效穗数/万·hm ⁻²	千粒重/g	理论产量/t·hm ⁻²	实际产量/t·hm ⁻²
常规粳稻	秀水 09	12.36	109.0	105.9	259.74	26.11	7.18	6.60±0.24CDde
	绍糯 9714	11.42	98.5	96.1	240.59	28.27	6.54	6.09±0.23De
常规籼稻	黄华占	13.48	128.6	123.5	279.72	22.96	7.93	7.62±0.50Bc
	天丝香	11.88	117.3	105.2	237.26	28.31	7.07	6.34±0.19CDe
粳型杂交稻	甬优 12 号	16.84	329.4	320.3	137.36	22.48	9.89	9.52±0.41Aa
	秀优 5 号	12.55	181.9	176.7	157.34	27.19	7.56	7.10±0.44BCed
籼型杂交稻	协优 8704	16.46	175.4	164.8	202.30	27.73	9.24	8.78±0.44Ab
	钱优 8704	15.88	185.4	165.0	235.60	24.53	9.54	8.98±0.25Aab
	中浙优 8 号	13.26	188.3	180.4	176.49	24.58	7.83	7.50±0.13Bc
	两优培九	13.63	177.0	159.3	191.48	26.57	8.10	7.71±0.12Bc
	甬优 9 号	16.30	188.6	175.8	200.63	27.26	9.61	9.22±0.48Aab

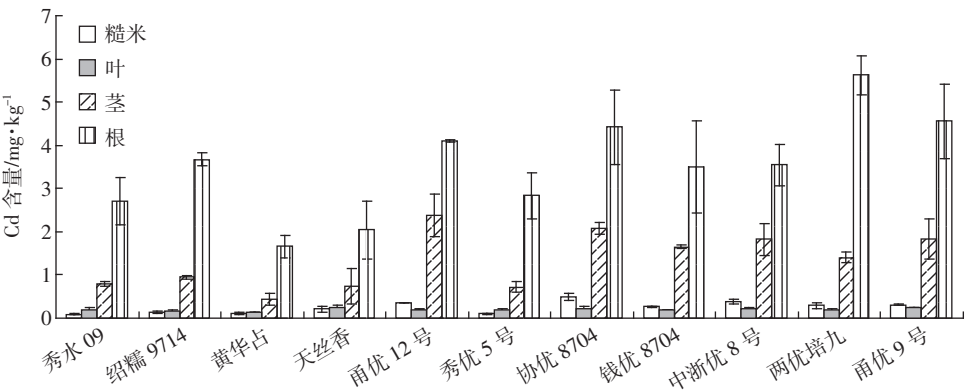


图 1 水稻不同基因型各器官 Cd 含量

Figure 1 Cd concentrations in the organs of different rice cultivars

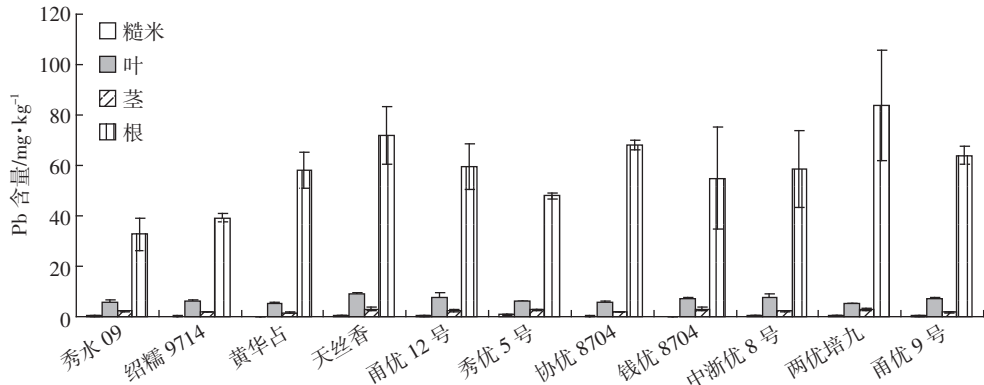


图 2 水稻不同基因型各器官 Pb 含量

Figure 2 Pb concentrations in the organs of different rice cultivars

表 3 水稻不同基因型糙米 Cd 和 Pb 的含量

Table 3 Cd and Pb concentrations in brown rice among various genotypes

类型	品种	Cd/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹
常规粳糯	秀水 09	0.10±0.01fE	0.24±0.02bcdBC
	绍糯 9714	0.15±0.03efDE	0.22±0.05bcdBC
常规籼稻	黄华占	0.10±0.03fE	0.16±0.02cdBC
	天丝香	0.21±0.07defCDE	0.40±0.11bB
粳型杂交稻	甬优 12 号	0.36±0.01bcAB	0.30±0.12bcdBC
	秀优 5 号	0.10±0.02fE	0.73±0.27aA
籼型杂交稻	协优 8704	0.50±0.07aA	0.21±0.08cdBC
	钱优 8704	0.26±0.02cdeBCD	0.12±0.02dC
	中浙优 8 号	0.39±0.05abAB	0.27±0.01bcdBC
	两优培九	0.30±0.07bcdBC	0.35±0.07bcBC
	甬优 9 号	0.31±0.02bcdBC	0.31±0.14bcdBC

注:表中小、大写字母表示差异分别达到显著和极显著水平。

糙米,这与解怀生等^[25]得出的结果一致,与刘建国等^[13]得出的根>茎>叶>籽粒的结果不同,可能与供试品种和种植土壤等不同有关,但都主要集中在根部位,糙米(籽粒)铅含量最低。因为植物根系所吸收的铅向地上部迁移困难,从根到枝叶会降低 7~10 倍,而籽粒铅含量最多只是根部铅含量的 1%左右^[26]。

2.4 水稻不同亚种和杂交组合各器官对 Cd、Pb 积累差异

从表 4 可见,水稻的糙米和茎、根 Cd 含量与水稻类型相关性分别达到极显著和显著水平,常规稻糙米 Cd 含量要低于杂交稻,粳稻要低于籼稻,粳型杂交稻要低于籼型杂交稻,这与王凯荣和龚惠群^[27]、李正文^[28]、刘建国等^[29]报道一致。从表 4 也可见,糙米的 Cd 含量与茎的 Cd 含量达到极显著相关水平,与根、地上部生物量及产量达到显著相关水平。据吴启堂等^[22]研究,水稻生物产量和谷粒产量较高的品种有较

强的根系活力及吸收能力,会从土壤中吸收较多的重金属等物质。董桂春等^[30]报道水稻根系活性的顺序为杂交籼稻>杂交粳稻>常规籼稻>常规粳稻。曹显祖等^[31]研究显示水稻不同品种因穗部性状、叶片光合能力及干物质的积累转运特性不同会影响物质的积累和分配,每穗粒数多会促进茎叶积累物质向谷粒分配。产量与每穗总粒数、每穗实粒数呈显著正相关,因而可能增加水稻所吸收的重金属向谷粒分配的比例。因此,水稻的物质积累、穗部特性、产量形成能力等农艺性状,很可能影响污染土壤环境下生长的稻米的重金属浓度。从表 5 可见,水稻各器官(除根外)Pb 含量与水稻类型无显著相关,虽然各类型间存在差异,但同一类型内不同基因型间的差异也较大(图 2、表 3)。这与刘建国^[29]的研究基本一致。

2.5 亲本不育系对重金属积累的差异

协优 8704 与钱优 8704 具有相同的恢复系 R8704(台州农科院选育),而其不育系不同,前者为协青早 A(安徽省广德县农科所选育),后者为钱江 1 号 A(浙江省农科院选育)。这两个组合的重金属积累差异显著,前者糙米中 Cd、Pb 的含量分别为 0.50、0.21 mg·kg⁻¹,后者糙米中 Cd、Pb 的含量分别为 0.26、0.12 mg·kg⁻¹,差异显著。这暗示着筛选低积累亲本是培育重金属低积累水稻品种的重要方法之一。杨莉等^[32]利用 4 个不育系、6 个恢复系进行不完全双列杂交试验也表明了水稻籽粒中重金属 Cd 和 As 含量的遗传效应,且培育 Cd 低吸收的杂交稻组合,不育系遗传改良的效果最好。

3 结论

不同水稻基因型对土壤 Cd、Pb 吸收能力差异显著,秀水 09、黄华占、秀优 5 号和绍糯 9714 的 4 个糙

表 4 水稻各器官 Cd 含量与水稻类型、农艺性状的相关性分析

Table 4 Correlation coefficients between Cd concentrations in rice organs and genotypes, agronomic traits

	糙米 Cd 含量	叶 Cd 含量	茎 Cd 含量	根 Cd 含量	水稻类型	地上部生物量	每穗总粒数	每穗实粒数	有效穗数	千粒重	实际产量
糙米 Cd 含量	1										
叶 Cd 含量	0.478	1									
茎 Cd 含量	0.892**	0.417	1								
根 Cd 含量	0.643*	0.242	0.703*	1							
水稻类型	0.757**	0.347	0.697*	0.694*	1						
地上部生物量	0.695*	0.243	0.822**	0.496	0.640*	1					
每穗总粒数	0.543	0.179	0.770**	0.435	0.416	0.732*	1				
每穗实粒数	0.512	0.150	0.747**	0.399	0.359	0.701*	0.996**	1			
有效穗数	-0.505	-0.352	-0.635*	-0.528	-0.443	-0.394	-0.804**	-0.809**	1		
千粒重	-0.052	0.458	-0.235	0.152	-0.041	-0.384	-0.555	-0.565	0.103	1	
实际产量	0.644*	0.187	0.797**	0.491	0.666*	0.985**	0.778**	0.746**	-0.437	-0.468	1

注: *、** 表示相关性分别达到显著和极显著水平,下同。

表 5 水稻各器官 Pb 含量与水稻类型、农艺性状的相关性分析

Table 5 Correlation coefficients between Pb concentrations in rice organs and genotypes, agronomic traits

	糙米 Pb 含量	叶 Pb 含量	茎 Pb 含量	根 Pb 含量	水稻类型	地上部生物量	每穗总粒数	每穗实粒数	有效穗数	千粒重	实际产量
糙米 Pb 含量	1										
叶 Pb 含量	0.077	1									
茎 Pb 含量	0.331	0.430	1								
根 Pb 含量	0.033	0.174	0.309	1							
水稻类型	0.033	0.136	0.306	0.643*	1						
地上部生物量	-0.306	0.078	-0.059	0.352	0.640*	1					
每穗总粒数	0.119	0.314	0.140	0.282	0.416	0.732*	1				
每穗实粒数	0.138	0.296	0.084	0.224	0.359	0.701*	0.996**	1			
有效穗数	-0.543	-0.290	-0.235	-0.275	-0.443	-0.394	-0.804**	-0.809**	1		
千粒重	0.331	-0.049	0.081	0.043	-0.041	-0.384	-0.555	-0.565	0.103	1	
实际产量	-0.253	0.091	-0.026	0.367	0.666*	0.985**	0.778**	0.746**	-0.437	-0.468	1

米 Cd 含量未超标,钱优 8704 和黄华占糙米中 Pb 含量未超标;水稻各器官(除叶外)Cd 含量与水稻类型显著相关,糙米中 Cd 含量为籼型杂交稻>粳型杂交稻>常规籼稻>常规粳稻。除稻根外,其他器官 Pb 浓度与水稻类型无显著相关;亲本不育系不同的杂交组合 F1 代的重金属积累存在差异,故可通过筛选重金属低积累的亲本,从遗传上加以改良,培育重金属摄入少、分配安全的杂交稻组合。

参考文献:

[1] 赵科理. 土壤-水稻系统重金属空间对应关系和定量模型研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
ZHAO Ke-li. Spatial relationships of heavy metals in soil-rice system and the quantitative model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
[2] 马宁远, 刘鲁新, 蔺彩霞, 等. 植物修复技术在重金属污染土壤中的

应用[J]. 新疆农业科技, 2008(3):31.
MA Ning-yuan, LIU Lu-xin, LIN Cai-xia, et al. Application of phytoremediation for heavy metal-contaminated soil[J]. *Xinjiang Journal of Agricultural Science and Technology*, 2008(3):31.
[3] 李月芳, 刘 领, 陈 欣, 等. 模拟铅胁迫下玉米不同基因型生长与铅积累及各器官间分配规律[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2260-2267.
LI Yue-fang, LIU Ling, CHEN Xin, et al. Plant growth, lead uptake and partitioning of maize(*Zea mays* L.) under simulated mild/moderate lead pollution stress[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2010, 29(12):2260-2267.
[4] FAO. Statistical databases[R]. Food and Agriculture Organization(FAO) of the United Nations, 2010.
[5] 郑喜申, 鲁安怀, 高 翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1):79-84.
ZHENG Xi-shen, LU An-huai, GAO Xiang, et al. Contamination of heavy metals in soil present situation and method[J]. *Soil and Environ-*

- mental Sciences, 2002, 11(1):79-84.
- [6] 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.
- [7] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients - food safety issues[J]. *Field Crops Research*, 1999, 60:143-163.
- [8] Grant C A, Buckley W T, Bailey L D, et al. Cadmium accumulation in crops[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1998, 78:1-17.
- [9] Nan Z R, Li J J, Zhang J M, et al. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 285:187-195.
- [10] Morishita T, Fumoto N, Yoshizawa T, et al. Varietal differences in cadmium levels of rice grains of japonica, indica, javanica and hybrid varieties produced in the same Plot of a field[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1987, 33:629-637.
- [11] 程旺大, 张国平, 姚海根, 等. 晚粳稻籽粒中As、Cd、Cr、Ni、Pb等重金属含量的基因型与环境效应及其稳定性[J]. 作物学报, 2006, 32(4):573-579.
- CHENG Wang-da, ZHANG Guo-ping, YAO Hai-gen, et al. Genotypic and environmental variation and their stability of As, Cd, Cr, Ni and Pb concentrations in the grains of Japonica rice[J]. *ACTA Agronomica Sinica*, 2006, 32(4):573-579.
- [12] 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-Environmental Science*, 2003, 22(5):529-532.
- [13] 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.
- [14] 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.
- 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.
- [15] Zeng F R, Mao Y, Cheng W D, et al. Genotypic and environmental variation in chromium, cadmium and lead concentrations in rice [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 153:309-314.
- [16] 郑绍建, 胡霁堂. 淹水对污染土壤镉形态转化的影响[J]. 环境科学学报, 1995, 15:142-147.
- ZHEN Shao-jian, HU Ai-tang. Effects of flooding on the transformation of cadmium fractions in contaminated soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15:142-147.
- [17] Reddy C N, Patriek W H J. Effect of redox potential and pH on the uptake of cadmium and lead by rice plants[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1977, 6:259-262.
- [18] 丁凌云, 蓝崇钰, 林建平, 等. 不同改良剂对重金属污染农田水稻产量和重金属吸收的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(06):1204-1208.
- DING Ling-yun, LAN Chong-yu, LIN Jian-ping, et al. Effects of different ameliorations on rice production and heavy metals uptake by rice grown on soil contaminated by heavy metals[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6):1204-1208.
- [19] 查燕, 杨居容, 刘虹, 等. 污染谷物中重金属的分布及加工过程的影响[J]. 环境科学, 2000, 21(3):52-55.
- ZHA Yan, YANG Ju-rong, LIU Hong, et al. Distribution of heavy metals in polluted crops seeds and the effect of heavy metals in the food processing[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2000, 21(3):52-55.
- [20] 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.
- [21] 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 difference in concentrations of Pb, Cd and As in polished rice grains[J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2002, 22(3):37-40.
- [22] 吴启堂, 陈卢, 王广寿. 水稻不同品种对吸收Cd积累的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1):104-107.
- WU Qi-tang, CHEN Lu, WANG Guang-shou. Difference on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1):104-107.
- [23] 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-kuang, YANG Lian-xin, WANG Yu-long, et al. Advances in the study uptake and accumulation of heavy metal in rice (*Oryza sativa*) and its mechanisms[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2005, 22(5):614-622.
- [24] 杨志敏, 郑绍建, 胡霁堂, 等. 镉磷在小麦细胞内的积累和分布特性及其交互作用[J]. 南京农业大学学报, 1998, 21(2):54-58.
- YANG Zhi-min, ZHENG Shao-jian, HU Ai-tang, et al. Accumulation and distribution of cadmium and phosphorus and their interaction in wheat suspension cultured cells[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1998, 21(2):54-58.
- [25] 解怀生, 陈美君, 许兴苗, 等. 土壤Cd、As、Pb在水稻植株中的吸收分布特征[J]. 浙江农业科学, 2010, 5:1056-1058.
- XIE Huan-sheng, CHEN Mei-jun, XU Xin-miao, et al. Accumulation and distribution of Cd, As and Pb in rice[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Science*, 2010, 5:1056-1058.
- [26] Robert L Zimdahl. Entry and movement in vegetation of lead derived from air and soil sources[J]. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1976, 26(7):655-660.
- [27] 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.
- WANG Kai-rong, GONG Hui-qun. Comparative studies on the differ-

- ence of the uptake and redistribution of environmental Cd by two genotype rice[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(4): 145-149, 176.
- [28] 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.
- LI Zheng-wen. Uptake of Pb and Cd by 2 rice cultivars in 2 soils differing in physio-chemical properties under spiked Cd treatment and its dynamics in growing period[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003.
- [29] 刘建国. 水稻品种对土壤重金属镉吸收分配的差异及其机理研究[D]. 扬州:扬州大学, 2004.
- 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.
- [30] 董桂春, 王余龙, 王坚刚, 等. 不同类型水稻品种间根系性状的差异[J]. 作物学报, 2002, 11(6): 749-755.
- DONG Gui-chun, WANG Yu-long, WANG Jian-gang, et al. Study on the differences of root traits between various types of varieties in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 11(6): 749-755.
- [31] 曹显祖, 朱庆森. 水稻品种的源库特征及其类型划分的研究[J]. 作物学报, 1987, 13(4): 266-272.
- CAO Xian-zu, ZHU Qing-sen. Study on characteristics of the relationship between source and sink in rice varieties and their classification[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1987, 13(4): 266-272.
- [32] 杨莉, 曹应江, 郑家奎, 等. 水稻籽粒镉和砷含量的遗传效应分析[J]. 杂交水稻, 2010, 25(5): 80-83.
- YANG Li, CAO Ying-jiang, ZHEN Jia-kui, et al. Analysis on genetic effect of cadmium and arsenic contents in rice grains[J]. *Hybrid Rice*, 2010, 25(5): 80-83.