

郭书海, 吴 波, 李凤梅, 等. 农产品重金属含量超标风险协同管控研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2245-2249.

GUO Shu-hai, WU Bo, LI Feng-mei, et al. Risk control of heavy metal content in agricultural products[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12): 2245-2249.

# 农产品重金属含量超标风险协同管控研究

郭书海<sup>1</sup>, 吴 波<sup>1</sup>, 李凤梅<sup>1</sup>, 迟光宇<sup>1</sup>, 李玉浸<sup>2</sup>

(1.中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

**摘 要:**我国农产品质量安全问题日益严峻,特别是重金属超标风险尤为突出。综合考虑土壤环境质量与农作物环境响应特性对农产品重金属超标的双重影响,基于农产品品种对重金属吸收/积累特性的差异性分析,阐明了农作物品种优选对农产品质量安全保障作用,提出了在农作物品种审定中增加对重金属的吸收/积累系数指标,建立国家层面的农作物吸收/积累重金属数据系统,探索农产品重金属超标风险的协同管控途径。

**关键词:**风险管控; 品种审定; 重金属; 农产品; 土壤; 吸收; 积累

中图分类号:X56 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)12-2245-05 doi:10.11654/jaes.2016-1132

## Risk control of heavy metal content in agricultural products

GUO Shu-hai<sup>1</sup>, WU Bo<sup>1</sup>, LI Feng-mei<sup>1</sup>, CHI Guang-yu<sup>1</sup>, LI Yu-jin<sup>2</sup>

(1.Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** The quality and safety of agricultural products in China were serious. Risk of heavy metal content in agricultural products was a prominent problem. Based on the soil and agricultural products' influence on heavy metal content in agricultural products, the difference of heavy metal concentrations in various crops were analyzed. It illustrated that selection of agricultural product is important for safety of agricultural products quality. This paper presented the methods of risk control, including addition of absorption/accumulation coefficient, the national coefficient database, and integrated management of soil-agricultural products.

**Keywords:** risk control; variety approval; heavy metal; agricultural products; soil; absorption; accumulation

目前,我国农产品质量安全问题日益严峻,特别是重金属超标风险尤为突出。2002年农业部对全国市场稻米的安全性抽检结果显示,稻米重金属超标率超过10%。2008年甄燕红等<sup>[1]</sup>研究结果表明,我国部分市售大米镉超标率达10%。2006年国家正式颁布《中华人民共和国农产品质量安全法》,将农产品质量管理纳入法制化轨道,但截至2013年,全国每年重金属超标粮食依旧远超1000万t,直接影响到人类健康与社会稳定。农产品重金属超标主要有两方面原因,

一是种植农作物的土壤环境质量差,二是部分农作物或品种对重金属的吸收/积累多。2014年,环保部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染调查公报》显示,我国耕地土壤污染物超标点位为19.4%<sup>[2]</sup>,以重金属污染为主,并且集中在中南、西南等高背景值地区和有色金属矿区<sup>[2-3]</sup>,与农产品超标频发区高度吻合。因此,土壤环境质量是农产品超标的重要外因。但大量农产品质量跟踪调查结果也表明,不同种类和品种的农作物对重金属的吸收/积累存在较大差异<sup>[4-5]</sup>,即农作物环境响应特性是农产品超标的重要内因。

由此可见,防治农产品重金属超标,不仅要监管土壤环境质量,还需重视农作物环境响应特性。本文通过农产品品种对重金属吸收/积累特性的差异性分

收稿日期:2016-09-02

基金项目:国家科技支撑计划课题(2015BAD05B03)

作者简介:郭书海(1964—),男,辽宁沈阳人,研究员,从事污染土壤及农产品风险控制研究。E-mail: shuhaiguo@iae.ac.cn

析,阐明了农作物品种优选对农产品质量安全保障作用,提出了在农作物品种审定中增加对重金属的吸收/积累系数指标,在国家层面建立农作物吸收/积累重金属数据系统,开展土壤和农作物双因素统筹管理等农产品重金属超标风险协同管控途径。

### 1 农作物品种间重金属吸收/积累特性的差别

#### 1.1 不同种类农作物对重金属吸收/积累的差异显著

不同种类农作物对重金属吸收/积累的生理机制不尽相同,导致吸收/积累量差异较大,表现为低、中、高三种程度<sup>[6]</sup>。以农作物对镉的吸收/积累量来区分,整体而言:豆科(大豆、菜豆、豌豆)表现为低吸收/积累,禾本科(水稻、大麦、小麦、玉米、高粱等)表现为中吸收/积累,十字花科(油菜、白菜、萝卜、芜菁等)、茄科(番茄、马铃薯、茄子)、菊科(莴苣)等表现为高吸收/积累。这是由于十字花科和茄科的农作物可食部分为根茎,研究表明一般农作物的根茎对镉的吸收/积累量均显著高于其籽实部分<sup>[7-8]</sup>。

根据文献及报道,对比分析了大宗农产品中水稻、小麦、大豆、玉米、油菜、茄子等可食部分对土壤中

镉的积累系数<sup>[9-19]</sup>,详见表 1。虽然文献资料中研究的地域分散,但结果所反应的趋势相似,即积累系数大小依次为油菜>水稻>大豆>小麦>玉米,与以往相关研究的结论基本一致。由此可见,农作物种类对土壤中的重金属吸收/积累影响显著。

#### 1.2 同类农作物中不同品种对重金属的吸收/积累有所不同

相同种类、不同品种的农作物对重金属的吸收/积累特征大多相近,但一些品种间存在较大差异。以目前社会关注的稻米镉超标现象为例,研究表明<sup>[17]</sup>,我国 14 个水稻主要产地,19 种当地主要水稻品种对土壤中镉吸收/积累能力存在显著差异,籽粒中镉的积累系数相差 1 倍以上。

根据文献及报道,相同地区的早稻与晚稻、杂交稻与常规稻、高产稻与低产稻等不同品种对土壤环境的响应存在显著差异<sup>[16,20-24]</sup>,详见表 2。不同品种水稻籽实镉吸收/积累能力大小分别为:早稻>晚稻;杂交稻>常规稻;高产稻>低产稻。

#### 1.3 低吸收/积累品种筛选工作成效日趋显现

随着我国对农产品重金属超标问题的日益重视,

表 1 不同种类农作物可食部分对土壤中 Cd 的积累差异  
Table 1 Difference of Cd concentrations in various crops accumulating Cd from soils

| 农作物种类<br>Crop varieties | 样品量/个<br>Sample size | 试验地区<br>Region | 试验方法<br>Test method | 积累系数(可食部分)<br>Accumulation coefficient | 参考文献<br>Reference |
|-------------------------|----------------------|----------------|---------------------|----------------------------------------|-------------------|
| 玉米                      | 21                   | 四川遂宁           | 田间试验                | 0.014 6(籽实)                            | [9]               |
| 玉米                      | 14                   | 辽宁葫芦岛          | 田间试验                | 0.041 6(籽实)                            | [10]              |
| 小麦                      | 22                   | 河南新乡           | 田间试验                | 0.159 7(籽实)                            | [11]              |
| 小麦                      | 24                   | 天津污灌区          | 田间试验                | 0.135 0(籽实)                            | [12]              |
| 大豆                      | 10                   | 广东韶关           | 盆栽试验                | 0.031 3(籽实)                            | [13]              |
| 大豆                      | 15                   | 北京昌平           | 盆栽试验                | 0.254 0(籽实)                            | [14]              |
| 大豆                      | 11                   | 辽宁沈阳           | 盆栽试验                | 0.230 0(籽实)                            | [15]              |
| 水稻                      | 60                   | 江苏里下河          | 盆栽试验                | 0.356 0(籽实)                            | [16]              |
| 水稻                      | 10                   | 江苏南京           | 田间试验                | 0.320 0(籽实)                            | [17]              |
| 油菜                      | 46                   | 四川成都           | 田间试验                | 2.172 0(茎叶)                            | [18]              |
| 油菜                      | 16                   | 湖北大冶           | 田间试验                | 40.230(茎叶)                             | [19]              |

表 2 不同水稻品种稻米对土壤中 Cd 的积累差异  
Table 2 Difference of Cd concentrations in grains of rice cultivars accumulating Cd from soils

| 研究区域<br>Region | 水稻品种(数量)<br>Rice varieties (sample size) | 籽实镉积累量变异系数/%<br>Coefficient of variation of Cd accumulation in grain | 参考文献<br>Reference |
|----------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 江苏             | 两系杂交稻(3 种)、三系杂交稻(3 种)                    | 12.5                                                                 | [16]              |
| 广东             | 杂交稻(3 种)                                 | 55.3                                                                 | [20]              |
| 湖南             | 杂交稻(4 种)、常规稻(5 种)                        | 25.2                                                                 | [21]              |
| 四川             | 常规稻(10 种)                                | 87.4                                                                 | [22]              |
| 广西             | 杂交稻(7 种)、超级杂交稻(1 种)、常规稻(2 种)             | 30.5                                                                 | [23]              |

低吸收/积累农作物的筛选逐渐成为科技界的研究热点<sup>[24-25]</sup>。国内许多科研院所和大专院校,选择典型农作物种类和品种,开展了重金属吸收/积累特性的筛查和对比试验。大量研究结果表明,种植重金属低吸收/积累的品种,可有效降低农产品重金属超标率<sup>[26-32]</sup>,有利于重金属超标农产品产地的安全生产。据不完全统计<sup>[24-32]</sup>,目前我国科研工作者已经从 35 种农作物中,筛选出 170 个低吸收/积累品种,为建立农作物吸收/积累重金属的指标体系、协同管控农产品超标风险奠定了基础。

## 2 农作物品种优选有利于农产品质量安全保障

### 2.1 优选作物品种可降低农产品重金属超标风险

我国北方地区降水较少,20 世纪 60 年代开始实施污水灌溉,形成了大面积的重金属超标污灌区<sup>[33-35]</sup>。沈阳西部污灌区的试验结果表明,玉米较水稻对镉的籽实吸收率减少 80%,推行水改旱的种植方式后,轻度污染耕地上种植的玉米籽粒重金属含量全部达标,实现受污染耕地的合理利用和农产品质量安全保障。

在我国中南、西南等高背景值和酸性土壤区,稻米镉超标问题比较突出<sup>[20-21,23]</sup>。但研究结果表明<sup>[36]</sup>,优选的低积累水稻品种对镉的亲合力远低于水稻作物的平均水平。因此,选种适宜的水稻品种,可减少籽粒中的镉含量,降低农产品质量安全风险。

### 2.2 优选作物品种可有效管控重金属超标问题

选择重金属低吸收/积累品种,控制影响农产品质量安全的内在因素,是农业规范化生产过程的重要环节,也是保障重金属污染/超标区农用地安全利用的有效途径。尤其在高风险农业区,通过农作物品种的适宜性选择,再配合重金属钝化、灌水调控等技术和手段,可最大限度保障区域性农产品质量安全。因此,核定重金属吸收/积累系数、选择适宜性品种是农产品质量安全的重要保障之一。

## 3 农产品重金属超标风险协同管控途径

### 3.1 在农作物品种审定中增加对重金属的吸收/积累系数指标

目前,农作物品种审定包括品种来源、特征特性、产量表现、产品质量、抗性表现、栽培要点、适宜种植地区等描述性与量化指标<sup>[37]</sup>,突出品种的丰产性、稳产性、适应性、抗逆性和品质等农艺性状,以及 DNA 指纹和转基因等遗传特性。在今后农作物品种审定中,应增加农作物对重金属的吸收/积累系数这一量

化指标。对种植面积大的已审定品种,也应逐渐补充复测,量化农作物品种的环境响应特征。

### 3.2 建立国家层面的农作物吸收/积累重金属数据系统

总结近年来低吸收/积累重金属农作物品种的筛选经验,建立检测流程和技术规范,审核认定专业化检测机构,保证全国性数据的一致性和可靠性。以农作物品种审定为起始点,以 DNA 分类分级鉴定为基础,对大宗农作物进行主要有毒有害重金属的吸收/积累率检测分析,获得农作物在各个生长阶段中不同部位的重金属含量,筛选稳定型低积累农作物,建立农作物吸收/积累重金属数据系统。

### 3.3 基于土壤和农作物双因素的风险协同管控

在土壤环境质量方面,环境保护部<sup>[3]</sup>、国土资源部<sup>[38]</sup>和农业部<sup>[39]</sup>等部门经过多年调查,已经掌握了土壤环境质量基本状况,初步形成了不同尺度的土壤重金属含量数据系统。建议统筹考虑农作物吸收/积累重金属特性和土壤重金属含量状况两个方面的因素,开展针对不同土壤理化性质、不同土壤环境质量的农作物种植适宜性评估与等级划分,优选可规避风险的种植品种,制定分类、分区的种植规划,开展典型区的协同管控技术示范,完善农产品的质量安全保障体系。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国土资源部.全国土壤污染现状调查公报[EB/OL].[2014-04-17].[http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417\\_270670.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm) Ministry of Environmental Protection of PRC, Ministry of Land and Resources of PRC. Bulletin of national survey of soil pollution[EB/OL].[2014-04-17].[http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417\\_270670.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm)
- [3] 张小敏,张秀英,钟太洋,等.中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J].环境科学,2014,35(2):692-703. ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2014, 35(2):692-703.
- [4] Arthur E, Crews H, Morgan C. Optimizing plant genetic strategies for minimizing environmental contamination in the food chain[J]. International Journal of Phytoremediation, 2000, 2(1):1-21.
- [5] 陆美斌,陈志军,李为喜,等.中国两大优势产区小麦重金属镉含量调查与膳食暴露评估[J].中国农业科学,2015,48(19):3866-3876.

- LU Mei-bin, CHEN Zhi-jun, LI Wei-xi, et al. Survey and dietary exposure assessment of cadmium in wheat from two main wheat-producing regions in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(19):3866-3876.
- [6] 章金鸿, 李玫. 植物对金属镉的吸收、分配及其影响因素[J]. *广州环境科学*, 1999, 14(3):28-32.
- ZHANG Jin-hong, LI Mei. The absorption and allocation of cadmium in plants and the influence factor[J]. *Guangzhou Huanjing Kexue*, 1999, 14(3):28-32.
- [7] Tarley C R T, Arruda M A Z. Biosorption of heavy metals using rice milling by-products. Characterisation and application for removal of metals from aqueous effluents[J]. *Chemosphere*, 2003, 54(7):987-995.
- [8] 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.
- [9] 吴传星. 不同玉米品种对重金属吸收累积特性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2010.
- WU Chuan-xing. Study on characteristics of heavy metal absorption and accumulation in the different maize varieties[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2010.
- [10] 李静, 依艳丽, 李亮亮, 等. 几种重金属(Cd、Pb、Cu、Zn)在玉米植株不同器官中的分布特征[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(4):244-247.
- LI Jing, YI Yan-li, LI Liang-liang, et al. Distribution of heavy metal (Cd, Pb, Cu, Zn) in different organs of maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(4):244-247.
- [11] 邵云, 姜丽娜, 李向力, 等. 五种重金属在小麦植株不同器官中的分布特征[J]. *生态环境*, 2005, 14(2):204-207.
- SHAO Yun, JIANG Li-na, LI Xiang-li, et al. Distribution of five heavy metals in different organs of wheat[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2):204-207.
- [12] 王祖伟, 李宗梅, 王景刚, 等. 天津污灌区土壤重金属含量与理化性质对小麦吸收重金属的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4):1406-1410.
- WANG Zu-wei, LI Zong-mei, WANG Jing-gang, et al. Absorption to heavy metals by wheat and influencing features in sewage-irrigated soil in Tianjin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1406-1410.
- [13] 赵本行, 陈康姜, 何楚斌, 等. 大豆作物对污染土壤中重金属镉的富集研究[J]. *天津农业科学*, 2013, 19(11):15-17.
- ZHAO Ben-hang, CHEN Kang-jiang, HE Chu-bin, et al. Cadmium accumulation in soybean crops in contaminated soil[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2013, 19(11):15-17.
- [14] 赵鲁, 李旭军, 刘安辉, 等. 大豆和小麦对土壤中镉的吸收与富集研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(5):66-70.
- ZHAO Lu, LI Xu-jun, LIU An-hui, et al. Uptake and accumulation characteristics of cadmium by soybean and wheat in soil [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2013(5):66-70.
- [15] 张显龙, 于涛, 冯婧微, 等. 大豆对镉的累积特性及形态研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(2):672-673.
- ZHANG Xian-long, YU Tao, FENG Jing-wei, et al. Preliminary study on accumulation characteristics and speciation of Cd in soybean[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(2):672-673.
- [16] 赵步洪, 张洪熙, 奚岭林, 等. 杂交水稻不同器官镉浓度与累积量[J]. *中国水稻科学*, 2006, 20(3):306-312.
- ZHAO Bu-hong, ZHANG Hong-xi, XI Ling-lin, et al. Concentrations and accumulation of cadmium in different organs of hybrid rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(3):306-312.
- [17] Ye X X, Li H Y, Ma Y B, et al. The bioaccumulation of Cd in rice grains in paddy soils as affected and predicted by soil properties[J]. *J Soils Sediments*, 2014, 14:1407-1416.
- [18] 代天飞, 王昌全, 李冰. 油菜各部位对土壤中活性态重金属的累积特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊2):471-475.
- DAI Tian-fei, WANG Chang-quan, LI Bing. Accumulation characters of heavy metals at different parts of rape growing at various soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl2):471-475.
- [19] 孙清斌, 尹春芹, 邓金锋, 等. 大冶矿区周边农田土壤和油菜重金属污染特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(1):85-91.
- SUN Qing-bin, YIN Chun-qin, DENG Jin-feng, et al. Investigation on the heavy metal contamination of farmland soil and Brassica campestris nearby mining areas in Dave City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1):85-91.
- [20] Yu H Y, Ding X D, Li F B, et al. The availabilities of arsenic and cadmium in rice paddy fields from a mining area: The role of soil extractable and plant silicon[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 215(8):258-265.
- [21] Williams P N, Lei M, Sun G X, et al. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China [J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(3):637-642.
- [22] 唐刃. 四川主要水稻产区大米中铅和镉水平分析与安全评价[J]. *中国农业信息*, 2015(8):1-5.
- TANG Ren. Analysis and safety evaluation of lead and cadmium in rice in main rice production areas of Sichuan[J]. *China Agriculture Information*, 2015(8):1-5.
- [23] 张磊, 杨惟薇, 张超兰, 等. 不同水稻类型对镉的耐性、累积性与转运性质研究[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(6):2185-2188.
- ZHANG Lei, YANG Wei-wei, ZHANG Chao-lan, et al. Cadmium tolerance, accumulation and translocation between "super" rice, hybrid rice and conventional rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(6):2185-2188.
- [24] 廖芳芳, 付文婷, 王永平, 等. 镉低积累农作物筛选研究进展 [J]. *南方农业*, 2015, 9(25):58-60.
- LIAO Fang-fang, FU Wen-ting, WANG Yong-ping, et al. Research progress on screening of low accumulation of cadmium in crops[J]. *South China Agriculture*, 2015, 9(25):58-60.
- [25] 王永平, 杨万荣, 廖芳芳, 等. 镉低积累作物筛选及其与超富集植物间套作应用进展[J]. *广东农业科学*, 2015, 42(24):92-98.
- WANG Yong-ping, YANG Wan-rong, LIAO Fang-fang, et al. Advances on screening of Cd low-accumulation crops and its tercropping with hyperaccumulator[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42

- (24):92-98.
- [26] 张锡洲, 张洪江, 李廷轩, 等. 水稻镉耐性差异及镉低积累种质资源的筛选[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11):1434-1440.  
ZHANG Xi-zhou, ZHANG Hong-jiang, LI Ting-xuan, et al. Differences in Cd-tolerance of rice and screening for Cd low-accumulation rice germplasm resources[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(11):1434-1440.
- [27] 杨 刚, 吴传星, 李 艳, 等. 不同品种玉米 Hg、As 积累特性及籽粒低积累品种筛选[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6):228-232.  
YANG Gang, WU Chuan-xing, LI Yan, et al. Accumulation characteristics of Hg and As in different maize varieties and screening their cultivars via low-grain accumulation[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(6):228-232.
- [28] 智 杨, 孙 挺, 周启星, 等. 铅低积累大豆的筛选及铅对其豆中矿物营养元素的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6):1939-1945.  
ZHI Yang, SUN Ting, ZHOU Qi-xing, et al. Identification of Chinese soybean cultivars with low lead accumulation and the effect of lead on their mineral ion complement[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(6):1939-1945.
- [29] 黄志亮. 镉低积累蔬菜品种筛选及其镉积累与生理生化特性研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.  
HUANG Zhi-liang. Screening of low Cd-accumulation vegetable cultivars and research on it's properties of Cd-accumulation and physiology [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [30] 张 楠. 低积累型水稻品种的筛选及其配套阻控技术初探[D]. 浙江:浙江大学, 2015.  
ZHANG Nan. A preliminary study on screening for low accumulation-type rice cultivars and forming a set of controlling technology [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2015.
- [31] 廖柳芳, 许 超, 廖育林, 等. 铅低积累作物及其低积累的生理机制研究进展[J]. 湖南农业科学, 2011(23):42-44.  
LIAO Liu-fang, XU Chao, LIAO Yu-lin, et al. Advances in low lead accumulation crops and its physiological mechanism[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011(23):42-44.
- [32] 孙洪欣. 府河污灌区农田镉铅含量调查及其低积累作物品种筛选[D]. 保定:河北农业大学, 2015.  
SUN Hong-xin. Investigation of Cd, Pb concentrations in soil-crops and screen of cultivars of wheat/maize with low Cd and Pb accumulation in the sewage irrigation farmlands along Fuhe River[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2015.
- [33] 吴燕玉, 张学询, 陈 涛, 等. 论张士污水灌区的重金属环境容量[J]. 生态学报, 1981, 1(3):275-282.  
WU Yan-yu, ZHANG Xue-xun, CHEN Tao, et al. The maximum amount of heavy metals applied to soil in Zhangshi wastewater irrigation area[J]. Acta Ecologica Sinica, 1981, 1(3):275-282.
- [34] 徐晟徽, 郭书海, 胡筱敏, 等. 沈阳张士灌区重金属污染再评价及镉的形态分析[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9):2144-2148.  
XU Sheng-hui, GUO Shu-hai, HU Xiao-min, et al. Revaluation of soil heavy metals pollution in Zhangshi irrigation area of Shenyang and analysis of Cd forms in soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(9):2144-2148.
- [35] 梁彦秋, 潘 伟, 刘婷婷, 等. 沈阳张士污灌区土壤重金属元素形态分析[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(2):43-45.  
LIANG Yan-qiu, PAN Wei, LIU Ting-ting, et al. Speciation of heavy metals in soil from Zhangshi soil of Shenyang contaminated by industrial wastewater[J]. Environmental Science and Management, 2006, 31(2):43-45.
- [36] 于 辉, 杨中艺, 向佐湘, 等. 两种不同镉积累类型水稻糙米中镉的存在形态[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010, 49(1):85-89.  
YU Hui, YANG Zhong-yi, XIANG Zuo-xiang, et al. Existing forms of cadmium in brown rice(*Oryza sativa* L.) of two cultivars differing in Cd accumulation[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2010, 49(1):85-89.
- [37] 中华人民共和国农业部. 主要农作物品种审定办法[S]. 北京:中华人民共和国农业部, 2016.  
Ministry of Agriculture of PRC. Methods for the validation of main crop varieties[S]. Beijing: Ministry of Agriculture of PRC, 2016.
- [38] 中华人民共和国国土资源部, 中华人民共和国国家统计局, 国务院第二次全国土地调查领导小组办公室. 关于第二次全国土地调查主要数据成果的公报[EB/OL].[2013-12-30]. [http://www.mlr.gov.cn/zwgk/zytz/201312/t20131230\\_1298865.htm](http://www.mlr.gov.cn/zwgk/zytz/201312/t20131230_1298865.htm)  
Ministry of Land and Resources of PRC, National Bureau of Statistics of PRC, Office of the Leading Group for the Second National Land Survey of the State Council. Bulletin of the second national land survey on the main results and data[EB/OL].[2013-12-30]. [http://www.mlr.gov.cn/zwgk/zytz/201312/t20131230\\_1298865.htm](http://www.mlr.gov.cn/zwgk/zytz/201312/t20131230_1298865.htm)
- [39] 师荣光, 刘凤枝, 王跃华, 等. 农产品产地禁产区划分中存在的问题与对策研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):425-429.  
SHI Rong-guang, LIU Feng-zhi, WANG Yue-hua, et al. The status and related countermeasures for the division of non-producing areas in agricultural producing areas[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(2):425-429.