



# 城镇土壤重金属的 层次健康风险评估与 管理体系探索

李飞 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



本著作由教育部人文社会科学基金青年项目：  
城镇环境污染物的层次健康风险评价与动态管理系统研究(17YJ CZH081)资助出版

# 城镇土壤重金属的 层次健康风险评价与 管理体系探索

李飞 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

城镇土壤重金属的层次健康风险评价与管理探索/李飞著.  
—武汉:武汉大学出版社,2020.11  
ISBN 978-7-307-21683-9

I.城… II.李… III.城市—土壤污染—重金属污染—风险评  
价—研究 IV.X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 138425 号

责任编辑:黄金涛      责任校对:李孟潇      版式设计:马 佳

---

出版发行: **武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)  
(电子邮箱: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:广东虎彩云印刷有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:17.75 字数:247千字 插页:3

版次:2020年11月第1版 2020年11月第1次印刷

ISBN 978-7-307-21683-9 定价:50.00元

---

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

# 前 言

《国家环境保护“十二五”环境与健康工作规划》和《国家环境与健康行动计划(2007—2015)》均指出“伴随着我国工业化、城镇化的快速发展，环境污染影响人民群众健康与安全的问题凸显，保护环境、保障健康成为人民群众最紧迫的需要”。在“十三五”期间，我国坚持绿色发展理念，党的十八届五中全会更首次将生态文明写进了五年规划。土壤是城镇生态环境系统的重要组成部分，而赋存于土壤中的重金属通过多介质环境间的迁移转化后可经由直接或间接暴露途径给城镇居民健康造成危害或带来风险。2014年我国环保部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示：全国土壤总的点位超标率为16.1%，重金属污染是土壤污染的特征之一。伴随着我国快速的城镇化，近年来与城镇土壤重金属相关的公众危害事件不时发生，对城镇居民的人身和财产安全构成了威胁，因此建立健全科学的、可操作性强的城镇土壤重金属的健康风险评价与管理成为保障居民健康与安全的关键，也是我国生态文明建设的内在要求。同时，在市场经济的驱动下我国区域土壤环境调查、风险评价和污染修复产业将超千亿元的市场规模无疑是本研究发展的巨大推力。

目前，国内外已发展出了较为成熟的污染场地风险评价与管理框架，但鉴于土壤科学的研究进展和各国不同城镇在土地利用现状、受体空间分布、受体暴露特征、风险评价与管理的预算投入程度等方面存在的特征差异，在国内外文献和实践中暂时没有形成一套科学而高效的城

镇土壤环境健康风险评价与量化管理的模板框架，城镇环境下土壤重金属污染的健康风险评价、污染风险来源解析和风险量化管理等关键技术亟须改进、整合或开发。

在上述研究背景下，本书作者经过近十年的科研探索，结合相关工程项目的实践经验，在同行专家的不断指导与启发下，撰写了本书，旨在针对该领域研究中的现存不足，通过对关键知识的整合、关键技术的建立健全等，架构一套科学、高效的城镇土壤重金属的层次评价与管理体制，为读者提供参考或指导。

全书共分为 7 章。

第 1 章 城镇土壤重金属污染与管理基础：主要内容包括城镇土壤重金属污染与管理引论，综述城镇土壤重金属的健康风险评价与管理领域的研究演进，阐明了著作的研究目的和思路；

第 2 章 城镇土壤环境中重金属的污染格局研究：基于 3S 技术和多元统计分析技术探索城镇不同土地利用方式下的土壤重金属污染格局，以长沙市先导区为实例，研究内容包括区域的概况，区域土壤的布点、实地采样和检测分析，城镇土壤重金属总量的空间统计分析，城镇土壤重金属的化学形态组成的空间统计分析和城镇土壤中重金属与土壤理化性质之间的相关关系研究等；

第 3 章 城镇土壤环境重金属污染的初步风险识别：基于城镇土壤重金属污染评价研究的现状与不足，在地累积指数评价模型的基础上，构建土壤重金属生物毒性双权重系数，同时引入数学运算效率较高且对实际应用中常见的贫数据或低精度数据具有良好适用性的随机模糊方法，构建基于生物毒性双权重的土壤重金属污染的随机模糊评价模型，并进行了实证研究；

第 4 章 3S 技术下的城镇土壤中重金属的层次健康风险评价研究：针对经典区域健康风险评价理论及其实践中的不足，借助 3S 技术和土壤重金属的污染格局，尝试将关于区域土地利用方式、重金属的生物可利用性程度和区域可能受体密度分布的量化考量嵌入经典评价体系中，

建立城镇土壤重金属的层次健康风险评价方法，并进行了实证研究；

第5章 城镇土壤重金属污染的来源综合解析技术：基于大量各环境介质中重金属的来源解析经验，鉴于同位素示踪技术的成本较高暂时难以推广，提出将常用的多元统计分析方法与3S技术下的土地利用现状空间分析、历史资料搜集综合和特征污染源实地验证相结合，探索形成一套兼顾高效性和准确性的城镇土壤重金属污染的来源综合解析技术，并进行了实证研究；

第6章 城镇土壤重金属污染的风险量化管理决策体系：基于所有章节的研究基础，提出集城镇土壤环境污染监测、城镇土壤潜在风险重金属识别、城镇土壤优先重金属的层次健康风险评价、城镇土壤重金属污染健康风险定量管控等功能和城镇土壤环境综合信息数据库为一体的城镇土壤重金属污染的风险量化管理决策体系，并进行了实证研究；

第7章 结论与展望：对本书进行总结和展望。

作者特别感谢一直以来提供重要指导的湖南大学曾光明教授和黄瑾辉教授；感谢提供资料、研究成果的国内外学者和启发作者编写此书的各位专家；特别感谢中南财经政法大学信息与安全工程学院同事们的大力协助；在成书过程中，感谢湖南大学袁兴中教授、梁婕教授、李晓东教授、陈桂秋教授、龚继来教授、陈耀宁老师、李源博士、李雪博士、黄大伟博士、王晓钰博士、肖志华博士、刘文楚硕士等老师和同学的无私支持。感谢教育部人文社会科学基金青年项目：城镇环境污染物的层次健康风险评价与动态管理系统研究(17YJCZH081)的资助。

衷心感谢我的家人默默承担写书之外的大量工作，付出了辛勤的汗水。

由于著者水平和时间所限，书中难免存在疏漏或不足，敬请读者批评指正。

李 飞

2018年秋于中南财经政法大学文永楼

# 目 录

<b>第 1 章 城镇土壤重金属污染与管理基础</b> .....	1
1.1 城镇土壤重金属污染与管理引论 .....	1
1.2 城镇土壤环境重金属污染 .....	4
1.3 城镇土壤环境重金属的污染评价.....	13
1.4 城镇土壤环境重金属的健康风险评价与管理.....	16
1.5 研究进展和现存问题.....	20
参考文献 .....	26
<b>第 2 章 城镇土壤环境中重金属的污染格局研究</b> .....	33
2.1 城镇概况.....	33
2.2 城镇土壤的布点、采样与样品分析.....	38
2.3 城镇土壤重金属总量的空间统计分析.....	48
2.4 城镇土壤重金属的化学形态组成特征.....	57
2.5 城镇土壤中重金属与土壤理化性质之间的相关关系研究.....	63
2.6 小结.....	75
参考文献 .....	78
<b>第 3 章 城镇土壤环境重金属污染的初步风险识别</b> .....	83
3.1 基于生物毒性双权重的土壤重金属污染的随机模糊评价 模型.....	85

3.2	基于所建随机模糊评价模型的初步风险识别流程·····	91
3.3	实例城镇研究·····	93
3.4	基于生物毒性双权重的城镇土壤重金属的风险模糊评价 软件·····	125
3.5	小结·····	133
	参考文献·····	134
<b>第4章</b>	<b>3S技术下的城镇土壤中重金属的层次健康风险评价</b>	
	研究·····	138
4.1	不同土地利用方式下城镇土壤的健康风险评价流程·····	139
4.2	城镇土壤重金属的层次健康风险评价模型的构建·····	147
4.3	实例城镇研究·····	152
4.4	小结·····	169
	参考文献·····	170
<b>第5章</b>	<b>城镇土壤重金属污染的来源综合解析技术·····</b>	<b>173</b>
5.1	来源解析中常用的多元统计技术·····	174
5.2	实例城镇研究·····	176
5.3	小结·····	182
	参考文献·····	183
<b>第6章</b>	<b>城镇土壤重金属污染的风险量化管理决策体系·····</b>	<b>188</b>
6.1	国内外城镇土壤中重金属污染风险的防控指标体系综述·····	189
6.2	城镇土壤重金属污染健康风险管理决策体系构建·····	191
6.3	城镇土壤优先控制重金属的风险量化管控·····	195
6.4	小结·····	206
	参考文献·····	207

---

第 7 章 结论与展望	209
7.1 主要结论	209
7.2 创新点	211
7.3 展望	212
附录 ERFA_SHM_V1.0 源程序	215

# 第 1 章 城镇土壤重金属污染 与管理基础

## 1.1 城镇土壤重金属污染与管理引论

联合国经济和社会事务部人口司发布的《世界城市化展望》2014 年修订版 (World Urbanization Prospects 2014 Revision) 显示: 从 1950 年到 2014 年, 全球城市人口从 7.46 亿增加至 39 亿, 占全世界总人口的 54%; 尽管亚洲的城市化率较低, 但由于人口基数大, 亚洲仍然是世界上城市人口最多的地区, 占全球城市人口总数的 53%。城镇是人类活动高度集中的场所, 人口相对密集、分布不均衡, 利用和消耗着大量的自然资源, 同时产生大量的污染物, 当污染物超过城镇环境自身负荷时, 则会使城镇环境受到污染和破坏。<sup>[1-3]</sup> 随着我国快速的城镇化和工业化, 相对短期而剧烈的人类活动将大量有机污染物 (如多环芳烃、酚类等) 和无机污染物 (如重金属、含砷化合物等) 带入到城镇环境中, 造成这些污染物在城镇环境中积累, 并可能通过土壤、水体、大气等多介质环境间的迁移转化直接或间接地对城镇人群健康和城镇生态安全造成危害或风险。<sup>[4-6]</sup> 城镇土壤是城镇生态环境的重要组成部分, 其与城镇水体、大气、地下水等环境要素均密切相关, 处于城镇生态环境的中心位置, 其既是各种污染物的汇聚地, 也是各种污染物的源, 故常被作为城镇综合环境质量的重要指示因子。<sup>[7-9]</sup> 重金属是一类具有富集性, 并

很难在环境中降解的有毒污染物,<sup>[10]</sup>城镇土壤重金属污染由于重金属来源广、形式多、迁移复杂等特性而导致其较难管控。城镇工业活动产生的三废物、交通尾气、污水灌溉、不当的肥料及农药施用已经成为城镇土壤重金属的主要来源,<sup>[4,7,11]</sup>城镇中不同的土地利用方式及人类活动扰动时间和程度差异是影响城镇土壤重金属污染的重要因素。<sup>[7,12]</sup>近年来,伴随着国内外与城镇土壤重金属污染相关的环境公众危害事件的不时发生<sup>[13,14]</sup>和部分国家城镇化进程的加速,<sup>[15]</sup>关于城镇土壤重金属的污染特征与机理、评价与管理的相关研究与实践已成为各国必须面对的重大课题,其研究成果对城镇经济社会的可持续发展、区域环境公平的维护和城镇生态文明建设等将具有重要意义。

《国家环境保护“十二五”环境与健康工作规划》和《国家环境与健康行动计划(2007—2015)》均指出“伴随着我国工业化、城镇化的快速发展,环境污染影响人民群众健康与安全的问题凸显,保护环境、保障健康成为人民群众最紧迫的需要”。城镇土壤中的重金属可能经由误食土壤、皮肤接触和呼吸吸入等直接或间接暴露途径给城镇居民健康造成短期危害或带来长期风险。<sup>[16]</sup>预计到 2050 年,全球城市人口将再增加 25 亿,全球城市人口比例将达 66%,其中近九成新增城市人口集中在亚洲和非洲(《世界城市化展望》)。未来城市人口增加最多的国家将是印度、中国和尼日利亚,从 2014 年到 2050 年,这三个国家将分别增加 4.04 亿、2.92 亿和 2.12 亿城市人口,占全球新增城市人口的 37%。在我国现城镇化率已达 53.73%(中国国家统计局,2014 年)和全国土壤总的超标率为 16.1%<sup>[17]</sup>的背景下,将城镇土壤重金属与城镇人群健康相关联的研究符合国家和人民的现实需要。基于我国 2005—2013 年的土壤普查数据得到的全国土壤中重金属(包括镉、汞、铅、铬、砷、铜、锌和镍)通过经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入三种暴露途径的非致癌总危害系数空间分布表明:中国大陆地区 29 个省、自治区和直辖市中的 45%存在对儿童受体的中等潜在非致癌风险,但暂时均未超过可接受非致癌风险水平限值。<sup>[18]</sup>同时,研究和实践已表明我国现行的《土壤环境

质量标准(GB15618—1995)》为主的土壤环境管控体系已不能适应我国当下复杂的环境变化和“绿色”的社会经济发展要求,<sup>[19]</sup>据报道国家《土壤污染防治法》的立法工作已进入前期准备阶段,并且继“大气十条”后,国务院正在编制《土壤环境保护和污染治理行动计划》。这都说明因我国城镇土壤重金属污染而引发的城镇人群健康风险已不容忽视。

因此,作为在过去20年间被美国环保署、国际化学品安全规划署等大力推动和发展的健康风险评价与管理技术被寄予厚望,国内外已发展出了较为成熟的污染场地健康风险评价与管理框架体系,但鉴于污染场地土壤与城镇土壤的自身特性及土地面积、功能等方面存在较大差异,城镇土壤重金属污染机理更为复杂并涉及更多方面的影响因素,故目前国内外仍暂时没有形成一套科学而高效的城镇土壤环境健康风险评价与管理的框架体系。世界银行发布的《中国污染场地的修复与再开发的现状分析》也指出“在目前中国污染场地(土壤)面积大数量多,而修复资金有限的现实情况下,中国应结合本国污染土地的实际情况建立高效、分优先级的污染土地风险等级系统”。鉴于土壤科学研究的最新进展和各国不同城镇在土地利用现状、受体空间分布、受体暴露特征、风险评价与管理经济投入程度上存在的显著特征差异,城镇环境下的土壤重金属健康风险评价、土壤风险来源解析和风险量化管理等关键技术均有待改进、整合或开发。

综上,以保护城镇居民受体健康为核心目标,如何科学合理地城镇土壤环境中重金属污染进行健康风险评价与管理,从而辅助包括区域土壤修复决策、区域土壤标准值与行动值的制定及相关政策法规的建立健全,具有较强的科研、现实和战略意义。以科学的健康风险评价和我国的国情为出发点,如何架构起具有中国特色的、易推广使用的城镇土壤环境污染物的健康风险评价方法和相应的风险管理体系成为亟需探索的基础研究课题。最后,2015年是被联合国粮食与农业组织(FAO)认定为国际土壤年,在市场经济的驱动下,土壤污染修复产业受到广泛关注。据公开资料显示,全国受污染耕地1.5亿亩,占18亿亩耕地的

8.3%，大部分为重金属污染。随着土壤污染形势的加剧，土壤污染治理逐渐引起管理层的重视，相关治理政策不断释放，土壤修复行业也迎来政策红利。同时，已发布的《2014—2015年中国粮食安全发展报告》预测：我国粮食总产将有望达到6.2亿吨左右，在没有重大政策出台的前提下，国内粮食仍将连年丰收。但当前每年受重金属污染的粮食超过1200万吨，污染治理已经引起管理层的重视，有望出台粮食重金属污染防治相关政策。我国土壤污染日趋严重，防治土壤污染已迫在眉睫。近日，被称为“土十条”的《土壤环境保护和污染治理行动计划》已由环保部提交至国务院审核，预计2016年中或2017年初将会出台。预计未来率先启动的是具有较高商业价值的“城市污染场地修复”和维系政府民生工程的部分“耕地修复”（<http://www.hbzhan.com/news/detail/101212.html>）。我国城镇土壤污染物健康风险评价和修复的产业市场规模将超过10000亿元，这无疑是推动相关课题研究发展的巨大推力，这使得本研究也具有了极强的社会经济前景。

## 1.2 城镇土壤环境重金属污染

### 1.2.1 土壤及土壤污染

土壤是孕育万物的摇篮，是人类文明的基石。ISO(2005)从土壤的组成和产生考虑，认为土壤是“由矿物颗粒、有机质、水分、空气和活的有机体以发生层的形式组成，是经风化和物理、化学以及生物过程共同作用形成的地壳表层”。运用当代土壤圈物质循环的观点，人们对土壤的认识和理解得到进一步地深化和拓展，现今考虑到土壤抽象的历史地位、具体的物质描述以及代表性的功能表征，可将土壤作如下定义，即“土壤是历史自然体，是位于地球陆地表面和潜水域底部具有生命力、生产力的疏松而不均匀的聚集层，是地球系统的组成部分和调控环境质量的中心要素”。<sup>[12]</sup>土壤环境作为一个极为复杂的复合体系，包含

固相、液相和气相，同时其组分变化巨大。另一方面，土壤环境系统与生长于土壤中的植物系统之间相互作用组成了土壤植物生态系统。<sup>[12,20]</sup>

环境领域的土壤污染主要指由于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或制剂施加到土壤中，使其增加了新的组分或某种成分的含量明显高于原有含量，并引起现存的或潜在的土壤环境恶化和相应危害的现象。

根据土壤学的内容，土壤污染具有三大特点：<sup>[12,20-21]</sup>

(1) 隐蔽性或潜伏性。

水体和大气的污染比较直观，严重时通过人群的感官即能发现，而土壤污染则往往要通过农作物包括粮食、蔬菜、水果或牧草以及其对应人群或动物的健康状况才能反映出来，从遭受污染到产生后果有一个逐步累积的过程，具有隐蔽性或潜伏性。例如，作为世界十大公害事件的日本痛痛病事件，即是由于居民常年食用被含镉废水污染了的土壤所生产的“镉米”所致(重病区大米含镉量平均为 0.527 mg/kg)，此时，致害的那个铅锌矿已经开采结束了，期间历经二十余年。我国也有例如张士灌区等土壤污染区的相关人和家畜受到明显污染危害的案例。

(2) 不可逆性和长期性。

土壤一旦遭受到污染后极难恢复，重金属元素对土壤的污染是一个不可逆的过程。例如，我国东北张士灌区的镉污染造成了大面积的土壤毒化、水稻矮化、稻米异味且含镉量超过卫生标准，经过很多年的艰苦努力，包括施用改良剂、深翻、清灌、客土和选择品种等各种措施，才逐步恢复其部分生产力，付出了大量的代价。

(3) 后果的严重性。

一旦土壤受到污染，生物多样性、生物循环和水循环(包括水质和水循环过程)等也就必然受到相应的影响。另一方面，由于土壤污染的隐蔽性以及不可逆性(或长期性)，因此往往通过食物链危害动物和人类的健康。例如有研究表明，土壤和粮食重金属污染与一些地区居民肝肿大有着显著的剂量效应关系，污灌引起的污染越严重，人群的肝肿大

概率就越高。

土壤的污染源可分为自然源和人为源。自然源是指自然界自行向环境排放有害物质或造成有害影响的场所，此种状况一般称为自然灾害，如正在活动的火山等。人为源是指人类活动所形成的污染源，是科学研究的主要对象，而在这些污染源中，化学品对土壤的污染是人们最为关注的，按照物质或制剂进入土壤的途径所划分的途径可划分土壤污染源为污水灌溉、固体废物的利用、农药和化肥的施用、大气沉降物等，具体情况如下：

#### (1) 污水灌溉。

生活污水和工业废水中，含有氮、磷、钾等许多植物所需要的养分，所以合理地使用污水灌溉农田，一般有增产效果。但是，污水中还含有重金属、酚、氰化物等许多有毒有害的物质，如果污水没有经过必要的处理而直接用于农业灌溉，则会将污水中有毒有害的物质带至农田，污染土壤。例如冶炼、电镀、燃料、汞化物等工业废水能引起镉、汞、铬、铜等重金属污染；石油化工、肥料、农药等工业废水会引起酚、三氯乙醛、农药等有机物的污染。

#### (2) 固体废物的利用。

工业废物和城市垃圾是土壤的固体污染物。例如，各种农用塑料薄膜作为大棚、地膜覆盖物被广泛使用，如果管理、回收不善，大量残膜碎片散落田间，会造成农田“白色污染”。这样的固体污染物既不易蒸发、挥发，也不易被土壤微生物分解，是一种长期滞留土壤的污染物。

#### (3) 化肥和农药的施用。

施用化肥是农业增产的重要措施，但不合理的化肥使用，也会造成土壤污染。长期大量使用氮肥，会破坏土壤结构，造成土壤板结、生物学性质恶化，影响农作物的产量和质量。过量地使用硝态氮肥，会使饲料作物含有过多的硝酸盐，妨碍牲畜体内氧的输送，使其患病，严重的导致死亡。农药能防治病、虫、草害，如果使用得当，可保证作物的增产，但它也是一类危害性很大的土壤污染物，施用不当，会引起土壤污

染。喷施于作物体上的农药(粉剂、水剂、乳液等),除部分被植物吸收或逸出进入大气外,约有一半左右散落于农田,这一部分农药与直接施用于田间的农药(如拌种消毒剂、地下害虫熏蒸剂和杀虫剂等)构成农田土壤中农药的基本来源。农作物从土壤中吸收农药,在根、茎、叶、果实和种子中积累,通过食物、饲料危害人体、牲畜的健康。此外,农药在杀虫、防病的同时,也使有益于农业的微生物、昆虫、鸟类受到伤害,破坏了生态系统,使农作物遭受间接损失。

#### (4)大气沉降物。

大气中的有害气体主要是工业中排出的有毒废气,它的污染面大,会对土壤造成严重污染。工业废气的污染大致分为两类:气体污染,如二氧化硫、氟化物、臭氧、氮氧化物、碳氢化合物等;气溶胶污染,如粉尘、烟尘等固体粒子及烟雾,雾气等液体粒子,它们通过沉降或降水进入土壤,造成污染。例如,有色金属冶炼厂排出的废气中含有铬、铅、铜、镉等重金属,对附近的土壤造成污染;生产磷肥、氟化物的工厂会对附近的土壤造成粉尘污染和氟污染。

土壤污染的类型目前并无严格的划分,如从物质的属性来考虑,一般可分为有机物、无机物、土壤微生物和放射性物质的污染。

#### (1)有机物污染。

有机物污染可分为天然有机污染物与人工合成有机污染物,这里主要是指后者,它包括有机废弃物(工农业生产及生活废弃物中生物易降解与生物难降解有机毒物)、农药(包括杀虫剂、杀菌剂与除莠剂)等污染。有机污染物进入土壤后,可危及农作物的生长与土壤生物的生存,如稻田因施用含二苯醚的污泥曾造成稻苗大面积死亡,泥鳅、鳝鱼绝迹。人体接触污染土壤后,手脚出现红色皮疹,并有恶心、头晕现象。农药在农业生产上的应用尽管收到了良好的效果,但其残留物却污染了土壤及其对应的食物链。近年来,塑料地膜地面覆盖栽培技术发展很快,由于管理不善,部分膜被弃于田间,它已成为一种新的有机污染物。

#### (2)无机物污染。