

滇东北毛坪铅锌矿岩溶含水层富水性评价模型及水害治理

袁世冲, 韩贵雷, 李贵仁, 孙帮涛, 章爱卫, 石佳宾, 付 毅

Water abundance assessment model development and water hazard control strategies for karst aquifers in metal mines: A case study of the Maoping lead zinc mine in Northeast Yunnan, China

YUAN Shichong, HAN Guilei, LI Guiren, SUN Bangtao, ZHANG Aiwei, SHI Jiabin, and FU Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202503011>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

矿山水土污染与防治对策研究

A discussion of soil and water pollution and control countermeasures in mining area of China

张进德, 田磊, 裴圣良 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 157-163

基于水力层析法的某煤矿承压含水层叠加放水试验分析

An analysis of sequential water releasing tests of the confined aquifers in a coal mine based on hydraulic tomography

赵瑞珏, 毛德强, 刘再斌, 姬中奎, 曹祖宝 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 1-9

基于广义径向流模型的非均质孔隙含水层井流试验分析

Pumping tests analyses of a heterogeneous pore aquifer based on the Generalized Radial Flow model

邓祺文, 陈刚, 郑可, 施雯, 胡成 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 17-23

云应盆地东北部含水层结构特征及地下水转化模式

Characteristics of the aquifer structure and groundwater conversion model in the northeastern Yuning Basin

常威, 黄琨, 胡成, 王清, 王宁涛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 9-15

地面沉降对含水层参数及给水能力的影响研究

A study of the influence of land subsidence on hydraulic parameters and water supply capacity

刘蓉, 曹国亮, 赵勇, 陆垂裕, 孙青言, 严聆嘉, 彭鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 47-54

桂海碑林摩崖石刻水害成因分析及防治对策

Cause analysis and control measures of water damages in Guihai's stone inscription

刘硕, 白雪亮, 张彬, 张中俭, 孙进忠, 杨文府 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 126-133



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202503011

袁世冲, 韩贵雷, 李贵仁, 等. 滇东北毛坪铅锌矿岩溶含水层富水性评价模型及水害治理[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 121-133.

YUAN Shichong, HAN Guilei, LI Guiren, et al. Water abundance assessment model development and water hazard control strategies for karst aquifers in metal mines: A case study of the Maoping lead zinc mine in Northeast Yunnan, China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 121-133.

滇东北毛坪铅锌矿岩溶含水层富水性评价模型及 水害治理

袁世冲^{1,2,3}, 韩贵雷^{4,5,6}, 李贵仁^{4,5}, 孙帮涛⁷, 章爱卫^{4,5}, 石佳宾^{4,5}, 付 毅⁷

(1. 河北地质大学城市地质与工程学院, 河北 石家庄 050031; 2. 京津冀城市群地下空间智能探测与装备重点实验室, 河北 石家庄 050031; 3. 河北省地下人工环境智慧开发与管控技术创新中心, 河北 石家庄 050031; 4. 华北有色工程勘察院有限公司, 河北 石家庄 050021; 5. 自然资源部金属矿山地下水灾害防治工程技术创新中心, 河北 石家庄 050021; 6. 中国矿业大学深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 7. 彝良驰宏矿业有限公司, 云南 昭通 657602)

摘要: 针对岩溶区金属矿山仅依据钻孔单位涌水量划分岩溶含水层富水性的缺陷, 以滇东北典型深采矿山毛坪铅锌矿为例, 在充分考虑其水文地质结构特征的基础上, 从渗流场特征、含水层特征、构造发育特征 3 方面, 构建了包含渗透系数、水位降深、单位涌水量、含水层有效厚度、水样溶解性总固体、断层发育密度、冲洗液消耗量等 7 个评价指标的层次结构评价模型。采用层次分析法计算得到了各评价指标的主观权重, 并在 ArcGIS 系统内根据富水性指数将研究区划分为弱富水区, 较弱富水区, 中等富水区, 较强富水区, 强富水区 5 个区域。评价结果表明: 毛坪铅锌矿石门坎背斜西翼岩溶含水层的富水性整体较强; 石门坎背斜轴部岩溶含水层的富水性呈现出上强下弱的特点; 石门坎背斜东翼岩溶含水层的富水性总体偏弱, 且浅部岩溶含水层的富水性向东逐渐减弱。针对金属矿山采掘揭露局部强富水区诱发高势能突水灾害, 提出了“骨料灌注→充填注浆→水源封堵”的被动治理方式; 以及针对区域强富水含水层的“物探先行→钻探验证→区域超前帷幕注浆”的主动治理方式。研究结果对于指导金属矿山深部采掘空间布置和制订疏放水方案具有重要的参考意义。

关键词: 金属矿山; 岩溶含水层; 富水性评价; 层次分析法; 水害治理方式; 矿山帷幕注浆

中图分类号: TD745; P641.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)04-0121-13

Water abundance assessment model development and water hazard control strategies for karst aquifers in metal mines: A case study of the Maoping lead zinc mine in Northeast Yunnan, China

YUAN Shichong^{1,2,3}, HAN Guilei^{4,5,6}, LI Guiren^{4,5}, SUN Bangtao⁷, ZHANG Aiwei^{4,5}, SHI Jiabin^{4,5}, FU Yi⁷

(1. School of Urban Geology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Detection and Equipment for Underground Space of Beijing-Tianjin-Hebei Urban

收稿日期: 2025-03-12; 修订日期: 2025-05-21

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172293); 河北省教育厅科学研究项目(BJ2025131); 河北地质大学国家预研项目(KY2025QN04); 河北省重点研发计划项目(21373901D)

第一作者: 袁世冲(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事矿山工程地质与地质灾害研究工作。E-mail: yuanshichong@hgu.edu.cn

通讯作者: 付毅(1991—), 男, 学士, 工程师, 主要从事矿山防治水及水文地质技术研究工作。E-mail: 459388319@qq.com

- Agglomeration, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 3. Hebei Technology Innovation Center for Intelligent Development and Control of Underground Built Environment, Shijiazhuang, Hebei 050031, China;*
- 4. North China Engineering Investigation Institute Co. Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050021, China;*
- 5. Technology Innovation Center for Groundwater Disaster Prevention and Control Engineering for Metal Mines, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 6. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;*
- 7. Yiliang Chihong Mining Co. Ltd., Zhaotong, Yunnan 657602, China)*

Abstract: To address the limitations of relying solely on borehole-specific water inflow rates to evaluate the water abundance of karst aquifers in metal mines, this study presented a comprehensive assessment in the Maoping lead zinc mine in Northeastern Yunnan, a typical deep karst mining area, using a hierarchical evaluation model for karst aquifer water abundance. This model integrated three key dimensions: Seepage field characteristics (permeability coefficient, water level drawdown, and unit water inflow), aquifer characteristics (effective thickness of aquifer and total dissolved solids in water samples), and structural development characteristics (fault density and drilling fluid loss). Subjective weights for each evaluation indicator were determined using the analytic hierarchy process (AHP). Using ArcGIS platform, the study area was categorized into five distinct water-richness zones based on the water abundance index thresholds: very low water-rich area, low water-rich area, moderate water-rich area, high water-rich area, and very high water-rich area. The evaluation results demonstrate that the karst aquifer in the western wing of the Shimenkan anticline, located at the Maoping lead zinc mine in Northeastern Yunnan, exhibits high overall water abundance. The karst aquifer in the axial zone of the Shimenkan anticline exhibits significant vertical zonation in water abundance, characterized by high values in the upper strata and low values in the lower strata. The water abundance of the karst aquifer in the eastern wing of the Shimenkan anticline is generally weak, and the water abundance of the shallow karst aquifer gradually weakens towards the east. The passive governance mode of “aggregate injection→filling grouting→water source blockage” was used to address the high potential water inrush disasters induced by the exposure of local strong water-rich areas in metal mines; the active governance mode of “geophysical exploration first→drilling verification→regional advanced curtain grouting” for strong water-rich aquifers in the region. This study offers critical technical guidance for optimizing deep mine layout and developing effective drainage strategies in karst metal mining regions.

Keywords: metal mines; karst aquifer; water abundance evaluation; analytic hierarchy process; water hazard control model; mine curtain grouting

我国滇东北地区的金属矿产资源储量丰富多样,具有重要的经济价值和战略意义^[1-2]。该地区也是我国重要的铅锌矿集区之一,主要的铅锌矿容矿地层有中元古界昆阳群黑山头组(Pt_2hs)、下寒武统渔户村组(ϵ_1y)、上泥盆统宰格组(D_3zg)、下石炭统摆佐组(C_1b)、下二叠统茅口组(P_1m)等,容矿地层绝大多数为碳酸盐岩建造^[3-5]。容矿碳酸盐岩地层在地下水的长期溶蚀和侵蚀作用下,通常会发育非均质性、各向异性强烈的岩溶现象,尺度从小到大可以划分为溶孔、溶隙、溶洞、地下暗河等^[6-8]。岩溶发育的强烈非均质性和各向异性会造成地层富水性的巨大差异,一般在同一

岩溶含水层同一标高范围内,或者同一地段,甚至相距几米,富水性可相差数十倍至数百倍^[9-11]。这种地质现象给金属矿山深部开采时的疏排水设计及采掘工作面探放水方案制订带来巨大的挑战。

目前,金属矿山地层富水性等级划分的依据主要是钻孔的单位涌水量(q),即当 $q \leq 0.1 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 时为弱富水性,当 $0.1 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}) < q \leq 1.0 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 时为中等富水性,当 $q > 1.0 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 时为强富水性^[12]。但是,这种依据单一指标的含水层富水性的评价方法对于岩溶发育不均一地层具有明显的缺陷,不能全面反映出地层真实的富水性强弱特征^[13-15]。岩溶含水层富水性评价

应该综合考虑多源地质因素,包括岩性特征、构造发育、水文地质条件等,才可以更加准确地反映含水层的富水性特征^[16-18]。多源化的地质数据之间通常存在复杂的相互作用和相互影响。通过构建融合多源数据的评价模型,进行综合分析,揭示数据之间的内在联系和规律。这种综合性分析有助于更准确地评估岩溶含水层的富水性特征,提高评价的准确性和可靠性。融合多源化地质数据的评价模型相较于单因子的分类方法具有更加全面、综合和科学的优势^[19-20]。近些年来,国内外众多学者构建了许多岩溶含水层富水性的综合评价模型。如,武强等^[21]提出了煤层顶板含水层富水性的主控因素,在GIS环境下对其按权重进行叠加,最后按照含水层的富水性指数进行分区。李盼盼等^[22]构建了侏罗系煤田洛河组含水层富水性评价的模糊层次组合赋权模型,评价结果相较于传统方法更加准确和可靠。李超峰^[23]提出了一种基于导水系数的含水层富水性分级方法,将原来的4级进一步细化为7级。薛森等^[24]建立了煤层顶板承压含水层富水性的FAHP-GRA评价模型,并在鄂尔多斯盆地的转龙湾煤矿得到了较好的验证结果。此外,矿山含水层富水性评价模型还有AHP-CRITIC^[25]、TOPSIS^[26]、FAHP-变异系数法^[27]等。这些评价模型都是通过融合多源地质数据得到的,评价结果相较于传统的钻孔单位涌水量法更加精确^[28]。但是,上述评价模型大多是运用在煤矿顶板覆岩含水层富水性评价中,在岩溶发育不均一性强烈的金属矿山含水层中还没有适用的多源数据融合富水性评价模型。

本文以滇东北典型深部开采大水矿山毛坪铅锌矿为例,在系统分析矿山地层岩性、构造发育、工程与水文地质条件的基础上,构建了融合多源数据的层次分析结构模型,得到了毛坪铅锌矿浅部和深部岩溶含水层的富水性5级分区图。通过井下现场实际调查对评价结果进行了验证,并结合毛坪铅锌矿的工程实践经验确定了主动和被动的的水害治理方式。

1 研究区概况

1.1 工程地质条件

滇东北毛坪铅锌矿处于区域SN与NE向构造带的复合部位,毛坪压扭性断裂和石门坎倒转背斜构成了研究区的主干构造格架^[29]。矿区面积约为8.27 km²。毛坪压扭性断裂位于矿区西北边缘,呈NE10°~15°展布,倾向SE,倾角为60°~75°,断距为100~300 m,断层破碎带宽度为10~40 m。石门坎背斜东翼产状为

90°~150°∠12°~25°,西翼产状为270°~340°∠40°~85°,北端在毛坪矿区一带西翼地层直立或倒转,南端被洛泽河断裂所切截,是毛坪铅锌矿主要的控矿构造。矿区出露的地层主要有泥盆系、石炭系、二叠系及第四系地层,如图1所示。

1.2 水文地质条件

受多期次构造作用控制,矿区岩溶含水层透水性、富水性的空间分布具有强烈的不均一性。在垂向上表现为强—弱—强的分布特征,中部弱含水层厚度大,构成相对隔水层,如图2所示。因此,将矿区地下含水系统划分为上部含水子系统和下部含水子系统^[30]。石门坎背斜西翼受F1、F26、F27、F35等多条断层影响,形成垂向构造裂隙含水带,造成下部含水子系统承压水隔水顶板受到破坏。下部含水子系统承压水越流补给上部含水子系统,地下水排泄降压,形成低水压带,水头标高在720~750 m。石门坎背斜东翼下部含水子系统顶部分布30~40 m厚相对完整的白云岩,透水性、富水性均较弱,构成下部含水子系统承压水顶板,下部含水子系统承压水越流补给上部含水子系统,二者间水力联系较弱。上、下含水子系统之间既相对独立,又相互联系,构成一个类似“π”型的统一地下含水系统,构建的水文地质结构概念模型如图3所示。根据矿山水文地质结构概念模型,矿区600 m标高以上划分为上部含水子系统,主要为潜水含水层;600 m标高以下划分为下部含水子系统,主要为承压水含水层。

1.3 岩溶发育特征

滇东北毛坪铅锌矿位于四川盆地与云贵高原的连接地带,山脉走向大致与区域构造线一致,多为北东向的顺向山,属于高原岩溶侵蚀山地,受喜马拉雅山造山运动的影响,高原地形呈现上升态势,河流强烈切割,形成现今的高原峡谷。根据地形、地貌特征,本区可分高原中山构造侵蚀型、高原中山构造侵蚀峡谷型、高原中山构造溶蚀残丘型3种类型,如图4(a)所示。

高原中山构造侵蚀型主要分布于研究区的东北部、西北部一带,由二叠系峨眉山玄武岩、三叠系砂页岩组成,山体呈北东向延伸,海拔1 200~1 500 m,“V”型谷发育,大气降雨入渗条件较差。高原中山构造侵蚀峡谷型主要分布于洛泽河两岸,是岩溶水的排泄带,西岸斜坡稍缓,东岸陡峻。高原中山构造溶蚀残丘型分布于研究区东部的献鸡、老官寨一带,海拔1 300~1 800 m,地势起伏20~50 m,是残留的溶蚀高原面。

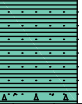
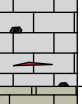
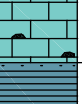
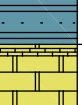
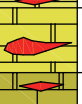
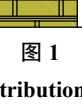
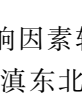
地 层				代 号	层 序	柱 状 图	厚 度 /m	岩 性 描 述	矿 产
界	系	统	组						
新生界	第四系			Q	15		0 ~ 5	褐黄色坡积残积砂砾、黏土碎屑	
古 生 界	二 叠 系	上 统	峨眉山玄武岩组	P ₂ β	14		不详	深灰色厚层状玄武岩，中上部为杏仁状、暗绿色斑状玄武岩	
		下 统	栖霞组茅口组	P ₁ q+m	13		265 ~ 405	上至顶部为青灰色中厚层状细晶灰岩，间夹沥青质灰岩，下部灰色厚层状致密灰岩，含早板珊瑚费伯虫、新希氏蜒化石	
			梁山组	P ₁ l	12		24 ~ 50	紫、米黄色砂页岩，上部夹0~5 m烟煤，中部夹绿色中厚层状凝灰岩，底部为3~5 m杂色灰质角砾岩	烟煤
	石 炭 系	威 宁 统	上 含 矿 组	C ₂ w ³	11		85 ~ 135	灰色中厚层状灰岩，夹白色燃石条带，下部5~8 m为粗晶白云岩，中下部夹透镜状铅锌矿	
				C ₂ w ²⁻³	10		35 ~ 62	浅灰、灰色中厚层状灰岩与细晶白云岩互层，中上部夹脉状、透镜状铅锌矿为III、III-1、HI、SI体赋存层位	III III-1 HI SI 矿体
				C ₂ w ²⁻²	9		34 ~ 72	浅灰、灰白色中厚层状细晶灰岩，中部夹1~2 m厚绿色页岩，中下部为II矿体产出层位	铅锌 II 矿体
				C ₂ w ²⁻¹	8		15 ~ 40	灰色薄层状灰岩与细晶白云岩互层，中部为II-1、X1矿体产出层位	II-1 X1 矿体
				C ₂ w ¹	7		52 ~ 90	灰、灰赭红色厚层状细-中晶白云岩，中下部夹灰绿色页岩及生物灰岩薄层，上部夹透镜状铅锌矿	
		丰 宁 统	灰 页 岩 组	C ₁ f ³	6		50 ~ 105	深灰色中厚层状结晶灰岩，夹绿色钙质页岩薄层，底部为灰黑泥质灰岩夹炭质页岩薄层	
				C ₁ f ²	5		26 ~ 60	灰、青灰色中-厚层状细晶灰岩，沿层分布有黑色燧石条带及团块，含珊瑚等化石	
			万寿山组	C ₁ f ¹	4		40 ~ 110	黑色炭质页岩夹薄层砂岩，其中见无烟煤3~5层，底部为中厚层状黄褐色石英砂岩	无烟煤
	泥 盆 系	上 宰 格 统	组	D ₃ zg ³	3		15 ~ 50	浅灰白色-灰色中-厚层状粗晶白云岩夹1~20 cm厚的薄层炭质页岩，上部夹2~5 m结晶灰岩，I~9号矿体赋存于底部	铅锌 I-9 矿体
				D ₃ zg ²	2		49 ~ 50	灰白色、灰色厚层状细-粗晶白云岩，中部为矿体产出层位	铅锌 I矿带
				D ₃ zg ¹	1		>60	灰白色中厚层状粗晶白云岩，层间夹薄层炭质页岩，晶洞发育，上部夹透镜状小矿体	

图 1 矿区地层分布、岩性与矿体特征

Fig. 1 Stratigraphic distribution, lithology, and ore body characteristics in the mining area

2 岩溶含水层富水性评价模型

2.1 评价指标体系建立

金属矿山岩溶含水层富水性的影响因素较多，各因素之间耦合关系复杂。在充分考虑滇东北地区水文地质结构特征的基础上，从渗流场特征(B1)、含水

层特征(B2)、构造发育特征(B3)3个方面，构建了如图5所示的层次结构评价模型，共包含7个评价指标，分别为渗透系数(C1)、水位降深(C2)、单位涌水量(C3)、含水层有效厚度(C4)、水样溶解性总固体(C5)、断层发育密度(C6)、冲洗液消耗量(C7)。

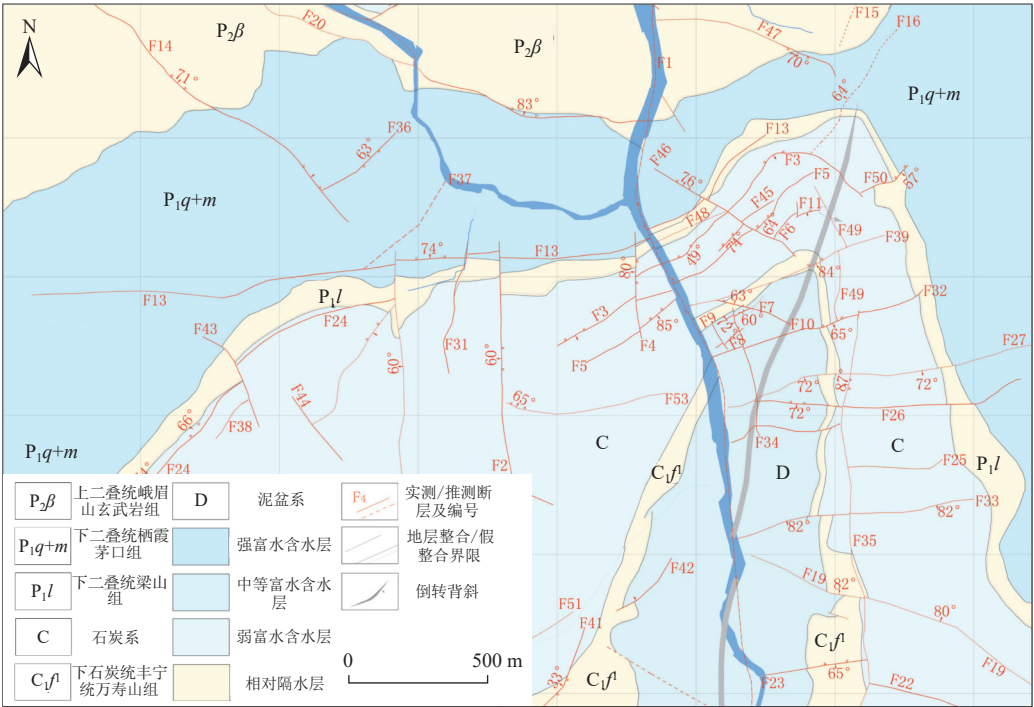


图 2 研究区水文地质与构造发育特征

Fig. 2 Hydrogeological and structural development characteristics in the study area

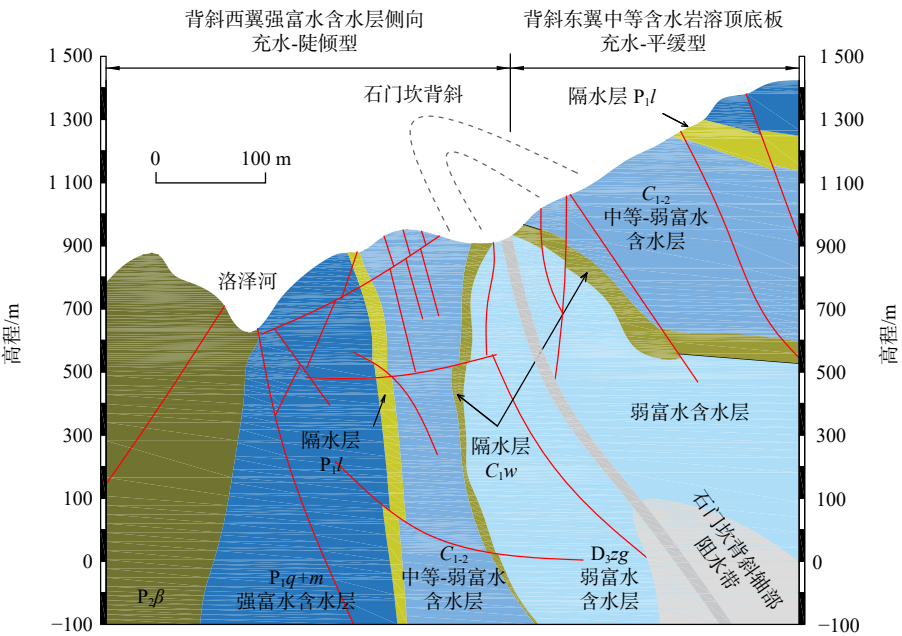


图 3 矿区水文地质结构概念模型

Fig. 3 Conceptual model of hydrogeological structure in the mining area

渗流场特征可以直接反映金属矿山地下水的赋存与流动状态,影响含水层的补给、径流、排泄能力;含水层特征是反映金属矿山含水层富水性的重要物质基础;构造发育特征是金属矿山水文地质结构特征的重要表征元素。其中,渗透系数是反映岩体空隙连通性的重要参数,渗透系数越大,说明岩体的透水性

越强,富水能力也就越强。放水试验中水文孔的水位降深越大,各含水层之间导水通道的连通性越强。单位涌水量越大,反映含水层的空隙越多,连通性越好,且富水性越强。含水层有效厚度是指去除不含水部分后的厚度,其值越大,则单位面积上的富水性越强。水样溶解性总固体表征含水层中的水所经历的

表 1 9 级标度打分表
Table 1 Scale rating of nine grades

序号	重要性等级级别	C_{ij} 标度值
1	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 同等重要	1
2	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 稍微重要	3
3	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 明显重要	5
4	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 强烈重要	7
5	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 极端重要	9
6	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 稍不重要	1/3
7	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 明显不重要	1/5
8	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 强烈不重要	1/7
9	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 极端不重要	1/9

表 2 A-Bi ($i=1, 2, 3$) 判断矩阵
Table 2 Judgment matrix of A-Bi ($i=1, 2, 3$)

A	B1	B2	B3
B1	1	4	5
B2	1/4	1	5
B3	1/5	1/2	1

表 3 B1-Ci ($i=1, 2, 3$) 判断矩阵
Table 3 Judgment matrix of B1-Ci ($i=1, 2, 3$)

B1	C1	C2	C3
C1	1	3	1/2
C2	1/3	1	1/4
C3	2	4	1

表 4 B2-Ci ($i=4, 5$) 判断矩阵
Table 4 Judgment matrix of B2-Ci ($i=4, 5$)

B2	C4	C5
C4	1	3
C5	1/3	1

表 5 B3-Ci ($i=6, 7$) 判断矩阵
Table 5 Judgment matrix of B3-Ci ($i=6, 7$)

B3	C6	C7
C6	1	2
C7	1/2	1

表 6 基于 AHP 的权重计算结果
Table 6 Weight calculation results based on AHP method

目标层	准则层	权重 $B_i (i=1 \sim 3)$	指标层	指标权重 $C_i (i=1 \sim 7)$
金属矿山 岩溶含水层 富水性 评价(A)	渗流场特征 (B1)	0.683 3	渗透系数(C1)	0.218 4
			水位降深(C2)	0.083 3
			单位涌水量(C3)	0.381 6
	含水层特征 (B2)	0.199 9	含水层有效厚度(C4)	0.149 9
			水样溶解性总固体(C5)	0.050 0
	构造发育 特征(B3)	0.116 8	断层发育密度(C6)	0.077 9
			冲洗液消耗量(C7)	0.038 9

地段的特定位置上的多源信息对其产生的叠加影响的总和,是一种含水层富水程度的归一化度量,表示为:

$$I_{WAI} = \sum_{k=1}^n W_k \cdot f_k(x, y) \quad (1)$$

式中: I_{WAI} ——富水性指数;
 W_k ——评价指标权重;
(x, y)——地理坐标;
 n ——多源信息的个数;
 $f_k(x, y)$ ——具体在含水层富水性评价中第 k 个评价指标信息量值归一化后的值。

3 基于多源数据融合的富水性分区

3.1 单指标评价结果

采用 ArcGIS 系统内的自然断点法,将归一化后的单指标原始数据在研究区域内进行差值,得到毛坪铅锌矿上部和下部含水子系统单指标专题图,如图 6—7 所示。

从图 6(a)、图 7(a)可以看出,浅部含水子系统渗透系数较高的区域主要分布在 NE 和 SW 2 个方向,深部含水子系统只有 NE 向渗透系数较高,从渗透系数单指标结果看,这些区域的富水性较强。从图 6(b)、图 7(b)可以看出,放水试验中水位降深是以研究区中心向四周逐渐减小,其中 NE 向的帷幕缺口位置为优势渗流路径。从图 6(c)、图 7(c)可以看出,上部和下部含水子系统的单位涌水量较大的区域主要有 3 处,分别是 NE、W、SW。从图 6(d)、图 7(d)可以看出,含水层有效厚度呈现从西向东逐渐减小的规律。从图 6(e)、图 7(e)可以看出,水样溶解性总固体呈现从南向北逐渐减小的规律。从图 6(f)、图 7(f)可以看出,浅部和深部断层发育密度的分布是一致的。从图 6(g)、图 7(g)可以看出,钻孔冲洗液消耗量在上部和下部含水子系统有较大的差异,上部为 NW 向较高,下部为 SE 向较高,主要与含水层岩溶发育特征强度的垂向差异有关。从图 6 和图 7 中可以看出,各个评价指标在研究区域内的水平向分布规律具有显著的差异性,某些指标的垂向分布规律也存在显著的差异。因此,需要对各评价指标进行融合叠加,才可以充分且全面地反映出含水层富水性的分布特征。

3.2 多源数据叠加富水性分区

根据表 6 计算得到的指标层 7 个评价指标的权重值,可以看出权重排序为 $C_3(0.381\ 6)>C_1(0.218\ 4)>C_4(0.149\ 9)>C_2(0.083\ 3)>C_6(0.077\ 9)>C_5(0.050\ 0)>$

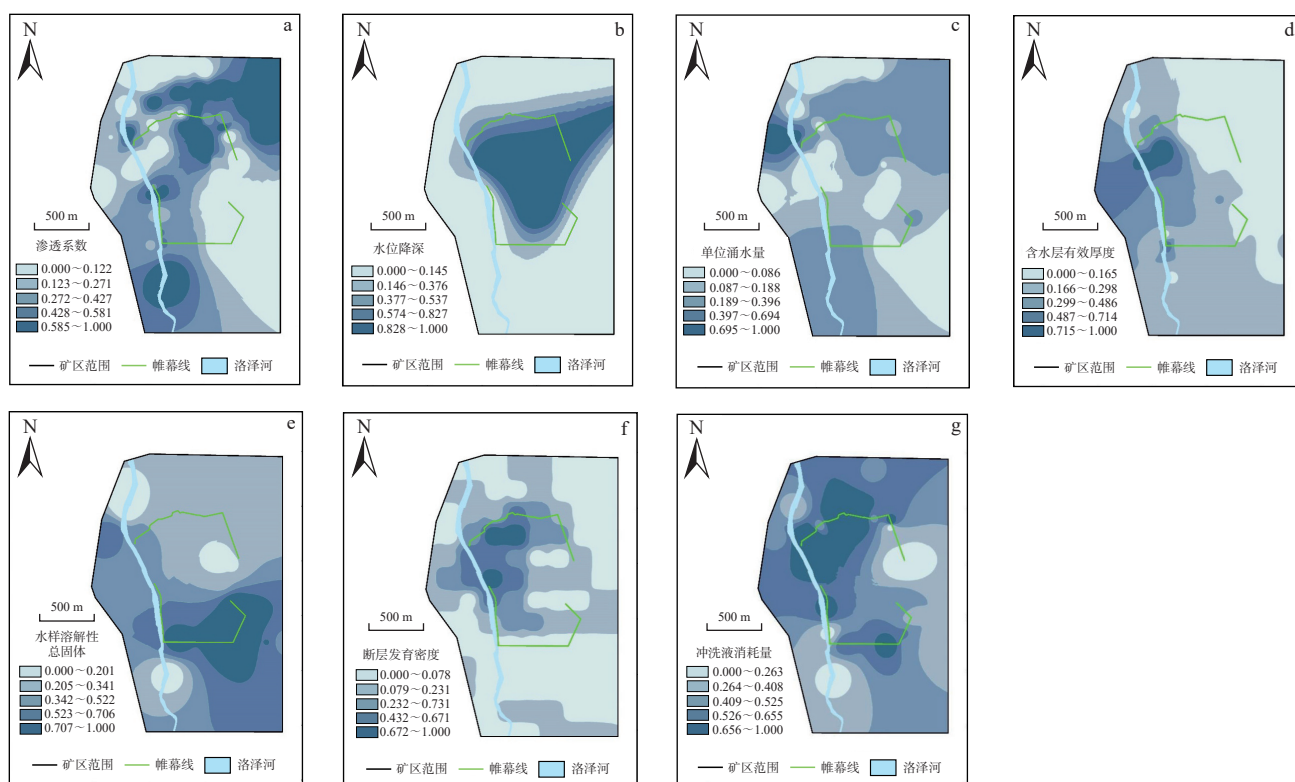


图 6 毛坪铅锌矿上部含水子系统单指标归一化专题图

Fig. 6 Single index normalized thematic maps of the upper aquifer subsystem in the Maoping lead zinc mine

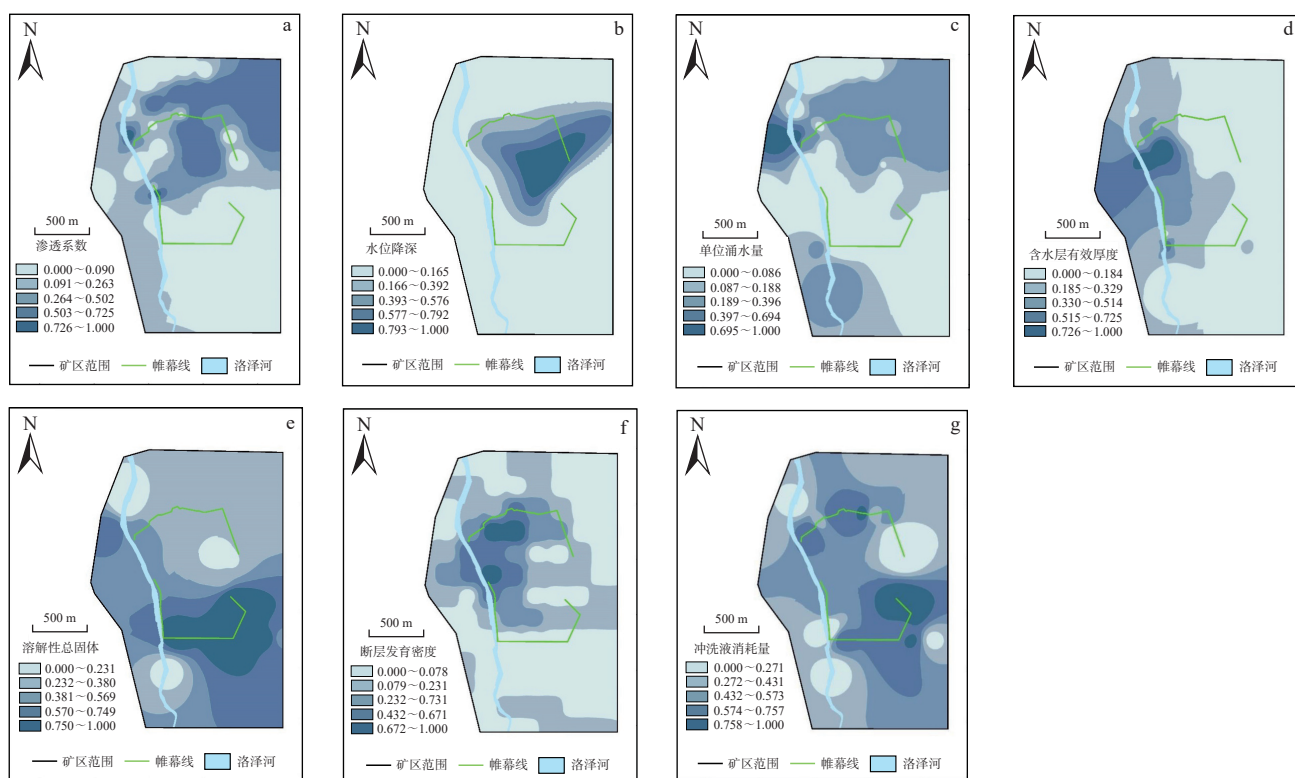


图 7 毛坪铅锌矿下部含水子系统单指标归一化专题图

Fig. 7 Single index normalized thematic maps of the lower aquifer subsystem in the Maoping lead zinc mine

C7(0.038 9)。根据式(1)计算金属矿山岩溶含水层的富水性指数, $I_{WAI}=0.218 4f_1(x,y)+0.083 3f_2(x,y)+0.381 6f_3(x,y)+0.149 9f_4(x,y)+0.050 0f_5(x,y)+0.077 9f_6(x,y)+0.038 9f_7(x,y)$ 。在 ArcGIS 系统内根据富水性指数将研究区分为强富水区、较强富水区、中等富水区、较弱富水区、弱富水区 5 个区域, 其中弱富水区 $I_{WAI} \in [0, 0.062)$, 较弱富水区 $I_{WAI} \in [0.062, 0.21)$, 中等富水区 $I_{WAI} \in [0.21, 0.40)$, 较强富水区 $I_{WAI} \in [0.40, 0.62)$, 强富水区 $I_{WAI} \in [0.62, 1]$, 如图 8 所示。

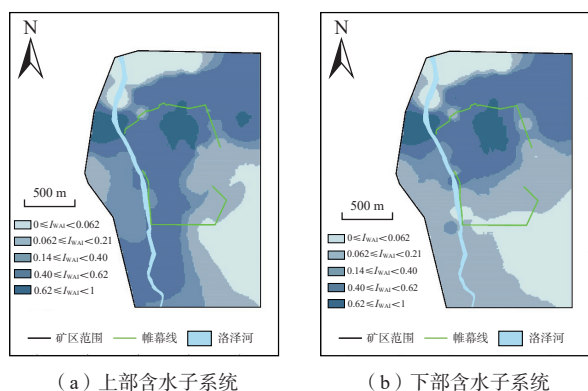


图 8 毛坪铅锌矿多源数据融合富水性分区结果

Fig. 8 Water rich zoning based on multi-source data fusion in the Maoping lead zinc mine

由于石门坎背斜西翼浅部和深部被矿区断层所连通, 富水性总体表现为较强—强, 尤其在北部帷幕线中西北部及北部体现出强富水性, 与帷幕注浆工程

一序孔单位注浆量相吻合, 平面上富水性强的地方所对应单位注浆量大。石门坎背斜轴部浅部与深部富水性不同, 由于背斜轴部浅部受拉应力较为明显, 富水性体现为较强, 而深部受挤压较为明显, 富水性体现为中等—较弱。石门坎背斜东翼富水性体现为上强下弱, 其中西南部 600 m 标高以上富水性较强, 沿帷幕线向东富水性逐渐减弱, 而深部富水性总体为较弱—弱。

3.3 模型评价结果验证

通过毛坪铅锌矿井下的现场实际调查发现, 在评价结果中的强富水区表现出了明显的巷道四周密集淋水或钻孔涌水现象, 并且巷道围岩结构较为破碎, 构造裂隙和岩溶空隙都明显发育, 锚杆锈蚀程度较高, 采场空气湿度也很高, 如图 9(a)(b)所示。现场调查发现评价结果中的较强富水区以及中等富水区, 巷道四周有零星淋水或局部潮湿现象, 断裂构造和节理裂隙的发育密度较低, 围岩结构相对完整且强度较高, 如图 9(c)所示。现场调查发现评价结果中的较弱富水区以及弱富水区, 巷道围岩结构十分完整, 断裂构造和节理裂隙的发育密度极低, 巷道表面也十分干燥, 锚杆锈蚀程度较低, 如图 9(d)所示。由此可见, 评价结果和现场调查的结果具有一致性, 验证了所构建的岩溶含水层富水性层次结构评价模型的准确性和合理性, 可以为矿山深部资源开采过程中的疏水、排水、治水方案的制订提供重要参考。

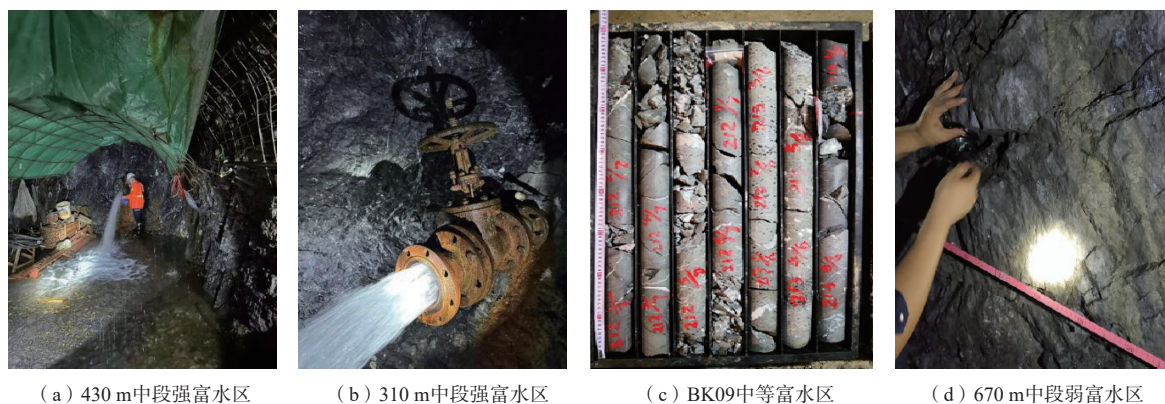


图 9 现场调查结果

Fig. 9 Field investigation

4 深部开采富水区水害防治方式

4.1 被动治理方式

强富水区以及较强富水区是矿山采掘过程中需要重点探查和治理的主要突水致灾危险源, 极易诱发

高势能突涌水灾害, 造成严重的淹井事故。例如, 2019 年 3 月 2 日毛坪铅锌矿 430 m 中段 112 线配电硐室在掘进放炮后, 掘进工作面的涌水量由最初的约 30 m³/h 迅速增加, 最大涌水量约 6 000 m³/h, 最后稳定涌水量约 1 650 m³/h, 远超该中段的储备排水能力。后期通过

“巷道骨料灌注+注浆封堵与补给水源区域注浆”相结合的方式治理,共灌注碎石骨料 10 569.50 m³,注入改性水泥单液浆 32 835.87 m³,水泥-水玻璃双液浆 1 839.21 m³,如图 10 所示。此次突水灾害的诱发机理主要是采掘揭露隐蔽导水构造,沟通了二叠系栖霞组茅口组局部强富水区,形成瞬时大涌水灾害^[5,35]。由此可见,由于岩溶含水层富水性的非均质性和各向异性,形成了局部强富水区,对矿山安全、高效开采造成了威胁。针对此类灾害,可以采用“骨料灌注→充填注浆→水源封堵”的被动治理方式。

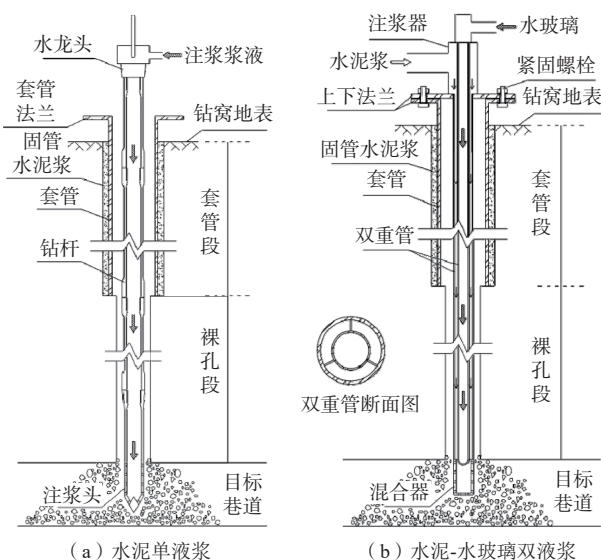


图 10 两种类型浆液在巷道灌注的骨料内充填注浆方式

Fig. 10 Two types of slurry filling and grouting methods in aggregates poured into the roadway

4.2 主动治理方式

为了彻底封堵矿山的主要补给水源和通道,毛坪铅锌矿在矿山南部和北部设计并实施了 2 条注浆帷幕。采用“直孔+定向分支孔+S 型分支孔”的组合钻孔方式,以及柔性钻杆组合钻具,克服了巷道内受限空间内超深钻孔的钻探和帷幕注浆难题,如图 11 所示^[19,36]。定向分支孔又称“鱼刺孔”,可以实现矿山巷道受限空间内分支孔曲率半径 5.7m、造斜强度 10°/m^[37]。该组合钻孔施工工艺不仅显著提升了钻孔对高倾角裂隙的钻遇概率,而且有效避免了传统工艺因钻孔群集中施工导致的巷道局部应力集中现象及围岩稳定性劣化风险^[37-38]。帷幕注浆工程完成后,通过实测涌水量计算的注浆帷幕堵水率达到了 70.19%,大幅度降低了矿山涌水量和深部掘进及采矿活动面临的突水风险^[5,28,36]。帷幕注浆工程设计前采用物探的方式确定区域强含水层的空间位置和边界,通过钻探的方式验证,为帷

幕轴线的选址提供明确依据。通过对比分析矿井瞬变电磁法、TSP 地震波反射法、地质雷达法、等值反磁通瞬变电磁法 4 种方法在毛坪铅锌矿局部富水体和导水构造探测方面的准确性和适用性,表明等值反磁通瞬变电磁法在金属矿山富水区域与破碎岩体区域解译效果较好。由此可见,由于区域强岩溶含水层的强富水性和强补给能力,毛坪铅锌矿可以采用“物探先行→钻探验证→区域超前帷幕注浆”的主动治理方式。

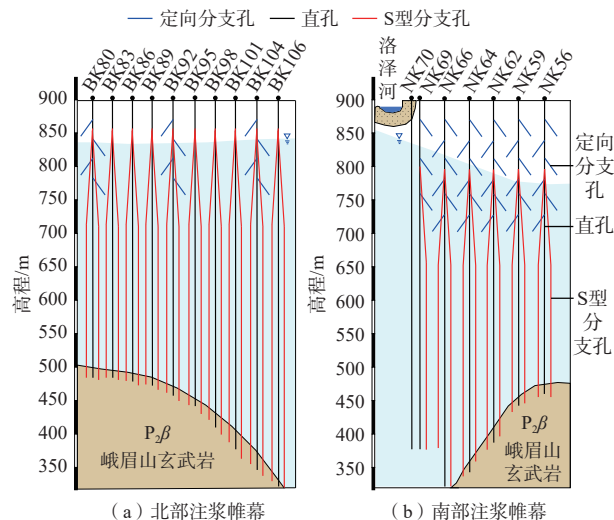


图 11 “直孔+定向分支孔+S 型分支孔”的组合钻孔方式

Fig. 11 Integrated drilling method of straight hole, directional branch hole, and S-shaped branch hole

5 结论

(1) 构建了金属矿山岩溶含水层富水性评价模型,确定了 7 个评价因子,分别为渗透系数、水位降深、单位涌水量、含水层有效厚度、水样溶解性总固体、断层发育密度、冲洗液消耗量。根据富水性指数将研究区分为强富水区、较强富水区、中等富水区、较弱富水区、弱富水区 5 个区域。

(2) 评价结果表明,石门坎背斜西翼富水性整体较强;石门坎背斜轴部富水性上强下弱;背斜东翼富水性总体偏弱,浅部含水层向东逐渐减弱。与传统的依靠钻孔的单位涌水量法相比较,该模型更加符合现场实际,并通过现场调查验证了评价模型的准确性和合理性。

(3) 提出了金属矿山采掘揭露局部强富水区诱发高势能突水灾害的“骨料灌注→充填注浆→水源封堵”被动治理方式;以及区域强富水含水层的“物探先行→

钻探验证→区域超前帷幕注浆”主动治理方式,可为金属矿山深部开采水害防控提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 吴建标,韩润生,周高明,等.滇东北毛坪富锗铅锌矿床构造控矿作用及深部找矿方向[J].大地构造与成矿学,2023,47(5):984-1001. [WU Jianbiao, HAN Runsheng, ZHOU Gaoming, et al. Structural ore-controlling and deep prospecting direction of the Maoping lead-zinc deposit in Northeastern Yunnan, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2023, 47(5): 984-1001. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 吴夏涛,周家喜,张浩,等.川滇黔接壤地区铅锌矿床成矿物质来源:方铅矿原位Pb同位素制约[J].地球科学与环境学报,2023,45(2):266-278. [WU Xiaotao, ZHOU Jiayi, ZHANG Hao, et al. Source of ore-forming materials for the carbonate-hosted Pb-Zn deposits in Sichuan-Yunnan-Guizhou adjacent area, SW China: Constraints of galena in-situ Pb isotopes[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 266-278. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 陈启良.滇东北渔户村组富铅锌矿成矿地质特征及找矿标志[J].地质与勘探,2002,38(1):22-26. [CHEN Qiliang. Metallogenic geological features and ore guides of high-grade Pb-Zn deposits in Yuhucun formation, Northeast Yunnan[J]. Geology and Exploration, 2002, 38(1): 22-26. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 马宏杰,张世涛,程先锋,等.云南会泽石炭系摆佐组白云岩地球化学特征及其成因分析[J].沉积学报,2014,32(1):118-125. [MA Hongjie, ZHANG Shitao, CHENG Xianfeng, et al. Geochemical characteristics and genetic analysis of carboniferous dolomite in Huize Basin, Yunnan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1): 118-125. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 袁世冲,李强,孙帮涛,等.金属矿山深部开采突水致灾危险源辨识与危险性评价——以滇东北毛坪铅锌矿为例[J].工程地质学报,2023,31(5):1668-1679. [YUAN Shichong, LI Qiang, SUN Bangtao, et al. Hazard identification and risk assessment of water inrush in deep mining of metal mines: A case study of Maoping lead-zinc mine in Northeast Yunnan, China[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(5): 1668-1679. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李博,韦韬,刘子捷.西南地区煤层顶板岩溶含水层富水性评价指标体系构建及突水危险性评价[J].煤炭学报,2022,47(增刊1):152-159. [LI Bo, WEI Tao, LIU Zijie. Construction of evaluation index system for water abundance of karst aquifers and risk assessment of water inrush on coal seam roof in Southwest China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(Sup1): 152-159. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 曹贤发,李海玲.中国典型岩溶发育区域划分[J].地球科学前沿,2018,8(4):845-851. [CAO Xianfa, LI Hailing. Typical zone division of karst development in China[J]. Advances in Geosciences, 2018, 8(4): 845-851. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 袁世冲,李强,杭远,等.深部矿山高承压应急防水闸门设计计算与数值模拟研究——以滇东北毛坪铅锌矿为例[J].工程地质学报,2024,32(2):632-644. [YUAN Shichong, LI Qiang, HANG Yuan, et al. Design calculation and numerical simulation investigation of high pressure emergency water retention bulk-head in deep mines: A case study of Maoping lead-zinc mine in Northeast Yunnan, China[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(2): 632-644. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 隋旺华.基于结构水文地质学的采掘诱发高势能突水溃砂主动防控[J].工程地质学报,2022,30(1):101-109. [SUI Wanghua. Active prevention and control of water-sand mixture inrush with high potential energy due to mining based on structural hydrogeology[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(1): 101-109. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 谢世平,徐磊,易伟功.岩溶地区某尾矿库尾砂渗漏探查与治理[J].中国矿业,2024,33(5):101-108. [XIE Shiping, XU Lei, YI Weigong. Exploration and control of tailings leakage in a tailings reservoir in karst area[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5): 101-108. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 武亚遵,于江浩,林云,等.碳酸盐岩裂隙溶蚀扩展试验与模拟研究[J].水文地质工程地质,2024,51(1):41-46. [WU Yazun, YU Jianghao, LIN Yun, et al. Experiment and simulation study on dissolution widening of carbonate rock fracture[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 41-46. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.矿区水文地质工程地质勘查规范:GB/T 12719—2021[S].北京:中国标准出版社,2021. [State Administration for Market Regulation, Standardization

- Administration of the People's Republic of China. Exploration specification of hydrogeology and engineering geology in mining areas: GB/T 12719—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)]
- [13] 李鑫, 孙亚军, 徐智敏, 等. 矿山采动突水危险源划分与致灾危险性评价研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(9): 108 – 115. [LI Xin, SUN Yajun, XU Zhimin, et al. Water sources classification and inrush hazard assessment approach in coal mining[J]. Coal Engineering, 2023, 55(9): 108 – 115. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 郭小铭, 王皓, 周麟晨. 煤层顶板巨厚基岩含水层空间富水性评价[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 167 – 175. [GUO Xiaoming, WANG Hao, ZHOU Linsheng. Evaluation of spatial water enrichment of ultra-thick bedrock aquifer in coal seam roof[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 167 – 175. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 吴铁卫. 宁正矿区洛河组含水层水文地质特征及防治对策[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(增刊1): 65 – 68. [WU Tiewei. Luohe Formation aquifer hydrogeological features and control countermeasures in Ningzheng mining area[J]. Coal Geology of China, 2021, 33(Sup1): 65 – 68. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 周对对, 龙良良, 刘家鹏, 等. 大佛寺井田洛河组含水层微观孔隙结构及富水性研究[J]. 中国煤炭, 2023, 49(9): 43 – 50. [ZHOU Duidui, LONG Liangliang, LIU Jiapeng, et al. Study on the micro-pore structure and water abundance of the Luohe Formation aquifer in Dafosi mine field[J]. China Coal, 2023, 49(9): 43 – 50. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 庞春燕. 金鸡滩煤矿基岩风化带含水层富水性评价[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023. [PANG Chunyan. Evaluation on the water abundance of aquifer in weathered zone of basement of Jinjitan coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 方楚婧, 杨泽元, 范立民, 等. 神府南区直罗组含水层富水性研究[J]. 灾害学, 2022, 37(3): 219 – 226. [FANG Chujing, YANG Zeyuan, FAN Limin, et al. Water yield property of Zhiluo formation aquifer in the Southern Shenmu-Fugu mine area[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(3): 219 – 226. (in Chinese with English abstract)]
- [19] YUAN Shichong, SUN Bangtao, HAN Guilei, et al. Application and prospect of curtain grouting technology in mine water safety management in China: A review[J]. Water, 2022, 14(24): 4093.
- [20] 高利军, 王海, 韩强. 柠条塔煤矿采煤围岩渗透性变化规律及工作面涌水量预测[J]. 中国矿业, 2024, 33(6): 183 – 193. [GAO Lijun, WANG Hai, HAN Qiang. Permeability changing laws of surrounding rock under the influence of coal mining and prediction of water yield of working face in Ningtiaota Coal Mine[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(6): 183 – 193. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 武强, 樊振丽, 刘守强, 等. 基于 GIS 的信息融合型含水层富水性评价方法——富水性指数法[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1124 – 1128. [WU Qiang, FAN Zhenli, LIU Shouqiang, et al. Water-richness evaluation method of water-filled aquifer based on the principle of information fusion with GIS: Water-richness index method[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1124 – 1128. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李盼盼, 侯恩科, 姬亚东. 基于标准差修正主观权重的洛河组含水层富水性评价[J]. 能源与环保, 2023, 45(10): 25 – 31. [LI Panpan, HOU Enke, JI Yadong. Water-rich evaluation of Luohe Formation aquifer based on standard deviation modified subjective weight[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(10): 25 – 31. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 李超峰. 基于导水系数的含水层富水性评价方法[J]. 地下水, 2023, 45(5): 15 – 17. [LI Chaofeng. Evaluation method of water-rich of aquifers based on transmissivity[J]. Ground Water, 2023, 45(5): 15 – 17. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 薛森, 李文平, 郭启琛, 等. 基于 FAHP-GR A 评价方法的顶板承压含水层富水性预测研究[J]. 金属矿山, 2018(4): 168 – 172. [XUE Sen, LI Wenping, GUO Qichen, et al. Prediction of water abundance of the roof confined aquifer strata based on FAHP-GR A evaluation method[J]. Metal Mine, 2018(4): 168 – 172. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 葛如涛, 陈陆望, 王迎新, 等. 基于改进 AHP 法和 CRITIC 法耦合赋权的松散承压含水层富水性评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(4): 519 – 528. [GE Rutao, CHEN Luwang, WANG Yingxin, et al. Water abundance assessment on unconsolidated confined aquifer based on the coupling of improved AHP and CRITIC[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2023, 46(4): 519 – 528. (in Chinese with English abstract)]
- [26] LI Qiang, SUI Wanghua, SUN Bangtao, et al. Application

- of TOPSIS water abundance comprehensive evaluation method for karst aquifers in a lead zinc mine, China[J]. *Earth Science Informatics*, 2022, 15(1): 397 – 411.
- [27] 白阳,牛超,李钊,等.基于FAHP-变异系数法的风化基岩含水层富水性评价[J].*煤矿安全*, 2023, 54(8): 143 – 149. [BAI Yang, NIU Chao, LI Fan, et al. Water abundance evaluation of weathered bedrock aquifers based on FAHP and coefficient of variance method[J]. *Safety in Coal Mines*, 2023, 54(8): 143 – 149. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 孙帮涛.滇东北岩溶大水深部矿山突水危险性评价研究[J].*中国矿业*, 2023, 32(增刊1): 440 – 446. [SUN Bangtao. Study on the risk assessment of water inrush of karst deep mines in Northeast Yunnan, China[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(Sup1): 440 – 446. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 黄荷,陈植华,王涛,等.岩溶矿区水文地球化学特征及其水源指示意义[J].*水文地质工程地质*, 2019, 46(1): 19 – 26. [HUANG He, CHEN Zhihua, WANG Tao, et al. Groundwater source identification incarbonate-hosted deposit using hydrogeochemistry, hydrogen and oxygen isotope method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(1): 19 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 袁世冲,张改玲,孙帮涛,等.基于光纤与微震监测系统的注浆帷幕“浆-岩”组合物体采动效应研究——以滇东北毛坪铅锌矿为例[J].*中国矿业大学学报*, 2024, 53(5): 1022 – 1036. [YUAN Shichong, ZHANG Gailing, SUN Bangtao, et al. Mining effects of grouted-rock composite of grout curtains based on optical fiber and microseismic monitoring systems: A case study of the Maoping lead-zinc mine in Northeast Yunnan, China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(5): 1022 – 1036. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 李加州,马俊杰.基于AHP-TOPSIS模型的某矿采场结构参数优选[J].*金属矿山*, 2023(8): 189 – 195. [LI Jiazhou, MA Junjie. Optimization of stope structure parameters based on AHP-TOPSIS model of a mine[J]. *Metal Mine*, 2023(8): 189 – 195. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 程香港,何昭宇,刘梦楠,等.淮北古近系“红层”工程地质特性及不良地质分区研究[J].*工程地质学报*, 2023, 31(1): 228 – 239. [CHENG Xianggang, HE Zhaoyu, LIU Mengnan, et al. Study on engineering geological characteristics and unfavorable geology subarea of Huaibei Paleogene red-bed[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(1): 228 – 239. (in Chinese with English abstract)]
- [33] LIU Jiawei, YANG Binbin, YUAN Shichong, et al. A fuzzy analytical process to assess the risk of disaster when backfill mining under aquifers and buildings[J]. *Mine Water and the Environment*, 2021, 40(4): 891 – 901.
- [34] YUAN Shichong, HAN Guilei, LIU Dajin, et al. Multicriteria risk assessment of water inrush in underground mines with large-scale curtain grouting: A mine disaster risk reduction strategy[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2024, 15(1): 2409200.
- [35] 向俊兴,李东立,杨红军.深孔模袋注浆技术在地下矿井突水治理中的应用[J].*建井技术*, 2023, 44(4): 41 – 46. [XIANG Junxing, LI Dongli, YANG Hongjun. Application of deep hole mold bag grouting technology in water inrush control in underground mine[J]. *Mine Construction Technology*, 2023, 44(4): 41 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 韩贵雷,李维欣,贾玉琴.金属矿山地下水防治与协同保护技术研究[J].*矿产勘查*, 2024, 15(8): 1508 – 1516. [HAN Guilei, LI Weixin, JIA Yuqin. Research on groundwater control and collaborative protection technology in metal mines[J]. *Mineral Exploration*, 2024, 15(8): 1508 – 1516. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 张改玲.裂隙注浆偏流机理及帷幕体采动效应研究综述与展望[J].*工程地质学报*, 2022, 30(3): 987 – 997. [ZHANG Gailing. Mechanism of deflection propagation for grouting in fractured rock mass with flowing water and mining effect on grouted curtain: A review[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(3): 987 – 997. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 袁世冲.深部矿山裂隙岩体帷幕注浆浆液扩散机理及“浆-岩”组合物体采动效应研究[D].徐州:中国矿业大学, 2023. [YUAN Shichong. Investigation on the grout propagation mechanism of curtain grouting in fractured rock mass in deep mines and mining influence on the grout-rock composite[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023. (in Chinese with English abstract)]

编辑:汪美华