

土壤重金属污染的环境监测与风险评估研究

鲜伟 罗嘉贤

昆明市生态环境工程评估中心（昆明市生态环境保护技术应用中心），中国·云南 昆明 650200

摘要：随着工业化、城市化进程的加速推进，土壤环境质量面临着严峻挑战。土壤作为生态系统的重要组成部分，不仅是植物生长的根基，更是维持生态平衡的关键。然而，重金属污染物在土壤中的持续累积，正逐渐侵蚀着土壤的生态功能，对整个生态环境和人类健康构成了极大威胁。论文简单阐述了土壤重金属污染的环境监测与风险评估的重要性，分析了监测要点，探讨了有效的风险评估方法，旨在为土壤重金属污染的治理工作提供帮助。

关键词：土壤重金属污染；环境监测；风险评估

Research on Environmental Monitoring and Risk Assessment of Soil Heavy Metal Pollution

Wei Xian Jiaxian Luo

Kunming Ecological Environment Engineering Evaluation Center (Kunming Ecological Environment Protection Technology Application Center), Kunming, Yunnan, 650200, China

Abstract: With the accelerated advancement of industrialization and urbanization, the quality of the soil environment faces severe challenges. As an important part of the ecosystem, soil is not only the foundation for plant growth but also the key to maintaining ecological balance. However, the continuous accumulation of heavy metal pollutants in the soil is gradually eroding the ecological functions of the soil, posing a great threat to the entire ecological environment and human health. This paper briefly expounds on the importance of environmental monitoring and risk assessment of soil heavy metal pollution, analyzes the key points of monitoring, and explores effective risk assessment methods, aiming to provide assistance for the treatment of soil heavy metal pollution.

Keywords: soil heavy metal pollution; environmental monitoring; risk assessment

0 前言

土壤重金属污染带来的危害是多方面且深远的，从生态环境的角度来看，重金属会影响土壤微生物的群落结构和功能，破坏土壤生态系统的正常物质循环和能量流动，进而导致土壤肥力下降，影响植物的生长发育，降低农作物产量和品质。从人类健康的层面而言，土壤中的重金属可通过食物链的生物富集作用进入人体，长期积累会对人体的神经、免疫、生殖等系统造成损害，引发多种严重疾病。鉴于土壤重金属污染的严峻现状和巨大危害，开展系统全面的环境监测与精准的风险评估工作迫在眉睫，这是有效防控土壤重金属污染的基础和关键。

1 土壤重金属污染的环境监测与风险评估的重要性

1.1 有利于保障公共健康

土壤是与人类生存密切相关的生态环境要素，土壤中的重金属一旦积累，将会通过食物链对人类的健康构成极大的危害。例如，受镉污染的土壤种植出的农作物，如水稻等，镉含量超标，长期食用会导致人体肾脏、骨骼等多器官受损，引发“痛痛病”等严重疾病。通过开展有效的环境监测，可以实时了解重金属在土壤中的形态、水平和分布情况，评估

其对周围人群的健康造成潜在的危害。在此基础上，有关部门可以根据监测和评价的结果，有针对性地采取控制污染地区农产品流通等措施，保证居民的食品安全，减少重金属污染带来的危害。

1.2 有利于推动环境法规完善

土壤中重金属污染的精确监测与风险评价是制定和完善相关法律的重要基础，随着监测手段的进步和评价体系的不断完善，新的污染态势和潜在的风险日益暴露出来。当发现现行法规在某些重金属污染管控方面存在漏洞，在详尽的监测、评价报告的基础上，立法机关可以适时地对法规条文进行修改、补充。这样既可以让环境条例更贴近现实的污染情况，提高法规的科学性和操作性，也可以促进整体的环境管理制度更加严谨和全面，从而促进各个有关方按照修订后的法律规范更好地进行土壤污染治理，保障中国的生态环境安全^[1]。

2 土壤重金属污染的环境监测要点

2.1 选择布局监测点位

为获得准确的土壤重金属污染资料，必须对监测点进行合理选址与布设。首先，要充分考虑不同地区的功能差异，在产业密集的工业区，因其高强度的工业生产，重金属的来

源较多,需要增加监测点的数量,实现对污染物的精确监测。而在农业地区,则以灌溉水源和工业污染源附近的农田为重点。其次,地形地貌也是重要因素,在地形起伏大、土壤类型复杂的山区和丘陵区,应根据不同的海拔、坡度、坡度等因素,布设监测点,确保监测成果能够真实地反映土壤中不同微环境中重金属的浓度。最后,还要参考历史污染数据,对曾出现过污染问题的区域持续监测,在此基础上将新建和潜在的污染区域纳入考虑范围,构建综合、定向的监测网点,实现对土壤中重金属的时空分异规律的准确把握。

2.2 监测指标与方法

在监测指标上,铅、汞、镉、铬、砷等对人体危害较大的常见重金属是要重点监控的。重金属在土壤中的赋存状态及迁移转化模式各不相同,其对生态环境与人类健康的作用模式也不尽相同,因此需要对其进行综合监测。在监测方法上,首先是实验室监测法,这一方法利用专用的实验仪器,可以实现高精度的监测。在采集土壤样品后,采用酸消解、碱熔融等前处理手段,把土壤中的重金属转化为溶液状态。在此基础上,采用原子吸收光谱仪(AAS),实现重金属铅、镉等重金属的准确测量。同时,利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析多种重金属,其具有高分辨率和灵敏度的优势,重金属监测结果更加准确可靠。其次是现场快速监测法,为满足快速获取土壤重金属污染信息的需求,现场快速监测技术应运而生,如X射线荧光光谱仪(XRF),该方法能够实现原位、非破坏性地测定土壤中的重金属,通过分析其所释放的X射线来实现重金属铅、汞等重金属的快速测定,具有操作简单、快速等优点,可以实现对土壤重金属的实时监测,但其准确性较室内监测方法差很多。最后,还可以运用遥感监测技术,借助卫星或航空遥感平台获取土壤表面的光谱信息。不同重金属含量的土壤,其反射和吸收光谱存在差异,建立基于光谱和重金属浓度反演的遥感反演模型,可以实现对大范围土壤中重金属污染的实时监控和评价^[2]。该技术具有监测范围广、效率高、能及时获取动态变化信息等优势,特别适合大范围地初筛、发现可能的污染源等工作,为下一步的精确监测指明方向。各种监测方法相辅相成,综合保证了土壤重金属污染状况的监测成效。

3 土壤重金属污染的环境风险评估方法

3.1 单因子指数法

单因子指数法是土壤重金属污染环境风险评估中最为基础且直观的方法之一,其核心原理是通过对比土壤中单一重金属污染物的实测浓度与该污染物既定的评价标准值,从而明确土壤受单一重金属污染的程度。在实际计算时,运用公式 $P_i=C_i/S_i$,其中 P_i 代表第*i*种重金属的污染指数, C_i 为第*i*种重金属在土壤样本中的实测浓度, S_i 则是第*i*种重金属对应的评价标准值。该方法的优点非常显著,其计算过程简单、易于理解,可以将各种重金属的污染程度清楚、直观地显示出来,从而使研究者们能迅速将注意力集中在一种重

金属上,并针对其污染状况进行深度剖析。例如,建立相关的治理对策,如果某个地区的镉污染程度比较高,则有针对性地研究减少镉的方法。然而,单因子指数法的局限性也较为突出,它仅能孤立地评估单一重金属,目前尚不能全面考虑多个重金属交互作用引起的复合污染效应。在现实中,多种重金属复合污染土壤的现象普遍存在,采用单因子指数方法很难对其进行综合评价。例如,某些工业废弃地的土壤中铅、汞、镉等多种重金属同时存在,单因子指数法不能反映多种重金属复合污染对人类健康和生态环境的影响。

3.2 潜在生态危害指数法(RI)

潜在生态危害指数法由瑞典学者Hakanson提出,是一种综合性较强的评估方法,其在考量土壤中重金属含量的同时,充分兼顾了重金属的毒性以及区域敏感性等关键因素。Hakanson认为,潜在生态危害指数影响因素有以下四个方面:一是含量状况,即土壤表面污染越严重,RI越大;二是金属污染的类型,随着不同的金属污染类型的增多,其影响因子也随之增大;三是在毒害情况下,高毒性金属对RI的影响大于低毒性金属;四是灵敏度,灵敏度愈高,则RI愈大。该方法的优点是可对复合重金属复合污染下的生态风险进行全面、全面地评价,并将重金属的毒性作为主要影响因子纳入其中,从而使评价结果更加符合实际^[3]。然而,这种方法也有其局限性,即毒性反应因子的测定具有很大的主观性,各学者、科研单位根据自己的经验、研究目标设置的指标也不尽相同,从而影响了评价结果的一致性与可比性。在某些边远地区,因资料不足,很难精确测定其毒性反应系数,进而影响其应用的准确性。

3.3 内梅罗指数法

内梅罗指数法是一种综合评估土壤重金属污染程度的方法,它巧妙地综合考虑了土壤中各重金属的平均污染水平以及污染最严重的重金属的影响,其计算公式为

$$P = \sqrt{\frac{P_{i-avg}^2 + P_{i-max}^2}{2}}, \text{ 其中 } P_{i-avg} \text{ 是各重金属污染指数的}$$

平均值,反映了土壤中重金属的整体平均污染状况; P_{i-max} 是各重金属污染指数中的最大值,突出了污染最严重的重金属的作用。此方法的优点在于突出了污染最严重的重金属对土壤污染程度的主导作用,同时又兼顾了整体平均水平,能较好地反映土壤重金属污染的实际情况,尤其适用于对区域土壤污染程度进行总体评估,帮助管理者快速了解区域土壤污染的大致状况。不过,该方法对各重金属的权重分配相对简单,没有充分考虑不同重金属在毒性、迁移性等方面的差异。在某些情况下,可能会低估一些毒性较强但含量相对较低的重金属的潜在危害。例如,在一些电子垃圾拆解区,土壤中可能含有少量但毒性极大的汞,内梅罗指数法可能无法充分体现汞对环境的严重威胁。

3.4 模糊数学法

模糊数学法是一种创新性地模糊集合理论应用于土壤重金属污染风险评估的方法。由于土壤重金属污染程度在

实际中界限模糊,传统评估方法难以精确界定,模糊数学法应运而生,其核心在于通过构建隶属函数,巧妙地将土壤重金属含量与污染等级之间的模糊关系进行量化。在构建隶属函数时,需要大量的数据支撑和专业的知识经验。例如,对于镉元素,研究人员通过对大量土壤样本的分析以及结合当地的生态环境特点,根据不同镉含量范围设定对应的隶属度。假设将土壤镉污染等级划分为轻度、中度、重度,当镉含量处于某一区间时,通过隶属函数计算出其对轻度、中度、重度污染等级的隶属度,如在某一含量下,对轻度污染的隶属度为 0.6,对中度污染的隶属度为 0.3,对重度污染的隶属度为 0.1。之后,利用模糊变换原理,综合各重金属的隶属度得到土壤整体的污染隶属向量^[4]。例如,土壤中存在镉、铅、汞三种重金属,分别计算出它们对不同污染等级的隶属度后,通过特定的模糊运算规则,得到一个综合的隶属向量,从而确定土壤的污染等级。该方法的显著优势在于能够有效处理土壤污染中的模糊性和不确定性问题,更符合土壤环境复杂多变的实际情况。同时,它能够考虑到土壤中多种重金属之间相互作用以及环境因素对污染程度影响的不确定性,提供更贴近真实状况的评估结果。然而,其缺点也较为明显,隶属函数的构建需要耗费大量时间和精力收集数据,且对专业经验要求极高。不同地区土壤特性、生态环境不同,需要针对性地构建隶属函数,这增加了方法应用的难度和成本。

3.5 灰色聚类法

灰色聚类法是基于灰色系统理论发展而来的一种土壤重金属污染风险评估方法,它将土壤重金属污染数据视为灰色信息进行处理。该方法将土壤环境中多种重金属作为聚类指标,根据各聚类对象(土壤样本)对不同灰类(污染等级)的白化权函数,来确定土壤样本属于不同污染等级的程度。具体操作时,首先要确定白化权函数,这需要对土壤样本数据进行深入分析和研究。例如,对于某一区域土壤,根据已知的土壤重金属含量数据以及对应的污染状况,将污染等级划分为未污染、轻度污染、中度污染、重度污染四个灰类,针对每种重金属构建相应的白化权函数。假设对于铅元素,

当含量低于某一阈值时,其对白化权函数中未污染灰类的贡献较大;随着含量升高,对轻度、中度、重度污染灰类的贡献逐渐变化。通过计算各样本的灰色聚类系数,判断其所属的污染类别。例如,某土壤样本中包含铅、镉、铬等多种重金属,分别根据各自的白化权函数计算出与不同污染等级对应的灰色聚类系数,若该样本对轻度污染灰类的灰色聚类系数最大,那么就判断该土壤样本属于轻度污染类别。此方法的优点在于能够充分利用已知信息,对土壤重金属污染进行分类评估,尤其适用于数据有限且存在不确定性的情况。灰色聚类法可以通过对有限数据的合理挖掘和分析,给出相对可靠的污染分类结果。但该方法对聚类标准的确定较为关键,聚类标准的微小差异可能会导致评估结果产生较大偏差^[5]。

4 结语

综上所述,通过对多种监测要点和风险评估方法的分析,明晰了不同监测手段在获取土壤重金属污染信息方面的优势与适用场景以及各类评估方法在衡量污染风险程度时的特点与局限性。在具体的工作实践中,相关人员要掌握监测点位选择布局、监测指标与方法确定选择等要点,同时根据实际情况,合理运用单因子指数法、潜在生态危害指数法(RI)、内梅罗指数法、模糊数学法、灰色聚类法等风险评估方法,为土壤重金属污染的有效治理和生态修复提供更坚实的理论支撑。

参考文献:

- [1] 郭全章.土壤重金属污染的环境监测与风险评估[J].清洗世界,2025,41(2):150-152.
- [2] 张硕峰.土壤重金属污染的环境影响评价及管理分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(24):187-189.
- [3] 何磊.土壤重金属污染修复技术及环境风险评估[J].清洗世界,2024,40(11):184-186.
- [4] 崔保玉.锰矿区土壤重金属污染风险评估与生态监测研究[J].中国资源综合利用,2024,42(11):167-170.
- [5] 王莉,孙大光,安娜,等.当前土壤重金属污染形势及环境风险评估分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(11):167-169.