

博士文库



科技部软科学研究项目  
陕西省科技发展计划重大项目  
山西师范大学学术著作出版基金资助

# 农业土壤 重金属污染研究的理论与实践

郑国璋 著



THEORY AND PRACTICE OF  
RESEARCH ON HEAVY METAL POLLUTION  
IN AGRICULTURAL SOIL

中国环境科学出版社

# 农业土壤重金属污染研究的 理论与实践

郑国璋 著

科技部软科学研究项目  
陕西省科技发展计划重大项目  
山西师范大学学术著作出版基金资助

中国环境科学出版社·北京

**图书在版编目 (CIP) 数据**

农业土壤重金属污染研究的理论与实践 / 郑国璋著.  
北京: 中国环境科学出版社, 2007.5  
ISBN 978-7-80209-576-2

I. 农… II. 郑… III. 土壤污染: 重金属污染—  
研究 IV. X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 061814 号

责任编辑 丁 枚 孟亚莉  
责任校对 刘凤霞  
封面设计 龙文视觉/陈莹

---

出版发行 中国环境科学出版社  
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)  
网 址: <http://www.cesp.cn>  
联系电话: 010-67112765 (总编室)  
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京东海印刷有限公司  
经 销 各地新华书店  
版 次 2007 年 5 月第一版  
印 次 2007 年 5 月第一次印刷  
开 本 880×1230 1/32  
印 张 6.25  
字 数 160 千字  
定 价 20.00 元

---

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载，侵权必究】  
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换

# 前言

---

约 60%的人口、55%的耕地、72%的灌溉面积和 80%以上的工业总产值，国内生产总值占全省的 70%以上，在陕西省经济社会发展中的地位和作用举足轻重。随着渭河流域关中地区工农业生产的迅速发展和城市化进程的提高，关中地区农业土壤环境受到不同程度的污染。目前，由于世界范围内的食品污染问题日趋严重，人们的环境意识和食品安全意识不断提高，对绿色（有机）食品的需求量不断增加，而且国内外对农产品及果品的市场限制措施也逐步完善，对无公害食品和绿色食品产地环境条件制定了更为严格的标准，这对于关中地区农业生产特别是果品业的发展提出了更高的要求，也是关中地区农业发展面临的严峻问题。

本书是在陕西省科技发展计划重大项目（2003K12-G5）和科技部软科学研究项目（2004DGS3D026）支持下，开展的“渭河流域综合治理战略研究”课题研究成果的一部分，也是作者博士学位论文研究内容的进一步升华和提高。本书共 13 章，主要分为两部分：第一部分 1~6 章为基础理论部分，主要探讨了农业土壤重金属污染的国内外研究现状、重金属元素的地球化学特征及其在自然界中的赋存状态、土壤重金属污染对农田生态系统及人体健康的危害、重金属元素在土壤剖面中的垂直分布特征、土壤环境中重金属元素的主要污染源、农业土壤重金属污染的防治对策；第二部分 7~13 章为实践研究部分，主要包括渭河流域关中地区自然、经济和社会概况、关中地区典型农业区土壤重金属累积和污染现状的调查评价、关中地区农业土壤剖面中重金属元素的垂直分布规律、关中地区农业土壤环境中重金属的主要污染源调查、关中地区农业土壤重金属污染的防治对策与建议。

本书在研究工作中曾得到岳乐平教授、薛祥熙教授、张云翔教授、孙来久教授、李同升教授、李智佩研究员、康卫东副教授、李

天文副教授、何爱萍副教授的关心和支持，并得到徐友宁博士、张莉博士、弓虎军博士、杨利荣博士、张睿博士、李建星博士、陈超硕士、徐永硕士、康媛硕士、孙勃硕士、武力超硕士的支持和帮助；中国环境科学出版社在本书出版过程中给予大力支持和帮助。作者对他们表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，加之客观条件所限，书中会有许多不足之处，敬请读者批评指正！

郑国璋

2006.12

# 目 录

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪 论 .....                          | 1  |
| 1.1 土壤与土壤环境污染 .....                      | 1  |
| 1.2 国内外土壤重金属污染研究现状 .....                 | 8  |
| 第 2 章 重金属元素的地球化学特征及其在自然界中的<br>赋存状态 ..... | 16 |
| 2.1 重金属元素的地球化学特征 .....                   | 16 |
| 2.2 母岩和土壤中重金属元素的背景含量 .....               | 20 |
| 第 3 章 土壤重金属元素的迁移转化及其生态环境效应 .....         | 28 |
| 3.1 土壤重金属元素的迁移转化 .....                   | 28 |
| 3.2 土壤重金属污染物对农田生态系统的影响 .....             | 33 |
| 3.3 土壤重金属污染物对人体健康的危害 .....               | 40 |
| 第 4 章 土壤剖面中重金属元素的垂直分布特征 .....            | 51 |
| 4.1 土壤剖面中重金属元素垂直分布的基本特征 .....            | 51 |
| 4.2 主要重金属元素在土壤剖面中的垂直分布特征 .....           | 52 |
| 第 5 章 土壤环境中重金属元素的主要污染源 .....             | 56 |
| 5.1 工业污染源 .....                          | 56 |
| 5.2 农业污染源 .....                          | 60 |
| 第 6 章 土壤重金属污染的防治对策 .....                 | 68 |
| 6.1 土壤重金属污染的防控对策 .....                   | 68 |

|                                                    |            |
|----------------------------------------------------|------------|
| 6.2 土壤重金属污染的治理措施.....                              | 71         |
| <b>第7章 渭河流域关中地区概况 .....</b>                        | <b>78</b>  |
| 7.1 自然地理环境概况.....                                  | 78         |
| 7.2 社会经济特征.....                                    | 85         |
| <b>第8章 渭河流域关中地区土壤重金属污染研究现状.....</b>                | <b>89</b>  |
| 8.1 渭河流域综合治理研究现状.....                              | 89         |
| 8.2 关中地区农业土壤重金属污染研究现状.....                         | 90         |
| 8.3 关中地区农业土壤重金属污染特征因子的选择.....                      | 91         |
| 8.4 关中地区主要农业土壤类型重金属含量背景值.....                      | 91         |
| <b>第9章 渭河流域关中地区农业土壤重金属污染调查与评价.....</b>             | <b>93</b>  |
| 9.1 土壤采样.....                                      | 93         |
| 9.2 样品的处理与监测.....                                  | 97         |
| 9.3 评价标准与方法.....                                   | 101        |
| 9.4 评价结果.....                                      | 103        |
| <b>第10章 渭河流域关中地区农业土壤剖面中重金属元素的<br/>垂直分布特征 .....</b> | <b>126</b> |
| 10.1 农业土壤剖面(0~40 cm)重金属元素的<br>垂直分布特征 .....         | 126        |
| 10.2 农业土壤剖面(0~100 cm)重金属元素的<br>垂直分布特征 .....        | 130        |
| 10.3 主要结论.....                                     | 132        |
| <b>第11章 渭河流域关中地区农业土壤重金属污染源.....</b>                | <b>134</b> |
| 11.1 渭河流域关中地区重金属主要污染源调查 .....                      | 134        |
| 11.2 渭河流域关中地区典型地区农业土壤重金属污染源 .....                  | 139        |
| 11.3 主要结论.....                                     | 146        |



|                                                     |            |
|-----------------------------------------------------|------------|
| <b>第 12 章 渭河流域关中地区农业土壤重金属污染的防治对策 .....</b>          | <b>147</b> |
| 12.1 关中地区典型农业区土壤重金属污染治理措施 .....                     | 148        |
| 12.2 关中地区农业土壤重金属污染防控对策与建议 .....                     | 149        |
| <b>第 13 章 渭河流域关中地区农业土壤重金属污染调查评价的主要结论与对策建议 .....</b> | <b>155</b> |
| 13.1 关中地区农业土壤剖面中重金属元素的垂直分布特征 .....                  | 156        |
| 13.2 关中地区农业土壤重金属污染源 .....                           | 157        |
| 13.3 关中地区农业土壤重金属污染防治的对策与建议 .....                    | 157        |
| <b>参考文献 .....</b>                                   | <b>159</b> |
| <b>附录 .....</b>                                     | <b>174</b> |



## 第 1 章

# 绪 论

---

## 1.1 土壤与土壤环境污染

### 1.1.1 土壤圈

土壤圈 (pedosphere) 是地球表层系统中一个独特的圈层, 它处于岩石圈、生物圈、水圈和大气圈的界面交接地带, 是联系有机界和无机界的中心环节, 是结合自然地理环境各组成要素的纽带, 是地球表层系统中物质与能量迁移和转化的重要环节。土壤 (soil) 具有其独特的生成和发展规律, 具有物理的、化学的、生物学的一系列复杂属性和独特的功能。从地球化学的角度来看, 土壤是岩石圈表面在次生环境中发生元素迁移和形成次生矿物的近期堆积体; 从工程建筑学的角度出发, 它是建筑材料和承压基础的物体; 从农业或生物学的角度来讲, 它是地球陆地表面具有一定肥力的能够生

长植物的疏松表层，是天然植物和栽培作物的立地条件和生长发育基地，是人类赖以生存的重要自然资源；从环境科学的角度来看，土壤不仅是一种自然资源，还是人类生存环境的重要组成部分，它依据其独特的物质组成、结构和空间位置，在提供肥力的同时，还通过自身所具有的缓冲性、同化和净化功能，在稳定和保护人类生存环境中发挥着极为重要的作用。因而，土壤圈在维持生物圈的生命过程、生物多样性和人类社会可持续发展中扮演着重要而独特的角色。

农业土壤 (agricultural soil) 是人们在农业生产实践活动中，在逐渐认识土壤发生发展客观规律的基础上，通过耕作、排灌和施肥等农业技术措施来影响、控制和改变土壤的原有特性，使自然土壤产生和发展了在人类农业活动主导作用下的土壤熟化过程及其经济肥力，以满足人类社会对农林牧产品的需求。因此，农业土壤实际上是自然土壤在人类控制下不断演变而形成的人为土壤，是人类劳动的产物。

人类活动对农业土壤的影响具有双重性。农业土壤在合理利用的情况下，土壤肥力（自然肥力和人工肥力）是可以维护、更新和不断提高的，土壤环境质量可以得到改善，并为人类提供愈来愈多的优质农林牧产品。因此，土壤属于一种永续的可更新的自然资源；相反，在人类不合理的经营之下，则会引起土壤退化和土壤肥力的衰退，土壤环境质量的下降和土壤生态系统的恶化，最终导致农业土壤丧失其作为永续性的可再生资源的功能和作用。

### 1.1.2 土壤质量与土壤环境质量

土壤质量 (soil quality) 概念的提出始于 20 世纪 90 年代，由于全球土壤质量退化的加剧及其导致的农业生态环境质量也随之下降，影响到农业生产的可持续发展。同时，也由于在全球变化研究中，提高了对土壤圈在地球表层系统中的地位和作用的认识，才开始引起人们对土壤质量的关注和研究。

20 世纪 90 年代初，国外学者开始对土壤质量的定义、评价指

标与定量化方法等内容进行了研究和探讨。土壤质量是“土壤在生态系统界面内维持生产、保障环境质量、促进动物和人类健康行为的能力”（Doram & Parkin, 1994）；“在自然或管理的生态系统边界内，土壤具有动植物生产持续性，保持与提高水、气质量以及支持人类健康与生活的能力”（李天杰等，2004）。

中国土壤学家于 20 世纪 90 年代中期也开始关注土壤质量问题的研究，如赵其国等连续发表的《土壤质量与持续环境》的文章，中国土壤学会对“土壤质量演变机理与持续利用”重大自然科学基金立项研究报告（1999）中提出就土壤肥力质量、土壤环境质量和土壤健康质量等演变机理及其对土壤持续利用的影响，土壤质量指标体系的建立和评价，土壤质量和农产品品质的关系，中国土壤质量控制理论等基础研究，重点耕地土壤质量之护育等应用进行研究。

土壤质量（个体和圈层）是在其自然或人为的生态系统界面内维持持续生产，保障产品、水、气的环境质量，维持生态平衡，调节与控制环境变化，支持人类与动植物健康和生活的能力。土壤质量的概念是对土壤环境质量（soil environment quality）的内涵和外延的进一步深化和拓宽，它涵盖了包括土壤环境质量在内的土壤全部功能的质量：① 土壤的持续性生产能力，即以土壤肥力为标志的土壤生产力功能所代表的土壤质量。② 土壤的环境质量，它是指土壤的净化与缓冲能力，以及土壤圈对全球环境变化的控制与调节能力。如对大气圈的水分和热量平衡，温室气体的吸收与排放；对水圈的全球水分循环及水质的影响；对生物圈的生物地球化学和生物多样性的影响。③ 土壤的健康质量（或品质质量），是指影响人类和动植物健康的能力。④ 土壤的生态质量，即维护生态系统平衡和生物多样性的能力。因此，土壤质量概念的含义远远超过了土壤肥力、土壤环境质量和食物安全的最高标准，还关系到土壤圈在陆地生态系统的稳定性和多样性，地球表层环境系统物质与能量的良性循环及其可持续性的影响和作用（李天杰等，2004）。

### 1.1.3 土壤环境的自净功能

土壤是自然界赋予人类的宝贵资源，是人类赖以生存的物质基础，也是人类环境的重要组成部分，具有维持系统生态平衡的自动调节能力。土壤环境（soil environment）是一个被能量流和物质流贯穿的开放系统，具有吸收和储存各种物质、净化环境的功能和一定的缓冲作用。土壤环境的自净作用是指在自然因素作用下，通过土壤环境中存在的多种性质的化合物、无机与有机胶体和微生物，与进入土壤中的有毒有害物质，通过物理作用、化学作用、物理化学作用和生物作用，使污染物在土壤环境中的数量、浓度或形态发生变化，活性、毒性降低的过程。按其机理不同，可分为物理净化作用、物理化学净化作用、化学净化作用和生物净化作用四个方面。前三者主要体现在土壤环境的机械阻留、吸附（物理、物理化学净化作用）、沉淀溶解（化学净化作用）等方面。目前在吸附、解吸、沉淀和溶解方面研究得较多。

（1）吸附、解吸：土壤对污染物的吸附机理是多种多样的，如离子的静电吸附或通过水极性分子形成桥连；非离子型农药可通过矿物表面金属螯合。

（2）沉淀、溶解：沉淀和溶解是控制土壤环境系统溶液中污染物质浓度变化的基本过程。进入土壤环境的污染物常常由于与土壤固、液、气相的物质成分作用发生化学沉淀、络合、螯合，或因土壤的酸度变化、氧化还原条件变化以及其他离子浓度变化而发生的形态变化，导致溶液中污染物质浓度变化。

（3）生物净化作用：土壤生物（土壤微生物、土壤动物）对污染物的吸收、降解、分解和转化过程与作物对污染物的生物性吸收、迁移和转化是土壤环境系统中两个最重要的物质与能量的迁移转化过程，也是土壤环境的最重要的净化功能。土壤环境的净化作用的强弱取决于生物净化作用，而生物净化作用的大小又决定于土壤生物和作物的生物学特性。

但是，土壤环境中有毒有害物质的输入、积累与土壤的自净作

用是两个方向相反、同时存在的过程，二者处于动态平衡。当土壤中有毒有害物质的输入数量和速度超出土壤的自净能力，打破二者的动态平衡时，土壤环境就会发生污染，土壤的环境质量和功能就会下降。土壤环境的纳污和自净能力与土壤环境容量有关，当土壤中污染物质超出其临界值时，土壤的组成、结构和功能均会发生变化，最终导致土壤资源的破坏。同时，土壤作为二次污染源，向环境输出污染物，会导致其他环境要素受到污染。

#### 1.1.4 土壤环境污染

农业生态环境中，土壤是连接自然环境中无机界与有机界、生物界与非生物界的重要枢纽。在正常情况下，物质和能量在环境和土壤之间不断进行交换、转化、迁移和积累，处于一定的动态平衡状态中，不会发生土壤环境的污染。但是，如果人类活动产生的污染物，通过各种途径输入土壤环境，其数量和速度超过了土壤环境的净化能力，从而使土壤污染物的累积过程逐渐占据优势，土壤的生态平衡遭受破坏，正常功能失调，导致土壤环境质量下降，影响作物的正常发育，引起作物减产和农产品质量降低，并通过食物链进一步影响畜禽、鱼类和野生动物的生长发育，最终将危及人体健康，以致人类的生存和发展。

因而，土壤环境污染（soil environmental pollution）是指人为因素有意或无意地将对人类本身和其他生命体有害的物质施加到土壤环境中，使其某种成分的含量超过土壤自净能力或者明显高于土壤环境基准或土壤环境质量标准，并引起土壤环境质量恶化的现象。土壤环境污染是全球三大环境要素（大气、水体和土壤）的污染问题之一，也是全世界普遍关注和研究的主要环境问题。

#### 1.1.5 土壤环境污染的特点

##### 1.1.5.1 隐蔽性或潜伏性

土壤污染是污染物在土壤中长期积累的过程，一般要通过对土

壤污染物、植物生态效应、植物产品产量和质量及环境效应监测，其后要通过长期摄食由污染土壤生产的植物产品的人体和动物的健康状况才能反映出来。因此，土壤污染物具有隐蔽性和潜伏性，不像大气污染和水污染那样容易为人们所察觉。如 20 世纪 60 年代发生在日本的“富山事件（骨痛病）”，经过 10 年后才知道，主要是由于炼锌厂排放的含镉废水通过污水灌溉进入稻田，当地居民食用了富集镉的“镉米”引起的。

#### 1.1.5.2 不可逆性和长期性

污染物进入土壤环境后，与复杂的土壤组成物质发生一系列迁移转化作用。其中，重金属污染物进入土壤是一个不可逆过程，污染物最终形成难溶化合物沉积在土壤环境中。因此，土壤一旦遭受污染极难恢复。如我国沈阳、抚顺污水灌溉区遭受土壤重金属污染后，采用了施加改良剂、深翻、清水灌溉、植物修复等各种治理措施，经过十多年的努力，付出了大量的劳动与代价，但收效甚微。

#### 1.1.5.3 污染后果的严重性

土壤污染物进入土壤环境后必然通过食物链的迁移转化，影响植物产品和动物产品的质量与食品安全，最终会影响到人体的健康和安全。有报道表明，我国某些地区居民的癌症发病率与土壤污染的程度呈线性相关。

### 1.1.6 土壤环境污染的类型

土壤环境中的污染物可以分为无机类（重金属元素、放射性元素等）和有机类（有机农药、酚类物质、氰化物、石油、有害微生物等）两种类型。按照土壤污染源和污染途径可以分为以下类型。

#### 1.1.6.1 水质污染型

主要是工业废水、城市生活污水和受污染的地表水，经由污水灌溉造成的土壤污染。尤其是缺水地区，引用污水灌溉，使土壤受

到重金属、无机盐、有机物和病原体的污染。其特点是污染物集中于土壤表层,但随着污灌时间的延长,某些可溶性污染物可由土壤表层渐次向心土层、底土层扩散,甚至通过渗透到达地下潜水层。污染土壤一般沿河流、灌溉干支渠呈树枝状或片状分布。

#### 1.1.6.2 大气污染型

大气污染物,如大气气溶胶的重金属、放射性元素、酸性物质等,通过干、湿沉降过程进入农田造成的土壤污染。其特点是污染土壤以大气污染源为中心呈扇形、椭圆形或条带状分布。其污染的面积、程度和扩散的距离,取决于污染物质的种类、性质、排放量、排放形式及风力大小等。大气型土壤污染物主要集中在土壤表层。

#### 1.1.6.3 固体废弃物污染型

工矿企业废弃物、城市垃圾、污泥等固体废弃物的堆积、掩埋、处理不仅占用大量的耕地,而且污染物会通过大气迁移、扩散、沉降,或降水淋溶、地表径流等污染周围地区的土壤,属点源型土壤污染。

#### 1.1.6.4 农业污染型

农业生产过程中,由于农药、化肥、垃圾堆肥、污泥长期不合理使用造成的土壤污染。主要污染物有化学农药、重金属、病原微生物等。属面源型污染,污染物集中于土壤耕作层。其污染程度与化肥、农药的数量、种类、利用方式及耕作制度等有关。

#### 1.1.6.5 综合污染型

土壤污染往往是多污染源和污染途径同时造成的,即某地区的土壤污染可能受大气、水体、农药、化肥和垃圾污泥堆肥的综合影响所致,其中以某一种或两种污染源污染影响为主。



### 1.1.7 土壤重金属污染

土壤重金属污染 (heavy metal pollution in soils) 是指由于人类活动使重金属在土壤中的累积量, 明显高于土壤环境背景值或土壤环境质量标准, 致使土壤环境质量下降和农田生态环境恶化的现象。其中, 尤其受人们关注的是对生物毒性较大的汞 (Hg)、镉 (Cd)、铅 (Pb)、铬 (Cr)、铜 (Cu) 以及类金属砷 (As)。土壤环境中的重金属污染物在土壤中的滞留时间长, 一般不易迁移, 也不能被土壤微生物分解, 相反可在土壤中累积, 并通过食物链在生物体中富集, 或转化为毒性更大的甲基化合物, 对食物链中某些生物达到有害水平, 最终在人体内蓄积而危害人体健康。重金属元素在土壤中的累积初期, 不易表现出毒害效果, 一旦毒害作用表现出来, 其自然净化过程和人工治理都是非常困难的, 是具有潜在性危害的无机污染物。如 20 世纪 50 年代前后西方发达国家出现的震惊世界的八大公害事件中, 日本的“富山事件 (骨痛病)”和“水俣事件”就是由于重金属镉 (Cd) 和甲基汞污染中毒导致的 (刘培桐, 1995)。在我国, 受重金属污染的耕地已达 2 000 万  $\text{hm}^2$ , 约占总耕地面积的 1/5, 每年因重金属污染而减产粮食超过 1 000 万 t, 被重金属污染的粮食每年多达 1 200 万 t, 合计经济损失至少 200 亿元 (陈同斌, 1999; 李天杰等, 2004)。由于土壤重金属污染物具有多源性、隐蔽性、积蓄性、难以恢复性和污染后果的严重性, 被环境学界比喻为“化学定时炸弹”, 已成为全球环境变化研究的重大问题之一, 是近年来环境科学领域研究的热点问题。

## 1.2 国内外土壤重金属污染研究现状

### 1.2.1 土壤环境元素背景值

土壤环境元素背景值或土壤环境背景值 (environmental background value of soils) 是指一定区域内自然状态下, 未受或少