

马蓝建, 陈世万, 田浪, 等. 岩溶区矿山地下水通道精细探查与地质模型构建[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 203-216. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.017

MA Lanjian, CHEN Shiwan, TIAN Lang, et al. Study on the groundwater pathway exploration and the geological model construction of the mine in karst area [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 203-216. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.017

岩溶区矿山地下水通道精细探查与地质模型构建

马蓝建¹, 陈世万^{1,2}, 田浪¹, 余会云³, 吴攀^{1,2}

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州金兴黄金矿业有限责任公司, 贵州 兴义 562305)

摘要:【目的】岩溶区矿山岩溶通道发育, 叠加强烈采矿改造作用, 矿山地下水系统可发生显著改变。为查明岩溶区矿山水文地质条件, 以贵州岩溶发育区紫木幽金矿为研究对象, 开展系统的矿山水文地质调查与地质模型构建工作。【方法】提出地球物理勘探技术和三维地质建模技术相结合的方法, 融合矿区勘探钻孔、地质剖面图和物探成果等多源数据, 建立了紫木幽金矿区精细三维地质模型, 精细刻画了该矿区岩溶通道空间展布, 建立了融合岩溶通道的矿山水文地质概念模型。【结果】结果显示, 矿区内受采矿作用影响的一中段暗河流向与矿区外未受采矿影响的太平洞暗河流向相反; 矿区内 F3 断层和 F6 断层分别为矿区东西方向的隔水边界。【结论】结果表明: 采矿活动显著改变了紫木幽矿区地下水系统, 导致地下水流向改变; 水文地质概念模型能够准确识别地下水岩溶通道与水文地质边界, 厘清了矿区地下水“补-径-排”体系, 实现了岩溶区矿山水文地质条件可视化。研究成果可为岩溶区矿山地下水污染科学防治提供支撑。

关键词: 地下水通道; 地下水污染; 物探; 三维地质模型; 水文地质概念模型; 水质; 人类活动

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.017

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU42

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)01-0203-14



Study on the groundwater pathway exploration and the geological model construction of the mine in karst area

MA Lanjian¹, CHEN Shiwan^{1,2}, TIAN Lang¹, YU Huiyun³, WU Pan^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guiyang 550025, Guizhou, China; 3. Guizhou Jinxing Gold Mining Co., Ltd., Xingyi 562305, Guizhou, China)

Abstract: [Objective] Karst channels in the mining area are abundant in karst areas, and the combined effect of heavy mining

收稿日期: 2024-05-07; 修回日期: 2024-08-14; 录用日期: 2024-08-20; 网络出版日期: 2024-09-30

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1805300); 贵州省科技项目(黔科合成果[2023]重大 006, 黔科合支撑[2022]一般 212, [2021]5635)

作者简介: 马蓝建(1998—)男, 硕士研究生, 主要从事地质工程方面研究。E-mail: 2336296636@qq.com

通信作者: 陈世万(1990—)男, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事地质工程及岩石力学方面研究。E-mail: swchen@gzu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

processes will lead to more complicated groundwater system. To identify the hydrogeological conditions of mines in karst areas, the Zimudang gold mine located in karst area in Guizhou was selected for a case study, and systematic hydrogeological investigations and 3D geological modeling were carried out in the gold mine. [Methods] A method combining geophysical exploration with 3D geologic modeling technology was proposed, and the fine 3D geological model of Zimudang gold mine was established based on integrating multi-source data such as exploration drilling holes, geological cross-section maps and geophysical result. The karst channels were depicted, and a hydrogeology conceptual model integrating the karst channel model was established. [Results] Result showed that mining activities have changed the flow direction of the underground river in the first level of the mine, which is opposite to flow direction of the Taipingdong underground river out of the mine. The fault F3 and F6 consisted the watertight boundaries in the east and west of the mine. [Conclusion] This study showed, the groundwater system was changed significantly by the heavy mining work. The karst channel and the hydrogeological boundary could be precisely identified, and the recharge-runoff-discharge groundwater system was also identified, which visualized the hydrogeological conditions of the mines in the karst area. This research could provide support for the scientific prevention and control of underground water pollution in mines in karst areas.

Keywords: karst channel; groundwater pollution; geophysical exploration; 3D geological model; hydrogeological conceptual model; water quality; human activities

0 引言

西南岩溶区金、煤、磷、锰等矿产资源丰富, 长期高强度的资源开发已对岩溶区生态环境, 特别是地下水环境造成显著的影响^[1-4]。岩溶区域内水文地质条件复杂, 岩溶洼地、落水洞、地下岩溶通道等发育强烈, 加之生产矿山的长期开采造成地层破坏, 形成更为复杂的水力通道, 给岩溶区矿山地下水水害和污染防治带来挑战^[5-6]。查明矿区地下岩溶通道、厘清矿区地下水补-径-排体系, 是矿山地下水水害和污染科学防治的关键。

为查明矿山地下水污染特征, 近年来已有不少研究团队和学者在此方面做了大量研究工作^[7-12], 为地下水资源的保护提供了依据。物探技术是查明地下水通道与水文地质条件的重要手段, 刘天云等^[13]采用大功率充电法和音频大地电磁法识别了某水库水文地质条件与岩溶渗漏通道。REN 等^[14]采用电法与电磁法相结合对某废弃矿区进行探测, 查明了矿区富水区和污染通道。TARGA 等^[15]采用地球物理方法对某铀矿尾矿堆场及下伏含水层系统进行水文地质分析, 结果表明尾矿和其他废物的排放会影响该区域的地下水。任虎俊^[16]利用现场监测、物探及钻探等方法, 研究了喀斯特地区废弃煤矿对岩溶地下水的污染模式及成因机理。杨天春等^[17]采用高密度电阻率法、瞬变电磁法和天然电场选频法等探测某石灰石矿山地下水岩溶特征, 查清了矿区地下岩溶的埋深及空间分布规律。以上研究通过采用不同的物探方法查明了岩溶矿区的地下水通道及岩溶发育特征, 但此类研究多集中在对物探结果以由点到线、由线到面的二维平面方式

进行单一解译, 解译成果难以直观准确地表达出矿区地质空间信息及地下水流特征。随着计算机科学技术的发展, 三维地质建模技术已得到了较为成熟的运用, 与传统的二维平面地质资料相比, 三维地质模型可对各类地质数据进行聚合分析与管理, 并以三维立体的形式对地质信息进行可视化表达, 因此, 结合三维地质模型解译物探结果, 可准确识别物探解译异常的空间分布特征, 同时还能有效提高解译效率。

当前, 三维地质建模技术已成为了描述地质构造和地层分布的有力工具, 可以直观地辅助地质解译和分析工作^[18], 在矿山开发方面得到了较广泛的应用^[19-22]。黄永志等^[23]对紫木函金矿床三维地质模型进行了可视化构建, 建立了金矿床的空间展布特征。JIN 等^[24]采用不同的地质和属性模型方法, 通过三维地质建模, 定量揭示了上汞矿区复杂地质现象。王素芬等^[25]基于 GOCAD 软件平台, 构建了西藏甲玛矿区三维地层和地球物理一体可视化模型。此外, 三维地质建模技术在水文地质应用方面也具有较好的表现, 杨通花^[26]基于二维地质剖面建立了大小井流域的三维地质模型, 并揭示了大小井地下河空间形态的展布特征。孟美杉等^[27]将三维地质模型应用于地下水污染防治中, 精准地展示了场地地层情况和地下水污染羽分布。文献^[28]结合三维隐式地质模型、野外调查成果和水文地质模型描述了岩溶含水层中的地下水流。上述研究表明, 三维地质建模技术能够实现地质数据的可视化分析, 同时还能直观地展示地质结构和属性的空间分布特征, 可为高效分析地质信息及地下水系统提供支撑。三维地质建模技术虽应用广

泛, 但针对岩溶发育区, 特别是针对受采矿活动剧烈影响的岩溶矿区应用较少, 且缺乏将物探与三维地质建模相结合分析以提升模型精度的研究。通过建立三维地质模型, 有助于更好地理解地质现象, 提高地质研究的效率和准确性, 结合物探技术建立精细三维地质模型, 对实现岩溶区矿山水文地质条件及地下水污染过程可视化有着重要的意义。

本文以贵州兴仁紫木凶金矿为例, 开展了系统的岩溶通道物探工作, 基于钻孔、地质剖面 and 物探等多源数据的综合分析, 构建了矿区精细三维地质模型, 识别了研究区地下水优势岩溶通道空间展布和水文地质单元边界特征, 厘清了矿区地下水“补-径-排”系统, 实现了对生产矿山现状水文地质概念模型的精细刻画。

1 紫木凶矿区地质环境条件

1.1 紫木凶金矿现状

紫木凶金矿位于贵州省兴仁市, 矿区范围面积 2.14 km², 当前该矿山尚在开采, 采矿方法主要为竖井加平巷方式, 开采标高为 1 530 ~ 1 000 m, 在

1 390~1 365 m 标高设有水仓, 开采期间, 地下水向采空区及巷道汇集, 并集中于水仓抽排至污水处理厂处理。调查发现, 砷(As)是矿区地下水中最主要超标的污染物, 其主要来源为井下的雄黄矿脉, 地下巷道内采样结果表明, As 的平均含量超过地下水质量(GB/T 14848—2017) III类标准 75.95 倍。当前地下水均抽排至地表污水处理厂处理, 因此对外界地下水无污染影响, 但矿区抽排水量大(超过 2 000 m³/d), 对矿区造成了较重的经济负担; 同时, 该矿山在雨季降雨时, 井下地下水量猛增, 常需组织井下抗洪工作, 为矿山长期安全生产带来挑战。查清矿区地下水补径排特征, 开展科学的地下水水量源头削减, 将缓解该矿山地下水水害和地下水污染防治压力。

1.2 矿区水文地质概况

如图 1 所示, 研究区位于黔西南灰家堡背斜西端, 主要地形地貌为溶蚀-侵蚀中低山沟谷、洼地等。矿段内出露地层为二叠系及三叠系地层, 其中: 二叠系上统长兴-大隆组(P_{3c+d})岩性主要为生物灰岩夹钙质黏土岩, 龙潭组(P_{3l})为黏土质泥岩及煤层; 三叠系下统夜郎组第一段(T_{1y¹})主要为白云质灰岩及

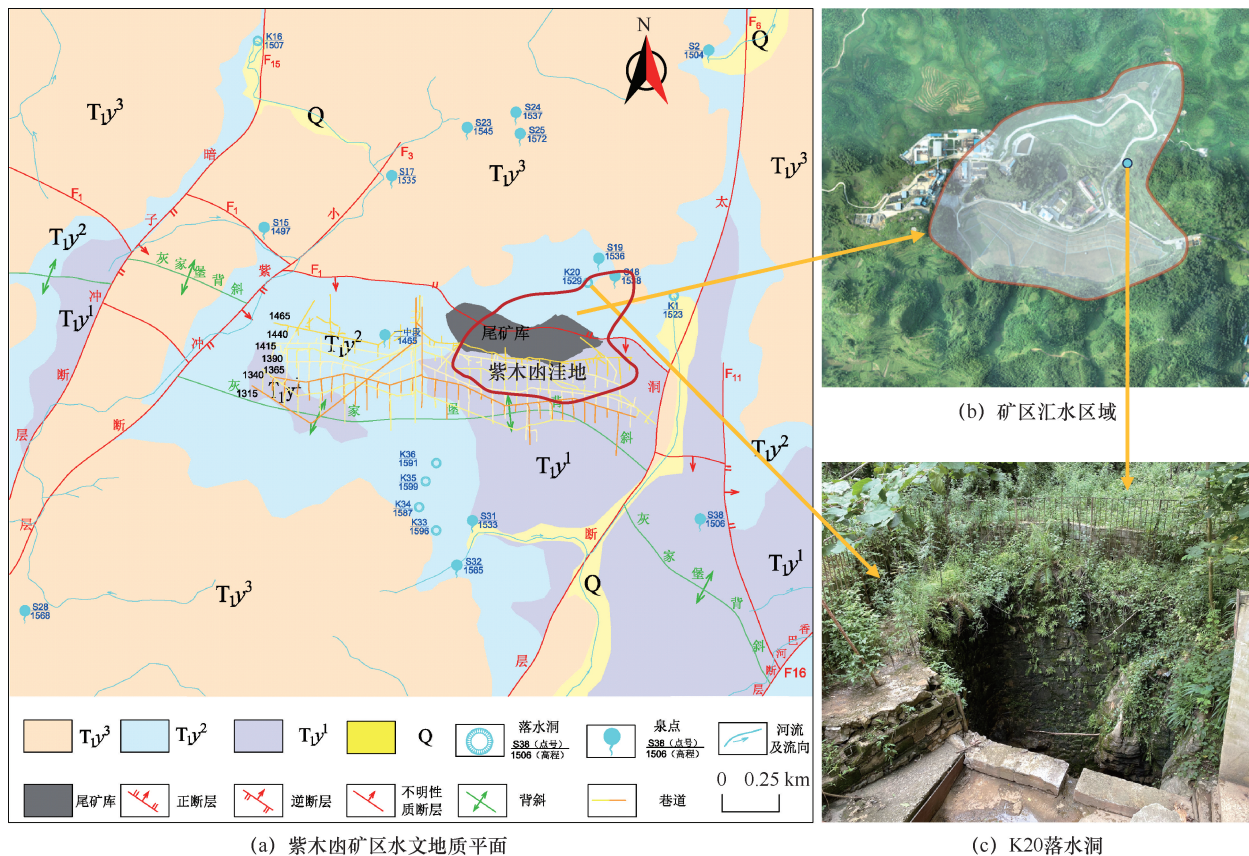


图 1 研究区水文地质概况

Fig. 1 Hydrogeologic overview of the study area

泥质岩, 第二段(T_{1y}^2)为中厚层灰岩, 第三段(T_{1y}^3)为粉砂质粘土岩及钙质粉砂岩, 近地表风化节理裂隙发育。矿区内断裂构造发育, 主要有处于矿段西部控制矿床主要金矿体的逆断层(F1), 具有平移性质的正断层(F3), 处于矿段东部的正断层(F6), 以及位于背斜转折端且控制着小透镜状金矿体的层间断层。

研究区出露岩层主要为碳酸盐岩和碎屑岩两类, 地下水类型主要为岩溶水和基岩裂隙水。矿区勘察结果表明, 区内 1 500~1 550 m 标高区间内的岩溶最为发育, 1 450 m 标高以下岩溶发育较弱, 1 300 m 标高以下岩溶发育极微弱, 区内地表岩溶形态主要为洼地、落水洞、盲谷等。矿区南部临近灰家堡背斜西段核部, 地势高峻, 为区域性地表及地下分水岭位置, 地表水及地下水就地接受大气降水的补给后在基岩裂隙带中经短暂径流, 汇入岩溶裂隙(溶洞)含水层中的岩溶管道中, 最终形成集中径流。矿区地表设施和地下采矿活动均主要位于紫木凶洼地内, 该洼地面积为 0.056 km², 深度 26 m, 汇水面积 0.45 km², 主要沿 F1 断层上盘的 T_{1y}^2 灰岩发育而成, 洼地内沿尾矿库修建截水沟, 降雨汇水均流入截水沟, 并注入洼地内矿区东北部的 K20 落水洞。矿山开采前水文地质调查表明, 矿区内主要控矿断层 F1 为隔水断层, K20 落水洞内的水流向矿区北部, 与南北走向的太平洞暗河连通。

1.3 矿区地球物理探测

为查明研究区主要断层、地下暗河(主要岩溶通道)等地下水优势通道空间展布及其水文地质特征, 探

查地下水系统边界条件, 厘清地下水补径排过程, 在矿区开展了高密度电法和瞬变电磁探测工作(见表 1)。

高密度电阻率法通过在特定区域布设等距电极测线, 并在施加电场作用下测量一定区域和深度地层视电阻率。该方法通过选择不同的电极组合方式和不同的极距间隔完成数据的快速采集, 因而同时具备电剖面法和电测深法的特点, 能够获得更为丰富的地电结构状态和地质信息, 成像效果形象、直观准确。瞬变电磁法(TEM)的基本原理是电磁感应定律, 是查明含水构造(采空区、岩溶通道、含水层等)的有效方法。相较于其他电法勘探技术, 具备分层能力强、穿透性好、地形适应能力强、无需布置长测线即可获得地下深部信息等优点, 但其分辨率和可靠性略低于高密度电阻率法。如图 2 所示, 根据工作区地质条件, 在研究区布置 10 条高密度电阻率法测线和 7 条瞬变电磁测线。

2 矿区综合物探解译与精细三维地质模型构建

根据矿区内密集勘探钻孔和生产过程修正地质剖面图等地质信息, 建立精细的三维地层模型, 并在矿区内开展地球物理勘探, 通过三维地层模型, 获得勘探剖面得到的地质信息, 形成研究区地球物理勘探解译标准; 在矿区潜在地下水优势通道及水文地质边界(岩溶通道和断层)开展地球物理勘探, 通过建立的解译标准, 可准确确定岩溶通道和水文地质边界位置及其水力特性, 在此基础上, 建立岩溶通道模型及

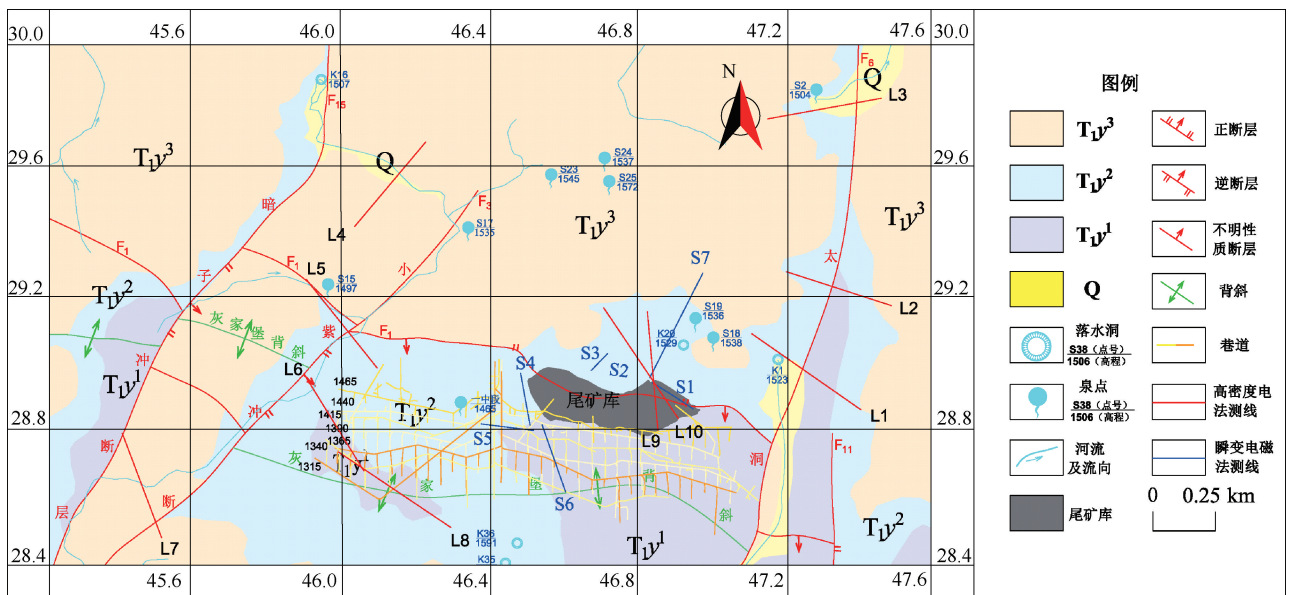


图 2 矿区物探测线布置

Fig. 2 Layout of geophysical exploration lines in the mine area

表 1 矿区地球物理勘察工作布置

Table 1 Geophysical exploration work in the mine area

高密度电法	长度/m	探查目的	瞬变电磁法	长度/m	探查目的
L1	466	查清矿区东部边界条件、太平洞暗河轨迹	S1	115	矿区内岩溶通道探查
L2	448		S2	300	
L3	439		S3	75	
L4	465	查清矿区西部边界条件	S4	160	
L5	432		S5	156	
L6	435	矿区地质信息参数识别	S6	210	
L7	453	查清矿区西部边界条件	S7	330	
L8	444	矿区地质信息参数识别			
L9	389	矿区内岩溶通道探查			
L10	423				

断层模型, 可实现对矿区水文地质边界和通道的刻画; 最后将地层模型、断层模型及岩溶通道模型等多源数据融合以构建矿山精细三维地质模型, 并在此基础上进一步形成水文地质概念模型, 进而实现矿区水文地质条件及地下水“补-径-排”体系的可视化研究, 具体过程如下。

2.1 矿区三维地层模型与地球物理探测成果解译

2.1.1 矿区内精细三维地层模型构建

收集整理在矿产资源探勘、生产过程补充勘探和生产过程中形成的丰富的矿山地质资料, 矿段内共布置了 340 个勘探钻孔, 累计总进尺长度 54.91 km, 区域内形成间距为 25 m 至 50 m 的密集勘探钻孔网络。在数据处理时, 统计所收集的各阶段钻孔数据并按规范格式进行处理, 包括空间坐标

位置、孔口高程、各地层深度范围; 并利用勘探线剖面图、生产过程修正地质剖面图和平面布置图等, 提取钻孔信息与地层界线信息。将统计的钻孔数据与地层界线导入建模软件中, 并开展数据校验, 如图 3 所示, 密集的钻孔与丰富的地质剖面图可为矿区内精细三维地层模型构建提供细致的地质信息。

采用 EVS(Earth Volumetric Studio) 三维地质建模软件建立矿区内精细三维地层模型, 如图 4 所示, 该模型可直观立体地展示矿区边界、地层界面、地层岩性(精确到分段和分层)、地形起伏情况等地理信息, 可对地层及任意剖面实现可视化。同时, 由于采用密集钻孔数据建模, 可对矿区范围内各类地质要素实现精细刻画。

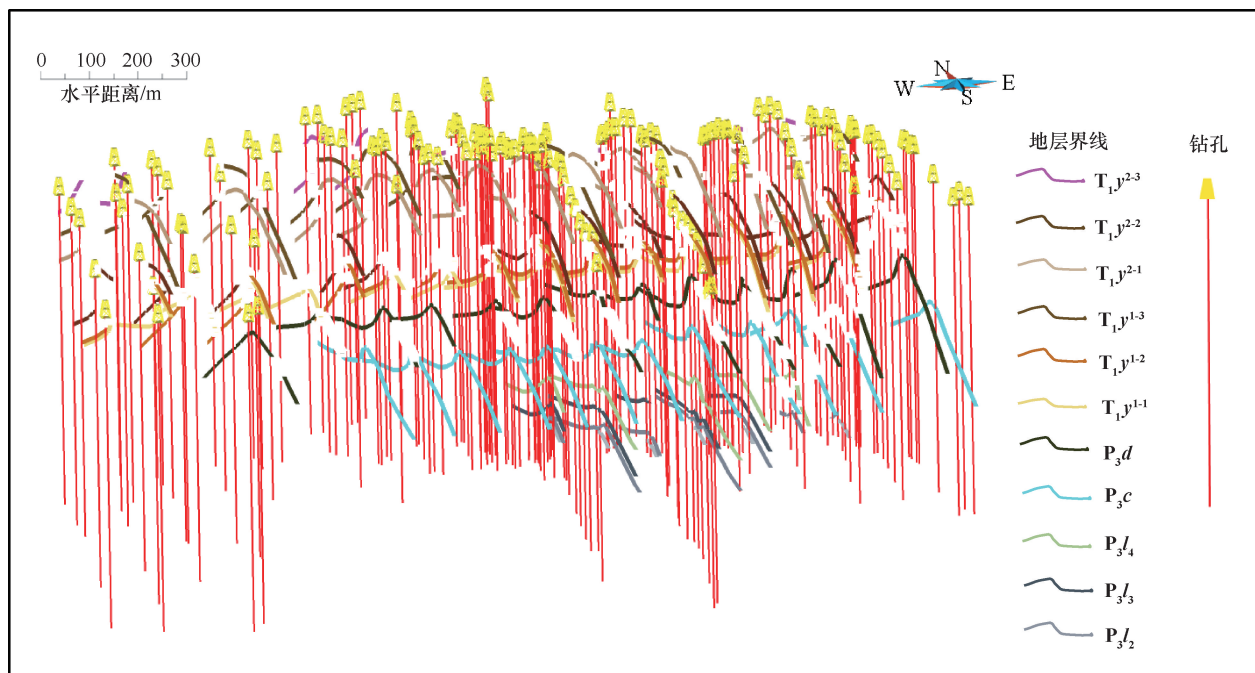


图 3 三维地质模型数据库(钻孔、地层界线)

Fig. 3 The 3D geological model database (boreholes, stratigraphic boundary)

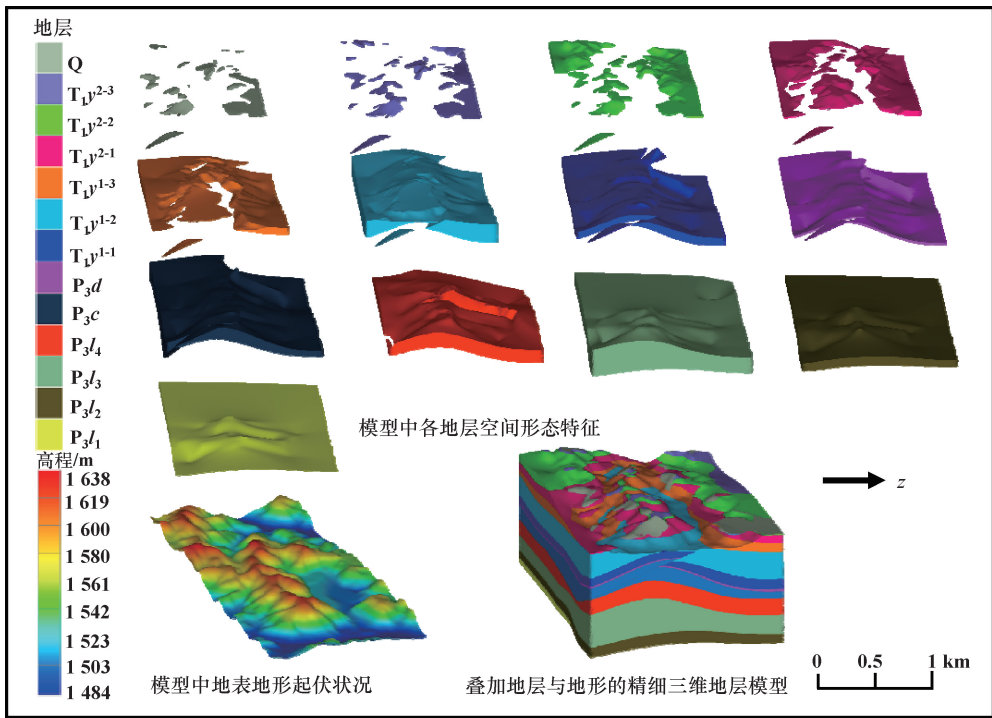


图 4 矿区精细化三维地层模型

Fig. 4 The 3D geological model of the mine area

2.1.2 矿区内物探信息解译与参数识别

如图 5 所示, 高密度测线 L6 和测线 L8 位于存在密集勘探钻孔的矿区范围内, 可根据建立的精细三维地层模型获得测线 L6 和测线 L8 的地质剖面图。通过

分析地质剖面图的高密度电法测试结果, 可实现对各地层及其他地质体视电阻率的率定(见表 2), 从而根据各地质体的视电阻率范围圈定基于高密度测线 L1、L2 和 L3 中的地质体的地层界线。

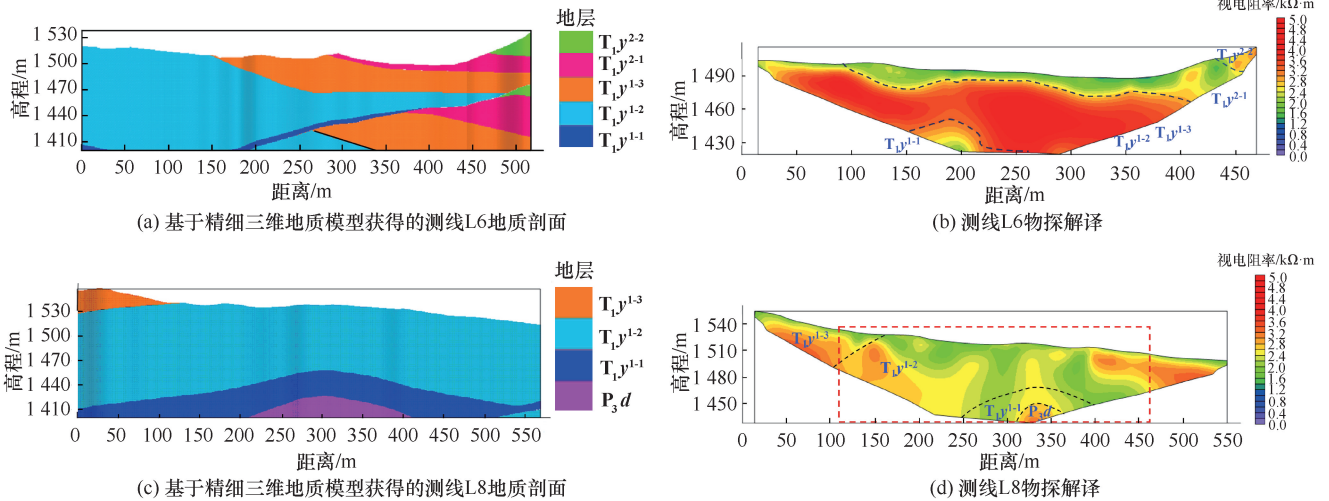


图 5 基于三维精细地质模型高密度电法结果解译

Fig. 5 Interpretation of high density resistivity method results based on the 3D fine geological model

表 2 基于三维精细地质模型地层视电阻率参数

Table 2 Formation resistivity parameters based on the 3D fine geological model

地层代号	T_{1y}^2	T_{1y}^1	T_{1y}^{1-3}	T_{1y}^{1-2}	T_{1y}^{1-1}
L6	1.6~2.6	1.8~2.6	2.6~5.0	2.6~5.0	—
L8	—	—	2.4~3.2	1.8~3.6	2.0~2.6

kΩ · m
kΩ · m

测线 L8 主要位于采空区上部, 受采矿活动影响明显, 测线 L6 距地下采空区较远, 受采矿活动影响较小。测线 L8 地质剖面图主要地层为 T_{1y}^{1-1} 和 T_{1y}^{1-2} , 处于采空区上方的 T_{1y}^{1-1} 和 T_{1y}^{1-2} 地层视电阻率明显低于不受采矿影响的测线 L6 上方的 T_{1y}^{1-1} 和 T_{1y}^{1-2} 地层视电阻率, 主要原因为受采矿活动影响、采空区上方岩体较为破裂、裂隙发育, 含水率较高, 因此视电阻率较低; 而采矿活动影响带边界外的侧向两端地层视电阻率也较高, 根据高密度电法测试结果, 可圈定采矿裂隙带。对比精细地质剖面图及物探结果图可见, 各地层具有明显电性差异、 T_{1y}^2 地层视电阻率最低; T_{1y}^1 地层视电阻率略高于 T_{1y}^2 ; T_{1y}^{1-2} 和 T_{1y}^{1-3} 地层视电阻率均较高, 差异不大; 而 T_{1y}^{1-1} 地层视电阻率较低(可能受断层影响)。考虑采矿作用影响各地层视电阻率划分如表 2 所列。

2.1.3 矿区水文地质边界物探与解释

如图 6(a) 所示, L1、L2 和 L3 测线主要探测矿区东部边界 F6 断层空间展布及含水特性, 根据物探反演结果和基于三维地质模型获得的地层视电阻率参数划定地层, 三条测线反演结果均显示断层 F6 附近存在明显的电性差异, 为断层引起地层错动的表现, 西侧低阻区为断层上盘, 其含水率高, 认为是断裂影响带内的 T_{1y}^2 碳酸盐岩地层岩溶发育强烈, 地层含

水率高; 东侧高阻区为断层下盘, 为 T_{1y}^1 地层, 该区域地层含水率低, 表明该断层为隔水断层, 是矿区东部的隔水边界。此外, 从反演结果异常点来看, 低阻异常 YC2 推测为 T_{1y}^2 地层内的岩溶发育带(1 440~1 485 m), 其西侧有一独立的突变低阻异常 YC1, 高程分布范围 1 470~1 500 m, 该异常区距暗河入口较近(约 20 m), 推测异常 YC1 位置为太平洞暗河流经处。综合三条测线从暗河入口至出口所反映的低阻异常 YC1 (1 470~1 500 m)、YC3 (1 455~1 490 m) 和 YC4 (1 465~1 485 m) 高程从高到底符合暗河的流向, 绘制太平洞暗河轨迹的分布如图 7 所示, 即暗河总体走向为南北向, 穿越矿区和接受矿区地下水补给的可能性较小。

如图 6(b) 所示, L4、L5 和 L7 测线主要探测矿区西部边界条件, L4 地表河流下方有一突变低阻异常, 推测该处地表河流与下方低阻区域有较强的水力联系。测线 L5 中断层 F1 与断层 F3 之间构造区域岩溶较为发育。测线 L5、L7 反演结果中 F3 断层带位于高阻区域, 断层两侧皆分布独立的低阻带, 显示 F3 为隔水断层。

2.1.4 矿区水文地质边界确定

利用矿山勘探过程获得的地质剖面图, 以及矿山开采过程中修正后的地质剖面图, 获得各断层在地下真实出露迹线如图 8(a) 所示, 结合地表断层出露迹

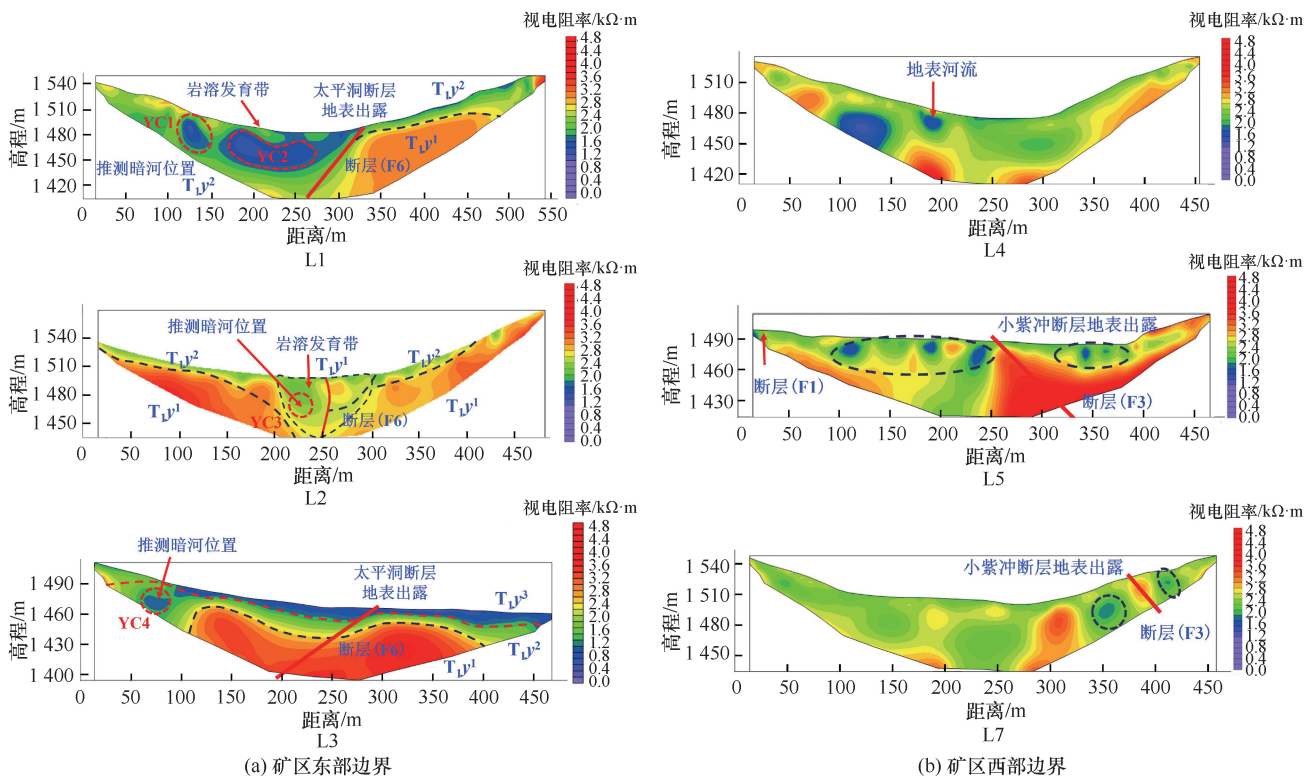


图 6 矿区水文地质边界高密度电法解译结果

Fig. 6 The hydrogeological boundary delineation based on the high-density resistivity tomography exploring result

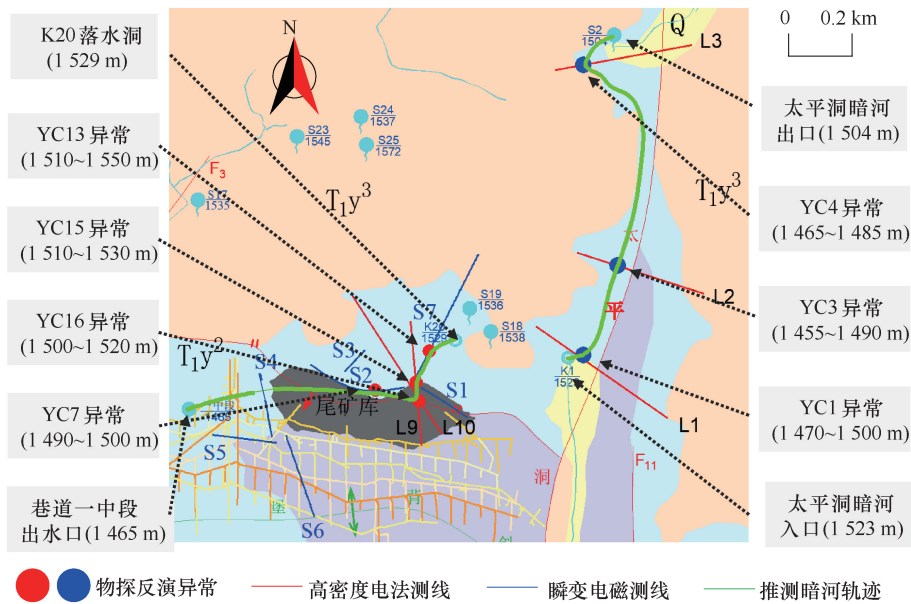
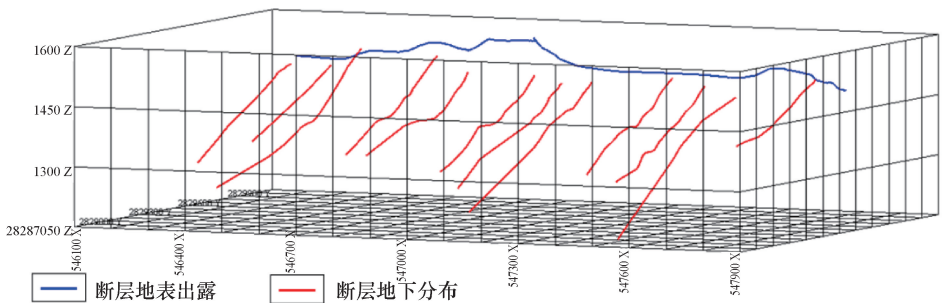
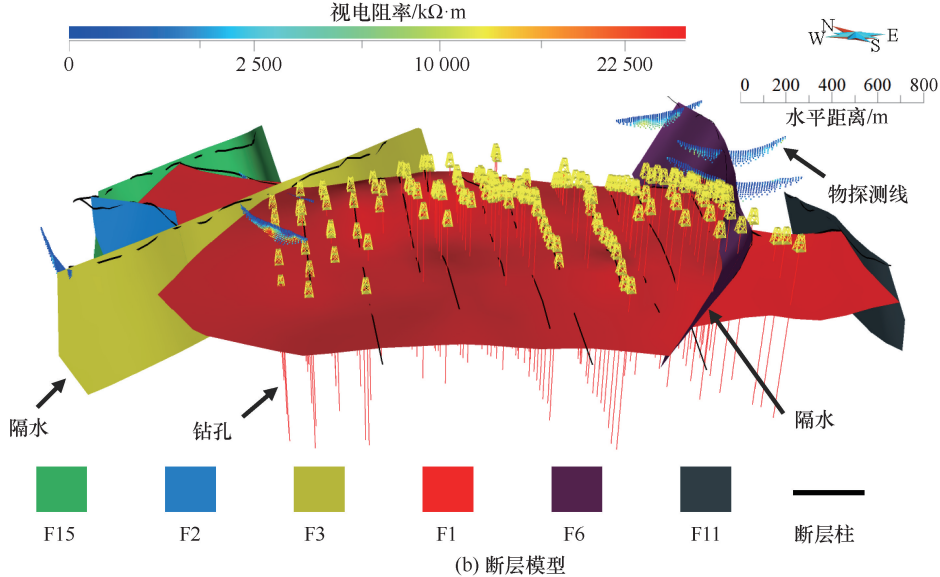


图 7 地下暗河轨迹物探解译

Fig. 7 The trace of the underground river based on geophysical interpretation



(a) 基于勘探剖面、生产剖面建立地下断层迹线



(b) 断层模型

图 8 断层建模方法

Fig. 8 The geological model construction method in fault zone

线和水文地质边界探查成果, 实现对断层空间展布的多源数据约束, 在此基础上在空间内对断层面进行平滑插值, 建立研究区内断层模型如图 8(b) 所示。并根据前述探查结果, 确定各主要边界断层导水特性。

2.2 矿区内部主要地下水岩溶通道探查与解译

2.2.1 矿区内暗河位置确定

分析矿区内部瞬变电磁和高密度电法探测结果, 圈出低阻异常区域如图 9 所示。分析各低阻异常区域: YC13 异常(1 510~1 550 m)、YC15 异常(1 510~1 530 m)、YC16 异常(1 500~1 520 m)和 YC7 异常(1 490~1 500 m)。连接各测线探查的低阻异常区(见图 7), 发现从 K20 落水洞起, 低阻异常区向西南延展, 且高程逐渐降低, 向一中段的溶洞出露口延伸, 在 YC7 处进行 100 m 钻探验证, 钻孔揭露地下溶洞, 地下水量大, 孔内可听见明显流水声。根据物

探及钻探验证结果, 圈定一中段优势地下水岩溶通道, 如图 7 所示。

此外, 对比以往调查研究发现, 采矿活动主要集中在 F1 控矿断裂带, 其在采矿前为隔水断层, 致使尾矿库所处水文地质单元分为南、北两个独立的地下水单元。矿区开采后, 采矿过程剧烈的采矿活动显著改变了地层结构, 叠加赋矿地层 T_1y^2 岩溶通道发育, 致使地下水径流方向发生改变, 地表主要汇水由矿区内 K20 落水洞经岩溶通道和采动裂隙带流向井下一中段。

2.2.2 矿区外暗河位置确定

基于标定的地层视电阻率数据, 可准确圈定密集勘探区域外布置的高密度测线 L1、L2 和 L3 反演结果中的各地层界线、断层和岩溶通道等分布位置, 并将其解译成果融合至矿区勘探界线外的三维地质模型中。如图 10 所示, 将物探反演剖面图进行空间定位,

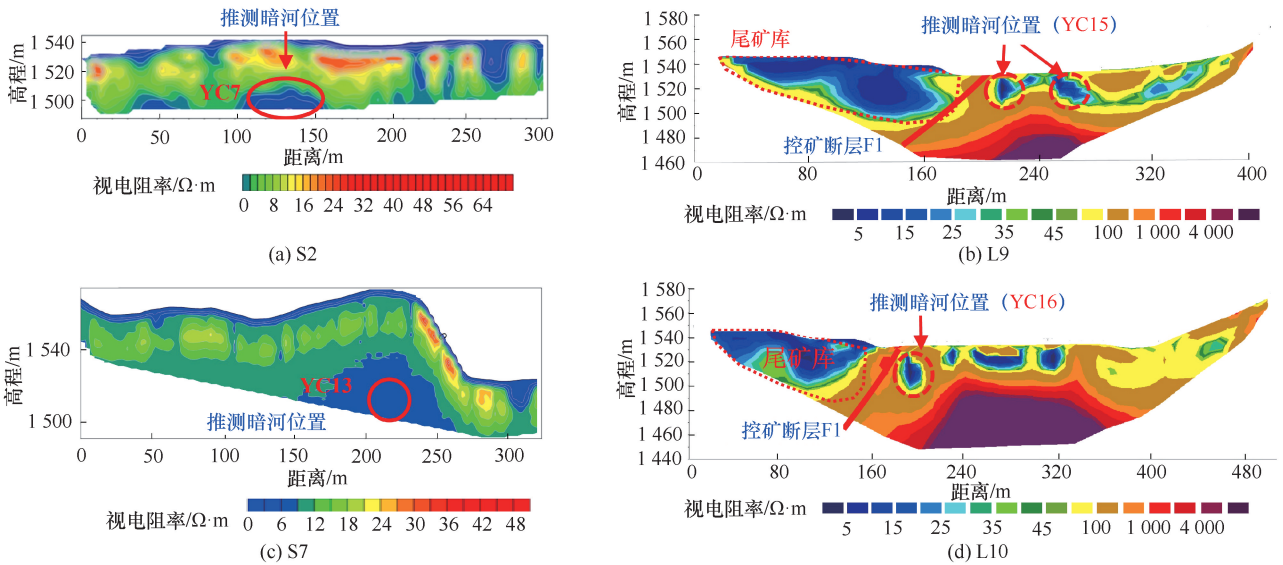


图 9 K20 落水洞附近物探解译异常区

Fig. 9 Results of the geophysical exploration around the K20 sinkhole

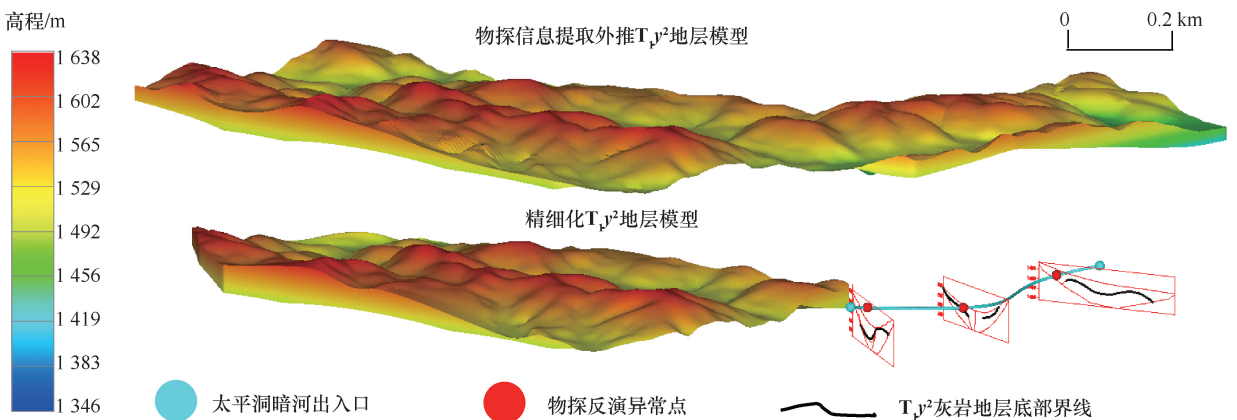


图 10 暗河走向空间展布

Fig. 10 The trace of the ground river

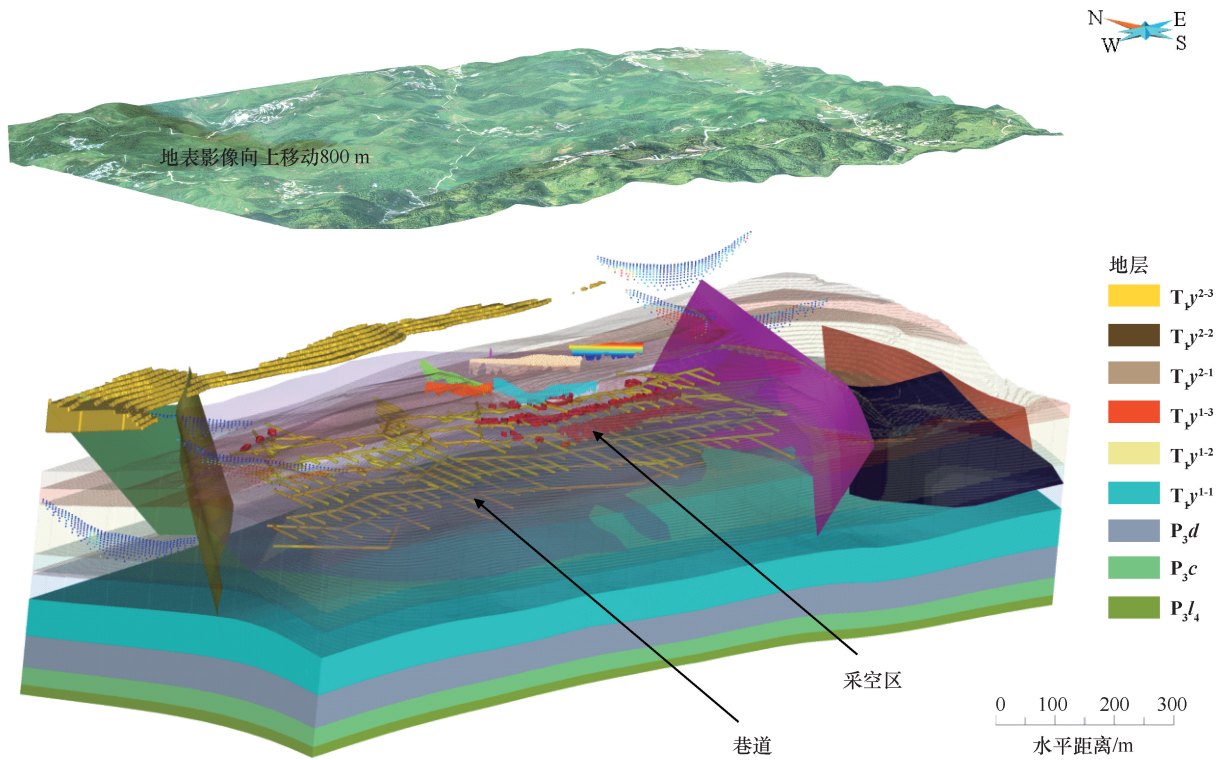


图 11 紫木凶金矿三维地质模型

Fig. 11 The 3D geological model of Zimudang gold mine

结合地表模型, 为 T_{1y}^2 地层模型的准确外推提供了依据, 并确定灰岩地层在密集勘探区域外的分布状况; 提取物探异常点并进行空间定位, 结合矿区暗河出入点进行拟合, 刻画了太平洞暗河岩溶通道。

综合矿区内主要潜在暗河通道位置物探成果, 确定矿区内主要岩溶通道平面位置如图 7 所示, 通过三维地质模型提供的解译标准, 可实现对岩溶矿区内重要地下水通道准确测定。

2.3 矿区精细三维地质模型构建

图 11 为采用 SKUA-GOCAD 软件基于精细三维地层模型、断层模型、生产数据(各中段采切平面布置图、各中段采空区轮廓图)等多源数据, 融合构建的一个含地层、构造、巷道、采空区、矿体、物探数据和地表影像及地表高程模型的精细三维地质模型, 该模型可实现对地下空间展布特征, 特别是巷道、采空区、断层构造等直观显示。结合该模型, 可进一步构建矿区水文地质概念模型, 深入刻画矿区地下水优势通道及补径排体系。

3 矿区水文地质概念模型

3.1 矿区边界条件

根据物探成果分析, 矿区东西部的 F6 和 F3 断层为天然的隔水断层, 属隔水边界。矿区开采后, 沿

F1 断裂带的开采巷道将断裂阻水功能破坏, 沟通了原有的南、北两个独立地下水单元, 叠加岩溶通道和采矿引起的采动裂隙带, 致使地下水系统发生显著改变。根据水文地质钻探结果, 矿区北部钻孔揭露地下水头为 1 500.46 m, 潜水位位于地下 72 m; 南部钻孔揭露地下水头为 1 521.46 m, 潜水位位于地下 20.27 m, 矿区的侧向补给主要来源于南北部, 即南北部为矿区流量边界, 地下水总体流向由南至北。

3.2 矿区含水系统概化

根据地层岩性及其组合特征、地下水赋存条件、水理性质和水力特征, 矿区内地下水类型主要分为碳酸盐岩岩溶水和基岩裂隙水。分析已有的水文地质测绘、水文地质钻孔观测与编录及钻孔抽水实验等大量资料, 基岩裂隙水含水岩组主要包括长兴(P_{3c})、大隆(P_{3d})、龙潭(P_{3l}), 其中龙潭(P_{3l})组地层为隔水层, 长兴(P_{3c})、大隆(P_{3d})组地层富水性弱, 可概化为弱透水层。碳酸盐岩含水岩组主要是夜郎组第一段(T_{1y}^1), 其在近地表岩溶发育, 富水性中等, 可概化为相对含水层, 夜郎组第二段(T_{1y}^2)岩溶较发育, 含水介质为裂隙、溶洞、管道等, 为含水层, 各地层渗透系数如表 3 所列(测试段不存在明显岩溶发育现象)。

表 3 地层渗透系数

Table 3 The hydraulic conductivity of stratum

地 层	渗透系数 $k/m \cdot d^{-1}$	地 层	渗透系数 $k/m \cdot d^{-1}$
T_1y^2	8.909	T_1y^{1-1}	0.309 3
T_1y^{1-3}	0.46	P_3c+d	0.014 85
T_1y^{1-2}	0.347	P_3l	0.002 874

3.3 水文地质概念模型刻画

矿区水文地质概念模型如图 12(a)所示, 区内地下水的补给来源主要为大气降雨补给, 矿区地表岩溶发育, 大气降水大部分通过盲谷、洼地或漏斗汇集后成为伏流。矿区内紫木凶洼地为主要的汇水区, K20落水洞位于矿区内洼地北东缘的陡崖下, 洼地汇集的地表水即通过该落水洞转化为地下水。矿山开发前, 由 K20 补给的地下水经岩溶系统流向矿区北部, 与矿区太平洞暗河连通并排泄至矿区外; 矿山地下开采后, 由于采矿活动破坏了 F1 断层的阻水功能, 及深部开采疏水和集中排水, 引起地下水流向改变, 致使补给的地下水不再向太平洞暗河径流, 而经岩溶通道和采动裂隙带转入流向井下一中段, 随后经一中段暗河向采空区及开采巷道汇集, 最后集中于水仓经过竖井并抽排至污水处理厂, 即地表汇水经 K20 沿一中段暗河大量补给矿井水, 矿井涌水量大, 给矿山污水处理造成了严重负担。

根据水文地质概念模型显示, 钻孔 ZJ03 位于矿区内一中段暗河(岩溶通道)上方, 钻孔内可听见明显的流水声, 表明地下存在较大尺寸的充水岩溶通道, 孔内钻孔影像及现场取样岩心如图 12(b)所示,

在 50~55 m 深度范围内有多处溶洞发育, 钻孔岩心破碎, 显示该地层岩溶发育强烈, 地下水流动较快, 证实了该处为地下水岩溶通道, 同时也验证了水文地质模型的可靠性。

该模型精准刻画了紫木凶矿山通道, 实现了矿山地下空间展布特征及地下水迁移污染过程可视化, 尤其是对地下水优势通道、径流特征等, 可清晰展示矿区地下水系统边界、地层水力特性、优势水力通道、补径排体系等, 可为分析预测矿区地下水环境污染提供重要依据, 进而为地下水污染精细防治工程设计提供支撑。

4 讨论

岩溶区矿山岩溶发育强烈, 地下水通道复杂, 物探技术是查明岩溶区矿山地下水通道与水文地质条件的重要方法, 在定位尾矿库渗漏岩溶通道^[29]、查明矿区地下水污染通道展布^[30]等方面已得到成功应用。但物探解译成果通过二维平面方式进行表达, 且常存在多解性, 物探解译成果的质量依赖研究者经验, 制约了岩溶通道探查的可靠性。通过三维地质模型可实现对水文地质条件的直观表达, 实现了地下水补-径-排过程的可视化^[31-32], 然而传统三维地质建模主要依靠有限的钻孔数据, 点状分布的钻孔数据存在“一孔之见”的问题, 不能实现对地质信息的连续表达, 也缺乏融合地球物理勘探成果的方法。本文提出的地球物理勘探技术和三维地质建模技术相结合的方法, 融合矿区勘探钻孔、地质剖面图和物探成果等多源数据, 实现多源地质信息与地球物理勘探数据的互

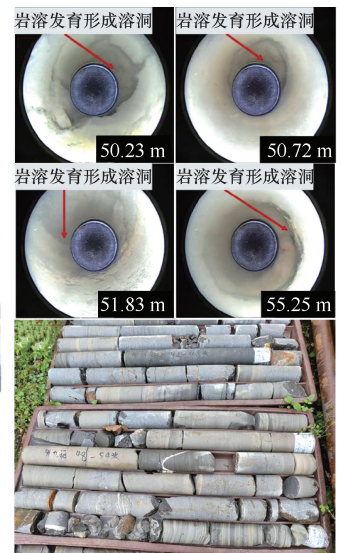
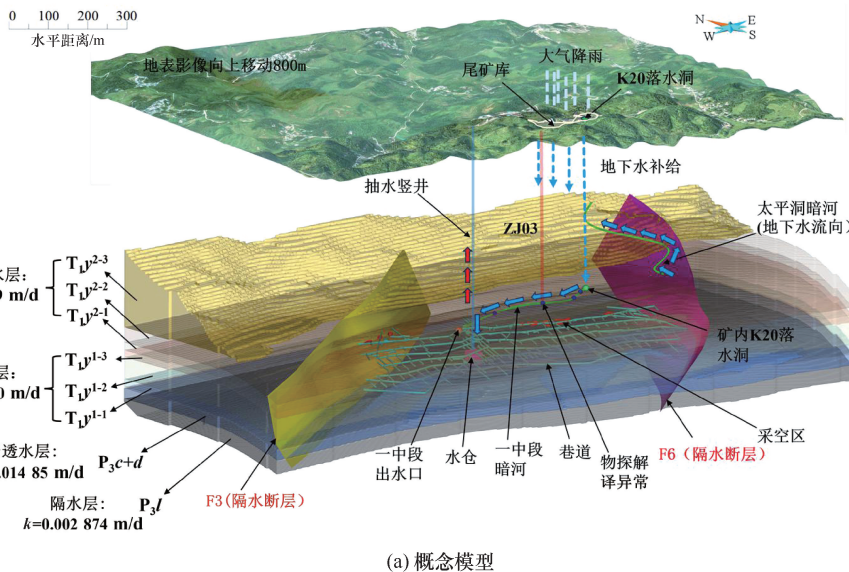


图 12 紫木凶金矿水文地质概念模型及其验证

Fig. 12 Hydrogeological conceptual model of Zimudang gold mine and its verification

馈解译, 解决了物探成果多解性问题, 进一步提升了三维地质模型刻画精度。提出的方法应用在岩溶发育的紫木凼金矿, 实现了整个矿区水文地质条件及岩溶通道可视化, 提高了模型对地下水系统描述的准确性。该方法对于各类矿区建模均具有普适性, 且获得的模型具有更高的精度, 可为岩溶区矿山地下水污染科学防治和矿井突涌水害防治提供重要支撑。应该指出, 本文提出的地球物理勘探技术和三维地质建模技术相结合的方法的基础是丰富的地质数据, 在缺乏地质信息的场景应用受限。

5 结论

为查明岩溶区矿山开采作用下复杂的水文地质条件, 认识剧烈采矿活动对岩溶区矿山地下水系统的影响, 以岩溶区紫木凼金矿为研究对象, 开展了系统的水文地质调查、地球物理勘探、三维地质模型构建等工作, 得到以下结论。

(1) 根据区内密集勘探钻孔和生产过程修正地质剖面图, 建立了精细的三维地质模型, 并在区内开展了地球物理勘探, 通过三维地质模型, 获得勘探剖面获得的地质信息, 可形成准确的地球物理勘探解译标准。

(2) 在矿区潜在地下水优势通道及水文地质边界(岩溶管道和断层)开展地球物理勘探, 通过建立的解译标准, 可准确确定优势通道和水文地质边界位置, 据此识别暗河通道及断层并建立模型, 实现了对矿区水文地质边界和通道的刻画。

(3) 剧烈采矿活动可引起地下水系统发生显著改变。通过综合水文地质勘察, 发现采矿活动主要集中在F1控矿带, 采矿前为隔水断层, 采矿过程剧烈的采矿活动显著改变了地层结构(形成大体积采空区、裂隙带), 叠加赋矿地层岩溶通道发育, 引起地下水流向改变, 地表主要汇水由区内落水洞经岩溶通道和采动裂隙带流向井下一中段, 并抽出地表污水厂处理。研究成果为地下水污染源识别和污染迁移路径分析提供了重要依据, 对地下水污染源减量 and 过程阻控提供支撑。

(4) 在精细三维地质模型的基础上建立了矿山水文地质概念模型, 实现了矿区水文地质条件可视化, 厘清了矿区地下水“补-径-排”体系, 可为矿山地下水污染“源头-过程-末端”系统科学防治提供支撑。

参考文献(References):

[1] 查学芳, 覃应机, 吴攀, 等. 磷石膏堆场渗漏影响下岩溶地下水

地球化学过程[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1708-1715.

ZHA Xuefang, QIN Yingji, WU Pan, et al. Geochemical process as affected by the leakage of phosphogypsum stock dump [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1708-1715.

[2] 林德洪, 刘汉武, 史绪山. 贵州鬃岭煤矿区水环境污染特征及成因分析[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(5): 186-195.

LIN Dehong, LIU Hanwu, SHI Xushan. Characteristics and cause analysis of water pollution in Zongling coal mining area, Guizhou [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(5): 186-195.

[3] 查学芳, 吴攀, 李学先, 等. 基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5084-5095.

ZHA Xuefang, WU Pan, LI Xuexian, et al. Karst hydrogeochemical characteristics and controlling factors of Carlin-type gold mine area based on hydrochemistry and sulfur isotope [J]. Environmental Science, 2022, 43(11): 5084-5095.

[4] 褚学伟. 黔中岩溶山谷型赤泥尾矿库污染物迁移机理及预测研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.

CHU Xuewei. Research on the Mechanism and Prediction of Contaminant Migration in Red Mud Tailings in Karst Valley in Central Guizhou [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.

[5] 张亮. 毛坪铅锌矿岩溶地下水系统及结构辨识研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.

ZHANG Liang. Study on Groundwater Systems and Structure Identification in Maoping Lead-Zinc Mine, Southwest China [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.

[6] 杜明泽, 李宏杰, 李文, 等. 煤矿区场地地下水污染防控技术研究进展及发展方向[J]. 金属矿山, 2020(9): 1-14.

DU Mingze, LI Hongjie, LI Wen, et al. Study progress and development directions of the prevention and control technology of ground water pollution in coal mine sites [J]. Metal Mine, 2020(9): 1-14.

[7] 张豪哲, 李文, 杜明泽, 等. 闭坑矿山地下水污染防治技术研究现状和展望[J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 170-176.

ZHANG Haozhe, LI Wen, DU Mingze, et al. Progress and prospect of groundwater pollution control technology for closed mine [J]. Coal Engineering, 2022, 54(11): 170-176.

[8] 张进德, 田磊, 裴圣良. 矿山水土污染与防治对策研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 157-163.

ZHANG Jinde, TIAN Lei, PEI Shengliang. A discussion of soil and water pollution and control countermeasures in mining area of China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 157-163.

[9] YAN Q T, ZHANG Z J, CHEN Z L. Microbial synthesized iron nanoparticles after recovering rare earth elements used for removing arsenic in mine groundwater [J]. Separation and Purification

- Technology, 2023, 327: 124938.
- [10] NINANYA H, VARGAS E A, GUIGUER N, et al. Analysis of water control in an underground mine under strong karstmedia influence (Vazante mine, Brazil) [J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26: 2257-2282.
- [11] LI B, ZHANG H L, LONG J, et al. Migration mechanism of pollutants in karst groundwater system of tailings impoundment and management control effect analysis: Gold mine tailing impoundment case[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 350: 131434.
- [12] 刘小佳, 刘聚涛, 胡芳. 幸福河湖建设实践与成效——以湘东区萍水河为例[J]. 水利发展研究, 2023, 23(12): 66-70.
LIU Xiaojia, LIU Jutao, HU Fang. The practice and effect of the construction of happy rivers and lakes: a case study of Pingshui River in Xiangdong District[J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(12): 66-70.
- [13] 刘天云, 罗锐恒, 胡顺强, 等. 文山小河尾水库岩溶渗漏水文地质条件与管道位置识别[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 88-99.
LIU Tianyun, LUO Ruiheng, HU Shunqiang, et al. Hydrogeological conditions of karst leakage and identification of pipeline location in Xiaohewei reservoir, Wenshan [J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(1): 88-99.
- [14] REN H J, SUI W H, MENG X D, et al. Hydrogeological investigation for the assessment of spring pollution due to abandoned mines in a karst area[J]. Water, 2021, 13(17): 2399.
- [15] TARGAD A, MOREIRA C A, CASAGRANDE M F S. Hydrogeological analysis of sulfide tailings at a uranium mine using geophysical and hydrochemical methods [J]. Mine Water and the Environment, 2021, 40: 671-689.
- [16] 任虎俊. 废弃煤矿岩溶地下水污染机理及防控研究: 以贵州凯里鱼洞河流域为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
REN Hujun. Investigation on the Mechanism and Control of Karst Groundwater Pollution due to Abandoned Coal Mines: A Case Study in the Yudong River Basin, Kaili City, Guizhou Province, China [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [17] 杨天春, 王丹齐, 张叶鹏, 等. 生产矿山岩溶灾害勘查中的综合物探应用研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(3): 1145-1153.
YANG Tianchun, WANG Danqi, ZHANG Yipeng, et al. Application research of comprehensive geophysical method to karst investigation in a productive mine[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(3): 1145-1153.
- [18] SONG R B, QIN X Q, TAO Y Q, et al. A semi-automatic method for 3D modeling and visualizing complex geological bodies[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 78(3): 1371-1383.
- [19] 田雪峰, 王金林, 张征峰, 等. 基于多源数据的三维地质建模与应用[J]. 新疆地质, 2022, 40(3): 456-459.
TIAN Xuefeng, WANG Jinlin, ZHANG Zhengfeng, et al. 3D geological modeling and application based on multi-source data[J]. Xinjiang Geology, 2022, 40(3): 456-459.
- [20] 熊玖琦, 刘星. 基于支持向量机的顾北煤矿北一矿区三维地质模型构建[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(19): 8194-8199.
XIONG Jiuqi, LIU Xing. A 3D geological model for the north one mining area of Gubei Coal Mine based on support vector machine[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(19): 8194-8199.
- [21] MARQUES F, DIAS P, CARVALHO J, et al. 3D constrained gravity inversion and TEM, seismic reflection and drill-hole analysis for new target generation in the Neves-Corvo VMS Mine Region, Iberian Pyrite Belt[J]. Natural Resources Research, 2022, 31(5): 2321-2346.
- [22] 张夏林, 吴冲龙, 周琦, 等. 贵州超大型锰矿集区的多尺度三维地质建模[J]. 地球科学, 2020, 45(2): 634-644.
ZHANG Xialin, WU Chonglong, ZHOU Qi, et al. Multi-scale 3D modeling and visualization of super large manganese ore gathering area in Guizhou China [J]. Earth Science, 2020, 45(2): 634-644.
- [23] 黄永志, 邹姐姐, 田丰, 等. 黔西南紫木函金矿床三维地质建模与成矿分析[J]. 矿床地质, 2023, 42(5): 927-924.
HUANG Yongzhi, ZOU Niuniu, TIAN Feng, et al. Three-dimensional geological modeling and mineralization analysis of Zimudang gold deposit in southwestern Guizhou [J]. Mineral Deposits, 2023, 42(5): 927-944.
- [24] JIN X, WANG G W, TANG P, et al. 3D geological modelling and uncertainty analysis for 3D targeting in Shanggong gold deposit (China) [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2020, 210: 106442.
- [25] 王素芬, 屈挺, 贺日政, 等. 西藏甲玛矿区三维地质建模与层状砂卡岩靶区预测[J]. 地质通报, 2021, 40(12): 2110-2122.
WANG Suifen, QU Ting, HE Rizheng, et al. 3D geological modeling and stratified skarn target prediction in the Jiama Deposit, Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(12): 2110-2122.
- [26] 杨通花. 基于三维地质建模的地下河空间展布特征分析: 以大小井地下河为例[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
YANG Tonghua. Spatial Distribution Characteristics of Underground River Based on 3D Geological Modeling: A Case Study of Da Xiaojing Underground River [D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.
- [27] 孟美杉, 顾海波, 孙杰夫, 等. EVS耦合三维地质模型在地下水污染修复中的应用[J]. 地质论评, 2023, 69(S1): 378-380.
MENG Meishan, GU Haibo, SUN Jieju, et al. Application of EVS coupled three-dimensional geological modeling in groundwater pollution remediation[J]. Geological Review, 2023, 69(S1): 378-380.
- [28] D' AFFONSECA F M, FINKEL M, CIRPKA O. Combining implicit geological modeling, field surveys, and hydrogeological modeling to

- describe groundwater flow in a karst aquifer [J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28: 2779-2802.
- [29] 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.
- [30] 段俭君, 李卿. 南方煤矿区喀斯特泉污染源识别及污染通道探查方法 [J]. *能源与环保*, 2019, 41(11): 62-66.
- DUAN Jianjun, LI Qing. Identification of karst spring pollution sources and exploration method of pollution channels in southern coal mine area [J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2019, 41(11): 62-66.
- [31] 田浪, 陈世万, 吴佼基, 等. 岩溶区闭坑煤矿采空区综合物探及三维地质模型构建 [J]. *矿业安全与环保*, 2022, 49(6): 112-117.
- TIAN Lang, CHEN Shiwan, WU Jiaoji, et al. Comprehensive geophysical exploration and three-dimensional geological model construction of goaf in closed pit coal mine in karst area [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2022, 49(6): 112-117.
- [32] 陈根深, 郭绪磊, 刘刚, 等. 宜昌长江南岸岩溶流域典型区三维地质建模 [J]. *安全与环境工程*, 2019, 26(2): 1-8.
- CHEN Genshen, GUO Xulei, LIU Gang, et al. 3D geological modeling in typical area of karst basin on the south bank of the Yangtze River in Yichang City [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2019, 26(2): 1-8.

(责任编辑 王海锋)