

我国稻田土壤镉污染现状及安全生产新措施

詹杰^{1,2}, 魏树和^{1*}, 牛荣成^{1,3}

(1.中国科学院沈阳应用生态研究所污染生态与环境工程重点实验室, 沈阳 110016; 2.辽宁职业卫生技术学院, 沈阳 110101; 3.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:水稻是我国重要的粮食作物, 由于受重金属污染威胁日益增大, 其安全生产问题备受关注。通过综述我国稻田土壤及稻米镉污染现状、镉污染土壤改良剂研究进展以及稻米对镉富集的品种间差异, 认为在土壤中镉的去除修复技术无法在短时间内实现的前提下, 镉排异型水稻品种的筛选与利用是实现其安全生产的一个新的有效措施。在此基础上, 配合一些污染土壤改良剂的使用, 会进一步增强其安全生产水平。

关键词:水稻; 重金属污染; 安全生产

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)07-1257-07

Advances of Cadmium Contaminated Paddy Soil Research and New Measure of Its Safe Production in China: A Review

ZHAN Jie^{1,2}, WEI Shu-he¹, NIU Rong-cheng^{1,3}

(1.Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2.College of Liaoning Professional Sanitation Technology, Shenyang 110101, China; 3.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Rice is the most important food crop in China. Recently, rice safe production became the key attention point due to increasing heavy metal contamination problem. This article reviewed the status of cadmium(Cd) contaminated paddy soil and rice grain in China, modifier research of Cd polluted paddy soil, and the differences of Cd accumulation in rice grain among of different cultivars. In China, Cd pollution investigation in whole rice production area was not conducted till now. Some literatures from different rice growth districts showed that some rice paddy soils have been contaminated by Cd. Accordingly, rice grains were polluted either. The main reasons were caused by improper irrigation with wastewater. In order to control and improve these contaminated paddy soils, some amendments named modifier were determined to decrease Cd bio-availabilities and increase rice grain yield by using soil pot culture or field experiment. Besides of lime, sea-form and kaolin, some organic materials showed better application potential. However, the role of modifier was limited. Too many research results showed that there were significantly differences among of different rice cultivar accumulating Cd in their grains. It suggested that the identification and application of excluder rice cultivar will be a new practical method and measure for rice safe production in Cd contaminated soil. Together with some amendments, excluder rice can normal growth and produce high quality rice even in Cd contaminated soils.

Keywords: rice; Cd pollution; safe production

我国是世界上最大的水稻生产和消费国, 水稻也是我国的第一大粮食作物, 年种植面积约 2 860 万

hm², 占全球水稻种植面积的 1/5; 我国常年水稻产量约占粮食总产量的 40%, 年产稻米 1.85 亿 t, 占世界总产量的 1/3。因此, 水稻生产在保障我国粮食安全中担当第一重任, 对确保世界粮食安全也具有举足轻重的作用^[1]。然而, 随着我国工业化进程的加速和社会经济的发展, 重金属污染问题日趋严峻, 水稻的生产受重金属镉污染的影响也日益加剧, 严重威胁着粮食生产安全^[2-3]。因此, 如何控制水稻镉污染并实现其安全生产(主要是卫生品质安全)值得关注。本文对我国稻

收稿日期: 2011-11-04

基金项目: 国家科技支撑项目(2012BAC17B04); “863”计划(2012AA06 A202); 国家自然科学基金项目(31070455, 40971184, 40930739); 中国博士后科学基金项目(20090461195, 20103626); 辽宁省自然科学基金项目(201102224)

作者简介: 詹杰(1972—), 女, 博士, 讲师。主要从事农产品安全与预防医学研究。E-mail: yaoshanyuan@yahoo.com.cn

* 通讯作者: 魏树和 E-mail: shuhewei@iae.ac.cn

田土壤及稻米镉污染现状进行了综述,对现有的镉污染稻田改良及钝化修复方法进行了归纳总结并指出其存在的弱点,在此基础上,试图从排异型水稻品种方面提出镉污染农田安全利用的新方法。

1 我国稻田土壤及稻米 Cd 污染现状

在我国,关于水稻生产受镉污染状况的大面积普查研究还未见报道,不同的学者根据不同地区的稻田土壤及稻米镉污染情况进行了相关研究。1989年就有报道表明,我国11个灌区遭受镉(Cd)污染农田面积达12 000 hm²。沈阳张士灌区一闸严重污染区土壤Cd含量高达5~7 mg·kg⁻¹,稻米Cd含量也达1~2 mg·kg⁻¹,严重超过了我国无公害稻米中重金属含量标准(NY 5115—2008)^[4]。土壤污染主要是因含工业污水灌溉造成的,Cd主要分布在土壤表层,这些污染土壤虽早已停止污灌,但Cd污染仍然存在,且有向下游扩散的趋势。王凯荣总结了我国16个工矿污染区农田土壤和稻米中Cd含量的状况,发现这些地方受Cd污染的程度已相当严重^[5]。其污染主要是因金属采矿废弃物堆放及矿山废水造成的,主要分布在矿区周围。之后,重金属尤其是Cd污染稻米事件常有报道,污染土壤的途径也主要是污灌或金属采矿及冶炼造成的。如浙江省遂昌县和温州地区曾相继出现Cd中毒事件,上述两地的糙米Cd含量分别达到1.17 mg·kg⁻¹和1.30 mg·kg⁻¹^[6]。福建省各主要稻区Cd的稻米重金属污染不容乐观,特别是Cd含量几乎均超标^[7]。刘洪莲等对太湖地区几种类型水稻土进行研究,结果表明Cd的积累速率达到0.3~3 μg·kg⁻¹·a⁻¹,年污染通量为0.8×10⁻³~10×10⁻³ kg·hm⁻²·a⁻¹,整个区域Cd的污染通量较国际上的报道偏高,说明该地区土壤环境污染较为严重^[8]。Yang等抽样调查了广东省乐昌铅锌矿周边采矿废水灌溉0.8 hm²稻田土壤及稻米中Cd的污染情况,结果表明,稻田土壤中Cd含量最大值为29.68 mg·kg⁻¹,最小值为2.01 mg·kg⁻¹,平均为13.59 mg·kg⁻¹,稻米中Cd含量平均为0.24 mg·kg⁻¹^[9]。王昌全等研究表明,成都平原(广汉、德阳、新都等)13个市(县、区)在主要耕种制度为稻-麦轮作制条件下,稻米中Cd含量超标达8.70%^[10]。Zhai等采样测定了湖南省矿业城市郴州2 415 km²稻田土壤及稻米中Cd的含量,土壤Cd含量为2.72~4.83 mg·kg⁻¹,几何平均值为1.45 mg·kg⁻¹;相应的,稻米中Cd含量为0.01~4.43 mg·kg⁻¹,平均值为0.39 mg·kg⁻¹,超标严重^[11]。甄燕红等随机抽取国内部分市场的精米样品(44个粳

米和47个粳米样品),对样品中Cd含量的测定结果表明,91个样品中Cd含量超标达10%左右^[12]。由于是市场随机取样的结果,对于稻米的准确来源无法确定,也就无法确定其污染源,但也说明一定量的Cd污染稻米是确实存在的。Sun等研究了湖南省凤凰县茶田镇汞矿周围18个稻田土壤及相应的水稻样品中Cd含量,结果表明,有4个土壤样品中Cd含量超标,Cd含量为0.53~14.91 mg·kg⁻¹,几何平均值为1.05 mg·kg⁻¹。相应的,稻米中Cd含量为0.25~0.54 mg·kg⁻¹,严重超标^[13]。Zhao等按照1:50 000比例土地使用图,采样测定了浙江省温岭地区96个稻田土壤及相应的水稻样品中Cd含量,结果表明,有4个土壤样品中Cd含量超标,Cd含量为0.11~0.45 mg·kg⁻¹,平均值为0.31 mg·kg⁻¹;相应的,稻米中Cd含量为0.002~0.467 mg·kg⁻¹,平均值为0.072 mg·kg⁻¹,部分样品超标^[14]。肖俊清等研究表明,长江三角洲地区水稻普遍遭遇了重金属元素污染,果实中Cd、Cr、Cu、Hg和Zn含量分别是背景值的3.1、2.7、1.5、1.1和1.1倍,有29.5%、5.8%、1.4%样品中的As、Cd和Pb含量超标。这一地区工矿企业密集,污染土壤多是因工业废水的不合理排放造成的^[15]。

上述这些研究虽然地域分散,在全国范围内不具有系统性、全面性,但也基本呈现出一些特点:即污染区域多分布在污灌区、金属采矿区、工业区和乡镇企业周围,在南方经济相对发达地区具有一定的普遍性,这些地区的污染土壤至今没有得到有效的控制与修复,且有污染面积继续扩大的趋势。更为严重的是,这些污染土壤绝大多数仍然在从事农业生产活动,虽然部分污染土壤转变了耕作方式,但仍然存在着一一定的环境风险。因此,上述研究也在一定程度上表明,我国水稻生产确实存在Cd污染风险,在某些地区还相当严重。有必要采用一些措施改善这种状况以确保稻米的安全生产。

2 Cd 污染稻田土壤改良剂研究

对于大面积污染农田来说,人们试图采取一些钝化方法,降低污染土壤中重金属的生物有效性,进而阻止其对农作物的污染,使一些污染程度较低的农田还可以继续安全的生产农产品。这一方法的主要原理就是通过向污染土壤中施加一些物质,以改变重金属在土壤中的存在状态,降低其在土壤中的迁移性和生物可利用性,使土壤中重金属钝化,进而减少作物对重金属的富集,从而减少重金属对作物的危害

及潜在的健康风险,施加的物质常常叫做钝化剂。然而,土壤钝化剂的施入会不同程度地改变土壤的物理、化学性质。较好的作用是在不造成土壤二次污染的同时,也能对污染土壤的一些理化性质进行改良,这类施加物质统称为土壤改良剂更具实践意义。

关于我国稻田 Cd 污染土壤改良剂及其改良效果的研究已有很多,根据改良剂的来源,大体可将改良剂分为无机型、有机型以及无机与有机混合型 3 大类。无机型改良剂方面,最常见的是一些工业用料或废料,如石灰^[16-17,20]、海泡石^[16]、 Na_2SO_4 ^[19],以及一些天然物质如高岭土^[16]。屠乃美等利用小区试验,研究了投加低中高 3 种不同剂量的石灰、钙镁磷肥、海泡石或高岭土对晚稻 V647 富集 Cd 的影响。结果表明,石灰和钙镁磷肥的作用主要是土壤 pH 值和降低土壤中 Cd 的有效性,海泡石和高岭土的改良机制主要在于通过对 Cd 的吸附作用而降低其有效性。综合来看,以钙镁磷肥中量处理和海泡石中量处理效果为最佳^[16]。宗良纲等利用土壤盆栽试验方法,设置高低 2 种施加剂量,认为硅肥的改良效果最好,其次是钙镁磷肥,然后是石灰^[17]。丁凌云等探讨了石灰、过磷酸钙和有机物料及其不同组合对盆栽污染土壤中水稻 Cd 富集的影响,认为石灰+过磷酸钙对于降低水稻体内的重金属含量效果最好^[18]。Li 等利用盆栽试验比较了 7 种施加物料(石灰、猪粪、泥碳、紫云英、硅酸钙、钙镁磷肥、 ZnSO_4)对水稻富集 Cd 的影响,其中以石灰的效果最好^[19]。上述 4 个试验中,石灰的使用最为广泛,修复效果也较好,这与其所具有的碱性条件有关。但不同学者之间的结果也有一定差异,这可能是施加量大小、土壤质地等因素造成的。此外,施加不同剂量的 Na_2SO_4 、 CaO 、 CaCO_3 、 CaSO_4 、赤泥也可以通过降低土壤中 Cd 的有效态含量以降低稻米中 Cd 含量^[20-22]。肥料的施用也具有明显的改良作用,其中磷肥和氮肥研究的较多,如钙镁磷肥^[16,20,23]以及氨态氮、硝态氮、尿素^[24,25,26]。对于硅肥的改良效果也取得了一定进展^[16]。有机型改良剂方面,研究较多是将一些有机物料粉碎后施入 Cd 污染土壤,以降低土壤中 Cd 的生物有效性,如苜蓿、稻草粉^[27]、稻草、紫云英^[28]、植物叶^[29]、油菜籽壳^[30],以及混合有机肥料或猪厩肥^[30-31]。此外,在有机酸和 EDTA 的改良作用方面也进行了一些研究^[32]。而复合型改良剂则主要是上述无机与有机改良剂的简单配制,如石灰与过磷酸钙及有机物料的混合物^[33]。在人为精细加工复配改良剂方面涉及得很少^[34]。与上述研究结果相类似,这些物料的施用一方

面提高了水稻的产量,另一方也通过降低土壤中 Cd 的有效性以降低稻米对 Cd 的富集,改良机理基本是一致的,即主要通过吸附及螯合钝化作用或提高土壤 pH 值等达到钝化土壤中的 Cd 的目的,这里不一赘述。

总的来看,在改良土壤环境方面,有机物料的效果较为突出。在土壤中 Cd 的有效性降低方面,无机物料更强一些。因此,有机与无机物料的混合使用成为当前研究的重要方向。我国虽在改良剂改良效果比较研究中取得较大进展,但在改良剂粒径对污染土壤改良效果方面涉及较少,在改良剂产业化方面进展也很缓慢,这主要是因为单纯地依靠改良剂的作用还无法达到污染土壤安全生产的要求,还需要寻找新的安全生产途径。

3 利用排异型水稻品种的安全生产思路

土壤改良剂法虽然具有操作简单、可以大面积实施以及短时间内见效快等优点,但污染土壤中的重金属毕竟还留在土壤中,一旦环境条件发生变化,被钝化了的重金属还有可能被释放出来,仍然具有潜在的环境风险。

一般来说,在得知土壤受到重金属污染后,是不能用于粮食生产的,这一点在西方发达国家执行得尤为彻底。在我国,重金属污染农田上农作物安全生产问题最初主要来自于人们在未知农田受到污染的条件下产生的。这主要是因为一方面当地人们确实不知道所种植的农田已遭到了重金属污染;另一方面,科研部门虽测知该地块受到了污染,却无法与当地农民沟通使之明了实情。这些情况就使得我国污染农田仍然在照常进行农业生产活动,所生产的粮食也就自然存在质量安全隐患。基于我国的国情,受污染农田若都不用来农业生产而改为它用也不现实。若等到污染土壤修复好后再使用,现有的修复技术在短时间内也很难实现。为此,在一定条件下种植一些排异型作物品种就成为一种较新颖也比较实际的安全生产措施。因为这种措施就算在没有污染的地块上,农产品也可以照样正常生产,适用性比传统的农业生产更为广泛。

那么,什么是排异型作物品种呢?魏树和和周启星等认为排异型作物是指能在重金属污染土壤上正常生长,植物有利用价值部位重金属的含量均较低,但是一旦土壤污染物含量超过了一定阈值,该作物的排异机理将无法继续限制污染物向有利用价值的部

位转移^[35]。与此相类似的提法还有低积累作物品种以及污染安全品种等^[36-38],其核心内容还是要求对重金属积累的含量较低,至少要低于我国无公害稻米中重金属含量标准(NY 5115—2008)。

我国水稻品种资源丰富,南方主要以籼型为主,北方主要以粳型为主。籼稻中,常规稻、三系杂交稻、二系杂交稻以及超级稻均有较大的种植面积,而粳型水稻主要以常规稻为主。不同学者主要采用小区试验和盆栽试验的方式,对不同水稻品种富集 Cd 的情况进行了研究,并发现不同品种稻米对 Cd 的富集存在着显著差异。李正文等采用小区试验的方法,对江苏、浙江和上海地区常用中粳稻的 57 个品种稻米 Cd 富集情况进行了研究,结果表明,稻米中 Cd 含量范围为 0.026~0.099 mg·kg⁻¹,变异系数达 39.4%,品种间差异显著^[39]。仲维功等采用小区试验的方法,比较了主要来自江苏省、湖南省、云南省、广东省和江西省,美国、国际水稻研究所、印度和日本的 7 份杂交稻品种,16 份常规籼稻品种,20 份常规粳稻品种精米中 Cd 含量的差异情况,除显示品种间有显著差异外,还呈现常规籼稻精米含量最高,杂交稻精米含量居中,常规稻精米含量最低的趋势^[36]。曾翔等采用土壤盆栽试验方法,以 7 个类型 46 个水稻品种为试材,发现在土壤含 Cd 量为 2 mg·kg⁻¹ 时,46 种水稻糙米含 Cd 量变化范围为 0.428~2.558 mg·kg⁻¹。7 种类型水稻糙米含 Cd 量从高到低依次为特种稻、常规早籼稻、三系杂交晚稻、两系杂交晚稻、常规晚籼稻、常规粳稻、爪哇稻^[40]。在浙江省晚粳稻主产区嘉兴、湖州、杭州、宁波、绍兴市的 6 个大田试点的 12 个晚粳稻糙米及精米中 Cd 的含量也具有显著差异^[41]。Yu 等采用土壤盆栽试验以籼型稻的 20 个常规品种和 23 个杂交种为试材,发现糙米 Cd 含量最高值和最低值相差近 6 倍,杂交稻 Cd 含量略高于常规稻^[42]。其他的学者也有类似的发现,如表 1 所示。上述研究表明,不同品种

稻米对 Cd 的富集呈现出显著的差异性,并略呈现出杂交稻富集程度高于常规稻,籼稻高于粳稻的趋势。但这种趋势因供试品种不同而有很大差异。总体上来看,确有一些水稻品种对 Cd 具有低积累性或者说是排异性,这为 Cd 污染土壤安全生产提供了新的思路,也正成为未来农业环境领域研究的一个新的方向和热点。

上述研究表明(表 1),从现有水稻品种筛选排异型品种是切实可行的,而且发现了一些具有排异型特征品种。事实上,这种品种间的差异也可能与品种间基因差异有关。如 Clarke 等认为,硬粒小麦低 Cd 积累的性状是由单基因控制的且具有较强的遗传稳定性^[49-50]。这一发现在低积累品种育种研究方面具有十分重要的意义,或许为低积累品种选育提供一条新的途径。

4 展望

确保 Cd 污染稻田水稻安全生产的最好办法当然是将污染了的稻田加以修复,修复 Cd 污染稻田土壤最理想的方式就是将 Cd 从土壤中去掉,这些方法如淋洗和植物提取修复等。然而,淋洗方法对于大面积的污染农田来说,还很难应用。利用超富集植物的超量提取作用去除污染土壤中重金属的技术虽表现出较好前景,但因其修复时间长、修复效率有限、修复植物生物量难以处理等问题,也无法大面积应用。况且,将大面积污染土壤长期闲置不用或用于植物修复也很难创造出可观的经济效益,对于我国人多地少的国情也不适宜。因此,在土壤中 Cd 的去除修复技术无法在短时间内实现的前提下,Cd 排异型水稻品种的筛选与利用是实现其安全生产的一个新的有效措施。排异型作物虽可以在一定污染水平条件下的农田上正常生长并生产了符合标准的农产品,但由于污染土壤的不均一性,在局部仍然存在因重金属含量

表 1 不同水稻品种稻米对土壤中 Cd 的积累差异研究

Table 1 Differences of Cd concentrations in grains of rice cultivars accumulating Cd from soils

品种来源(地区)	水稻亚种	试验方法	主要结果	参考文献
广东	籼型(8个常规品种,13个杂交种)	土壤盆栽试验	糙米 Cd 含量最高值和最低值相差 15 倍,常规稻和杂交稻间差异不明显	[43]
江苏	籼型(超级杂交种 II 优明 86", 常规杂交种汕优 6)	土壤盆栽试验	超级杂交种 Cd 吸收能力高于常规杂交种	[44]
江苏	籼型(17个常规品种)	小区试验	精米中 Cd 的含量差异显著,籼型略高于粳型	[45]
	粳型(14个常规品种,7个杂交种)			
浙江	籼型(138个常规品种)	小区试验	籽粒中 Cd 含量差异显著,最大值是最低值的 9 倍	[46]
四川、云南、广西	籼型(12个超级杂交种,98个常规杂交种)	小区试验	籽粒中 Cd 含量差异显著,最大值是最低值的 14 倍	[47]
东北地区	粳型(32个常规品种)	土壤盆栽试验	糙米中 Cd 含量差异显著,最大值是最低值的 10 倍	[48]

过高而导致农产品中重金属含量过高的风险。如果在使用排异型作物生产之前,施加污染土壤改良剂,不但会降低这种风险,也会进一步提高排异型作物的适用范围。因此,土壤改良剂与排异型作物的联合使用应是一种较好的选择。

参考文献

- [1] 唐绍清. 稻米蒸煮和营养品质性状的 QTL 定位[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
Tang Shao-qing. Mapping of QTL for cooking and nutrient quality traits of rice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [2] 赵雄, 李福燕, 张冬明, 等. 水稻土壤镉污染与水稻镉含量相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2236-2240.
Zhao Xiong, Li Fu-yan, Zhang Dong-min, et al. Relationship between paddy soils cadmium pollution and cadmium content in Rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11): 2236-2240.
- [3] 肖相芬, 张经廷, 周丽丽, 等. 中国水稻重金属镉与铅污染 GAP 栽培控制关键点分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(21): 130-136.
Xiao Xiang-fen, Zhang Jing-ting, Zhou Li-li, et al. Analysis on key points for controlling cadmium and lead contamination during rice production[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(21): 130-136.
- [4] 吴燕玉, 陈涛, 张学询. 沈阳张士灌区镉污染生态的研究[J]. 生态学报, 1989, 9(1): 21-26.
Wu Yan-yu, Chen Tao, Zhang Xue-xun. Pollution ecology of Cd in the Zhangshi irrigation area of Shenyang[J]. *ACTA Ecologica Sinica*, 1989, 9(1): 21-26.
- [5] 王凯荣, 郭焱, 何电源, 等. 重金属污染对稻米品质的影响的研究[J]. 农业环境保护, 1993, 12(6): 254-257.
Wang Kai-rong, Guo yan, He Dian-yuan. Studies on the influences of heavy metal pollution on the qualities of brown rice[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1993, 12(6): 254-257.
- [6] 胡培松. 土壤有毒重金属镉毒害及镉低积累型水稻筛选与改良[J]. 中国稻米, 2004, 2: 10-12.
Hu Pei-song. Cd toxic in soil and low accumulation rice screening and improving[J]. *China Rice*, 2004, 2: 10-12.
- [7] 肖美秀, 梁义元, 梁康迳, 等. 水稻重金属污染及其控制技术的研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2005, 1(3): 40-43.
Xiao Mei-xiu, Liang Yi-yuan, Liang Kang-jing, et al. Advance in research on pollution of heavy metals in rice and its control technology[J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2005, 1(3): 40-43.
- [8] 刘洪莲, 李艳慧, 李恋卿, 等. 太湖地区某地农田土壤及农产品中重金属污染及风险评价[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 60-63.
Liu Hong-lian, Li Yan-hui, Li Lian-qing, et al. Pollution and risk evaluation of heavy metals in soil and agro-products from an area in the Taihu Lake region[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(5): 60-63.
- [9] Yang Q W, Lan C Y, Wang H B, et al. Cadmium in soil-rice system and health risk associated with the use of untreated mining wastewater for irrigation in Lechang, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 84: 147-152.
- [10] 王昌全, 代天飞, 李冰, 等. 稻麦轮作下水稻土重金属形态特征及其生物有效性[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 890-897.
Wang Chang-quan, Dai Tian-fei, Li Bing, et al. The speciation and bioavailability of heavy metals in paddy soils under the rice-wheat cultivation rotation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 890-897.
- [11] Zhai L M, Liao X Y, Chen T B, et al. Regional assessment of cadmium pollution in agricultural lands and the potential health risk related to intensive mining activities: A case study in Chenzhou City, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20: 696-703.
- [12] 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, 8(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, 8(1): 119-122.
- [13] Sun H F, Li Y H, Ji Y F, et al. Environmental contamination and health hazard of lead and cadmium around Chatian mercury mining deposit in western Hunan Province, China[J]. *Trans Nonferrous Metal Social, China*, 2010, 20: 308-314.
- [14] Zhao K L, Liu X M, Xu J M, et al. Heavy metal contaminations in a soil-rice system: Identification of spatial dependence in relation to soil properties of paddy fields[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181: 778-787.
- [15] 肖俊清, 袁旭音, 李继洲. 长江三角洲地区土壤和水稻重金属污染特征研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(19): 10206-10208.
Xiao Jun-qing, Yuan Xu-yin, Li Ji-zhou. Characteristics of heavy metal pollution in soil and rice of Yangtze River delta region[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(19): 10206-10208.
- [16] 屠乃美, 郑华, 邹永, 等. 不同改良剂对铅镉污染稻田的改良效应研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(6): 324-326.
Tu Naimei, Zheng Hua, Zou Yong, et al. Effects of different modifier oil rice growth and Pb & Cd contents of rice and soil in Pb-Cd-contaminated paddy field [J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(6): 324-326.
- [17] 宗良纲, 张丽娜, 孙静克, 等. 3种改良剂对不同土壤-水稻系统中 Cd 行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 834-840.
Zong Liang-gang, Zhang Li-na, Sun Jing-ke, et al. Effects of three amendments on behaviors of cadmium in different soil-rice system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 834-840.
- [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. 生态环境, 2006, 15(6): 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] Fan J L, Hu Z Y, Ziadi N, et al. Excessive sulfur supply reduces cadmium accumulation in brown rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158: 409-415.
- [20] Li P, Wang X X, Zhang T L, et al. Effects of several amendments on

- rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20: 449-455.
- [21] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 不同类型钙化合物对污染土壤水稻吸收累积 Cd Pb 的影响及机理[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):78-84.
LIU Zhao-bing, Ji Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effects of calcium compounds on uptake and accumulation of Cd and Pb by rice and its mechanism in polluted soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):78-84.
- [22] 刘昭兵, 纪雄辉, 王国祥, 等. 赤泥对 Cd 污染稻田水稻生长及吸收累积 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4):692-697.
Liu Zhao-bing, Ji Xiong-hui, Wang Guo-xiang et al. Effects of red-mud on rice growth and cadmium uptake in cadmium polluted soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4):692-697.
- [23] 张良运, 李恋卿, 潘根兴, 等. 磷、锌肥处理对降低污染稻田水稻籽粒 Cd 含量的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3):909-913.
Zhang Liang-yun, Li Lian-qing, Pan Gen-xing, et al. Effects of phosphorus and foliar zinc fertilizers on reducing grain Cd concentration of rice grown in a polluted paddy[J]. *Ecology and Environment*, 2009, 18(3):909-913.
- [24] Mohamed A J, Chen J H, Zhen F R, et al. Effect of different N fertilizer forms on antioxidant capacity and grain yield of rice growing under Cd stress[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162:1081-1085.
- [25] Du Q, Chen M X, Zhou R, et al. Cd Toxicity and accumulation in rice plants vary with soil nitrogen status and their genotypic difference can be partly attributed to nitrogen uptake capacity[J]. *Rice Science*, 2009, 16(4): 283-291.
- [26] 滕斌, 李之林, 肖立中, 等. 施氮水平对优质稻产量、品质及稻米 Hg、As、Cd 含量的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(7):30-33.
Teng Bin, Li Zhi-lin, Xiao Li-zhong, et al. Effects of nitrogen application level on yield, quality, and Hg, As, Cd concentrations in grains of high quality rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(7): 30-33.
- [27] 葛滢, 黄丹丹, 周权锁. 添加有机物料对淹水土壤 Cd 活性的影响机制 [J]. 中国环境科学, 2009, 29(10):1093-1099.
Ge ying, Huang Dan-dan, Zhou Quan-suo, et al. Influence of organic material addition on the variation of Cd activity in submerged soils[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(10):1093-1099.
- [28] 高山, 陈建斌, 王果. 有机物料对稻作与非稻作土壤外源镉形态的影响研究 [J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1):95-98.
Gao Shan, Chen Jian-bin, Wang Guo. Effects of organic matter on the forms of added Cd and its dynamic transformation in soil with or without growth of rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(1): 95-98.
- [29] Liu C P, Li F B, Luo C L, et al. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161: 1466-1472.
- [30] Wu U L, Lin D Y, Su D C. The effect of planting oilseed rape and compost application on heavy metal forms in soil and Cd and Pb uptake in rice[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(2):267-274.
- [31] 王凯荣, 张玉焯, 胡荣桂. 不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 476-481.
Wang Kai-rong, Zhang Yu-zhu, Hu Rong-gui. Effects of different types of soil amelioration materials on reducing concentrations of Pb and Cd in brown rice in heavy metal polluted paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):476-481.
- [32] Xu W H, Li Y R, He J P, et al. Cd uptake in rice cultivars treated with organic acids and EDTA[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(3): 441-447
- [33] 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(6):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.
- [34] 龚海军, 刘昭兵, 纪雄辉, 等. 新型土壤改良剂对水稻吸收累积 Cd、Pb 的影响初探[J]. 湖南农业科学, 2010, 5:50-53.
Gong Hai-jun, Liu Zhao-bing, Ji Xiong-hui, et al. Effect of new soil amendment on absorption and accumulation of Cd and Pb by rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2010, 5:50-53.
- [35] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
Zhou Qi-xing, Song Yu-fang. Principal and method of remediating contaminated soil [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [36] 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 rice cultivars and their organs distribution of Pb, Cd, Hg and As in (*Oryza sativa* L.)[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 22(4):331-338.
- [37] Chen F, Dong J, Wang F, et al. Identification of barley genotypes with low grain Cd accumulation and its interaction with four microelements [J]. *Chemosphere*, 2007, 67: 2082-2088.
- [38] 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(2-3): 301-310.
- [39] 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入风险 [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.
- [40] 曾翔, 张玉焯, 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, 83.
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, 83.
- [41] 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, Cr, Cd, Ni and Pb

- concentrations in the grains of Japonica rice[J]. *ACTA Agronomica Sinica*, 2006, 32(4):573-579.
- [42] Yu H, Wang J L, Fang Wei, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370: 302-309.
- [43] 陈志德, 仲维功, 杨杰, 等. 不同水稻品种在 Cd、As 和 Hg 胁迫下的吸收积累特性[J]. 中国农学通报, 2008, 24(2):389-393.
Chen Zhi-de, Zhong Wei-gong, Yang Jie, et al. Response characteristics of different rice cultivars under Cd, As and Hg stress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(2):389-393.
- [44] 成颜君, 龚伟群, 李恋卿, 等. 2 种杂交水稻对 2 种不同土壤中 Cd 吸收与分配的比较[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5):1895-1900.
Cheng Yan-jun, Gong Wei-qun, Li Lian-qing, et al. Comparison of Cd uptake and partitioning in plant tissues by two hybrid rice grown in two contrasting paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5):1895-1900.
- [45] Zeng F R, Mao Y, Cheng W, et al. Genotypic and environmental variation in chromium, cadmium and lead concentrations in rice[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 153: 309-314.
- [46] Shi J, Li L Q, Pan G X. Variation of grain Cd and Zn concentrations of 110 hybrid rice cultivars grown in a low-Cd paddy soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21: 168-172.
- [47] 殷敬峰, 李华兴, 卢维盛, 等. 不同品种水稻糙米对 Cd Cu Zn 积累特性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5):844-851.
Yin Jing-feng, Li Hua-xing, Lu Wei-sheng, et al. Variations of Cd, Cu, Zn accumulation among rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):844-851.
- [48] 刘侯俊, 梁吉哲, 韩晓日, 等. 东北地区不同水稻品种对 Cd 的累积特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):220-227.
Liu Hou-jun, Liang Ji-zhe, Han Xiao-ri, et al. Accumulation and distribution of cadmium in different rice cultivars of Northeastern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):220-227.
- [49] Clarke J M, Depauw R M, Thiessen L L. Registration of five pairs of durum wheat genetic stocks near: Isogenic for cadmium concentration[J]. *Crop Science*, 1997, 37:297.
- [50] Clarke J M, Norvell W A, Clarke F R, et al. Concentration of cadmium and other elements in the grain of near-isogenic durum lines[J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2002, 82:27-33.