

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.261>



采动影响下复杂岩溶矿区地表水—地下水交互模式

康小兵¹, 乔宇^{1,2}, 眭素刚^{3,4*}, 王帮团^{3,4}, 许模¹

1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川成都 610059
2. 四川省第四地质大队, 四川成都 611100
3. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南昆明 650224
4. 云南省岩土工程与地质灾害重点实验室, 云南昆明 650224

摘要: 为研究采矿活动影响下的复杂岩溶矿区地表水—地下水相互作用模式, 借助水化学及同位素技术、示踪实验、数值模拟等方法, 发现天然条件下, 地下水以大气降水补给为主, 沿分水岭向牛栏江排泄。开采干扰下(1950—2010年), 浅层开采对区域地下水流动系统影响有限, 仅引起局部水位下降, 改变局部径流方向。干扰强化条件下(2010年后)第一时期(2010—2025年)呈现“浅部弱自然循环—深部强人工排泄”的特征, 浅部含水层与牛栏江弱连通, 深部地下水向巷道排泄; 第二时期(2025年后)以持续扩展的降落漏斗为特征, 预测往后第5、10、20年的水位下降约64 m、103 m、120 m。综上所述, 矿区岩溶地表水—地下水交互受控于矿区岩溶水文地质结构与采矿活动。研究成果可为会泽铅锌矿区制定科学有效的防排水方案提供理论依据。

关键词: 岩溶矿区; 地表水—地下水交互; 水文地球化学; 深部开采; 水文地质。

中图分类号: P641

文章编号: 1000—2383(2026)06—2115—14

收稿日期: 2025-08-21

Interactive Mode between Surface Water and Groundwater in Complex Karst Mining Areas under Influence of Mining Activities

Kang Xiaobing¹, Qiao Yu^{1,2}, Sui Sugang^{3,4*}, Wang Bangtuan^{3,4}, Xu Mo¹

1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. The Fourth Geological Brigade of Sichuan Province, Chengdu 611100, China
3. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metal Industry Co., Ltd., Kunming 650224, China
4. Yunnan Key Laboratory of Geotechnical Engineering and Geohazards, Kunming 650224, China

Abstract: The Huize lead-zinc mine is located in the karst plateau of northeastern Yunnan. Long term mining has formed a complex underground mining tunnel system below the local minimum erosion benchmark level of the Niulanjiang River. The interaction between karst surface water and groundwater in the mining area is extremely complex under the influence of mining activities. In this article it uses hydrochemical and isotopic techniques, tracer experiments, numerical simulations, and other methods to deeply explore the interaction process between surface water and groundwater in mining areas. The following conclusions are drawn. Under natural conditions, groundwater is mainly supplied by atmospheric precipitation and discharged along

基金项目: 云南省基础研究专项(No.202301AS070008); 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司科研项目; 云南省科技厅科技计划项目基础研究专项(No.202401AT070211); 中铝国际重点科研项目(No.CJ2022JS-13); 云南省岩土工程与地质灾害重点实验室(培育)开放基金资助项目(No.YNYDK-202209)。

作者简介: 康小兵(1981—), 副教授, 从事水文地质专业的教学和研究工作。ORCID: 0000-00001-5750-1090. E-mail: Kangxiaobing09@cduet.cn

* **通讯作者:** 眭素刚, 正高级工程师, 博士生导师, 总工程师, 主要从事矿山水工环地质研究工作。E-mail: suisugang2@zskk1953.com

引用格式: 康小兵, 乔宇, 眭素刚, 王帮团, 许模, 2026. 采动影响下复杂岩溶矿区地表水—地下水交互模式. 地球科学, 51(6): 2115—2128.

Citation: Kang Xiaobing, Qiao Yu, Sui Sugang, Wang Bangtuan, Xu Mo, 2026. Interactive Mode between Surface Water and Groundwater in Complex Karst Mining Areas under Influence of Mining Activities. *Earth Science*, 51(6): 2115—2128.

the watershed to the Niulanjiang River. Under the disturbance of mining (1950—2010), shallow mining had limited impact on the regional groundwater flow system, only causing a local water level drop and changing the direction of local runoff. Under the conditions of intensified interference (after 2010), the first period (2010—2025) presents the characteristics of “weak natural circulation in the shallow part and strong artificial discharge in the deep part”. The shallow aquifer is weakly connected to the Niulanjiang River, and the deep groundwater is discharged into the tunnel. The second period (after 2025) is characterized by a continuously expanding descending funnel, and it is predicted that the water level will decrease by about 64 m, 103 m, and 120 m in the 5th, 10th, and 20th years. In summary, the interaction between karst surface water and groundwater in mining areas is controlled by the hydrogeological structure of karst and mining activities. The research results provide theoretical basis for the development of scientific and effective waterproofing and drainage plans in the Huize lead-zinc mining area.

Key words: karst mining area; interactive between surface water and groundwater; hydrogeochemistry; deep mining; hydrogeology.

0 前言

人类活动影响下岩溶地区地表水—地下水交互作用研究是水文地质学领域的科学问题之一,其交互的补给、径流和排泄过程受控于复杂的地质构造、岩溶发育特征、气候条件及人类工程活动影响,具有显著的地质与工程效应.会泽铅锌矿区地处滇东北岩溶高原,区内断裂构造发育,碳酸盐岩广泛分布,发育二叠系栖霞—茅口组、石炭泥盆系、震旦系 3 个岩溶含水系统,含水系统间分布连续的隔水层,形成了由 3 个含水层及两个相对隔水层组成的矿区深部岩溶地下水系统,3 个碳酸盐岩岩溶含水系统具有很强的独立性.地下水循环系统受岩溶管道—裂隙网络控制,表现出强烈的空间异质性.矿区经过多年的开采,形成了复杂的地下井巷系统,且开采巷道位于最低侵蚀基准面以下,同时矿区距离区域排泄基准面牛栏江最近约 600 m,这一特殊的地理位置、复杂的地质条件与强烈的人类活动,使得矿区地下水与地表水体的水力联系更为密切,水文地质条件更加复杂,随着井巷工程不断往深部拓展,深部水文地质工程地质问题如深部涌水、地热、地压、岩爆等不良地质问题愈加凸显.深部矿床上覆和下伏地层均赋存高承压地下水,一旦揭露不但会造成较大的矿坑涌(突)水,大流量强排地下水还会对深部巷道围岩的稳定性造成影响,一方面增加了矿山安全生产建设的投资,同时也严重影响和制约了深部资源找探工作的进程.目前,该矿区地下水补径排特征仍存在诸多不确定性,如深部地下水补给的来源、深部与浅部径流路径的耦合关系,以及深部地下水排泄方式等.矿区地表水—地下水交互响应研究不仅对揭示岩溶含水系统的运移规律具有重要理论意义,还对深部地下水疏排工程优

化具有实际指导价值.

地表水与地下水是水文循环中不可分割的组成部分,二者通过下渗、补给、排泄等过程动态交互.大气降水和地表水渗入地下岩(土)体成为地下水,水在岩(土)体中流动,至排泄区或揭露点排出,构成一个补给—径流—排泄的交互过程.国内外学者对影响地表水—地下水交互的因素进行了研究(陈税琳和刘明柱,2011;杨瑞琪,2022).一些学者认为地质构造控制着区域地形(地貌)构架,影响着地下水储存类型和地下水循环(孙厚云等,2022),如地理位置影响着矿区的气候特征和河流分布,进一步影响着地下水循环和排泄.此外,地表水—地下水交互也受人类工程活动影响(郑剑等,2025),如隧道开挖后,隧道作为一个新的自由透水面,截断了从补给到沟谷排泄的地下水流,影响了隧底以上的地下水循环(尚海敏等,2025);地下工程开挖疏排水,对山体地表水—地下水交互和地表植被可能带来重要影响(胡振琪,2019).毛学红(2024)认为煤矿开采行为对地下水环境的影响具体表现为:破坏地下水的空间结构、改变地下水循环形态;地表水—地下水相互作用深刻影响着地下水系统,但其作用模式与强度尚不明确,因此,厘清二者的交互模式具有重要意义(余倩等,2023).

地表水—地下水交互研究常采用水文地质条件分析、水化学分析、同位素示踪、水文地质实验(如放水实验)和示踪实验等手段进行研究(曹阳,2009;孙芳强,2010;温汉辉,2013).化学和稳定同位素数据已被广泛应用到岩溶水文系统研究中,以阐明地下水循环模式和水文地质特征,同时为查明岩溶水系统补径排路径,厘清岩溶水流场特征提供了新的依据(Bakalowicz,2015;Liu *et al.*,2019).特别是降水的氢、氧同位素组成已经作为地下水的示踪

牛栏江起于松阳县杨林,经小牛栏流入金沙江,全长 423 km. 该河流自南部至北部贯穿矿区的东部,是该地区面积最大、切割最深的一片水域,河谷宽 200~300 m,江面宽 30~150 m,流经矿区长度约 4 km,最高洪水位标高为 1 561.79 m.

会泽铅锌矿属于超大型富集银、锗的高品位铅锌矿床,矿体主要产于下石炭统摆佐组中、上部白云岩及灰岩中,属于沉积—成岩期后热液改造叠加型层控矿床. 截止 2017 年 12 月底,矿山保有铅锌矿石量 774 万 t,保有铅锌金属量 215 万 t,伴生银 584 t,伴生锗 282 t,铅锌品位在 25% 以上.

截止 2019 年 4 月,麒麟厂已有 1 571 m、1 511 m、1 451 m、1 391 m、1 331 m、1 261 m、1 211 m、1 151 m、1 091 m、1 031 m、961 m 等多个中段,其中 1 167 m 水平以下为探矿中段,1 031 m 属于麒麟厂最低水平;961 m 仅连接四号斜井及二号盲竖井,巷道开拓尚未展开(图 2)(乔宇,2025).

麒麟厂总涌水量在 7 200 m³/d 左右,丰水期(或井下掘进、勘探揭露震旦系水)时水量最大可达 11 000 m³/d,主要出水点为 86 号穿脉栖霞—茅口组含水层突水钻孔,涌水量 2 640~3 360 m³/d,占麒麟厂总排水量 30.5%~36.7%,其余则为南北沿脉石炭—泥盆系出水点涌水. 矿山浅部涌水自泄到 1 584~1 571 m 中段,经排水渠自流至临江坑口,排泄于牛栏江. 1 584~1 571 m 水平以下巷道涌水,麒

麟厂集中于 1 031 m 中段水仓,然后抽至 1 584~1 571 m 中段,排至牛栏江. 目前,麒麟厂采用强排水,降压疏干方式确保生产安全,1 584~1571 m 中段以上基本趋于疏干状态.

矿区分布的地层有元古界震旦系(Z)、古生界寒武系(Є)、泥盆系(D)、石炭系(C)、二叠系(P),中生界三叠系(T)、侏罗系(J)以及新生界第四系(Q). 矿区深部地下水含水系统是由 3 个含水层及两个相对隔水层组成,含水层为二叠系栖霞—茅口组(P_1q+m)岩溶裂隙水含水层、石炭系威宁组、摆佐组、大塘组—泥盆系宰格组($C_2w+C_1b+C_1d+D_3zg$)岩溶裂隙水含水层、震旦系灯影组、陡山沱组(Z_2dn+Z_2d)岩溶裂隙水含水层;隔水层为二叠系梁山组—石炭系马平组(P_1l+C_3m)隔水层与泥盆系海口组—寒武系筇竹寺组($D_2h+Є_1q$)隔水层.

受地层岩性、构造及补给来源等多种因素的影响,各个含水层的富水性存在很大差异. 其中,含水层与隔水层呈交错分布,3 个岩溶裂隙含水层之间是相互独立的,部分区段内的构造裂隙含水层与邻近的岩溶裂隙含水层有水力联系,断裂破碎带及其两侧的影响带与含水层组成深层地下水含水系统(图 1).

1.2 研究方法

目前,国内外关于地表水—地下水转化作用的研究方法主要有水文学方法、水化学法、同位素法、

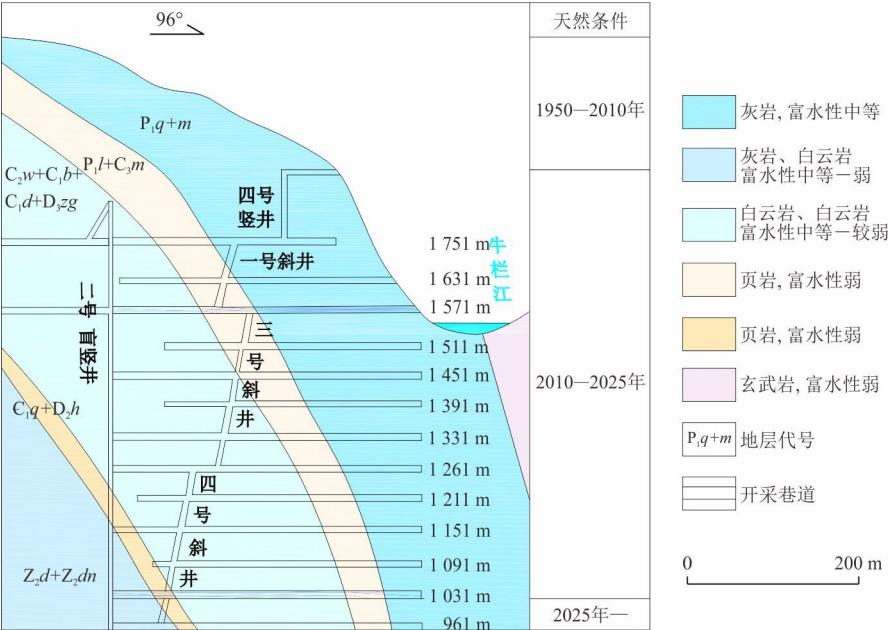


图 2 研究区开采巷道分布
Fig.2 Distribution of mining tunnels in the study area

温度示踪法和数值模型法等。鉴于地表水与地下水交互作用的复杂性,综合运用多种方法进行互相验证分析,既能降低复杂条件下的尺度效应风险,也是系统阐明地表水与地下水转化作用机制的关键。随着计算机运算能力的提高,利用数值模型逐渐成为研究流域尺度地表地下水循环的重要方法。

通过水质分析可以了解矿区水文地球化学特征、矿区地下水环境的演化规律,了解地下水迁移、运动规律,判断矿床充水主要来源,为矿山防治水提供水化学特征依据。本次采用环境同位素测试和水质分析的方法,分别在年内枯、丰水期采样,对研究区地下水进行综合对比分析,采样点位置见图1。

1.2.1 水化学特征分析 地下水水质分析是研究地表水—地下水交互的重要手段(马瑞等,2013),通过多参数监测能够揭示水化学特征的变化规律,为地下水循环演化提供科学依据。其核心在于利用水化学指标识别不同含水层的补给来源与循环路径,例如通过矿化度差异区分深层滞流水与浅层入渗水,或借助离子比例(如 Na^+/Cl^- 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$)推断径流条件及滞留时间。同时,关键指标(如 HCO_3^- 、 Ca^{2+})的动态变化可反映水—岩相互作用强度及溶蚀—沉淀过程,而 NO_3^- 、 Cl^- 等异常则能指示人类活动或海水入侵的影响。

针对矿区采集的水样进行一般全分析,项目包含:色、浑浊度、臭和味、肉眼可见物、pH值、溶解性总固体、总硬度、总碱度、总酸度、钾离子、钠离子、钙离子、镁离子、氨根、碳酸氢根、氯化物、氟离子、硫酸根、硝酸根、磷酸根和亚硝酸盐等21项。

1.2.2 水环境同位素特征分析 同位素特征为研究地表水—地下水交互规律提供了重要依据,能够分析地下水更新速率、评价地表水与地下水的补排关系、揭示地下水形成过程及来源,并识别不同含水层之间的水力联系。通过稳定同位素($\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$)的特征可区分不同水源,放射性同位素(如 ^3H ,半衰期12.4年)可判定水体年龄,识别现代循环水与封闭多年的古地下水。结合多同位素数据,可量化不同水源的混合比例,解析径流路径的时空演变特征。

本次研究采集了牛栏江、者海湖地表水、大气降水及矿区不同含水层地下水,测试了 ^3H 、 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值。通过对比三水(降水、地表水、地下水)的同位素组成,研究地下水的来源。

1.2.3 示踪实验 示踪实验是地表水—地下水交互作用研究中十分有效的手段之一。结合抽(放)水

试验,矿区于2019年进行了示踪试验,通过对投放指示剂的监测研究矿区地表水(牛栏江)与地下水的相互关系,分析矿坑充水的补给来源以及补给通道。

依据矿区施工的水文钻孔裂隙发育情况及灰岩地下水流场,选择SK12水文孔作为示踪剂投放孔,钻孔孔深100.126 m,距离86穿突水点直线距离约800 m,距离SK19孔直线距离约1350 m;示踪试剂选用对环境无害的盐(NaCl)为示踪剂,加入了3000 kg的盐,在充分溶解食盐后,然后通过潜水泵输送至钻孔孔底。选择1031 m中段86穿脉涌水、SK19放水孔、下游SK13孔及河对岸SK15孔作为长期动态监测点取水样检测,同时对1091 m中段栖霞—茅口组出水点、D64号灰岩泉、1571 m巷道排水、牛栏江江水进行不定时取样检测。

示踪试验中86线穿脉巷道位于1031中段,揭露石炭系下统摆佐组(C_1b)、石炭系中统威宁组(C_2w)、石炭系上统马平组(C_3m);SK12孔深100.126 m,揭露二叠系下统栖霞—茅口组(P_1q+m);SK19孔深222.61 m,揭露石炭系中统威宁组(C_2w)、石炭系上统马平组(C_3m)、二叠系下统梁山组(P_1l)、二叠系下统栖霞—茅口组(P_1q+m);SK13孔深100.12 m,揭露二叠系下统栖霞—茅口组(P_1q+m);SK15孔深50.19 m,揭露二叠系下统栖霞—茅口组(P_1q+m);D64泉点出露于二叠系下统栖霞—茅口组(P_1q+m)中。

实验中,利用DDB-303手持电导仪,以 $0.1\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 的精度,对各监测点的地下水电导率变化情况进行测试,并在实验前连续3 d对各监测点的地下水电导率进行监测。试剂投放期间对各观测点电导率异常值及时分析和复测,保证了观测值的正确性。

1.2.4 三维数值模拟 数值模拟在地表水—地下水交互作用、矿坑涌水量预测和渗流场的动态变化研究上具有较好的效果。如杨彪等(2013)应用Visual MODFLOW软件建立不同矿区的三维地下水渗流模型,并对矿区的地下水流场、矿坑涌水量、溶质场等方面进行预测模拟,从而为矿山地下水灾害的防治提供依据。

(1)模型构建。本次数值模拟范围西以双水河—二道沟—大石头脑包地表分水岭为界,东以牛栏江为界,北端以双水河—老翅岩—老坪子地表分水岭为界,南以大石头脑包—乌孤坪子—包谷山地表分水岭为界,包含整个矿区(图1)。模型区剖分成

100×100 的网格,根据地层岩性将模型分成五层,并对矿区进行网格的加密处理(图 3).矿区开采巷道作为人工地下水排泄边界,使用第三类的排水沟边界 Drain 刻画,排水的水头取值即为开采巷道高程值,排水强度根据矿区涌水量监测结果调整.

(2) 水文地质参数的选取.模型的参数主要基于野外裂隙调查、以往工程经验参数与水文地质经验参数综合取值,结合《水文地质手册》中关于岩土体渗透系数的经验取值相关说明,确定研究区的渗透系数初始值,并输入模型进行计算.将模拟结果与实测数据进行对比分析,根据拟合结果反复调参,使误差降至允许范围之内.模型的渗透系数取值见表 1.

(3) 模型验证.模拟时间设置从 2010 年 1 月 1 日至 2025 年 1 月 1 日,时间步长取为 1 个月,模型运行 180 个时段,利用研究区前期钻孔地下水水位长期观测数据,选取其中 6 个观测数据,并设置地下水位拟合误差为±10 m,置信度为 95%,首先进行 GMS 的 PEST 参数自动估计校准法,初步对模拟进行校准,再结合试估—校正法人为校准模型.图 4a 为模

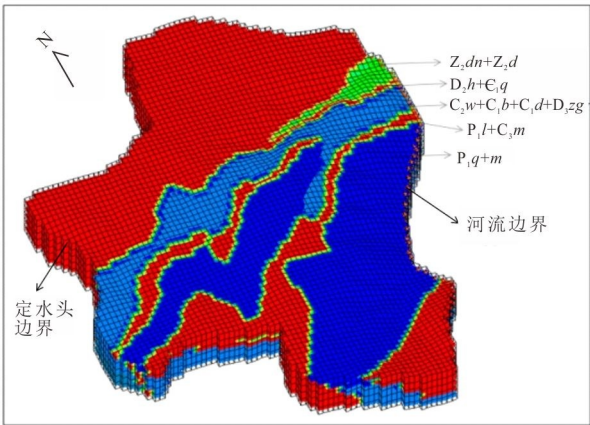


图 3 研究区地下水系统三维结构模型
Fig.3 Three dimensional structural model of groundwater system in the study area

型含水层观测点分布图,图 4b 为观测孔拟合对比图,图中观测点均靠近 1:1 直线且 $R^2=0.996$,拟合效果好.该模型可以反映模拟区实际的地下水流情况,利用校准后的模型进行后续的研究是基本可行的.

(4) 模拟工况.本次模型计算主要有以下两种工况:①自 2010 年 1 月 1 日至 2025 年 1 月 1 日,矿山开采位于最低排泄基准面之下,矿山排水成为新的排泄方式,对矿区进行 15 个水文年(2010—2025 年)的稳定流模拟,对于扰强化条件下第一时期地下水模式进行验证.②在矿区开采情况下,进行 20 个水文年(2025—2045 年)的非稳定流模拟,对于扰强化条件下第二时期地下水循环模式进一步的分析.

2 结果与讨论

矿区地表水—地下水交互作用模式受自然条件和人为开采活动的双重影响,其演化过程可分为 3 个典型阶段,分别为天然循环、人工扰动与干扰强化 3 个阶段.随着开采深度和强度的增加,地下水系统从自然补给—排泄平衡逐渐转向以人工排泄为主导的动态过程.这一演变不仅改变地下水的径流路径和排泄方式,还导致降落漏斗扩展、含水层疏干等环境问题.以下从天然循环、开采扰动到干扰强化 3 个阶段,系统分析矿区地表水—地下水交互作用过程的演化特征.

2.1 天然条件地表水—地下水交互作用模式

在矿山未开采之前,地下水流动系统主要受地形地貌及最低排泄基准面(牛栏江)控制,形成天然的地下水循环模式.具体而言,地下水主要来源于大气降水的入渗补给,在分水岭(双水河—小菜园—大菜园一带)形成补给区,并沿两侧径流.其中,右侧地下水向牛栏江方向径流排泄,而左侧地下水则向矿山河方向径流排泄,汇入者海河后注入牛栏江,最终均以牛栏江作为最低排泄基准面集中

表 1 地下水三维数值模型参数

Table 1 Parameters of groundwater three-dimensional numerical model

分区	$K_{xy}(\text{m/d})$	$K_z(\text{m/d})$	$S_s(1/\text{m})$	S_y
P_1q+m	0.6	0.35	0.06	0.000 6
Z_2dn+Z_2d	0.02	0.01	0.002	0.000 02
$C_2w+C_1b+C_1d+D_3zg$	0.65	0.325	0.065	0.000 65
P_1l+C_3m	0.005	0.002 5	0.000 5	0.000 005
D_2h+C_1q	0.005	0.003	0.000 5	0.000 005
$P_2\beta$	0.4	0.2	0.04	0.000 4

排泄.这一天然条件下,地下水系统处于动态平衡状态,地表水—地下水交互作用模式径流路径清晰,补给—径流—排泄关系稳定,如图5所示.

2.2 开采干扰下地表水—地下水交互作用模式

在1950—2010年期间,矿山开采主要位于最低排泄基准面之上,矿山开采对区域地下水流动系统的影响总体相对有限.然而,随着采矿活动的持续进行,不可避免地会引起局部地下水位的不同程度下降.李保珠(2001)对会泽铅锌矿进行水化学分析,发现研究区暗河出现浑浊水质、高COD及 Ca^{2+} 含量异常等局部水化学异常,直接反映了巷道排水对局部水流场的改造作用.该时期的地下水循环模式为:地下水主要接受大气降水入渗补给,向双水河—小菜园—大菜园分水岭向两侧流动,分水岭右侧地下水大部分向牛栏江排泄,少部分通过巷道排

水排出,侧翼地下水则向矿山河排泄,见图6.天然地下水循环在此阶段仍保持相对稳定的状态,但已开始受到采矿活动的轻微扰动.

2.3 干扰强化条件下地表水—地下水交互作用模式

在2010年之后,随着矿山开采深度不断加大,采矿活动逐渐延伸至最低排泄基准面以下.这一阶段,矿山开采对地下水流动系统的影响显著增强,导致天然地表水—地下水交互模式发生明显改变,形成了以采矿排水为主导的人工干扰强化地表水—地下水交互作用模式.根据开采深度、排水强度及地下水系统的响应特征,该阶段又可进一步划分为两个时期.

(1)第一时期(2010—2025年):此时为矿山开采向深部拓展的过渡期,地下水系统逐步受到强烈干扰,天然径流路径被人工排水工程改变.

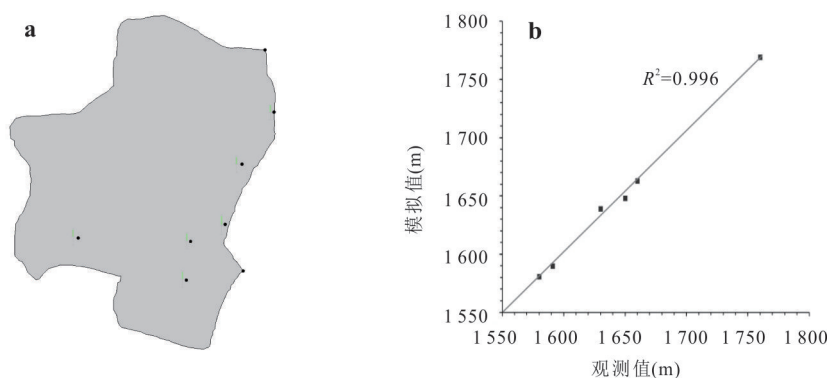


图4 地下水三维数值模型校验

Fig.4 Verification of groundwater three-dimensional numerical model

a.模型含水层观测点分布;b.观测孔拟合对比

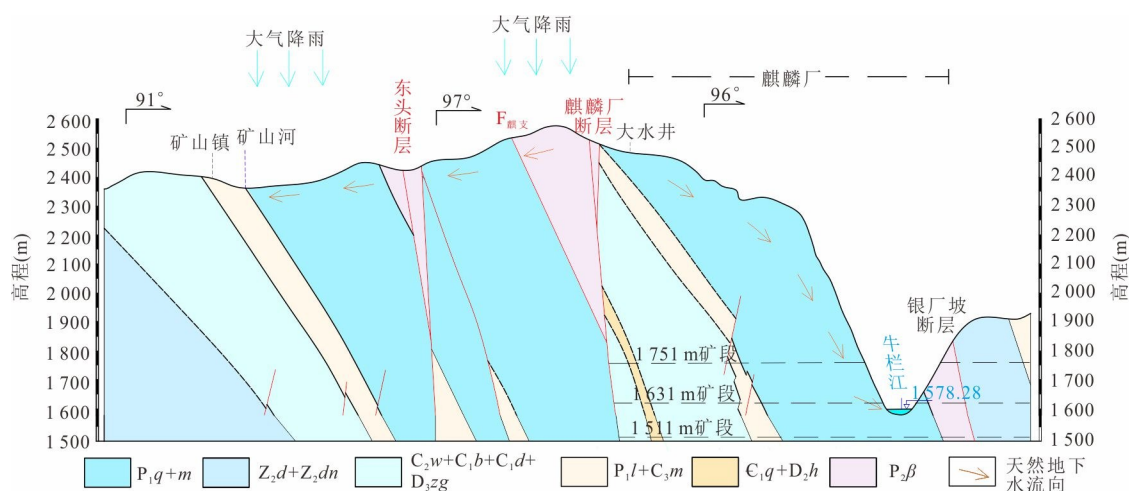


图5 天然地表水—地下水交互作用模式

Fig.5 The interaction mode between surface water and groundwater under natural conditions

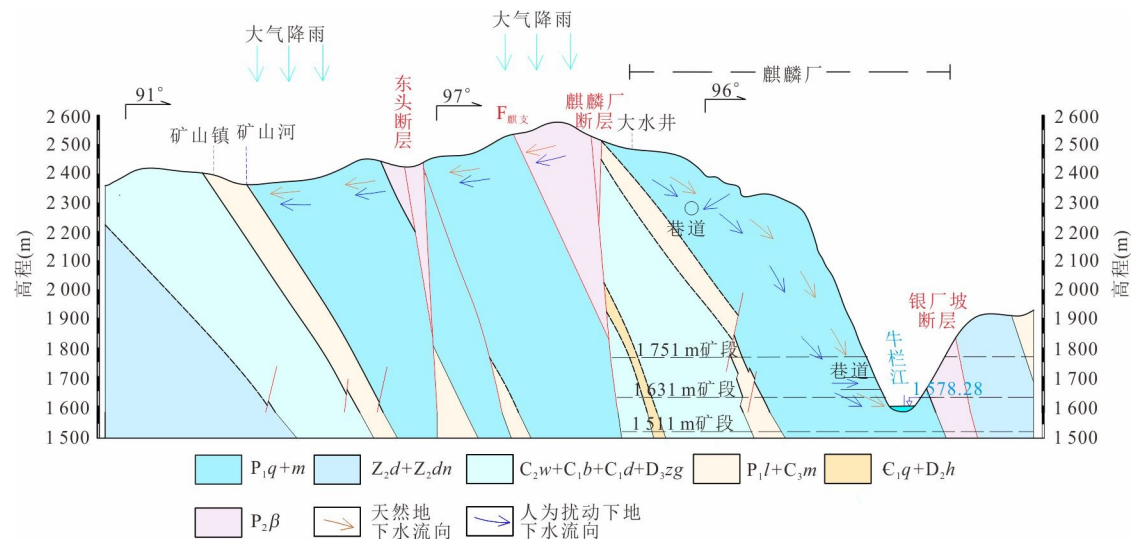


图 6 人工干扰下地表水—地下水交互作用模式

Fig.6 The interaction mode between surface water and groundwater under artificial interference conditions

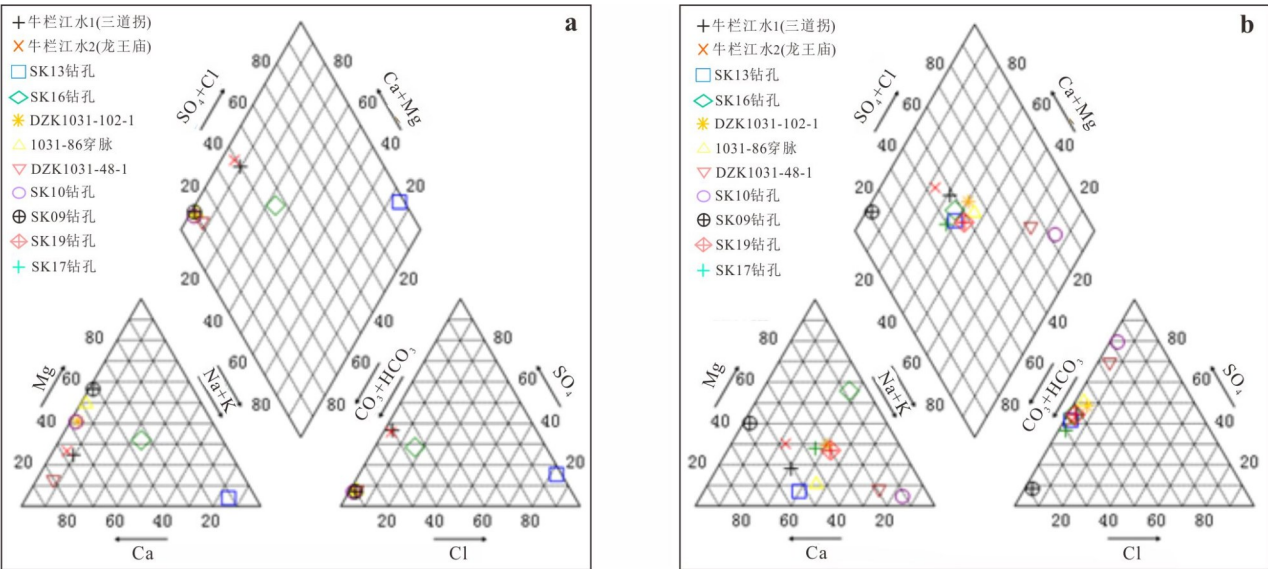


图 7 矿区水化学 piper 三线图

Fig.7 Piper diagrams of water chemistry in the study area

a. 枯水期; b. 丰水期; 数值单位为 %

(2)第二时期(2025年之后):随着开采深度进一步增加,地下水流动系统完全受控于矿山排水,天然地下水流动格局被彻底重塑.这一演变过程反映了矿山开采对地下水流动系统的扰动从局部影响逐步发展为系统性改变(图 6).

2.3.1 干扰强化条件下第一时期地表水—地下水交互作用模式 通过矿区水化学、同位素测试及示踪试验结果,深入分析该时期的地表水—地下水交互作用模式.研究区枯水期及丰水期地下水水化学特征见图 7.

利用昆明市大气降雨线作为研究标准,建立矿区各水样点枯水期及丰水期 δD 、 $\delta^{18}O$ 关系曲线图,结果如图 8.

根据水文地球化学分析测试及示踪试验结果,分析该时期地表水—地下水交互过程如下(图 9).

(1)补给特征.①大气降水为主要补给源.矿区各含水层 pH 值为 7.02~7.80,均属偏碱性淡水,Piper 三线图显示主要离子组成为 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,这一特征反映大气降水补给后经历的水岩相互作用过程.弱酸性的大气降水入渗后,首先溶解

碳酸盐岩($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$), 形成以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型为主的地下水;同时通过离子交换(如岩土中 Na^+ 与水中 H^+ 交换)和易溶盐类(如 NaCl 、 CaSO_4)的溶解,使水中 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子浓度增加,尤其在丰水期更为明显.

根据同位素特征可得,地下水 δD ($-100.4\text{‰} \sim -74.5\text{‰}$)、 $\delta^{18}\text{O}$ ($-13.57\text{‰} \sim -10.87\text{‰}$)均位于昆明大气降水线($\delta\text{D}=6.56\delta^{18}\text{O}-2.96$)左下方,且与大气降水同位素值($\delta\text{D}=-24.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=-$

-5.41‰)具有同源性,证实水源以大气降水入渗为主.

②含水层间存在越流补给.栖霞—茅口组与地表水体:浅部栖霞—茅口组地下水 δD ($-85.5\text{‰} \sim -74.5\text{‰}$)、 $\delta^{18}\text{O}$ ($-11.57\text{‰} \sim -10.87\text{‰}$)更接近牛栏江地表水($\delta\text{D}=-78.7\text{‰} \sim -76.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=-10.88\text{‰} \sim -10.41$)且 SK16 钻孔(牛栏江沿岸)水质类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,与江水共享 SO_4^{2-} 、 Na^+ 离子特征,表明浅部含水层与牛栏江存在弱

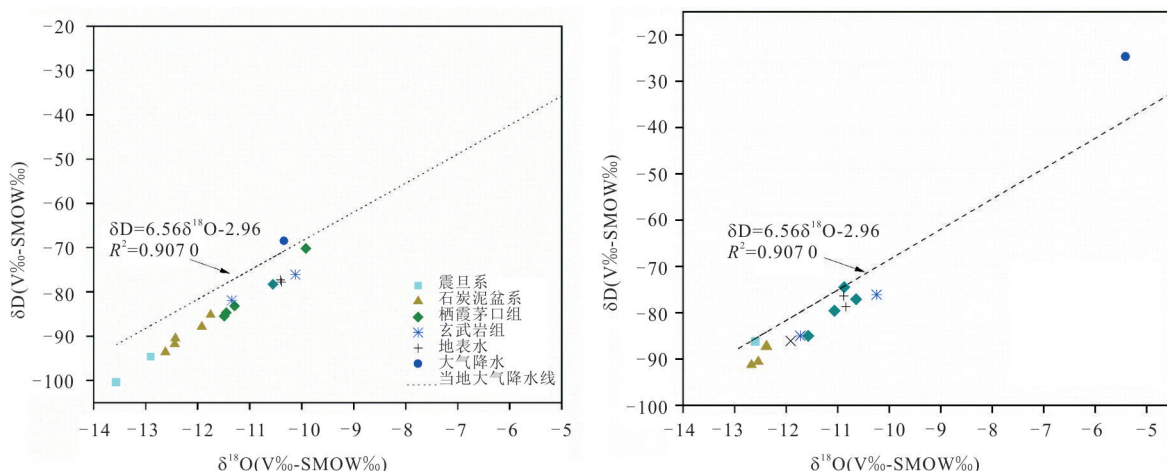


图 8 研究区地表水、地下水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig.8 The relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ of surface water and groundwater in the study area

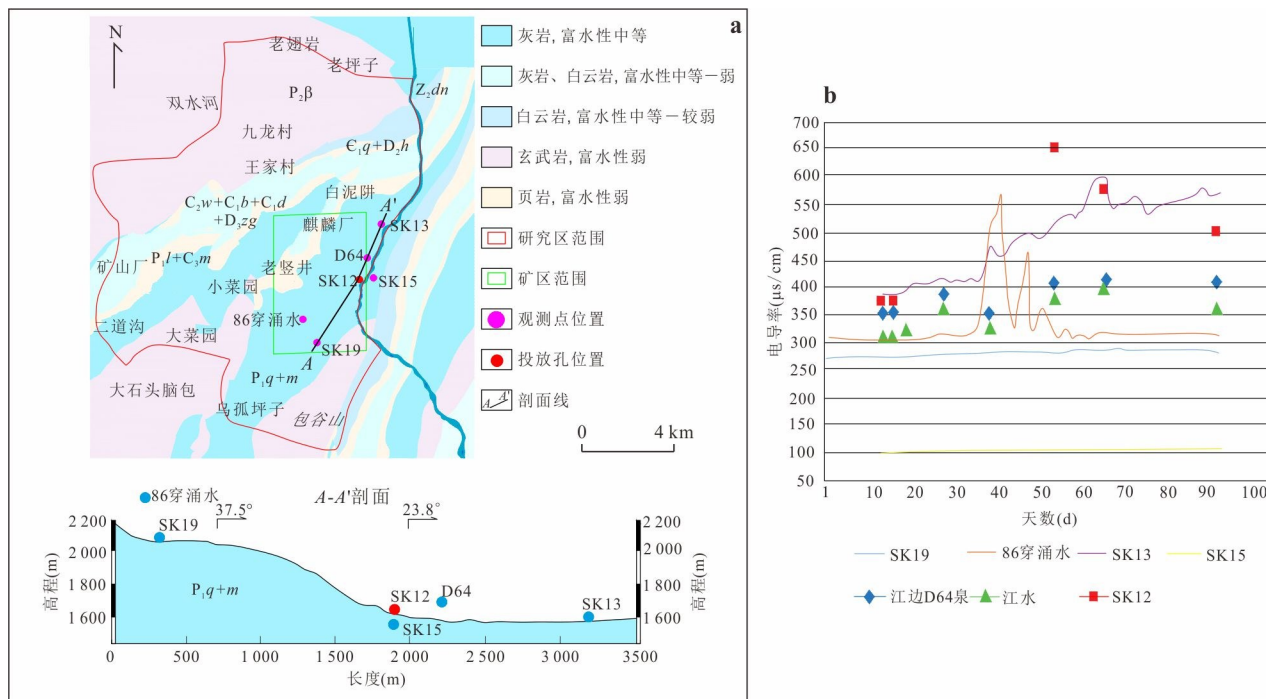


图 9 示踪试验点位(a)及监测结果(b)

Fig.9 Tracer test points(a) and monitoring results (b)

a. 示踪试验监测点位置示意; b. 示踪试验监测点电导率变化曲线

水力联系。

震旦系与石炭泥盆系:两者 δD ($-93.6\text{‰} \sim -85.2\text{‰}$)、 $\delta^{18}O$ ($-12.67\text{‰} \sim -11.75\text{‰}$) 值高度接近,且水化学类型均为 $HCO_3-Ca \cdot Mg$ 型,推测深部地下水通过东头断层、银厂坡断层等构造裂隙发生越流补给。

(2) 径流特征. ①浅部循环. 受地形与构造控制,水力联系较弱. 栖霞—茅口组含水层(K288、SK17、SK19、1031-86)中枯水期水化学类型以 HCO_3-Ca 型为主,丰水期因 Na^+ 、 SO_4^{2-} 增加演变为 $HCO_3-Ca \cdot Mg \cdot Na$ 型,反映大气降雨入渗后与地表碎屑岩风化产物混合;示踪实验中,SK12 孔投放的 NaCl 示踪剂经 65 天在下游 SK13 孔(牛栏江沿岸)监测到电导率微小波动(从 $154.98 \mu S/cm$ 升至 $171 \mu S/cm$),证实存在缓慢渗流通道,但无明显管道流. 井下 SK19 及其他栖霞—茅口组灰岩地下水均未见异常,表明 1031 m 中段涌水点与地表水无直接水力联系. 地下水沿栖霞—茅口组裂隙向牛栏江方向渗流,水力梯度平缓,透水性整体不均一。

②深部循环. 开采驱动径流转向,指向巷道排泄中心. 石炭泥盆系(DZK1031-102-1、SK10、DZK1031-48-1)与震旦系(SK13、SK16)含水层,氡值普遍 $< 2TU$ (半衰期 12.43 年),计算地下水年龄 > 40.8 年,属“古水”,循环周期长;水化学类型稳定为 $HCO_3-Ca \cdot Mg$ 型,与地表水体差异显著(牛栏江为 $HCO_3 \cdot SO_4-Ca \cdot Mg$ 型)、表面深部径流几乎不参与地表循环。

巷道工程形成低于牛栏江的排泄基准面,打破自然径流平衡,地下水在水头差作用下向巷道汇聚,形成以 1274 中段、1031 中段巷道为中心的径流场。

(3) 排泄特征. ①深部地下水以巷道排泄为主. 巷道涌水(如 1031-86 穿脉)水质类型为 HCO_3-Ca 型,与深部石炭泥盆系($HCO_3-Ca \cdot Mg$ 型)、震旦系($HCO_3-Ca \cdot Mg$)存在差异,但与浅部栖霞—茅口组相似,表明排泄水主要为浅部径流与深部越流混合水;牛栏江地表水未检测到深部含水层特征离子(如高 Mg^{2+}),证实深部地下水不再向牛栏江排泄。

巷道涌水氡值 $2.79TU$ (年龄 34.87 年)高于深部含水层 ($< 2TU$),但低于浅层玄武岩泉水 ($3.53TU$),反映其混合了不同循环深度的地下水,但主导来源为深部径流。

②浅部自然排泄弱化. 牛栏江沿岸栖霞—茅口组钻孔虽与江水存在弱联系,但枯水期矿坑涌水量(1274 中段、1031 中段)占区域总排泄量的 65% 以上,自然渗流排泄占比不足 35%,人工排泄成为主导。

2010—2025 年期间,矿山开采位于最低排泄基准面之下,此时受矿山开采影响,该模式为大气降水入渗补给各含水层,浅部栖霞—茅口组通过裂隙与牛栏江弱连通,深部含水层经构造越流缓慢流通,整体向开采巷道径流,最终以开采巷道为主要排泄方式,形成“浅部弱自然循环—深部强人工排泄”的模式(图 10)。

2.3.2 干扰强化条件下第二时期地表水—地下水交互作用模式预测 2025 年之后,矿山持续向深部开采,地下水流动系统完全受控于矿山排水. 该时期交互作用过程为:地下水由大气降雨补给,通过入渗补给各含水层,各含水层之间会通过构造裂隙或越流相互补给,地下水向巷道方向径流,矿山开采成为深部地下水重要的排泄方式,且其降落漏斗会随着开采的时间持续降低(图 11)。

2.4 矿山开采扰动下地下水—地表水交互作用数值模拟结果

2.4.1 干扰强化条件下第一时期地表水—地下水交互响应特征 基于现有的地下水动态数据,在模型中运用稳定流校验所得到的计算结果作为会泽铅锌矿矿区的地下水初始水位,研究区的干扰强化条件下第一时期地下水渗流场见图 12. 此时地下水水位在 1240~1906 m,地下水等值线的分布主要受地形地貌条件控制,各冲沟的地下水水位变化更加剧烈,水力梯度更大;而分水岭的地下水等值线变化较缓. 模型区最高水位 1906 m,位于双水河—小菜园山脊线附近;最低水位 1240 m,位于巷道开挖处. 由图 12 可知,麒麟厂开采不改变矿山厂原有的流动路径,是由于麒麟厂、矿山厂属于两个不同的岩溶水系统,两矿区之间水力联系弱。

基于渗流场结果,可见地下水接受大气降雨补给,在双水河—小菜园分水岭两侧径流,少部分通过牛栏江排泄,大部分通过矿山排水排出,与前述分析一致。

2.4.2 干扰强化条件下第二时期地表水—地下水交互响应特征 在第一时期渗流场模拟的基础上,采用非稳定流模拟未来 20 年内矿山开采的渗流场

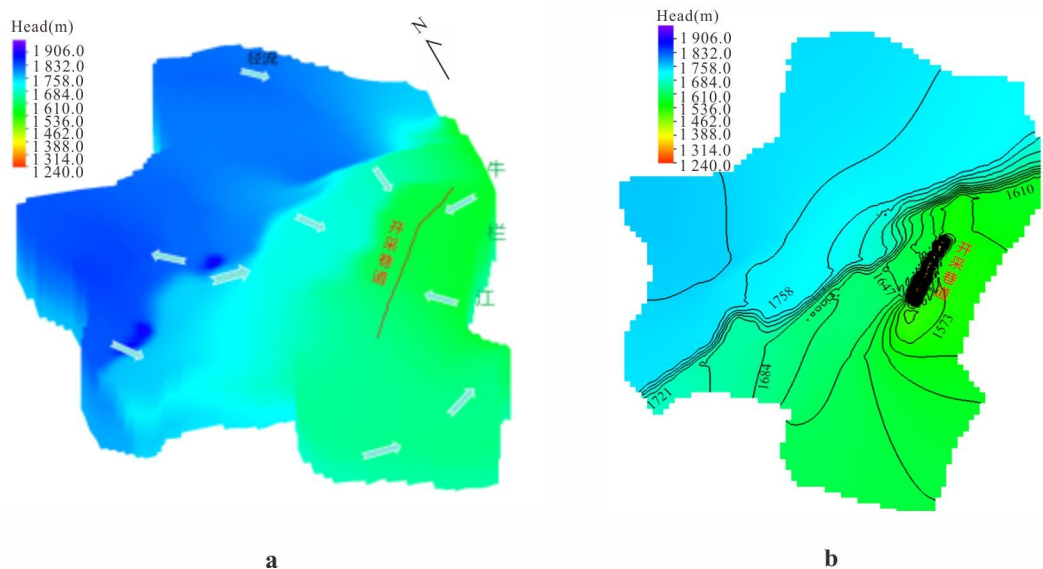


图 12 干扰强化条件下第一时期矿区地下水渗流场
Fig.12 Groundwater seepage field of the mining area during the first period under enhanced interference conditions
a.模型表层地下水流向; b.模型第三层渗流场

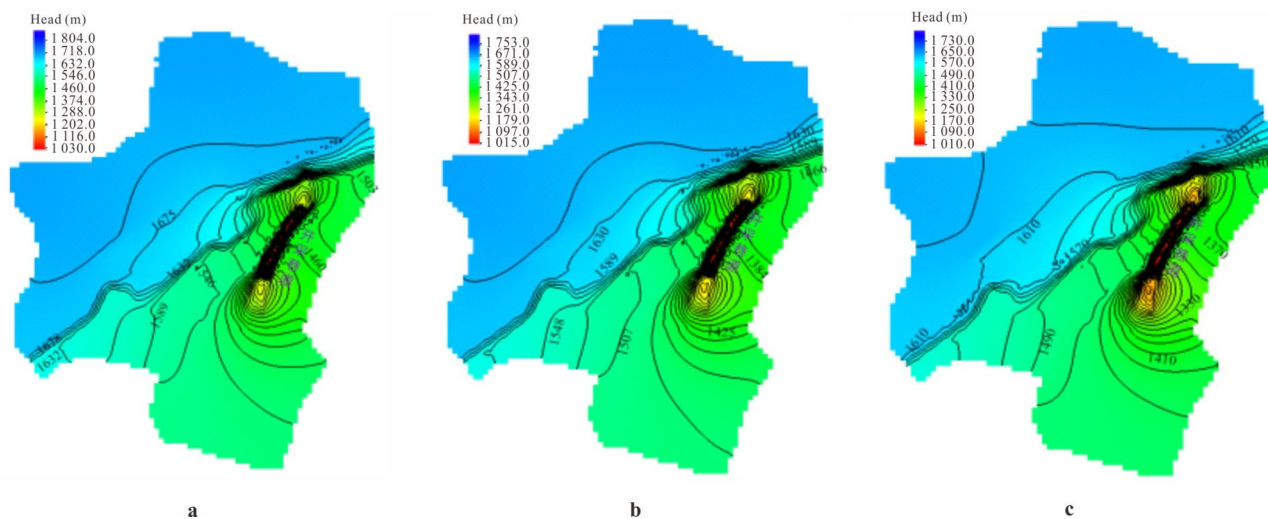


图 13 干扰强化条件下第二时期矿区地下水渗流场
Fig.13 Groundwater seepage field of the mining area during the second period under enhanced interference conditions
a.深部开采 5 年后; b.深部开采 10 年后; c.深部开采 20 年后

变化情况.其中矿区在模型中运用 Drain 命令进行刻画,研究区地下水渗流场及降深情况随矿山深部开采年份的变化(图 13).

麒麟厂深部开采 5 年后,地下水位下降约 64 m;开采 10 年后,其影响范围出现一定程度的扩大,地下水位下降约 103 m;开采 20 年后,地下水位下降约 120 m.矿区开采导致麒麟厂区域形成降落漏斗,且水位下降逐年加剧,使得矿区径流方向发生改变,矿区排水成为排泄的基本方式.

3 结论

本文借助水化学及同位素分析、示踪实验、数值模拟等多种技术手段,研究深部地下水的来源、径流路径及其与浅部系统的相互作用关系,提出了采动影响下复杂岩溶矿区地表水—地下水交互模式,结论如下.

(1)地表水与地下水相互作用复杂,需采用水文地球化学方法、示踪法和数值模型法等多种方法,利用多源数据精细刻画地表水与地下水的交换

量、相互作用带内的水流途径、流速及其变化趋势和控制因素。

(2)矿区地处滇东北岩溶高原,发育3套岩溶含水层,岩溶水文地质结构复杂,矿区地表水—地下水交互响应模式受控于矿区岩溶水文地质结构与采矿活动。

(3)天然条件下地表水—地下水交互模式:矿区地下水以大气降水补给为主,沿分水岭向牛栏江排泄,形成天然地表水—地下水交互响应模式。

(4)开采干扰下地表水—地下水交互模式(1950—2010年):浅层开采仅引起局部水位下降和径流方向微调,未显著改变区域流动系统,地表水—地下水交互作用增强。

(5)干扰强化条件下地表水—地下水交互模式:第一时期(2010—2025年)形成“浅部弱自然循环—深部强人工排泄”模式。浅部含水层与牛栏江保持弱联系,而深部地下水转向巷道排泄。第二时期(2025—)天然排泄逐渐被人工排泄取代,地表水—地下水交互作用模式完全发生改变。

References

- Bakalowicz, M., 2015. Karst and Karst Groundwater Resources in the Mediterranean. *Environmental Earth Sciences*, 74(1): 5—14. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4239-4>
- Cao, Y., 2009. Groundwater Circulation Patterns of Typical Lake Area in Northern Ordos Cretaceous Basin (Dissertation). Jilin University, Changchun(in Chinese with English abstract).
- Chen, S. L., Liu, M. Z., 2011. Status and Advances in the Coupled Model between Surface Water and Groundwater. *Journal of Beijing City University*, (2): 87—93(in Chinese with English abstract).
- Hu, Z. Q., 2019. The 30 Years' Land Reclamation and Ecological Restoration in China: Review, Rethinking and Prospect. *Coal Science and Technology*, 47(1): 25—35 (in Chinese with English abstract).
- Kang, F. X., Sui, H. B., Zheng, T. T., et al., 2024. Formation Mechanism of Cold Springs and Hot Springs in Karst Groundwater Systems in North China: A Study of Baotu Spring. *Earth Science*, 49(8): 2862—2878 (in Chinese with English abstract).
- Li, B. Z., 2001. The Hydrogeological Condition of Huize Pb-Zn Mining Area and the Prediction of Water Discharge of Qilinchang Deposit (Dissertation). Kunming University of Technology, Kunming(in Chinese with English abstract).
- Li, L., Qin, D. J., Sun, J., et al., 2019. Impacts of Yongding River on the Xishan Karst Aquifer and Yuquan Spring in Beijing, China. *Journal of Engineering Geology*, 27(1): 162—169 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F., Wang, S., Wang, L. S., et al., 2019. Coupling Hydrochemistry and Stable Isotopes to Identify the Major Factors Affecting Groundwater Geochemical Evolution in the Heilongdong Spring Basin, North China. *Journal of Geochemical Exploration*, 205: 106352. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106352>
- Ma, R., Dong, Q. M., Sun, Z. Y., et al., 2013. Using Heat to Trace and Model the Surface Water-Groundwater Interactions: A Review. *Geological Science and Technology Information*, 32(2): 131—137 (in Chinese with English abstract).
- Mao, X. H., 2024. Research on the Impact and Prevention Measures of Coal Mining on Groundwater Environment. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 30(3): 107—111, 117 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. Y., Xuan, J. S., Yue, B. X., et al., 2007. The Large Dewatering Test and Tracing Experiment Based on GSM Water Level Remote Sensing System. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 26(2): 152—155 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, Y., 2025. Study on the Impact of Deep Mining in Huize Lead-Zinc Mining Area on the Karst Groundwater System (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Shang, H. M., Cui, Q. G., Yu, J. Q., et al., 2025. Risk Analysis of Water Inrush in a Tunnel Project in a Karst Mountain Area. *Modern Tunnelling Technology*, 62(1): 48—55 (in Chinese with English abstract).
- Sun, F. Q., 2010. Research on Groundwater Circulation and Environment Effect of Dusitu River in Ordos Basin (Dissertation). Chang'an University, Xi'an(in Chinese with English abstract).
- Sun, H. Y., Sun, X. M., Wei, X. F., et al., 2022. Formation Mechanism of Metasilicate Mineral Water in Chengde, Hebei Province: Evidence from Rock Weathering and Water-Rock Interaction. *Geology in China*, 49(4): 1088—1113 (in Chinese with English abstract).
- Peng, T. R., Huang, C. C., Chen, C. T., et al., 2016. Using Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes to Reveal Monsoonal and Related Hydrological Effects on Meteoric Water in the Western Pacific Monsoon Region: A Case Study of the Ilan Region, Northeastern Taiwan.

- Journal of Asian Earth Sciences*, 128: 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.06.024>
- Wen, H. H., 2013. Study on Circulation Pattern and Numerical Modeling of Groundwater Flow in Leizhou Peninsula (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Yang, B., Luo, Z. Q., Wang, Y. W., et al., 2013. Analysis and Prediction of Mine Groundwater Flow Field Based on Visual Modflow. *Mining and Metallurgical Engineering*, 33(4): 11–15, 21 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R. Q., 2022. Study on Surface Water Groundwater Interaction in Ecologically Fragile Area under the Influence of Coal Mining (Dissertation). Liaoning Technical University, Fuxin (in Chinese with English abstract).
- Yu, Q., Zhang, Y., Dong, T., et al., 2023. Effect of Surface Water-Groundwater Interaction on Arsenic Transport in Shallow Groundwater of Jiangnan Plain. *Earth Science*, 48(9): 3420–3431 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. P., Yan, K. T., Chen, C., 2024. Hydrochemical and Multi-Isotope Analysis of Nitrogen Sources and Transformation Processes in the Wetland-Groundwater System of Honghu Lake. *Earth Science*, 49(11): 3946–3959 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J., Chen, L. W., Zhang, J., et al., 2025. Study on Hydraulic Connections between Water-Inrush Aquifers Based on Bayesian Discriminant Analysis and Inverse Hydrogeochemical Simulation. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 48(2): 203–211 (in Chinese with English abstract).
- 中文参考文献**
- 曹阳, 2009. 鄂尔多斯白垩系盆地北部典型湖沼地区地下水循环模式研究(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 陈税琳, 刘明柱, 2011. 地表水—地下水相互作用模型研究现状及进展, 北京城市学院学报, (2): 87–93.
- 胡振琪, 2019. 我国土地复垦与生态修复 30 年: 回顾、反思与展望. 煤炭科学技术, 47(1): 25–35.
- 康凤新, 隋海波, 郑婷婷, 等, 2024. 岩溶地下水系统冷泉和热泉的形成机制: 以趵突泉群为例. 地球科学, 49(8): 2862–2878.
- 李保珠, 2001. 会泽铅锌矿区水文地质条件及麒麟厂深部矿坑涌水量预测(硕士学位论文). 昆明: 昆明理工大学.
- 李露, 秦大军, 孙杰, 等, 2019. 永定河对北京西山岩溶水和玉泉山泉的影响. 工程地质学报, 27(1): 162–169.
- 马瑞, 董启明, 孙自永, 等, 2013. 地表水与地下水相互作用的温度示踪与模拟研究进展. 地质科技情报, 32(2): 131–137.
- 毛学红, 2024. 煤矿开采对地下水环境的影响及防治措施研究. 水利科技与经济, 30(3): 107–111, 117.
- 潘国营, 轩吉善, 岳保祥, 等, 2007. 基于 GSM 水位遥测系统的大型放水与示踪联合试验. 河南理工大学学报(自然科学版), 26(2): 152–155.
- 乔宇, 2025. 云南会泽铅锌矿深部开采对岩溶地下水系统影响研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 尚海敏, 崔庆国, 于进庆, 等, 2025. 岩溶山区某隧道工程突涌水风险分析. 现代隧道技术, 62(1): 48–55.
- 孙芳强, 2010. 鄂尔多斯盆地都思兔河流域地下水循环及生态环境效应研究(博士学位论文). 西安: 长安大学.
- 孙厚云, 孙晓明, 卫晓锋, 等, 2022. 河北承德偏硅酸矿泉水成因模式: 岩石风化与水岩作用证据. 中国地质, 49(4): 1088–1113.
- 温汉辉, 2013. 雷州半岛地下水循环规律及合理开发利用研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 杨彪, 罗周全, 王益伟, 等, 2013. 基于 Visual Modflow 的矿山地下水流场分析及预测. 矿冶工程, 33(4): 11–15, 21.
- 杨瑞琪, 2022. 采煤影响下的生态脆弱区地表水—地下水相互作用研究(硕士学位论文). 阜新: 辽宁工程技术大学.
- 余倩, 张宇, 董昕, 等, 2023. 地表水—地下水相互作用对砷在浅层地下水系统中运移的影响. 地球科学, 48(9): 3420–3431.
- 张彦鹏, 严克涛, 陈晨, 2024. 洪湖湿地—地下水系统中氮来源与转化过程的水化学和多同位素解析. 地球科学, 49(11): 3946–3959.
- 郑剑, 陈陆望, 张杰, 等, 2025. 贝叶斯突水水源判别与反向水文地球化学模拟的含水层水力分析. 合肥工业大学学报(自然科学版), 48(2): 203–211.