

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.04.002

基于 ArcGIS 土壤重金属迁移模型研究进展

王明明^{1,2}, 贺秋华^{1,2}, 肖粤^{1,2}, 李星^{1,2}, 钟甜甜^{1,2}, 刘陈^{1,2}, 滑熠龙^{1,2}

1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001;
2. 衡阳市土壤污染控制与修复重点实验室, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 工业生产活动的增加造成了土壤和地下水中的重金属污染不断加剧。由于重金属在土壤中滞留时间长、迁移性差,且难以生物降解,导致土壤中重金属元素含量超标。土壤重金属迁移规律复杂,治理难度大,修复费用高,研究土壤重金属迁移模型,以可视化形式精准判定污染区域,可以为科学污染防治和土壤资源保护提供依据。全面阐述土壤重金属迁移扩散模型的研究进展,探讨基于 ArcGIS 二次开发的相关研究,包括土壤污染风险评估、修复及重金属迁移等。同时,分析现有研究不足之处,展望未来土壤重金属迁移模型的发展趋势。

关键词: 土壤重金属污染; ArcGIS; 迁移扩散模型; 模型应用

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1007-7545(2024)04-0013-09

Research Progress of Heavy Metal Migration Modeling in Soil Based on ArcGIS

WANG Mingming^{1,2}, HE Qiuhua^{1,2}, XIAO Yue^{1,2}, LI Xing^{1,2},
ZHONG Tiantian^{1,2}, LIU Chen^{1,2}, HUA Yilong^{1,2}

1. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China;
2. Hengyang Key Laboratory of Soil Pollution Control and Remediation, Hengyang 421001, Hunan, China)

Abstract: The increase of industrial production activities has resulted in increasing heavy metal pollution in soil and groundwater. Due to the long retention time of heavy metals in soil, poor mobility, and difficult biodegradation, the content of heavy metals in the soil exceeds the standard. The migration pattern of heavy metals in soil is complex, and it is difficult to manage and expensive to remediate. Therefore, it is important to study the soil heavy metal migration model to accurately determine the contaminated area in a visualized form, so as to provide a basis for scientific pollution prevention and soil resource protection. The research progress of soil heavy metal migration and diffusion modeling was comprehensively described, and the related research based on the secondary development of ArcGIS was discussed, including soil pollution risk assessment, remediation and heavy metal migration. At the same time, the shortcomings of the existing research were analyzed, and the future development trends of soil heavy metal migration model were forecasted.

Key words: soil heavy metal contamination; ArcGIS; transport diffusion model; model application

收稿日期: 2023-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12375311)

作者简介: 王明明(1996-), 女, 硕士研究生; 通信作者: 贺秋华(1974-), 男, 博士生, 副教授

土壤是生态系统的重要组成部分,在植物生长、生物多样性、水的过滤和储存、碳储存等方面发挥着重要作用。随着城镇化、工业化的飞速发展,土壤重金属的直接或间接排放导致土壤中重金属活性增强,加剧了土壤污染的趋势^[1],制约了土壤多功能发挥,对生态环境、公众健康以及经济的可持续发展造成了潜在威胁^[2-3]。根据2014年全国土壤污染状况调查公报结果^[4],全国土壤超标率为16.1%,其中重金属等无机污染物超标点位占全部超标点位的82.8%。此外,重金属元素在土壤中滞留时间长、迁移性差,难降解等特点^[5],使得土壤修复治理和风险管控成为研究与探讨的新课题和未来发展的新方向。当前对土壤重金属研究集中在土壤重金属污染修复(物理试验)^[6-8]、风险评估^[9-11]、污染分析^[12-14]以及流域重金属迁移模拟^[15-16]等方面。

“十三五”以来,各地区积极推动土壤、地下水和农业农村生态环境的保护工作。在推进生态环境保护方面,强调要实施土壤污染源头管控的重大工程项目,严格建设用地准入管理,加强对关闭搬迁企业地块的土壤污染管控。开展土壤污染状况调查评估,推进土壤污染风险管控与修复^[17-18],明确风险管控与修复重点,确保土地资源的可持续利用和人民居住环境的安全^[19]。

根据《生态环境损害鉴定评估技术指南 土壤与地下水》,常见的土壤修复技术的成本在每吨100至2000元,而热处理技术应用的成本较高,在每吨600至2000元^[20]。确切计算治理污染区所需的土方量关系到土壤修复经费的数额大小。因此,对基于ArcGIS土壤重金属污染迁移模型的研究^[21-22]进行深入探讨,不仅可以实现对受污染区域面积的精准可视化,还可作为后期对土壤重金属污染的监测、修复及预防工作的科学依据。通过应用此类模型,能够更精确地应对工农业污染问题,了解土壤重金属污染范围,制定有效的修复方案,实现区域性精准治理,节省政府的经费开支,并提高土壤修复和保护工作效率,对于推动我国土地资源的可持续利用具有深远的影响。

1 土壤重金属污染迁移模型研究进展

重金属污染迁移模拟模型是一种数学模型^[23-25],旨在研究不同环境条件下,土壤中如铅^[26-27]、镉^[28]、汞^[29]、锌^[30]等重金属元素的迁移、转化和累积过程。该模型有助于科学家和环境专家深入理解土壤重金属污染的动态变化^[31],准确预测污染的扩散路

径和速率^[32],从而对潜在的环境风险进行评估,并针对实际情况制定有效的污染防治措施^[33-35]。这些模型通常以土壤的物理、化学和生物过程为基础,涉及吸附、解吸、迁移、转化、生物有效性等多个环境过程^[36],涵盖经验模型、概念模型、统计模型和机理模型等^[15,37-40]。常见土壤重金属迁移模型如表1所示。

1.1 经验模型

经验模型是基于试验数据和经验规律建立的数学模型,用数学方程描述重金属在土壤中的分布和迁移过程,如Langmuir和Freundlich等吸附模型。经验模型通常被应用于初步评估土壤中重金属的吸附行为,是依赖于历史数据或试验结果进行预测,并不能反映土壤吸附过程的复杂性。在实际应用中,对于一些具有明显规律性的土壤重金属污染迁移过程可以取得较好的预测效果。

1.2 概念模型

概念模型是对土壤中重金属污染物迁移过程的抽象描述,用于理解和预测重金属在土壤中的迁移过程。这类模型通常基于土壤物理、化学、生物等原理,以及现场监测数据,用数学方程或规则来描述土壤中重金属的迁移、转化和积累过程,但不涉及具体数学方程的推导。

1.3 统计模型

统计模型是一种利用统计学方法来分析和预测土壤中重金属污染迁移行为的模型。统计模型通常基于现有的土壤重金属污染迁移的数据进行统计分析和拟合,得到一些有意义的统计指标和参数,从而建立数学关系描述重金属在土壤中的迁移和分布规律。

1.4 机理模型

机理模型是根据对土壤重金属污染迁移的物理、化学和生物过程的深入理解,采用数学方程和模拟方法,描述土壤重金属的吸附、解吸、迁移和生物有效性等详细过程和影响因素。机理模型通常能够提供最为精确的模拟结果,然而,其需要大量的试验数据支持,并且模型的复杂度较高。

经验模型通常适用于初步了解土壤中重金属的吸附行为和小范围的土壤污染现象。概念模型可以用于理解和预测重金属在土壤中的迁移过程,但通常需要在一定假设条件下建立。统计模型可以利用现有的监测数据和统计分析技术来描述重金属在土壤中的迁移和分布规律,适用于数据相对较少的情况,能够提供相对简单的预测结果。机理模型则基于土壤物理、化学过程的详细认识,能够提供最为准确的模拟结果,但需要大量的试验数据和较高的模型复杂度。

表1 常见土壤重金属迁移模型
Table 1 Common soil heavy metal transport models

类别	序号	名称	模拟内容	适用范围	模型优缺点
经验模型	1	Langmuir 模型 ^[41]	以化学吸附为基础,用于描述在固体表面上的分子或离子与其吸附位点的相互作用	系统中的均匀、单层吸附现象	优点:模型简单且参数具有明确的物理意义;缺点:适用范围较窄,不能描述多层吸附且不考虑非均匀表面,为理想状态模型
	2	Freundlich 模型 ^[42]	吸附量预测,吸附等温线绘制,吸附非均匀度分析	各种吸附系统,特别是在非均匀和多层吸附情况	优点:适用范围广泛,吸附点位可以是非均匀的,无特定吸附层限制;缺点:不考虑饱和和吸附现象,不适用于高浓度
概念模型	3	对流-扩散模型 ^[43]	研究各种物质在流体中的传输过程,主要为地下水流动模拟	地下水中的污染传播、水资源管理和地下水补给的评估	优点:建立在数学基础上,并可预测物质在介质中的浓度分布;缺点:不考虑复杂过程以及不适用于瞬态过程
	4	PHREEQC 模型 ^[44]	研究地下水和土壤中的化学反应	用于描述地下水和土壤水中化学平衡和溶解-沉淀过程	优点:可以计算抗污溶解和沉淀,酸碱平衡,氧化还原反应,用户界面友好;缺点:学习曲线较陡峭、输入参数复杂
统计模型	5	地统计学模型 ^[45]	模拟地理空间上的变量分布,例如进行空间插值、建立地质模型对土壤质量的空间变异分析	用于空气、水、土壤质量的监测和模拟,地下矿产资源的空间分布规律	优点:提供了有关地理空间上变量分布的详细信息,生成连续空间表面;缺点:依赖样本密度,计算较复杂
	6	克里金插值模型 ^[46]	推断未采样位置上的数值,空间变异性分析如重金属污染的空间插值等	模拟空气、水、土壤等环境变量的时空分布	优点:简单直观,适用于均匀和非均匀采样的点集,且对点分布没有要求;缺点:主要用于描述空间变异性,对于空间趋势的建模相对有限,数据要符合正态分布
机理模型	7	Hydrus 模型 ^[47]	模拟土壤水分运动过程,土壤中溶质(如营养元素、污染物等)的迁移	研究土壤水文过程、污染物迁移、水文循环和地下水流动等问题	优点:适用于不同类型的土壤和气象条件,建立在扎实的土壤物理学和水文学原理基础上,提供了相对准确的模拟结果。缺点:对土壤特性和气象数据要求较高,模型使用复杂
	8	Modflow 模型 ^[48]	模拟地下水的流动过程,地下水与地表水相互作用,模拟地下水中的溶质迁移过程	地下水中的污染传输和控制方面	优点:用于不同地质条件和水文环境的地区,模型具有模块化的结构,允许用户根据具体问题选择合适的模块,使其在不同研究场景中灵活应用;缺点:仅对地下水进行模拟工具,计算复杂,上手难度大
	9	SWAT 模型 ^[49]	水文,泥沙,氮磷,农药,重金属	模拟重金属流失或其他模型耦合模拟	优点:能够较好地模拟预测重金属在流域扩散影响;缺点:建模过程相对复杂,需要河网数据资料

2 基于 ArcGIS 二次开发的相关研究应用

根据《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国土壤污染防治法》,土壤污染治理的流程主要包括以下步骤:首先,进行土壤污染状况调查,采集受污染土壤的基本数据和信息;其次,对污染地块进行健康风险评估,确定土壤和地下水的风险控制值;最后,确定污染地块的风险管控措施并进行土壤修复效果评估。在当前阶段,基于 ArcGIS 二次开发的软件广泛用于研究污染地块的风险评估和土壤修复方案选择方面。然而,对于土壤重金属迁移模型的研究和污染土方量计算相对较少。因此,基于 ArcGIS 开发的重金属迁移模型具有填补系统软件在重金属迁移方面的空白的潜力。这一模型的应用

不仅能够提供对土壤污染状况的准确评估,还为风险管控和治理提供科学依据,有望在土壤环境保护领域发挥重要作用。

2.1 土壤污染风险评估

在土壤污染风险评估领域,大部分的研究往往聚焦于某一特定区域,例如某矿区、某化工厂或河流域周边地区^[50-53]。这些研究具有明确的目的和范围,旨在详细评估这些特定区域内的土壤污染程度以及对周边居民的健康风险。然而,也有一部分研究将目光投向了更为广泛的区域。例如,有些研究针对整个省份的土壤质量进行调查和分析,甚至还有一些研究涉及全国多个省份的大范围土壤重金属健康风险研究^[54]。这些研究涵盖了更广泛的地理区域,具有更大的影响力,能够为政策制定者和环保工作者提供全面、准确的土壤污染状况和健康风

险信息。

其中一部分利用我国生态环境部《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)规范推荐的健康风险评估模型,通过估算有害因子对人体产生健康危害的概率,以评估此化学暴露在目前或将来是否会引发某个普遍群体的健康风险,重点探讨了每日经口摄入量(OSIR)、空气中可吸入颗粒物浓度(PM_{10})、每日呼吸空气量(DAIR)等参数对评价结果的影响。

另一部分,借助地理信息系统(GIS)的强大功能,采用了污染指数评价法、污染负荷指数(PLI)、污染因子(CF)、地累积污染指数法(I_{geo})等多种方法,结合半变异函数和 Kriging 插值技术^[55-56],对不同功能区的重金属污染情况进行全面评估。这些评估方法不仅考虑了单一的污染物浓度,还结合了空间分布特征,使得评价结果更为准确和全面。有些研究还提供基于 ArcGIS 二次开发构建健康风险评估模型^[57],应用该系统可以准确地预测不同功能区的重金属污染水平对人类健康可能产生的影响,揭示土壤重金属空间分布格局的规律和特征,为环境保护和公共健康安全提供重要的参考依据。

当前研究仍未深入探讨重金属的毒性综合作用,即多种重金属毒性效应之间可能存在的拮抗、协同或增加等相互作用。现有研究主要侧重于考虑各种重金属在不同暴露途径下毒害效应的叠加,这在一定程度上引入了评估结果的不确定性。

2.2 土壤污染修复

众多研究人员在土壤修复工程领域进行了基础性研究工作。比如,李杨^[58]、李爽^[20]等基于现有的重金属污染土壤修复案例,对土壤修复工程中的数据采集、处理、工艺选择和方案设计进行了深入研究。CHENG 等^[59]、HU 等^[60]系统总结了近年来修复材料对于重金属污染土壤修复试验的研究进展,重点阐述了影响重金属在土壤-作物系统中吸收和转运的可能因素。这些研究为土壤修复工程提供了更加科学、精确的数据支持,有助于更好地了解土壤污染状况和修复效果,进一步提高修复工程的效率和准确性。

此外,还有 GERSON 等^[61]、XIE 等^[62]、吴博等^[63]研究人员分别利用土地利用(MEDALUS)、传感在线、物联网技术和克里金空间插值方法,结合地理信息系统(GIS)和 3D WebGIS 开发技术,对土壤修复工程监管方法和在线的土壤重金属污染修复评价系统开发进行研究。该系统实现了土壤修复工程管

理、数据在线采集与管理、修复效果评价,以及将土壤污染和修复环境信息以地图和图表的形式三维可视化表达等功能。另外,还有一些研究人员致力于开发基于互联网技术的在线监测系统。例如,GAMTESA 等^[64]、ANH 等^[65]和朱昌达等^[66]结合坡度、土壤质地、pH、降雨、数字高程模型(DEM)等因子的信息和数据进行了处理和分析,在开发基于 GIS 的在线土壤监测系统方面取得了重要成果。此外,系统还能够分析土地退化敏感的环境区域并根据研究区敏感程度提出修复建议。在实际情况中,这些技术在土壤修复工程中取得了较好的应用效果,提高了修复过程监管的效率和修复效果评价的准确性。

2.3 土壤重金属迁移

重金属向土壤深处的迁移会对生态环境产生深远影响。首先,土壤中的微生物群落结构对于重金属的迁移扩散具有重要影响。通过维持稳定的微生物群落结构,可以降低重金属对土壤生态平衡的破坏作用,从而抑制重金属在土壤中的迁移扩散。HONG 等^[67]采用试验的方式,施用磷灰石、生物炭和有机肥对重金属复合污染土壤进行修复,降低了重金属的迁移。其次,重金属还会通过食物链的传递对人类和动物产生危害。一些关于农作物-重金属的相关研究应运而生,杨国航等^[28]主要探讨晚稻全生育期中镉的迁移转化规律及预测模型,研究了晚稻不同部位的吸收、累积和分配差异。

如何有效治理土壤重金属的污染,对其迁移规律的研究至关重要。目前研究主要集中在两方面:其一,通过以动态土柱试验为基础,利用模型对土柱试验结果进行拟合验证、预测分析与敏感性解析。张启蒙等^[68]借助 Hydrus-1D 软件中的 VG-TSM 模型对土柱试验结果进行拟合,研究镉的迁移规律。其二,采用数值模拟的方式,对于已经污染的工业企业场地内的重金属迁移进行模拟和预测。刘欢等^[69]通过数值模拟技术,调整土壤中的渗透系数、弥散度、分配系数和孔隙率等参数,以探究这些参数变化对重金属 As(V)在土壤中迁移行为的影响及规律。

综上所述,针对土壤重金属迁移问题的研究,需要考虑土壤的物理化学性质、微生物作用、地下水、降雨等众多因素,以及在不同环境条件下重金属的迁移规律。为了更好地控制和治理土壤重金属污染,需要不断地研究其迁移规律的呈现形式,在现有研究数据的基础上并结合 ArcGIS 探索出更加可视化、清晰化和准确化的模型构建方法。

3 方法评价

根据对土壤重金属迁移模型研究以及基于 ArcGIS 二次开发系统的应用方面分析,我们发现,针对基于 ArcGIS 二次开发的土壤重金属迁移系统研究相对较少。主要是研究过程中受到地下水、降雨、生产工艺等因素的限制,使得研究难度较高。但此类研究对于单一工业企业的土壤重金属污染治理具有重要价值,前景广阔。ArcGIS 的土壤重金属迁移扩散模型是一种综合性模型,其特点在于集成了多种学科知识,并具有可视化、灵活性和决策支持等优势。该模型能够整合多种数据格式,包括遥感数据、实地调查数据等,使得模型能够利用多源数据进行分析,揭示土壤重金属污染问题的内在机制,为环境保护策略的制定提供有力的支持。

然而,该模型也面临着一些挑战和局限性。首先,模型对大量高质量的土壤、地下水、地形等数据依赖较高,数据获取和准确性对模型的结果影响较大,需要大量的基础数据来支持模型的运行和分析。其次,模型的计算过程较为复杂,需要借助高性能计算机或云计算等技术进行运算。此外,土壤系统的复杂性导致模型参数的不确定性较高,尤其是在考虑生物因素、植物吸收、非均质性等因素时,模型的准确度可能受到挑战。

为了改进现有模型,需要加强与其他学科(如土壤科学、生态学、地理信息科学等)的跨领域合作,引入更多影响因素(如生物因素、地下水流动等)来完善模型的机制和理论基础。同时,还需要进行模型验证与修正,提高模型的预测准确性。例如,可以通过比较模型预测结果与实际观测数据的差异,对模型参数进行调整和优化。另外,为了提高模型的普适性和应用价值,应该鼓励数据共享与开放,促进不同地区和不同领域之间的交流与合作。同时,可以通过宣传和教育活动,增强公众对环境保护的意识,从而推动土壤重金属迁移模型的推广和应用。

综上所述,基于 ArcGIS 的土壤重金属迁移扩散模型是研究土壤污染问题和制定环境保护策略的重要工具。虽然存在一些挑战和局限性,但通过跨学科合作、模型验证与修正以及数据共享和公众参与等措施的引入,可以全面提高该模型的可信度和应用价值。

4 结语与展望

ArcGIS 二次开发技术在未来土壤重金属迁移

扩散模型研究中的发展将聚焦于技术创新、模型精度提升、实时监测与预警、公众参与以及跨学科合作,以构建一个准确、高效、透明和可信的研究体系。展望基于 ArcGIS 二次开发技术在土壤重金属迁移扩散模型研究中的未来发展,有以下几种可能性。

1) 技术进步与跨领域合作:随着人工智能和机器学习等技术的持续发展,我们有能力将这些创新技术与 ArcGIS 的二次开发更深度地结合,推动模型开发的智能化和高效化。例如,利用深度学习算法处理土壤重金属污染等复杂特性,能显著提高模型的预测精度。

2) 精度的提升:基于 ArcGIS 的土壤重金属迁移扩散模型,可以通过引入更高分辨率的空间数据、更准确的土壤和地下水数据,以及先进的数值模拟方法,优化模型的精度。同时,多源数据的融合和模型参数的优化也是提高精度的关键。

3) 实时监测与预警:结合物联网技术,我们可以实现对土壤重金属污染的实时监测。通过传感器网络收集实时的土壤质量数据,并将其整合到 ArcGIS 平台,可以即时监测和分析污染情况,为环境管理提供及时的决策支持。

4) 跨学科合作:为了推动土壤重金属迁移扩散模型的持续创新和发展,我们需要跨学科的合作,包括环境科学、地理信息科学、计算机科学等多个领域的专家。这种合作将促进技术、数据和方法的共享。

参考文献

- [1] 第三次全国土壤普查工作方案[J]. 中国农业综合开发, 2022(3):4-8.
Workprogram for the third national soil survey [J]. China's Comprehensive Agricultural Development, 2022(3):4-8.
- [2] 李琳丽,黄小凤,赵丹,等. 汞矿区土壤重金属迁移转化及治理技术研究综述[J]. 有色金属工程, 2022, 12(2): 128-137.
LI L L, HUANG X F, ZHAO D, et al. Review on migration, transformation and treatment of soil heavy metals in mercury mining area [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(2): 128-137.
- [3] SAMANTHA J O, MARIA-JESUS G M, MARCELO F. O, et al. Multi-pathway human exposure risk assessment using Bayesian modeling at the historically largest mercury mining district [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 201: 110833. DOI: 10.

- 1016/j. ecoenv. 2020. 110833.
- [4] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报,2017,36(9):1689-1692.
CHEN N C, ZHENG Y J, HE X F, et al. Analysis of the Report on the National General Survey of Soil Contamination[J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2017, 36(9):1689-1692.
- [5] 孙天河,刘伟,靳立杰,等.基于多元统计的土壤主要重金属影响因素分析:以济南市平阴县城区及附近区域为例[J]. 安全与环境学报,2021,21(2):834-840.
SUN T H, LIU W, JIN L J, et al. Assessment of the heavy metal influential factors based on the multivariate statistical analysis: a case study of the urban and nearby areas of Pinyin county of Ji'nan, China[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(2):834-840.
- [6] 刘兵.不同植物种类对土壤重金属污染修复及应用前景[J]. 新农业,2023(3):21-22.
LIU B. Remediation of soil heavy metal pollution by different plant species and application prospects[J]. New Agriculture, 2023(3):21-22.
- [7] 张春鑫,魏勇,钟卫红,等.生物炭在农业土壤重金属污染修复中的应用研究[J]. 农业技术与装备,2022(11):65-67.
ZHANG C X, WEI Y, ZHONG W H, et al. Application of biochar in remediation of heavy metal pollution in agricultural soil[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2022(11):65-67.
- [8] 刘富平.土壤重金属污染修复技术及应用分析[J]. 山西化工,2023,43(3):221-222,225.
LIU F P. Analysis of soil heavy metal pollution remediation technology and application [J]. Shanxi Chemical Industry, 2023, 43(3):221-222, 225.
- [9] 魏洪斌,罗明,向垒,等.金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估[J/OL]. 环境科学;1-19[2023-11-20]. https://doi.org/10.13227/j. hjkx. 202305184.
WEI H B, LUO M, XIANG L, et al. Health risk assessment of heavy metals in farmland soils and crops around metal mine[J/OL]. Environmental Science;1-19 [2023-11-20]. https://doi.org/10.13227/j. hjkx. 202305184.
- [10] 杨楠楠,韩玲,刘明.基于信息扩散模型的沅东新城区土壤重金属潜在生态风险评估[J/OL]. 环境科学;1-18[2023-11-20]. https://doi.org/10.13227/j. hjkx. 202304033.
YANG N N, HAN L, LIU M. Potential ecological risk assessment of soil heavy metals in Fengdong new district based on information diffusion model[J/OL]. Environmental Science;1-18[2023-11-20]. https://doi.org/10.13227/j. hjkx. 202304033.
- [11] 赵鹏,肖佩文,ADNAN M,等.中南某废弃铅冶炼场地土壤剖面重金属污染成因及风险评估[J]. 矿物岩石地球化学通报,2023,42(2):360-368.
ZHAO P, XIAO P, ADNAN M, et al. Formation and risk assessment of heavy metal contamination in soil profiles of an abandoned lead smelting site in South-central China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2023, 42(2):360-368.
- [12] BRIDGET D, OKORONDU J, SUSAN I, et al. Assessment of heavy metal contamination of soil in mechanic workshops at Nekede and Orji, Owerri Zone, Imo State, Nigeria[J]. Journal of Scientific Research and Reports, 2023, 29(7):8-16.
- [13] ZHU H N, LIU X L, WANG Q, et al. Heavy metals pollution of soil in central plains urban agglomeration (CPUA), China: human health risk assessment based on Monte Carlo simulation[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2023, 45(11):8063-8079.
- [14] 曾晓娜,贺秋华,吕世豪,等.典型冶炼企业集中区土壤重金属污染分析及风险评价[J]. 有色金属(冶炼部分),2021(12):98-104.
ZENG X N, HE Q H, LYU S H, et al. Pollution level and risk assessment of heavy metals in a typical nonferrous metal smelting concentration area [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(12):98-104.
- [15] 刘连华,张晴雯,王依滴,等.流域重金属迁移模型研究进展[J]. 中国环境科学,2023,43(8):4229-4238.
LIU L H, ZHANG Q W, WANG Y D, et al. Research progress on heavy metal migration model at watershed scale[J]. China Environmental Science, 2023, 43(8):4229-4238.
- [16] 易琦,王瑞芳,赵筱青,等.中小河流水体重金属 Zn、Pb、As 沿程迁移扩散过程模拟:以泚江为例[J]. 云南大学学报(自然科学版),2022,44(1):98-106.
YI Q, WANG R F, ZHAO X Q, et al. Simulation of migration and diffusion processes of heavy metals Zn, Pb and As in medium and small rivers; taking Bijiang river as an example[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2022, 44(1):98-106.
- [17] 张益硕,周仲魁,杨顺景,等.重金属污染土壤修复原理与技术[J]. 有色金属(冶炼部分),2022(10):124-134.
ZHANG Y S, ZHOU Z K, YANG S J, et al. Principles and technologies for remediation of heavy metal contaminated soil[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(10):124-134.
- [18] 阳翠红,杨志辉,司梦莹,等.基于风险管控的矿区污染修复技术与模式综述[J]. 有色金属(冶炼部分),2023(12):

- 59-68.
- YANG C H, YANG Z H, SI M Y, et al. Review of pollution remediation technologies and models in mining areas based on risk management[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2023(12):59-68.
- [19] 李丽颖. 生态环境部有关负责人解读《“十四五”土壤、地下水和农村生态环境保护规划》[J]. *中国农垦*, 2022(2):8-9.
- LI L Y. The relevant person in charge of the Ministry of Ecology and Environment interprets the "14th Five-Year Plan" for the Protection of Soil, Groundwater and Rural Ecological Environment[J]. *China State Farm*, 2022(2):8-9.
- [20] 李爽, 高兰兰, 陈军, 等. 土壤修复应用案例及费用组成分析[C]//中国环境科学学会 2022 年科学技术年会: 环境工程技术创新与应用分会场论文集(三). 南昌: 《工业建筑》杂志社有限公司, 2022:585-590.
- LI S, GAO L L, CHEN J, et al. Analysis of soil remediation application cases and its expenditure composition[C]//Proceedings of the 2022 Annual Scientific and Technical Conference of the Chinese Society of Environmental Sciences: Environmental Engineering Technology Innovation and Application Session(III). Nanchang: Industrial Building Magazine Ltd., 2022:585-590.
- [21] 王建, 夏天, 罗政, 等. 基于 GIS 的土壤重金属污染模拟扩散研究及应用[J]. *测绘与空间地理信息*, 2022, 45(1):74-78.
- WANG J, XIA T, LUO Z, et al. Research and application on soil heavy metal pollution simulated diffusion based on GIS[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2022, 45(1):74-78.
- [22] WANG Y J, CHAO T, BIN Z. A transfer learning approach utilizing combined artificial samples for improved robustness of model to estimate heavy metal contamination in soil [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 176960-176972.
- [23] 万朔阳, 吴勇, 唐学芳, 等. 基于 Hydrus-1D 对西坝镇农田土壤重金属迁移模拟及空间解析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(2):854-859.
- WAN S Y, WU Y, TANG X F, et al. Simulation and spatial analysis of heavy metal migration in Xiba town soil based on Hydrus-1D[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(2):854-859.
- [24] 张天玑, 王海芳. 重金属在土壤-地下水中的迁移模型研究:以山西、陕西黄土高原塬区为例[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(2):151-158, 164.
- ZHANG T J, WANG H F. Research on migration model of heavy metals in soil-groundwater: take Loess Plateau area in Shanxi and Shaanxi as an example[J]. *Journal of North University of China(Natural Science Edition)*, 2021, 42(2):151-158, 164.
- [25] FANG A M, DONG J H, ZHANG R. Simulation of heavy metals migration in soil-wheat system of mining area [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16: 2550. DOI: 10.3390/ijerph16142550.
- [26] QING X, BOZHI R, XI Y S, et al. Factors on the distribution, migration, and leaching of potential toxic metals in the soil and risk assessment around the zinc smelter[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109502. DOI:10.1016/j.ecolind.2022.109502.
- [27] 张兆虎, 薛丽洋, 曹兴, 等. 废弃铅冶炼厂及周边土壤铅分布特征[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(5):597-603, 609.
- ZHANG Z H, XUE L Y, CAO X, et al. Spatial distribution of Pb in soils near an abandoned lead smelter[J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 2019, 55(5):597-603, 609.
- [28] 杨国航, 李琼, 和利钊, 等. 晚稻全生育期 Cd 的迁移转化规律及预测模型研究[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(25):1-10.
- YANG G H, LI Q, HE L Z, et al. Study on the migration, transformation and prediction model of cadmium in the whole growth stage of late rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(25): 1-10.
- [29] SURENDRAN N, CHRISTOPHER D, J. P., et al. Integrated watershed process model for evaluating mercury sources, transport, and future remediation scenarios in an industrially contaminated site [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 127049. DOI:10.1016/j.jhazmat.2021.127049.
- [30] 马杰, 张秀, 刘今朝, 等. 某铅锌尾矿库周边土壤重金属污染特征及其来源分析[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2022(6):101-109.
- MA J, ZHANG X, LIU J C, et al. Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in soils of a lead-zinc tailings pond[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2022(6):101-109.
- [31] 哈力旦·艾赛都力, 阿不都艾尼·阿不里, 孙小丽, 等. 基于 GIS 的不同土地利用方式土壤重金属污染评价及来源解析[J]. *中国矿业*, 2023, 32(5):53-64.
- HARIDAN A, ABDUAINI A, SUN X L, et al. Assessment and source analysis of heavy metal pollution in soils with different landuse patterns based on GIS [J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(5):

- 53-64.
- [32] XUE S G, KE W S, ZENG J Q, et al. Pollution prediction for heavy metals in soil-groundwater systems at smelting sites[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 473:145499. DOI:10.1016/j.cej.2023.145499.
- [33] 梁耀杰. 我国土壤重金属污染现状及其防治措施探讨[J]. *资源节约与环保*, 2020(1):98.
LIANG Y J. Discussion on the current situation of soil heavy metal pollution and its prevention and control measures in China [J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2020(1):98.
- [34] 张宇. 土壤重金属污染及其防治措施探讨[J]. *资源节约与环保*, 2022(10):85-88.
ZHANG Y. Discussion on soil heavy metal pollution and its control measures [J]. *Resources Economization & Environmental*, 2022(10):85-88.
- [35] 张松. 土壤重金属污染的危害以及防治措施[J]. *世界有色金属*, 2018(18):285-286.
ZHANG S. Harm and prevention measures of heavy metal pollution in soil [J]. *World Nonferrous Metals*, 2018(18):285-286.
- [36] 刘情, 陈红燕, 唐豆豆, 等. 苏南典型区土壤-水稻系统中重金属迁移特征及定量模型研究[J]. *环境科技*, 2016, 29(4):20-25.
LIU Q, CHEN H Y, TANG D D, et al. Migration characteristics and quantitative model of heavy metals in the typical polluted areas of southern Jiangsu province [J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 29(4):20-25.
- [37] 潘茜雯, 胡韬, 孙洪广. 化工厂地土壤重金属迁移模拟[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(4):1781-1788.
PAN Q W, HU T, SUN H G. Simulation of heavy metal migration in soil of chemical plant [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(4):1781-1788.
- [38] 乔鹏炜, 周小勇, 杨军, 等. 土壤重金属元素迁移模拟方法在矿集区适用性比较[J]. *地质通报*, 2014, 33(8):1121-1131.
QIAO P W, ZHOU X Y, YANG J, et al. The comparison of simulation methods for soil heavy metal movement in the ore concentration area [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(8):1121-1131.
- [39] KAWACHI T, KUBO H. Model experimental study on the migration behavior of heavy metals in electrokinetic remediation process for contaminated soil [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 45(2):259-268.
- [40] GRECHISHCHEVA N Y, YARISLAVTSEV N V, KOTELNIKOVA A D, et al. Mobilization of soil organic matter by ultrafresh water: modeling and assessment of the impact on the mobility of heavy metals [J]. *Eurasian Soil Science*, 2021, 54(6):843-851.
- [41] SUI Y W, LU H S, HU Z H, et al. Adsorption and reduction of heavy metal Cr(VI) by enterobacter cloacae SKD and its kinetics [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2393(1):2001. DOI: 10.1088/1742-6596/2393/1/012001.
- [42] BALÁZS Z S G, MÁRTON T. Experimental and numerical study for the adsorption behavior of Cu(II) and Mn(II) in quartz sand [J]. *Sustainable Water Resources Management*, 2022, 8(5):126. DOI: 10.1007/S40899-022-00725-X.
- [43] SUN Z J, SHANGGUAN Y X, WEI Y, et al. A study on antimony migration in soils using an artificial neural network model and a convection-dispersion diffusion model [J]. *Ecological Modelling*, 2018, 389(12):1-10.
- [44] IZADI T, GHOLAMREZA A, KHODADADI D. Mathematical model for reactive transport of heavy metals in soil column; based on PHREEQC and HP1 simulators [J]. *Advances in Environmental Research*, 2017, 6(1):67-81.
- [45] 杨宇, 周佳俊, 郭婷婷, 等. 基于小流域尺度的矿区农田土壤重金属源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(9):1956-1963.
YANG Y, ZHOU J J, GUO T T, et al. Source analysis of heavy metal pollution in farmland soil in a mining area based on a small watershed scale [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(9):1956-1963.
- [46] LI Z C, LU W C, HUANG J L. Monitoring, diffusion and source speculation model of urban soil pollution [J]. *Processes*, 2020, 8(11):1339.
- [47] FARHAD M, YASSER A, TEYMOUR S, et al. Investigation of heavy metalloid pollutants in the south of Tehran using Kriging method and HYDRUS model [J]. *Geoscience Letters*, 2022, 9(1):2034. DOI: 10.1186/S40562-022-00237-8.
- [48] STEFANIA G, ROTIROTI M, FUMAGALLI L, et al. Numerical modeling of remediation scenarios of a groundwater Cr(VI) plume in an alpine valley aquifer [J]. *Geosciences*, 2018, 8(6):209. DOI: 10.3390/geosciences8060209.
- [49] 丁杰, 胡兆平, 刘湛, 等. 基于流域水环境模型评估重金属面源污染负荷 [J]. *环境科学研究*, 2023, 36(6):1125-1134.
DING J, HU Z P, LIU Z, et al. Assessment of non-point source load of heavy metals using a watershed water quality model [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(6):1125-1134.

- [50] 丁洁,彭香琴,区杰泳,等.历史遗留铅锌矿选矿厂土壤重金属污染特征及风险评估[J].环境保护科学,2023,49(5):24-30.
DING J, PENG X Q, QU J Y, et al. Pollution characteristics and risk assessments of heavy metals in soil of concentrator in historical lead-zinc mining area[J]. Environmental Protection Science, 2023, 49(5): 24-30.
- [51] 李惠民,赵刚,文琛,等.赣东北典型重(类)金属污染农田土壤人体健康风险评估[J].生态毒理学报,2023,18(5):255-265.
LI H M, ZHAO G, WEN C, et al. Health risk assessment of typical heavy metal(metalloid)contaminated farmland soils in part of Northeast Jiangxi[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2023, 18(5): 255-265.
- [52] 吕明超,徐梦劫,董敏刚,等.华南某典型香料厂地块土壤污染状况调查与风险评估[J].农业与技术,2021,41(21):93-95.
LYU M C, XU M J, DONG M G, et al. Investigation and risk assessment of soil contamination in a typical spice factory site in South China[J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(21): 93-95.
- [53] 杨琰琰,方先斌,张晓晴,等.程潮矿区周边土壤重金属污染风险评价和健康风险评估[J].有色金属(冶炼部分),2023(1):65-74,87.
YANG Y H, FANG X B, ZHANG X Q, et al. Risk assessment and health risk assessment of soil heavy metal pollution in Chengchao mining area[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2023(1): 65-74, 87.
- [54] 郭日,张盈盈,臧加伟,等.中国十省市土壤重金属镉生态风险和健康风险评估[J].环境卫生学杂志,2023,13(9):680-685,695.
GUO R, ZHANG Y Y, ZANG J W, et al. Ecological and health risk assessment of cadmium in soil of ten provinces and cities, China[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2023, 13(9): 680-685, 695.
- [55] SAIBAL G, SONALI B, JYOTI P, et al. Pollution and health risk assessment of mine tailings contaminated soils in India from toxic elements with statistical approaches[J]. Chemosphere, 2023, 324: 138267. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138267.
- [56] AJAY N, Y. H, KASHIFA I. Comprehensive assessment of pollution indices, sources apportionment and ecological risk mapping of heavy metals in agricultural soils of Raebareli District, Uttar Pradesh, India, employing a GIS approach[J]. Land Degradation & Development, 2022, 34(1): 173-195.
- [57] WANG Y B. Ecological risk identification and assessment of land remediation project based on GIS technology[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(27): 70493-70505.
- [58] 李杨,吴晓烽,梁吉哲.某冶炼厂重金属污染土壤修复案例研究[J].科技创新与应用,2023,13(5):131-134.
LI Y, WU X F, LIANG J Z. Case study of heavy metal contaminated soil remediation in a smelter plant[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(5): 131-134.
- [59] CHENG Z Y, HAN Q Y, HE Y, et al. Contrasting response of rice rhizosphere microbiomes to in situ cadmium-contaminated soil remediation [J]. Soil Ecology Letters, 2023, 6(2): 230203. DOI: 10.1007/S42832-023-0203-5.
- [60] HU Y, CAO Y N, MA C X, et al. Nano-biochar as a potential amendment for metal (loid) remediation: implications for soil quality improvement and stress alleviation[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351: 119658. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119658
- [61] GERSON M, CRISTÓBAL T, MANUEL O, et al. Spatial analysis of environmentally sensitive areas to soil degradation using MEDALUS model and GIS in Amazonas (Peru): an alternative for ecological restoration[J]. Sustainability, 2022, 14(22): 14866. DOI:10.3390/SU142214866.
- [62] XIE B, ZHAO X W, YANG J, et al. Research on intelligent supervision method and system developing of soil remediation project based on 3D mobile GIS[J]. E3S Web of Conferences, 2019, 131: 01085. DOI: 10.1051/e3sconf/201913101085.
- [63] 吴博,赵相伟,周小勇,等.基于WebGIS的土壤重金属污染修复评价系统设计与实现[J].测绘与空间地理信息,2021,44(10):131-135,139.
WU B, ZHAO X W, ZHOU X Y, et al. Design and implementation of soil heavy metal pollution remediation evaluation system based on WebGIS[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(10): 131-135, 139.
- [64] GAMTESA O, GELANA F, BASHA G. GIS based soil loss assessment using RUSLE model; a case of Horo district, western Ethiopia [J]. Heliyon, 2023, 9(2): E13313. DOI:10.1016/j.heliyon.2023.E13313.
- [65] ANH N Y, KHUE N. Management of Al³⁺ residue in the soil by mapping soil capability in retaining and transporting Al³⁺ in the farmland of Trang Bom District, Vietnam [J]. Agronomy, 2022, 12(5): 1243. DOI:10.3390/agronomy12051243.

- [51] 常玉虎,张瀚元,张蒋维,等.一种用于农药污染场地阻隔墙施工过程的异味控制装置;CN202220128585.5[P]. 2022-08-12.
CHANG Y H,ZHANG H Y,ZHANG J W,et al. The utility model relates to a barrier wall construction process for a pesticide-contaminated site flavor control device;CN202220128585.5[P]. 2022-08-12.
- [52] 李梅,张胜田,杨璐,等.一种用于农药污染土壤异味清除控制的原位氧化修复方法;CN202210167491.3[P]. 2022-08-16.
LI M,ZHANG S T,YANG L,et al. The invention relates to an in situ oxidation repair method for odor removal and control of pesticide-contaminated soil; CN202210167491.3[P]. 2022-08-16.
- [53] 江苏省环境科学研究院.农药污染地块修复与风险管控技术指南:征求意见稿[S].南京:江苏省环境科学学会,2022(试行).
Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science. Technical guide for remediation and risk management of pesticide-contaminated sites; draft for comments[S]. Nanjing; Jiangsu Society For Environmental Sciences, 2022(Interim)
- [54] ARMISTEAD S J, RAWLINGS A E, SMITH C C, et al. Biopolymer stabilization/solidification of soils: a rapid, micro-macro, cross-disciplinary approach [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(21): 13963-13972.
- [55] 常州外国语学校化工污染事件[J].绿色中国 B 版, 2016(4):78-79.
Chemical contamination in Changzhou Foreign Language School[J]. Green China, 2016(4):78-79.
- [56] 何飞,燕永利,张家明,等.土壤含水层 NAPLs 污染修复技术的研究进展[J].油气田环境保护,2008,18(3): 46-50.
HE F,YAN Y L,ZHANG J M,et al. Research progress of remediation technology of soil aquifer NAPLs pollution[J]. Environmental Protection of Oil, 2008, 18(3):46-50.

(上接第 21 页)

- [66] 朱昌达,高明秀,王文倩,等.基于 GIS 的滨海盐渍化农田土壤空间变异及其分区管理[J].生态学报,2020, 40(19):6982-6990.
ZHU C D, GAO M X, WANG W Q, et al. Spatial variability and zoning management of coastal salinized farmland soil based on GIS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(19):6982-6990.
- [67] HONG Y, LI D, XIE C, et al. Combined apatite, biochar, and organic fertilizer application for heavy metal co-contaminated soil remediation reduces heavy metal transport and alters soil microbial community structure[J]. The Science of the Total Environment, 2022,851(P1):158033. DOI: 10. 1016/J. SCITOTENV. 2022. 158033.
- [68] 张启蒙,吴勇,刘琴,等.基于 VG-TSM 模型的不同灌水模式下土壤镉迁移模拟及适用性研究[J].中国农村水利水电,2023(4):221-227,234.
ZHANG Q M, WU Y, LIU Q, et al. Simulation and applicability of soil cadmium migration under different irrigation modes based on VG-TSM Model[J]. China Rural Water and Hydropowver, 2023(4):221-227,234.
- [69] 刘欢,孙洪广.重金属砷在饱和土壤中迁移过程模拟[J].科学技术与工程,2022,22(20):8980-8985.
LIU H,SUN H G. Simulation of migration process of heavy metal arsenic in saturated soil [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(20):8980-8985.