

大田生产条件下不同品种水稻植株中镉的分布特点

周鸿凯^{1,2}, 何觉民¹, 陈小丽¹, 莫俊杰¹, 黎华寿²

(1.广东海洋大学农学院, 广东 湛江 524088; 2.华南农业大学热带亚热带生态研究所, 广州 510642)

摘要:通过4个水稻品种在大田生产条件下的试验,研究分析了水稻植株Cd积累和分布的特点。结果表明,水稻的根系是吸收Cd的主要器官,也是Cd的主要储存场所,无论在水稻分蘖期还是成熟期都很明显;在水稻成熟期,籽粒(糙米)中Cd的含量显著地低于其他器官,水稻植株器官中Cd的分布情况大致为:根>鞘>叶>茎>糙米,但随着品种的不同而有所变化;根据4个水稻品种在成熟期的植株Cd积累量的分析,9311是植株高累积Cd的水稻品种,Jia-48和Jia-51的糙米中Cd的积累很低;水稻品种间对于Cd的吸收和累积能力有显著的差异,但水稻类型间(粳稻与籼稻间)Cd含量没有显著差异,因此不能按照水稻类型来选育糙米中低Cd积累品种,应针对品种选育出糙米中低Cd积累的高产优质水稻品种。

关键词:大田生产;水稻;镉;分布特点

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)02-0229-06

The Cd Uptake and Distribution Features in Plant Organs of Four Rice Cultivars

ZHOU Hong-kai^{1,2}, HE Jue-min¹, CHEN Xiao-li¹, MO Jun-jie¹, LI Hua-shou²

(1.College of Agronomy, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2.Institute of Tropical and Subtropical Ecological, South China Agriculture University, Guangzhou 510642, China)

Abstract:Field experiment was conducted to investigate the features of cadmium(Cd) accumulation and distribution of rice plant organs in four rice varieties. The results showed that the rice root was the main plant organ to uptake Cd, it also was the main storage site of Cd. The Cd content of grain (brown rice) was significantly lower than in other organs at maturity stage. The concentration order of heavy metal Cd in different plant organs was root> sheath > leaf > stem > grain, but the order changed with the different varieties. Based on the results which Cd accumulation of four rice varieties was analysed in mature stage, 9311 was the variety of high accumulation Cd, the Cd content of brown rice was very low in Jia-48 and Jia-51. The ability to Cd uptake and accumulation was significantly different in rice varieties, but the inter-type rice(japonica and indica rooms) was not significantly different.

Keywords:field; rice; Cd; distribution feature

我国是世界上最大的稻谷生产国,年均生产稻谷1.87亿t,约占世界稻谷产量的35%^[1]。2003年中国水稻研究所和农业部稻米品质质量监督检测中心对全国各地的大米进行的检测分析表明,我国稻米的平均Cd含量为0.076 mg·kg⁻¹,最高达2.11 mg·kg⁻¹,远超过我国谷物中Cd的最高许可含量0.2 mg·kg⁻¹,超标率为8.8%。甄燕红等^[2]随机抽取国内部分市场的精米样品91个,Cd含量超标(食品卫生质量标准)的达10%左右,若以USEPA推荐的成人RfD(Cd)值计算

摄取量,则70%的大米潜存着Cd食物暴露风险问题。在我国现有的约1×10⁸hm²耕地中,约近1/5受到不同程度的污染,每年造成粮食减产达2.5×10⁹kg,农业总损失每年达1×10¹¹元以上。2000年对全国3×10⁵hm²基本农田保护区2×10⁸kg粮食抽查发现,重金属超标率大于10%,污水灌区的问题更加严重^[3]。稻田受到重金属污染后,土壤中重金属被水稻吸收并在植株和籽粒中积累,通过食物进入人体。这不仅降低了稻米的食用品质,而且威胁人类健康。随着社会经济的发展,人们生活水平的日益提高,对稻米质量的要求越来越高,特别对稻米的安全性给予了极大的关注。多年来,国内外在重金属镉污染对水稻生长发育、生理生化特性的影响^[4-10]、重金属Cd在水稻植株中的积累富集行为^[11-14]、Cd对水稻的毒害效应及其耐性机制^[15-20]和不同水稻品种对重金属Cd的吸收积累的基

收稿日期:2009-09-17

基金项目:国家重点基础研究“973计划”项目(2006CB1000206);国家自然科学基金资助项目(30870413,40871156);广东省农业科技攻关项目(2009B020302005)

作者简介:周鸿凯(1962—),男,广东人,硕士,副研究员,主要从事作物生态与育种工作。E-mail:zhouhangkai@sina.com

通讯联系人:黎华寿 E-mail:lihuashou@scau.edu.cn

因型间差异^[21-25]等方面进行了大量研究。这对于农业生产、环境治理及生态保护都具有重要意义,同时可进一步提高人们的环保及保健意识,促进无公害食品生产的发展。

但是,大田生产的条件下,有关 Cd 在不同水稻植株中的积累和分布特点的研究报道较少。为此,笔者通过 4 个水稻品种在大田生产条件下的试验,研究水稻植株中 Cd 积累和分布的特点,以期为筛选和选育低重金属累积品种的理论研究和应用提供参考,并为保障食物重金属安全性监测与评价和无公害食品生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

参试的水稻品种:中作 9128(粳稻)、Jia-48(粳稻)、Jia-51(粳稻)、9311(籼稻)。

参试品种于 2008 年 7 月 10 日直播种植于广东海洋大学实验农场水稻试验田,随机区组排列,3 次重复,土壤 pH6.2,土壤肥力中等;有机质含量 2.43%,碱解氮含量 131.5 mg·kg⁻¹,速效磷含量 68.5 mg·kg⁻¹,速效钾含量 183.5 mg·kg⁻¹。小区面积 2 m×11 m,株距为 15 cm,行距为 20 cm。田间栽培管理按大田常规措施进行。试验田的 Cd 含量的基础数据(于 2008 年 7 月 9 日按梅花形取 5 个试验田土样进行分析)为:0.113 7、0.172 5、0.140 8、0.122 2、0.132 7 mg·kg⁻¹,平均值 0.136 4 mg·kg⁻¹,属于未受污染的常规耕作大田。

1.2 样品采集

于水稻不同生育期(分蘖期、成熟期)采集水稻样品,先用自来水小心清洗水稻植株的根系及其茎、叶,然后用蒸馏水再清洗,自然风干,粉碎过 100 目筛,测定 Cd 含量;水稻成熟时收获稻谷,风干去壳,粉碎,

过 100 目筛测定。

1.3 分析方法

样品中 Cd 元素采用 HNO₃-HClO₄ 湿消化法^[21],待测液中 Cd 含量用原子吸收分光光度法测定^[21]。以国家标准物质 GBW07604(GSV-3)为内标控制分析质量。

1.4 数据统计分析

方差分析和多重比较按文献的方法和步骤^[27],应用统计分析软件 SAS(8.01)在 PC 机上进行。

2 结果分析

2.1 水稻不同生育期植株器官中 Cd 含量的方差分析

根据试验数据,以品种为 A 因素、植物器官为 B 因素进行双因素随机区组设计方差分析,如表 1。

从表 1 可知,在水稻的分蘖期,本试验的 4 个品种间和根、茎、叶 3 个植株器官间 Cd 含量都呈现极显著的差异;在成熟期,4 个品种的根、茎、叶、叶鞘、糙米 5 个植株器官 Cd 含量间及其互作都呈现极显著的差异,但 4 个品种植株 Cd 含量间的差异没有达到显著水平。

试验的 4 个水稻品种于分蘖期和成熟期的植株器官中 Cd 含量测定结果见表 2。

2.2 分蘖期水稻植株器官中 Cd 的分布特点

由表 2 和图 1 可知,参试的 4 个水稻品种在水稻分蘖期根系 Cd 的含量都是最高,比茎、叶的 Cd 含量高 3~4.5 倍达极显著水平,并且品种间根的 Cd 含量差异较小;茎、叶间没有明显的差异,品种 Jia-51 和 9311 茎的含量稍高于叶,Jia-48 和 9128 为叶的含量稍高于茎。同一植物不同器官对 Cd 的富集系数不同,一般为根系>茎叶>果实,Cd 主要集中在根部与 Cd 进入根的皮肤细胞后和根内蛋白质、多糖、核糖、

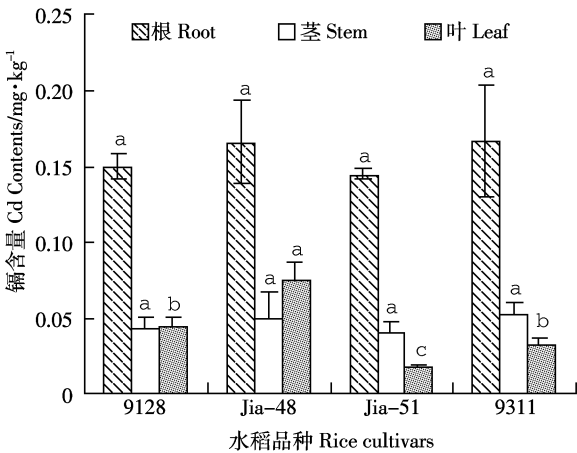
表 1 方差分析表(固定模型)
Table 1 The form of variance analysis(Fixed model)

生长期 Growth stage	变异来源 Source	平方和 SS	自由度 DF	均方 MS	F	Pr>F
分蘖期 Tillering stage	A 品种间 Cultivars	0.004 0	3	0.001 3	5.560	0.004 8
	B 器官间 Organs	0.101 8	2	0.050 9	212.800	0.000 1
	A×B	0.002 8	6	0.000 5	1.958	0.112 1
	误差 Error	0.005 7	24	0.000 2		
	总变异 Total variance	0.114 3	35			
成熟期 Mature stage	A 品种间 Cultivars	0.001 5	3	0.000 5	1.577	0.21
	B 器官间 Organs	0.067 8	4	0.017	53.268	0.000 1
	A×B	0.012 7	12	0.001 1	3.313	0.002 1
	误差 Error	0.012 7	40	0.000 3		
	总变异 Total variance	0.094 7	59			

表 2 水稻植株中镉的含量状况(mg·kg⁻¹)
Table 2 Cadmium(Cd) concentration in plant organs of rice at growth stage(mg·kg⁻¹)

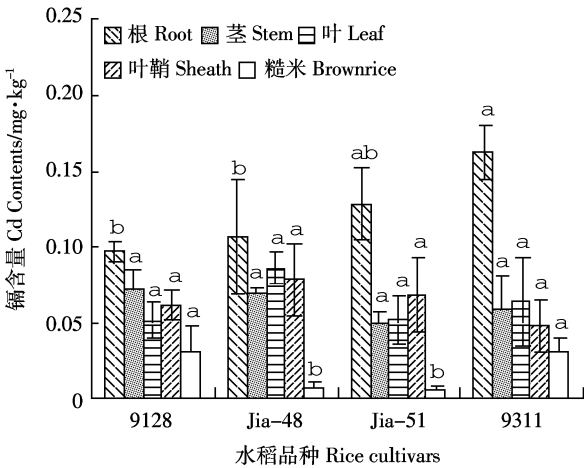
生长期 Growth stage	品种 Cultivars	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	叶鞘 Sheath	糙米 Brown rice	平均值 Average
分蘖期 Tillering stage	9128	0.1492±0.0086a	0.0428±0.0072b	0.0436±0.0064b			0.0785± 0.0471bc
	Jia-48	0.1656±0.0201a	0.0489±0.0128c	0.0742±0.0075b			0.0962±0.0462a
	Jia-51	0.1443±0.0026a	0.0396±0.0052b	0.0167±0.0022c			0.0669±0.0516c
	9311	0.1667±0.0277a	0.0523±0.0056b	0.0318±0.0032c			0.0836±0.0554ab
	平均 Average	0.1565±0.0180a	0.0459±0.0078b	0.0416±0.0182b			
成熟期 Mature stage	9128	0.0973±0.0043a	0.0721±0.0094b	0.0511±0.0094b	0.0613±0.0075b	0.0305±0.0127c	0.0625±0.0178a
	Jia-48	0.1071±0.0270a	0.0699±0.0015a	0.0860±0.0080a	0.0780±0.0157a	0.0066±0.0021b	0.0695±0.0252a
	Jia-51	0.1283±0.0173a	0.0491±0.0054b	0.0521±0.0120b	0.0679±0.0184b	0.0054±0.0022c	0.0606±0.0300a
	9311	0.1627±0.0136a	0.0592±0.0159b	0.0637±0.0198b	0.0478±0.0118b	0.0305±0.0069c	0.0728±0.0360a
	平均 Average	0.1239±0.0292a	0.0626±0.0121b	0.0632±0.0179b	0.0638±0.0157b	0.0182±0.0134c	

注:1.表中各器官数据为平均值±标准误(n=3),同一行不同字母代表用 Duncan 法测试时 5%水平上的差异显著性(P<0.05)。2.平均值列为各品种的植株器官的平均值±标准误(n=3,或 n=5),不同字母代表用 Duncan 法测试时 5%水平上的差异显著性(P<0.05)。



图中不同字母代表用 Duncan 法测试不同品种同一器官间时,5%水平上的差异显著性 (P<0.05)。

图 1 分蘖期 4 个水稻品种植株器官中 Cd 含量的比较
Figure 1 Cd concentrations in the organs of different genotypes of rice cultivars at tillering stage



图中不同字母代表用 Duncan 法测试不同品种同一器官间时,5%水平上的差异显著性 (P<0.05)。

图 2 成熟期 4 个水稻品种的根、茎、叶、叶鞘、糙米中 Cd 含量的比较
Figure 2 Cd concentrations in the organs of different genotypes of rice cultivars at mature stage

核酸等化合形成稳定的大分子络合物,或形成不溶性有机大分子而沉积下来有关^[28]。因此,在水稻分蘖期根系为 Cd 的主要储存器官。

参试品种水稻植株 Cd 的平均含量差异比较为:品种 Jia-48 与 9128,Jia-51,9311 与 Jia-51 的差异达显著水平,并且 Jia-48 与 Jia-51 之间的差异达极显著水平。

2.3 成熟期水稻植株器官中 Cd 的分布特点

从表 2 和图 2 可看出,在水稻的成熟期,水稻植株器官中以根的 Cd 含量为最大,并显著地高于其他器官;糙米中 Cd 含量为最低,并极显著地低于其他器官,表明了糙米是 Cd 积累最低的植株器官;茎、

叶、叶鞘间 Cd 含量差别不大。又根据表 2 呈现出品种与植株器官间的互作达极显著水平的事实,不同品种间植株器官 Cd 的积累量差异还是很大,如 9311 的根中 Cd 积累为最大,明显地高于其他品种;Jia-48 和 Jia-51 的糙米中 Cd 的含量明显地低于 9311 和 9128。说明了 Cd 在水稻不同器官中的比例因水稻品种的不同而有显著的差异^[29]。Chino^[30]在成熟期早期进行放射性 Cd 研究表明,水稻籽粒中的 Cd 主要来自根中 Cd 的重新分配,而不是茎和叶的再运输。说明水稻的根系从土壤中吸收 Cd 后,大部分累积在根部,然后逐渐向地上部转移在其他植株器官中再分

配,因其种性的不同而在植株器官分布有所差异,但大致情况为:根>鞘>叶>茎>糙米。其中Cd在糙米中的含量因水稻品种的根系对Cd的吸收及向籽粒转运、贮存能力有较大的差异而不同,而且营养器官根和叶片的积累量与糙米(籽粒)中积累并不呈正相关,即Cd在水稻根系-茎叶-糙米中的迁移率在品种间有显著差异,不同品种水稻Cd向糙米的迁移率差异明显,可能是造成糙米Cd含量种内差异的主要原因,这与吴启堂等^[24]的研究结论是一致的。因此,对于低积累Cd的水稻品种的选育不仅要注重植株的吸收总量,更要注意Cd在籽粒与其他器官之间的分配比例问题。

3 讨论

3.1 水稻植株对Cd的吸收与累积

由于污水的灌溉、污泥农用及含有重金属的化肥、农药的不合理使用,使种植水稻的大田受重金属Cd污染胁迫越来越严重。土壤中重金属元素含量提高后,水稻植株对重金属元素的吸收与积累量显著增加^[25]。植物对重金属的耐性机理一般认为有以下两点:一是植物对金属的排斥性,即重金属被植物吸收后又被排出体外,或重金属在植物体内的运输受到阻碍;二是有的植物可积累重金属,但自身具有解毒能力^[31-32]。土壤性质也是影响植物对镉吸收的重要原因。由于镉主要存在于土壤耕作层,且较多以溶解态形式存在,土壤镉含量、溶解性离子(Cl^-)、有机质含量、阳离子交换能力等都会影响作物对镉的吸收。本研究在大田的生产条件下对4个水稻品种的Cd积累富集进行探索,认为根系是水稻吸收Cd的主要器官,也是Cd的主要储存器官,无论是水稻分蘖期还是成熟期都是很明显。在水稻成熟期,籽粒(糙米)中Cd的含量显著低于其他器官,虽然随着品种的不同其植株器官中Cd的分布比例有所差异,但水稻植株器官中Cd的分布情况大致为:根>鞘>叶>茎>糙米。这一结果与仲维功等^[25]、曾翔等^[26]在盆栽试验条件的研究结论相似。因此,水稻植株对Cd的吸收与积累量随着器官的不同而有差异,吸收的重金属元素相当大的部分滞留在根部,少量向地上部迁移进行再分配,在糙米中的累积很少。

3.2 不同类型水稻品种对Cd的吸收与累积

不同水稻品种植株器官间Cd的含量差异很大,9311和Jia-51的根中Cd积累为较大,Jia-51和Jia-48糙米中Cd积累为较小。根据4个水稻品种在成熟

期的植株Cd积累量的分析,9311是植株高累积Cd的水稻品种,且其糙米中Cd积累也较大。Jia-48Cd的积累特点是:根积累很大,而糙米(籽粒)中积累较低。水稻品种间对于Cd的吸收和累积能力有显著的差异,但水稻类型间(粳稻与籼稻间)Cd含量没有显著差异,因此不能按照水稻类型来选育糙米中低Cd积累的品种,应针对品种选育出糙米中低Cd积累的高产优质水稻品种。这一结果与徐燕玲等^[33]的研究结论相一致,但仲维功等^[25]、曾翔等^[26]的研究认为水稻类型间(粳稻与籼稻间)Cd含量有显著差异。在Cd胁迫下,不同的水稻品种的根系对Cd的吸收及向籽粒转运、贮存能力有较大的差异,这为基于稻米Cd安全选育和种植糙米中Cd低积累水稻品种指明了方向。

3.3 水稻品种间对Cd的吸收与累积差异的机理

已有相关研究和综述指出,不同植物、同一植物不同基因型品种对污染物的吸收累积均可能存在显著差异。造成不同植物在吸收累积重金属方面存在差异的原因很多,不同植物吸水量、根冠比增大的品种或环境因素可造成植物产品重金属浓度增加,而品种间Cd向食用部位的迁移率差异,特别是较低耐性植物体内汁液水溶性Cd浓度较低,吸收的Cd较少由根系向食用部位(糙米)转移,可能是其主要的生理生化机制^[24]。

当前,利用高富集或低积累作物品种进行植物修复或减少农产品污染的研究和实践应用是研究的热点,并已取得较大进展。如加拿大对硬粒小麦(*durum wheat*)进行了长期研究,表明低Cd品种具有较低的Cd根冠转移特征,这种低转移特征与较低的木质部汁液Cd浓度以及较低的韧皮部汁液分泌有关^[34],从而于2004年通过传统育种技术选育并推出低Cd品种——Strongfield^[35],该品种已在农业生产上广泛应用,占加拿大硬粒小麦播种面积25%以上,对解决硬粒小麦Cd污染问题作出了显著贡献^[36]。

本文结果表明,大田生产条件下不同水稻品种植株各器官对Cd的积累与分布有显著差异,尽管其内在生理生化机制和分子生态学机理有待深入研究,但筛选和选育Cd低累积品种水稻以保障稻米Cd安全,无疑具有巨大潜力和良好前景。

参考文献:

- [1] 杨春刚,杜成喜,张三元,等.糙米与水稻植株中镉含量的关系[J].安徽农业科学,2008,36(10):4026-4027,4127.
YANG Chun-gang, DU Cheng-xi, ZHANG San-yuan, et al. Relationship between Cd content of brown rice and that of rice plant[J]. *Journal of*

- Anhui Agri Sci, 2008, 36(10):4026-4027, 4127.
- [2] 甄燕红, 成颜君, 潘根兴, 等. 中国部分市售大米中 Cd、Zn、Se 的含量及其食品安全评价[J]. 安全与环境学报, 2008(1):119-122.
- ZHEN Yan-hong, CHENG Yan-jun, PAN Gen-xing, et al. Cd, Zn and Se content of the polished rice samples from some Chinese open markets and their relevance to food safety[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2008(1):119-122.
- [3] 周东美, 郝秀珍, 薛艳, 等. 污染土壤的修复技术研究进展[J]. 生态环境, 2004, 13(2):234-242.
- ZHOU Dong-mei, HAO Xiu-zhen, XUE Yan, et al. Advances in remediation technologies of contaminated soils [J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2):234-242.
- [4] 邵国胜, Muhammad Jaffar Hassan, 章秀福, 等. 镉胁迫对不同水稻基因性植株生长和抗氧化酶系统的影响 [J]. 中国水稻科学, 2004, 18(3):239-244.
- SHAO Guo-sheng, Muhammad Jaffar Hassan, ZHANG Xiu-fu, et al. Effects of cadmium stress on plant growth and antioxidative enzyme system in different rice genotypes[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2004, 18(3):239-244.
- [5] 易俗, 王瑞兰, 汪琼, 等. 铀尾沙胁迫对水稻幼苗叶绿素含量、MDA 含量和 SOD 活性的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(6):626-628.
- YI Su, WANG Rui-lan, WANG Qiong, et al. Effects of uranium tail stress on chlorophyll content and MDA content and activity of SOD in rice seedlings[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(6):626-628.
- [6] 陈平, 张伟锋, 余土元, 等. 镉对水稻幼苗生长及部分生理特性的影响[J]. 仲恺农业技术学院学报, 2001, 14(4):18-21.
- CHEN Ping, ZHANG Wei-feng, YU Tu-yuan, et al. Effects of cadmium on growth and some physiological characteristics of rice seedlings[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Technology*, 2001, 14(4):18-21.
- [7] 葛才林, 杨小勇, 孙锦荷, 等. 重金属胁迫对水稻萌发种子淀粉酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2002, 30(3):47-52.
- GE Cai-lin, YANG Xiao-yong, SUN Jin-he, et al. Effect of heavy metal stress on the amylase activity in germinating rice seeds[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2002, 30(3):47-52.
- [8] 葛才林, 杨小勇, 朱红霞, 等. 重金属胁迫对水稻叶片过氧化氢酶活性和同功酶表达的影响[J]. 核农学报, 2002, 16(4):197-202.
- GE Cai-lin, YANG Xiao-yong, ZHU Hong-xia, et al. Effect of heavy metal stress on the catalase activity and expression of isozymes in the leaves of rice seedling[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2002, 16(4):197-202.
- [9] Khale H. Response of roots of trees to heavy metals[J]. *Environ Exper Bot*, 1993, 33:99-119.
- [10] Hegedus A, Edrei S, Horvath G. Comparative studies of H₂O₂ detoxifying enzymes in green and greening barley seedlings under cadmium stress[J]. *Plant Science*, 2001, 160:1085-1093.
- [11] 莫争, 王春霞, 陈琴, 等. 重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 在水稻植株中的富集与分布[J]. 环境化学, 2002, 21(2):110-116.
- MO Zheng, WANG Chun-xia, CHEN Qin, et al. Distribution and enrichment of heavy metals of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd in paddy plant[J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(2):110-116.
- [12] 张潮海, 华村章, 邓汉龙, 等. 水稻对污染土壤中镉、铅、铜、锌的富集规律的探讨[J]. 福建农业学报, 2003, 18(3):147-150.
- ZHANG Chao-hai, HUA Cun-zhang, DENG Han-long, et al. Investigation on the enrichment of Cd, Pb, Cu and Zn by rice in the field near a smelting plant[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2003, 18(3):147-150.
- [13] 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.
- 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 J Rice Sci*, 2005, 19(3):273-279.
- [14] 柯庆明, 林文雄, 梁康逵, 等. 水稻稻米镉累积的遗传生态特性研究 [J]. 农业现代化研究, 2008, 29(3):376-378, 384.
- KE Qing-ming, LIN Wen-xiong, LIANG Kang-jing, et al. Genetic ecological properties of Cd accumulations in rice grains exposal[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, 29(3):376-378, 384.
- [15] 周启星, 吴燕玉, 熊先哲. 重金属 Cd-Zn 对水稻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.
- [16] 吴燕玉, 余国营, 王新, 等. Cd、Cu、Zn、As 复合污染对水稻的影响[J]. 农业环境保护, 1998, 17(2):49-54.
- WU Yan-yu, YU Guo-ying, WANG Xin, et al. Compound pollution of Cd, Pb, Cu, Zn and As on lowland rice[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1998, 17(2):49-54.
- [17] 居婷, 张春华, 胡延玲, 等. 水稻对镉的吸收转运与耐性的关系研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(9):3506-3508.
- JU Ting, ZHANG Chun-hua, HU Yan-ling, et al. Studies on the relationship among cadmium absorption, translocation and tolerance in rice [J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2008, 36(9):3506-3508.
- [18] 宋阿琳, 娄运生, 梁永超. 不同水稻品种对铜镉的吸收与耐性研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(9):408-411.
- SONG A-lin, LOU Yun-sheng, LIANG Yong-chao. Research on copper and cadmium uptake and tolerance in different rice varieties [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(9):408-411.
- [19] 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.
- 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.
- [20] 黄冬芬, 奚岭林, 杨立年, 等. 不同耐镉基因型水稻农艺和生理性状的比较研究[J]. 作物学报, 2008, 34(5):809-817.
- HUANG Dong-fen, XI Ling-lin, YANG Li-nian, et al. Comparisons in agronomic and physiological traits of rice genotypes differing in cadmium-tolerance[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(5):809-817.
- [21] 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.
- [22] Florijn P J, Van Beusichem M L. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines[J]. *Plant and Soil*, 1993, 150:25-32.
- [23] Florijn P J, Nelemans J A, Van Beusichem M L. Cadmium uptake by lettuce varieties[J]. *Neth J Agric Sci*, 1991, 39:103-114.
- [24] 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]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 19(1):104-107.
- [25] 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 J Agr Sci*, 2006, 22(4):331-338.
- [26] 曾 翔, 张玉烛, 王凯荣, 等. 水稻植株镉积累分配的差异 [J]. 作物研究, 2006(4):342-344.
- ZENG Xiang, ZHANG Yu-zhu, WANG Kai-rong, et al. Genotype difference in accumulation and distribution of cadmium in rice plant[J]. *Crop Research*, 2006(4):342-344.
- [27] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2002:367-386.
- Tang Q Y, Feng M G. DPS data processing system for practical statistics[M]. Beijing: Science Press, 2002:367-386.
- [28] 李铭红, 李 侠, 宋瑞生. 受污农田中农作物对重金属镉的富集特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3):675-679.
- LI Ming-hong, LI Xia, SONG Rui-sheng. Cadmium accumulation in crops grown in polluted farmlands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3):675-679.
- [29] Arao T, Ishikawa S. Genotypic differences in cadmium concentration and distribution of soybeans and rice[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2006, 40(1):21-30.
- [30] Chino M. The distribution of heavy metals in rice plants influence by the time and the path of supply[J]. *J Sci Soil Manure Jpn*, 1973, 44:204-210.
- [31] 王松良, 郑金贵. 土壤重金属污染的植物修复与金属超富集植物及其遗传工程研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1):190-194.
- WANG Song-liang, ZHENG Jin-gui. Phytoremediation for heavy metal contamination in soil, metal hyperaccumulator and their genetic engineering[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(1):190-194.
- [32] 彭少麟, 杜卫兵, 李志安. 不同生态型植物对重金属的积累及耐性研究进展[J]. 吉首大学学报: 自然科学版, 2004, 25(4):19-26.
- PENG Shao-lin, DU Wei-bing, LI Zhi-an. A review of heavy metal accumulation and tolerance by plants of different ecotype [J]. *Journal of Jishou University(Natural Science Edition)*, 2004, 25(4):19-26.
- [33] 徐燕玲, 陈能场, 徐胜光, 等. 低镉累积水稻品种的筛选方法研究——品种与类型 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7):1346-1352.
- XU Yan-ling, CHEN Neng-chang, XU Sheng-guang, et al. Breeding rice cultivars with low accumulation of cadmium; cultivars versus types [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2009, 28(7):1346-1352.
- [34] Harris N S, Taylor G J. Cadmium uptake and translocation in seedlings of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium accumulation[J]. *BMC Plant Biol*, 2004, 4(14 April 2004).
- [35] Clarke J M, McCaig T N, DePauw R M, et al. Strongfield durumwheat [J]. *Can J Plant Sci*, 2005, 85:651-655.
- [36] Grant C A, Clarke J M, Duguid S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of The Total Environment*, 2008, 390:301-310.