



农田

重金属污染危害与 修复技术

NONGTIAN ZHONGJINSHU WURAN WEIHAI YU XIUFU JISHU

安志装 索琳娜 赵同科 刘亚平 ◎ 主编

本书从土壤重金属污染的内涵及特点出发，阐述了土壤重金属污染对植物、土壤动物、土壤酶以及通过食物链对人类的危害。在此基础上，介绍了土壤重金属污染的修复措施，主要包括物理修复、化学修复、植物修复及微生物修复等

 中国农业出版社



农田重金属 污染危害与修复治理技术

NONGTIAN ZHONGJINSHU WURAN WEIHAI
YU XIUFU ZHILI JISHU

安志装 索琳娜 赵同科 刘亚平 主编

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

农田重金属污染危害与修复技术 / 安志装等主编.
—北京: 中国农业出版社, 2018. 1
(听专家田间讲课)
ISBN 978-7-109-23572-4

I. ①农… II. ①安… III. ①农田污染—重金属污染—污染防治 IV. ①X535

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 285271 号

中国农业出版社出版
(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)
(邮政编码 100125)
责任编辑 郭晨茜

三河市君旺印务有限公司印刷 新华书店北京发行所发行
2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月河北第 1 次印刷

开本: 880mm×1230mm 1/32 印张: 3.875

字数: 106 千字

定价: 15.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

编写人员

主 编：安志装 索琳娜 赵同科
刘亚平

参 编：赵丽平 马茂亭 王 旭
李清波 陈久海 肖长坤
郑云霞 芦宇晨

土壤是社会经济可持续发展的重要物质基础，其质量好坏关系着人民群众身心健康，关系着美丽中国建设。土壤环境保护工作是推进生态文明建设和维护国家生态安全的重要内容。2014年4月17日，环境保护部与国土资源部联合发布《全国土壤污染普查公报》显示，全国土壤环境状况总体不容乐观，部分地区土壤污染较重，耕地土壤环境质量堪忧，工矿业废弃地土壤环境问题突出。全国土壤总的超标率为16.1%，其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为11.2%、2.3%、1.5%和1.1%。污染类型以无机型为主，有机型次之，复合型污染比重较小，无机污染物超标点位数占全部超标点位的82.8%。镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍8种无机污染物点位超标率分别为7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%、4.8%。工矿业、农业等人为活动及土壤环境背景值高是造成土壤污染或超标的主要原因。



与水 and 空气污染人们能够亲身感受到不同，土壤污染具有隐蔽性和滞后性特点。土壤污染加剧了我国原本耕地资源短缺紧张的趋势；万物土中生，土壤污染直接影响农业可持续发展，导致其生产力和农产品产量与品质下降；土壤污染如隐形杀手通过食物、饮水、大气灰尘等途径进入人体，直接或间接威胁人体健康，由土壤污染引发的农产品质量安全隐患和群体性事件逐年增多，成为影响群众身体健康和社会稳定的重要因素；土壤污染也是造成水、大气和新的土壤污染的重要原因。因此，土壤污染是比空气和水污染更严峻、更长期的问题，治理土壤重金属污染刻不容缓。

国家对土壤污染问题高度重视，2012 年 10 月，国务院常务会议研究部署土壤环境保护和综合治理工作，将保护土壤环境、防治和减少土壤污染、保障农产品质量安全、建设良好人居环境作为当前和今后一个时期的主要目标。2013 年 1 月 23 日，国务院办公厅发布的《国务院办公厅关于印发近期土壤环境保护和综合治理工作安排的通知》中提出了包括“开展土壤污染治理与修复”在内的六项主要任务。2016 年 5 月，国务院印发《土壤污染防治行动计划》，总体工作目标是：到 2020 年，全国土壤污染加重趋势得到初步遏制。

我国对于重金属污染修复技术的积累比较少，大部分研究以前期的理论探索为主，可以开展工程化或产业化应用的非常少。目前，我国真正成型的污染土壤修复技术非常少，现状是存在大量的污染农田，却没有适宜、成型的修复技术。而对于已经成型的个别修复技术，实施成本又成为技术推广的一大难题。而对于污染农田的修复，更是难上加难，退耕还林、不耕作等措施不能从根本上治理农田土壤重金属污染问题。

本书从对土壤重金属污染的概念、来源和危害开始，进一步引申到6种对人类毒害较大的重金属的具体危害，主要的土壤污染修复与治理技术，并列举出典型重金属污染类型区农产品安全生产技术。

目录

MULU

前言

一、土壤重金属污染简述 / 1

- (一) 什么是重金属? 1
- (二) 农田土壤中的重金属从哪里来? 1
- (三) 我国农田土壤重金属污染的现状如何? 3
- (四) 我国在土壤污染防治方面开展了哪些工作? 4
- (五) 为什么土壤重金属污染治理那么难? 6
- (六) 农田土壤中的重金属有哪些危害? 6
- (七) 重金属超标农田的安全利用 7

二、几种主要土壤重金属污染物对人类的危害 / 8

- (一) 为什么重金属污染会对人类造成严重的危害? 8
- (二) 铅 (Pb) 9
 - 1. 铅污染的来源有哪些? 9
 - 2. 铅的危害有哪些? 9
 - 3. 铅中毒的代表性公害事件 11
- (三) 汞 (Hg) 14



1. 汞污染的来源有哪些?	14
2. 汞的危害有哪些?	15
3. 汞中毒的代表性公害事件	17
(四) 铬 (Cr)	19
1. 铬污染的来源有哪些?	19
2. 铬的危害有哪些?	20
3. 铬中毒的代表性公害事件	22
(五) 砷 (As)	23
1. 砷污染的来源有哪些?	23
2. 砷的危害有哪些?	24
3. 砷中毒的代表性公害事件	27
(六) 镉 (Cd)	28
1. 镉污染的来源有哪些?	28
2. 镉的危害有哪些?	29
3. 镉中毒的代表性公害事件	33

三、农田土壤重金属污染监测与评价 / 34

(一) 农田土壤采样	34
1. 农田土壤监测单元分类	34
2. 采样点布置	34
3. 样品采集	35
(二) 农田土壤环境质量评价参数及 计算公式	35
(三) 评价方法	36

四、农田土壤重金属污染修复治理原理与技术 / 37

- (一) 农田土壤重金属形态与特点 37
- (二) 影响农田生态系统中重金属生物有效性的因素 38
 - 1. 土壤 pH 38
 - 2. 土壤有机质 38
 - 3. 土壤微生物 39
 - 4. 农业活动 40

五、几种土壤重金属污染的主要防控技术 / 44

- (一) 物理工程修复技术 44
- (二) 化学修复技术 45
 - 1. 钝化稳定技术 45
 - 2. 淋洗修复技术 52
- (三) 生物修复技术 54
 - 1. 植物修复技术 54
 - 2. 微生物修复技术 64
- (四) 农艺调控修复技术 66
 - 1. 水分管理 66
 - 2. 施肥与重金属污染修复 67

六、几类典型重金属污染区的农田修复治理技术 / 74

- 1. 湖南省镉污染稻田修复治理技术 74



2. 广西环江砷污染农田修复治理技术	75
3. 地球化学工程技术	77
4. 京津冀地区石灰性镉污染农田修复治理技术	79
附录 1 土壤环境质量标准 (GB 15618—1995)(部分)	81
附录 2 全国土壤污染状况调查公报 (2014 年 4 月 17 日)	
环境保护部 国土资源部	84
附录 3 设施菜地重金属污染钝化修复技术指南	89
附录 4 设施菜地土壤重金属修复治理技术规程	92
参考文献	95

一、 土壤重金属污染简述

（一）什么是重金属？

化学上通常把密度大于 5 g/cm^3 的金属称为重金属，根据实际应用，具体定义为元素周期表中原子序数介于 23（钒 V）至 83（铋 Bi）之间的金属，碱金属（铷 Rb、铯 Cs、钫 Fr）除外，同时还包括钡（Ba）以及砷（As）、硒（Se）和碲（Te）等类金属。从环境污染对生态毒害和人类危害程度来说，科学研究和防控治理涉及最多的主要有 5 种：铅（Pb）、汞（Hg）、铬（Cr）、砷（As）、镉（Cd）。

（二）农田土壤中的重金属从哪里来？

重金属的主要来源是工业“三废”的排放，此外，污水灌溉、污泥还田、大气沉降、农药和肥料等的不合理施用也是造成农田土壤重金属污染的重要原因^[1]。在农田生态系统重金属的输入途径中，以大气沉降形式进入农田的重金属量因所在区域的差异而存在较大差别，在人类活动干扰频繁，尤其是采矿、冶炼业发达的地区，大气沉降可能成为农田生态系统重金属的主要来源之一，其对重金属输入的贡献率较高^[2]。在农业生产相对集中而工业尤其是采矿和冶炼较少的地区，农业生产资料



0	18	电子层	电子数
2 He	18		2
10 Ne	18		10
18 Ar	18		18
36 Kr	18		36
54 Xe	18		54
86 Rn	18		86

III A	IV A	V A	VI A	VII A
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl
31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br
49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I
81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At

II B	I B	11	10	9	8	7	6	5	4	3	II A
21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge
39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm

1 A	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 H	2 He	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	11 Na	12 Mg
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf

注：相对原子质量取自1999年国际原子量表，并全部取4位有效数字。

III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII	IX	X	XI	XII
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si
31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr
49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce
81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th

化学元素周期表

特别是含重金属较高的肥料、农药等的施用，可能是农田中重金属输入的主要途径^[3]。此外，工矿企业污水污泥、城镇生活废弃物中由于重金属含量较高，也可能成为某些地区农田生态系统中重金属的重要来源之一^[4]。

农业生产中长期施用有机肥、磷肥而造成农田土壤中铜（Cu）、锌（Zn）、镉（Cd）、铅（Pb）的累积现象也较为常见，甚至达到污染水平。这主要是由于肥料中含有一定量的重金属，磷肥和复合肥中的重金属主要来源于磷矿石及肥料加工过程，而有机肥中的重金属则主要来源于饲料添加剂。对各种化肥中重金属含量的分析表明，氮、钾肥中重金属的含量较低，磷肥中镉等重金属的含量较高，复合肥中重金属的含量则主要取决于生产原料及加工过程。不同类型肥料中重金属含量从高到低排列顺序为：磷肥＞复合肥＞钾肥＞氮肥^[4]。另外，杀虫剂、杀菌剂、除草剂、抗生素等农药中因含有砷、铅等也可能成为农田重金属的重要来源。农用薄膜等其他农用物资中往往也含有一定量的镉和铅，在大量使用塑料薄膜的设施中，如果不及及时清除残留在土壤中的农膜，其中的重金属也可能进入土壤并导致累积^[4]。

（三）我国农田土壤重金属污染的现状如何？

土壤重金属污染是指由于人类活动将外源重金属加入到土壤中，导致土壤中的重金属含量明显高于土壤背景值，从而造成土壤生态环境质量恶化的现象^[5,6]。我国受镉、砷、铅等重金属污染的耕地面积近 $2.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，约占总耕地面积的 1/5；其



中工业“三废”污染耕地 $1.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，污水灌溉的农田面积 $3.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。我国每年因重金属污染而减产粮食超过 $1.0 \times 10^7 \text{ t}$ ，另外每年被重金属污染的粮食也多达 $1.2 \times 10^7 \text{ t}$ ，由此造成的经济损失至少 200 亿元。例如：某省的 47 个县和郊区的 $2.59 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的耕地污染状况的调查结果显示，75% 的地区已受到不同程度的重金属污染的潜在威胁，而且污染有逐年加重的趋势。

当前，我国耕地重金属污染问题突出，总体形势不容乐观。呈现出以下两个特点：①污染面积大，超标严重。我国耕地土壤污染超标点位中 82.8% 为重金属超标点位，主要污染物为镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍 8 种。②重金属污染耕地分布区域较为广泛，尤其是西南、中南地区土壤重金属超标范围较大，长江三角洲、珠江三角洲等地区土壤污染问题也较为突出。

2016 年 5 月，国务院印发的《土壤污染防治行动计划》中提出，在现有相关调查基础上，我国将在 2018 年底前查明农用地土壤污染的面积、分布及其对农产品质量的影响。同时将建立土壤环境质量状况定期调查制度，每 10 年开展 1 次。

（四）我国在土壤污染防治方面开展了哪些工作？

与发达国家和地区相比，我国土壤污染防治工作起步较晚。从总体上看，目前的工作基础还很薄弱，土壤污染防治体系尚未形成。20 世纪 80~90 年代，我国科学家开始关注矿区土壤、污灌区土壤和六六六、滴滴涕农药大量使用造成的耕地污染等

问题。“六五”和“七五”期间，国家科技攻关项目支持开展农业土壤背景值、全国土壤环境背景值和土壤环境容量等研究，积累了我国土壤环境背景的宝贵数据，在此基础上制订并于1995年发布了我国第一个《土壤环境质量标准》（GB 15618—1995）。

近年来，我国土壤环境问题日益凸显，引起社会广泛关注。按照党中央、国务院决策部署，有关部门和地方积极探索，土壤污染防治工作取得一定成效。一是组织开展全国土壤污染状况调查，掌握了我国土壤污染特征和总体情况；二是出台一系列土壤污染防治政策文件，建立健全土壤环境保护政策法规体系；三是开展土壤环境质量标准修订工作，完善土壤环境保护标准体系；四是制定实施重金属污染综合防治规划，启动土壤污染治理与修复试点项目；五是编制土壤污染防治行动计划，全面推动土壤污染防治工作。

“十二五”期间，国家相继启动了973计划、863计划、科技支撑以及行业专项等重大课题30余项，投入大量资金，分别在农田土壤重金属污染监测检测技术、污染诊断和表征体系、生态安全阈值、阻控与修复技术方面开展了大量的研究工作。近年来，农业部和财政部启动了“农产品产地土壤重金属污染防治实施方案”，分别开展农田土壤重金属污染状况普查、国控点设置、污染修复治理及农产品产地禁产区划分等工作。农田土壤重金属污染调查点位达130多万个，并在2015年南方7省稻区开展加密调查，农田重金属污染修复治理面积达2000hm²。



（五）为什么土壤重金属污染治理那么难？

重金属污染物一旦进入土壤，就会与土壤成分发生吸附—解吸、沉淀—溶解、氧化—还原、螯合—解离等一系列物理—化学反应，进而形成不同的存在形态，有的甚至可能在土壤中转化为毒性更大的有机化合物（如 Hg），影响农作物的产量和质量^[7-9]。部分残留于土壤中的重金属将随着水循环由土壤迁移至地表水进而污染水环境，或通过不同途径进入食物链，在食物链不同营养级中累积、放大，严重危害人体健康^[10,11]。

与大气、和水体污染直观可见不同，土壤污染具有隐蔽性、滞后性的特点，不易被察觉或注意，再加上重金属污染范围广、持续时间长、无法被生物降解，由于生物体富集性、弱移动性等特点，大部分富集在耕层土壤中。土壤一旦因重金属积累而遭受污染，就很难消除。因此，重金属污染土壤的修复治理已成为世界性的难题。

（六）农田土壤中的重金属有哪些危害？

重金属在农田中的危害主要表现在对作物的危害，对土壤、水体质量的危害，对农产品安全的危害，以及通过农产品和水体对人类的危害。

农田土壤中过量的重金属对农作物具有很强的毒害作用：重金属可以破坏植物的组织，直接影响作物的生长发育，进而影响作物的产量和品质，如铜、锌等虽然是作物必需的微量营养元素，但作为重金属在灌溉水或土壤中达到一定浓度后，就