

新寨河流域矿井水对环境污染影响及其治理

常璐凡, 房银祥, 孙 辉

河北工程大学, 地球科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2023年9月7日; 录用日期: 2023年10月5日; 发布日期: 2023年10月16日

摘 要

新寨河长期受到煤矿废水污染, 污染源主要是开采煤矿和关闭的无主矿井等产生的污水, 无主矿井酸性废水长期肆意流淌, 成为新寨河的主要污染源之一。近年来, 新寨河还受其源头下山镇土壤障碍层“含煤岩系”地层污染、小城镇生活污染以及农村面源污染等各种因素影响, 河道水质污染严重, 水体内观察不到有生命的物种, 沿河寸草不生, 整体呈黄色, 出现了“锈水”“黄水”景象, 河床沉积有黄褐色物质。本文主要研究新寨河流域酸性废水对环境污染的影响并提出治理方案。

关键词

酸性废水, 矿井水, 环境污染, 治理

Impact of Mine Water on Environmental Pollution in Xinzhai River Basin and Its Treatment

Lufan Chang, Yinxiang Fang, Hui Sun

School of Earth Science and Engineering, Hebei Engineering University, Handan Hebei

Received: Sep. 7th, 2023; accepted: Oct. 5th, 2023; published: Oct. 16th, 2023

Abstract

Xinzhai River has been polluted by coal mine wastewater for a long time. The source of pollution is mainly the sewage produced by mining coal mines and closed ownerless mines. The acid wastewater of ownerless mines has been flowing freely for a long time, and it has become one of the main pollution sources of Xinzhai River. In recent years, the new village river also its source under the hills soil barriers “coal” formation pollution, small towns life pollution and rural non-point source pollution factors, river water pollution, water body observe the living species, no grass

along the river, the whole yellow, the “rust” “yellow”, river bed deposition with tan material. This paper mainly studies the influence of acidic wastewater on environmental pollution and puts forward the treatment scheme.

Keywords

Acid Wastewater, Mine Water, Environmental Pollution, Treatment

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

地下水是我国最为重要的水资源之一，与日常生产生活息息相关。随着矿山开采深度不断增加，矿区地下水污染程度日益严重，因此，矿区地下水污染防治与整治措施显得尤为重要。新寨河流域的地下水是整个兴仁地下水的一部分，共同组合成为整个地下水循环系统。见图 1 为新寨河流域(兴仁段)水系分布图。因此，做好新寨河流域地下水的治理工作，对于维护整个兴仁地区的地下水资源起到关键作用。

目前，地下水污染问题已逐渐被重视，国内外学者对地下水污染进行了深入研究，取得许多有益成果。但由于矿区施工环境及地质条件复杂，普通地下水污染处理措施模式化严重，可借鉴性较小。因此，本研究通过对新寨河的地下水进行水质分析及研究，并提出针对性的治理方案。

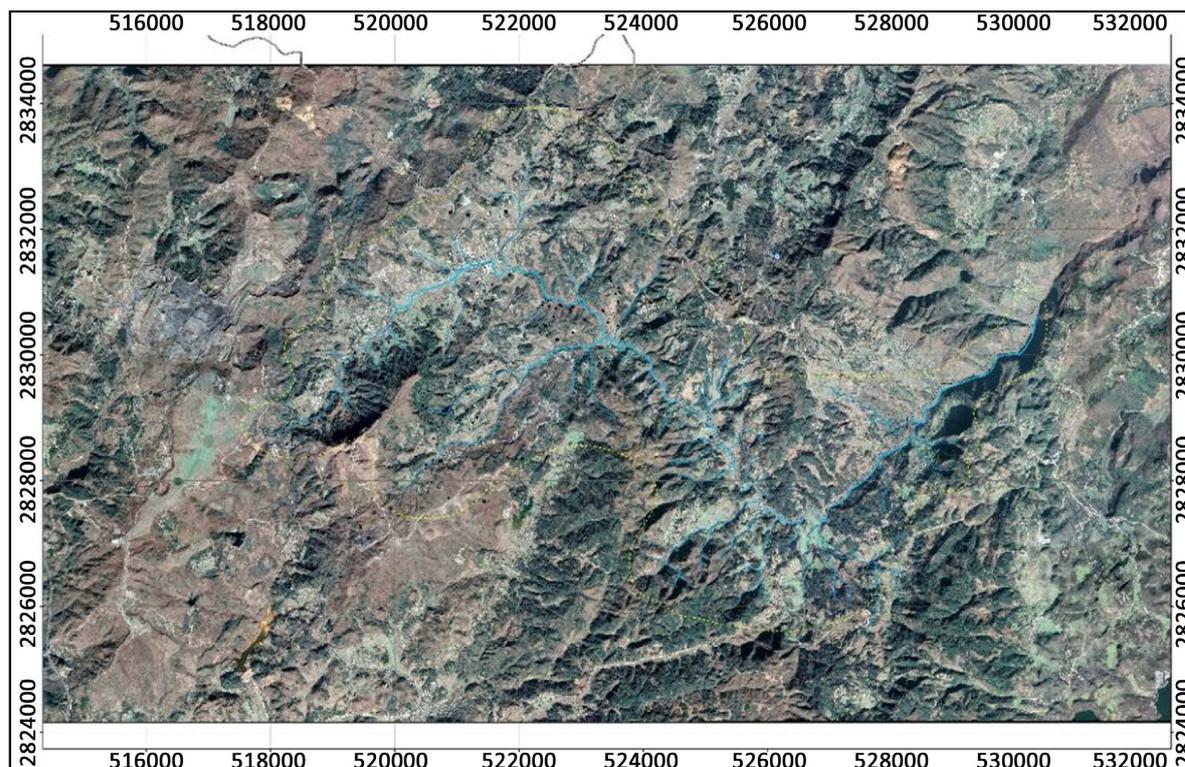


Figure 1. Distribution diagram of water system in Xinzhai River Basin (Xingren Section)

图 1. 新寨河流域(兴仁段)水系分布图

2. 区域自然地理概况

新寨河作为麻沙河一级主要支流,北盘江二级支流,发源于兴仁市下山镇黄家湾子(东经 105°11'、北纬 25°34', 高程 1470 m),向东北流至下山,转东南流,自茅坪起为兴仁市与晴隆县界河,经典母后再转东北向流,经麻窝幽至桐子林(东经 105°20'、北纬 25°27', 高程 835 m)于左岸汇入波秧河,源头距河口 27 km,主河长 23 km,落差 635 m,平均比降 27.6‰,流域面积 86.9 km²,其中兴仁市境内流域面积 42.1 km²,流域涉及 35 条支流(冲沟、溪沟)。

3. 新寨河流域煤矿酸性废水排放

3.1. 酸性废水排放方式

煤矿开采过程中往往会出现大量矿井水[1],新寨河流域水质污染主要来源之一是煤矿矿井水的排泄汇入,其排放方式分为矿井口出水点直接排放及煤矸石淋滤[2][3]。

1) 矿井口出水点直接排泄

主要为废弃(停产)矿井口(斜井、平硐、风井、排水巷等)出水点自流直接排泄和生产矿井的抽出偷排入[4],是新寨河流域污染的主要排泄方式,此类排泄方式受降雨影响较大,随季节性变化明显,丰水期水量明显增加,枯水期水量逐趋下降。

本次调查新寨河两岸共发现主要矿井水排泄点 13 个。

2) 煤矸石淋滤

本次调查共调查煤矸石堆放点 25 座,矸石总量为 126,600 m³。大部分就近杂乱堆放于井口附近。河道两侧也有煤矸石堆放。煤矸石在大气降水淋滤下产生酸性废水沿沟谷最终汇入河流,造成地表水体污染。

3.2. 酸性废水出水点调查及采样

治理区范围内共发现主要出水点 13 处,分布于新寨河及支流沿河两岸。图 2、图 3 为出水点实拍图。



Figure 2. Waste water outflow point of Xinzhai River source
图 2. 新寨河源头废水流出点



Figure 3. Water outlet from Xingliu Coal Mine
图 3. 兴柳煤矿矿井出水



Figure 4. Water sampling at the mine mouth
图 4. 矿井口水取样



Figure 5. Sampling of river water section
图 5. 河水断面取样

本次调查共设计煤矿废水水质监测点 31 点，图 4、图 5 为工程部分取样实拍图，采样时间处于当地

水文枯水期，河水流量和煤矿排水量较小；水质布点基本涵盖了新寨河流域内主要煤矿排水点，煤矿排水采样点位于排水口 10 m 以内，河流汇水断面的水质采样点。采样点统计见表 1、采样点分布见图 6。

Table 1. Statistical table of sampling points

表 1. 采样点统计表

序号	样品编号	描述	流量(m ³ /h)	备注	
1	2-S6	崩土山村水库入水口【不过新寨河】	15	入横涧河	
2	2-S8	永贵煤矿出水口【不过新寨河】	36		
3	3-S25	锦矿【洗煤厂】出水水池【不汇入】	0	不入新寨河	
4	3-S22	池塘水【不汇入】	0		
5	1-S9	庄子田村村民生活用水蓄水池【不汇入】	0		
6	3-S8	新寨河上游【荣阳上游 2 公里断面】	8	入新寨河上游	
7	3-S3	荣阳煤矿附近【断面】汇入前	45		
8	3-S2	荣阳煤矿	150		
9	3-S1	荣阳煤矿附近【断面】汇入后	200		
10	3-S18	黔山煤矿露天矿井排水	20		
11	3-S23	上游煤系岩壁渗水	0.2		
12	1-S4	下山村东南小河沟	30		
13	1-S5	下山村东南新寨河主河道小桥【断面】	250		
14	1-S6 (1-T1/1-T2)	漫滩【兴隆背后】	30		
15	1-S7	漫滩后新寨河【断面】	380		
16	1-S35	新寨河上游【断面】鼎锅田汇合上游	380		
17	1-S1	鼎锅田小溪流	30		
18	1-S2	鼎锅田支流汇合【断面】	510		
19	2-S2	兴柳煤矿	17		入新寨河支流海马河
20	2-S3	兴柳煤矿附近水坝	16		
21	2-S4	兴发寨附近农房背后	14		
22	2-S5	兴发寨附近矸石山	12		
23	2-S1	兴隆煤矿	40		
24	1-S36	新寨河支流【海马河】断面	120	新寨河支流汇入后	
25	1-S10	最北两支流的偏东侧支流【晴隆县】	15		
26	1-S37	新寨河【麻芋冲断面】中游	600		
27	1-S12	奔小康煤矿西侧山顶汇水【晴隆县】	35		
28	3-S14	新寨河支流【汇入前】保田村断面	100		
29	3-S15	新寨河中下游【汇入前】保田村断面			
30	3-S16	新寨河中下游【汇入后】保田村断面	1000		
31	1-S11 (1-D3)	保田村东大坝北侧，山泉水【晴隆县】	10		

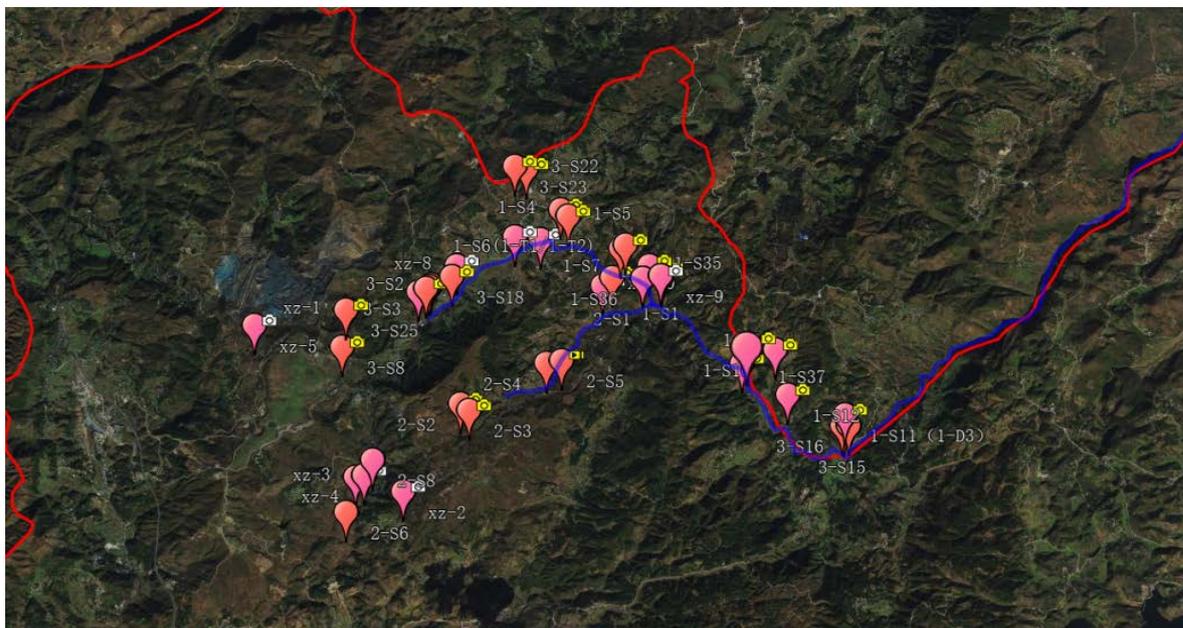


Figure 6. Distribution map of the sampling points
图 6. 采样点分布图

3.3. 样品检测

水样采集完成后立即送往青岛斯八达分析测试有限公司(中国科学院大学与中国科学院海洋研究所联合控股的国有科技创新型实验测试公司)进行检测, 测试项目有: pH 值、色、浑浊度、臭味、肉眼可见物、pH、氯离子、硫酸根、总硬度、溶解性总固体、全铁、硝酸根、亚硝酸根、氰化物、锌、硒、铜、六价铬、铅、汞、银、铊、金、铋、砷、镉、锰、COD、BOD5、挥发酚类。

3.4. 水质评价标准

本次对煤矿废水主要污染因子的评价参考了两个国家标准和一个贵州省地方标准, 分别为: 《煤炭工业污染物排放标准》(GB 20426-2006)中“煤炭工业废水有毒污染物排放限值”, “采煤废水污染物限值”中规定限值; 《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)地表水分类指标中III类水标准, 调查区河流水为地表水, 因此采用表中的水质标准; 《贵州省环境污染物排放标准》(DB52/864-2013)第一类污染物最高允许排放标准, 第二类污染源一级排放标准。

3.5. 煤矿酸性废水的水质特征

根据采集水样进行检测的结果分析, 从煤矿分布上来看, 盘兴煤矿、兴福煤矿、兴民煤矿、兴旺煤矿、四海煤矿、黔山煤矿、华宏煤矿、上洒格煤矿排水水体 pH 值和总铁多数超标, 对新寨河上游、新寨河支流(海马河)对新寨河的上游中游及下游至麻沙河段的 pH 和总铁贡献比较大。

综上, 调查区内煤矿排水多数未达标; pH 值、总铁及硫酸盐是造成煤矿废水超标的最主要的水质因子, 特别是总铁普遍超标两百多倍以上。

4. 煤矿废水排放的环境污染影响

4.1. 污染地表水

新寨河不作为当地地表水饮用水源地, 调查区内也不存在其他地表水作为饮用水源地, 因此调查区

地表水中的铁、氯离子、硫酸盐、硝酸盐、锰、铊、锑等指标的评价不宜参考《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补充项目标准限值及集中式生活饮用水地表水源地特定项目标准限值。综合考虑地表水和煤矿井水的关系,本次调查对地表水中的锑、铁、氯化物的指标采用煤矿污染物排放标准的评价标准,《贵州省环境污染物排放标准》(DB 52/864-2013)。

根据本次的水质测试结果,新寨河及其支流 12 个水质监测断面(3-S8, 3-S3, 3-S1, 1-S5, 1-S7, 1-S35, 1-S2, 1-S36, 1-S37, 3-S14, 3-S15, 3-S16),新寨河及其支流沿河水质检测点 19 个,共计 31 个水质检测样品, pH 值中有 11 个断面超标,分布在新寨河荣阳煤矿断面及其下游断面(3-S3)、新寨河下山村东南断面及其下游断面(3-S1)、新寨河兴隆煤矿山后漫滩后断面(1-S5)、新寨河支流海马河鼎锅田断面(1-S7)、新寨河鼎锅田汇入上游断面(1-S35)、新寨河鼎锅田汇入下游断面(1-S2)、新寨河支流海马河断面(1-S36)、新寨河麻芋冲断面(1-S37)、新寨河支流保田村断面(3-S14)、新寨河中下游汇入前保田村断面(3-S15)、新寨河中下游汇入后保田村断面(3-S16),也导致了新寨河下游水体 pH 值超标;总铁 12 个断面全部超标。

31 个水样品中 29 项检测项目,其中,检测项目 pH(无量纲)31 个检测样品有 5 个样品 pH 超标,除庄子田村村民生活用水蓄水池(1-S9),不汇入新寨河 pH = 6.36;新寨河上游荣阳煤矿上游 2 公里断面(3-S8) pH = 6.14;最北两支流的偏东侧支流(1-S10)晴隆县一侧, pH = 6.46;奔小康煤矿西侧山顶汇水(1-S12)晴隆县一侧, pH = 6.71;保田村东大坝北侧,山泉水(1-S11 (1-D3))晴隆县一侧, pH = 6.60。水样 pH 范围是 2.53~5.56,超过《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)表 1 地表水环境质量标准基本项目 pH 的限值。氢离子浓度最高超过 pH = 6 的标准值 2951.2092 倍。

检测项目总 Fe, 31 个检测样品有 3 个样品,庄子田村村民生活用水蓄水池(1-S9),不汇入新寨河(总 Fe = 0.55 mg/L);最北两支流的偏东侧支流(1-S10),晴隆县一侧(总 Fe = 0.15 mg/L);保田村东大坝北侧山泉水(1-S11 (1-D3)),晴隆县一侧(总 Fe = 0.48 mg/L)。《贵州省环境污染物排放标准》(DB52/864-2013)第二类污染源一级排放标准(按直接排入地表水体的污水执行一级排放标准,1 mg/L)判定,其他均不合格,最高超标 253 倍。

检测项目 Zn, 四个样品超过 III 类地表水标准值 1 mg/L,具体水质判定标准是兴柳煤矿出水点(2-S2)IV 类、兴柳煤矿附近水坝(2-S3)劣 V 类、兴发寨附近农房背后出水点(2-S4) IV 类、兴发寨附近矸石山出水点(2-S5) IV 类。这四个水样的 Zn 超标,这些水样主要是在新寨河支流(海马河),主要是分布在小尖山的靠近海马河一侧。水质 pH 的范围是 2.68~2.87,其中兴柳煤矿附近水坝(2-S3)浓度最高 2.2 mg/L,主要是兴柳煤矿附近水坝水源是上游煤矸石堆的渗滤液在酸性环境中渗滤出水。这四个水样都是小尖山山顶浅层煤层渗滤出水。

挥发酚检测项目只要(1-S5)样品超过 III 类地表水标准值 0.005 mg/L,具体水质判定标准是 IV 类。下山村东南新寨河主河道小桥断面(1-S5)初步判断是下山镇部分木材加工厂防腐废水外排造成。

检测项目锑,其中样品中最高值是 0.52 ug/L,所有样品均未超过《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)表 3 集中式生活饮用水地表水源地特定项目(锑及其化合物(以锑计) = 0.005 mg/L)标准。更加不会超过《贵州省环境污染物排放标准》(DB52/864-2013)第一类污染物最高允许排放(锑及其化合物(以锑计) = 0.5 mg/L)标准。

其余检测 24 个项目中颜色、气味、超标倍数、色度(倍)、浑浊度(NTU)、肉眼可见物、溶解性总固体、COD、BOD₅、总硬度(含量以 CaCO₃ 计)、氯离子、硫酸盐、NO₂⁻、NO₃⁻、硒、铅、银、铊、砷、镉、Cu、Mn、Hg、六价铬浓度、氰化物、等水质因子均未超标。

从水质检测结果分析,认为流域内首要污染源是 pH 值,其次是总铁,总铁最高超标 252 倍,煤矿外排的高铁含量酸性废水是造成流域内水体、河床和岩土呈现红褐色的直接祸首[5]。新寨河流域水质变化见图 7、图 8。

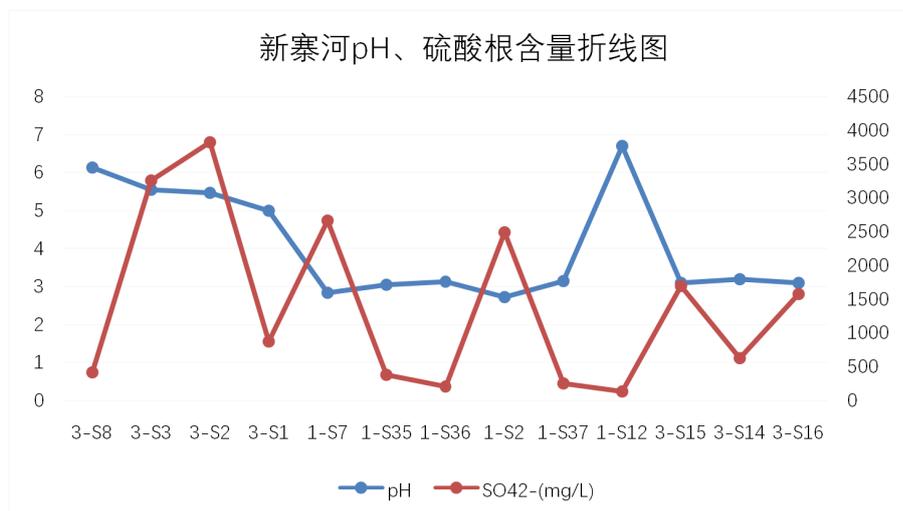


Figure 7. pH, sulfate root of Xinzhai River section

图 7. 新寨河断面 pH、硫酸根

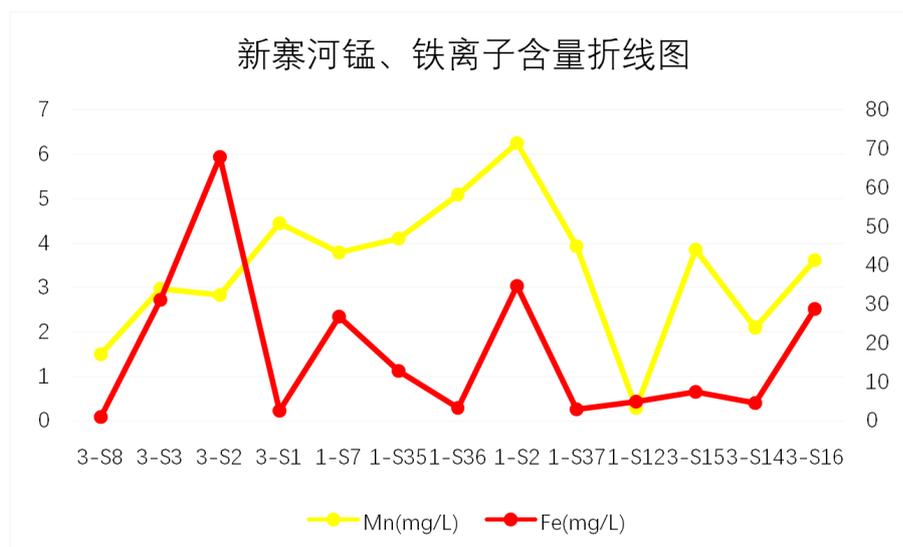


Figure 8. Iron and manganese ion content in the Xinzhai River section

图 8. 新寨河断面铁、锰离子含量

4.2. 污染地下水

闭坑煤矿采空区为酸性水产生和储存提供空间；通过泉水污染动态特征，可初步确定，研究区降雨时，地下水位升高，下水沿采空区附近构造薄弱部位或底板破坏带迅速灌入采空区，与采空区酸性水发生水力联系，降雨结束，混合后的酸性水沿泥盆地下水进水通道涌出，迅速补给地下水及泉，地下水及泉水发生污染[6]，泉水流到地表对地表水造成污染。治理区属于典型的喀斯特地貌区，溶洞、暗河、溶蚀管道极为发育，煤矿酸性废水极易通过岩溶通道、断层与未受污染的含水层联通，造成其他含水层的水体串联污染。

4.3. 煤炭开采对生态环境影响

经实际调查发现，调查区由于受到煤矿开采的影响，使得区内的河流流量、泉、井流量都受到影响，主要表现井、泉的出水量逐年减小，影响了当地居民的生产与生活。新寨河流域煤矿开采方式一般是地

下开采, 地下开采破坏了原有的力学平衡[7] [8], 使得上覆岩层产生移动变形和断裂破坏[9] [10] [11]。梁山组含煤地层上覆基岩为栖霞组岩溶含水层, 富水性中等, 在煤层开采过程中, 这些含水层发生位移, 使地下水流场变化[12]。当导水裂隙带波及到含水层时, 地下水沿采动裂隙流向采空区, 造成岩土体中水位下降[13] [14] [15]。

5. 治理方案

根据前期各煤矿治理项目实地调查, 本次拟选出源头封堵、关键通道充填及末端处理三类十二项工程技术。

5.1. 源头封堵

该法的总原则是控制大气降水的入渗量、减少地表水的对矿井入渗补给量。主要由以下几种方法:

1) 源头地表洞、隙充填

对煤矿采空区顶部地表存在的落水洞、裂隙、地裂缝等矿井充水通道进行物料充填, 减少矿井补给水量, 最大限度使得大气降水转化为地表径流; 并适当通过工程手段引导地表径流至河道之中。

2) 源头地表排水疏浚

区域内第四系厚度 1~5 m, 绝大部分地段植被覆盖茂密, 大气降水容易被第四系和枯枝落叶所截留, 进而渗入地下。地表洞、隙充填工程完成后, 为了缩短大气降水在地表的停滞时间, 可对沟谷谷底进行疏浚, 或在主要沟谷、斜坡建设人工渠道, 使得大气降水快速形成地表径流排入新寨河, 最大限度减少大气降水渗入地下, 进入煤矿采空区。

3) 煤系地层边坡固化绿化

① 客土喷播: 客土喷播技术是一项新型的岩质边坡绿化技术, 主要利用机械搅拌设备将客土、种子、缓释肥、粘结剂、保水剂、稳定剂等充分混匀, 在待修复坡面上锚杆挂网, 然后利用泵和压缩空气机将基材垂直喷附到坡壁上, 形成具有一定厚度的喷附层。

② 植被混凝土: 采用特定的混凝土配方和种子配方, 将植生土、胶结剂、绿化剂、有机质、腐殖质、肥料、保水剂、草种等基础材料混匀, 然后浇灌于坡壁以起到边坡防护与绿化的作用。植被混凝土所用的胶结剂为普通硅酸盐水泥, 将其与特制的绿化剂配合使用, 能够在岩坡表面形成具有大量细密孔隙的植被生长基质, 该生长基质既能像普通混凝土那样稳固边坡, 又因为它独特的多孔结构, 可以加快水分和养分的运输速率, 营养物质供应顺畅, 植被生长迅速, 对裸岩边坡的治理效果良好。

③ 生态植被毯: 植被毯适用于坡度较缓的裸露边坡, 能够有效减少地表径流和降水对坡面的冲刷, 减少水土流失, 其中含有的壤土和营养物质可以有效促进区域植被的立地生长, 植被毯生产成本低、修复效果好, 目前应用十分广泛。

5.2. 关键通道充填

1) 通道充填封堵: 矿井水通过天然岩溶裂隙以及煤矿生产期间实施的钻孔、煤系地层裂隙泄水。改造目的是防止矿井水经过流动通道进入岩溶及裂隙通道, 由于通道的不易确定位置, 采用矿井灌浆, 浆液比重大于水的比重优先向底板及下方通道流动, 形成通道封堵改造, 封堵矿井水。

2) 废弃矿井口封闭: 对废弃矿洞进行采取土石回填或对井口进行钢筋混凝土封堵等行之有效措施。改变矿井内氧化还原条件, 进而减少酸性矿井水形成量, 同时封堵矿井水流出通道, 并在显眼位置设立永久性明显警示牌。

3) 侧向断面帷幕阻截: 通道充填存在灌浆液干缩问题, 一般会有部分流体未达到 100% 封堵, 为将此部分未封堵住的污染水再度阻隔, 在出水口近端查明的污染通道或地下径流断面实施钻孔帷幕灌浆。

4) 采空区顶板灌浆隔离；新寨河流域附近煤矿外排水全部由于降雨下渗补充水量，对于煤层采动后由于应力释放遭到破坏的煤层顶板进行灌浆，阻止降雨下渗进入采空区，减弱其动力作用。

5.3. 末端处理

对矿山酸性废水处理采用末端处理的技术方法，主要运用人工湿地处理的方法。

人工湿地类似于天然湿地或沼泽，其中填充有如砂砾或砂子等颗粒基质，表面种植有水生植物，可以处理含有硫酸盐及各种金属(Fe、Mn、As、Al、Cu 等)的碱性、中性及酸性的废水，其独特性体现为湿地土壤和基质、特有的水文条件和湿地生物。其去除机理主要包括以下几个方面：(a) 由 Fe 和 Mn 氧化细菌促进的金属氧化，氢氧化物絮凝物形成，沉淀，痕量金属与氢氧化铁和 Mn 氧化物的共沉淀；(b) 有机质层中金属还原和金属硫化物的形成；(c) 与有机物络合；(d) 土壤-植物通过吸附、过滤作用将酸性矿井水中的悬浮物截留下来，并沉积在基质中；(f) 直接被植物吸收。

6. 结论

实地调查中，几乎所有煤矿直接排水均存在污染，矿井排水酸度较高，pH 一般在 2~4 之间，硫酸根离子含量最高达 6000 mg/L 以上，锰含量最高达 50 mg/L 以上，铁离子的检测结果最高为 253 mg/L，排水底部底泥或岩土均呈现红褐色，系水体中铁及其化合物沉淀所致。

调查区内的煤矿废水绝大部分呈酸性，煤矿酸性废水外排是导致河流污染，pH 值、硫酸盐、总铁和镉超标的最主要的直接原因。

通过对新寨河流域矿井水对环境污染影响及其治理的研究，有针对性地提出了关于酸性矿井水处理与地下水防控控制、污染物合理放置、填充废弃矿井及采空区等地下水污染治理措施，为治理新寨河流域地下水污染、修复矿山生态环境提供有效建议。

参考文献

- [1] 王蜜. 煤矿矿井水处理存在问题及对策[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022, 360(19): 127-129.
- [2] 张亚兵. 煤矿采区三维地震资料联片解释[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [3] 李曦滨. 煤矿酸性废水污染综合治理技术与展望——以贵州省鱼洞河流域综合治理技术应用研究为例[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(7): 48-53+93.
- [4] 任虎俊. 废弃煤矿岩溶地下水污染机理及防控研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [5] 陈亚洲. 闭坑煤矿对喀斯特地区泉水污染研究——以龙洞泉污染为例[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [6] 付艳华, 胡振琪, 肖武, 等. 高潜水位煤矿区采煤沉陷湿地及其生态治理[J]. 湿地科学, 2016, 14(5): 671-676.
- [7] 韩飞. 地下开采诱发地表移动规律研究[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(7): 16-18+22.
- [8] 刘爽. 煤矿矿井水处理技术及资源化综合利用[J]. 资源节约与环保, 2022(8): 104-107.
- [9] 韩程辉. 矿山开采对地下水资源的影响及水质评价[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2005.
- [10] 李岚. 煤炭保水开采技术探究[J]. 露天采矿技术, 2009(5): 14-16+19.
- [11] 魏丹峰, 张春辉, 赵振. 煤炭开采与保水开采技术[J]. 能源与环保, 2021, 43(10): 306-310.
- [12] 陈芳, 张劲满, 徐良骥, 李杰卫, 徐瑞瑞, 张坤. 厚松散含水层失水沉降相似模拟实验研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(1): 78-85.
- [13] 刘靖. 邻水县西区煤矿开采对环境影响及煤矿废水资源化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [14] 栾崧, 张发旺. 矿井开采对地下水位的影响[C]//中国地质学会. 中国地质学会 2015 学术年会论文摘要汇编(下册). 2015: 126-130.
- [15] 梁庆华. 厚冲积层地表沉陷数值模拟及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2006.