

太行山区土壤重金属污染分布特征及来源解析

杜丽媛 杨颖

河北省煤田地质局环境地质调查院, 河北 石家庄 050085

[摘要] 随着经济的发展, 农业生产及矿山开采的活跃, 对山区造成的土壤污染日趋严重, 其负面效应日益突出。以往研究的重点多在平原区, 对山区的调查研究较少。本次研究以石家庄西部太行山区作为研究区, 分析表层土壤的重金属 (As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn) 含量特征和空间分布规律, 开展生态风险评价, 并分析了土壤重金属来源, 可以为土壤污染管控及土地资源管理提供依据。

[关键词] 土壤污染; 重金属; 太行山区

DOI: 10.33142/nsr.v2i1.15895

中图分类号: X824

文献标识码: A

Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in Taihang Mountain Area

DU Liyuan, YANG Ying

Environmental Geological Survey Institute of Hebei Coalfield Geological Bureau, Shijiazhuang, Hebei, 050085, China

Abstract: With the development of the economy and the activity of agricultural production and mining, soil pollution in mountainous areas is becoming increasingly serious, and its negative effects are becoming more prominent. In the past, the focus of research was mostly on plain areas, with less investigation and research on mountainous areas. This study takes the Taihang Mountains in western Shijiazhuang as the research area, analyzes the characteristics and spatial distribution of heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) in surface soil, conducts ecological risk assessment, and analyzes the sources of heavy metals in soil, which can provide a basis for soil pollution control and land resource management.

Keywords: soil pollution; heavy metals; Taihang mountain

1 研究区概况

本研究在河北省石家庄西部太行山区开展, 面积约为 7200km²。研究区位于山西高原和河北平原之间, 地势西高东低, 共有中山、低山、丘陵和台地四种地形, 属于暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 13.3℃, 年平均降水量为 612.09mm, 区内各种生物资源种类繁多, 矿产资源丰富。

2 样品采集与分析

调查研究共采集 496 个表层 (0~20cm) 土壤样品,

采样点分布见图 1。

样品分析测试由河北拓维检测技术有限公司完成。其中 Cr、Ni、Pb、Cu、Zn 采用火焰原子吸收分光光度法, 检出限分别为 4mg/kg、3mg/kg、10mg/kg、1mg/kg、1mg/kg; Hg、As 采用原子荧光法, 检出限分别为 0.002mg/kg、0.01mg/kg; Cd 采用石墨炉原子吸收分光光度法, 检出限为 0.01mg/kg。测试设置 2% 的平行样, 平行样相对偏差满足质量控制要求。

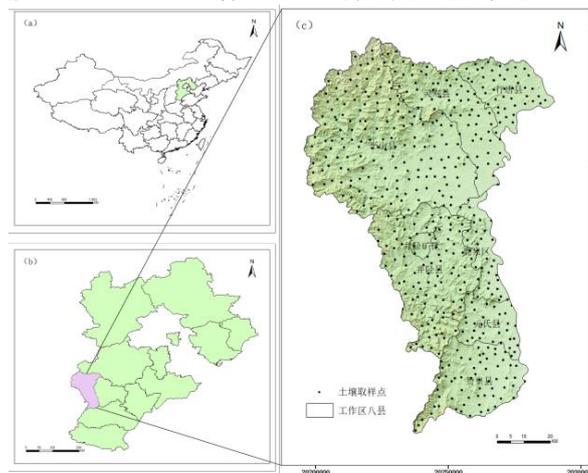


图 1 研究区位置及土壤采样点分布图

3 评价方法

3.1 重金属污染风险评价方法

3.3.1 地累积指数法

用于土壤重金属污染评估方法有很多,目前较为常用的为德国提出的地累积指数法^[1-2],其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2[C_i / (K \times B_i)] \quad (1)$$

C_i 为重金属元素 i 在表层土壤中的实测值; B_i 为重金属元素 i 在土壤中的背景值^[3-4]; K 为修正系数,一般取值 1.5。土壤重金属污染程度分级见表 1。

表 1 地累积指数分级标准

I_{geo}	级别	污染程度
≤ 0	0	无污染
0~1	1	轻度-中等污染
1~2	2	中等污染
2~3	3	中等-强污染
3~4	4	强污染
4~5	5	强-极严重污染
>5	6	极严重污染

3.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态危害指数 (RI) 是综合评价土壤重金属的潜在生态风险的另一重要手段^[3],其计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C_i}{C_n^i} \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (3)$$

式中, C_i 为重金属含量, C_n^i 采用河北省土壤背景值, T_r^i 为毒性响应系数, E_r^i 为潜在生态风险系数, RI 为潜在生态危害指数, 分级如表 2^[5]。

表 2 潜在生态风险指数分级标准^[5]

指数	项目	生态风险等级				
		<40	40~80	80~160	160~320	>320
E_r^i	系数范围	<40	40~80	80~160	160~320	>320
	污染程度	轻微	中等	强	很强	极强
RI	指数范围	<150	150~300	300~600	>600	
	污染程度	轻微	中等	强	很强	

4 评价结果

采用 Excel 对土壤数据进行描述统计特征分析,采用 SPSS 软件进行相关性分析和主成分分析,运用 ArcGIS 软件通过泛克里格法进行空间插值分析^[6]。

4.1 土壤重金属含量特征

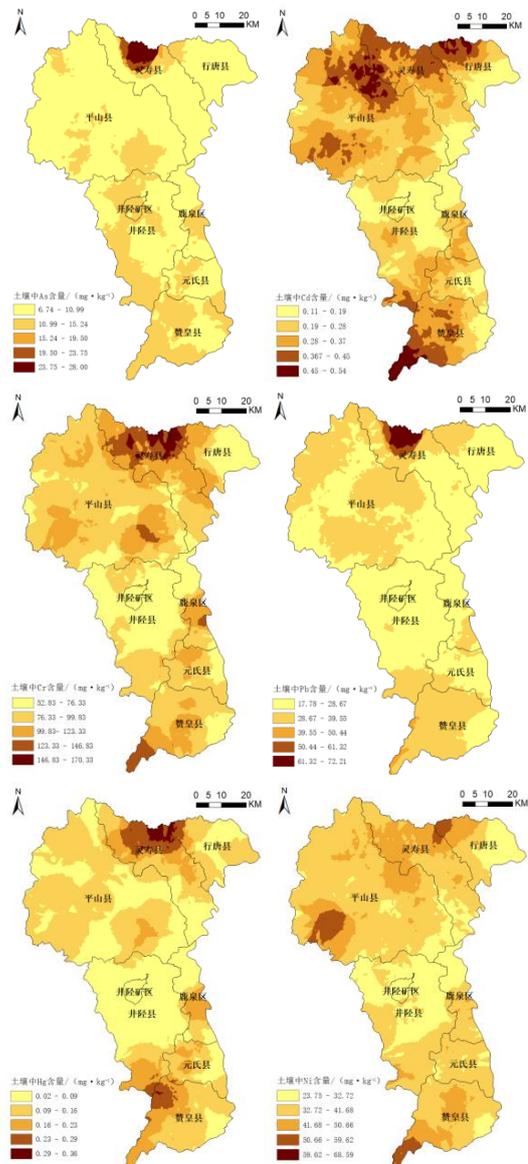
研究区土壤重金属元素的变异系数由高到低为: $Hg > Cd > As > Cr > Pb > Cu > Zn > Ni$, 结果见表 3。

将各元素含量的平均值与河北省土壤背景值进行比较,表层土壤中 As 的平均含量为背景值的 0.82 倍, Cd 的平均含量为背景值的 3.14 倍, Cr 的平均含量为背景值的 1.33 倍, Pd 的平均含量为背景值的 1.37 倍, Hg 的平均含量为背景值的 3.24 倍, Ni 的平均含量为背景值的 1.24

倍, Cu 的平均含量为背景值的 1.54 倍, Zn 的平均含量为背景值的 1.17 倍, 除 As 之外的 7 种重金属含量均高于河北省土壤背景值。

表 3 研究区土壤重金属元素含量统计 (单位: mg/kg)

项目	As	Cd	Cr	Pb	Hg	Ni	Cu	Zn
最大值	125.75	1.37	380.00	256.00	0.72	145.00	117.00	545.00
最小值	1.97	0.04	18.00	10.00	0.01	7.00	9.00	21.00
平均值	10.63	0.28	90.81	28.89	0.11	37.30	33.60	91.44
标准差	7.03	0.22	52.71	15.00	0.15	14.60	15.82	36.72
变异系数 (%)	66.20	76.59	58.04	51.93	133.69	39.15	47.08	40.16
河北省土壤背景值	13.00	0.09	68.10	21.10	0.04	30.20	21.80	78.30
均值与背景值比值	0.82	3.14	1.33	1.37	3.24	1.24	1.54	1.17



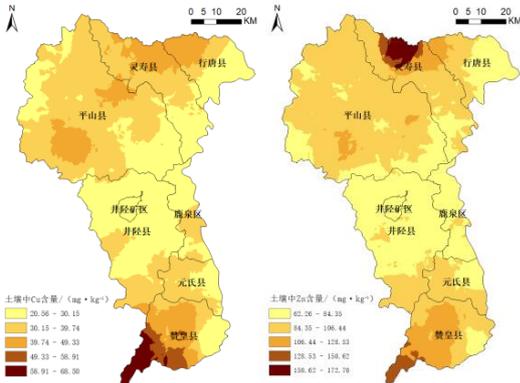


图2 研究区土壤重金属空间分布图

研究区表层土壤重金属元素含量空间分布见图2,其空间分布为南北高、中间低的特征。其中As和Pb高值区出现在研究区灵寿县北部,Cr和Zn元素含量高值区集中在灵寿县北部和赞皇县西南部,Cd元素含量高值区主要位于平山县北部、行唐县北部和赞皇县西南部,Hg元素含量高值区位于灵寿县北部和赞皇县西北部,Ni元素含量高值区主要分布于平山县西南部、行唐县西北部和赞皇县西南部,Cu元素含量高值区主要集中于赞皇县西南部。综上,研究区表层土壤重金属元素含量空间上总体呈现赞皇县西南部高、灵寿县、行唐县和平山县北部高,中部井陘县相对较低的特征。

4.2 土壤重金属污染风险评价

研究区土壤重金属评价结果如图3,其地累积指数(I_{geo})平均值大小排序为: Cd (0.69) > Hg (0.29) > Cu (-0.1) > Pb (-0.22) > Cr (-0.34) > Ni (-0.38) > Zn (-0.45) > As (-1.01)。Cd和Hg均属于无到强污染水平,As、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn均值都小于0,基本无污染。

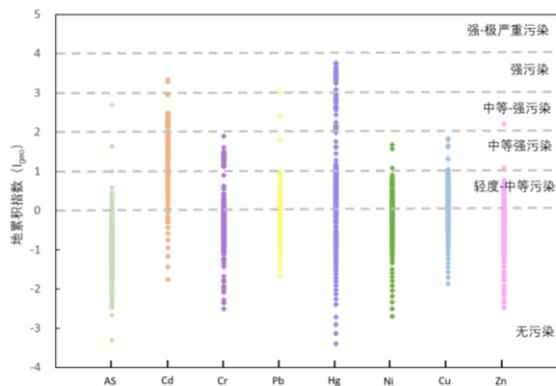


图3 研究区地累积指数评价结果

由表4可知,Cd和Hg潜在生态危害等级为强污染,其他重金属元素潜在生态危害指数(E_r)平均值均未超过40,潜在生态危害等级均为轻微。研究区表层c生态危害指数平均值为256.76,属于中等危害程度。其危害指数分布见图4。

研究区潜在生态危害等级以中等为主,占总面积的62.77%;其次为强危害等级,占总面积的25.23%,主要分布在灵寿县和行唐县北部、鹿泉区山区中部、井陘县南部和赞皇县西部;轻微等级面积占比为12%,主要分布在井陘县中部和鹿泉区山区北部地区。

表4 表层土壤重金属潜在生态危害指数

项目	重金属潜在生态危害指数 E_r							RI	
	As	Cd	Cr	Pb	Hg	Ni	Cu		Zn
最小值	1.52	13.33	0.53	2.36	5.71	1.16	2.06	0.27	28.47
最大值	96.73	456.67	11.16	60.38	818.29	24.01	26.83	6.96	998.65
平均值	8.17	94.26	2.67	6.81	129.80	6.18	7.71	1.17	256.76
危害程度	轻微	强	轻微	轻微	强	轻微	轻微	轻微	中等

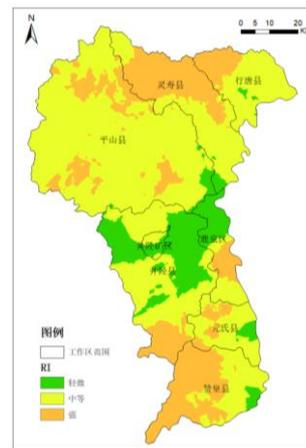
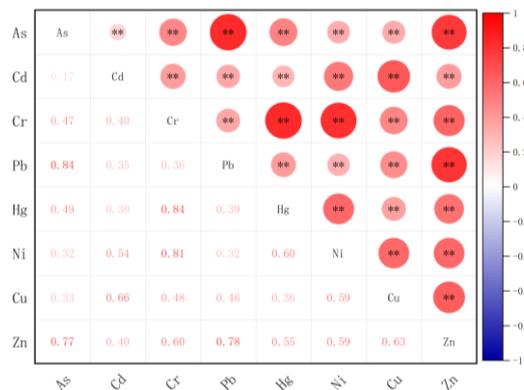


图4 研究区重金属综合潜在生态危害指数分布图

4.3 土壤重金属含量的相关性分析

对研究区表层土壤中的As、Cd、Cr、Pb、Hg、Ni、Cu、Zn进行Pearson相关性分析,如图5所示。



* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$

图5 研究区土壤重金属相关性

重金属元素As-Pb-Zn相互之间呈极显著正相关,Cr-Hg-Ni相互之间呈极显著正相关,可以初步判断土壤中这些重金属具有共同的来源,Cd-Cu之间呈现极显著相关关系。

4.4 土壤重金属来源解析

根据相关性分析得出研究区土壤重金属之间存在相关性，对其进行主成分分析，基于特征值大于1的标准，使用主成分分析法提取了3个公因子，使用最大方差法，成分1的特征值为4.639，成分2的特征值为1.321，成分3的特征值为1.021，这三个方差贡献率为87.26%，原有指标的信息丢失较少，主成分分析效果比较理想，具有研究意义。结果见表5。

表5 研究区土壤重金属主成分分析

元素	组成		
	第一主成分	第二主成分	第三主成分
As	0.92	0.27	0.01
Cd	0.09	0.17	0.89
Cr	0.23	0.91	0.25
Pb	0.92	0.10	0.25
Hg	0.30	0.87	0.07
Ni	0.12	0.74	0.52
Cu	0.30	0.23	0.82
Zn	0.77	0.39	0.36
贡献率	57.98%	16.52%	12.76%
累计贡献率	57.98%	74.50%	87.26%

第一主成分的贡献率占57.98%，其中As、Pb和Zn来源可能相同，均集中在研究区北部，根据收集的矿山资料，灵寿县北部成矿条件良好，矿产资源丰富，煤炭开采、有色金属冶炼、非金属矿藏建材施工等都有可能致土壤中As、Pb和Zn含量较高，其中As常见于多种金属矿床中，尤其多伴生于金矿床，灵寿县黄金储量、产量居太行山区首位。因此，As、Pb和Zn主要来自工业源。

第二主成分的贡献率占16.52%，Cr、Hg、Ni具有较高的荷载，荷载系数均大于0.7，且在赞皇县西南部、中部、鹿泉区中部、行唐县西北部和平山县西南部含量较高，由表可知，Hg的变异系数大于1，属于强变异，说明其来源主要受到人为活动影响，已有研究显示，Hg是化肥的重要组成成分，研究区赞皇中部、平山县西南部均有农业基地、养殖场等，因此，Hg主要来自农业源。Ni元素的变异系数相对其他重金属元素最小，且Ni和Cr的地累积指数均小于0，说明人类活动对这两种元素的影响不大，因此，这两种元素积累主要是成土母质导致，为自然源。综上，Hg、Cr和Ni主要来自农业源和自然源。

第三主成分的贡献率占12.76%，Cd和Cu具有较大荷载，荷载系数均大于0.8，Cd和Cu高值区分布在赞皇

县西南部，相关资料显示，赞皇县西南部虎寨口具有规模铜矿床，因此，Cu主要来自工业源。相关资料显示，磷肥和农药的施用都会造成土壤中Cd超标，赞皇县西南部有多处农业基地，因此，Cd主要来自农业源。综上，Cd和Cu主要来自工业源和农业源。

5 结论

(1) 石家庄太行山革命老区表层土壤重金属元素除了As外，平均含量均大于河北省土壤背景值，这表明该研究区土壤中重金属存在一定程度的积累。

(2) 通过地累积指数法评价，Cd和Hg均属于无到强污染水平，As、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn均值都小于0，基本无污染。

(3) 通过潜在生态危害指数法评价，研究区总体表现为轻微潜在生态危害；Hg和Cd表现为强潜在生态危害。综合潜在生态危害指数(RI)平均值为256.76，属于中等危害程度。

(4) 土壤重金属来源解析结果显示，As、Pb和Zn主要源于工业源，Cr、Ni和Hg主要来自自然源和农业源，Cd和Cu主要来自农业源和工业源。

基金项目：河北省财政资金项目“河北省石家庄太行山革命老区生态地质调查”(13000022P00B04410024W)。

[参考文献]

[1] 苏全龙. 城市土壤重金属污染特征及影响因素研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.

[2] 王磊, 段星星, 赵禹, 等. 甘肃省白银市四龙镇—北湾镇耕地区土壤重金属现状及生态风险评价[J]. 中国地质, 2024, 51(1): 290-303.

[3] 胡兆鑫, 吴泽燕, 罗为群, 等. 典型岩溶县土壤重金属含量、来源及生态风险评价[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5506-5516.

[4] 李学刚, 袁华茂, 许思思, 等. 胶州湾滨海湿地盐渍土壤中重金属的聚集与分散特性研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(7): 88-95.

[5] 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 等. 重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 环境科学, 2024, 45(4): 2450-2460.

[6] 徐祖奔, 伍艳, 赵越, 等. 黄河下游典型滩区土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 200-207.

作者简介：杜丽媛(1985—)，女，硕士，2012年毕业于中国地质大学(北京)，高级工程师，从事水文地质、生态地质研究工作。