

doi: 10.12029/gc20200916001

孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 张会琼, 殷志强. 2023. 山区小流域矿集区土壤重金属污染生态风险评价基准与模型[J]. 中国地质, 50(1): 36–51.
Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Sun Xiaoming, Zhang Huiqiong, Yin Zhiqiang. 2023. An overview of evaluation criteria and model for heavy metal pollution ecological risk in small-scale drainage catchment of mountainous area[J]. Geology in China, 50(1): 36–51(in Chinese with English abstract).

山区小流域矿集区土壤重金属污染生态风险评价基准与模型

孙厚云^{1,2}, 卫晓锋², 孙晓明^{1,3}, 张会琼², 殷志强³

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京 100012; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要:【研究目的】矿集区小流域属重金属天然高背景区, 传统重金属污染评价的统一基准值或标准值已不能满足矿山生态环境监管过程中生态环境服务功能影响评价和矿区恢复治理、土壤污染修复要求; 以地球系统科学理论指导开展山区矿集区重金属污染调查评价具有重要意义。【研究方法】本文阐述了以小流域为单元评价山区土壤重金属污染的必要性, 对矿集区土壤重金属污染生态风险评价的基准确定与模型方法进行了系统总结。【研究结果】山区矿集区土壤重金属污染与生态风险评价的关键在于调查评价单元的划分, 评价基准——地球化学基线的厘定和评价数学模型的确定。【结论】本文梳理了矿集区重金属污染评价基准的三类确定方法: 环境质量标准法、地球化学基线法和生态效应法; 论述了重金属污染与生态风险评价模型的发展和现状及各模型的优缺点及其适用性, 评价模型主要有—般指数法、模型指数法和考虑生物有效性与健康风险的评价方法; 展望了流域地球关键带调查监测技术框架下的小流域矿集区土壤重金属基线调查评价新技术、新方法的应用, 以期确定已扰动环境下重金属环境地球化学基线特征, 回溯土壤环境重金属本底特征, 揭示土壤重金属元素的污染来源和迁移转化机制, 流域生态环境污染预警和生态环境修复提供参考基准、定量标尺和方法支撑。

关键词:小流域; 重金属污染; 基准与模型; 生态风险评价; 环境地质调查工程

创 新 点:(1) 山区矿集区土壤重金属生态风险评价的关键在于调查评价单元的划分, 评价基准——地球化学基线的厘定和评价数学模型的确定;(2) 系统梳理了矿集区土壤重金属生态风险评价基准的确定与模型选择方法。

中图分类号: X142 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2023)01–0036–16

An overview of evaluation criteria and model for heavy metal pollution ecological risk in small-scale drainage catchment of mountainous area

SUN Houyun^{1,2}, WEI Xiaofeng², SUN Xiaoming^{1,3}, ZHANG Huiqiong², YIN Zhiqiang³

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources Co., Ltd., Beijing 100012, China; 3. China Institute of Geo-Environment Monitoring,

收稿日期: 2020–09–16; 改回日期: 2020–11–09

基金项目: 中国地质调查局项目承德市生态文明示范区综合地质调查(DD20160229–01, DD20190822)资助。

作者简介: 孙厚云, 男, 1990年生, 博士生, 研究方向生态水文地质; E-mail: shyun2016@126.com。

Beijing 100081, China)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] Small-scale drainage catchment in mining areas usually have natural high geological background values of heavy metals, therefore, the traditional unified reference value or standard value for heavy metal pollution assessment can no longer meet the requirements of ecological environment service function impact assessment, land restoration management, and soil restoration requirements in the process of mine ecological environment supervision. It is of great significance to carry out investigation and evaluation of heavy metal pollution in the mining area of shallow mountain areas under the guidance of scientific theory of earth system. **[Methods]** The crux of soil heavy metal pollution and ecological risk assessment in mountainous areas lies in the division of survey and evaluation units—the division of survey and evaluation scales, the determination of assessment criteria—the establishment of geochemical baselines, and the establishment of assessment mathematical models. The investigation and evaluation unit dividing method, as well as three methods for determining assessment criteria for heavy metal pollution including environmental quality standard, geochemical baseline and ecological effect method were reviewed in this article. **[Results]** The classification, applicability and development status of heavy metal pollution and ecological risk assessment models, application of new techniques and methods for geochemistry baseline survey and evaluation of soil heavy metal were summarized for evaluation of heavy metal pollution in the mining area. **[Conclusions]** All these reviews were aiming to provide reference baseline, quantitative ruler and method support for determine the baseline geochemical characteristics of heavy metals in the disturbed environment, tracing back the background characteristics of heavy metals, revealing the sources of pollution and the mechanism of migration and transformation of heavy metal, and methods for early warning of ecological environment pollution and ecological environment restoration support.

Key words: small-scale drainage catchment; heavy metal pollution; evaluation criteria and model; ecological risk; environmental geological survey engineering

Highlights: (1) The key to the ecological risk assessment of soil heavy metals in mountainous mining areas lies in the division of investigation and evaluation units, the establishment of geochemical baselines and the establishment of assessment mathematical models. (2) The evaluation criteria determination methods and evaluation models of soil heavy metal ecological risk assessment in mountainous mining catchments were systematically summarized.

About the first author: SUN Houyun, male, born in 1990, doctor candidate, engaged in the research on environmental hydrogeology; E-mail: shyun2016@126.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20160229-01, No.DD20190822).

1 引言

矿业开发是土壤环境质量的重要影响因素之一,矿业人类工程活动在某种程度上加速了区域或流域尺度内的重金属元素自然地质地球化学作用过程,改变了元素迁移转化的途经(徐友宁等, 2014)。矿产资源开发采选冶过程中的工业废弃物排放、污水灌溉、交通运输尾气排放、露天开采和尾矿库扬尘干湿沉降、矿石及围岩风化淋滤暴雨径流面源排放等使得土壤重金属污染成为区域生态环境潜在风险的重要影响因素(Shi et al., 2018; Yang et al., 2018; 孙厚云等, 2019a, b; 陈自然等, 2021; 李多杰等, 2021)。在生态文明建设和绿色矿山建设背景下,基于矿山生命周期理论的矿山环境本底调

查持续推进。与此同时,地球系统科学理论支撑指导的地球关键带调查亦已延伸至重金属环境地球化学领域(周晓妮, 2017)。矿集区小流域属重金属天然高背景区,在以往重金属污染评价中,往往采用统一环境质量标准或区域土壤背景值作为评价依据,未考虑成矿地质特征、成土母质、成土过程等差异对土壤重金属天然丰度的影响(聂静茹等, 2013),在指导矿山环境污染控制与恢复治理时易出现“过保护”或“欠保护”现象(朱晓东等, 2016)。传统重金属污染评价的统一基准值或标准值已不能满足矿山生态环境监管过程中生态环境损害评估与生态环境服务功能影响评价,因此,确定矿集区土壤重金属元素的基准值对于矿山生态风险评价、健康风险评价、矿区恢复治理、土壤污染修复等

均具有重要意义。

山区属于山地的一部分,是相对平原有一定的海拔高度和坡度起伏以低山、丘陵、台地、山麓平原和洪积扇等地貌为主的山地—平原、山地—山地之间的过渡地带,和人为开发建设与山地自然生境的交接缓冲区域。山区土壤多为基岩就近风化而成,具有定积母质特点,土壤重金属含量受原生地质环境影响强烈。山区地形地貌构架了若干相对独立和封闭存在的自然汇水区域,形成了局部差异化的水文气象微气候特征,影响着地表水、地下水的补给径流排泄特征、植被的自然空间结构分布,重金属污染物的迁移空间分布“源—汇”风险格局(王金亮等,2018);以往以行政区范围或图幅范围为边界的地质调查单元划分,不能很好地适用于山区土壤重金属污染调查评价。

山区地质环境管理与土地资源规划常以小流域为单元,能保证一定尺度范围内生态系统的完整性,生态资源要素的系统性,地质环境格局的独立性,实现山水田林湖草矿的统一综合管理。山区小流域矿集区重金属污染与生态风险评价的关键在于调查评价单元的划分,评价基准(地球化学基线)的厘定,评价数学模型的确立。本文论述了山区矿集区小流域划分、地球化学基线值确定、重金属污染与生态风险评价模型构建等方法,旨在为矿集区土壤重金属污染识别基准的确定和生态风险评价提供科学依据。

2 山区小流域评价单元的划定

2.1 以小流域为单元评价山区土壤重金属污染的必要性

流域是一类复杂的自然地理区域,它是地表水和地下水为主要纽带,密切连接特定区域水循环、土地覆被、生态系统等自然支撑系统的综合生态地域系统(Schmidt and Morrison, 2012)。小流域作为相对独立的地貌单元,具有封闭存在的自然汇水区域,对山区生态系统、地质环境特征分布格局具有明显的控制作用,影响着地质建造(岩石建造和构造特征)、元素地球化学特征、土壤类型、土地利用类型和景观格局、水文地质条件,工程地质条件,旅游资源人文资源,人类活动强度的空间分布特征。独立的水文条件使得流域控制着暴雨径流

面源污染的“源—汇”风险格局,影响着地下水污染物的迁移转化,环境污染控制与治理单元多为流域单元(巩杰等,2014)。流域边界往往与主体功能区划相一致,山区小流域沿水系多村庄密集,是人类经济活动聚集区,人类活动强度大,重金属污染、水污染等环境影响与生态风险受体分布密集,为生态风险反馈响应敏感区。长期以来,以小流域为单元进行流域水环境管理与规划、水污染治理、水资源配置,开展地质灾害调查评价已被广泛接受(蒋洪强等,2015),与流域相关的流域水环境模型,排污交易政策、流域生态补偿机制和污染治理模式、流域生态风险评价与管理研究也是环境科学研究的重要方向之一(李月和齐实,2018)。

总体而言,小流域具有相对独立的地质生态系统,是多圈层交互作用强烈地带,可作为人类活动与生态环境发生紧密联系的基本单元。以山区自然地貌分异与水文过程形成的生态空间格局为评价区域,评价矿业活动人为干扰等风险源对流域内重金属污染的影响,识别重金属元素的可能来源、研究迁移转化富集规律、评价潜在生态风险,指导重金属污染场地恢复治理与土壤修复等,具有实际意义。

2.2 山区小流域评价单元的划定

在实际调查过程中,主要以地理地貌学中的水系流域划分方案进行流域划分。区域性的一级流域由国家一级水系区划划定,一级水系支流(二级水系)再划分次级流域,而矿集区土壤重金属污染评价单元山区矿集区通常是指二、三级支流以下以分水岭和下游河道出口断面为界的集水区(张会琼等,2017)。一级流域和次级流域的土壤环境特征常用以作为山区矿集区小流域土壤环境的本底(Baseline)特征背景调查区。在山区小流域实际划分过程中,常借助ArcGIS平台基于数字地貌高程模型(DEM)自动提取,控制适宜的集流阈值、小流域面积频率、精度以及河网密度进行划分;再辅助遥感影像、坡度阴影表面分析进行一定的人工修正。小流域划分以自然地形地貌为基础,面积原则上控制在30~50 km²,特殊情况不宜小于3 km²或大于100 km²;微流域最小面积一般以0.1~1.0 km²为宜,实际划分过程中,可根据地形复杂状况选择合适的阈值(韩培等,2018)。如承德市内主要水系滦河属于海河的二级支流,伊逊河、武烈河等属滦河支流,

海河的三级支流,在承德市钒钛磁铁矿矿集区小流域重金属污染评价时,以滦河流域土壤重金属环境地球化学基线为评价基准,而以三级支流伊逊河小流域、武烈河小流域或更小的次级流域矿集区为单元开展工作。山区矿集区重金属污染与生态风险评价以流域单元开展,较传统的以行政区为单元或图幅范围,更适用于流域地球关键带和生态地质要素的调查,有利于土壤环境的综合保护与管理。

3 评价基准值的确定方法

评价基准的确定是小流域矿集区金属污染与风险评价的关键内容,可以为矿业活动重金属高背景值区域生态环境监管,土壤环境损益评估提供借鉴,为重金属污染环境监测预警、风险控制和生态环境修复提供参考基准和定量标尺,是指导土壤环境保护、土地利用规划,污染土壤治理修复、土壤污染生态效应评价(环境风险评价与健康风险评价)、地球化学灾害预测研究的基础(周国华等,2005;李婷等,2020)。现行土壤环境质量标准环境保护对象主要针对农用地和建设用地,用统一的标准来界定土壤中某种污染元素的临界值较为缺乏科学性,标准适用性也有所差异,针对不同区域、不同土壤类型、不同土地利用方式、不同功能区划制定不同的污染物限值要求,建立不同的评价标准十分必要(Sun et al., 2019; Chen et al., 2019)。

另一方面,环境基准和环境质量标准的内涵有所差异,环境基准是指环境中污染物对特定对象(人或其他生物等)不产生不良或有害影响的最大剂量(无作用剂量)或浓度,是由污染物同特定对象之间的剂量-反应关系确定的,不考虑社会、经济、技术等人为因素,不具有法律效力。环境质量标准是在考虑技术、经济条件下为保障人体健康、维护生态环境、保证资源充分利用,而对环境中有害物质和因素作出的限制性规定,是国家或地方环境政策目标的具体体现;环境基准和环境质量标准二者均可作为评价基准。以往将环境基准等同于环境质量标准致使环境标准体系系统性不强,在重金属的生物效应、健康风险评价、污染治理修复时,对污染土壤修复效果,土壤纳污能力和环境容量评价时存在局限,污染土壤健康风险和修复基准的研究十分必要,保证土壤环境质量评价、土壤环境规划管

理、修复全过程的标准体系的系统性。基于土壤生态环境和人体健康保护两方面制定评价基准,可将评价基准分为土壤环境背景值、土壤污染风险筛选值、土壤污染风险管控值、土壤修复目标值等4类,将标准确定方法分为地球化学法与生态效应法(陈怀满等,2006)。

3.1 以环境质量标准作为评价基准

土壤环境质量标准是重金属污染评价最常用的评价基准。在研究区无法获取历史数据和对照区数据时,根据影响区域土地利用方式,应用相应的土壤环境质量标准,包括国家标准、行业标准、地方标准和国外相关标准,如《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)、《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)、《温室蔬菜产地环境质量评价标准》(HJ 333-2006)、《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ 332-2006)等。如果存在多个适用标准时,应该根据评估项目所在地区技术、经济水平和环境管理需求确定选择标准。矿集区小流域重金属污染评价时,采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)风险筛选值作为评价标准时,由于某些重金属元素的自然丰度较高,属地质高背景区,进行生态风险评价和污染治理时,易产生风险误判和过度治理的问题。

3.2 地球化学法确定评价基准

地球化学基线最早由国际地质对比计划欧美地球化学填图项目(IGCP259)和全球地球化学基线(IGCP360)项目提出(倪师军等,2004;王学求等,2016),旨在通过基线地球化学评价区分人类活动对环境的扰动,是研究土壤环境演变的重要方法。矿产资源集中区土壤污染与风险评价基准水平确定常用的方法有历史数据对比法、历史数据统计改进对比法,对照区域背景值法,现状调查数据统计学背景值法,累积频率、参比元素标准化法环境地球化学基线法,基于土壤重金属元素垂向分布规律的似背景值法,基于土壤理化性质表征的标准化法,不同土地利用类型、功能利用分区、地质建造分区分类采样机制等。

矿业开发活动前的土壤重金属元素丰度(污染起始浓度)是矿集区土壤污染的理想评价基准,矿集区重金属污染评价时可优先使用历史数据作为

基线水平。在新建矿山投产运行前,一般会有建立对环境动态监测、污染物扩散规律、环境质量人体健康影响、自然自净能力评价基础上的环境本底调查或建设项目环境影响评价土壤环境质量评价数据;在环境地质调查、土地质量调查等公益性地质调查覆盖区,或国家、地方土壤环境监测网络监测站点覆盖区,历史数据均可作为重金属污染评价的基准值。另外,固体矿产资源勘查预查、普查、详查、勘探各个阶段均有丰富的地球化学勘查资料,如土壤化探样品、岩屑样品、岩石样品、水系沉积物样品等;但在样品加工和分析方法上,地球化学勘查和土壤环境质量调查存在一定差异,以化探数据作评价基线水平值时需进行统计学或实验对比改进;如矿产勘查岩屑样品多筛分加工粒径为40目,土壤环境质量调查样品采集为10目,1:25万多目标区域地球化学调查样品采集为20目。在干旱荒漠景观区(如新疆戈壁荒漠区)岩石成土过程以物理风化为主地区,无其他成土搬运迁移作用将矿物颗粒或矿物元素输入或输出,可尝试开展样品加工方法试验,采集研究区现状岩屑样品、土壤样品分别加工成不同粒径进行分析,建立不同粒径样品的元素含量相关回归分析方程。运用建立的回归方程,可以将岩屑地球化学样品经标准化校正表征为同时期土壤介质重金属元素含量,用作污染评价基线值。另一方面,在缺乏历史数据时,可以选取成壤规律、气象水文、农业措施等土壤外部影响因素较为一致的相邻区域土壤重金属元素含量平均值,作为评价基准值(徐友宁等,2014)。

在缺乏工作基础和历史数据的矿集区小流域,更多的是通过现状调查数据经统计学方法确定土壤污染评价基准值(Covelli and Fontolan, 1997; 陈兴仁等, 2012; 李多杰等, 2021)。在成土母质分类分区前提下,对现状调查数据进行离散统计,采用维斯捷利乌斯(Visteliws)置信带分析数据分布情况;经反复检验、统计和异常值剔除,采取置信区间内数据的算术平均值与2倍标准差之和作为环境背景值上限值,以此作为评价基准。全国地球化学基准网建立计划中(王学求等, 2016),采用分位数选取地球化学基线值,从统计学角度选取正态分布数据的四分位数,以25%、50%和75%累积频率处分位数对应的基线值分别作为低背景、背景、高背景地球

化学基准值,以85%累积频率处分位数作为异常基准值。

在受矿业活动影响的山区小流域内,重金属元素含量、自然本底值、地球化学基线、土壤环境质量总体上具有图1a中所示的关系。在土壤环境已扰动情况下,自然本底值(Nature Baseline)已很难获取,环境地球化学基线水平成为界定污染、判定污染程度的重要参考标准(图1a)。常用于确定地球化学基线的方法有标准化方法和相对累积频率分析法(朱晓东等, 2016; 孙厚云等, 2019a, 2021a)。在成壤过程中,某些惰性元素与重金属活性元素(污染元素)具有较好的相关性,可以将惰性元素作为标准元素,根据其活性元素的相关性建立二者之间的线性或非线性回归方程,由95%置信区间内的标准元素的实测浓度算术平均值经基线模型方程确定污染元素的基线值;常用的标准元素有Al、Fe、La、Li、Sc、Ti、V、Rb、Cs等。在确定矿集区土壤重金属环境地球化学基线时,可选取新揭露的受矿业活动影响较小的自然成土剖面,采用与矿床矿致异常元素相关性小的参比元素进行厘定。累积频率法由Sinclair(1974)和Tennant(1985)引进到地球化学探矿研究中,可以敏感地反映数据的异常。利用累积频率曲线中所有点实测污染元素浓度进行直线回归分析,确定回归曲线拐点,将两拐点间样本元素含量的算数平均值作为基线值。

通过一定间隔(10~20 cm)或高密度(<5 m)的垂向剖面土壤样品采集分析研究表明,剖面一定深度以下土壤样品的重金属元素含量变化趋于稳定(苏耀明等, 2016),如徐友宁等(2014)研究表明小秦岭地区金矿影响区农用地耕作层40~60 cm土壤重金属元素含量趋于稳定,攀枝花矿区花岗岩风化形成的土壤剖面上50 cm时各元素含量变化趋于稳定,可以将一定深度内元素含量稳定时的污染元素实测值剔除大于3倍离差数据后的平均值作为评价基准(图1b)。通过表层土壤与深层土壤元素含量的对比确定背景值时,由于不同地域不同土壤类型的元素垂向分布规律及稳定层位不尽相同,具有一定的局限性,如土壤重金属元素含量趋于稳定仅限于在地表水体溶解度很小的Pb、Hg、Cd等元素,某些土壤中有机质、黏土矿物和铁锰氧化物含量相对较高的地区,As、Cd、Pb、Hg等元素含量相对增加,

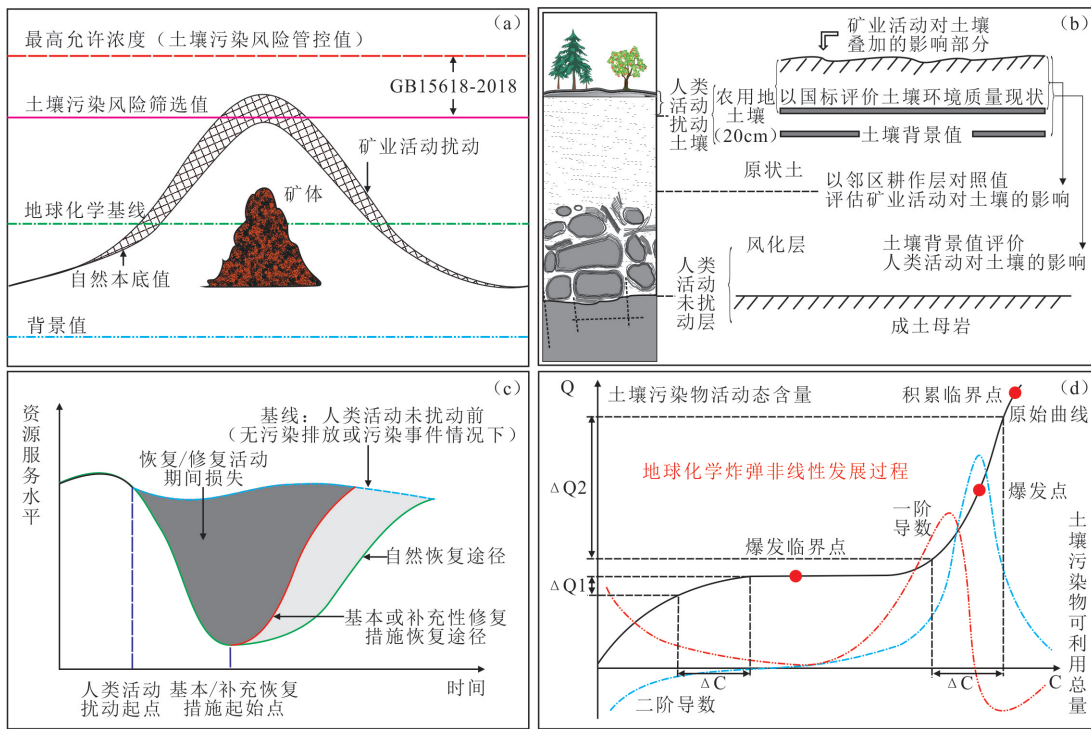


图1 矿集区土壤重金属污染评价标准示意图

Fig. 1 Standard for evaluation table of heavy metal pollution in soil

但为非人为活动造成的,故确定的元素背景值为似背景值(赵元艺等,2014)。在第四系覆盖层厚度适中的矿集区,可以建立土壤标准剖面,重金属人为影响的迁移富集和富矿围岩风化的元素传导方向呈相反方向,即地表重金属随水溶液下渗,重金属含量总体呈表层土壤重金属含量低于深层土壤特征;矿体岩体上部由于成矿原生晕岩石风化传导作用,使得越靠近矿体部分土壤重金属含量相对越高,即深度愈大重金属含量愈高;覆盖层土壤中部存在一个元素含量相对稳定区,该层的元素含量平均值亦可以用作评价基准值。另一方面,黏土矿物与重金属元素存在一定的相关性,可以参照标准化法将黏土矿物作为参照物质确定背景值,评价重金属元素的富集程度(郝立波等,2016)。

土壤重金属环境基线的厘定可以作为矿山开采土壤环境的起始值,评价矿山勘查-开采-闭坑-恢复全生命周期各阶段土壤环境重金属扰动对矿产资源服务水平的影响(图1c)。同时,土壤重金属环境基线的厘定一定程度上可以为环境质量评价、环境问题预测以及污染物在环境中迁移转化规律的研究、环境标准的制定、环境污染权责划分、土壤

修复和土地复垦提供可比较和解释的科学依据,是判断矿业活动对地质环境扰动的起始参考值(周妍,2014;王晨昇等,2019)。陈明等(2006)将土壤重金属污染称之为缓变型地球化学灾害,亦即“化学定时炸弹”,并对重金属污染的长期累积和非线性释放(Q为土壤中重金属活动态含量,C为重金属的可利用总量)提出了识别和预测模型(图1d),通过异常的生态效应特征(如地方病、植物生长发育异常),重金属污染物浓度变化和输入速率的数学特征划定土壤重金属污染环境地球化学基准值,识别爆发临界值等,从而预测重金属环境地球化学行为。

3.3 生态效应法

生态效应法以保护不同土地利用方式下的人体健康和生态安全作为污染判别或污染修复最终目标,是基于土壤生态环境和人体健康风险的环境管理策略(张红振等,2011);具体的标准确定主要涉及重金属有效态限值、土壤污染风险筛选值、土壤修复目标值等。通过生态效应确定环境基准的关键在于方法试验的科学性和广谱性(周启星等,2014)。重金属有效态、形态标准值的确定基础是通用提取剂和提取方法的研究,以保证毒理数据的

可比性(崔邢涛等,2015;余涛等,2021;孙厚云等,2021b)。污染物的土壤环境风险值、土壤修复目标值主要由试验研究(如盆栽试验、大田试验)和生态毒理学实验确定。在存在复合污染时,要考虑污染物发生的交互作用,即污染物的互作态。对于不同场地,土地利用功能属性不同,结合土壤钝化和活化、植物吸收和阻控、微生物转化等生物化学行为,全面考虑暴露途径、合理选择暴露参数,以人体最高允许摄入量、土壤污染物淋滤强度、径流侵蚀与冲洗作为修复目标值标准制定的基本原则(化勇鹏,2012)。如窦磊等(2007)将土壤环境中重金属生物有效性评价方法划分为物理化学法和土壤生物学评价法两类,包括化学总量预测法、化学一步提取法、顺序提取法、自由离子活度法(唐南膜平衡法)、植物指示法、微生物学评价法等(徐猛等,2013;章海波等,2014)。

4 土壤重金属污染评价方法

在评价基准值确定后,需要通过数学模型来评价单个重金属元素的污染程度、生态风险或重金属元素的综合污染程度,潜在生态风险和環境健康风险等。目前,重金属污染评价还没有统一的评价模型和方法,结合近年研究,评价方法总体上可分为三类:一般指数法、模型指数法、生物有效性与健康风险评价法(范拴喜等,2010;杜艳等,2010;郭笑笑

等,2011;刘同等,2022)。

4.1 一般指数法

一般指数法通过固定的数学公式计算污染元素实测值与评价标准的指数关系,确定重金属元素单项污染等级或综合污染等级。常用的数学指数方法有单因子指数法、污染负荷指数法(The Pollution Load Index)、内梅罗污染指数法(Nemerow Pollution Index)、地积累指数法(Index of Geoaccumulation)、富集因子法(Enrichment Factor, EF 指数)、潜在生态危害指数法(The Potential Ecological Risk Index, RI)等,常见指数评价法计算公式见表1。

在山区小流域矿集区土壤重金属污染生态风险评价中,可运用一般指数法对重金属的总体污染状况进行宏观评价,作为其他模型运用分析的基础。基于单因子指数的综合评价方法有简单叠加、算数平均、加权平均、均方根法、平方和的平方根法等;单因子指数法的算术平均或几何平均处理一定程度削弱了重金属综合评价的权值,仅适用于单一因子污染特定区域的评价,但其是环境质量分级和综合评价的基础。污染负荷指数法能直观反映单项重金属元素对综合污染的贡献程度以及重金属在时间、空间上的变化趋势。内梅罗污染指数法能较为全面地评判重金属的总体污染程度(李雪梅等,2007;陈自然等,2021),但未考虑土壤中各种重

表1 常见指数评价法计算公式

Table 1 Calculation formula of several commonly used index methods

名称	公式	参数内容
单因子指数法	$P_i = \frac{C_i}{S_i}$	P_i 为单项污染指数; C_i 为污染物实测值; S_i 为根据需要选取的评价标准
污染负荷指数法	$P_n = \sqrt[n]{P_1 P_2 P_3 \cdots P_n}$	P_n 为某区域的污染负荷指数; P_i 为单项污染指数; n 为从该区域采样点数
内梅罗污染指数法	$P_i = \sqrt{\frac{(P_{iave})^2 + (P_{imax})^2}{2}}$	P_{iave} 为单项污染指数平均值; P_{imax} 为最大单项污染指数
地积累指数法	$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{(k \times B_n)} \right]$	I_{geo} 为地积累指数; C_n 为第 n 种元素的实测值; B_n 为第 n 种元素的背景值; k 是为考虑岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数,一般取值为1.5; C_{ref} 为参比元素在所测环境中的浓度; B_{ref} 为参比元素在背景环境中的浓度
富集因子法	$EF = \frac{(C_n / C_{ref})_{sample}}{(B_n / B_{ref})_{background}}$	RI为综合潜在生态危害指数; T_i^i 为重金属 i 的毒性响应系数; C_i^i 为重金属 i 的污染系数; C_n^i 为污染物质实测值; C_n^i 为根据需要选取的评价标准
潜在生态危害指数法	$RI = \sum_{i=1}^n T_i^i \cdot C_i^i = \sum_{i=1}^n T_i^i \cdot C_i^i / C_n^i$	

金属毒性的差别,仅能反映污染的程度而难于反映污染的质变特征(范拴喜等,2010)。地积累指数由德国科学家Müller(1969)提出,引入了考虑岩石差异导致的背景值变动差异的校正系数,能够较好地考虑地质背景所带来的影响。富集因子法引入参比元素对污染元素进行标准化,减小了环境介质以及样品采集和加工过程对元素浓度的影响。在区域土壤环境质量评价时,参比元素的不稳定性使得背景值不确定性增加(张秀芝等,2006),富集因子指数法较适用于小流域矿集区等小区域范围的重金属环境质量评价。潜在生态危害指数法由瑞典科学家Hakanson(1980)提出,针对不同重金属元素引入毒性响应系数,一定程度上将环境生态效应与毒理学联系起来,消除了区域差异影响,使得不同尺度、不同范围重金属潜在生态风险具有可比性,是综合反映重金属对生态环境影响潜力的指标,适合于大区域范围沉积物和土壤进行评价比较;但其未考虑健康风险受体特征,重金属拮抗作用等,不能满足精细化健康风险评价要求。

谢志宜等(2016)研究表明,对单个重金属元素污染评价时,富集指数法最优,单项污染指数法次之,其次是地累积指数法,最后是潜在生态风险指数法。一般指数法在山区矿集区小流域土壤重金属污染评价中具有普遍适用性,但评价结果对特征重金属溯源分析效果不明显,多较宜用以说明流域重金属污染和生态风险的总体宏观分布情况。

4.2 模型指数法

模型指数法是在已有样本数据基础上,通过构建多元统计决策数学模型,进行重金属污染评价,常需要借助特定计算软件;适用于污染评价决策对比过程中的模糊边界以及土壤质量影响因素灰色性的处理和权重分配。模型指数数学模型众多,土壤污染评价中应用较广的有模糊数学法、灰色聚类法、层次分析法、神经网络法、物元分析法、核密度估计模型、区间排序法、支持向量机预测模型等(谢志宜等,2016)。

模糊数学法以隶属度来描述土壤污染状况的模糊界线,经权重叠加和模糊矩阵复合运算确定污染等级;在模糊数学基础上改进衍生出的相关数学模型有三角模糊数模型(Michael et al., 2008)、模糊贴近度模型(陆洋等,2007)、属性识别模型(孔健健

等,2012)、支持向量机模型(姜雪等,2014),提高了评价结果的可分辨性和可拓展性。灰色聚类法通过构造白化函数,引入修正系数确定污染权重,最终按聚类系数的最大值进行污染评价等级分类,计算较为繁琐(郭绍英等,2017)。层次分析法构建重金属元素层次分析模型,通过判断矩阵计算单要素权重,适用于重金属综合污染评价,计算过程相对简单(陈峰等,2012)。层次分析法在定权计算过程中,实际监测数值的利用率较低,故重金属响应系数和重金属-作物体系植物重金属含量限值易于被引入综合评价模型中,在重金属生态效应和健康风险评价中亦适用(胡森等,2014)。神经网络可以较好地映射非线性关系,通过样本选取、确定网络各层的节点个数和神经元的传递函数、确定训练函数进行污染评价,提高了分析数据的信息量和可靠性(李向等,2012)。物元分析法通过建立物元模型,确定经典域和节域矩阵,根据关联函数计算关联度和综合关联度,最终根据最大关联度原则确定评价等级(苏海民等,2016)。核密度估计户籍模型仅依赖数据本身,是完全数据驱动下的密度函数的估计,在土壤重金属数据信息挖掘上有很强的适用性(Krishna et al., 2013; Okedeyiet al., 2014)。区间排序法现阶段在重金属污染中也逐渐的到应用,重金属含量区间数较均值评价相比,能更好地表征污染物浓度的变化范围,信息量得到提升(王晓飞等,2017)。以上模型各有优缺点,在山区小流域矿集区土壤重金属污染生态风险评价实际应用中可根据数据丰富程度和评价需求合理选择。

4.3 考虑生物有效性与健康风险的评价方法

指数模型评价主要是针对土壤中重金属的超标和富集情况进行评价,对各重金属元素的生物毒性差异,化学形态和生物有效性考虑较少;评价直接围绕对象主体进行,对风险影响受体考虑较少。近年来,重金属污染与生态风险评价更多的关注于土壤中重金属的可提取态—生物有效态和健康风险评价等方面,涉及评价方法有重金属提取态评价、重金属形态分析、农作物-土壤体系重金属有效态分析、环境风险评价和健康风险评价等。重金属提取态评价是指通过标准试剂经过一定的实验处理,通过提取溶液中重金属的浓度表征重金属的污染程度,常用的提取方法有BCR提取法、弱酸试剂

提取法、螯合剂提取法、缓冲试剂提取法等(刘春早等,2011)。目前,较为成熟的提取态评价方法主要为美国法定重金属污染评价方法 TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP) (Bilge and Mehmet, 2002; Sun et al., 2006)。除上述重金属提取态外,面向重金属形态、迁移能力以及对植物吸收有效性的重金属有效态和形态分析应用也越来越广,常用的有生物效应浓度法、重金属形态分析法、次生相与原生相分布比值法等。生物效应浓度法以土壤重金属有效态浓度表征污染强度,能更有效地反映土壤重金属污染状况和植物潜在危害程度(楠定其其格等,2014)。重金属形态分析法更为系统,主要有两类分类体系:基于 Tessier et al. (1979)提取法的交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物结合态和残渣态;和经提取方法改进后的交换态、碳酸盐结合态、氧化锰结合态、有机结合态、无定形氧化铁结合态、晶形氧化铁结合态和硅铝酸盐矿物态分类方法。与此同时,重金属生物有效性分析也从土壤重金属分析扩展至植物迁移富集分配过程中,成土母质、根系土、植物总体和组织中,更准确地刻画重金属潜在环境风险,也为土壤生态修复提供了重要支撑(黄益宗等,2013)。环境风险评价法通过污染元素的实测浓度、元素的污染临界限量、环境风险指数等参数综合加权之和表征重金属污染环境风险,由 Rapant et al. (2003)提出,目前国内该方法较考虑重金属毒性响应系数的潜在生态风险指数法应用较少。健康风险评价以人体为风险受体,针对环境介质中的基因毒物质(放射性污染物和化学致癌物)和躯体毒物质(非致癌物)进行定量评价,估算污染物进入人体的数量,识别暴露途径、暴露参数(如暴露周期和暴露频率)和临界风险受体,评估剂量与负面健康效应之间的关系,并表征污染物引起的致癌和非致癌风险。目前,健康风险评价多集中于污染场地尺度,对大气(大气降尘)、地下水(地表水)、土壤、农作物等进行单环境介质健康风险评价,也没有统一评价参数和模型(夏芳等,2017)。针对金属矿集区开展健康风险评价时,可耦合大气降尘-水-水系沉积物-土壤-农作物等多种环境介质进行综合评价,为土壤环境风险管理和决策提供依据(常玉虎等,2015;宋静等,2019)。

在人类活动较为强烈,或矿区周围存在农用地等重金属污染敏感受体的山区小流域矿集区重金属污染评价基准确定,如在生态环境损害鉴定评估执法时,或小流域尺度土壤修复等为环境决策提供依据时,需优先考虑基于人体健康和生态安全为污染判别目标的生态效应法,以此作为评价基准值的确定方法为土壤环境风险管理提供可能引起不良生态环境效应的科学支撑信息。

5 讨论与展望

5.1 流域地球关键带调查监测与重金属元素循环

地球关键带为人类社会面临的重大资源、环境和生态问题提供新的理论框架和解决方案(Minor et al., 2019)。重金属环境地球化学行为是流域地球关键带调查流域生态环境问题库、地球四大圈层变量库和人类活动变量库的重要研究内容(石建省等,2019;马腾等,2020);地球关键带植被-土壤界面、包气带-饱水带界面垂向结构,岩石风化过程对山区小流域土壤重金属环境归趋具有重要影响。以地球系统科学理论指导的山区重金属污染调查评价对揭示重金属元素的空间分布特征、污染累积程度、污染源和重金属迁移转化机制,流域生态系统响应反馈机制,环境生态风险评价,人体健康评价与生态自然修复能力具有重要意义。山区土壤具有定积母质的特点,物、能流呈现垂向传导继承性(李正积,1996;孙厚云等,2021c),通过成土母岩、风化层、土壤层、水系沉积物、大气干湿沉降、根系土、农作物多环境介质的重金属元素丰度特征,可以溯源重金属污染形成、传导、富集迁移机制,阐明多环境介质耦合的重金属污染健康风险。通过关键带不同环境介质重金属空间分布特征,阐明元素垂向迁移规律以及土壤垂向结构、质地、基岩-土壤-水-生物界面对重金属迁移转化的影响制约,可以为重金属污染生态风险评价提供新的思路。

随着技术的发展,地球关键带调查循环上升的填图(Mapping)-监测(Monitoring)-建模(Modeling)体系框架中愈来愈多新技术、新方法被应用到土壤重金属污染源解析研究中(Lin, 2010)。如同位素新技术的应用(陈雅丽等,2019),稀土元素示踪技术(赵文静等,2014)、多环境介质耦合的健康风险评价(卢鑫等,2018)、遥感多光谱遥感影

像解译指示监测土壤重金属含量变化,低空无人机或载人飞机航飞放射性监测物探技术监测识别土壤重金属含量的长时序变化特征。同位素比值法利用不同污染源中某重金属元素同位素比值的不同分馏特征,来定量区分污染物的来源及贡献程度;目前已有Pb、Cd、Cu、Zn、Hg同位素逐步应用于土壤重金属污染溯源研究(孙厚蔚等,2017;张妙月等,2022)。多元统计模型的进展也为重金属污染溯源分析提供了新的工具,如正定矩阵因子分解法(PMF)、UNMIX模型、条件推断树、有限混合分布模型、随机森林法等(董燕等,2021)。测试技术和采样优化模型的发展也使得土壤重金属污染快速评价变得更为便利。如样品测试方法的改进,使得采集样品量大大减小,田野调查无扰动采样得以实现;便携式重金属快速测定仪器(如便携式X射线荧光光谱分析仪,手持式XRF)可以为矿区高精度化探数据方法试验,即化探历史数据校正提供大量样本,实现无扰动高密度采样数据分析,为矿集区小流域本底调查技术方法体系、基于小流域-地质建造-土地利用类型的重金属污染评价快速提供大量样本,实现基于GIS基线分割与插值单元优化的土壤重金属生态风险累积效应定量评价(孙厚云等,2021a,2022)。随着信息技术的发展,大数据可视化技术亦在重金属污染和风险评价中有所应用。如基于不同土地利用类型,土地功能区划、服务对象、农作物立地背景、景观格局、成土地质建造条件下,实行分类采样确定地球化学基线(李文博,2018),区分影响重金属污染的主要控制因素,有针对性地进行重金属污染和环境风险评价。

5.2 基于矿山环境本底调查和矿山生命周期理论的土壤环境重金属监管模式

土壤重金属基准值是矿山生命周期理论下判断矿业活动对土壤环境扰动的起始参考值,在国内大多矿山已开采,土壤环境已扰动情况下,自然本底值(Nature Baseline)已很难获取,通过矿山环境本底调查确定的环境地球化学基线水平成为界定污染、判定污染程度和生态环境损益评估的重要参考标准。

国外矿山开发项目已广泛实施环境影响评价本底调查制度,根据《Michigan's nonferrous metallic mining regulations 1994》,在申请采矿权时必须提交含本底调查、预测评价和替代方案评估的环境影响

评估报告;同时在矿山项目本底调查中规定了土壤重金属本底数据的收集项目(ELAW, 2010)。《Environmental code of practice for metal mines 2009》明确了基于矿山生命周期理论的生态环境监管模式,提出了从勘探到闭坑的整个矿山生命周期,为缓减已识别的各类环境问题提供环境管理实践方面的建议,并规定了矿产资源勘查阶段需要进行本底调查,即为后续矿山土壤环境质量评价和土地修复提供了本底值(基线值)(Environment Canada, 2009)。澳大利亚国际开发署在2003年发布了本底调查研究指南(Baseline Study Guidelines),亦有相应规定(AusAID, 2003;柴星等, 2021)。通过建立基于矿山环境本底调查和矿山生命周期理论的生态环境监管模式,可以完善土壤环境重金属质量长期监测和动态预警机制,体现矿区重金属元素地球化学高背景,制定从源头上控制扰动和破坏的技术路线与措施,支撑生态环境监管模式和制度创新。基于矿山环境本底调查的土壤重金属污染损害评估基线水平评价,为生态环境损害评估、环境污染预警、风险控制和生态环境修复提供参考基准和定量标尺,有利于生态环境评价考核制度、自然资源资产负债表和审计考核的制度完善。

6 结 论

本研究探讨了在生态文明建设背景下,以地球系统科学理论指导如何开展小流域矿集区土壤重金属污染评价,阐述了矿集区小流域调查评价单元的划分方法,论述了矿集区土壤重金属污染生态风险评价基准与模型及各模型的优缺点和适用性,展望了流域地球关键带调查监测技术框架下的小流域矿集区土壤重金属基线调查评价新技术、新方法的应用,主要得出以下结论:

(1)矿集区土壤重金属污染与生态风险评价的关键在于评价单元-评价尺度的划分,评价标准-地球化学基线的厘定和评价数学模型的确立。小流域具有相对独立的地质生态系统,是地球多圈层交互作用强烈地带,可作为人类活动与生态环境相互作用评价的基本单元。

(2)矿集区重金属污染评价基准可通过环境质量标准法、地球化学基线法和生态效应法确定,重金属污染与生态风险评价模型主要有一般指数法、

模型指数法、考虑生物有效性与健康风险的土壤重金属污染评价方法。山区矿集区小流域重金属污染评价需根据不同需求选择合适的评价基准和模型。

(3) 矿集区小流域属重金属天然高背景区, 差异化的土壤重金属污染评价基准和地球化学基线为矿集区生态环境损害评估、环境污染预警、风险控制 and 生态环境修复提供参考基准和定量标尺具有重要意义, 是基于矿山环境本底调查和矿山生命周期理论的生态环境监管有效途径之一。

References

- AusAID. 2003. Baseline Study Guidelines[R]. Australia: Australian Agency for International Development.
- Bilge Alpaslan, Mehmet Ali Yukselen. 2002. Remediation of lead contaminated soils by stabilization/solidification [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 133: 253–263.
- Chai Xing, Wang Chensheng, Wang Jingbin. 2021. Exploration and analysis of environmental governance model of mine life cycle[J]. *Natural Resource Economics of China*, 40(8): 3753–3763 (in Chinese with English abstract).
- Chang Yuhu, Zhao Yuanyi, Cao Chong, Shan Yun, Cao Qiang. 2015. The characteristics of heavy metals content and health risk assessment in different environment media from Dexing copper mining area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(5): 889–908 (in Chinese with English abstract).
- Chen Feng, Jiang Xin, Tang Fangliang, BianYongrong. 2012. Application of AHP and GIS in evaluation of agricultural soil heavy metals pollution[J]. *Environmental Pollution & Control*, 34(7): 6–8, 14 (in Chinese with English abstract).
- Chen Huaiman, Zheng Chunrong, Zhou Dongmei, Wang Shenqiang, Lin Yusuo. 2006. Soil Environmental quality: A review[J]. *Journal of Agro- Environment Science*, 25(4): 821–827 (in Chinese with English abstract).
- Chen Ming, Cao Xiaojuan, Tan Keyan, Mou Yongming, Cao Shuping, Feng Xin, Feng Liu. 2006. Present and future of the researches on chemical time bomb in soil[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(10): 1607–1615 (in Chinese with English abstract).
- Chen Shibao, Wang Meng, Li Shanshan, Zhao Zhongqiu, Wendi E. 2019. Overview on current criteria for heavy metals and its hint for the revision of soil environmental quality standards in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(4): 765–774.
- Chen Xingren, Chen Furong, Jia Shijun, Chen Yongning. 2012. Soil geochemical baseline and background in Yangtze River Huaihe River basin of Anhui Province[J]. *Geology in China*, 39(2): 302–310 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yali, Weng Liping, Ma Jie, Wu Xiaojuan, Li Yongtao. 2019. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. *Journal of Agro- Environment Science*, 38(10): 2219–2238 (in Chinese with English Abstract).
- Chen Ziran, Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Hung Xingkai, Li Duojie, Zhang Xiaomin, Guo Yingchao. 2021. Spatial structure characteristic and ecological risk assessment of heavy metal in the soil of Vanadium Titanite Magnetite Mine area in Heishan, Chengde, North China[J]. *Mineral Exploration*, 12(4): 1019–1029 (in Chinese with English abstract).
- Covelli S, Fontolan G. 1997. Application of a normalization procedure in determining regional geochemical baselines[J]. *Environmental Geology*, 30(1): 34–45.
- Cui Xingtao, Wang Xueqiu, Luan Wenlou. 2015. An analysis of modes of occurrence and biological availability of the heavy metal elements in soil of the central and southern plain in Hebei[J]. *Geology in China*, 42(2): 655–663 (in Chinese with English abstract).
- Dong Yan, Sun Lu, Li Haitao, Zhang Zuochen, Zhang Yuan, Li Gang, Guo Xiaobiao. 2021. Sources and spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils from Xiongan New Area, China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(3): 172–181 (in Chinese with English abstract).
- Dou Lei, Zhou Yongzhang, Gao Quanzhou, Peng Xianzhi, Cai Limei, Gu Zhihong. 2007. Methods and environmental implications of measuring bioavailability of heavy metals in soil environment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 38(3): 576–583 (in Chinese with English abstract).
- Du Yan, Chang Jiang, Xu Li. 2010. Progress on assessing methods of soil environmental quality[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 3(3): 749–756 (in Chinese with English abstract).
- ELAW. 2010. Guidebook for Evaluating Mining Project EIAs[R]. America: Environmental Law Alliance Worldwide.
- Environment Canada. 2009. Environmental code of practice for metal mines[Z].
- Fan Shuanxi, Gan Zhuoting, Li Meijuan, Zhang Zhangquan, Zhou Qi. 2010. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 26(17): 310–315 (in Chinese with English abstract).
- Gong Jie, Zhao Caixia, Xie Yuchu, Gao Yanjing. 2014. Ecological risk assessment and its management of Bailongjiang watershed, southern Gansu based on landscape pattern[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(7): 2041–2048 (in Chinese with English abstract).
- Guo Shaoying, Lin Hao, Xie Yu, Rao Ruiye, Zhang Jiangshan, Zheng Yuyi. 2017. Evaluation on heavy metal pollution in soil of mining area based on improved grey clustering method[J]. *Environmental Engineering*, 35(10): 146–150 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xiaoxiao, Liu Congqiang, Zhu Zhaozhou, Wang Zhongliang, Li Jun. 2011. Evaluation methods for soil heavy metals contamination[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 30(5): 889–896 (in Chinese with English abstract).

- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 4(8): 975–1001.
- Han Pei, Wang Zhigang, Gao Chao, Zhang Pingcang, Ren Hongyu, Dong Linyao. 2018. Small watersheds division in complex terrain region based on human-machine interaction[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 38(6): 182–186 (in Chinese with English abstract).
- Hao Libo, Tian Mi, Zhao Xinyun, Wang Tong, Li Hongjiao, Wan Hongxiang. 2016. Evaluating pollution of heavy metals with backgrounds calculated by clay minerals[J]. *Global Geology*, 35(2): 586–592 (in Chinese with English abstract).
- Hu Miao, Wu Jiaqiang, Peng Peiqin, Gan Guojuan, Zhou Hang, Liao Bohai. 2014. Assessment model of heavy metal pollution for arable soils and a case study in a mining area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 34(2): 423–430(in Chinese with English abstract).
- Hua Yongpeng. 2012. A Study of Health Risk Assessment on Contaminated Sites and Method of Remediation Goal calculation in China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1–22 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yizong, Hao Xiaowei, Lei Ming, Tie Boqing. 2013. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 32(3): 409–417 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Hongqiang, Wu Wenjun, Yao Yanling, Liu Nianlei, Wang Jinnan, Bi Jun, Yao Ruihua. 2015. Coupling watershed environmental model with optimizing method to provide least cost alternatives in environmental planning and management[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 24(3): 539–546 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Xue, Lu Wenxi, Yang Qingqing, Zhao Haiqing. 2014. Application of support vector machine in soil environmental quality assessment[J]. *China Environmental Science*, 34(5): 1229–1235 (in Chinese with English abstract).
- Kong Jianjian, Zhang Yang, Zhang Jiangshan. 2012. Application of attribute recognition theoretical model in evaluation of heavy metal pollution in soil[J]. *Environmental Engineering*, 30(1): 100–102, 115 (in Chinese with English abstract).
- Krishna A Keshav, Mohan K Rama, Murthy N N, Periasamy V, Bipinkumar G, Manohar K, Rao S Srinivas. 2013. Assessment of heavy metal contamination in soils around chromite mining areas, Nuggihalli, Karnataka, India[J]. *Environmental Earth Sciences*, 70(2): 699–708.
- Li Duojie, Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Huang Xingkai, Chen Ziran, Li Jian, Guo Yingchao. 2021. Distribution, accumulation and ecological risk of heavy metals in the soil of a lead zinc mine in Xing'an League, Inner Mongolia[J]. *Mineral Exploration*, 12(4): 1030–1039 (in Chinese with English abstract).
- Li Ting, Wu Minghui, Wang Yue, Yang Huaju, Tang Chundong, Duan Changqun. 2020. Advances in research on the effects of human disturbance on biogeochemical processes of heavy metals and remediation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(13): 4679–4688 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenbo. 2018. A Study on Varied Cultivated Land Quality Using Site Conditions and Soil Geo-chemistry Characteristics as Indicators in a Peri-urban Area of The Black Soil Region [D]. Changchun: Jilin University: 1–35 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiang, Guan Tao, Xu Qing. 2012. The Evaluation of soil heavy metal pollution based on the BP neural Network-Taking soil environmental quality assessment in Baotou as an example[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28(2): 250–256 (in Chinese with English abstract).
- Li Xuemei, Wang Zuwei, Tang Xianqiang, Huang Suiliang, Zhao Qingxiang. 2007. Determining weights of heavy metal contaminations and its application to soil environmental quality assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 26(6): 2281–2286(in Chinese with English abstract).
- Li Yue, Qi Shi. 2018. Ecological civilization small watershed of construction of soil and water conservation[J]. *China Population, Resources and Environment*, 28(S2): 14–17 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhengji. 1996. Large scale system of rock-soil-plant[J]. *Geological Review*, 42(4): 369–372(in Chinese with English Abstract).
- Lin H. 2010. Earth's Critical Zone and hydrogeology: Concepts, characteristics, and advances[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(1): 25–45.
- Liu Chunzao, Huang Yizong, Lei Ming, Hao Xiaowei, Li Xi, Tie Boqing, Xie Jianzhi. 2011. Assessment of ecological risks of heavy metal contaminated soils in the Zijiang River region by toxicity characteristic leaching procedure[J]. *Environmental Chemistry*, 30(9): 1582–1589 (in Chinese with English abstract).
- Liu Tong, Liu Chuanpeng, Deng Jun, Kang Pengyu, Wang Kaikai, Zhao Yuyan. 2022. Ecological health risk assessment of soil heavy metals in eastern Yinan County, Shandong Province[J]. *Geology in China*, 49(5): 1497–1508(in Chinese with English abstract).
- Lu Xin, Hu Wenyong, Huang Biao, Li Yuan, Zu Yanqun, Zhan Fangdong, Kuang Rongxi. 2018. Source apportionment of heavy metals in farmland soils around mining area based on UNMIX Model[J]. *Environmental Science*, 39(3): 1421–1429 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yang, Xie Feng, Tan Hong, Xu Xijuan, He Jinlin. 2007. Evaluation on polluted degree by heavy metal in soils with fuzzy approach degree evaluation method[J]. *Environmental Monitoring in China*, 23(6): 69–72 (in Chinese with English abstract).
- Ma Teng, Shen Shuai, Deng Yamin, Du Yao, Liang Xing, Wang Zhiqiang, Yu Haotian. 2020. Theoretical approaches of survey on Earth's Critical Zone in basin: an example from the Jiangnan Plain,

- Central Yangtze River[J]. *Earth Science*, 45(12): 4498–4511 (in Chinese with English abstract).
- Michael Angelo B, Promentilla T, Furuichi K, Ishii N, Tanikawa. 2008. A fuzzy analytic network process for multi-criteria evaluation of contaminated site remedial countermeasures[J]. *Journal of Environmental Management*, 88(3): 479–495.
- MinorJesse, PearlJessie K, BarnesMallory L, Colella Tony R, Murphy Patrick C, Mann Sarina, Barron-Gafford Greg A. 2019. Critical zone science in the Anthropocene: opportunities for biogeographic and ecological theory and praxis to drive earth science integration[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 44(1): 50–69.
- Müller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geological Journal*, 2(3): 108–118.
- Nandingqiqige, He Jiang, Lü Changwei, Du dagula, Zhangjing, Li Chuanzhen, Guo Xia, Hou Zhaojie. 2014. Distribution of acid volatile sulfide and simultaneously extracted metals and bioavailability of heavy metals in sediments from Lake Daihai[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 33(1): 155–161 (in Chinese with English abstract).
- Ni Shijun, Wang Yongli, Teng Yanguo, Zhang Chengjiang. 2004. A response model of anthropogenic disturbances and equilibria to the geological systems in mining environment[J]. *Advance in Earth Sciences*, 19(3): 484–489 (in Chinese with English abstract).
- NieJingru, Ma Youhua, Xu Lulu, Fu Huanhuan, Ma Tiezheng. 2013. Discussion about heavy metal pollution in soil environmental quality standard in China[J]. *Journal of Agriculture Resources and Environment*, 30(6): 44–49 (in Chinese with English abstract).
- Okedeyi Olumuyiwa O, Dube Simiso, Awofolu Omotayo R, NindiMathew M. 2014. Assessing the enrichment of heavy metals in surface soil and plant (*Digitariaeriantha*) around coalfired power plants in South Africa[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(6): 4686–4696.
- Rapant S, Kordik J. 2003. An environmental risk assessment map of the Slovak Republic: Application of data from geochemical atlases[J]. *Environmental Geology*, 44: 400–407.
- Schmidt P, Morrison T H. 2012. Watershed management in an urban setting: Process, scale and administration [J]. *Land Use Policy*, 29: 45–52.
- Shi Jiansheng, Ma Rong, Ma Zhen. 2019.Regional investigation of the Earth's Critical Zone[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(6): 767–780 (in Chinese with English abstract).
- Shi Yajuan, Xu Xiangbo, Li Qifeng, Zhang Meng, Li Jing, Liu Yonglong, Liang Ruoyu, Zheng Xiaoqi, Shao Xiuqing. 2018. Integrated regional ecological risk assessment of multiple metals in the soils: A case in the region around the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. *Environmental Pollution*, 242(11): 288–297.
- Sinclair A J. 1974. Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2(3): 129–149.
- Song Jing, Xu Genyan, Luo Yongming, Gao Hui, Tang Wei. 2019. Some thoughts on the classification of soil environmental quality for agricultural land: taking risk control of Cd in potato producing area of Guizhou as an example[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(6): 192–198 (in Chinese with English abstract).
- Su Haimin, He Aixia, Yuan Xintian. 2016. Pollution evaluation of soil heavy metal around mining using matter element analysis[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 47(1): 173–178 (in Chinese with English abstract).
- Su Yaoming, Chen Zhiliang, Lei Guojian, Fang Xiaohang. 2016. Vertical pollution characteristic and ecological risk assessment of heavy metal of soil profiles in polymetallic ore mine [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 25(1): 130–134 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Gan Fengwei, Wang Heng, He Zexin, Jia Fengchao, Zhang Jing. 2019a. Determination of heavy metal geochemical baseline values and its accumulation in soils of the Luanhe River Basin, Chengde[J]. *Environmental Science*, 40(8): 3753–3763 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Wu Dingding, Mao Qigui, Wei Xiaofeng, Zhang Huiqiong, Xi Yuze. 2019b. Soil heavy metal pollution and ecological risk assessment in a copper mining area in East Tianshan, Xinjiang[J]. *Environmental Chemistry*, 38(12): 2690–2699 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Jia Fengchao, He Zexin, Sun Xiaoming. 2021a. Geochemical baseline and ecological risk accumulation effect of soil heavy metals in the small-scale drainage catchment of V-Ti-magnetite in the Yixun River basin, Chengde[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 588–604 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Sun Xiaoming, Jia Fengchao, Li Duojie, Li Jian. 2021b. Bioaccumulation and translocation characteristics of heavy metals in a soil-maize system in reclaimed land and surrounding areas of typical Vanadium-Titanium magnetite tailings[J]. *Environmental Science*, 42(3): 1166–1176 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Sun Xiaoming, Jia Fengchao, Li Duojie, Li Jian. 2021c. Element migration and accumulation characteristics of Bedrock-Regolith-Soil-Fruit Plant Continuum of the Earth's Critical Zone in Chengde almond producing area[J]. *Earth Science*, 46(7): 2621–2645 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Liu Wei, Li Duojie, Jia Fengchao, Chen Ziran, Sun Xiaoming. 2022. Baseline segmentation evaluation for ecological risk accumulation effect of soil heavy metals based on optimization by GIS overlay model and land use unit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(4): 1488–1502 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jingwei, Yu Ruilian, Hu Gongren, Su Guangming, Wang Xiaoming. 2017. Assessment of heavy metal pollution and tracing

- sources by Pb & Sr isotope in the soil profile of woodland in Quanzhou[J]. *Environmental Science*, 38(4): 1566–1575 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yefang, Xie Zhengmiao, Li Jing, Xu Jianming, Chen Zuliang, Naidu Ravi. 2006. Assessment of toxicity of heavy metal contaminated soils by the toxicity characteristic leaching procedure[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 28: 73–78.
- Sun Yiming, Li Hong, Guo Guanlin, Semple Kirk T, Jones Kevin C. 2019. Soil contamination in China: Current priorities, defining background levels and standards for heavy metals[J]. *Journal of Environmental Management*, 251: 109512.
- Tessier A, Campbell Peter G. C., Bisson M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal [J]. *Analysis Chemistry*, 51(7): 844–851.
- Wang Chensheng, Chai Xing, Wang Heng. 2019. An overview of baseline investigation in foreign mine project environmental impact assessment[J]. *Mineral Exploration*, 10(9): 2436–2439 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinliang, Chen Chenglong, Ni Jiupai, Xie Deti, Shao Jing'an. 2018. Resistance evaluation and “source–sink” risk spatial pattern of agricultural non–point source pollution in small catchment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 34(10): 216–224 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaofei, Deng Chaobing, Yin Juan, Xu Guiping, Deng Qucheng. 2017. Ecological risk assessment of heavy metals in the contaminated farmland based on ranking– method of interval numbers [J]. *Environmental Monitoring in China*, 33(3): 106–113 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xueqiu, Zhou Jian, Xu Shanfa, Chi Qinghua, NieLanshi, Zhang Bimin, Yao Wensheng, Wang Wei, Liu Hanliang, Liu Dongsheng, Han Zhixuan, Liu Qingqing. 2016. China soil geochemical baselines networks: Data characteristics[J]. *Geology in China*, 43(5): 1469–1480 (in Chinese with English abstract).
- Xia Fang, Wang Qiushuang, Cai Limei, Yang Chao, Feng Zhizhou, Tang Cuihua, Wei Yinghai, Xu Zhencheng. 2017. Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in nonferrous metals smelting area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 26(6): 865–873 (in Chinese with English Abstract).
- Xie Zhiyi, Zhang Yajing, Chen Danqing, Yang Jianjun, Liang Yaojie. 2016. Research on assessment methods for soil heavy metal pollution: A case study of Guangzhou[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 35(7): 1329–1337 (in Chinese with English abstract).
- Xu Meng, Yan Zengguang, He Mengmeng, Zhang Chaoyan, Hou Hong, Li Fasheng. 2013. Human health risk–based environmental criteria for soil: A comparative study between countries and implication for China[J]. *Environmental Science*, 34(5): 1667–1678 (in Chinese with English abstract).
- Xu Youning, Zhang Jianghua, Ke Hailing, Chen Huaqing, Liu Ruiping, Qiao Gang, Shi Yufei. 2014. An assessment method for heavy metal cumulative risk on farmland soil in the mining area: A case study of the Xiaoqinling gold mining area[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(8): 1097–1105 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qianqi, Li Zhiyuan, Lu Xiaoning, Duan Qiannan, Huang Lei, Bi Jun. 2018. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 363: 690–700.
- Yu Tao, Jiang Tianyu, Liu Xu, Ma Xudong, Yang Zhongfang, Hou Qingye, Xia Xueqi, Li Fengyan. 2021. Research progress in current status of soil heavy metal pollution and analysis technology[J]. *Geology in China*, 48(2): 460–476 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haibo, Luo Yongming, Li Yuan, Zhou Qian, Liu Xinghua. 2014. Screening of criteria for heavy metals for revision of the national standard for soil environmental quality of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 51(3): 429–438 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongzhen, Luo Yongming, Xia Jiaqi, Zhang Haibo. 2011. Some thoughts of the comparison of risk– based soil environmental standards between different countries[J]. *Environmental Science*, 32(3): 795–802 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Huiqiong, Wang Jingbin, Fu Shuixing. 2017. Comprehensive geological survey in mineral resources base[J]. *Mineral Exploration*, 8(5): 727–731 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Miaoyue, Yin Wei, Wang Yi, Yang Wenjun, Tang Yetao, QiuRongliang. 2022. Research progress on the environmental behavior of heavy metals in soil tracing by stable isotopes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 59(5): 1215–1227 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiuzhi, Bao Zhengyu, Tang Junhong. 2006. Application of the enrichment factor in evaluating of heavy metals contamination in the environmental geochemistry[J]. *Geological Science and Technology Information*, 25(1): 65–72 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenjing, Guo Wei, Zhao Renxin, Fu Ruiying, Guo Jiangyuan, Bi Na, Zhang Jun. 2014. Effects of rare earth elements on heavy metal behavior and their action mechanisms in a soil– plant system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 45(2): 508–512 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuanyi, Zeng Hui, Xu Youning, Lu Lu. 2014. Theory and work methods for the cumulative effects of environmental geochemistry in the metallic deposit cluster[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(8): 1106–1113 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Guohua, Qin Xuwen, Dong Yanxiang. 2005. Soil environmental quality standards: principle and method[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(8): 721–727 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Qixing, Teng Yong, Zhan Sihui, Tong Ling. 2014. Fundamental problems to be solved in research on soil– environmental Criteria/

- standards[J]. Journal of Agro-Environment Science, 33(1): 1-14 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaoni. 2017. Research on the Influence Mechanism of Spatial Variability of Heavy Metals of Critical Zone in the Lower Luanhe River[D]. Shijiazhuang: Chinese Academy of Geological Sciences, 1-90 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yan. 2014. Regulatory System of Mine Land Reclamation on Life Cycle and the Informatization[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1-36 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaodong, Wei Chaoyang, Yang Fen. 2016. Determination of heavy metal baseline in Baotou and Bayan Obo and its application in the assessment of heavy metal contamination[J]. Journal of Natural Resources, 31(2): 310-320 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 柴星,王晨昇,王京彬. 2021. 矿山生命周期性环境治理模式探析[J]. 中国国土资源经济, 34(4): 29-33, 40.
- 常玉虎,赵元艺,曹冲,单云,曹强. 2015. 德兴铜矿区主要流域内环境介质中重金属含量特征与健康风险评价[J]. 地质学报, 89(5): 889-908.
- 陈峰,蒋新,唐访良,卞永荣. 2012. 层次分析法与地理信息系统在农田土壤重金属污染评价中的应用[J]. 环境污染与防治, 34(7): 6-8, 14.
- 陈怀满,郑春荣,周东美,王慎强,林玉锁. 2006. 土壤环境质量研究回顾与讨论[J]. 农业环境科学学报, 25(4): 821-827.
- 陈明,曹晓娟,谭科艳,牟永明,曹淑萍,冯鑫,冯流. 2006. 土壤环境中化学定时炸弹的研究现状与展望[J]. 地质学报, 80(10): 1607-1615.
- 陈兴仁,陈富荣,贾十军,陈永宁. 2012. 安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究[J]. 中国地质, 39(2): 302-310.
- 陈雅丽,翁莉萍,马杰,武晓娟,李永涛. 2019. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 38(10): 2219-2238.
- 陈自然,孙厚云,卫晓锋,黄行凯,李多杰,张晓敏,郭颖超. 2021. 承德黑山钒钛磁铁矿矿区土壤重金属空间结构特征与生态风险评价[J]. 矿产勘查, 12(4): 1019-1029.
- 崔邢涛,王学求,栾文楼. 2015. 河北中南部平原土壤重金属元素存在形态及生物有效性分析[J]. 中国地质, 42(2): 655-663.
- 董燕,孙璐,李海涛,张作辰,张源,李刚,郭小彪. 2021. 雄安新区土壤重金属和神元素空间分布特征及源解析[J]. 水文地质工程地质, 48(3): 172-181.
- 窦磊,周永章,高全洲,彭先芝,蔡立梅,古志宏. 2007. 土壤环境中重金属生物有效性评价方法及其环境学意义[J]. 土壤通报, 38(3): 576-583.
- 杜艳,常江,徐笠. 2010. 土壤环境质量评价方法研究进展[J]. 土壤通报, 3(3): 749-756.
- 范拴喜,甘卓亭,李美娟,张掌权,周旗. 2010. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 26(17): 310-315.
- 巩杰,赵彩霞,谢余初,高彦净. 2014. 基于景观格局的甘肃白龙江流域生态风险评价与管理[J]. 应用生态学报, 25(7): 2041-2048.
- 郭绍英,林皓,谢好,饶瑞晔,张江山,郑育毅. 2017. 基于改进灰色聚类法的矿区土壤重金属污染评价[J]. 环境工程, 35(10): 146-150.
- 郭笑笑,刘从强,朱兆洲,王中良,李军. 2011. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志, 30(5): 889-896.
- 韩培,王志刚,高超,张平仓,任洪玉,董林垚. 2018. 基于人机交互的地形复杂区小流域划分研究—以湖北省为例[J]. 水土保持通报, 38(6): 182-186.
- 郝立波,田密,赵新运,王通,李宏姣,万洪祥. 2016. 利用黏土矿物计算背景值评估沉积物重金属污染[J]. 世界地质, 35(2): 586-592.
- 胡森,吴家强,彭佩钦,甘国娟,周航,廖柏寒. 2014. 矿区耕地土壤重金属污染评价模型与实例研究[J]. 环境科学学报, 34(2): 423-430.
- 化勇鹏. 2012. 污染场地健康风险评价及确定修复目标的方法研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 1-22.
- 黄益宗,郝晓伟,雷鸣,铁柏清. 2013. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 32(3): 409-417.
- 姜雪,卢文喜,杨青春,赵海卿. 2014. 应用支持向量机评价土壤环境质量[J]. 中国环境科学, 34(5): 1229-1235.
- 蒋洪强,吴文俊,姚艳玲,刘年磊,王金南,毕军,姚瑞华. 2015. 耦合流域模型及在中国环境规划与管理中的应用进展[J]. 生态环境学报, 24(3): 539-546.
- 孔健健,张阳,张江山. 2012. 属性识别理论模型应用于土壤重金属污染评价[J]. 环境工程, 30(1): 100-102, 115.
- 李多杰,孙厚云,卫晓锋,黄行凯,陈自然,李健,郭颖超. 2021. 内蒙古兴安盟某铅锌矿土壤重金属空间分布特征与生态风险评价[J]. 矿产勘查, 12(4): 1030-1039.
- 李婷,吴明辉,王越,杨化菊,唐春东,段昌群. 2020. 人类扰动对重金属元素的生物地球化学过程的影响与修复研究进展[J]. 生态学报, 40(13): 4679-4688.
- 李文博. 2018. 基于立地条件与地化特征的黑土区域郊耕地质量变化研究[D]. 长春: 吉林大学, 1-35.
- 李向,管涛,徐清. 2012. 基于BP神经网络的土壤重金属污染评价方法—以包头土壤环境质量评价为例[J]. 中国农学通报, 28(2): 250-256.
- 李雪梅,王祖伟,汤显强,黄岁樑,赵庆香. 2007. 重金属污染因子权重的确定及其在土壤环境质量评价中的应用[J]. 农业环境科学学报, 26(6): 2281-2286.
- 李月,齐实. 2018. 建设水土保持生态文明小流域的思考[J]. 中国人口·资源与环境, 28(S2): 14-17.
- 李正积. 1996. 时代前缘的全息探索—岩土植物大系统研究[J]. 地质论评, 42(4): 369-372.
- 刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治. 2011. 重金属污染评价方法(TCLP)评价资江流域土壤重金属生态风险[J]. 环境化学, 30(9): 1582-1589.
- 刘同,刘传朋,邓俊,康鹏宇,王凯凯,赵玉岩. 2022. 山东省沂南县东部土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 49(5): 1497-1508.
- 卢鑫,胡文友,黄标,李元,祖艳群,湛方栋,邝荣禧. 2018. 基于

- UNMIX模型的矿区周边农田土壤重金属源解析[J]. 环境科学, 39(3): 1421-1429.
- 陆洋, 谢锋, 谭红, 许锡娟, 何锦林. 2007. 用模糊贴适度方法评价土壤重金属污染程度[J]. 中国环境监测, 23(6): 69-72.
- 马腾, 沈帅, 邓娅敏, 杜尧, 梁杏, 王志强, 於昊天. 2020. 流域地球关键带调查理论方法: 以长江中游江汉平原为例[J]. 地球科学, 45(12): 4498-4511.
- 楠定其其格, 何江, 吕昌伟, 都达古拉, 张京, 李传镇, 郭霞, 侯兆洁. 2014. 岱海沉积物中AVS-SEM分布特征及重金属生物有效性研究[J]. 农业环境科学学报, 33(1): 155-161.
- 倪师军, 王永利, 滕彦国, 张成江. 2004. 人为扰动与平衡对矿山地质环境的响应模式[J]. 地球科学进展, 19(3): 484-489.
- 聂静茹, 马友华, 徐露露, 付欢欢, 马铁铮. 2013. 我国《土壤环境质量标准》中重金属污染相关问题探讨[J]. 农业资源与环境学报, 30(6): 44-49.
- 石建省, 马荣, 马震. 2019. 区域地球多圈层交互带调查探索研究[J]. 地球学报, 40(6): 767-780.
- 宋静, 许根焰, 骆永明, 高慧, 唐伟. 2019. 对农用地土壤环境质量类别划分的思考: 以贵州马铃薯产区Cd风险管控为例[J]. 地学前缘, 26(6): 192-198.
- 苏海民, 何爱霞, 袁新田. 2016. 应用物元分析法评价矿区周边土壤重金属污染的变化[J]. 土壤通报, 47(1): 173-178.
- 苏耀明, 陈志良, 雷国建, 方晓航. 2016. 多金属矿区土壤重金属垂直污染特征及风险评估[J]. 生态环境学报, 25(1): 130-134.
- 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞. 2019a. 承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征[J]. 环境科学, 40(8): 3753-3763.
- 孙厚云, 吴丁丁, 毛启贵, 卫晓锋, 张会琼, 蕙玉泽. 2019b. 新疆东天山某铜矿区土壤重金属污染与生态风险评价[J]. 环境化学, 38(12): 2690-2699.
- 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 何泽新, 孙晓明. 2021a. 承德伊逊河钒钛磁铁矿小流域土壤重金属地球化学基线及生态风险累积效应[J]. 地质学报, 95(2): 588-604.
- 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健. 2021b. 钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征[J]. 环境科学, 42(3): 1166-1176.
- 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健. 2021c. 承德杏仁产区关键带基岩-土壤-作物果实BRSPC系统元素迁聚特征[J]. 地球科学, 46(7): 2621-2645.
- 孙厚云, 卫晓锋, 刘卫, 李多杰, 贾凤超, 陈自然, 孙晓明. 2022. 基于GIS基线分割与土地利用单元优化的土壤重金属生态风险累积效应评价方法[J]. 地质学报, 96(4): 1488-1502.
- 孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王小明. 2017. 应用铅镉同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析[J]. 环境科学, 38(4): 1566-1575.
- 王晨昇, 柴星, 王恒. 2019. 国外矿山项目环境影响评价中本底调查工作概述[J]. 矿产勘查, 10(9): 2436-2439.
- 王金亮, 陈成龙, 倪九派, 谢德体, 邵景安. 2018. 小流域农业面源污染阻力评价及“源-汇”风险空间格局[J]. 农业工程学报, 34(10): 216-224, 306.
- 王晓飞, 邓超冰, 尹娟, 许桂苹, 邓渠成. 2017. 基于区间数排序法的农田土壤重金属生态风险分析[J]. 中国环境监测, 33(3): 106-113.
- 王学求, 周建, 徐善法, 迟清华, 聂兰仕, 张必敏, 姚文生, 王玮, 刘汉粮, 刘东盛, 韩志轩, 柳青青. 2016. 全国地球化学基准网建立与土壤地球化学基准值特征[J]. 中国地质, 43(5): 1469-1480.
- 夏芳, 王秋爽, 蔡立梅, 杨超, 冯志州, 唐翠华, 卫瀛海, 许振成. 2017. 有色冶金区土壤-蔬菜系统重金属污染特征及健康风险分析[J]. 长江流域资源与环境, 26(6): 865-873.
- 谢志宜, 张雅静, 陈丹青, 杨剑军, 梁耀杰. 2016. 土壤重金属污染评价方法研究—以广州市为例[J]. 农业环境科学学报, 35(5): 1329-1337.
- 徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生. 2013. 不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示[J]. 环境科学, 34(5): 1667-1678.
- 徐友宁, 张江华, 柯海玲, 陈华清, 刘瑞平, 乔冈, 史宇飞. 2014. 矿业活动区农田土壤重金属累积风险的评判方法—以小秦岭金矿区为例[J]. 地质通报, 33(8): 1097-1105.
- 余涛, 蒋天宇, 刘旭, 马旭东, 杨忠芳, 侯青叶, 夏学齐, 李凤嫣. 2021. 土壤重金属污染现状及检测分析技术研究进展[J]. 中国地质, 48(2): 460-476.
- 张红振, 骆永明, 夏家淇, 章海波. 2011. 基于风险的土壤环境质量标准国际比较与启示[J]. 环境科学, 32(3): 795-802.
- 张会琼, 王京彬, 付水兴. 2017. 矿产资源基地综合地质调查探索[J]. 矿产勘查, 8(5): 727-731.
- 张妙月, 尹威, 王毅, 杨文俊, 汤叶涛, 仇荣亮. 2022. 稳定同位素示踪土壤中重金属环境行为的研究进展[J]. 土壤学报, 59(5): 1215-1227.
- 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 2006. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. 地质科技情报, 25(1): 65-72.
- 章海波, 骆永明, 李远, 周倩, 刘兴华. 2014. 中国土壤环境质量标准中重金属指标的筛选研究[J]. 土壤学报, 51(3): 429-438.
- 赵文静, 郭伟, 赵仁鑫, 付瑞英, 郭江源, 毕娜, 张君. 2014. 稀土元素对土壤-植物系统中重金属行为的影响及其机理研究进展[J]. 土壤通报, 45(2): 508-512.
- 赵元艺, 曾辉, 徐友宁, 路璐. 2014. 金属矿集区地球化学环境累积效应的理论与工作方法[J]. 地质通报, 33(8): 1106-1113.
- 周国华, 秦绪文, 董岩翔. 2005. 土壤环境质量标准的制定原则与方法[J]. 地质通报, 24(8): 721-727.
- 周启星, 滕涌, 展思辉, 佟玲. 2014. 土壤环境基准/标准研究需要解决的基础性问题[J]. 农业环境科学学报, 33(1): 1-14.
- 周晓妮. 2017. 滦河下游地球关键带结构对重金属空间变异性影响机制研究[D]. 石家庄: 中国地质科学院, 1-90.
- 周妍. 2014. 矿山土地复垦全生命周期监管体系及信息化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-36.
- 朱晓东, 韦朝阳, 杨芬. 2016. 包头-白云鄂博地区重金属基线值的厘定及其在重金属污染分级评价中的应用[J]. 自然资源学报, 31(2): 310-320.