

DOI: 10.12401/j.nwg.2023092

## 某钼矿集中开采区尾矿库排水重金属环境 风险等级及其贡献率分析

贾晓丹<sup>1</sup>, 王晖<sup>2</sup>, 徐友宁<sup>1,\*</sup>

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心 / 西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119;

2. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为研究具有 20 年采矿历史的陕南某钼矿集中开采区对外环境的水污染效应, 笔者采集 25 个尾矿库酸性外排水的水量及水质测试数据, 包括 Hg、Cd、As、Pb、Cu、Zn、Mn、Fe、Mo 等 9 种重金属元素含量, 对多污染源多种重金属复合污染进行评价。采用单项污染指数法和综合污染指数法与《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)和《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)进行对标分析, 结合外排水水量计算单项重金属元素污染负荷; 在等权指标法的基础上, 以地表水环境质量标准为基准, 按照“标准值大小决定其重要性”的原则, 根据两基点相对重要程度, 引入三标度间接矩阵, 计算得出含 Fe 元素在内的 9 种元素相对权重, 与其污染负荷共同给出某一尾矿库环境风险值。在此基础上, 计算得出 25 个尾矿库对受纳水体的污染贡献率, 为制定尾矿库污染源优先治理方案提供参考。

**关键词:** 尾矿库; 外排水; 钼矿; 环境风险值; 环境风险值; 污染贡献率

中图分类号: P69; X508

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)04-0152-10

### Analysis of Heavy Metal Environmental Risk Level and Contribution Rate of Tailings Storerooms of A Molybdenum Mine

JIA Xiaodan<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>, XU Youning<sup>1,\*</sup>

(1. Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Hydrogeology Engineering Geology and Environment Geology Survey Center, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** To investigate the water pollution effects of a molybdenum mine's concentrated mining area in southern Shaanxi Province with a 20-year mining history on the surrounding environment, this study collected water quantity and quality test data for 25 tailings pond acid drainage outlets, including the contents of nine heavy metal elements such as mercury, cadmium, arsenic, lead, copper, zinc, manganese, iron, and molybdenum, to evaluate the compound pollution caused by multiple sources and multiple heavy metals. Using the single pollution index and comprehensive index method, this study compared and analyzed the results with the "Comprehensive Wastewater Discharge Standard (GB 8978-1996)" and the "Surface Water Environmental Quality

收稿日期: 2022-08-26; 修回日期: 2023-04-23; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质调查局项目“安康蒿坪河流域石煤矿区生态修复支撑调查与监测”(DD20230457), 陕西省重点研发计划“秦巴山区金属矿产开发引发生态环境污染综合治理关键技术与示范”(2023-ZDLSF-63)联合资助。

作者简介: 贾晓丹(1979-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事环境资源评价与研究。E-mail: jxiaodan@mail.cgs.gov.cn。

\* 通讯作者: 徐友宁(1963-), 男, 博士, 研究员, 主要从事矿山环境地质调查与研究。E-mail: ksdzhj@sohu.com。

Standard (GB 3838-2002)", and calculated the single heavy metal element pollution load based on the amount of discharged water. Furthermore, on the basis of the equal-weight index method, this study used the environmental quality standards as a benchmark and, according to the principle of "the importance of the standard value determines its importance," introduced a three-scale indirect matrix to calculate the relative weights of the nine elements, including Fe, and their pollution loads to determine the environmental risk value of a tailings pond. Finally, this study determined the pollution contribution rate of the 25 tailings ponds to the receiving water body, and provided suggestions for the prioritization of tailings pond pollution source control in the next step, based on the pollution load and environmental risk value, to provide a reference for the formulation of relevant follow-up treatment plans.

**Keywords:** tailings; effluent wastewater; molybdenum mine; heavy metal element; environmental risk; pollute-contribution rate

矿山资源开采是维护国家能源资源安全、保障国民经济有序发展的基础产业,但部分矿山开采会带来水土流失、环境污染、生态系统受损、生物多样性下降等问题(徐友宁等, 2008, 2022; 刘紫薇等, 2023)。陕西南部地质矿产较为丰富,矿脉内的矿物成分异常复杂,硫铁矿、磁铁矿和辉钼矿等矿种的开采历史悠久,废水和尾矿的排放已经引发矿区及周边地区重金属污染的问题(柯洪等, 2003)。随着国内经济水平的快速提升,对于矿产资源的需求越来越大,钼矿石在化工、冶金行业中应用广泛,但是钼矿开采以及其后尾矿堆积过程中,浸矿剂和矿体、岩体中的重金属元素进入水循环系统,对矿区周边水环境产生一定危害(张江华等, 2018; 韩张雄, 2020; 李峰等, 2022; 冯博鑫等, 2023),而重金属元素在水体中具有隐蔽性、易富集性和难降解性等特点(陈仁祥等, 2022)。更重要的是, Pb、As、Cd 等重金属在环境中累积到一定浓度后会对人体产生严重的危害, Pb 是毒性较大的一种重金属,会直接伤害人脑细胞,造成先天大脑沟回浅,进而对智力产生影响; As 可以损伤多种器官组织,诱发癌症; Cd 会诱发心脑血管疾病(康家琦, 2004; 韩磊等, 2009)。因此,开展钼矿集中区外排水中重金属元素污染研究,圈定关键污染元素,判定污染源对受纳水体污染的贡献程度,进而开展靶向治理,对尽快恢复河流及矿区生态功能具有重要意义(张章等, 2016; 王梓博等, 2020)。

该钼矿集中区因矿产地质特征富集硫铁矿,其主要成分为  $\text{FeS}_2$  (黄铁矿、白铁矿) 和  $\text{FeS}$  (磁黄铁矿),同时含有大量 Mn 等金属元素。由于  $\text{FeS}_2$  在空气、水中氧化下生成硫酸等酸性物质,导致产生酸性废水(徐友宁等, 2023),同时,酸性水冲刷淋溶又将大量  $\text{Fe}^{3+}$

带出,使外排水呈现黄褐色(崔雅红等, 2021)。为了预防和减轻酸性废水对环境和人类健康造成的危害,必须对其排放和扩散进行全面的生态环境风险评估,并且采取可行、科学的控制措施。笔者收集该钼矿集中区 25 个尾矿库外排水中含 Fe、Mn 和 Mo 元素在内的 9 种重金属元素水质测试数据,同步获取相应外排水水量,从而开展多污染源多种重金属复合污染评价,旨在为制定高效的污染治理方案提供科学依据。

## 1 研究区地质背景

研究区地处秦岭腹地,是中国大陆钼矿资源储量和产量最大的地区之一。该地区主要分布在黄龙河上游,矿产资源呈现出高品位、大规模、高品质等特点,以辉钼矿为主,其次为黄铜矿、黝铜矿等。该区域的地质构造复杂,主要由花岗岩、片麻岩、变质岩等组成,形成了复杂的褶皱和断裂构造,地质条件良好,钼矿品位较高,为矿产资源的形成和富集提供了有利条件。由于地处秦岭腹地,气候属于温带半湿润气候,四季分明,年平均气温约为  $12\text{ }^\circ\text{C}$ 。该区域的降水量充沛,年平均降水量约为 800 mm,大部分降水集中在夏季。

该钼矿集中区尾矿库一般设置在较小支沟内,整体属中低山地貌(图 1)。沟谷较为狭窄,形态多呈“V”字形,两侧坡度一般为  $40^\circ\sim 45^\circ$ ,切割深度一般为 120~150 m。根据野外水文地质调查,尾矿库所在流域,地层一般为中元古界二道河、陈家洞、龙家园、北关组、冯家湾组,岩性为石英砂岩、白云质砂岩、白云岩等,岩石表层风化较为强烈,节理裂隙较为发育,一般发育厚度为 10~20 m。其下岩体比较完整,节理

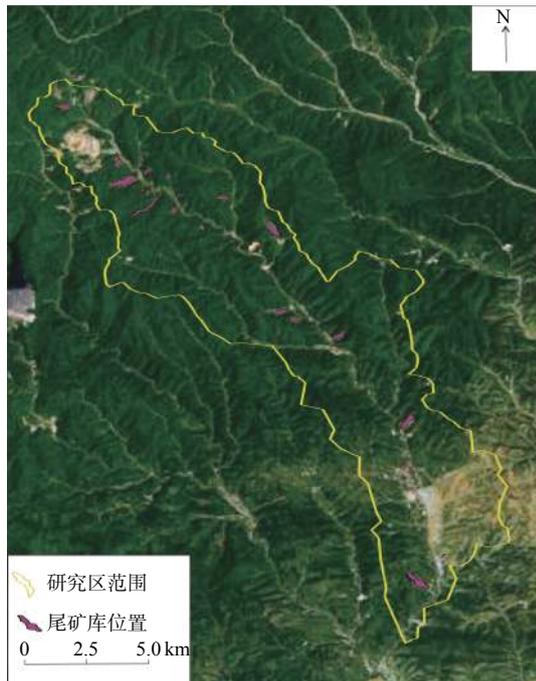


图1 研究区范围及尾矿库分布图

Fig. 1 Map of study area and tailings distribution

裂隙发育少。在较缓的斜坡及坡脚有坡残积堆积,岩性为坡残积碎石土,分选性磨圆度差,比较松散,孔隙发育。在河谷沟道的底部一般堆积冲洪积块石土,块石最大粒径为1.5 m,岩性成分为石英砂岩、砂质白云岩、白云岩。块石占比为40%,砂砾占比为50%,其他为10%。分选性、磨圆度差。尾矿库一般设置在流域面积较小的沟谷中,该沟谷成为独立的水文地质单元,坝体设置在近沟口位置,此处也是地下水的最低侵蚀基准面,上部受分水岭的限制,地下水岩组与周围沟谷无联系,沟口为该流域地下水的唯一出口。在坝底部设置排水沟,设置截渗坝,通过收集池及废水管网

引流,基本可以抑制尾矿库排水的污染扩散。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与测试

野外样品是由陕西省水工环地质调查中心于2021年10月至2021年12月完成采集,采集尾矿库外排水口水口监测点25处,采集水样43件;陕西正为环境检测股份有限公司于2021年11月~2022年4月样品分析测试,以X射线荧光光谱法(XRF)、原子荧光光谱法(AFS)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS/AES)为主的测试方法,测定了Hg、Cd、As、Pb、Cu、Zn、Mn、Fe、Mo等9种重金属含量。工作方法符合相关技术规定和设计要求。

### 2.2 评价标准

矿山废水排放首先应符合《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)要求,按照所在区域功能,执行一级排放标准限值,但其未包含Fe和Mo元素排放标准。根据《尾矿设施设计规范》(GB 50863-2013)等相关规定,文中Fe排污标准参考《钢铁工业水污染物排放标准》(GB 13456-2012)质量浓度限值执行。中国现行污水排放标准中尚无对Mo的控制指标,故选择参照地方标准《辽宁省污水综合排放标准》(DB 21/1627~2008)直接排放废水中Mo的质量浓度限值。

经尾矿库外排水进入接纳水体,需要判断水质是否满足环境质量标准。按照所在区域功能,采用《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)Ⅲ类标准。Fe、Mn和Mo参考该标准中集中式生活饮用水项目标准。本项目执行标准及质量浓度限值见表1。

表1 评价标准及质量浓度限值统计表

Tab. 1 The limit value of standard

标准及限值	项 目									
	pH	Hg	Cd	As	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Mo
污水综合排放标准(GB 8978-1996)一级	6~9	50	0.1	500	1.0	0.5	2	2	10*	1.5**
地表水质量标准(GB 3838-2002)Ⅲ类	6~9	0.1	0.005	50	0.05	1	1	0.1	0.3	0.07

注:\*.《钢铁工业水污染物排放标准》(GB 13456-2012);\*\*.《辽宁省污水综合排放标准》(DB 21/1627-2008); Hg、As含量为 $\mu\text{g/L}$ ,其余元素含量为 $\text{mg/L}$ 。

### 2.3 评价方法

#### 2.3.1 单项污染物超标倍数

单项污染物超标倍数是指将污染物的实测浓度

和污染物标准浓度的差值与标准浓度进行比值分析,从而确定超标程度的方法,最终得到一个无量纲的比。具体公式如下:

$$I_i = \frac{C_i - S_i}{S_i} \quad (1)$$

式中:  $I_i$  为某个尾矿库排水中重金属  $i$  的超标倍数,  $C_i$  为某个尾矿库排水中重金属  $i$  的实测含量,  $S_i$  为重金属  $i$  的评价标准,  $I_i > 0$  判定为超标。

### 2.3.2 单因子污染指数法

单因子污染指数法是指将污染物的实测浓度与污染物的评价标准浓度进行比值分析, 以确定污染状态的方法(王志垚等, 2016; 郑琨等, 2018)。具体来说, 它是将某种研究因子的实际测试或监测数据与评价指标的标准数值进行对比, 得到一个无量纲的比值, 然后根据这个比值大小对地表水体的污染程度进行分级评价。采用的标准值参照《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)及《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)。具体公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

式中:  $P_i$  为某个尾矿库排水中第  $i$  类重金属的单因子污染指数,  $C_i$  为某个尾矿库排水中第  $i$  类重金属的实测含量,  $S_i$  为第  $i$  类重金属的评价标准。单因子污染指数分级标准见表 2。

表 2 重金属单因子污染指数及综合指数分级标准表

Tab. 2 Classification standard of single factor pollution index and nemerow index of heavy metals

等级	单因子指数 ( $P_i$ )	评价等级	综合指数 ( $P_{综}$ )	评价等级
1	$P_i \leq 1.0$	无污染	$P_{综} \leq 0.7$	安全
2	$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻微污染	$0.7 < P_{综} \leq 1.0$	警戒值
3	$2.0 < P_i \leq 3.0$	轻度污染	$1.0 < P_{综} \leq 2.0$	轻度污染
4	$3.0 < P_i \leq 4.0$	中度污染	$2.0 < P_{综} \leq 3.0$	中度污染
5	$P_i > 5.0$	重度污染	$P_{综} > 3.0$	重污染

### 2.3.3 重金属综合污染指数法

在各单项污染指数评价结果的基础上采用内梅罗(Nemerow)综合指数法评价 25 个尾矿库重金属综合污染情况(李静等, 2023)。具体公式如下:

$$P_{综} = \sqrt{\frac{(P_{imax})^2 + (\bar{P}_i)^2}{2}} \quad (3)$$

式中:  $P_{综}$  为 25 个尾矿库第  $i$  种重金属污染综合评价指数即内梅罗指数,  $P_{imax}$  为 25 个尾矿库第  $i$  种重金属单因子污染指数最大值,  $\bar{P}_i$  为 25 个尾矿库第  $i$  种重金属元素单因子污染指数平均值。综合污染指数分级标准见表 2。

## 2.4 尾矿库外排水污染负荷

### 2.4.1 单项重金属污染负荷

污染负荷计算公式为:

$$G_i = Q_n C_i \quad (4)$$

式中:  $G_i$  为第  $n$  个尾矿库外排水中第  $i$  种重金属的绝对排放量, 单位为 mg/s;  $Q_n$  为第  $n$  个尾矿库外排水量, 单位为  $m^3/d$ ;  $C_i$  为第  $i$  种重金属实测浓度, 单位为 mg/L。

### 2.4.2 尾矿库污染负荷排序

因多年采矿干扰, 结合各元素地球化学背景影响, 该区表现出多污染源多种重金属复合污染的特点, 如何判断 25 个尾矿库对地表水体的污染贡献程度是本研究的一个难点。仅用单因子污染指数法和内梅罗综合指数法等权评价方法分析, 未考虑每种重金属元素对环境影响程度不同, 存在一定的片面性。徐友宁等(2010)按照标准含量限值小的污染物比限值大的污染物在综合评价中的地位重要, 即权值大, 而含量限值相同的污染物具有相同的权值的原则赋予地表水中 8 种污染元素权值, 一致性检验较为满意。因此, 文中选用该方法, 利用更适合多因素指标的三标度判断矩阵, 以《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III 类水中污染物含量标准为基础, 通过比较两基点相对重要的程度, 采用公式将各元素排序指数变换为反应各元素相对重要性的程度值, 再将指标标值经归一化后所得值作为每种重金属元素相应权值。需要说明的是, 为保证该区 9 种重金属元素评价的完整性, 且 Mn、Fe 和 Mo 为该区域特征污染物, 对这 3 种元素执行标准中集中式生活饮用水地表水源地补充项目和特定项目标准限值, 一并进行权值计算。

按照该方法, 判断两两重要性(表 3), 两基点相对重要程度介于“非常重要( $b_m=7$ )”和“明显重要( $b_m=5$ )”之间, 推荐  $b_m$  值=6。通过公式(4)将各元素排序指数变换为反应各元素相对重要性程度值, 用  $b_{ij}$  表示, 给出矩阵, 经过 2 次正规化和 1 次加和处理的三标度法, 计算出各元素权重  $W_i$ (图 2)。

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r}{r_{\max} - r_{\min}}(b_m - 1) + 1, & r_i - r_j \geq 0 \\ \left[ \frac{r_i - r}{r_{\max} - r_{\min}}(b_m - 1) + 1 \right]^{-1}, & \\ r_i - r_j < 0 \quad (i, j = 1, 2 \dots n) \end{cases} \quad (5)$$

对所得权重值进行一致性检验, 本项目矩阵阶数为 9, 按照平均随机一致性指标  $R_i$  在 9 阶为 1.45, 则判

表3 地表水综合评价污染物两两判断比较表

Tab. 3 Comparison of contamination assessment on the surface water

	Hg	Cd	As	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Mo	排序指数 $r_i$
地表水环境质量标准 Ⅲ类水标准	0.000 1	0.005	0.05	0.05	1	1	0.1	0.3	0.07	
Hg	1	2	2	2	2	2	2	2	2	17
Cd	0	1	2	2	2	2	2	2	2	15
As	0	0	1	1	2	2	2	2	2	12
Pb	0	0	1	1	2	2	2	2	2	12
Cu	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2
Zn	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2
Mn	0	0	0	0	2	2	1	2	0	7
Fe	0	0	0	0	2	2	0	1	0	5
Mo	0	0	0	0	2	2	2	2	1	9

注：Hg、As含量为 $\mu\text{g/L}$ ，其余元素含量为 $\text{mg/L}$ 。

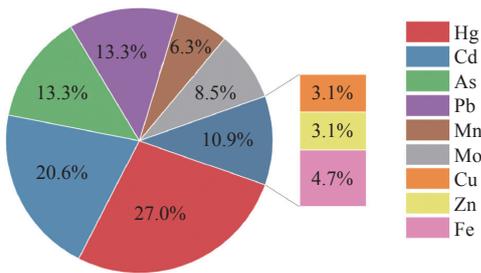


图2 9种重金属元素权值图

Fig. 2 The weight values of heavy metals

断矩阵的一致性指标  $C_i$  (公式5) 与同阶平均随机一致性  $R_i$  比值, 记为  $CR=0.053 < 0.10$ , 说明判断矩阵一致性符合满意度要求, 赋予权值在合理范围内。

$$C_i = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (6)$$

式中:  $\lambda_{\max}$  为矩阵最大特征根,  $n$  为元素个数,  $n=9$ 。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 根据《污水综合排放标准》判定尾矿库排水重金属污染特征

根据生态环境部门管理要求, 该区域钼矿尾矿库作为污染源之一, 按照接纳水体使用功能, 其排水水质首先应达到《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)。超标倍数最大为12号小沟尾矿库Fe元素, 达到120.74倍。按照25个尾矿库外排水中多源重金属超标情况综合分析, 有6个尾矿库的10种重金属均未超

标, 5个尾矿库1种重金属超标, 6个尾矿库2种重金属超标, 6个尾矿库有3种重金属超标, 同时超标重金属分别达到4种和5种的各有1个。

参照《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)中一级标准, 以单因子污染指数来看(图3), 该区域Hg、As、Pb全部达到排放标准, 无污染; Cd仅一个尾矿库出现重度污染, 其余24个点位为无污染, 污染率4%; Cu有23个尾矿库为无污染, 其余尾矿库分别为轻微污染和轻度污染, 污染率为8%; Zn有18个尾矿库为无污染, 其余为轻微污染至重度污染, 污染率为28%; Mn污染情况较为普遍, 仅6个尾矿库为无污染, 污染率为76%, 最高污染指数为65.75; Fe有11个尾矿库为无污染, 其余含轻微污染至重度污染, 污染率为56%; Mo有23个尾矿库为无污染, 其余尾矿库分别为轻微污染和轻度污染, 污染率为8%; 以上9种重金属按照污染率由高到低排序依次为  $Mn > Fe > Zn > Mo = Cu > Cd > Pb = As = Hg$ 。前人研究显示, 洛南某钼矿开采区域地表水中Pb、As、Cd和Mo浓度均较低, 监测点位没有超标现象(张章等, 2016)。单因子污染指数平均值显示, Hg、Cd、As、Pb、Cu和Mo等6种重金属元素单项污染指数平均值均小于1, 属于无污染; Zn、Mn和Fe3种元素平均值均大于2, 其中, Zn属于轻度污染, Fe和Mn表现为重度污染。广西某铅锌矿区, 地表水中主要是Cd、Pb超标, 重金属污染相当严重(肖筱瑜等, 2021)。根据各重金属元素单项污染指数, 计算25个尾矿库重金属综合污染指数, 即内梅罗指

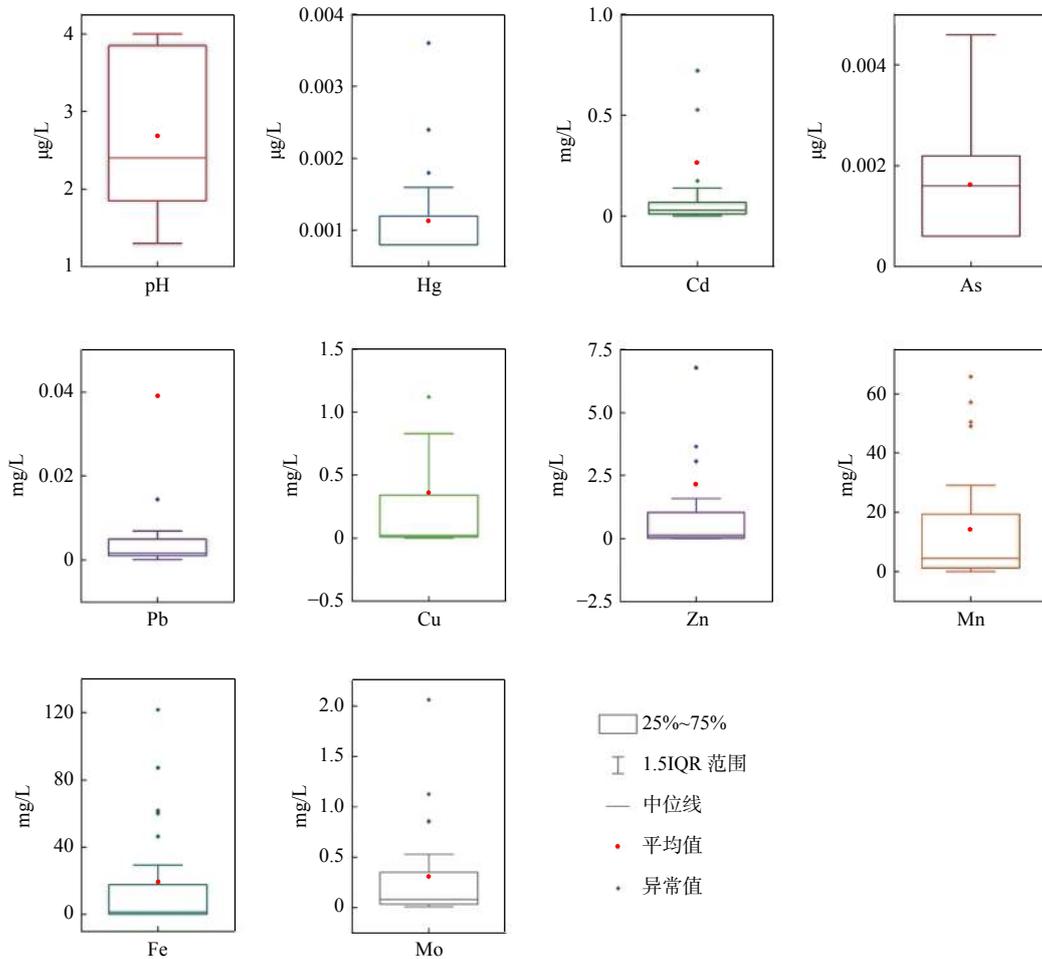


图 3 25 个尾矿库单因子污染指数图(参照《污水综合排放标准(GB 8978-1996)》)

Fig. 3 Single factor pollution indexes in 25 tailings ponds (refer to “Integrated wastewater discharge standard GB 8978-1996”)

数,按照分级评价标准(表 2),Hg、As、Pb 3 种元素表现安全,Mo 为轻度污染,其余重金属元素综合污染指数均为重污染级别(图 4)。综上所述,文中区域以 Fe、Mn 为主要特征污染物。

### 3.2 根据《地表水环境质量标准》判定尾矿库排水重金属污染特征

将 25 个尾矿库排水水质与《地表水环境质量标准》(GB 3 838-2002)Ⅲ类水质进行对比分析,除 As 达标外,其他重金属均有不同程度的超标。超标率最高为 Mn、Fe、Mo,超标率分别为 92%、76%、68%;其次为 Zn、Cd、Pb、Hg 和 Cu,超标率为 40%、32%、16%、8% 和 4%。超标最大仍为 12 号小沟尾矿库 Fe 元素,超标倍数高达 4 057 倍。

为分析该区尾矿库外排水重金属元素对环境的污染情况,选取《地表水质量标准》Ⅲ类标准值为  $S_i$  进行单因子污染指数计算(图 5),结果表明,该区域仅 As 无污染,其余重金属均表现出不同程度的污染。按

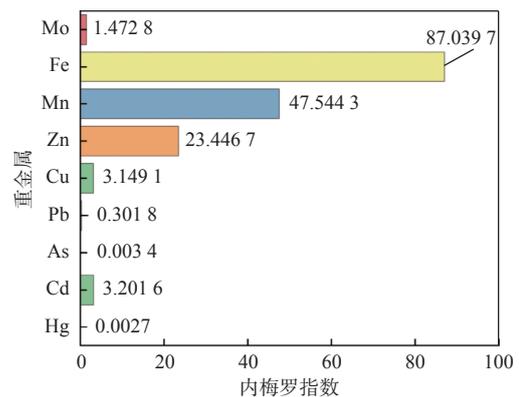


图 4 25 个尾矿库重金属元素内梅罗指数图(参照《污水综合排放标准(GB 8978-1996)》)

Fig. 4 Nemerow indexes of heavy metals in 25 tailings ponds (refer to “Integrated wastewater discharge standard GB 8978-1996”)

照污染率由高到低 9 种重金属排序依次为 Mn>Fe>Mo>Zn>Cd>Pb>Hg>Cu>As, Mn 元素仅有 2 个

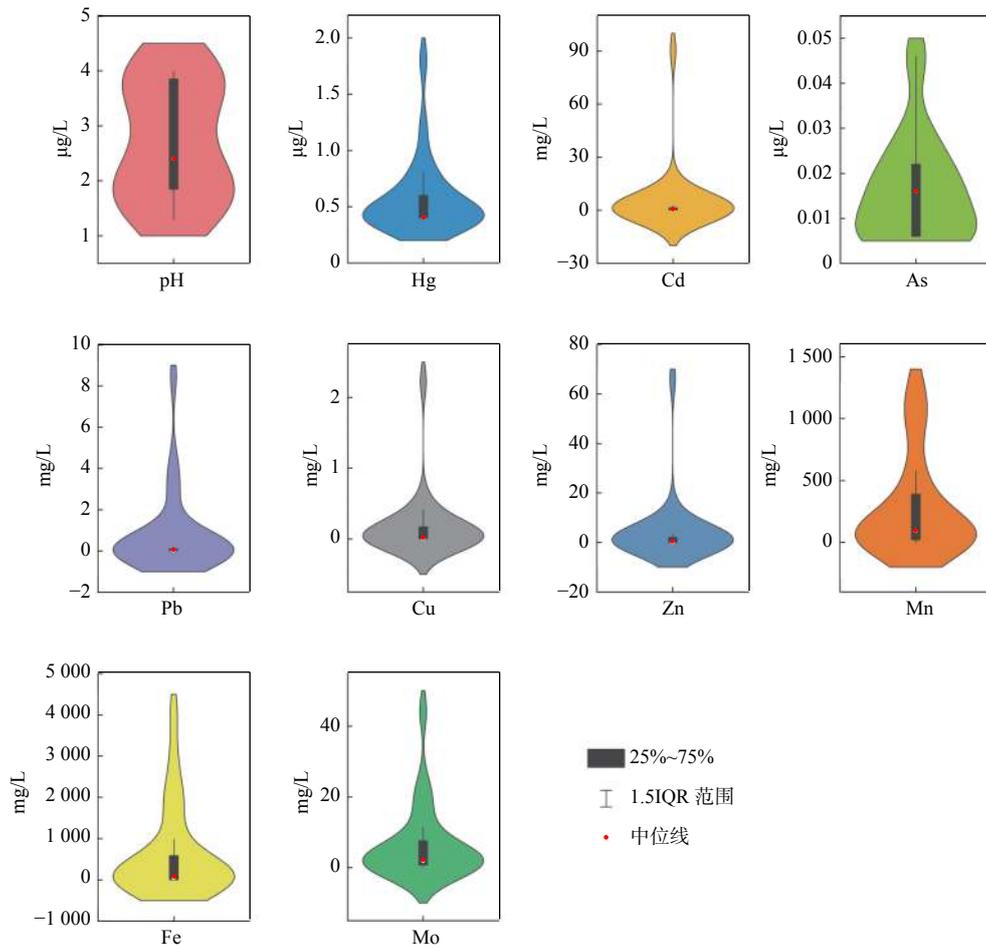


图5 25个尾矿库单因子污染指数图(参照《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》)

Fig. 5 Single factor pollution indexes in 25 tailings ponds (refer to “Environmental quality standards for surface water GB 3838-2002” )

尾矿库为无污染, 污染率 92%, 且均超过重度污染标准。由综合污染指数评价, 仅 As 元素属于安全等级, Hg 和 Cu 为轻度污染, 其余重金属元素综合污染指数均为重污染级别(图 6)。

### 3.3 污染负荷排序情况

重金属污染评价较为常见的方法有单因子法、内梅罗指数法、污染负荷指数法和生态风险指数法等, 其中单因子法和生态风险指数法无法对污染因子进行综合考虑。由从前文评价结果可以看出, 综合污染指数与单因子污染指数评价结果有较大差异, 究其原因, 内梅罗指数难以凸显单因子的质变过程, 最大值所占比重较大, 未考虑异常值影响, 一旦出现离散高值, 综合污染指数计算偏大, 判定污染程度偏高。因此, 根据 25 个尾矿库外排水量, 计算单项重金属污染负荷并多源综合考虑尾矿库对受纳水体的污染贡献, 是开展下一步治理工作的基础。

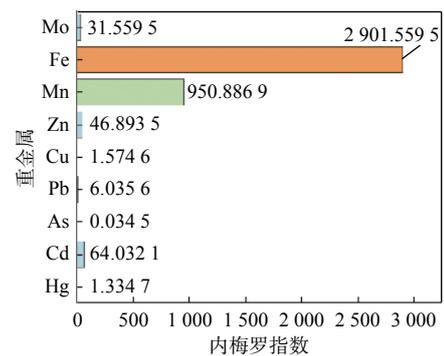


图6 25个尾矿库重金属元素内梅罗指数图(参照《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》)

Fig. 6 Nemerow indexes of heavy metals in 25 tailings ponds (refer to “Environmental quality standards for surface water GB 3838-2002” )

分析 25 个尾矿库 9 个元素污染负荷情况(图 7), 对于 Hg 来说, 3 号尾矿库污染负荷最大; 对于 Cd 来说, 9 号尾矿库污染负荷最大; 对于 As 来说, 4 号和 9

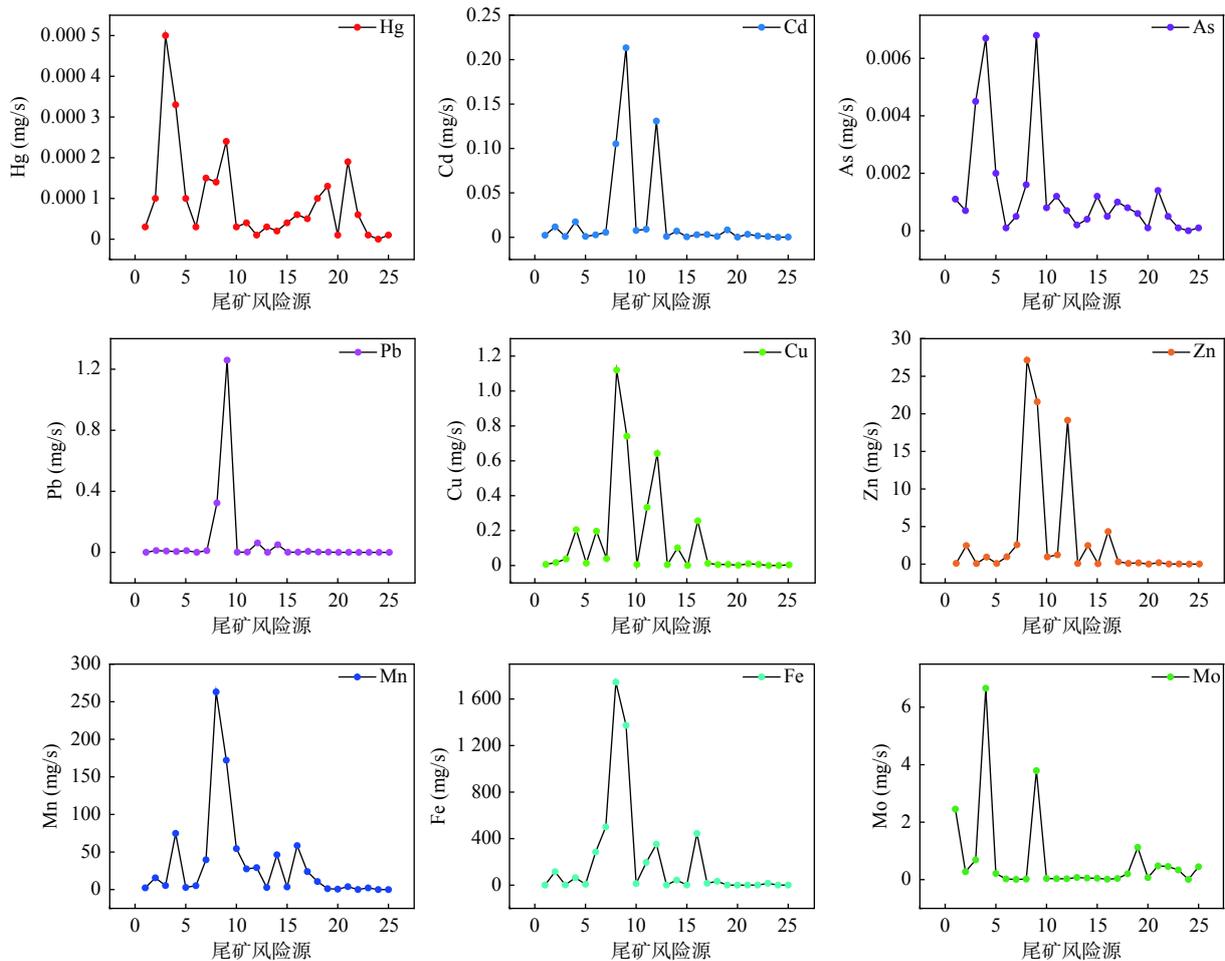


图7 25个尾矿库重金属污染负荷图

Fig. 7 Heavy metal pollution loads of 25 tailings ponds

号尾矿库污染负荷较大;对于Pb来说,9号尾矿库污染负荷最大,其余尾矿库污染负荷相对较小;对于Cu来说,8号和9号尾矿库污染负荷较大;对于Zn来说,8号、9号和12号尾矿库污染负荷较大;对于Mn来说,8号尾矿库污染负荷最大;对于Fe来说,8号和9号尾矿库污染负荷较大;对于Mo来说,4号尾矿库污染负荷最大。综合来看,9号尾矿库污染物负荷较高。该区域Fe元素污染负荷指数最大,占总污染负荷的84.5%;其次为Mn,达到13.73%,此两者污染负荷占到总负荷的98%(图8)。Fe元素单因子污染指数、综合污染指数按照外排水及地表水质量标准都达到重度污染级别,这是因为尾矿中的硫化矿物一般以黄铁矿居多,矿山尾矿金属硫化物氧化释放出铁( $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ )离子、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{H}^+$ 及重金属离子(舒小华, 2014; 叶翰, 2021),这也是黄龙河流域酸水形成的主要原因,而 $\text{Fe}^{3+}$ 离子是导致“磺水”现象的主要原因,但客观来说,其本身对环境以及周边人群健康产生的影响并不

大(张瑞雪等, 2021)。从地质角度来看,本区大量发育的富含硫化物的长石英脉及长石石英方解石脉,由于这些脉岩性脆易碎,脉岩内富含金属硫化物,在开采过程中形成的氧化环境下易风化形成酸水,在淋溶作用下造成金属离子的迁移。同时,Cu、Zn、Cd、Hg、As、Se、Fe等元素均为亲硫元素,与硫亲和力强。所以在含量较高的断面处,这些金属指标常相互伴随。金属指标从上游小王河沟排渣场到下游明显有递减的趋势。值得注意的是,地表水超标断面几乎都集中在黄龙河干流中,而支流断面中超标现象较少,说明干流断面中超标现象较明显可能为黄龙河两岸的矿山开采及采选企业排放的金属离子在干流中汇集富集导致。综合来看,造成黄龙河流域金属元素指标超标的原因主要是因为高地质背景与历史遗留的不规范的工业固体废物堆积叠加而成。

### 3.4 污染源贡献率排序

按照25个尾矿库作为污染源向一条地表水体外

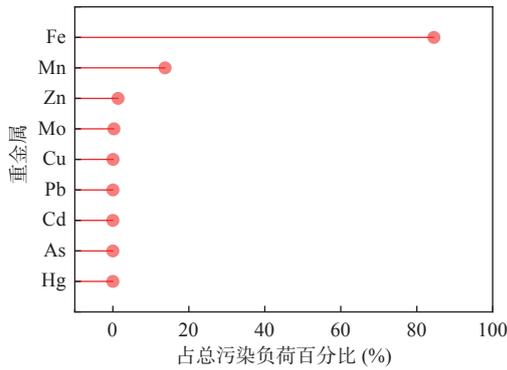


图8 每种污染物负荷所占百分比图

Fig. 8 Percentage of each pollutant load

排水,则污染贡献率可由每个污染源的环境风险值对总环境风险值所占的百分比表示(图9)。环境风险值根据各单项元素污染负荷,使用计算得出的权重值,给出每个污染源即单个尾矿库的环境风险值(吴梅等,2023)即污染程度,继而排序给出亟待优先治理污染源的推荐结果。以污染负荷(污染贡献率)为风险排序依据,7号、8号和9号尾矿库污染情况较为严重,亟需治理,而20号、24号和25号尾矿库污染情况较轻,可在治理完成其他尾矿库后再治理。

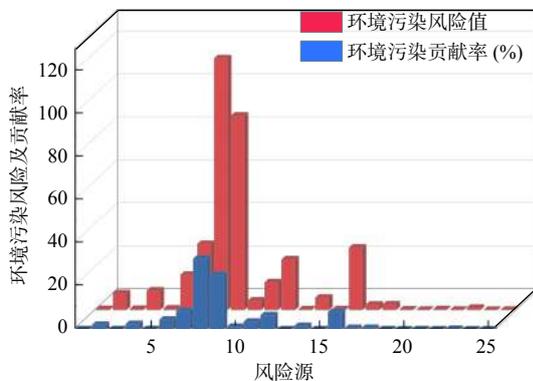


图9 环境污染风险值及环境污染贡献率图

Fig. 9 Risk value and contribution rate of environmental pollution

## 4 结论

(1)根据《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)判定尾矿库排水重金属污染特征,该钼矿集中区尾矿库外排水Cd、Fe、Mn、Zn和Cu 5种重金属污染严重,Mo处于轻度污染等级,而Hg、As和Pb处于安全等级。

(2)根据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)判定尾矿库排水重金属污染特征,该钼矿集中区尾矿

库外排水Cd、Fe、Mn、Zn和Mo 5种金属处于重污染级别,Hg和Cu处于轻度污染等级,仅As元素处于安全等级。

(3)计算单项重金属污染负荷并多源综合考虑尾矿库对受纳水体的污染贡献,Fe和Mn元素对总污染负荷贡献率较高,7号、8号和9号尾矿库污染情况较为严重,亟需治理,而20号、24号和25号尾矿库污染情况较轻。

## 参考文献(References):

- 陈仁祥,张博,宋勇,等. 赣州稀土矿区周边地表水污染分布特征及健康风险评价[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022, (12): 124-133.
- CHEN Renxiang, ZHANG Bo, SONG Yong, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of surface water pollution around Ganzhou rare earth mining area[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2022, (12): 124-133.
- 崔雅红,崔炜,孟庆俊,等. 陕西蒿坪石煤矿区重金属污染及生态风险评价[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(2): 157-162.
- CUI YaHong, CUI Wei, MENG QingJun, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment in Haoping stone coal Mine area of Shaanxi province[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(2): 157-162.
- 冯博鑫,徐多勋,张宏宇,等. 基于最小数据集的周至地区土壤重金属地球化学特征及成因分析[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 284-292.
- FENG Boxin, XU Duoxun, ZHANG Hongyu, et al. Geochemical Characteristic of Heavy Metal in Zhouzhi Area and Analysis of Their Causes Based on Minimum Data Set[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 284-292.
- 韩磊,张恒东. 铅、镉的毒性及其危害[J]. 职业卫生与病伤, 2009, 24(3): 173-177.
- HAN Lei, ZHANG Hengdong. Toxicity and harm of lead and cadmium[J]. Journal of Occupation Health and Damage, 2009, 24(3): 173-177.
- 韩张雄. 钼矿区污染特征及伴生Pb、Cd的稳定化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- HAN Zhangxiong. Study on the pollution characteristics and the immobilization of associated Pb, Cd in molybdenum mine [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.
- 柯洪,王瑞廷. 陕西南部地区铂族金属(PGE)矿床找矿方向[J]. 矿产与地质, 2003, 17(S1): 400-402.
- KE Hong, WANG Ruiting. Prospecting direction of platinum group elements ore deposit in south shangxi province, China[J]. Mineral Resources and Geology, 2003, 17(S1): 400-402.
- 康家琦. 砷对健康危害的研究进展[J]. 卫生研究, 2004, 33(3): 372-376.
- KANG Jiaqi. Study progress of adverse effects of arsenic on

- health[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2004, 33(3): 372–376.
- 李峰, 王素芳. 豫西某钼矿尾矿库地下水污染及健康风险评估[J]. *环境科技*, 2022, 35(06): 41–44+50.
- LI Feng, WANG Sufang. Assessment of Groundwater Pollution and Health Risks in Molybdenum Mine Tailings Pond in Western Henan Province[J]. *Environmental Science and Technology*, 2022, 35(06): 41–44+50.
- 李静, 王晨晨, 邱春生, 等. 城市污水厂二级出水补给湖泊的水质评价[J]. *天津城建大学学报*, 2023, 29: 31–35.
- LI Jing, WANG Chenchen, QIU Chunsheng, et al. Water Quality Evaluation of Receiving Lake Recharged by Secondary Effluent of Wastewater Yreatment Plant[J]. *Journal of Tianjin Chengjian University*, 2023, 29: 31–35.
- 刘紫薇, 范书凯, 张萌. 典型铅锌矿山周边土壤和地下水环境风险分析[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2023, (1): 88–91.
- LIU Ziwei, FAN Shukai, ZHANG Meng. Environmental risk analysis of soils and ground water in a typical Pb–Zn mine[J]. *Non-ferrous Metals (Mining Section)*, 2023, (1): 88–91.
- 舒小华. 金属硫化物矿山尾矿钝化及机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- SHU Xiaohua. Study on passivation of metal–sulfide tailing by surface tailings by surface coating and passivation mechanism[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- 王志垚, 张克峰, 刘雷. 地下水污染评价中单因子指数法的优化[J]. *环境工程*, 2016, 34(S1): 810–812+816.
- WANG Zhikai, ZHANG Kefeng, LIU Lei. Optimization of single factor index method in groundwater pollution evaluation[J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(S1): 810–812+816.
- 王梓博, 卢文喜, 王涵, 等. 某钼矿尾矿库地下水污染的随机模拟[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(5): 2124–2131.
- WANG Zibo, LU Wenxi, WANG Han, et al. Stochastic simulation of the groundwater pollution in the molybdenum mine tailings pond[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(5): 2124–2131.
- 吴梅, 刘属灵, 袁余洋, 等. 土壤重金属潜在生态风险指数法优化研究——以重庆市城口县为例[J]. *土壤通报*, 2023, 54(02): 473–480.
- WU Mei, LIU Shuling, YUAN Yuyang, et al. Optimization of Potential Ecological Risk Index Method for Soil Heavy Metals: A Case Study of Chengkou County, Chongqing City[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(02): 473–480.
- 徐友宁. 矿山地质环境调查研究现状及展望[J]. *地质通报*, 2008, 27(8): 1235–1244.
- XU Youning. Investigation and research on the mine geological environment: present status and outlook[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(8): 1235–1244.
- 徐友宁, 陈华清, 柯海玲, 等. 嵩坪河流域石煤矿区河流铝的白色污染及其成因分析[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 128–140.
- XU Youning, CHEN Huaqing, KE Hailing, et al. Analysis of White Pollution of River Aluminum in Stone Coal Mining Area in Haoping River Basin and Its Causes[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 128–140.
- 徐友宁, 徐冬寅, 张江华等. 地表水污染综合评价时污染物权值确定方法[J]. *西安科技大学学报*, 2010, 30(03): 280–285.
- XU Youning, XU Dongyin, ZHANG Jianghua, et al. Determination of contamination weights in comprehensive assessment of surface water[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2010, 30(03): 280–285.
- 徐友宁, 张江华, 何芳, 等. 西北地区矿山地质环境调查与防治研究[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 129–139.
- XU Youning, ZHANG Jianghua, HE Fang, et al. Investigation and Preventive Research of Mine Geological Environment in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 129–139.
- 肖筱瑜, 梁文寿, 唐名富, 等. 广西某铅锌矿区水环境质量演变分析[J]. *矿产与地质*, 2021, 35(4): 775–780.
- XIAO Xiaoyu, LIANG Wenshou, TANG Mingfu, et al. Analysis on evolution of water environment quality in a lead–zinc mining area in Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2021, 35(4): 775–780.
- 叶翰. 金属硫化物矿山尾矿中硫素的分布特征与转化机制[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- YE Han. Distribution and transformation of sulfur in tailings of metal sulfide mine: A case study from Dabaoshan tailings impoundments, South China[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- 张江华, 王葵颖, 徐友宁, 等. 小秦岭太峪水系沉积物重金属污染生态危害评价[J]. *地质通报*, 2018, 37(12): 2224–2232.
- ZHANG Jianghua, WANG Kuiying, XU Youning, et al. Ecological hazard assessment of heavy metal pollution in sediments of Taiyu water system in Xiaolinling[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(12): 2224–2232.
- 张章, 王秋侠, 胡渭平. 洛南某钼矿开采区域地表水 Pb、As、Cd、Mo 污染健康风险评估[J]. *河南科学*, 2016, 34(4): 577–580.
- ZHANG Zhang, WANG Qiuxia, HU Weiping. Health risk assessment of Pb, As, Cd and Mo pollution in surface water of molybdenum mining area in Luonan county[J]. *Henan Science*, 2016, 34(4): 577–580.
- 郑琨, 张蕾, 薛晨亮. 单因子指数法在水质评价中的应用研究[J]. *地下水*, 2018, 40(5): 79–80.
- ZHENG Kun, ZHANG Lei, XUE Chenliang. Application of single factor index method in water quality evaluation[J]. *Ground Water*, 2018, 40(5): 79–80.
- 张瑞雪, 翟全德, 叶慧君, 等. 贵州省区域煤矿排水重金属污染特征及健康风险评估[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(3): 1333–1341.
- ZHANG Ruixue, ZHAI Quande, YE Huijun, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals from coal mine drainage of different regions in Guizhou Province[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(3): 1333–1341.