

## 四川省马边老河坝磷矿重金属污染分析

卢君勇<sup>1</sup>, 吴浪<sup>1</sup>, 阳开龙<sup>1</sup>, 唐茂林<sup>1</sup>, 邓杰<sup>2</sup>, 谭洪旗<sup>2</sup>

1. 四川省地质矿产勘查开发局二零七地质队, 四川 乐山 614000;
2. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610000)

**摘要:** 马边老河坝磷矿资源丰富, 矿业活动频繁, 对矿区内水土环境影响不明。为查明老河坝磷矿区内矿山环境及水体、土壤内的重金属污染程度, 以老河坝磷矿区水土环境为研究对象, 对地表水及表层土壤的重金属元素(Cd、As、Cu、Cr、Pb、Zn)含量及其分布特征开展了生态污染程度评价。结果表明: 研究区水质较好, 重金属及磷元素污染程度较低, 符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)III类水质标准的相关指标。土壤中金属元素平均值与四川省土壤元素背景值相比: Cd元素超标8.75倍, Pb元素超标3.36倍, Zn元素超标1.94倍, As元素超标1.48倍, Cu元素超标1.36倍, P元素超标7.47倍。与中国土壤元素背景值相比: Cd元素超标10倍, Pb元素超标4.40倍, Zn元素超标2.48倍, As元素超标1.88倍, Cu元素超标2.12倍, Cr元素超标1.42倍。潜在生态危害指数法显示, 马边老河坝磷矿表层土壤重金属污染程度依次为Cd>As>Pb>Cu>Zn>Cr, Cd元素危害最大, 其次是As、Pb和Zn, 为中度生态污染风险。累积指数法显示, 马边老河坝磷矿表层土壤重金属污染程度依次为Cd>Pb>As>Zn>Cu>Cr, Cd、Pb污染程度为中度。综上所述, 马边老河坝磷矿重金属污染对水体影响小, 而土壤重金属污染不可忽视。

**关键词:** 老河坝磷矿; 重金属污染; 潜在生态危害指数法; 地累积指数法

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.02.033

中图分类号: TD952; P611.1+3 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)02-0187-07

马边磷矿是我国四大磷矿之一, 其开发利用是马边彝族自治县的支柱产业之一。近年来, 中低品位磷矿的选矿技术有突破, 矿业开发快速推进, 从而矿山环境问题较为突出<sup>[1]</sup>, 成为该县磷矿开发的制约因素<sup>[2]</sup>。本文以四川省马边老河坝磷矿区的水土环境为研究对象, 以小流域为主线, 参考国内外各种评价模型<sup>[3-6]</sup>, 对研究区水土重金属元素(Cd、As、Cu、Cr、Pb、Zn)的含量以及分布特征进行了研究, 采用潜在生态危害指数法和地累积指数法进行生态污染程度评价, 为矿山环境保护及绿色矿山建设提供技术参考<sup>[7]</sup>。

### 1 样品采集与分析

沿马边河向上游河段开始, 尽量选取未受或

少受磷矿开发影响的地段, 结合研究区的地质地貌特征和污染源分布特征, 用平行法采集水体样品和相应的表层土壤样品。水样用聚乙烯瓶采集离开河床一定距离的流动水, 同一采样点采集4瓶样品, 采集水样前聚乙烯瓶用采样点处的流动水清洗3次。同时, 用取土器采集各点的表层土壤样品, 样品采集后第一时间送往中国地质科学院矿产综合利用研究所分析测试实验室进行相关的处理和分析测试工作。

河水中重金属的浓度用ICP-MS分析仪直接测定, 表层土壤分析采用国家一级标准物质作为标样, 用空白样作为仪器基准值, 力求达到各项指标分析方法检出限要求、准确度及精密度。

收稿日期: 2021-06-08

基金项目: 中国地质调查局项目《四川马边-金阳地区磷等重要矿产资源综合利用调查评价》(DD20190626); 四川省自然资源厅项目(510201202101631-5)

作者简介: 卢君勇(1987-), 男, 工程师, 研究方向为区域地质调查。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水体中重金属的分布规律

地表水样采样点的重金属含量，总磷含量，pH 值等的分析结果见表 1。从表 1 中可以看出，马边老河坝磷矿及周围河水的 pH 值较高，总体呈弱碱性至碱性。在采矿山样品 pH 值平均值大于 8.4，而下游河水 pH 值在 8.03~8.40 之间，说明矿山开采对河水的 pH 值有一定小影响。马边老河坝磷矿区的重金属元素含量相对高，上下游的含

量低于磷矿集区，说明矿业活动对环境也有一定的影响。其中，重金属元素 Pb、P 元素的含量高，Pb 元素超标 II 类水质标准 4.91 倍，P 元素超标 II 类水质标准 1.21 倍，Cu、Zn、Cr、Cd、As 元素的含量低，在老河坝磷矿区附近水样的含量高，表明磷矿的开采对土壤造成了一定的污染。总磷污染在上下游的样品中总磷含量未超过 II 类水质标准，在磷矿区内则呈点状超标（C5 点超标 10 倍）。

表 1 马边老河坝磷矿水体样品分析测试结果/%  
Table 1 Analysis and test results of water samples from Laoheba phosphate rock in Mabian

编号	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	P	pH值
C1	1.92	0.82	1.97	0.046	0.059	0.301	0.078	8.03
C2	5.55	1.55	6.61	0.027	0.034	0.407	0.093	8.4
C3	1.62	9.08	38.9	0.034	0.223	2.3	1.4	8.61
C4	0.9	6.28	27.7	0.028	0.462	1.64	1.04	8.47
C5	13	454	793	0.023	4.4	19.7	31	8.43
C6	0.331	0.412	8.72	0.025	0.022	1.51	0.919	8.36
C7	0.07	0.38	10.5	0.017	0.024	0.379	0.065	8.32
C8	0.404	14.2	26.9	0.027	0.207	1.84	1.54	8.4
C9	2.51	3.4	9.58	0.04	0.057	2.34	0.241	8.33
C10	0.142	0.707	3.56	0.028	0.019	0.428	0.048	8.45
平均值	2.64	49.08	92.74	0.03	0.55	3.08	3.64	8.38
水质标准(II类)	1000	10	1000	50	5	50	3	-
水质标准(III类)	1000	50	1000	50	5	50	5	-

注: 水质标准参照国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中的水质标准。

采矿区的样品 pH 值为碱性，表明矿山开采对河水的环境具有一定的影响。河水中的重金属元素分布较均匀，在途径矿山的采样点（如 C3、C4、C5、C8），重金属浓度明显高于下游河段，其原因与磷矿开采过程中废石、矿渣、污水等排放至河道有关。参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中的水质标准，该磷矿区的河水中重金属元素浓度较低，符合 II 类水质标准，可以作为集中式生活饮用水地表水源地、珍惜水生生物栖息地、鱼虾类产卵场、仔稚幼鱼的索饵汤等。

总磷最高允许排放质量浓度参照 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》，该磷矿区的水体中总磷污染绝大多数达到 I 类，可作为生活生产饮用水源头水，极个别样品（C5）总磷浓度明显高于其他采样点，原因在于当地磷矿企业不规范堆矿，致使河道内存在废石、废渣等，使得河水中总磷浓度较高。

### 2.2 表层土壤重金属元素特征

马边老河坝磷矿矿区内重金属元素含量相对高，上下游的含量相对磷矿集区较低，说明矿业开采对环境有一定的影响。其中，重金属元素 Cd、Pb、Zn 元素的含量高，Cr 元素的含量低，在老河坝磷矿区附近表层土壤样的含量高，亦说明磷矿的开采对土壤造成了一定的污染。总磷污染也显示相同的规律，在上下游的样品中总磷含量未超过四川土壤背景值，而在磷矿区内则含量超标。从表 2 中可以看出，各元素平均值与四川省土壤元素背景值相比：Cd 元素超标 8.75 倍，Pb 元素超标 3.36 倍，Zn 元素超标 1.94 倍，As 元素超标 1.48 倍，Cu 元素超标 1.36 倍。Cr 在标准值以内，P 元素超标 7.47 倍。与中国土壤元素背景值相比：Cd 元素超标 10 倍，Pb 元素超标 4.40 倍，Zn 元素超标 2.48 倍，As 元素超标 1.88 倍，Cu 元素超标 2.12 倍，Cr 元素超标 1.42 倍。

表2 马边老河坝磷矿表层土壤样品分析测试结果/%  
Table 2 Analysis and test results of surface soil samples of Laoheba phosphate mine in Mabian

编号	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	P	pH值
BC1	14.8	490	625	63	1.45	25.07	48100	8.17
BC2	41.8	127	319	79.1	1.5	15.71	4520	7.72
BC3	91	63.8	59.6	62.4	0.33	19.15	1360	7.33
BC4	24.2	39.8	102	73.8	0.77	16.85	999	8.09
BC5	31.4	37.8	89.8	93.4	0.88	8.41	1140	8.38
BC6	62	39.2	65.3	71.2	0.49	12.88	2150	6.95
BC7	56.8	65.2	129	74.6	0.76	20.25	1470	7.92
BC8	44.6	121	140	83	0.3	10.68	1740	5.3
BC9	36.8	26.0	86.8	86.1	0.26	14.83	395	8.22
BC10	20.6	28.1	61.6	65.7	0.30	10.27	592	8.17
平均值	42.40	103.79	167.81	75.23	0.70	15.41	6246.60	7.63
最大值	91.00	490.00	625.00	93.40	1.50	25.07	48100	8.38
最小值	14.80	26.00	59.60	62.40	0.26	8.41	395	5.30
四川土壤背景值	32.7	40.4	89.4	86.2	0.34	10.3	836	-
中国土壤背景值	20.00	23.60	67.70	53.10	0.07	8.20	-	-

分析结果表明，研究区重金属元素普遍超标，超标范围在1.36~7.47倍，仅Cr与四川省土壤元素背景值相比不超标，Cd、Pb、Zn、P元素相比其他元素明显高于背景值，富集程度高，其余金属元素超标在1~2倍之间，富集程度相对较低。

### 2.3 植被重金属元素特征

从各地采集植物（为玉米）样品枝、叶、果

分析结果（表3），可以看出该地区玉米所有元素的变化规律基本一致，即叶>茎>果实。就各元素而言，Cu、Cr、V在叶、茎、果实中的变化不大，说明更容易进入植物，乃至果实。Pb、As、Mn三种元素在土壤中的含量是果实含量的1000~3000倍，说明土壤中的这三种元素不容易进入植物或者果实。

表3 马边老河坝重点调查区植物分析结果/(g·t<sup>-1</sup>)  
Table 3 Plant analysis results in the key investigation area of the old river dam in Mabian

部位	位置	Hg	Mo	V	Cr	Co	Ni	As	Cd	Pb	P	Cu	Mn	Zn
枝		0.00279	0.13	0.118	1.80	0.090	6.43	<1	0.043	1.72	0.12	3.24	1.37	20.7
叶	二坝	0.0119	0.32	0.141	2.60	0.26	14.1	<1	0.11	5.45	0.19	6.36	12.7	37.5
果		<0.001	0.17	0.048	1.15	0.021	5.28	<1	0.011	0.25	0.36	2.03	1.93	14.7
枝		0.00416	0.29	0.082	0.94	0.046	3.98	<1	0.039	1.24	0.063	3.95	3.60	18.6
叶	铜厂坝	0.0132	0.55	0.073	2.15	0.16	5.69	11.4	0.089	3.15	0.14	7.35	12.9	18.8
果		<0.001	0.19	0.030	0.91	0.014	1.74	<1	0.0066	0.17	0.30	1.60	2.16	12.4
枝		<0.001	0.12	0.094	1.18	0.11	8.99	<1	0.059	0.92	0.12	4.39	7.46	8.70
叶	暴风坪	0.0234	0.28	0.211	2.68	0.46	46.9	230	0.34	19.6	0.17	14.3	27.7	42.0
果		<0.001	0.092	0.034	1.93	0.049	4.40	<1	0.011	0.24	0.31	2.21	1.61	11.9

### 2.4 水体与表层土壤的对比

水体与土壤的对比中可以看出，Pb、P元素在水体中的含量高，Cu、Zn、Cr、Cd、As元素的含量低。Cu元素土壤中含量为42.40 g/t，是水体中的16.06倍。Pb元素土壤中含量为103.79 g/t，是水体中的2.11倍。Zn元素土壤中含量为167.81 g/t，是水体中的1.81倍。Cr元素土壤中含量为

75.23 g/t，是水体中的2507.67倍。Cd元素土壤中含量为0.70 g/t，水体含量为0.55 g/t，土壤是水体中的1.27倍。As元素土壤中含量为15.41 g/t，是水体中的5倍。P元素土壤中含量为6246.60 g/t，是水体中的1716.10倍。综上所述，这些重金属元素在水中的含量较少，而在土壤中的含量大多是水中的1.27~2507.67倍，说明重金属元素在土壤中

迁移能力较弱，在水中迁移能力较强。

### 2.5 与其他地区对比

马边老河坝磷矿与贵州开阳磷矿<sup>[8]</sup>相比，前者土壤中 Cu、Pb、Zn、Cd、As 元素的平均含量高于开阳磷矿表层沉积物的元素含量，仅 Cr 元素

平均含量低于开阳磷矿。两地元素均高于其背景值（表 4），说明其重金属含量均有富集，在磷矿开采中产生的废石、废渣、废水等对其生态造成了污染。

表 4 马边磷矿元素平均值与西南土壤背景值对比/(g·t<sup>-1</sup>)  
Table 4 Comparison of the average value of phosphate rock elements in Mabian and the background value of soil in Southwest China

元素值	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As
马边磷矿测试值	42.40	103.79	167.81	75.23	0.70	15.41
开阳磷矿表层沉积物 <sup>[9]</sup>	29.43	29.39	89.94	79.42	0.31	14.89
四川土壤背景值 <sup>[10]</sup>	31.10	30.90	86.50	79.00	0.08	10.40
贵州土壤背景值 <sup>[10]</sup>	0.58	5.69	3.91	-	9.69	-
云南土壤背景值 <sup>[10]</sup>	46.3	40.6	89.7	65.2	0.218	-

### 2.6 土壤潜在生态危害指数评价

Hakanson<sup>[11]</sup>给出 7 种元素的“沉积学毒性系数”顺序为 Zn=1 < Cr=2 < Cu = Pb =5 < As =10 < Cd=30 < Hg =40。徐争启等<sup>[12]</sup>给出 12 种元素的毒性系数为: Ti= Mn = Zn =1 < V = Cr =2 < Cu = Pb = Ni = Co =5 < As =10 < Cd =30 < Hg = 40。

$$RI = \sum_{i=0}^n E_r^i \sum_{j=1}^n T_r^j C_r^j = \sum_{i=1}^n T_r^i C_r^i \text{实测} / C_n^i$$

式中： $C_r^i$ 为某一重金属的污染指数， $C_r^i \text{实测}$ 为重金属的实测含量， $C_n^i$ 为该元素的评价标准（以四川省土壤背景值为评价标准）。 $T_r^i$ 为各重金属的毒性系数， $RI$ 为多种金属的潜在生态风险系数，潜在生态危害指数划分标准见表 5。

表 5 潜在生态危害指数划分标准  
Table 5 Classification criteria of potential ecological hazard index

$C_r^i$	污染程度	$E_r^i$	$RI$	风险程度
$C_r^i < 1$	轻污染	$E_r^i < 30$	$RI < 50$	轻微
$1 \leq C_r^i < 3$	中污染	$30 \leq E_r^i < 60$	$50 \leq RI < 100$	中度
$3 \leq C_r^i < 6$	重污染	$60 \leq E_r^i < 120$	$100 \leq RI < 200$	强
$C_r^i \geq 6$	极重污染	$120 \leq E_r^i < 240$	$200 \leq RI < 400$	很强
-	-	$E_r^i \geq 240$	$RI \geq 400$	极强

据以上标准，对马边老河坝磷矿重金属污染程度及潜在生态危害程度进行分析（表 6）。

从表 6 可以看出，与四川土壤背景值相比，马边老河坝磷矿土壤中重金属值顺序依次为 Cd > As > Pb > Cu > Zn > Cr。Cd 的平均值为 62.12，属于强生态污染风险，Cd 在 BC1、BC2 样点处值超过 120，属于很强生态污染风险，在 BC4、BC5、BC7 样点处超过 60，属于强生态污染风险。Pb 在 BC1 样点处值为 60.64，属于强度生态风险，其他样点均为中度-轻微生态污染风险。而样点  $RI$  值看，BC1 和 BC2 为强生态风险。BC3-8 为中生态风险。BC9、BC10 分别为磷矿区外围上下游样点，生态污染程度低，为轻微生态风险。重金属

元素污染上，As、Cu、Zn、Cr 的值在所有样品中均小于 30，均为轻微生态风险。

从平均值来看，马边老河坝磷矿土壤中各重金属污染程度为中度生态污染风险。其中 Cd 元素的值占了  $RI$  值的 73%，是最主要的污染物。从单个元素污染程度上看，与云南开阳磷矿相比，单个重金属元素中 Cd 的生态危害指数最大，其次是 As，与马边老河坝磷矿分析结果一致。

### 2.7 基于地累积指数的沉积物污染评估

地累积指数法<sup>[13]</sup>( $I_{geo}$ ) 计算方法为

$$I_{geo} = \log_2 C_n / k B_n$$

式中  $C_n$  为实测元素 n 在土壤含量； $B_n$  为该元素地球化学背景值（选取四川省土壤元素背景值作为

表6 土壤采样点潜在生态危害指数评价结果/(g·t<sup>-1</sup>)  
Table 6 Evaluation results of potential ecological hazard index at soil sampling sites

采样点	E <sub>r</sub>						RI	危害程度
	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As		
BC1	2.26	60.64	6.99	1.46	127.94	24.34	199.30	强
BC2	6.39	15.72	3.57	1.84	132.35	15.25	159.87	强
BC3	13.91	7.90	0.67	1.45	29.12	18.59	53.04	中度
BC4	3.70	4.93	1.14	1.71	67.94	16.36	79.42	中度
BC5	4.80	4.68	1.00	2.17	77.65	8.17	90.30	中度
BC6	9.48	4.85	0.73	1.65	43.24	12.50	59.95	中度
BC7	8.69	8.07	1.44	1.73	67.06	19.66	86.99	中度
BC8	6.82	14.98	1.57	1.93	26.47	10.37	51.76	中度
BC9	5.63	3.22	0.97	2.00	22.94	14.40	34.75	轻微
BC10	3.15	3.48	0.69	1.52	26.47	9.97	35.31	轻微
平均值	6.48	12.85	1.88	1.75	62.12	14.96	85.07	中度

评价指标)；k为考虑各地的岩石差异可能引起背景值的变动而取的常数(通常取1.5)。根据 $I_{geo}$ 的大小将污染等级分为7级(0~6级)，0级为 $I_{geo} < 0$ ，清洁；1级为 $0 \leq I_{geo} < 1$ ，轻度污染；2级为 $1 \leq I_{geo} < 2$ ，偏中度污染；3级为 $2 \leq I_{geo} < 3$ ，中度污染；4级为 $3 \leq I_{geo} < 4$ ，偏重度污染；5级为 $4 \leq I_{geo} < 5$ ，重度污染；6级为 $I_{geo} \geq 5$ ，严重污染。

从表7中可见，研究区表层土壤污染程度为Cd>Pb>As>Zn>Cu>Cr，Cd、Pb的 $0 \leq I_{geo} < 1$ ，污染程度为中度；Cu、Zn、Cr、As的 $I_{geo}$ 全部小于0，污染程度为清洁。以上数据表明，研究区表层土壤总体上Cd、Pb污染较强。Cd总体污染程度为中度，BC1-2、BC4-5、BC7的 $I_{geo}$ 显示其污染程度为中度污染；Pb总体污染程度为清洁，BC1-

3、BC7、BC8的 $I_{geo}$ 显示其污染程度为中度污染；As总体污染程度为清洁，BC1-4、BC7的 $I_{geo}$ 显示其污染程度为轻度污染；Zn总体污染程度为清洁，BC1-2、BC7、BC8的 $I_{geo}$ 显示其污染程度为轻度污染；Cu总体污染程度为清洁，BC3、BC6、BC7的 $I_{geo}$ 显示其污染程度为轻度污染；Cr总体污染程度为清洁，其全部样点均为清洁。从单个元素污染程度上看，与云南滇池周边某磷矿各复垦区土壤<sup>[13]</sup>相比，该磷矿各复垦区土壤中风险较高的重金属元素主要为Cd和Pb，与马边老河坝磷矿分析结果一致。

### 2.8 不同评价方法结果比较

根据潜在生态危害指数法得到马边老河坝磷矿表层土壤重金属污染程度依次为Cd>As>

表7 马边老河坝土壤中重金属 $I_{geo}$ 值与污染分级  
Table 7  $I_{geo}$  value and pollution classification of heavy metals in soil of old river dam in Mabian

采样点	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As
BC1	-1.73	3.02	2.22	-1.04	1.51	0.70
BC2	-0.23	1.07	1.25	-0.71	1.56	0.02
BC3	0.89	0.07	-1.17	-1.05	-0.63	0.31
BC4	-1.02	-0.61	-0.39	-0.81	0.59	0.13
BC5	-0.64	-0.68	-0.58	-0.47	0.79	-0.88
BC6	0.34	-0.63	-1.04	-0.86	-0.06	-0.26
BC7	0.21	0.11	-0.06	-0.79	0.58	0.39
BC8	-0.14	1.00	0.06	-0.64	-0.77	-0.53
BC9	-0.41	-1.22	-0.63	-0.59	-0.97	-0.06
BC10	-1.25	-1.11	-1.12	-0.98	-0.77	-0.59
平均值	-0.40	0.10	-0.15	-0.79	0.18	-0.08
污染等级	0	1	0	0	1	0
污染程度	清洁	轻度	清洁	清洁	轻度	清洁

Pb > Cu > Zn > Cr, 根据地累积指数法得到马边老河坝磷矿表层土壤重金属污染程度依次为 Cd > Pb > As > Zn > Cu > Cr。两种评价方法均显示 Cd、As、Pb 等元素的污染程度较高, 而潜在生态危害指数法中单元素污染评价因子中, Cd 是表层土壤中的主要污染贡献者, 其占比超过 70%。而两种评价方法的结果中可以得出, 造成老河坝磷矿区土壤重金属富集的主要污染源是矿产开采过程中涉及的岩石、土壤等地球化学背景, 矿业开发对区域生态环境有直接影响, 后期矿产开采、运输、选矿等过程中应加强对矿山环境的治理和保护。

### 3 结论

(1) 研究区水质较好, 重金属及磷元素污染程度较低, 生活、生产污水经处理后, 处理后达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 及《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017) III 类标准值, 仅局部位置污染程度较高。

(2) 土壤中金属元素平均值与四川省土壤元素背景值相比: Cd 元素超标 8.75 倍, Pb 元素超标 3.36 倍, Zn 元素超标 1.94 倍, As 元素超标 1.48 倍, Cu 元素超标 1.36 倍。Cr 在标准值以内, P 元素超标 7.47 倍。与中国土壤元素背景值相比: Cd 元素超标 10 倍, Pb 元素超标 4.40 倍, Zn 元素超标 2.48 倍, As 元素超标 1.88 倍, Cu 元素超标 2.12 倍, Cr 元素超标 1.42 倍。

(3) 研究区重金属元素普遍超标, 超标范围在 1.36~7.47 倍, 仅 Cr 与四川省土壤元素背景值相比不超标, Cd、Pb、Zn、P 元素相比其他元素明显高于背景值, 富集程度高, 其余金属元素超标在 1~2 倍之间, 富集程度相对较低。

(4) 根据潜在生态危害指数法得到马边老河坝磷矿表层土壤重金属污染程度依次为 Cd > As > Pb > Cu > Zn > Cr, Cd 元素的值占了 RI 值的 73%, 是该地区最主要的污染物, 其次是 As、Pb 和 Zn, 生态污染风险为中度生态污染风险。

(5) 根据地累积指数法得到马边老河坝磷矿表层土壤重金属污染程度依次为 Cd > Pb > As > Zn > Cu > Cr, Cd、Pb 的  $0 \leq I_{geo} < 1$ , 污染程度为中度; Cu、Zn、Cr、As 的  $I_{geo}$  全部小于 0, 污染程度为清洁。

### 参考文献:

- [1] 周永兴, 田宗平, 曹健, 等. 磷矿选矿现状及发展趋势[J]. 广州化工, 2014, 42(19):31-33.
- ZHOU Y X, TIAN Z P, CAO J, et al. Current Situation and Development Trend of Phosphate Rock Enrichment[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(19):31-33.
- [2] 王显炜, 徐友宁, 杨敏, 等. 国内外矿山土壤重金属污染风险评价方法综述[J]. 中国矿业, 2009, 18(10):54-56.
- WANG X W, XU Y N, YANG M, et al. Review on risk assessment methods for soil heavy metal contamination in mines at home and abroad[J]. China Mining Magazine, 2009, 18(10):54-56.
- [3] 陈峰, 蒋新, 唐访良, 等. 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, 2012, 34(7):6-8+14.
- CHEN F, JIANG X, TANG F L, et al. Application of AHP and GIS in evaluation of agricultural soil heavy metals pollution[J]. Environmental pollution and prevention, 2012, 34(7):6-8+14.
- [4] 石晓翠, 钱翌, 熊建新. 模糊数学模型在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 土壤通报, 2006, 37(2):2334-2336.
- SHI X C, QIAN Y, XIONG J X. Application of Fuzzy mathematics models in the Evaluation of soil heavy metal pollution[J]. Chinese journal of soil science, 2006, 37(2):2334-2336.
- [5] 王晓钰. 基于灰色关联度的土壤环境重金属污染综合评价法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2013, 41(3):110-113.
- WANG X Y. An integrated method for assessing the pollution level of soil based on grey correlation theory[J]. Journal of Henan normal university (Natural science edition), 2013, 41(3):110-113.
- [6] 聂静茹, 马友华, 徐露露, 等. 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, 2013(6):44-49.
- NIE J R, MA Y H, XU L L, et al. Discussion About Heavy Metal Pollution in Soil Environmental Quality Standard in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2013(6):44-49.
- [7] 徐争启, 黄寰, 宋昊, 等. 四川省马边-雷波磷矿基地环境效应综合评估报告[R]. 2018.
- XU Z Q, HUANG H, SONG H, et al. Comprehensive assessment report on environmental effect of mabian-leibo phosphate mine base, sichuan province[R]. 2018.
- [8] 程馨, 施泽明, 张成江, 等. 贵州开阳磷矿开采对洋水河水体重金属污染与评价[J]. 中国环境监测, 2015, 31(2):78-83.
- CHEN X, SHI Z M, ZHANG C J, et al. Evaluation of Heavy

Metals Pollution to Yangshui River in Mining of Phosphate Rock of Kaiyang Phosphate Mine in Guizhou[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, 31(2):78-83.

[9] 张家铜, 刘佳麟. 水体重金属污染的危害及其治理[J]. 山东工业技术, 2019, 12(12):35.

ZHANG J T, LIU J L. Harm of heavy metal pollution in water body and its treatment[J]. *Shandong Industrial Technology*, 2019, 12(12):35.

[10] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

National Environmental Protection Agency. Soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.

[11] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.

[12] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008(2):112-115.

XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al. Calculation of Heavy Metals' Toxicity Coefficient in the Evaluation of Potential Ecological Risk Index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008(2):112-115.

[13] 于云江, 胡林凯, 杨彦, 等. 典型流域农田土壤重金属污染特征及生态风险评估 [J]. *环境科学研究*, 2010, 23(12):1523-1527.

YU Y J, HU L K, YANG Y, et al. Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils of a Typical Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(12):1523-1527.

## Analysis of Heavy Metal Pollution in the Environment of Laoheba Phosphate Mine in Mabian Region, Sichuan Province

Lu Junyong<sup>1</sup>, Wu Lang<sup>1</sup>, Yang Kailong<sup>1</sup>, Tang Maolin<sup>1</sup>, Deng Jie<sup>2</sup>, Tan Hongqi<sup>2</sup>

(1.207 Geological Brigade of Sichuan Bureau of Exploration & Development of Geology & Mineral Resources, Leshan, Sichuan, China; 2.Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu, Sichuan, China)

**Abstract:** Laoheba phosphate mineral resources are rich in Mabian region, and mining activities are frequent. The impact on the soil and water environment is unclear in the mining area. In order to find out the pollution degree of heavy metals in the mine environment, water body and soil in the Laoheba phosphate ore area, the content and distribution characteristics of heavy metals (Cd, As, Cu, Cr, Pb, Zn) in the surface water and surface soil were evaluated by taking the soil and water environment in the Laoheba phosphate ore area as the research object. The results indicate that the water quality in the study area is good, and the pollution degree of heavy metals and phosphorus is low, which conforms to the relevant indexes of the Environmental Quality Standard for Surface Water (GB3838-2002)III. Compared with the background value of soil elements in Sichuan Province, the mean value of metal elements in the soil is 8.75 times, 3.36 times, 1.94 times, 1.48 times, 1.36 times, and 7.47 times of Cd, Pb, Zn, Cu and P. Compared with the background values of soil elements in China, Cd exceeds the standard by 10 times, Pb 4.40 times, Zn 2.48 times, As 1.88 times, Cu 2.12 times and Cr 1.42 times. The potential ecological hazard index method showed that the pollution degree of heavy metals in the surface soil of Laoheba phosphate mine was Cd> As > Pb > Cu> Zn>Cr, followed by Cd element, followed by As, Pb and Zn, which was a moderate ecological pollution risk. The accumulation index method showed that the pollution degree of heavy metals in the surface soil of Mabian Laoheba phosphate mine was Cd>Pb>As>Zn>Cu>Cr, and the pollution degree of Cd and Pb was moderate. In conclusion, the heavy metal pollution of phosphate ore has little influence on water body, while the heavy metal pollution of soil cannot be ignored in Laoheba, Mabian.

**Keywords:** Laoheba phosphate mine; Heavy metal pollution; Potential ecological hazard index method; Geoaccumulation index method