

# 农田重金属污染对作物的影响及其调控

王志刚 林海 庞乾林

(中国水稻研究所, 杭州 310006)

**摘要:**介绍了我国农田重金属污染的现状,分析了重金属污染对作物的影响以及影响作物对重金属吸收的主要因素,在此基础上,探讨了减轻作物重金属污染的调控措施。

**关键词:**作物;重金属污染;调控

**中图分类号:**S511 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-8082(2018)03-0039-05

重金属是指密度大于  $4.5 \text{ g/cm}^3$  的金属元素,主要包括铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)、铬(Cr)、类金属砷(As)等<sup>[1-2]</sup>。重金属污染指由重金属或其化合物造成的环境污染,主要由采矿、废气排放、污水灌溉和使用重金属超标制品等人为因素所致。农作物重金属污染直接影响农业生产、粮食安全,危及人类生存环境,已经成为当今世界面临的重大生态环境问题之一。农田重金属污染本身具有较强的隐蔽性,且重金属毒性大、化学行为和生态效应复杂,在土壤中存留时间长,可经农作物吸收、代谢进入食物链,或迁移进入水体、大气环境,对人类生存和可持续发展都已构成极大威胁。由于农田重金属污染对生态环境与食品安全的破坏及其对农业发展的制约,已成为环境科学等相关领域广泛关注、重点研究的热点问题。

## 1 农业重金属污染的现状

据研究,人体摄入的Cd有90%以上来源于食物,摄入的Pb有50%~90%来源于食物,其中绝大部分来源于粮食和蔬菜,且水稻易受重金属毒害,稻米是人和动物摄取重金属的主要途径<sup>[3]</sup>。有关文件和专家预测显示,目前全国耕种土地面积的10%以上已受重金属污染,共约1 000万 $\text{hm}^2$ ;每年因重金属污染的粮食高达1 200万t,造成的直接经济损失超过200亿元;因污水灌溉而污染的耕地有216.7万 $\text{hm}^2$ ;因固体废弃物堆存而占地和毁田的约有13.4万 $\text{hm}^2$ ,其中多数集中在经济较发达地区<sup>[4-6]</sup>。2002年,农业部稻米及制品质量监督检验测试中心曾对全国市场稻米进行安全性抽检,结果显示,铅超标率为28.4%,镉超标率为10.3%。有研究认为,我国农药使用量达130万t,是世界平均水平的2.5倍,化肥和农药的实际利用率不到30%<sup>[7]</sup>。另据云南农业大学测算,我国每年大量使用的农药仅有

0.1%左右可以作用于目标病虫,99.9%的农药则进入生态系统,造成大量土壤重金属、激素的有机污染。

## 2 农田重金属污染的来源与特点

### 2.1 重金属污染的来源

农田重金属污染的来源主要有两个方面,一个是自然来源,另一个是人为干扰输入。自然来源中,主要包括成土母质的风化过程对土壤重金属本底含量的影响,以及大气沉降、风力和水力搬运的自然物理和化学迁移过程。人为活动方面,主要包括工矿企业生产及不规范处理,使用重金属含量高的农药、化肥、农膜、污水灌溉,以及汽车尾气等。

王美等<sup>[8]</sup>研究认为,通常过磷酸钙中锌(Zn)、铜(Cu)、镉(Cd)、铅(Pb)含量高于氮肥、钾肥和三元复合肥,有机-无机复混肥料中的Pb含量高于其他化肥。有机肥如畜禽粪便、污泥及其堆肥中的重金属含量高于化肥,猪粪中的Cu、Zn、砷(As)、Cd含量明显高于其他有机废弃物,鸡粪中铬(Cr)含量高,污泥和垃圾堆肥中Pb或汞(Hg)含量高。

### 2.2 重金属污染的特点

目前,受人类活动的影响,土壤重金属污染日趋普遍,受污染的地区和面积越来越多。土壤重金属污染具有潜伏期长、危害大、高毒性、难降解、可移动性差、易积累和不易被人们察觉的特点,而且重金属一旦形成污染,就不易从环境中去除,具有较强的顽固性<sup>[9-10]</sup>。通常情况,不经过专业的检测,人们很难从感官上来判断土壤是否重金属超标。与大气和水体中的重金属污染

收稿日期:2018-04-23

**基金项目:**中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2017RG007-3)

相比,重金属污染物质在土壤中较难迁移,土壤一旦被重金属污染,很难恢复,重金属对土壤的污染是一个不可逆的过程。

### 2.3 土壤和作物中重金属的存在形态

Tessier 等<sup>[11]</sup>将沉积物或土壤中金属元素的形态分为 5 种:可交换态、碳酸盐结合态、铁-锰氧化物结合态、有机物结合态和残渣态。这种分类法的应用较为广泛。Gambrell<sup>[12]</sup>认为,土壤和沉积物中的重金属存在 7 种形态,即:水溶态、易交换态、无机化合物沉淀态、大分子腐殖质结合态、氢氧化物沉淀吸收态或吸附态、硫化物沉淀态和残渣态。Sauman<sup>[13]</sup>将其分为 8 种形态:交换态、水溶态、碳酸盐结合态、松结合有机态、氧化锰结合态、紧密结合有机态、无定形氧化铁结合态和硅酸盐矿物态。

植物中的重金属形态根据重金属在不同提取剂中的溶解度差异,可分为:乙醇提取态,提取以硝酸盐、氯化物为主的无机盐以及氨基盐等;去离子水提取态,提取水溶性有机酸盐、重金属的一代磷酸盐等;氯化钠提取态,提取果胶酸盐、与蛋白质结合态或呈吸着态的重金属等;醋酸提取态,提取难溶于水的重金属磷酸盐,包括二代磷酸盐、亚磷酸盐等;盐酸提取态,提取草酸盐等<sup>[14]</sup>。

## 3 重金属污染对作物的影响

### 3.1 对作物生长发育的影响

有研究表明,植物体受到一定浓度的重金属胁迫后,会出现生长迟缓、植株矮小、叶片失绿等现象,植物细胞质膜的选择透性、组成和结构受到危害<sup>[15]</sup>。何李生<sup>[16]</sup>认为,Cd 在植物体内含量达到 1 mg/kg 时,就对某些植物产生毒害,使其表现出叶片失绿、植株矮化、生育期延长、生物量下降等症状,严重的甚至导致植物死亡。邹继颖等<sup>[17]</sup>研究表明,在 Hg 浓度 50~250 mg/L 范围内,随 Hg 浓度的增加,水稻鲜质量、株高呈递减趋势;在 Cd 浓度 50~250 mg/L 范围内,Cd 浓度低于 100 mg/L 时,对水稻鲜质量、株高有促进作用,超过 100 mg/L 时表现为抑制作用。曾翔等<sup>[18]</sup>研究了 Cd 对不同类型水稻种子萌发的影响,结果表明,在 10 mg/L Cd 处理下,水稻种子发芽率比对照下降 1.3%,根系长度则比对照下降 32.8%,说明 Cd 对水稻种子根系生长表现出强烈的抑制作用。何俊瑜等<sup>[19]</sup>研究表明,超过一定浓度的 Cd 处理会使水稻幼苗根系扭曲变形,膨大变粗,外观呈褐色。

杜天庆等<sup>[20]</sup>研究表明,小麦各器官中重金属的富集表现:幼苗期为根系>叶鞘>叶片,成熟期为根系>茎叶>籽粒;在 Cd、Cr、Pb 二元或三元胁迫条件下,小麦幼苗期植株各器官对重金属的富集浓度均极显著高于单一胁迫处理。徐加宽等<sup>[21]</sup>研究认为,水稻不同器官对重金属元素的吸收与积累一般表现为根>茎>叶>籽粒(或糙米);在籽粒中,从浓度上看,胚和皮层中重金属的浓度均显著高于胚乳,但从单位质量的积累量来看,胚乳中的积累量占据绝对优势,大约占 70%,颖壳、皮层各占 10%左右,胚的积累量相对较小,约占 8%;不同品种对重金属的积累存在显著差异,糙米对 Cd、Pb 的积累能力一般表现为籼稻>粳稻。

### 3.2 对作物产量和品质的影响

王恒<sup>[10]</sup>研究表明,在试验条件下,不同浓度重金属污染对水稻产量均有影响,与对照相比,单一污染条件下水稻产量降低 8.03%~35.43%;复合污染条件下,水稻产量降低 23.44%~56.10%。丁园等<sup>[22]</sup>研究表明,当土壤中 Cd 含量为 4.48 mg/kg 时,糙米中的 Cd 含量就会超标,且籽粒蛋白质含量显著减少;当土壤中 Cd 的含量达到 20.84 mg/kg 时,与对照相比,水稻的经济产量、籽粒蛋白质含量均极显著降低。聂胜委等<sup>[23]</sup>研究表明,Cd、Pb、As、Hg、Cr 5 种重金属对小麦产量三要素中单位面积有效穗数的影响最大,其次为每穗粒数,对千粒重的影响相对最小;重金属 Cr 对小麦的产量表现为抑制效应,Cd、Hg、Pb、As 对小麦产量的影响表现为增产效应;不同种类重金属胁迫对小麦产量影响作用依次为 Hg<Cd<As<Pb<Cr。范中亮等<sup>[24]</sup>研究表明,在 Cd 浓度水平较低(1~3 mg/kg)时,潮土和水稻土的水稻结实率和单穗质量均略有下降;但在高浓度水平(5~7 mg/kg)时,水稻结实率和单穗质量均显著下降,其中,结实率降低 3~10 个百分点,单穗质量最大降低 28.4%。廖钢<sup>[25]</sup>研究表明,与轻度 Cd 胁迫相比,重度 Cd 胁迫下水稻籽粒蛋白质含量有所下降,下降幅度在 1%~23%之间;品种籽粒直链淀粉含量在重度 Cd 胁迫下显著下降,平均比轻度 Cd 胁迫下降了 13.3%。张晶等<sup>[26]</sup>对不同浓度重金属 Cu、Zn 污染对小麦产量影响的研究表明,在 50~300 mg/kg 浓度范围,Cu 对小麦产量有促进作用;在 100~400 mg/kg 浓度范围,Zn 一开始表现为促进作用,浓度升高后反而有抑制作用。

### 3.3 对作物生理生化的影响

范中亮等<sup>[24]</sup>通过盆栽试验研究表明,在 Cd 浓度为 0~7 mg/kg 范围内,水稻抽穗期剑叶净光合速率(Pn)、

气孔导度( $G_s$ )和蒸腾速率( $Tr$ )、剑叶叶绿素相对含量(SPAD 值)的变化趋势基本一致,随着 Cd 处理浓度的增大呈现出先升高后下降的趋势;而细胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )随着土壤 Cd 处理浓度的提高呈现先降低后升高的趋势;水稻剑叶实际光化学效率( $\Phi PSII$ )总体上随着 Cd 处理浓度的升高而降低。陈圣安<sup>[27]</sup>认为,重金属 Cd 会降低水稻叶片中蛋白质的含量,增强水解酶的活性,加速水稻叶片的衰老,缩短了叶片的功能期,并且, Cd 可以通过破坏水稻体内自由基清除系统,导致叶绿体膜脂过氧化,从而导致水稻叶片的叶绿素降解。章秀福等<sup>[28]</sup>研究表明,轻度 Cd 胁迫有利于提高水稻叶片超氧化物歧化酶(SOD)的活性,而高浓度 Cd 胁迫对水稻叶片的 SOD 活性有抑制作用;较高浓度的 Cd 胁迫会增加水稻叶片丙二醛(MDA)含量。何俊瑜等<sup>[19]</sup>研究了 Cd 胁迫对水稻幼苗生长的影响,结果表明,随着 Cd 浓度的增加和处理时间的延长,水稻幼苗根的生长及根尖细胞有丝分裂指数明显降低,染色体畸变率升高。还有研究表明,重金属胁迫会降低植物的水势和蒸腾速率,抑制植物体内水分的运输,从而引起水分代谢失调<sup>[29-30]</sup>。郑楠等<sup>[31]</sup>认为,多数重金属对植物的影响存在“低促高抑”现象,当重金属浓度较高时,植物体内的 POD、CAT、SOD 的活性逐渐降低,而质膜透性、Pro 含量和 MDA 含量则随重金属浓度的增加而增加。

## 4 影响作物对重金属吸收的主要因素

陈爱葵等<sup>[32-35]</sup>认为,水稻对重金属镉的吸收除受土壤 pH 值、稻田氧化还原值、Cl 浓度、Zn 含量、水稻根表铁膜的厚度、水稻品种本身的差异等因素的影响外,还与淹水时间、土壤类型及其有机质含量、其他金属元素(如 Pb、Cu 等)以及土壤微生物活动等有关。汤文光等<sup>[36]</sup>在南方双季稻区的研究表明,与双季稻-冬闲相比,双季稻-冬种模式有促进消减土壤部分重金属污染的趋势,但其作用有限,并能一定程度降低糙米中 Cd 和 Pb 的含量,改善稻米品质和提高水稻产量。

## 5 作物重金属污染的治理与调控

### 5.1 尽可能控制和减少重金属污染的来源和污染量

控制和减轻作物重金属污染是关系国计民生的大事。针对重金属污染的来源,有针对性的开展治理工作,减轻或杜绝污染源。严格控制工业“三废”的排放,合理使用农药、化肥、农膜等。

### 5.2 加强作物重金属污染的检测与监测

要不断改进和提高重金属检测的方法和精度。目前,重金属离子的检测方法主要有原子吸收光谱法、原子荧光光谱法、高效液相色谱法、电感耦合等离子体质谱法、电化学法、生物传感器法、免疫分析法等 7 种<sup>[37]</sup>。同时,可利用高光谱卫星遥感数据和大量地面实验测量数据,系统分析受重金属污染的作物特征变化及其与高光谱遥感数据的响应关系,然后建立遥感监测模型用于检测大面积重金属污染<sup>[38-39]</sup>。仲晓春等<sup>[40]</sup>研究表明,不同浓度 Cd 处理之间光谱反射率在可见光区具有明显差异,特别是在叶绿素吸收区(660~680 nm 附近),随着 Cd 浓度的增加,光谱反射率的值呈下降趋势。

### 5.3 开展土壤重金属污染的治理

目前,有关重金属污染修复的技术主要有两种类型,一种是直接清除重金属污染的土壤;二是改变土壤中重金属的存在形态,降低其活性、迁移性和生物可利用性。目前,有关土壤重金属污染的修复方法主要有物理修复、化学修复、电化修复以及生物修复等<sup>[41-42]</sup>。

#### 5.3.1 物理修复

换土法。在重金属污染的土壤表面覆盖,或者全部或部分替换成未污染的土壤。

深耕法。对污染较轻的土壤,采用翻耕形式,把底部未污染的土壤翻到土壤表面,或者与之混合,以减轻污染。

另外还有加热固定法等。

#### 5.3.2 化学修复

化学修复主要是通过向土壤中添加改良剂或抑制剂,以改变 pH 值等土壤理化性质,使土壤中的重金属发生沉淀、吸附、抑制和拮抗等作用,改变重金属的存在形态,从而降低有毒重金属的生物有效性和迁移性。杜志敏等<sup>[43]</sup>对不同改良剂对重金属污染土壤的修复研究表明,石灰、磷灰石和蒙脱石处理均显著提高了土壤溶液 pH 值,并显著降低了土壤 Cu、Cd 的浓度。郑楠等<sup>[31,44]</sup>研究认为,抗坏血酸和水杨酸对缓解作物 Cd 毒害有一定的效果。柳赛花等<sup>[45]</sup>对磷酸盐矿添加不同硅材料处理的研究表明,与对照相比,施硅处理能有效降低水稻根、茎、叶质外体和共质体中 Cd、Zn、Pb 的含量,且不同硅材料处理的磷酸盐矿能有效降低重金属 Cd、Zn、Pb 和 P 的生物有效性。许建光等<sup>[46]</sup>认为,硅肥能降低重金属对作物的毒害,其作用机理主要是:(1)硅肥中的硅能与重金属反应形成不易被植物吸收的硅酸化合物而沉淀下来;(2)硅能够通过影响植物根际的氧化



还原能力来降低重金属的活性;(3)硅通过影响土壤 pH 值来影响植物对重金属的吸收;(4)通过改变重金属在土壤中的形态来抑制植物的吸收;(5)硅在植株地上部分的淀积阻碍了重金属向地上部分的迁移。高芳等<sup>[47]</sup>研究表明,施钙可以缓解 Cd 胁迫对花生株高和侧枝生长的抑制作用,提高花生叶片叶绿素含量、光合速率、SOD、CAT、POD 活性和可溶性蛋白质含量,降低 MDA 的积累量,减轻 Cd 胁迫对花生叶片及产量的影响。

### 5.3.3 电化修复

电化修复方法的工作原理是在水分饱和的污染土壤中插入电极(通常用石墨电极),通入低强度的直流电,在电场作用下,金属离子可以定向移动,并在电极附近聚集,从而清除重金属<sup>[41]</sup>。

### 5.3.4 生物修复

利用特定的动植物以及微生物,通过吸收、沉淀、氧化还原等作用,固定或者降低土壤重金属的毒性。李松克等<sup>[48]</sup>关于多年生黑麦草对黄壤重金属污染修复的研究表明,多年生黑麦草根系对重金属的富集能力总体上比地上部强,其中,地上部对 Cd 的富集能力中等,根系对 Pb、Cd、Cr、Hg 的富集能力中等;经过 6 年种植,土壤中 As、Pb、Cr、Cd 含量分别比种植初期降低了 52.71%、45.12%、48.32%、59.15%,降幅非常明显。

## 5.4 强化农业栽培措施的降污作用

通过水肥调节以及耕作措施等,可以改善或调节作物对重金属的吸收。朱智伟等<sup>[49]</sup>认为,适当减少肥料用量,尽量选用碱性化肥,适量有机肥与化肥配施,或者采用间作或轮作等种植方式,可有效降低重金属污染的风险,而适当的淹水管理可降低土壤的 Eh 值和 Cd 的生物有效性。Si 具有提高作物抗逆性的能力, Si 能够降低土壤中重金属的活性,使其不易被作物吸收,从而减轻重金属对植物的毒害。董敬娜<sup>[50]</sup>研究表明,在一定范围内,施 Si 能够降低土壤中铜的生物毒性,提高土壤酶活性,增加土壤 pH 值,从而使得小麦幼苗发芽率升高,光合作用增强,有利于小麦的生长。另外,筛选对重金属污染耐性较强的品种,喷施腐植酸肥等叶面肥也具有较好的效果。汤海涛等<sup>[51]</sup>对不同叶面肥对轻度重金属污染稻田重金属积累的研究表明,喷施 3 种叶面肥均能显著降低稻谷的重金属综合污染程度,与喷清水对照相比,喷施腐植酸肥、富硒肥、自配钛硒微肥处理的稻谷中 Pb 含量平均降低 18.11%, Cd 含量平均降低 37.00%, Hg 含量平均降低 45.69%, Cr 含量

平均降低 18.24%,且前 2 个处理还能降低稻谷中砷的含量 10~20 个百分点。

## 参考文献

- [1] Anita Singh, Sheo Mohan Prasad. Reduction of heavy metal load in food chain: technology assessment [J]. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 2011, 10: 199-214.
- [2] Lars Jarup. Hazards of heavy metal contamination[J]. *British Medical Bulletin*, 2003, 68: 167-182.
- [3] Ikeda M, Zhang Z W, Shimbo S, et al. Urban population exposure to lead and cadmium in east and south-east Asia[J]. *Sci Total Environ*, 2000, 249: 373-384.
- [4] 万宝瑞. 确保我国农业三大安全的建议 [J]. 农业经济问题, 2015 (3): 4-8.
- [5] 梁为. 粮食重金属污染趋重: 被污染耕地仍在种植, 部分粮食流向市场[N]. 时代周报, 2013-02-07.
- [6] 污染耕地修复要花数万亿[N]. 信息时报, 2013-06-18(A10).
- [7] 孙彬, 管建涛, 连振祥, 等. 大地之殇[N]. 经济参考报, 2012-06-11(005).
- [8] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 466-480.
- [9] 黄冬芬. 水稻对土壤重金属镉的响应及其调控[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.
- [10] 王恒. 吉林省土壤—水稻系统环境质量分析评估及重金属复合污染研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [11] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Anal Chem*, 1979, 51(7): 844-850.
- [12] Gambrell R P. Trace and toxic metals in Wetland—A review[J]. *J Environ Qual*, 1994, 23: 883-819.
- [13] Sauman L M. Fractionation method for soil micro-elements [J]. *Soil Sci*, 1985, 140: 11-22.
- [14] 王学锋, 杨艳琴. 土壤—植物系统重金属形态分析和生物有效性研究进展[J]. 化工环保, 2004, 24(1): 24-27.
- [15] 唐鹏, 刘光, 徐俊峰. 植物重金属胁迫的高光谱遥感研究[J]. 杭州师范大学学报: 自然科学版, 2014, 13(6): 634-640.
- [16] 何李生. 镉对水稻生长和养分吸收的影响及质外体在水稻耐受镉毒害中的作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [17] 邹继颖, 刘辉, 祝惠, 等. 重金属汞污染对水稻生长发育的影响[J]. 土壤与作物, 2012(4): 227-232.
- [18] 曾翔, 张玉烛, 王凯荣, 等. 镉对水稻种子萌发的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1665-1668.
- [19] 何俊瑜, 任艳芳, 严玉萍, 等. 镉胁迫对水稻幼苗生长和根尖细胞分裂的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 138-144.
- [20] 杜天庆, 杨锦忠, 郝建平, 等. Cd、Cr、Pb 复合胁迫下小麦植株重金属的积累与分布[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(3): 537-542.
- [21] 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.
- [22] 丁园, 宗良纲, 徐晓炎, 等. 镉污染对水稻不同生育期生长和品质的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 183-186.

[23] 聂胜委,黄绍敏,张水清,等. 不同种类重金属胁迫对两种小麦产量及构成因素的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(3):455-463.

[24] 范中亮,杨菲,吴琦,等. 不同土壤类型下重金属 Cd 对水稻剑叶光合特性和产量构成的影响 [J]. 农业环境科学学报,2010,29(6):1 021-1 026.

[25] 廖钢. 水稻对重金属镉胁迫响应的品种间差异[D]. 长沙:湖南农业大学,2011.

[26] 张晶,王姣爱,党建友,等. 重金属 Cu、Zn 污染对小麦旗叶生理及产量的影响[J]. 中国农学通报,2015,31(11):229-233.

[27] 陈圣安. 镉污染对水稻生理生化的影响 [J]. 农技服务,2011,28(7):1 033-1 035.

[28] 章秀福,王丹英,储开富,等. 镉胁迫下水稻 SOD 活性和 MDA 含量的变化及其基因型差异[J]. 中国水稻科学,2006,20(2):194-198.

[29] 江行玉,赵可夫. 植物金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报,2001(1):92-99.

[30] Chatterjee J, Chatterjee C. Phytotoxicity of Cobalt,Chromium and Copper in cauliflower[J]. *Environ Pollut*, 2000, 109(1): 69-74.

[31] 郑楠,王月平,吴玉环,等. 重金属对油菜生理生化影响的研究现状[J]. 安徽农业科学,2011,39(9):5 156-5 158.

[32] 陈爱葵,王茂意,刘晓海,等. 水稻对重金属镉的吸收及耐性机理研究进展[J]. 生态科学,2013,32(4):514-522.

[33] Nocito F F, Lancilli C, Dendena B, et al. Cadmium retention in rice roots is influenced by cadmium availability, chelation and translocation[J]. *Plant Cell Environ*, 2011, 34(6): 994-1 008.

[34] Zeng F, Ali S, Zhang H, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environ Pollut*, 2011, 159(1): 84-91.

[35] Mou R X, Chen M X, Zhu Z W, et al. Advance in the researches on heavy metals in rice[J]. *Ecol Environ*, 2004, 13(3): 417-419.

[36] 汤文光,唐海明,罗尊长,等. 不同种植模式对稻田土壤重金属含量及晚稻稻米品质的影响 [J]. 作物学报,2011,37(8):1 457-1 464.

[37] 郑守国,李森,翁士状,等. 稻米中重金属污染现状与检测方法 [J]. 农产品质量与安全,2012(S):25-28.

[38] 关丽,刘湘南,程承旗. 土壤镉污染环境下水稻叶片叶绿素含量监测的高光谱遥感信息参数 [J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(10):2 713-2 716.

[39] 曹仕,刘湘南,刘清俊. 利用独立变量分析与高光谱植被指数模型监测成熟期水稻中砷污染 [J]. 农业环境科学学报 2010,29(5):881-886.

[40] 仲晓春,戴其根,何理,等. 不同浓度镉胁迫下水稻冠层光谱特征及其预测评价[J]. 农业环境科学学报,2012,31(3):448-454.

[41] 周丽英. 水稻根际土壤耐镉细菌的筛选及其耐镉机理研究[D]. 福州:福建农林大学,2012.

[42] 张良运. 稻田土壤重金属污染和稻米 Cd 安全分析及控制技术探讨[D]. 南京:南京农业大学,2009.

[43] 杜志敏,郝建设,周静,等. 四种改良剂对铜和镉复合污染土壤的田间原位修复研究[J]. 土壤学报,2012,49(3):508-517.

[44] 胡春霞,王秀芹. 外源水杨酸对镉胁迫下油菜渗透调节物质和保护酶活性的影响[J]. 鞍山师范学院学报,2010,12(2):40-42.

[45] 柳赛花,黄涓,纪雄辉,等. 不同硅材料处理的磷酸盐矿对水稻生长及体内重金属含量的影响 [J]. 作物研究,2014,28(8):896-900.

[46] 许建光,李淑仪,王荣萍. 硅肥抑制作物吸收重金属的研究进展 [J]. 中国农学通报,2006,22(7):495-499.

[47] 高芳,张佳蕾,杨传婷,等. 钙对镉胁迫下花生生理特性、产量和品质的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(11):2 907-2 912.

[48] 李松克,张春林,李克勤,等. 多年生黑麦草对黄壤重金属污染的修复[J]. 贵州农业科学,2014,42(11):147-151.

[49] 朱智伟,陈铭学,牟仁祥,等. 水稻镉代谢与控制研究进展[J]. 中国农业科学,2014,47(18):3 633-3 640.

[50] 董敬娜. 硅作用下铜对小麦生理指标和土壤酶活性的影响研究 [D]. 泰安:山东农业大学,2012.

[51] 汤海涛,李卫东,孙玉桃,等. 不同叶面肥对轻度重金属污染稻田水稻重金属积累调控效果研究[J]. 湖南农业科学,2013(1):40-44.

Effects and Regulations of Heavy Metal Pollution on Crops

WANG Zhigang, LIN Hai, PANG Qianlin  
(China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China)

**Abstract:** This paper introduced the status of farmland heavy metal pollution in China, analyzed the effects of heavy metal pollution on crops and main factors affecting the uptake of heavy metals in crops. On the basis of this, we discussed the control measures to reduce heavy metal contamination of crops.

**Key words:** crop; heavy metal pollution; control

·+++++·

·综合信息·

山东省 2017 年审定通过的水稻新品种

审定编号 (鲁审稻)	品种名称	类型	选育单位	品种来源	全生育期 (d)	区试产量 (kg/667 m <sup>2</sup> )	生试产量 (kg/667 m <sup>2</sup> )
20170043	临稻 23 号	粳型常规稻	山东省临沂市农业科学院	临稻 10 号 / 盐粳 7 号	160	683.60	640.40
20170044	临稻 24 号	粳型常规稻	山东省临沂市农业科学院	临稻 10 号 / 镇稻 88	160	684.20	648.30
20170045	南粳 505	粳型常规稻	江苏省农业科学院粮食作物研究所	武粳 15/ 宁 5055	157	697.70	656.40
20170046	润农 11	粳型常规稻	山东润农种业科技有限公司	圣稻 13/ 津 90-3	140	697.70	607.70

(中稻宣)