

# 科学认识和防治耕地土壤重金属污染

张桃林

(中华人民共和国农业部, 北京 100125)

**摘要:**农产品产地环境质量直接影响农产品质量。近年来,我国部分地区土壤重金属污染问题日益凸显,已成为影响农产品质量安全,并受到广泛关注和重视的突出的问题之一。本文在分析土壤重金属污染具有来源复杂、评价难度大和治理任务艰巨等特点的基础上,提出为科学防治耕地土壤重金属污染,必须本着科学认识、统筹规划、综合防治、分类指导、治用结合的原则,从加强普查监测、加强科技支撑、完善法律法规、培育环保产业、构建工作体系等方面入手,以切实加强和改进耕地土壤重金属污染防治工作。

**关键词:**耕地土壤;重金属;农产品安全;污染治理

**中图分类号:** X53

农产品产地环境质量安全是农产品质量安全的第一道关口,直接影响农产品质量。然而,近年来我国部分地区土壤重金属污染问题日益凸显,已成为影响农产品产地环境质量,进而影响农产品质量安全的突出问题。如何科学认识和客观评价我国农业土壤及主要农产品重金属污染现状和发展趋势,并开展有效的保护和防治工作,尽快地把耕地土壤重金属污染的危害降到最低程度,已成为政府、公众和科学界共同高度关注的话题和十分紧迫的任务。

相对于大气和水体等污染,土壤重金属污染有其特殊的复杂性、隐蔽性、滞后性和长期性,需要对其成因、扩散途径和生态效应进行客观、全面和科学的分析,在此基础上采取针对性的防控和治理措施。

## 1 土壤重金属污染的复杂性

### 1.1 土壤重金属来源的复杂性

土壤重金属污染的复杂性,首先体现在土壤重金属污染来源十分复杂。人类的各种生产和生活活动,尤其是在工业化、城镇化快速发展过程中,粉尘、工业污水和垃圾、汽车尾气等废弃物排放量显著增加,这些废弃物中含有的 Cd、Cr、Pb、Cu、As 等重金属,通过各种途径迁移、扩散进入土壤,导致表层甚至深层土壤重金属元素不同程度的富集,成为土壤退化的重要表现形式。一些矿山在开采、加工和冶炼过程中废渣和尾矿等随意堆放导致其中的重金属直接或间

接进入土壤,是耕作土壤重金属重度污染的最主要原因<sup>[1-5]</sup>。大气沉降和污水灌溉则是城市工业和交通源重金属进入耕作土壤的最主要途径,尤其是 Cd、As、Sb、Pb 和 Ni 等元素<sup>[6-8]</sup>。根据我国学者的估算结果,目前各种人为来源 Cd 的输入导致我国农田耕层土壤(0~20 cm) Cd 的年平均增量为 4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[1]</sup>,如果不采取有效的管控措施,这种幅度的持续增加足以在几十年的时间内使得大部分无污染的土壤 Cd 含量达到超标水平。

同时,由于矿化和一些特殊的地质作用,自然因素也会导致一些地区土壤母质中重金属呈现高度富集的现象。20 世纪 80 年代进行的中国土壤元素背景值调查结果表明,不同类型母质上发育的土壤,其重金属含量的差异很大,如 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni 和 Pb 等元素在基性火成岩和石灰岩母质发育的土壤中的平均含量大大高于风沙母质土壤(表 1)。由于地质成因(主要与超基性火成岩有关)导致的土壤重金属富集现象,是我国南方地区土壤中 Cr、Cu、Ni、Zn 等元素含量在大尺度上发生分异的重要原因<sup>[9]</sup>。

### 1.2 土壤重金属污染评价的复杂性

受成土过程及土壤质地、有机质含量、pH、Eh 等环境条件的影响和制约,来自母质和通过各种途径进入土壤中的人为源重金属以多种不同形态存在,且不同形态重金属的生物有效性差异极大。我国幅员辽阔,土壤类型多样,不同类型土壤对重金属的环境容

表 1 我国 3 种典型母质发育土壤中重金属元素的平均含量<sup>[9]</sup>(A 层, mg/kg)  
Table 1 Average content of heavy metals in soils from 3 typical parent materials

母质类型	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb
基性火成岩	12.4	0.078	101.2	31.0	0.090	48.9	22.9
石灰岩	18.7	0.218	78.1	27.7	0.112	38.0	32.7
风沙母质	5.4	0.048	29.3	10.6	0.019	13.6	15.9

量也有显著差别,加之区分土壤中自然和不同人为来源重金属的技术难度较大,进一步增加了土壤重金属污染评价的复杂性。

土壤-作物系统中的重金属迁移是一个复杂过程,除受土壤中重金属含量、形态及环境条件的影响外,不同类型农作物吸收重金属元素的生理生化机制各异,因而有不同吸收和富集重金属的特征<sup>[10-11]</sup>。即使是同一类型的农作物,不同品种间富集重金属的能力也有显著差异<sup>[12-13]</sup>。此外,农田灌溉方式、灌溉时间、施肥方式和田间管理等农艺措施都会影响作物对产地土壤中重金属的吸收<sup>[14-15]</sup>。这些因素均决定了农产品产地土壤重金属含量与农产品质量之间并非简单的直接对应关系。我国目前所执行的《土壤环境质量标准》(GB15618-1995),在我国农业资源环境保护中发挥了积极作用,但由于当时研究水平和数据资料积累等因素的限制,主要以土壤重金属全量为依据,没有充分考虑我国土壤类型、作物类型、耕作制度和农艺管理措施的多样性和差异性,不能满足我国农产品安全生产的需要,其科学性和可操作性亟待改进和完善。事实上,全国农业环境保护监测结果表明,按现行土壤环境质量和食品安全国家标准,“土壤重金属超标而农产品不超标”与“土壤重金属不超标而农产品却超标”的现象时有发生。例如,对全国无公害农产品基地县环境质量评价结果表明,南方部分土壤重金属高背景值地区,有的重金属全量超过了国家土壤环境质量二级标准,但多年来生产的农产品一直是安全的,甚至是出口创汇的主打产品,农产品质量经得起发达国家的严格检验。

此外,土壤属性的空间异质性决定了土壤重金属含量在空间上的分异并随着研究尺度、采样密度和采样方法的不同而有着不同的表现。目前国内已开展了大量土壤重金属污染的调查和评价工作,但目前大尺度的调查和评价主要集中在人口密集、经济发达的东部和中部地区,小尺度上的研究大多针对工矿和冶炼厂区周边地区、城郊蔬菜地等,对农业主产区耕地重金属现状的调查和分析相对较少,而且由于调查目的不同、研究方法和评价标准的差异,评价结果的宏观代表性值得商榷。这在客观上造成了对我国部分地区土壤重金属污染状况估计过高的结果<sup>[5]</sup>。因此,要科

学认识和正确对待现行土壤重金属污染调查结果。一方面要高度重视土壤保护、积极开展有效防治工作;另一方面也不必谈“污”色变,夸大我国土壤重金属污染范围、程度和危害。

### 1.3 土壤重金属污染治理的艰巨性

过去部分行业的环保工作者把土壤作为污染物的消纳场所,过高估计了土壤的自净能力,实际上土壤是宝贵的农业生产资料,其环境负载容量是有限的,必须加以保护,防治重金属逐步累积。各种来源的重金属一旦进入土壤,除少部分可通过植物吸收和水循环(或挥发)移出外,其在土壤中的滞留时间极长。前人研究结果表明,温带气候条件下,Cd 在土壤中的驻留时间为 75 ~ 380 年,Hg 为 500 ~ 1 000 年,Pb、Ni 和 Cu 为 1 000 ~ 3 000 年<sup>[8]</sup>。一些土壤遭重金属污染后,往往需要花费很大的代价才能将污染降到可接受的水平,而且根据现有的技术水平,很难完全避免在修复等治理过程中派生的二次污染等负面影响。

土壤修复技术研究虽已开展多年,但纵观已有的研究成果,多数只限于实验室水平或田间小试阶段,达到现场大规模应用和商业化推广的成套技术不多。即使有少数现场修复工作获得成功,也往往由于成本太高或技术不稳定而难于复制和推广,尚没有一项特殊的技术具有普遍适用性。目前的各种物理修复、化学修复和生物修复方法虽然不少,但大多是针对某一类型重金属污染,能同时有效修复多种重金属污染土壤的方法鲜有报道,而污染区尤其是矿山开发导致的污染往往是多种重金属元素的复合污染。

目前农产品产地土壤重金属污染治理和修复面临的难点很多,有些是技术经济成本高,如用客土法等;有的时间长,如超积累植物吸收重金属方法需要几十年乃至上百年时间。而且,我国的农田土壤重金属污染治理绝大多数是在不中断农业生产的条件下进行,进一步加大了修复的难度。这些因素都制约了土壤重金属污染治理技术的有效运用。不过,虽然重金属污染土壤修复治理难度大,但也不是不可防、不可控的。事实上,我国近年来在一些重点地区开展的一些以农艺措施为主的土壤重金属污染综合治理试验示范,如农业部、财政部在湖南水稻 Cd 污染地区

实施推广的“VIP+n”稻米Cd污染控制技术模式，治理成效显著。

## 2 耕地土壤重金属污染防控对策

土壤重金属污染的极端复杂性，决定了污染防治工作的长期性和艰巨性。总的原则是在坚持科学认识、统筹规划、综合防治、分类指导、治用结合基础上，切实处理好3个关系：一是防治与生产的关系，充分认识耕地在我国是稀缺的宝贵资源，切实加强耕地资源保护和重金属污染防控，防止耕地不科学、不合理的非粮化、非农化倾向。二是内源污染与外源污染防治的关系，从流域、区域的尺度防控污染源，在加强对工矿和城乡生活等外源污染向农业农村转移排放管控的同时，高度重视农业内源重金属污染的防治。三是科研先行与技术审慎应用的关系，要稳中求进，把成熟、可靠且符合当地自然生态条件及农业生产特点的技术尽快集成应用到实践中。

为实现科学认识耕地土壤重金属污染状况，并开展有效的防控，必须重点解决以下问题。

### 2.1 尽快全面把握耕地土壤重金属污染状况

尽快开展农产品产地土壤重金属污染普查和监测，全面准确、动态把握产地污染状况。首先，应当加强我国农业土壤环境质量标准修订完善的基础研究，建立精准的土壤重金属污染评价指标体系。针对目前我国土壤环境质量标准建立在全量指标上、未充分考虑土壤中重金属的形态和生态受体的毒性效应等问题，加大基础研究力度，深入研究重金属在土壤-植物系统中的形态转化、运移和富集规律，修正完善现有土壤重金属污染评价指标、评价体系和分析测试方法。研究制订符合我国国情、与土壤类型和作物种植方式等相对应的农田土壤重金属含量安全阈值，并尽快修订和完善我国农用地土壤环境质量标准评价体系。在此基础上，从全面普查、重点详查和动态监测三方面入手，全方位、多层面系统推进土壤和农产品监测与评价工作，确保土壤重金属污染的家底清楚，为进一步做好污染修复治理的科学规划和分类指导打好基础。以摸清全国农产品产地环境状况为目的，以基本污染调查为手段，在全国范围内开展全面普查。重点详查要在全国农产品重点污染区域开展。动态监测要以农产品产地环境污染监测国控点、省控点网络为基础，跟踪产地环境变化趋势，按年度开展监测，动态把握农产品产地环境情况。由于稻米重金属污染与产地土壤环境紧密相关，特别是我国南方酸性土壤区的稻田风险更高，当前需要在工矿企业周边农区、污水灌区、大中城市郊区、以及南方酸性

土壤的稻田等污染重点区适当加大调查密度。

### 2.2 加强土壤保护与重金属污染防治科技支撑

一方面，必须加强清洁土壤的管控技术研究，防止重金属在土壤中累积和污染面积的继续扩大，以保证其永续利用。另一方面，针对镉大米等突出重金属污染问题，加强低积累水稻品种筛选与推广，灌溉水净化处理技术与设备研发，加强产地土壤主要重金属污染控制技术、降活减存技术、综合治理技术等科技攻关，并建立相应的综合示范区，对现有各种治理修复技术及模式进行比选、优化、集成和熟化、简化，形成一系列适合不同土壤污染类型和污染程度、不同农业生态类型区的先进、适用、易行、能复制、可推广的模式和工程技术体系及标准化操作规程，为重金属土壤污染防控和治理提供强有力的科技支撑和示范样板。

实践证明，以农艺措施为主的风险管控综合治理方式更适宜我国国情、农情。如农业部、财政部在湖南水稻Cd污染地区实施推广的“VIP+n”稻米Cd污染控制技术模式。该技术包括种植Cd低积累型水稻品种(variety)、合理灌溉(irrigation)、调控土壤酸碱度(pH)3项关键技术，同时根据污染情况辅以其他针对性措施(“n”，或施用重金属钝化剂，或喷施Si、Se、Zn，或施用生物菌剂等)。采用“VIP”和“VIP+n”技术，能显著降低土壤中、轻度Cd污染区稻米Cd含量，轻度和中度污染的农田早稻达标率提高了53.1%和44.8%。加强科技支撑，是土壤保护和重金属污染防治的关键。

### 2.3 加强农业资源环境保护法律法规建设、创新体制机制

通过近40年的努力，我国农业环境保护法律雏形已基本形成，但是面对农业环境保护领域出现的新问题和农业可持续发展的新需要，农业环境保护领域法制建设仍然较为滞后，法律体系还比较松散，缺乏完整性、系统性和协同性。农业资源环境保护是一项系统工程，既涉及农业生产内部，也涉及农业生产外部(如工矿企业、城乡生活排污转移等)。然而，长期以来，在法制建设过程中，由于没有将农业资源环境保护作为独立的调整对象，导致农业资源环境保护立法缺少顶层设计，缺乏系统性、整体性、协调性，没有形成“从投入品到农田、从农田到餐桌”一整套全周期保护的法律法规体系，相关规定散落于多部法律之中，农业环境保护立法碎片化、分散重复、不衔接的问题比较突出，不少领域还存在法律空白。

因此，必须加快推动相关法律法规的制修订，充分考虑到农业资源环境保护的规律和特点，形成中国

特色的农业资源环境保护法律体系和管理体系,把技术法规作为组成部分或法律附件,通过配套政策机制来推动法律实施。建立最严格的农产品产地保护制度、农田土壤污染管控制度、农业资源损害赔偿制度、责任追究制度等,确保“谁污染、谁治理”。将土壤重金属污染防控工作重点由终点评价和末端修复治理,转变为源头控制-过程监管-终点评价-修复治理相结合的全程防控。

同时,加强体制创新。建立农业资源环境保护协作平台,加强不同行政区域、部门间的统筹协调,完善产学研及用户的协作机制,构建农业环境保护责权利共同体;明确生态补偿方案,强化政策激励作用和工作保障机制

#### 2.4 着力培养农业资源环境保护产业

农产品产地土壤重金属污染涉及面广、治理难度大、治理时间长,仅靠政府专项投资,只能解决局部、暂时性问题。某些劳动强度大、技术要求高的治理措施单纯靠农民自身力量的实施还存在一定难度,必须发挥市场作用,探索第三方治理模式,培育壮大资源环境保护产业和社会化服务组织。一方面鼓励现有科研单位加快已有科技成果的转化力度,推动与企业的合作。另一方面对有志于从事农产品产地土壤重金属污染防治的企业给予项目示范和优惠政策。当前,已经有一批企业投入到农产品产地土壤重金属污染防治工作中,应进一步发挥相关行业协会等社会团体的作用,凝聚一大批企业社会力量,推动农业资源环境保护事业全面深入开展。

#### 2.5 以体系建设保障农产品产地环境安全

建设好“三支队伍”,即监管队伍、科技队伍、使用者队伍(农民、经营者或承包者)的管理执行体系。进一步加强农业资源环境保护的队伍建设和能力建设,切实提升监测能力、应急能力和管理能力,建立有效的土壤重金属污染监测网络、预警系统,探索土壤重金属污染防控的长效管理机制。充分发挥高校、科研院所的作用,积极支持相关的技术研发、集成与示范,提升我国土壤重金属污染管控与治理的科技水平。充分尊重和发挥实施主体农民的积极性,加快培育新型职业农民,切实增强农民环保安全意识和应用新知识新技术的能力,保障耕地土壤保护和污染治理修复工作的成效。

### 3 结语

我国部分地区土壤重金属污染问题日益凸显,已成为影响农产品产地环境质量,进而影响农产品质量

安全的最主要因素之一。尽快把耕地土壤重金属污染的危害降到最低程度,是十分紧迫的任务。土壤重金属污染来源极其复杂、评价难度大和治理任务艰巨的特点,决定了污染防治工作的长期性和艰巨性。必须本着科学认识、统筹规划、综合防治、分类指导、治用结合的原则,尽快全面把握耕地土壤重金属污染状况,从加强普查监测、加强科技支撑、完善法律法规、培育环保产业、构建工作体系等方面入手,保障耕地土壤重金属污染防治工作的成效。

#### 参考文献:

- [1] Luo L, Ma YB, Zhang SZ, Wei DP, Zhu YG. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90: 2 524-2 530
- [2] Li ZY, Ma ZW, Kuijp TJ, Yuan ZW, Huang L. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468/469: 843-853
- [3] 王国庆, 林玉锁. 土壤环境标准值及制订研究: 服务于管理需求的土壤环境标准值框架体系[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(5): 552-562
- [4] 张桃林, 鲁如坤, 季国亮. 中国红壤退化机制与防治[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999
- [5] 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 唐世荣, 李永涛, 李芳柏, 周东美, 武志杰. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1): 186-194
- [6] Wei BG, Yang LS. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. *Microchemical Journal*, 2010, 94(2): 99-107
- [7] Shao X, Cheng HG, Li Q, Lin CY. Anthropogenic atmospheric emissions of cadmium in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79: 155-160
- [8] Kabata-Pendias. Trace Elements in Soils and Plants[M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2011
- [9] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版 1990
- [10] Alexander PD, Alloway BJ, Dourado AM. Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144: 736-745
- [11] Yang Y, Zhang FS, Li HF, Jiang RF. Accumulation of cadmium in the edible parts of six vegetable species grown in Cd-contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90: 1 117-1 122
- [12] Wang JL, Fang W, Yang ZY, Yuan JG, Zhu Y, Yu H. Inter- and intraspecific variations of cadmium accumulation of 13 leafy vegetable species in a greenhouse experiment[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55: 9 118-9 123
- [13] Zheng RL, Li HF, Jiang RF, Zhang FS. Cadmium accumulation in the edible parts of different cultivars of radish, *Raphanus Sativus* L., and carrot, *Daucus carota* var. sativa, grown in a Cd-contaminated soil[J]. *Bulletin of*

- Environmental Contamination and Toxicology, 2008, 81: 75–79
- [14] Williams PN, Lei M, Sun GX, Huang Q, Lu Y, Deacon C, Meharg AA, Zhu YG. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(3): 637–642
- [15] Yang LQ, Huang B, Hu WY, Chen Y, Mao MC, Yao LP. The impact of greenhouse vegetable farming duration and soil types on phytoavailability of heavy metals and their health risk in eastern China[J]. Chemosphere, 2014, 103: 121–130

## More Comprehensive Understanding and Effective Control of Heavy Metal Pollution of Cultivated Soils in China

ZHANG Tao-lin

(Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, Beijing 100125, China)

**Abstract:** Elevated concentrations of heavy metals in agricultural soils directly threaten human health through the food chain. Heavy metal pollution has pervaded many parts of China, posing a major threat to the safety of agricultural products. Pollution of agricultural soils with heavy metals is characterized by its complex origin, difficulty in its evaluation and remediation. Better understanding of the processes of pollution is the prerequisite of effective pollution control. It was reiterated in this paper that a national-scale thorough investigation is immediately needed to grasp the overall situation of heavy metal contamination of agricultural soils in the country. Enhancing the support of science and technology, perfecting laws and regulations, cultivating the industry of agricultural resources and environment protection, constructing work systems to secure the safety of agricultural production bases are the priority measures in improving the effectiveness of heavy metal pollution control.

**Key words:** Cultivated soils; Heavy metals; Safety of agricultural products; Pollution control