



山东省五莲县表层土壤安全性评价与预测

王延浩¹, 朱江源^{1*}, 麻国龙², 闫早华¹, 周立国¹, 张晓闯¹, 杨本固¹

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队(山东省第八地质矿产勘查院), 山东地矿局有色金属矿找矿与资源评价重点实验室, 日照地质地理大数据研究院, 日照市土地质量评价与污染修复重点实验室, 山东日照 276826; 2. 日照市自然资源和规划局东港分局, 山东日照 276826)

摘要:为揭示山东省五莲县表层土壤重金属累积规律及环境风险演变趋势, 基于 2008 年和 2018 年两期地球化学调查数据, 综合运用特征值统计、克里金空间插值、累积速率模型计算及环境质量评价图对比等方法, 系统分析了 10 年尺度五莲县表层土壤各重金属元素变化范围和幅度。结果表明: 研究区土壤重金属呈普遍累积趋势, Cd、Cu、Hg、Pb、Zn 累积速率显著, 其中 Cu 增幅范围最广, Hg 增幅强度最大, 主控因素为矿山开采与地质高背景。通过土壤重金属累积速率计算, 预测 2028 年, 研究区表层土壤重金属元素含量呈现不同程度上升, 其中 Cd 元素环境质量降级最显著, Pb、Zn 在户部乡、松柏镇周边将形成轻微风险区, 土壤环境质量等级相应有所降低, 相关部门应引起重视。

关键词:土壤重金属; 累积速率; 环境质量; 五莲县

中图分类号: X53

文献标识码: A

doi: 10.12128/j.issn.1672-6979.2025.08.004

0 引言

表层土壤安全性是威胁全球农业安全与生态健康的核心环境问题之一。我国快速工业化与高强度农业活动加剧了区域性土壤元素积累, 尤以矿业密集区为甚^[1-5]。山东省五莲县地处环太平洋多金属成矿带, 地质背景复杂, 矿产资源开发与农业生产叠加导致局部土壤重金属(如 Cd、Pb)超标问题初现。2008—2018 年两期地球化学数据表明, Cd、Cu、Hg、Pb、Zn 等元素呈现显著累积趋势, 揭示经济发展与生态保护的矛盾日益尖锐。

近年来, 重金属元素累积速率研究在驱动机制解析与动态预测方面取得显著进展, 明确了成土母质风化、工业排放及农业输入等关键驱动因素, 并发展了同位素示踪^[6-7]、高光谱遥感^[8-11]及 LSTM 神经网络^[12-14]等精准监测与预测技术。然而, 如何将累积速率动态转化为表层土壤安全性评价指标, 并建立多尺度风险预警体系仍面临挑战。本文基于

2006 年山东省地质调查院开展的山东省东部地区农业生态地球化学调查项目——山东省日照市农业生态地球化学调查与评价项目成果和 2018 年山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队开展的山东省五莲县 1:5 万土地质量地球化学调查与评价项目两期土壤调查数据, 构建了五莲县重金属累积速率关系, 综合运用特征值统计、克里金空间插值、累积速率模型计算及环境质量评价图对比等方法, 研究了 10 年尺度重金属累积空间分布规律, 初步推断研究区重金属累积程度与矿山开采和地质高背景呈正相关。根据土壤重金属预测值公式, 可预测 2028 年五莲县表层土壤重金属环境质量状况, 其结果具有参考警示意义。

1 研究区概况

研究区位于山东半岛东南部, 属日照市管辖, 面积 1 443 km², 地处鲁东低山丘陵与鲁中南低山丘陵交接地带, 地势呈现出中部高、向南北两侧倾斜的地

收稿日期: 2025-02-24; 修订日期: 2025-05-09; 编辑: 王敏

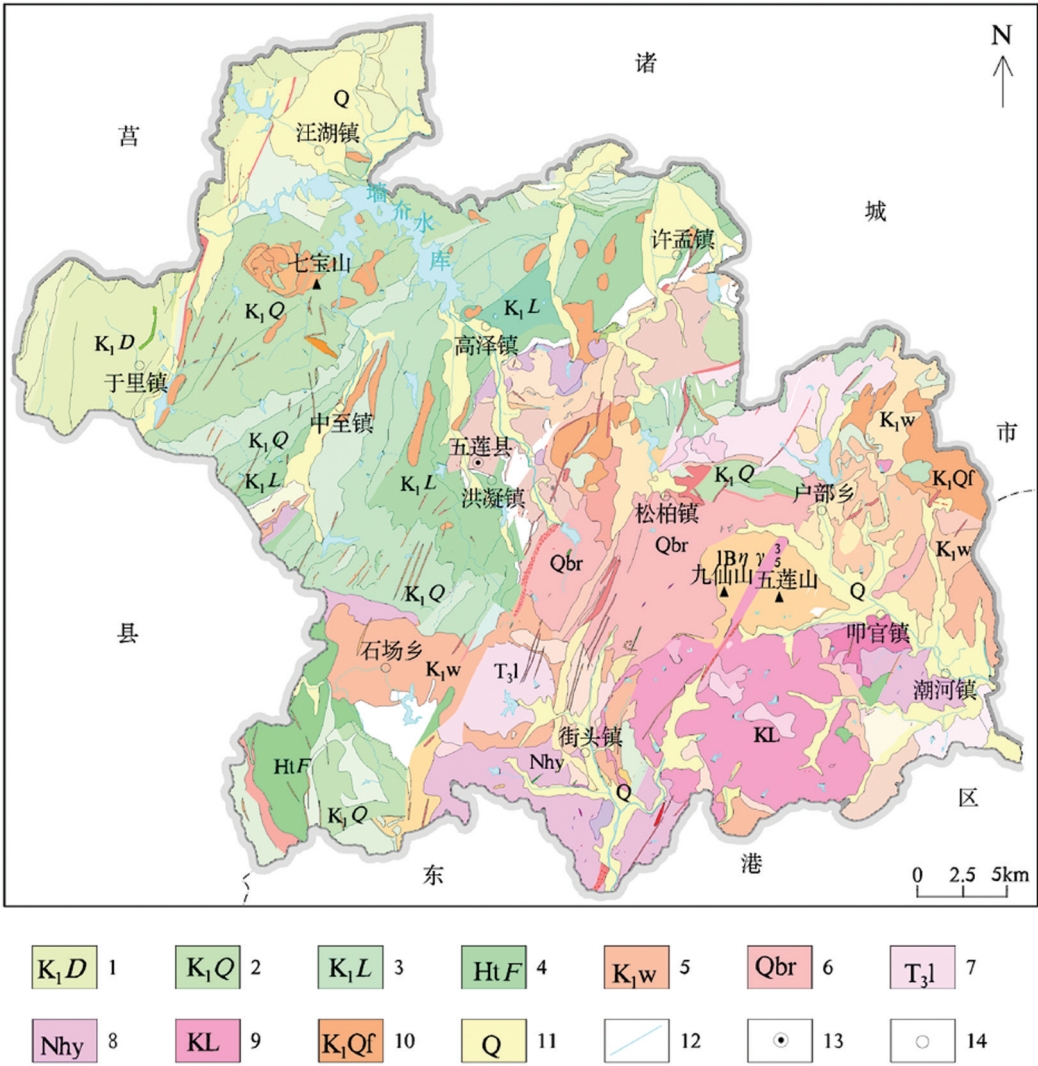
基金项目: 山东省自然资源厅山东省五莲县 1:5 万土地质量地球化学调查与评价项目(鲁勘字[2018]52 号)

作者简介: 王延浩(1983—), 山东济宁人, 工程师, 主要从事地质调查工作; E-mail: 61967596@qq.com

* 通信作者: 朱江源(1987—), 山东日照人, 工程师, 主要从事物化探调查与解译工作; E-mail: 414205838@qq.com

势特征。属温带季风气候,四季分明,雨热同期。研究区位于沂沭断裂带东侧,出露地层包括古元古代至新生代多套岩系(图 1),岩浆活动频繁,燕山期花岗岩与白垩纪地层东西分异明显。土壤以棕壤和褐土为主,成土母质受东西部基岩差异控制:东部花岗

岩区富集 Si、Fe、Mn 及 Cu、Zn、Mo;西部白垩纪地层则 Pb、Cd 等元素背景值较高。土壤母岩中元素原始含量高,是导致土壤中元素含量偏高的主要原因。



1—大盛群;2—青山群;3—莱阳群;4—粉子山群;5—伟德山序列;6—荣成序列;7—柳林庄序列;8—月季山序列;
9—崂山序列;10—方戈庄旋回;11—第四系;12—水系;13—县驻地;14—乡镇驻地。

图 1 研究区地质图

根据 2018 年开展的山东省五莲县 1:5 万土地质量地球化学调查与评价项目成果,研究区土壤环境质量总体较好(图 2),一等土壤占 89.0%,面积为 1 332.42 km²;二等土壤占 10.88%,面积为 162.95 km²;三等土壤占 0.12%,面积 1.77 km²,主要分布在五莲县西北部七宝山矿区、中至镇北部和潮河镇西南部,主要污染物为 Pb、Cd。

2 工作方法

2.1 数据资料依据及可靠性

2018 年山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队承担山东省五莲县 1:5 万土地质量地球化学调查与评价项目,完成表层土壤、土壤剖面、灌溉水、大气沉降、农作物的取样工作,土壤样品由山东省地质

矿产勘查开发局第八地质大队实验室分析规范规定的 28 项指标。

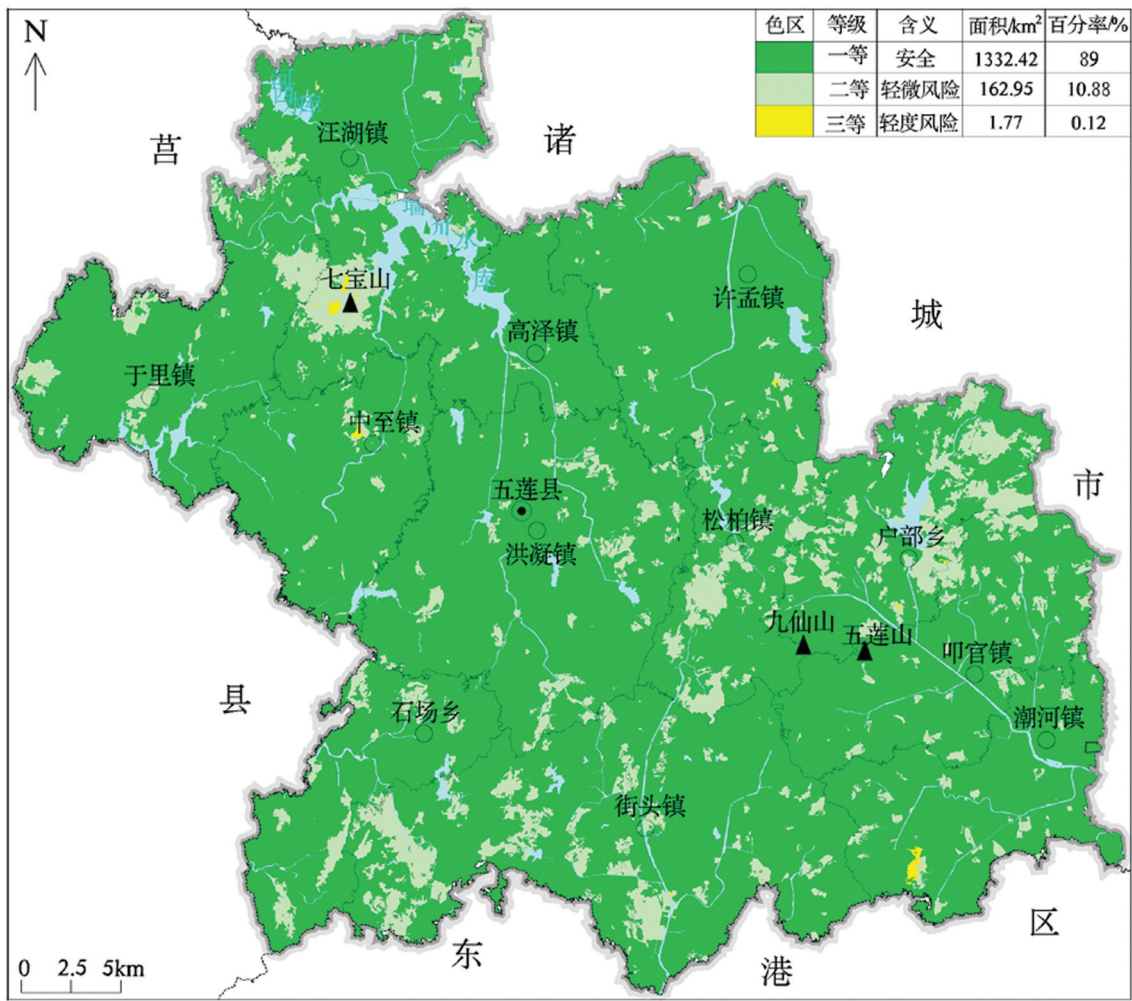


图 2 研究区土壤环境质量图(2018 年)

2006 年山东省东部地区农业生态地球化学调查项目全面开展(山东省地质调查院主持),山东省日照市农业生态地球化学调查与评价项目是其中任务之一,野外样品采集工作开始于 2008 年 3 月,结束于同年 6 月,历时 4 个月,完成表层土壤、深层土壤、有效态及浅层地下水取样工作。土壤样品由武汉岩矿测试中心分析规范规定的 54 项指标。此项工作是调查区前期开展的最为详尽的地球化学调查工作。

上述两次调查均采集 0~20 cm 表层土壤样品,由 3~5 个子样组成,采样方法相同,采样介质类型一致,可体现土地利用现状变化信息。两次采样测试土壤重金属指标相同,分析方法、质量监控要求基本相同,采用了标准样、密码平行样、监控样等多种

质量控制手段,保证了分析测试质量的可靠性,测试成果通过了专家组的验收。两批数据为区域土壤地球化学环境时空变化研究提供了高质量数据资料。

2.2 技术方法

对比 2008 年和 2018 年两个期次表层土壤重金属元素含量特征值统计(中值、平均值、相关系数等),对研究区内重金属土壤元素含量变化做出判断。研究表明,短期内土壤元素累积速率基本呈线性^[15],因此,利用过去 10 年间土壤元素累积速率,可以预测今后数年后土壤元素含量的变化^[16-19],并用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)和《山东省 1:5 万土地质量地球化学调查评价技术要求(试行)》制作评价图,对比可发现土壤元素空间分布的变化,结合变化

区域地质情况、人文活动等情况,综合判断引起环境质量变化的因素^[20-23],以引起有关部门重视。

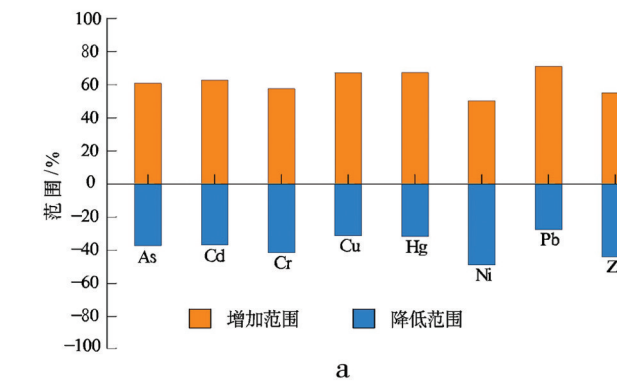
(1)预测单元划分及取值。为保证预测单元内数据样本数量一致,根据两次工作的布点密度,以公里网格作为参照对象,按4 km²一个预测单元进行划分,将五莲县划分为 366 个预测单元。2008 年 1:25 万地球化学调查表层土壤每个预测单元有1 件样品,其土壤重金属值代表该预测单元值;而 2018 年1:5万土地质量地球化学调查项目,每个预测单元为多件样品。为便于对比分析预测单元重金属元素变化趋势,本文利用克里金插值法获取预测单元中心点两次工作的土壤重金属值,作为本次研究的基础数据。

(2)土壤重金属预测值计算,见公式(1)(2)(3)。

$$C_{is} = (C_{i2018} - C_{i2008}) / C_{i2008} \times 100\%$$
$$\Delta C_i = (C_{i2018} - C_{i2008}) / 10$$
$$C_{i2028} = C_{i2018} + 10 \times \Delta C_i$$

式中: C_{is} 为累积速率; ΔC_i 为 10 年间元素年平均变化量; C_{i2008} 为 2008 年 1:25 万地球化学调查表层土壤元素含量; C_{i2018} 为 2018 山东省五莲县 1:5 万土地质量地球化学调查与评价项目所获取的土壤元素含量值; C_{i2028} 为 2028 年预测的土壤元素含量值。

3 结果与分析



3.1 重金属元素含量变化特征

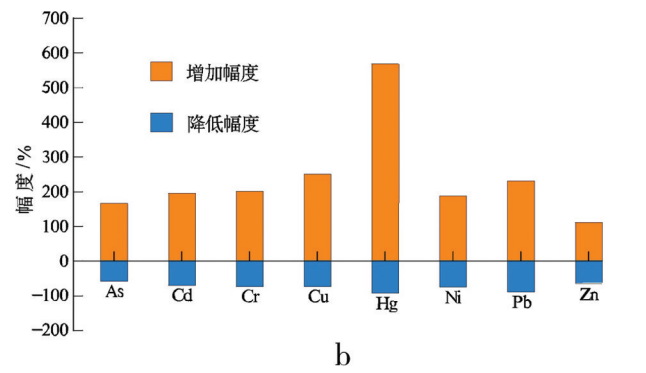
2008—2018 年 10 年间五莲县土壤重金属元素含量统计见表 1,统计表明,2008—2018 年 10 年间,五莲县土壤重金属元素的相对累积率以 Cd 最快,10 年间含量上升了 22.2%,其次为 Hg、Cu、Pb,表明过去 10 年间研究区土壤中 Cd、Hg、Cu、Pb 重金属元素的富集作用十分明显。

表 1 五莲县表层土壤重金属 10 年间含量统计参数表									
元 素	2008 年			2018 年			相 关 系 数	相 对 累 计 速 率 /%	年 均 累 积 量
	均 值	中 值	变 异 系 数	均 值	中 值	变 异 系 数 /%			
As	4.87	4.62	0.35	5.23	4.57	59	0.62	-1.1	-0.005
Cd	0.13	0.09	0.42	0.14	0.11	65	0.33	22.2	0.002
Cr	42.26	41.73	0.58	43.39	41.98	50	0.68	0.6	0.025
Cu	20.47	14.96	0.72	23.94	15.60	97	0.35	4.3	0.064
Hg	0.035	0.026	0.87	0.041	0.028	132	0.26	7.7	0.0002
Ni	17.32	16.35	0.52	18.32	16.22	47	0.72	-0.8	-0.013
Pb	34.87	32.12	0.46	36.11	32.89	53	0.29	2.4	0.077
Zn	98.35	87.62	0.51	95.23	77.30	61	0.42	0.4	0.031

注:元素含量单位为 mg/kg,相对累积速率和年均累积量计算均以中值计算。

3.2 重金属累积速率

根据计算结果,五莲县表层土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 在大部分预测单元中土壤累积速率是增加的,其中 Pb 和 Cu 增幅范围最广,Cu 和 Hg 增加幅度最大(图 3)。



a—范围;b—幅度。
图 3 五莲县表层土壤重金属元素 2008—2018 年变化统计图

3.3 重金属环境质量时空变化特征

按照五莲县 2008 年和 2018 年获得的表层土壤数据,可以计算出 10 年的变化速率,继而估算出下一个 10 年,即 2028 年五莲县表层土壤重金属环境

质量状况。该推断仅考虑相同速率下的时间因素,推断结果仅具有参考警示意义。

从预测结果来看,到 2028 年五莲县内各重金属元素含量呈现不同程度上升,重金属环境质量等级

相应有所降低,从 2008—2018—2028 年各重金属元素指标的环境质量对比可知,Cd 元素环境质量下降最明显(图 4),其中于里镇东部、户部乡西部及东部轻微风险土壤增加明显,中至镇西部出现轻度风险土壤;其次是 Pb 元素环境质量也有所下降(图 5),

在户部乡、松柏镇出现轻微风险区。其余重金属指标环境质量虽未出现轻微风险区及轻度风险区,但重金属元素增长幅度较大,在工农业生产中应注意减少重金属元素的排放。

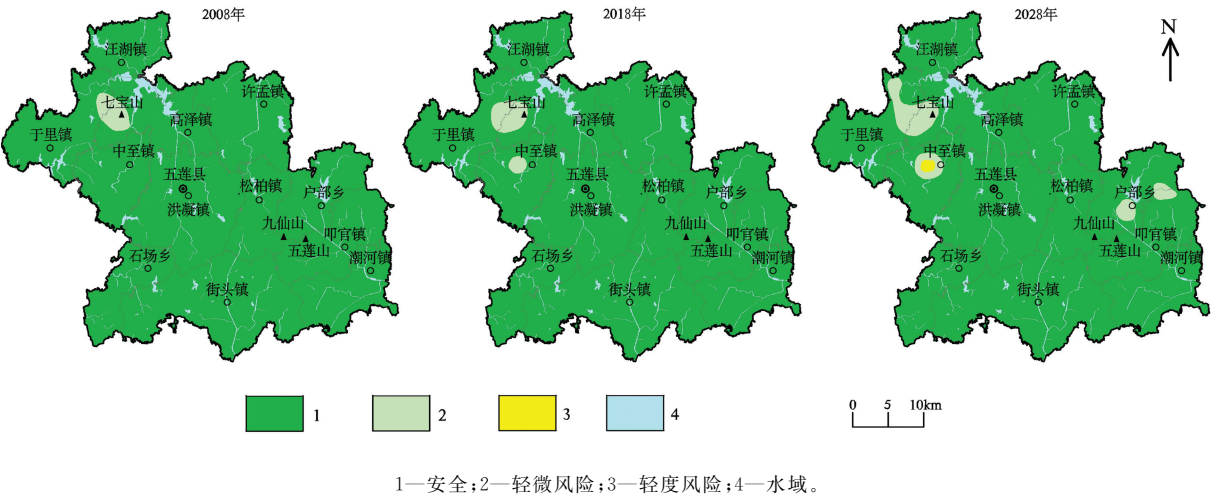


图 4 五莲县表层土壤 Cd 环境质量预测图

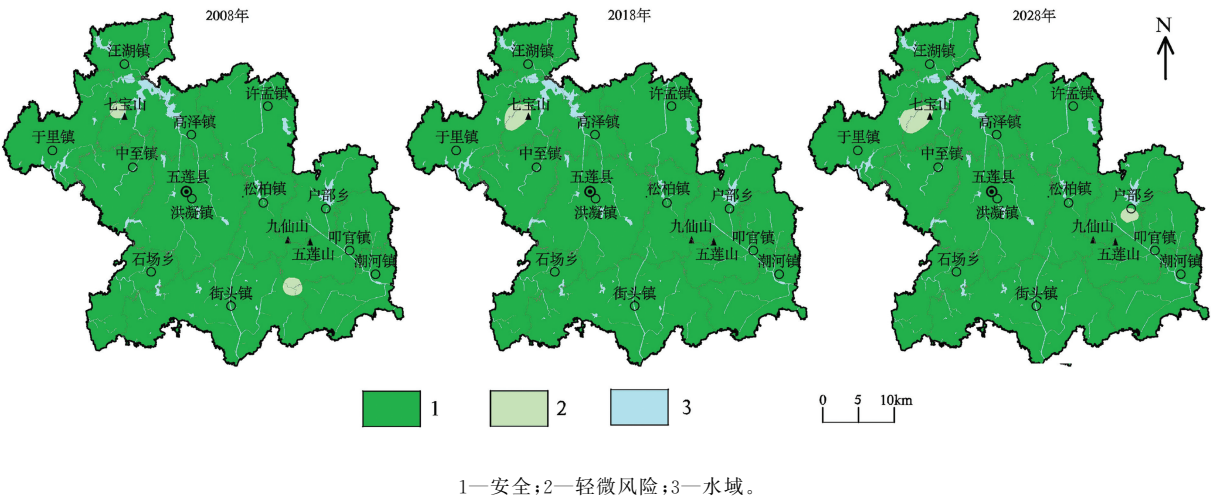


图 5 五莲县表层土壤 Pb 环境质量预测图

造成上述土壤重金属元素含量增加的主要因素是矿山的开采活动,如高泽镇西部七宝山金矿及铅锌银多金属矿区,预测 Cd、Pb、Zn 等元素风险区的范围增大。次要因素为地质背景高,如户部岭周边 Pb、Zn 高值区。

4 结论

本文对 2008 年和 2018 年两期地球化学调查数据采用特征值统计、累积速率计算、评价图对比等手段,分析了五莲县表层土壤各重金属元素变化范围和幅度,并预测了 2028 年五莲县表层土壤重金属环境质量状况。

(1)2008—2018 年间,五莲县表层土壤重金属呈全域性累积态势,其中 Cd、Cu、Pb、Zn 为典型活跃元素。Cd 相对累积速率最快,Pb 和 Cu 增幅范围最广,Cu 和 Hg 增加幅度最大,反映矿业活动与地质背景的协同效应。

(2)到 2028 年五莲县内各重金属元素含量呈现不同程度上升,重金属环境质量等级相应有所降低,从 2008—2018—2028 年各重金属元素指标的环境质量对比可知,Cd 元素环境质量下降最明显,其中于里镇东部、户部乡西部及东部轻微风险土壤增加明显,中至镇西部出现轻度风险土壤;其次是 Pb、Zn 元素环境质量也有所下降,在户部乡、松柏镇出现轻微风险区。

(3)重点关注区域应为矿山开采区,土壤首要污染关注物为 Cd 元素,其次为 Cu、Zn 和 Pb 等。其余重金属指标环境质量虽未出现轻微风险区及以上风险区,但重金属元素累积速率普遍呈增长趋势,在工农业生产中应注意减少重金属元素的排放。

参考文献：

[1] 代杰瑞,曾宪东,张华平,等.山东东部表层土壤重金属潜在生态风险评价模型探讨[J].山东国土资源,2012,28(11):36-40.

[2] 舒玲,李梧庆.铅锌矿区不同类型用地土壤铅、锌、铜、镉元素累积特征及机理分析[J].国土资源导刊,2021,18(3):66-71.

[3] 赖斯颖,曹容浩,谭桂丽.福建省龙海市南部表层土壤重金属元素累积特征研究[J].华东地质,2021,42(1):29-36.

[4] 陈雅丽,翁莉萍,马杰,等.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,2019,38(10):2219-2238.

[5] 张妙月,尹威,王毅,等.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,2022,59(5):1215-1227.

[6] 赵奕然,谷建辉,万卫,等.株洲城郊农田土壤重金属污染特征与 Pb 同位素示踪[J].环境科学学报,2020,40(3):1074-1084.

[7] 程李迅,夏建东,阎苗,等.重金属污染源解析研究综述[J].安徽化工,2020,46(4):4-6.

[8] 王森,储学远,钱家炜,等.区域水稻田土壤-作物系统重金属污

染高光谱遥感定量估测[J].江苏农业科学,2023,51(12):172-180.

[9] 钟亮,钱家炜,储学远,等.利用高光谱遥感技术监测小麦土壤重金属污染[J].农业工程学报,2023,39(5):265-270.

[10] 温志纯.基于高光谱遥感方法的土壤重金属污染检测应用[J].能源与环境,2022(5):69-71.

[11] 成永生,周瑶.土壤重金属高光谱遥感定量监测研究进展与趋势[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3450-3467.

[12] 赵萍,阮旭东,刘亚风,等.基于遗传算法和 BP 神经网络的矿区土壤重金属含量空间分布预测[J].土壤,2024,56(4):889-896.

[13] 黄煜韬,施维林,纪娟,等.基于 BP 神经网络对某电镀厂土壤重金属预测及人体健康风险评价[J].生态毒理学报,2022,17(2):278-289.

[14] 任加国,龚克,马福俊,等.基于 BP 神经网络的污染场地土壤重金属和 PAHs 含量预测[J].环境科学研究,2021,34(9):2237-2247.

[15] 李恋卿,潘根兴,张平究,等.太湖地区水稻表层土壤 10 年尺度重金属元素累积速率的估计[J].环境科学,2002,23(3):119-123.

[16] 乔冈,徐友宁,陈华清,等.某金矿区农田土壤重金属元素 Pb 的累积速率[J].地质通报,2014,33(8):1147-1163.

[17] 代杰瑞,赵西强,喻超,等.青岛市生态地球化学预测与预警研究[J].地球学报,2011,32(4):447-454.

[18] 于林松,宋蕊蕊,康桂玲,等.基于土壤地球化学分区的重金属污染风险评价:以山东省郯城县某镇为例[J].山东国土资源,2020,36(3):34-41.

[19] 李佳佳,高宗军,王敏,等.青岛城区土壤重金属现状评价及趋势预测[J].山东国土资源,2012,28(11):42-46.

[20] 施小学,孙乾迎,卢阳,等.碳酸盐岩风化成土过程重金属的迁移富集特征:以华南典型地区为例[J].中国环境科学,2025,45(4):2063-2074.

[21] 熊健,古增瑞,格旦,等.农田土壤重金属 Cd 污染修复技术研究进展[J].科学技术与工程,2025,25(10):3969-3985.

[22] 刘华峰.章丘区北部土壤重金属地球化学特征及潜在生态风险[J].山东国土资源,2020,36(9):50-57.

[23] 于剑峰,汤世凯,李金鹏,等.山东烟台南部海岸带地区土壤重金属来源、空间分布及潜在风险评价[J].山东国土资源,2019,35(9):41-47.

Safety Assessment and Predication of Surface Soil
in Wulian County in Shandong Province

WANG Yanhao¹,ZHU Jiangyuan¹, MA Guolong², YAN Zaohua¹, ZHOU Liguo¹, ZHANG Xiaochuang¹, YANG Bengu¹

(1. No.8 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources(No.8 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province),Key Laboratory of Nonferrous Metal Exploration and Resource Evaluation of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Rizhao Big Data Research Institute of Geology and Geographic Information,Rizhao Key Laboratory of Land

Quality Evaluation and Pollution Remediation, Shandong Rizhao 276826, China; 2. Donggang Branch Bureau of Rizhao Bureau of Natural Resources and Planning, Shandong Rizhao 276826, China)

Abstract: In order to reveal accumulation patterns and the evolutionary trends of associated environmental risks of heavy metals in surface soil of Wulian county in Shandong province, based on geochemical survey datasets in 2008 and 2018, by using descriptive statistical analysis, accumulation rate calculation and comparative evaluation of geochemical maps, the variations in concentration ranges and magnitudes of heavy metal elements in surface soil over a 10 year period have been analyzed. It is indicated that the soil heavy metals in the research area show a general accumulation trend, accumulation rates of Cd, Cu, Pb and Zn is obvious. Cu has the widest range of amplification, and Hg has the strongest amplification intensity. Main controlling factors are mining and high geological background. By calculating the accumulation rate of heavy metals in the soil, it is predicated that by 2028, the content of heavy metal elements in the surface soil of the study area will increase to varying degrees. Among them, the environmental quality degradation of Cd element is the most significant, while Pb and Zn will form a slight risk area around Hubu town and Songbai town. The soil environmental quality level will correspondingly decrease, and relevant departments should pay more attention to it.

Key words: Heavy metals in soils; accumulation rate; environmental quality; Wulian county