第 56 卷 第 4 期 2023 年 (总 230 期) 西北地质

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 56 No. 4 2023(Sum230)

DOI: 10.12401/j.nwg.2023107

某地陈家沟河水中重金属元素时空变化 及影响因素研究

龚慧山^{1,2},徐友宁^{1,2,3,*},陈华清^{2,3},柯海玲^{2,3}

(1. 长安大学地球科学与资源学院,陕西西安,710054;2. 中国地质调查局西安地质调查中心,陕西西安,710119;3. 自然资源部陕西典型矿山地质环境野外科学观测研究站,陕西西安,710119)

摘 要:河水重金属污染一直是环境污染防治领域的热点。秦岭某地石煤矿区陈家沟河水中重 金属含量严重超标,但重金属来源不明,为污染治理带来困扰。为了查明陈家沟河水中重金属 来源和时空变化情况,采集了2期河水、废弃石煤矿硐排水、废渣堆淋溶水等地表水样品,采用污 染指数法、主成分分析法和 Pearson 相关性分析方法,研究河水中重金属污染程度、空间分布,并 对河水中重金属来源进行了解析。研究表明,陈家沟源头河水(对照点)重金属含量可以达到地 表水的 I 类标准,中游受废弃石煤矿矿硐排水及废渣堆淋溶水的影响,河水中重金属含量显著升 高,汇入干流前河水中重金属含量是对照点的 3.5~312 倍;河水中 Cd、Cu、Zn、Ni、Mn 等重金属元 素同源,均来源于矿硐排水、废渣淋溶水。河水中重金属含量的空间分布与地质体、污染源分布 以及河水 pH、盐度等因素有关。研究结果可为陈家沟河水重金属污染防治提供科学依据。 关键词:石煤矿;河水重金属污染;时空变化;来源分析;影响因素

中图分类号: P69; X508 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2023)04-0169-16

Temporal and Spatial Variation and Influencing Factors of Heavy Metals in the Water of the Chenjiagou River in a Certain Place

GONG Huishan^{1,2}, XU Youning^{1,2,3, *}, CHEN Huaqing^{2,3}, KE Hailing^{2,3}

 School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
 Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China;
 Shaanxi Typical Mine Geological Environment Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: River water heavy metal pollution has always been a hot spot problem in the field of environmental pollution prevention and control. The heavy metal content in the water of the Chenjiagou river in a stone coal mining area in Qinling exceeded the standard seriously, but the source of heavy metals was unknown, which caused trouble for pollution control. In order to find out the source and temporal and spatial changes of heavy metals in the Chenjiagou river, surface water samples such as Phase II river water, waste stone coal mine drainage and waste residue pile leaching water were collected, and the pollution index method, principal component analysis and Pearson correlation analysis methods were used to study the degree and spatial distribution of

收稿日期: 2023-03-06;修回日期: 2023-06-02;责任编辑: 贾晓丹

基金项目: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),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)联合资助。

作者简介:龚慧山(1998-),女,硕士研究生,从事矿山地质环境防治工作。E-mail:1071268164@qq.com。

^{*} 通讯作者: 徐友宁(1963-)男, 博士, 研究员, 从事矿山地质环境研究工作。E-mail: 948477575@qq.com。

heavy metal pollution in river water, and the sources of heavy metals in river water were analyzed. The results show that the heavy metal content of the river water at the source of Chenjiagou (control point) can reach the Class I standard of surface water, and the heavy metal content in the middle reaches is significantly increased by the drainage of waste stone coal mines and the leaching water of waste residue pile in the middle reach, and the heavy metal content in the river water before entering the main stream is $3.5 \sim 312$ times that of the control point; the heavy metals such as Cd, Cu, Zn, Ni, and Mn in the river water are homologous, all from the mine drainage and waste residue leaching water in the upper reaches of the river. The spatial distribution of heavy metal content in river water is related to geological bodies, pollution source distribution, river pH, salinity and other factors. The research results provide a scientific basis for the prevention and control of heavy metal pollution in Chenjiagou river.

Keywords: stone coal mine; river water is polluted by heavy metals; space-time changes; source analysis; influencing factors

环境重金属污染是全球环境污染防治的重要问 题之一(韩宝华等, 2022; 蒋起保等, 2022; 冯博鑫等, 2023),河水重金属污染对人类健康和生态系统构成 严重威胁(卢秋等, 2016; Xiao, 2019; 曹佰迪等, 2022)。 国内外有关河水重金属污染的研究成果丰富。孟春 芳等(2019)采用了主成分和对应分析相结合的方法 对卫河水系新乡段水质进行分析,表明区域主要污染 源为点源污染,典型污染指标为耗氧有机物、有毒有 机污染物。王宇等(2022)研究了铜陵某矿区流域河 水、底泥、土壤重金属含量的空间分布特征,相关性 分析方法和主成分分析法均表明流域重金属来源于 矿区。许飞亚等(2022)对浉柳河水中Cr、Mn、Fe、Cu、 Zn、As、Cd、Hg、Pb等重金属浓度按照春、夏、秋和 冬4个季节的监测,河水中重金属浓度随季节变化顺 序为冬季>春季>秋季>夏季。舒旺等(2019)运用 了多元统计分析方法对鄱阳湖流域乐安河水影响因 素进行分析,乐安河上游水化学离子主要受岩石风化 控制,中、下游受人类活动控制。刘瑞平等(2012)研 究小秦岭金矿带枣香河河水和底泥中重金属时空变 化,研究表明河水污染成因为山区采矿活动、山外傍 河选冶作业、河水的稀释及混合作用、底泥的吸附作 用、生物化学的降解作用等,影响因素主要为污染物 总量及其降解速率、水系沉积物颗粒粒径、地形地貌等。

秦巴山地的汉江是南水北调中线工程的重要水 源涵养区,研究区陈家沟地处汉江水源涵养区范围内, 汇水地区广泛分布黑色岩系,历史上石煤矿开发遗留 废渣堆和矿硐,陈家沟河水酸化及重金属污染严重。 但河水中重金属来源与黑色泥页岩、煤系地层的天然 风化有关,还是受石煤矿开采影响,或两者兼而有之 未有定论,重金属来源不明为后续河水污染的精准治 理带来了困扰。石煤是一种高灰分、低热值、含碳少的腐泥无烟煤。研究区石煤形成于寒武纪、奥陶纪及志留纪,由菌藻类等生物遗体在浅海、泻湖、海湾条件下经腐泥化作用和煤化作用转变而成(孙玉宝等,2007;刘志逊等,2016)。石煤矿属于能源矿产,主要用于发电、居民取暖等(汪泽秋,1992;陈西民等,2010)。中国作为世界上少数拥有石煤资源的国家之一,石煤分布广泛,遍布全国二十多个省份。陕西安康市石煤资源总储量达到41383万t(李莹等,2005;王国星,2012)。由于石煤中重金属含量较高,所以石煤矿的不合理开发利用通常会导致矿区水环境重金属污染(杜蕾,2018;王美华,2021)。

前人在研究区主要开展了石煤矿产资源调查研 究工作,崔雅红等(2021)研究陕西蒿坪石煤矿区重金 属污染及生态风险评,尚缺乏流域河水重金属时空的 精细化研究。河水中重金属的研究与评价,对于水质 安全控制、流域生态安全及社会的可持续发展都具有 非常重要的作用(秦欢欢,2020)。笔者以蒿坪河流域 陈家沟石煤矿区河水重金属为研究对象,通过分析河 水重金属的时空变化,利用主成分分析和 Pearson 相 关性进行分析重金属相关性、影响因素及重金属来源, 旨在为河水重金属污染防治及风险管控提供科学依据。

1 研究区概况

陈家沟位于秦巴山区安康某地,属北亚热带湿润 季风型气候,年平均降水量为1085.13 mm,降雨多集 中在 6~9月,占全年降水量的 52%~76%,枯水期 (12月、1月、2月)降水量占全年降水量的1.1%~4.5%。 平均气温为15.0℃,1月为最冷月,平均气温为3.4℃, 极端最低气温为-7.4℃。7月最热,平均气温为 25.5℃,极端最高气温为41.7℃。陈家沟河流长度为 3.38 km,流域面积为2.43 km²,高差为644.6 m,枯水期 流量为240.8 m³/d。陈家沟石煤矿储存于斑鸠关组 (图1)(贾志刚,2014),斑鸠关组岩性以黑色碳质板岩、 碳硅质岩为主,中-上部夹粗面岩,硬度大,具细粒变 晶结构、板状构造,其成份主要为石英、绢云母、白云 母及碳质等,地层为一套次深海深水盆地相富炭(硅) 泥质碎屑岩沉积地层及多旋回的火山喷出岩(杨学存, 2013; 贾志刚等,2014)。

历史上陈家沟石煤矿体开采主体是个体及村集

体,开采方式主要是平硐开采和露天开采,缺乏环境 保护意识,废渣随意堆放。平硐沿着矿体走向和倾向 开采,硐口形态不规则、高度不等、深浅不同,部分矿 硐上下贯通。露天开采造成山体岩石裸露,废渣露天 堆放。开采过程中未作任何生态环保措施,开采结束 也未进行生态恢复治理(崔炜等,2019)。2014年,河 道磺水造成鱼虾异常死亡,环保部门对水质进行检测, 结果显示河水中重金属呈不同程度超标,分析认为与 矿硐及废渣酸性水有关。2019年,地方政府进行了部 分矿硐封堵及废渣堆封存处理,但是仍旧存在矿硐酸 性涌水,河道磺水污染明显。



图 1 陈家沟地质简图(据周小康, 2000 修改) Fig. 1 Geological skeeth of Chenjiagou

2 研究方法

2.1 样品采集

本次研究在陈家沟石煤矿区水环境详细调查的

基础上,先后开展了2期地表水样品采集工作,采样 点见图2。第一期(2021年12月)采样点由河流上游 至下游,其中上游源头河水(S121,用于河水重金属累 积污染评价的对照点)、上游河水(S101)、矿硐积水 (S102)、矿硐排水(S103、S3、S123)、废渣堆淋溶水 (S122),下游河水(S124)、汇入干流前河水(S126)。 第二期(2022年8月、9月、10月)主要采样2个监测 断面点(J19、J20)河水。2期共采集地表水样品16件, 其中河水11件,矿硐涌水4件,废渣淋溶水1件。样 品采集严格执行地表水采样规定和运输。



图 2 陈家沟地表水样品类型及采样点分布图

Fig. 2 Chenjiagou surface water sample type and sampling point distribution map

2.2 分析方法与监测手段

地表水样品分析由中国地质调查局西安地质调 查中心实验测试室(自然资源部西北矿产资源监督检 测中心)检测分析完成,实验室具有检验检测实验室 国家级资质认定(CMA)和中国合格评定委员会实验 室认可资质(CNAS)。水样分析方法、检出限及检测 仪器见表 1。野外断面水质检测采用 In-Situ Aqua TROLL500 便携式水质分析仪,使用前进行了校正, 其性能良好、便于携带、操作简便(张丽红,2015),对 水质连续监测(张嘉杰,2013),主要检测参数包括 pH、 盐度、温度、实际电导率、溶解性总固体等。

2.3 评价标准与方法

2.3.1 评价标准

地表水水质评价标准见表 2。Cd、Cu、Zn 元素依据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)评价,Ni、 Mn、Fe 元素依据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)集中式生活饮用水地表水源地标准评价,Al 元 素依据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)评价。 2.3.2 污染评价方法

采用指数法对陈家沟地表水中重金属污染程度 进行评价。指数法评价方法包括单项污染指数法、单 项污染超标倍数法和综合污染指数法等。

单项污染超标倍数计算公式为:

$$P_c = (C_i - S_i)/S_i \tag{1}$$

综合污染指数法计算公式为:

$$P_z = \sqrt{\frac{(\max P_i)^2 + (\bar{P}_i)^2}{2}}$$
 (2)

$$P_i = C_i / S_i \quad (3) \tag{3}$$

式中: C_i 为水体中第 i种重金属元素实测含量 (mg/L); S_i 为国家标准中水体第 i种重金属元素含量 限值(mg/L); P_i 为水体中重金属元素 i的单项污染指 数; max P_i 为多种污染物中某单项污染指数的最大值 (mg/L); \bar{P}_i 为多种污染物各单项污染指数的平均值 (mg/L); P_c 为水体中第 i种重金属元素的超标倍数; P_i 为重金属综合污染指数。

重金属污染程度分级标准见表3。

表 1	样品分析方法、检出限及检测仪器概况表

Tab. 1 Sample analysis methods, detection limits and monitoring instruments

分析对象	分析方法	检出限	检测仪器
pH	玻璃电极法现场	/	pH计、PHSJ-4F
As, Hg, Se	原子荧光光谱法(AFS)	$0.1~\mu\text{g/L}_{\odot}~0.05~\mu\text{g/L}_{\odot}~0.1~\mu\text{g/L}$	原子荧光光度计AFS-2202E
Cd、Al、Cu、 Zn、Ni、Mn	电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)	0.06 μg/L、 0.6 μg/L、 0.09 μg/L、 0.8 μg/L、 0.07 μg/L、 0.06 μg/L	电感耦合等离子质谱ICAP-RQ
Cr ⁶⁺	二苯碳酰二肼分光光度法(COL)	0.004 mg/L	紫外可见分光光度计UV-1800
TFe	电感耦合等离子体光谱法 (ICP-AES)	4.5 μg/L	电感耦合等离子光谱ICAP7400

表 2 河水环境质量标准表(mg/L)

Tab. 2 Water environmental quality standard Unit (mg/L)

			1	2			/			
		pН	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Al
	Ⅱ类标准	6~9	0.005	0.05	1	1				
《地表水环境质量标准》	Ⅲ类标准	6~9	0.005	0.05	1	1				
(GB 3838-2002)	Ⅳ类标准	6~9	0.005	0.05	2	2				
	V类标准	6~9	0.01	0.1	2	2				
《地表水环境质量标准》集中式生活饮用水 地表水源地标准(GB 3838-2002)							0.02	0.1	0.3	
生活饮用水卫生标准(C	GB 5749-2006)					-		-		0.2

表 3 河水重金属超标倍数及污染程度分级表

等级划分	单项污染超标倍数	污染程度	综合污染指数	污染程度
Ι	$P_c \leqslant 0$	无污染	$P_z \leq 0.7$	清洁(安全级)
Π	$0 \le P_c \le 1$	轻度污染	$0.7 < P_z \le 1.0$	尚清洁(警戒限)
Ш	$1 \le P_c \le 2$	中度污染	$1.0 < P_z \le 2.0$	轻度污染
IV	$2 \leq P_c \leq 4$	重度污染	$2.0 < P_z \leq 3.0$	中度污染
V	$P_c > 4$	极度污染	$P_z > 3.0$	重度污染

2.3.3 分析方法

使用 SPSS 18.0 数据统计软件,综合使用多元统 计方法相关性分析和主成份分析对河水中的重金属 含量及水体水质情况进行统计分析,结合流域污染点 源数据,分析河水重金属污染的主要来源(吴海霞, 2008;刘总堂,2010),相关性分析可能会提供重金属 元素的来源和迁移信息(Alves,2020; Chai,2021)。相 关性分析采用 pearson 相关性系数分析不同变量间的 相关性。主成分分析使用最大方差法对因子进行旋 转,并采用 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)和 Bartlett 的球 形度检验判断主成分分析结果的有效性,若 KMO> 0.5 且 P<0.001 则主成份分析的结果有效(俞茜, 2015; 朱泊丞等, 2018; 朱雪凝, 2021)。

3 河水重金属含量的时空变化

3.1 河水重金属含量的空间变化

河水中重金属含量见表 4, 矿硐排水及废渣堆淋 溶水中重金属(Al不是重金属, 为了分析简述方便, 以 下简述归为重金属)含量见表 5, 河水 pH 及重金属含

表 4 陈家沟河水中不同点位重金属元素含量表(mg/L)

TC 1 4	TT		C1	•	()T)
Tab /	Hoow moto	content in	('honiiogou	river woter	$(m\alpha/L)$
1 40 4			V HEIHIAYOH		1119/1/1
100	11000 1 110000		Chienjiagoa		$(m_{\mu}) = j$

编号	位置	pН	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Al
S121	源头(对照点)	7.48	0.001 1	0.003	0.046	0.011	0.035	0.02	0.081
S101	沿河道距源头82m	6.46	0.0006	0.001	0.023	0.004	0.001	0.02	0.045
S103	沿河道距源头369m	5.05	0.01	0.052	0.15	0.048	0.3	0.02	1.142
S124	与S103相距1376m	3.75	0.38	1.41	6.12	2.2	11.4	0.41	20.56
S126	与S124相距1143m	4.62	0.28	0.94	5.61	1.92	9.72	0.09	14.36

表 5 陈家沟矿山污染源中重金属元素含量表(mg/L)

Tab. 5 Heavy metal content in Chenjiagou pollution source (mg/L)

编号	位置	类型	pН	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Al
S102	距河道51m	矿硐积水	4.04	0.16	1.42	1.06	0.4	0.94	0.08	9.76
S104	与S103相距470m	矿硐排水	5.8	0.096	0.022	6.03	1.8	14.8	0.02	0.39
S122	汇入河道处与S104相距104m	废渣淋溶水	3	0.9	11.2	22.4	12.4	50.6	15.37	185.6
S3	汇入河道处与S122相距243m	矿硐排水	3.47	2.5	4.68	27.8	7.86	54.1	19.57	-
S123	距离主河道直线距离65m	矿硐排水	6	0.003 7	0.004	2	1.0	2.6	0.04	0.443

量从上游至下游变化见图 3。河水 pH 整体呈弱酸性, 自上游呈现下降的趋势, 汇入干流河水前 pH 略有上 升。S121 为陈家沟上游不受采矿活动影响的河水, 可 作为评价河水水质污染的对照点。距源头 S121 点位 82 m 和 369 m 的 S101 和 S103 两个点位河水 pH 降低, 河水中重金属含量略有上升。源头 S121 至 S103 点位,



图 3 陈家沟河水从上游到下游 PH 值及重金属含量的空间变化及超标情况

Fig. 3 Spatial variation and excesses of PH, heavy metal content in Chenjiagou River from upstream to downstream

河水中Cd、Cu、Zn、Ni、Mn、Al 含量分别由 0.0011 mg/L、 0.003 mg/L、0.046 mg/L、0.011 mg/L、0.035 mg/L 和 0.081 mg/L, 上升至 0.01 mg/L、0.052 mg/L、0.15 mg/L、 0.048 mg/L、0.3 mg/L 和 1.142 mg/L。S102 点位河水重 金属未超标,水质等级为地表水 I 类水。S103 点位河 水水质为地表水V类水,Cd元素超过了《地表水环境 质量标准》Ⅱ类水质标准1倍;Ni、Mn元素超过《地表 水环境质量标准》集中式生活饮用水地表水源地标准 1.4 倍、2 倍; Al 超过《生活饮用水卫生标准》4.7 倍。 S124点位重金属含量显著上升,Cd、Cu、Zn、Ni、Mn、 Fe、Al 含量分别上升至 0.38 mg/L、1.41 mg/L、6.12 mg/L、 2.2 mg/L、11.4 mg/L、0.41 mg/L、20.56 mg/L。 S124 河 水水质等级为地表水劣 V类水, 河水中 Cd、Cu、Zn 元 素超标 75 倍、0.41 倍、5.12 倍; Ni、Mn、Fe 元素超标 109倍、113倍、0.37倍; Al 元素超标 101.8倍。S124 至河口 S126 点位, 重金属含量略有下降, Cd、Cu、Zn、 Ni、Mn、Fe、Al 含量分别下降至 0.28 mg/L、0.94 mg/L、 5.61 mg/L, 1.92 mg/L, 9.72 mg/L, 0.09 mg/L, 14.36mg/L。但该点位河水水质等级仍为地表水劣V类水,

河水中 Cd、Zn 元素超标 55 倍、4.6 倍, Ni、Mn 元素超标 95 倍、96.2 倍, Al 元素超标 70.8 倍。

与对照点 S121 对比, S103 下游的 S104、S3、 S123 矿硐排水和 S122 废渣堆淋溶水为河水提供重金 属,从而导致河水中重金属急剧升高。河流的沉淀自 净化作用使得河水中重金属含量在空间上的释放和 迁移特点(宿文姬, 2014)为沿水流方向呈下降趋势, 但由于河水水环境纳污能力远不及排入的酸性废水 中重金属污染物浓度含量,使得河水自净化能力大大 减弱(邱小琮, 2015;周闻达, 2020)。因此,陈家沟矿 硐酸性废水和废渣堆淋溶水是导致河水中重金属超 标污染的主要原因。陈家沟河水从上游至下游,河水 中 Cd、Cu、Zn、Ni、Mn、Fe、Al 元素均有不同程度的 超标,而源头 S121 重金属元素含量全部未超标,说明 矿业活动对陈家沟河水中重金属元素含量影响显著, 是河水水质污染的主要原因。

3.2 河水重金属含量的时间变化

分析陈家沟 2 个监测断面中 pH 及重金属元素的 时间变化(图 4)发现, J19 断面 8 月份 Zn、Ni、Mn、Al



8月.累计降雨量<50mm;9月.降雨量>100mm;10月.降雨量>180mm(降雨量计算了采样前 15天总降雨量);数据来源:2022年8~10月紫阳县天气(中国气象网https://www.cma.gov.cn)

图 4 河水中重金属含量的时间变化



表 6	河水中pH、	、重金属相关性分析	统计表(n=11)
-----	--------	-----------	-----------

Tab. 6 Correlation analysis of pH and heavy metals in river water (n=11)

	pН	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Al
pН	1								
Cd	-0.603*	1							
Cr	-0.685*	0.550	1						
Cu	-0.768**	0.824**	0.744**	1					
Zn	-0.586	0.988**	0.447	0.797**	1				
Ni	-0.636*	0.980**	0.486	0.842**	0.991**	1			
Mn	-0.531	0.947**	0.326	0.724*	0.977**	0.969**	1		
Fe	-0.694*	0.510	0.552	0.632*	0.523	0.556	0.560	1	
Al	-0.492	0.741**	0.426	0.462	0.759**	0.733*	0.734*	0.568	1

注:*表示p<0.05水平显著;**表示p<0.01水平显著。

含量是 8 月、9 月、10 月这 3 个月份中最高的。9 月 份除 Fe 外,其他元素含量均下降,是3个月份当中最 低的1个月,Cd、Zn、Fe元素随降雨量增大其含量变 化不大, Cu、Ni、Mn含量变化明显。初步分析, J19断 面上游附近有矿硐 D2、D3、D4 和废渣堆 Z1 等污染 源,降雨量大时,矿硐废水、废渣堆淋溶水进入河流, 导致河水中重金属增高。J20 断面 8 月份 Zn、Ni、Mn 含量为8月、9月、10月这3个月份中最高的,10月 份除 Cu 外,其他所有元素含量均为3个监测月份中 最低。河水中 Cd、Cu、Zn、Fe 元素在降雨中含量变化 略微显著,Ni、Mn含量随降雨量增大而减小,受降雨 量影响较大。综上所述,陈家沟降雨量大小对河水中 重金属含量的影响不稳定,使得河水中重金属的迁移、 释放和积累的时间规律很难把握,即陈家沟河水中重 金属在时间上规律性较差,后期将会持续监测分析重 金属含量在时间上的变化规律。

4 河水重金属污染来源解析

河水中重金属来源包括自然源和人为源,自然源 为自然条件下岩石风化释放进入水体的重金属元素, 人为源即人为活动排放的富含重金属废水和废渣淋 溶进入水体的重金属(周巧巧,2020)。由于研究区广 泛分布黑色泥页岩、石煤地层,同时还有多处石煤开 采遗留的矿硐和废渣堆,河水重金属来源识别,对于 污染水体的重金属治理意义重大。

4.1 相关性分析

利用 SPSS 软件对陈家沟河水 pH 和 Cd、Cr、Cu、

Zn、Ni、Mn、Fe、Al 共 8 种重金属元素进行相关性分析 (表 6)。分析发现,河水 pH 与河水 Cd、Cr、Cu 等重 金属元素呈现出显著负相关,pH 与 Cd、Cr、Cu、Ni、 Fe 元素在 P<0.01 水平下为显著负相关;pH 与 Zn、 Mn、Al 元素在 P<0.05 水平下为显著负相关;说明水 体酸化是引起金属元素溶解度增加的主要原因。此 外,水体中 Mn 元素与 Cu、Zn、Ni、Cd 元素,Fe 元素 与 Cu 元素,Al 元素与 Cd、Zn、Ni、Mn 元素均具有显 著正相关,反映了 Mn、Fe、Al 的氢氧化物对这些微量 重金属元素的控制作用。

4.2 基于主成分分析的重金属来源解析

为了分析水体中重金属来源的同源性,采用主成 分分析法对陈家沟河水中8种重金属进行分析。主 成分分析中,当KMO检验值为0.537>0.5, Bartlett检 验显著性概率 P=0.000<0.05, 主成分分析结果有效 (Yang, 2016; 纪冬丽, 2019)。满足主成分分析的前提 要求,意味着本次分析的结果对各变量较为有效。归 一化数据集的因子分析提取了特征值>1的最大方差 旋转(何宇, 2021), 通过因子分析提取的负载因子如 表7所示。因子负载分为高、中等和低载荷,对应于 绝对载荷值分别>0.75、0.75~0.50 和 0.50~0.30(Liu CW, 2003; Kumar, 2018)。由于样品数据较多且选取 的因子与理论设想相同,因此选择特征值>1及累计 方差贡献率≥75%的原则进行因子分析(王磊, 2020; 陈雪, 2022)。特征值>1的有4个主成分,故PCA分 析结果显示,陈家沟河水中8种重金属元素的特征变 量可归纳为4个主成分(PC₁~PC₄),累计贡献率达到 99.16%, 故分析 4 个主成分便可了解陈家沟河水中重

表 7 河水中重金属主成分分析结果表

 Tab. 7
 Analysis results of heavy metal principal components in river water

一步去		主	成分	
儿系	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC_4
Cd	0.885	0.326	0.127	0.292
Cr	0.181	0.941	0.214	0.173
Cu	0.701	0.611	0.324	-0.081
Zn	0.915	0.204	0.173	0.298
Ni	0.910	0.250	0.211	0.245
Mn	0.916	0.050	0.268	0.278
Fe	0.268	0.290	0.893	0.213
Al	0.480	0.161	0.247	0.821

金属的主要来源。

PC₁的贡献率 51.40%, Cd、Cu、Zn、Ni、Mn的浓度在高载荷下,其溶解度会增加,因为它们在水中的离子活动度会增强,从而增加了其溶解度。而在 Al的浓度上为低等载荷,其溶解度和溶度积都较低,因为 Al的离子活动度比较低。根据统计 Cd、Cu、Zn、Ni、Mn 的高值分布在陈家沟中游,位于污染源石煤矿 硐 D2、D3、D4 和废渣堆 Z1 下游。该区域的 pH 处于弱酸-强酸,金属更容易被溶解,水中氢氧根离子与金属离子结合形成更稳定的氢氧化物沉淀。陈家沟河水中 Cd、Cu、Zn、Ni、Mn 主要来源可能是石煤矿硐D2、D3、D4 和废渣堆 Z1,故 PC₁可能由矿硐排水、废

渣淋溶水共同作用的结果。

PC₂的贡献率 19.76%, 主要反映了 Cr 和 Cu 的变 化特征, 在 Cr 的浓度上具有高载荷, 在 Cu 的浓度上 具有中载荷。结合水体重金属空间分布特征与重金 属间相关性分析可知, Cr 和 Cu 的高值分布在陈家沟 监测断面 J20 附近, 经实地调查, J20 监测断面西侧一 涌水矿硐富含 Cr、Cu 等重金属, 因此, PC₂ 可能由矿 硐酸性废水地表径流所致。

PC₃的贡献率 14.65%, 主要反映了 Fe 的变化特征, Fe 的浓度上具有高载荷。相关性分析表明 Fe 和 Cu 有相同来源,结合陈家沟石煤矿体特征, 认为 PC₃ 元 素可能受地质环境影响。

PC₄的贡献率 13.35%, 主要反映了 Al 的变化特征, 在 Al 的浓度上具有高载荷。Al 的高值分布在中上游 Zl 废渣堆附近, 该处 pH 值低于 4.5, Al 的溶解度显著 增加, 故 PC₄元素的主要来源可能与废渣堆底部淋溶 水有关。

4.3 河水重金属变化影响因素分析

4.3.1 地质背景对河水重金属变化的影响

研究区陈家沟地层主要是晚奥陶世-早志留世斑 鸠关组,岩性为黑色炭质板岩、炭硅质岩及石煤矿层。 研究区石煤中重金属含量与大陆上地壳平均值相比(表 8), Cd、Cr、Cu、Zn、Ni元素较富集, Mn含量低于 大陆上地壳平均值。南秦岭斑鸠关组平均值中 Cd、 Cr、Zn、Mn含量高于石煤矿体和大陆上地壳元素含 量,因而陈家沟河水中较高浓度 Cd、Cr、Cu、Zn、Ni 元素,与区域地质背景有关。

Z属元素平均含量统计表(mg/L)
Z属元素平均含量统计表(mg/L

Tab. 8	Average content of heav	v metal elements in	ore bodies and	rock formations	(mg/L)
		,			(

指标	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni	Mn
陈家沟石煤矿体	0.9	169	34	86.3	64.6	230
南秦岭斑鸠关组平均值*	1.58	183	21.9	133	60	516
大陆上地壳*	0.098	35	25	71	20	600

注:*表示数据来自中国地质调查局西安地质调查中心(2021)。

4.3.2 污染源对河水重金属变化的影响

在自然条件下,河水中重金属主要来自于大气降水、岩石风化和火山作用(廖红为,2023),但是同一地 质环境背景条件下,同一地区重金属元素含量的水平 波动相对较小,区域上重金属含量分异相对变化不大 (徐友宁,2007)。但是,由于矿业开发活动会带来重 金属污染,导致河水中重金属含量升高而造成水环境 污染,对农业和生活带来影响(徐友宁,2005)。陈家 沟地表水中重金属含量平均值见表9,废渣淋溶水是 S122数据,矿硐排水是S102、S104、S3、S123共4个 点位数据的平均值,河水是S121、S102、S103、S124、 S126共5个点位数据平均值,对照值为源头S121河 水点位。结果表明,河水重金属含量平均值显著高于 上游河水对照值,表明陈家沟河水受到矿业活动污染 明显。中、上游河水受到矿硐排水及废渣堆淋溶水的 影响后,造成河流中下游一段河床呈黄色(图 5),河水 重金属含量急剧升高。废渣堆淋溶水中所有重金属 含量明显高于河水,是河水中重金属含量的 5.92 倍~ 138.73 倍; 矿硐排水中除 Al 外,其他重金属含量高于 河水,是河水中重金属含量的 2.19 倍~43.82 倍。说 明废渣堆淋溶水和矿硐排水是导致河水中重金属含 量增高的污染源。

表 9 陈家沟不同地表水中重金属平均含量统计表(mg/L)

Tab. 9 Average content of heavy metals in different surface waters of Chenjiagou (mg/L)							
	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Al
废渣堆淋溶水(S122)	0.9	11.2	22.4	12.4	50.6	15.37	185.6
矿硐排水(n=4)	0.69	1.53	9.22	2.76	18.11	4.93	3.53
河水(n=5)	0.13	0.48	2.39	0.84	4.29	0.11	7.24
对照值(S121)	0.001 1	0.003	0.046	0.011	0.035	0.02	0.081



图 5 陈家沟"磺水"河道照片 Fig. 5 Chen Jiagou "sulfur water" channel

4.3.3 pH 对河水重金属变化的影响

河水中 pH 值的变化影响着河水中的重金属行为,对重金属在溶解态和颗粒态之间的相互转化有一定作用,也会影响吸附剂表面的官能团、悬浮颗粒物的表面吸附特性及各种吸附反应,从而促进或抑制对 H^{*}和 OH 的吸附(Shil, 2019;叶宇航, 2023)。 水体 pH 值的变化直接影响吸附速率的变化,影响 悬浮颗粒物及沉积物对重金属的吸附和解吸,导致 水体重金属在颗粒态与溶解态之间的迁移转化(郝 向英,2000)。由重金属含量和河水 pH 值相关性及 含量变化(图 6)可以看出,河水中重金属含量与河 水 pH 有较好的负相关性。河水 pH 值偏酸性,水中 的氢离子浓度较高,导致重金属更容易溶解在水中, 重金属离子含量则高;河水 pH 值愈高,中性甚至偏 碱性时,河水中的重金属离子和氢氧根离子结合形 成不溶性的氢氧化物沉淀增多,导致河水中的重金 属离子浓度降低(表 10)。研究区河水 pH=5,河水中 的重金属离子显著减低,为重金属离子形成氢氧化 物增多所致。

4.3.4 河水盐度对重金属变化的影响

部分重金属与 Cl 亲和力较强, 而盐度与 Cl 浓 度呈正相关关系, 盐度增大时, 可提高难溶金属化 合物的溶解度, 也可使被吸附的重金属在高浓度 Cl 的水中被释放, 使得颗粒态重金属向溶解态转 化(汤爱坤, 2011; 王宇彤, 2021)。分析发现, 陈家 沟河水中重金属含量与河水盐度的相关性(表 11), 河水盐度与 Cd、Zn、Ni、Mn 呈现较好的正相关性, 表明河水中 Cd、Zn、Ni、Mn含量随河水盐度的升 高而升高(图 7)。

表 10 金属氢氧化物沉淀的 pH 值及其溶度积统计表(25 ℃)

1 ab. 10 pH value and solubility product of metal hydroxide precipitation

		_				
j Z	氢氧化物	pH	溶度积	氢氧化物	pH	溶度积
1	Fe(OH) ₃	2.48	4×10 ⁻³⁸	Cu(OH) ₂	5.4	1.6×10 ⁻¹⁹
1	Fe(OH) ₂	5.5	4.8×10^{-17}	Mn(OH) ₂	9.0	4.1×10^{-14}
1	Al(OH) ₃	4.1	1.9×10 ⁻³³	Zn(OH) ₂	5.2	4.5×10 ⁻¹⁷
(Cr(OH) ₃	5.3	7×10 ⁻³¹	Cd(OH) ₂	6.7	2.3×10^{-14}





表 11 河水盐度与重金属元素含量的相关性统计表(n=8)

Tab. 11 Correlation between salinity of river water and heavy metal content (n=8)



图 7 河水中重金属离子浓度含量随盐度的变化 Fig. 7 The concentration of heavy metal ions in river water varies with salinity

rig. / The concentration of neavy metal ions in fiver water valies wi

5 结论

(1)陈家沟源头水(对照值)未受矿业活动影响, 水质为 I 类水;4个矿硐排水中重金属平均值是对照 值的 42.6~626.3 倍,废渣淋溶水是对照值的 484~ 3732 倍,中下游河水平均值是对照值的 4.5~117.2 倍。 矿硐排水和废渣淋溶水是河水重金属污染的主要污 染源。陈家沟河水汇入干流前沟口河水水质为地表 水劣 V类水,河水中 Cd、Zn 含量超过了 V类水质标 准 27 倍、1.8 倍; Ni、Mn 超过集中式生活饮用水地表 水源地标准 95 倍、96.2 倍; Al 含量超过《生活饮用水 卫生标准》的 70.8 倍。

(2)降雨量对陈家沟河水中重金属含量影响规律 还不明显,有待后续进一步观测。陈家沟地表水的Cd、 Cu、Zn、Ni、Mn、Al元素具有同源性,主要来自于矿 硐排水和废渣淋溶水;Cr、Cu元素同源性强,主要来 自于矿硐排水;Fe、Cu元素具有同源性,主要是受岩 性影响明显;Al元素与废渣淋溶水关系密切。

(3)影响陈家沟河水中重金属含量时空分布的主要因素:①地质背景。②随着河水 pH 升高,其重金属离子浓度明显降低。③随河水盐度的升高,Cd、Zn、Ni、Mn含量升高。

致谢:感谢中国地质调查局西安地质调查中心 赵振宏正高级工程师、王晓勇正高级工程师、卜涛 高级工程师、陈述工程师、梁博工程师在野外调查 和资料收集工作的支持和帮助。

参考文献(References):

- 陈雪, 汪小祥, 刘敬青. 小流域矿集区土壤重金属污染评价与来源综合解析[J]. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(06): 74-81.
- CHEN Xue, WANG Xiaoxiang, LIU Jingqing. Assessment and sources comprehensive identification of soil heavy metal pollution in small-scale drainage catchment of mining areas [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2022, 74(06): 74–81.
- 陈西民,马合川,魏东,等.安康石煤资源特征及勘查开发建议 [J].陕西地质,2010,28(01):1-5+81.
- CHEN Ximing, MA Hechuan, WEI Dong, et al. An kang stone coal resource characteristics and exploration and development suggestions [J]. Geology of Shaanxi, 2010, 28(01); 1–5+81.
- 曹佰迪,李文明,周一凡,等.都阳湖流域沉积物中重金属元素 分布特征及生态风险浅析[J].西北地质,2022,55(4): 343-353.
- CAO Baidi, LI Wenming, ZHOU Yifan, et al. Geochemical Characteristic and Fluxes of Trace Metal in Water System of the Poyang Lake[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 343–353.
- 崔炜,张佳伟,苏文让,等.石煤采矿区水流域重金属污染治理实践[A]. 《环境工程》编委会,工业建筑杂志社有限公司.《环境工程》 2019年全国学术年会论文集[C].《工业建筑》杂志社有限 公司,2019:6.

CUI Wei, ZHANG Jiawei, SU Wenrang, et al. Prractice of Heavy

Metal Pollution Control in Water Basin of Stone Coal Mining Area[A]. Editorial Board of Environmental Engineering, Industrial Architecture Magazine. Proceedings of the 2019 National Annual Conference of Environmental Engineering[C]. Industrial Construction Magazine Limited, 2019: 6.

- 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(02):157-162.
- CUI Yahong, CUI Wei, MENG Qinjun, 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(02): 157–162.
- 杜蕾,朱晓丽,安毅夫,等.石煤尾矿区土壤重金属污染风险评价[J].化学工程,2018,46(03):6-9+15.
- DU Lei, ZHU Xiaoli, AN Yifu, et al. Potential ecological risk assessment of soil heavy metalsin a stone-like coal tailing using TCLP and Hakanson method[J]. Chemical Engineering (China), 2018, 46(03): 6–9+15.
- 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.
- 韩宝华, 胡永浩, 段星星, 等. 西北地区重金属元素累积现状及 典型地区成因分析[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 318-325.
- HAN Baohua, HU Yonghao, DUAN Xingxing, et al. Accumulation Status of Heavy Metals in Northwest China and Analysis of Causes in Typical Areas[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 318–325.
- 郝向英,赵慧,刘卫.黄河中游主要重金属污染物的迁移转化[J].内蒙古环境保护,2000,12(3):27-28.
- HAO Xiangying, ZhAO Hui, LIU wei. Migration of the Main Heavy Metal in the Middle Reaches of the Yellow River[J]. Environment and Development, 2000, 12(3): 27–28.
- 何宇,洪欣,闭潇予,等.九洲江流域水环境重金属污染特征及 来源解析[J].环境化学,2021,40(01):240-253.
- HE Yu, HONG Xin, BI Xiaoyu, et al. Characteristics and sources of heavy metal pollution in water environment of Jiuzhou River basin[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(01): 240–253.
- 纪冬丽,曾琬晴,张新波,等.天津近郊农田土壤重金属风险评价及空间主成分分析[J].环境化学,2019,38(9): 1955-1965.

JI Dongli, ZENG Wanqing, ZHANG Xinbo, et al. Ecological risk as-

sessment and principal component analysis of heavy metals in suburban farmlandsoils of Tianjin[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(9): 1955–1965.

- 蒋起保,欧阳永棚,章敬若,等.江西省贵溪市水系沉积物重金 属污染及其潜在生态风险评价[J].西北地质,2022,55(3): 326-334.
- JIANG Qibao, OUYANG Yongpeng, ZHANG Jingruo, et al. Evaluation of Heavy Metal Pollution and Its Potential Ecological Risk in Stream Sediments in Guixi City, Jiangxi Province [J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 326–334.
- 贾志刚.安康市蒿坪石煤矿带地质特征[J].价值工程,2014, 33(30):310-311.
- JIA Zhigang. Geological Characteristics of the Stone Coal Belt in Haoping, Ankang City[J]. Value Engineering, 2014, 33(30): 310–311.
- 贾志刚,吕婷婷.安康市双龙一带斑鸠关组地质特征及其含石 煤性分析[J].煤,2014,23(02):52-53+76.
- LI Ying, YE Jida, ZHANG Liang, et al. The survey of status quo on heavy-metal contamination in the bone-coal mining and utilization[J]. Energy Environmental Protection, 2005, (02): 58–61.
- 廖红为,蒋忠诚,周宏,等.铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健 康风险评价[J/OL].环境科学,2023:1-15.
- LIAO Hongwei, JIANG Zhongcheng, ZHOU Hong, et al. Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine [J/OL]. Environmental Science, 2023:1–15.
- 刘瑞平,徐友宁,张江华,等.小秦岭金矿带枣香河重金属及氰 化物分布特征及污染成因[J].黄金,2012,33(11):59-64.
- LIU Ruiping, XU Youning, ZHANG Jianghua, et al. Distribution characteristics of heavy metals and cyanide in Zaoxiang River in Xiaoqinling gold mine belt and pollution causes [J]. Gold, 2012, 33(11): 59–64.
- 刘志逊,代鸿章,刘佳,等.我国石煤资源勘查开发利用现状及 建议[J].中国矿业,2016,25(S1):18-21.
- LIU Zhixun, DAI Hongzhang, LIU Jia, et al. Status quo and suggestions for exploration, development and utilization of stone coal resources in China[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(S1): 18–21.
- 刘总堂,李春海,章钢娅.运用主成分分析法研究云南湖库水体 中重金属分布[J].环境科学研究,2010,23(04):459-466.
- LIU Zongtang, LI Chunhai, ZHANG Gangya. App lication of P rinc ipal Component Ana lysis to the D istributions of Heavy Meta ls in the W ater of Lakes and Reservo irs in Yunnan P rov

ince[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(04): 459–466.

- 卢秋,邓渠成,卢苇等.龙江河水体重金属污染状况及健康风险 评价[J].广西科学,2016,23(5):478-484.
- LU Qiu, DENG Qucheng, LU Wei, et al. Assessment on the Status and Health Risks of Heavy Metal Pollutions of Longjiang River[J]. Guangxi Sciences, 2016, 23(5): 478–484.
- 孟春芳,何长海,田珂宁,等.卫河水系新乡段水质时空分异及
 污染因子识别[J].安全与环境学报,2019,19(04):
 1461-1467.
- MENG Chunfang, HE Changhai, TIAN Kening, et al. Identification of water pollutants in Xinxiang section of Wei River Basin in terms of spatio-temporal features and pollution contributors[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(04): 1461–1467.
- 秦欢欢,高柏,黄碧贤,等.拉萨河流域河水重金属分布特征及 污染风险评价[J].有色金属(治炼部分),2020,(10): 79-86.
- QIN Huanhuan, GAO Bai, HUANG Bixian, et al. Distribution Characteristics and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Lhasa River Basin[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020, (10); 79–86.
- 邱小琮,赵红雪,尹娟等.爱伊河水环境容量与水体自净能力研 究[J].人民黄河,2015,37(01):87-90.
- QIU Xiaozong, ZHAO Hongxue, YIN Juan, et al. Study on the Water Environmental Capacity and the Water Self- Purification Ability of Aiyi River[J]. Yellow River, 2015, 37(01): 87–90.
- 舒旺, 王鹏, 肖汉玉, 等. 鄱阳湖流域乐安河水化学特征及影响 因素[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(03): 681-690.
- SHU Wang, WANG Peng, XIAO Hanyu, et al. Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Le'an River, Poyang Lake Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(03): 681–690.
- 宿文姬,徐友宁,凡生,等.广东大宝山矿区横石河沿岸水土重 金属分布规律及其累积风险[J].地质通报,2014,33(08): 1231-1238.
- SU Wenji, XU Youning, FAN Sheng, et al. The distribution regularity and accumulation risk of heavy metals in water and soil along the Hengshi River in the Dabaoshan mining area, Guangdong Province[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(08): 1231–1238.
- 孙玉宝,张金水.霍邱县石煤矿床地质特征及其开发利用前景 初探[J].矿产保护与利用,2007,(02):24-27.
- SUN Yubao, ZHANG Jinshui. Geological Characteristics of the Stone Coal Deposits and its Prospects of the Development and

Utilization in Huoqiu County[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2007, (02); 24–27.

- 汤爱坤. 调水调沙前后黄河口重金属的变化及其影响因素[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- TANG Aikun. The influence Factors and Behavior Characteristics of Heavy Metals from River to Sea in Yellow River [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- 汪泽秋. 湖南石煤资源的开发利用与保护[J]. 资源开发与保护, 1992, (01): 63-64+81.
- WANG Zeqiu. Development, utilization and protection of Hunan stone coal resources[J]. Resources Development and Conservation, 1992, (01): 63–64+81.
- 王国星. 陕南利用资源循环发展[J]. 西部大开发, 2012, (140): 90-91.
- WANG Guoxing. Southern Shaanxi uses resources for circular development[J]. Great Development of the Western Region, 2012, (140): 90–91.
- 王磊. 西秦岭火鸡山地区地球化学异常分形解析及成矿预测研 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- WANG Lei. Fractal Analysis and Metallogenic Prediction of Geochemical Anomalies in Huojishan Area, Western Qinling[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.
- 王美华. 浙江常山江源石煤矿山周边耕地土壤重金属分布特征 与生态风险评价[J]. 浙江国土资源, 2021, (S1): 13-21.
- WANG Meihua. Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around Jiangyuan Stone Coal Mine in Changshan, Zhejiang[J]. Zhejinag Land & Resources, 2021, (S1): 13–21.
- 王宇.铜陵某矿区小流域重金属污染及风险评价[D].合肥:安徽农业大学,2022.
- WANG Yu. Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment of a Small Watershed draining a mining area in Tongling[D]. Anhui Agricultural University, 2022.
- 王宇彤. 沉积物中重金属迁移释放规律研究[D]. 北京: 中国矿 业大学, 2021.
- WANG Yutong. Study on the Migration and Release Rules of Heavy Metals in Sediments[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2021.
- 吴海霞. SPSS 在试卷相关性分析和再测信度计算中的应用[J]. 电脑知识与技术, 2008, 4(S2): 148-149.
- WU Haixia. SPSS Application in Examination Paper Correlation Analysis and Retest Reliability[J]. Computer Knowledge and Technology, 2008, 4(S2): 148–149.

徐友宁.矿山环境地质与地质环境[J].西北地质,2005, 38(04):

108-112.

- XU Youning. Mine environmental geology and mine geological environment[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(4): 108–112.
- 徐友宁,陈社斌,陈华清,等.大柳塔煤矿开发土壤重金属污染 响应研究[J].中国矿业,2007,(119):47-50+54.
- XU Youning, CHEN Shebin, CHEN Huaqing, et al. Study on soil heavy metals pollution in daliuta coal mine area[J]. China Mining Magazine, 2007, (119): 47–50+54.
- 许飞亚, 姬亚军, 王玲玲, 等. 信阳市浉河水体重金属污染监测 与评价[J]. 山东化工, 2022, 51(12): 222-225+228.
- XU Feiya, JI Yajun, WANG Lingling, et al. Monitoring and Evaluation of Heavy Metal Pollution of Shihe River in Xinyang City[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(12): 222–225+228.
- 杨学存,马合川.安康石煤特征及其综合利用[J].陕西煤炭, 2013,32(01):11-13.
- YANG Xuecun, MA Hechuan. Characteristics of Ankang stone coal and its comprehensive utilization[J]. Shaanxi Coal, 2013, 32(01): 11–13.
- 叶宇航,周润东,于雪,等.水环境中微塑料对重金属的吸附及 其影响因素[J].环境化学,2023,42(3):1-10.
- YE Yuhang, ZHOU Rundong, YU Xue, et al. Review on the adsorption of heavy metals with micro plastics in water environment and its influencing factors[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(3): 1–10.
- 俞茜.普渡河污染源解析及浮游藻类变化特征[D].北京:清华 大学,2015.
- YU Xi. Source Apportionment of Pollutants and Variation Analysis in Phytoplankton Compositions in the Pudu River[D].Beijing: Tsinghua University, 2015.
- 张嘉杰.分析便携式水质分析仪器的应用前景[J].科技创新与 应用,2013,(51):28.
- ZHANG Jiajie. Analyze the application prospect of portable water quality analysis instruments[J]. Technological Innovation and Application, 2013, (51): 28.
- 张丽红. 便携式水质分析仪器的应用前景[J]. 资源节约与环保, 2015, (162): 48.
- ZHANG Lihong. Application prospect of portable water quality analysis instruments[J]. Resources Economization & Environmental Prolection, 2015, (162): 48.
- 中国地质调查局西安地质调查中心.紫阳县蒿坪镇陈家沟废弃 矿硐酸性水污染综合治理工程可行性研究报告[R].中国 地质调查局西安地质调查中心,2021.

周巧巧,任勃,李有志,等.中国河湖水体重金属污染趋势及来

源解析[J]. 环境化学, 2020, 39(8): 2044-2054.

- ZhOU Qiaoqiao, REN Bo, LI Youzhi, et al. Trends and sources of dissolved heavy metal pollution in water of rivers and lakes in China[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(8): 2044–2054.
- 周闻达,向武,金丽,等.石煤矿山酸性废水自净化机理及防治 对策[J].环境科学与技术,2020,43(08):20-27.
- ZHOU Wenda, XIANG Wu, JIN Li, et al. The Self-purification Mechanism and Control Counter measures of Cadmium-rich Acid Mine Drainage of Stone Coal Mines[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(08): 20–27.
- 周小康.紫阳县幅 149E021003 1/5 万地质图说明书[R].陕西省 地调院,2000.
- 朱泊丞,施泽明,王新宇,等.安宁河水体中重金属空间分布特 征及来源识别[J].四川冶金,2018,40(04):24-31.
- ZHU Bocheng, SHI Zeming, WANG Xinyu, et al. Spatial distribution characteristics and source identification of heavy metals in Anning River[J]. Sichuan Metallurgy, 2018, 40(04): 24–31.
- 朱雪凝. 滏阳河邯郸段重金属风险评估及来源解析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- ZHU Xuening. Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals of the Fuyang River in Handan[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021.
- Alves D D, Riegel R P, Klauck C R, et al. Source apportionment of metallic elements in urban atmospheric particulate matter and

assessment of its water-soluble fraction toxicity[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(11); 12202–12214.

- Chai N, Yi X, Xiao J, et al. Spatiotemporal variations, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in the Fen River[J]. Science of the Total Environment, 2021, 757: 143882–143892.
- Kumar B, Singh U K. Source apportionment of heavy metals and their ecological risk in a tropical river basin system[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(25): 25443–25457.
- Liu C W, Lin K H, Kuo Y M. Application of factor analysis in the assessment of ground water quality in a black foot disease area in Taiwan[J]. Science Total Environmental, 2003, 313; 77–89.
- Shil S, Singh K. Health risk assessment and spatial variations of dissolved heavy metals and metalloids in a tropical river basin system[J]. Ecological Indicators, 2019.
- Xiao J, Wang L, Deng L, et al. Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 2004–2012.
- Yang X H, WU P B, YIN A J, et al. Distribution and source analysis of heavy metals in soils and sediments of Yueqing Bay Basin, East China Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 115(12): 489–497.