

土壤重金属污染监测及风险评估体系构建

荆磊¹ 李浩²

(青岛斯坦德衡立环境技术研究院有限公司, 山东 青岛 266109)

【摘要】土壤重金属污染已成为全球性的环境问题, 严重威胁人体健康和生态安全。本文基于国内外相关研究成果, 从土壤重金属污染监测与风险评估两个方面入手, 探讨了构建土壤重金属污染监测及风险评估体系的必要性和可行性。在分析现有监测和评估方法的基础上, 提出了一套包括监测网络布设、采样与分析、数据管理、风险识别、风险表征、风险评价和风险管理等环节的土壤重金属污染监测及风险评估技术体系。该体系可为土壤重金属污染防治、农产品质量安全控制和国家环境管理决策提供科学依据。

【关键词】土壤; 重金属污染; 监测; 风险评估; 体系构建

引言:

随着工业化和城市化进程的加快, 以及矿产资源的大规模开发利用, 土壤重金属污染日益严重, 已成为制约区域可持续发展的瓶颈性问题。据统计, 我国污染耕地面积已达 2000 万公顷, 其中重金属污染耕地达 2000 万亩。土壤重金属污染不仅影响农作物的产量和品质, 而且通过食物链富集进入人体, 危害人体健康。因此, 开展土壤重金属污染监测与风险评估研究, 对于保障粮食安全、促进生态文明建设具有重要意义。

一、土壤重金属污染的危害与现状

(一) 土壤重金属污染的危害

土壤重金属污染对环境和人体健康造成严重威胁。重金属在土壤中具有持久性、不可降解性和生物富集性等特点, 一旦进入土壤, 便难以去除。重金属污染的土壤会影响植物的生长发育, 导致农作物产量和品质下降。同时, 重金属可通过食物链富集, 最终危害人体健康。例如, 镉、铅、汞等重金属元素可引起人体神经系统损伤、内分泌紊乱、免疫功能低下等问题, 甚至导致癌症的发生。此外, 土壤重金属污染还会破坏土壤生态系统平衡, 降低土壤微生物多样性和活性, 影响土壤的正常功能。

(二) 我国土壤重金属污染现状

我国土壤重金属污染问题日益突出, 已成为制约区域可持续发展的瓶颈性问题。据第一次全国土壤污染状况调查公报显示, 我国土壤总的点位超标率为 16.1%, 其中镉、汞、砷、铅等重金属污染尤为严重。我国土壤重金属污染具有区域分布不均衡、污染程度差异大、污染类型多样等特点。西南、中南等地区土壤重金属污染较为严重, 而东北、华北等地区相对较轻。矿产资源开发区、工业园区、污灌区等是土壤重金属污染的高风险区。农田土壤重金属污染主要来源于工业“三废”污染、农药化肥污染、灌溉水污染和大气沉降等, 城市土壤重金属污染主要来源于交通排

放、燃煤排放和固体废物污染等。

(三) 国外土壤重金属污染研究进展

国外对土壤重金属污染的研究起步较早, 在污染现状调查、污染机理、风险评估、修复治理等方面取得了丰硕成果。美国、加拿大、欧盟等发达国家和地区均建立了较为完善的土壤重金属污染监测网络, 定期开展土壤环境质量调查, 并建立了配套的土壤环境标准和管理制度。在污染机理方面, 国外学者研究了重金属在土壤中的吸附、迁移转化、生物有效性等过程, 阐明了土壤理化性质、环境因子对重金属行为的影响规律。在风险评估方面, 发展了基于健康风险评估模型的土壤重金属污染风险评价方法, 为土壤污染风险管理提供了重要依据。在修复治理方面, 国外研究人员开发了物理修复、化学修复、生物修复等多种技术, 并在实际污染场地修复中得到了成功应用^[1]。这些研究成果为我国土壤重金属污染防控体系建设提供了宝贵经验和理论指导。

二、土壤重金属污染监测体系构建

(一) 土壤重金属污染监测的意义

开展土壤重金属污染监测是掌握土壤环境质量状况、评估污染风险、预防和控制土壤污染的基础。通过土壤重金属污染监测, 可以及时发现和判别污染区域, 为污染治理和修复提供依据。同时, 监测数据可用于评价农产品质量安全风险, 指导农业生产实践。建立健全的土壤重金属污染监测体系, 可以为国家和地方土壤污染防治决策提供科学支撑, 对于保障区域生态安全和人体健康具有重要意义。

(二) 土壤重金属污染监测网络布设

构建科学合理的土壤重金属污染监测网络是开展土壤环境质量调查与评价的关键。监测网络布设需要综合考虑区域自然地理条件、土地利用现状、污染源分布、敏感目标等因素。一般采用系统抽样与目的抽样相结合的方式, 在全国范围内布设若干个监测区, 每个监测区内设置多个监测点位。监测点位应涵

表一 关于土壤重金属污染监测网络布设

项目	内容
布点考虑因素	1. 区域自然地理条件 2. 土地利用现状 3. 污染源分布 4. 敏感目标
抽样方法	系统抽样与目的抽样相结合
监测区划分	在全国范围内布设若干个监测区，每个监测区内设置多个监测点位
监测点位选择	1. 农田 2. 林地 3. 草地 4. 工矿企业 5. 灌溉区 6. 固废填埋场等重点污染源
采样密度	根据土地利用方式、污染程度的差异而有所不同
注意事项	充分利用已有的土壤环境质量监测点位和数据资源，减少重复建设

盖农田、林地、草地等不同土地利用类型，并兼顾工矿企业、灌溉区、固废填埋场等重点污染源。采样密度可根据土地利用方式、污染程度的差异而有所不同。在布设过程中，还应该充分利用已有的土壤环境质量监测点位和数据资源，减少重复建设。

（三）土壤重金属污染监测的采样与分析方法

规范的采样和分析方法是保证土壤重金属污染监测数据质量的前提。土壤重金属污染监测一般采用0-20cm表层土壤作为采样对象，对于农田土壤，还需要根据作物根系分布情况适当加深采样深度。采样前，应去除表面枯枝落叶等杂物，采用“S”形、“X”形、多点混合等方式进行布点采样，每个点位应采集一定数量的土壤样品，混匀后及时封装并送至实验室进行预处理。土壤样品的分析项目主要包括pH、有机质、阳离子交换量等常规理化性质指标和铜、锌、铅、镉、汞、砷、铬等重金属元素含量。样品分析应严格按照国家或行业标准方法进行，并进行质量控制。

（四）土壤重金属污染监测数据的管理与共享

土壤重金属污染监测将产生大量的数据信息，需要建立规范化的数据管理和共享机制。监测数据的采集、录入、审核、存储等环节应有明确的操作规程和责任人。应开发土壤环境监测信息管理系统，实现监测数据的标准化、信息化管理，提高数据利用效率。在数据共享方面，要加强部门间的协调配合，消除“数据孤岛”，促进数据资源的开放共享^[2]。可借助互联网、大数据等技术手段，建设土壤重金属污染监测数据共享平台，方便不同用户查询和使用数据。同时，要重视数据的保密性，对涉及国家机密、商业秘密和个人隐私的数据应严格管控，规范使用权限。

三、土壤重金属污染风险评估体系构建

（一）土壤重金属污染风险评估的内容与程序

土壤重金属污染风险评估是在监测数据的基础上，判断污染物对受体产生不良影响的可能性和严重程度，为风险管理提供依据的过程。土壤重金属污染风险评估的内容一般包括风险识别、风险表征、风险评价和风险管理等步骤。首先，识别土壤中重金属污染物的种类、浓度水平及其来源；其次，分析重金属的环境行为特征和迁移转化规律，表征其生态风险和健康风险；再次，综合考虑污染物毒性、环境暴露水平和受体敏感性，定量或半定量评价风险大小，

判断风险是否可接受；最后，根据风险评价结果，提出污染治理、风险防控等管理对策。

（二）土壤重金属污染风险识别

土壤重金属污染风险识别是风险评估的首要步骤，目的是明确评估区域内重金属污染物的种类、含量、形态、来源及其空间分布特征。常见的土壤重金属污染物包括汞、镉、铅、铬、砷、铜、镍、锌等。通过对比土壤背景值或相应标准，可初步筛选出超标的重金属污染物。利用地统计学、GIS等方法，可分析重金属污染的空间变异规律，识别污染热点区域。此外，应调查评估区域内工矿企业、污灌区、固废填埋场等潜在污染源，分析其与土壤重金属污染的关联性，判断污染来源。

（三）土壤重金属污染风险表征

土壤重金属污染风险表征是定量描述重金属进入环境后，通过何种途径对生态或人体健康产生危害的过程。土壤重金属的生态风险主要通过三种途径：一是重金属被植物吸收累积而影响其生长发育；二是重金属通过食物链富集，最终危害陆地或水生生物；三是重金属改变土壤理化性质和微生物区系，破坏土壤正常功能。土壤重金属对人体健康的风险主要通过以下三条暴露途径：一是经口摄入污染的农产品；二是吸入含重金属颗粒物的空气；三是皮肤直接接触污染土壤。因此，土壤重金属污染风险表征需要获取污染物理化性质、环境行为、毒理学等方面的参数，计算重金属在土壤、植物、动物体内的含量，评估生态或健康危害效应。

（四）土壤重金属污染风险评价

土壤重金属污染风险评价是在风险表征的基础上，综合分析和判断重金属污染所带来的负面影响，为管理决策提供依据的过程。风险评价可采用定性、半定量、定量等不同方法，常用的模型有地累积指数法、潜在生态风险指数法、健康风险评估法等。地累积指数法通过计算重金属含量与背景值之比，来表征土壤污染程度和生态风险大小。

潜在生态风险指数法不仅考虑重金属含量，还引入毒性响应参数，更加全面地反映了重金属的生态损害效应。健康风险评估法根据重金属参考剂量、致癌斜率等毒理学参数和环境暴露参数，定量计算非致癌风险商和致癌风险概率，评判人体健康受到危害

的可能性。

(五) 土壤重金属污染风险管理

土壤重金属污染风险管理是根据风险评价结果,制定和采取相应的防控措施,将风险降低到可接受水平的过程。风险管理应坚持“预防为主、风险管控、分类施策、综合治理”的原则。对于风险较低的区域,主要采取源头控制措施,从农药化肥使用、灌溉水质改善、大气降尘等方面预防和减少重金属进入土壤^[3]。对于中等风险区域,需开展适度修复治理,可采用客土、石灰、有机肥等农艺措施降低重金属活性,或种植富集植物修复污染土壤。

对于高风险区域,要采取工程修复措施,将重金属彻底去除或钝化稳定,确保农产品和饮用水源的安全。同时,要加强重点行业企业污染治理,严控新增污染源,并对受污染土地采取严格的用途管控措施。

四、土壤重金属污染监测及风险评估体系的应用

土壤重金属污染监测及风险评估体系建成后,可在多个领域发挥重要作用,为土壤环境管理、污染治理与修复、农产品质量安全控制等提供技术支撑。

(一) 农产品产地土壤环境质量评价

利用土壤重金属污染监测及风险评估体系,可对农产品产地土壤环境质量进行评价,及时发现和预警农田土壤重金属污染风险,保障农产品质量安全。具体而言,通过布设农田土壤重金属监测网络,定期开展土壤和农产品协同监测,获取重金属背景含量、污染状况和蔬菜、水稻等农产品中重金属含量数据。在此基础上,分析农田土壤与农产品重金属含量的响应关系,构建农产品重金属污染风险预测模型,划定农产品产地土壤重金属的风险等级,形成农产品质量安全风险地图。基于风险评价结果,有针对性地制定农产品种植区域布局、农艺管理措施等,引导农业生产经营活动,将重金属超标农产品控制在源头。

(二) 污染场地修复效果评估

在工矿企业、尾矿库、固废填埋场等场地开展土壤重金属污染修复过程中,需运用监测及风险评估技术,科学评估修复效果,优化修复方案。首先,应查明场地及其周边区域的土壤重金属污染状况,明确污染物种类、浓度、空间分布特征,识别污染源并评估其生态和健康风险,确定修复目标和范围。在实施修复过程中,需跟踪监测土壤重金属含量的变化情况,评估去除率、稳定化率等指标,调整修复工艺参数。修复结束后,要开展一定时期的跟踪监测,评估修复效果的稳定性和持久性,并预测污染反弹的可能性^[4]。基于风险评估结果,判断修复后场地的用地安全性,确定土地开发利用方向。

(三) 区域土壤环境管理决策支持

土壤重金属污染监测及风险评估体系可为区域

土壤环境管理提供科学决策依据。通过获取区域土壤重金属本底含量、人为污染状况、污染时空变化特征等系统性数据,结合社会经济、人口健康等数据,建立区域土壤环境承载能力和重金属污染风险评估模型,分析区域土壤重金属污染的宏观分布格局、成因机制和演变趋势,预测未来污染态势,评判区域土壤环境安全状况。在此基础上,从宏观层面提出土地资源开发利用、产业发展布局、城乡建设用地选址、矿产资源开采强度等管控措施,并对土壤环境质量改善目标、重点防控区域等进行动态调整,实现土壤资源的永续利用。此外,通过多区域土壤重金属风险评估结果对比,可筛选出土壤污染风险突出的区域,有针对性地开展土壤污染详查、健康影响评价等工作,并优先予以治理修复,提高土壤环境管理的精准性和有效性^[5]。

五、结语

土壤重金属污染已成为制约区域可持续发展的突出环境问题。构建科学、高效的土壤重金属污染监测及风险评估体系,对于掌握土壤重金属污染状况、评估生态环境风险、预防和控制土壤重金属污染至关重要。本文在分析国内外相关研究进展的基础上,提出了一套包括监测网络布设、采样与分析、数据管理、风险识别、风险表征、风险评价和风险管理等环节的土壤重金属污染监测及风险评估技术体系,可为土壤重金属污染防治、农产品质量安全控制和国家环境管理决策提供重要的理论与技术支撑。未来应进一步加强土壤重金属污染过程机理、健康风险评估、污染修复等方面的研究,为建立覆盖全国、布局合理的土壤环境监测网络,实现土壤重金属污染的全过程管控奠定基础。

参考文献:

- [1] 董亚萍,张快凡,徐茜等.某煤矿区土壤中重金属污染状况及风险评估[J].广东化工,2024,51(05):108-110.
- [2] 何川黔,高波,张杏锋等.外源物质对杂交狼尾草和油葵植物修复重金属污染土壤及温室气体排放的影响[J/OL].环境科学,1-20[2024-03-26].<https://doi.org/10.13227/j.hjks.202311263>.
- [3] 林小兵,王斌强,成艳红等.井岗蜜柚主产区土壤重金属污染特征及风险评价[J].中国农业科技导报,2024,26(03):188-200.
- [4] 伍少福,孙涛,陈德等.基于长期定位监测的稻田土壤理化变化和镉污染风险评价[J].中国无机分析化学,2023,13(12):1342-1353.
- [5] 陈景辉,马云,郭毅等.陕西省城市土壤重金属空间分布特征与来源解析[J].环境生态学,2023,5(10):1-12.