

基于 Feflow 软件的西部某深部矿区地下水系统演变特征研究

张戈一¹, 王路军¹, 张锁², 赵泽³, 张勇¹

1. 北京低碳清洁能源研究院 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 102211;
2. 神华新街能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 0172003;
3. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083

中图分类号: ID745 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2025)02-0029-09
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2025.02.003

摘要 西部某深部矿区分布着水量丰富、水质优良的第四系潜水和白垩系洛河组含水层, 是查干淖水厂饮用水水源及湖泊湿地重要补给源, 该区域地下水资源保护要求高, 水环境敏感。为了给矿区未来采煤安全生产和水资源综合利用提供可靠依据, 首先通过相似模拟实验确定 2⁻² 煤开采后导水裂隙带发育高度; 其次运用数值模拟法, 定性描述各含水层相互影响及时空演化规律, 定量描述各含水层补给与排泄主控因子及矿井涌水量。结果表明: (1) 矿区导水裂隙带发育高度最大为 148 m, 未贯穿安定组隔水层; (2) 采动导致直罗组及延安组水位明显下降, 形成降水漏斗, 白垩系志丹群含水层开采前后水位变化不明显; (3) 矿区一井涌水量为 17 032 m³/d。研究揭示了煤炭开采覆岩裂隙场和渗流场演化规律, 为矿区“保水采煤”提供理论基础。

关键词 导水裂隙带发育高度; 数值模拟; 含水层演化规律; 矿井涌水量; 水资源保护

0 引言

西部某深部矿区煤炭资源储量丰富, 开发潜力巨大。但矿区内分布的第四系潜水和白垩系洛河组含水层, 是查干淖水厂饮用水水源以及湿地保护区的重要补给源, 当地监管部门对地下水资源的保护要求极为严格^[1]。目前, 受水源保护区重叠等问题的影响, 矿区开发进程受阻。在此情形下, 深入研究煤矿开采后地下水系统的演变特征, 显得尤为重要。

目前, 数值模拟法是模拟矿区开采地下水流场的重要手段^[2], 其中 GMS、Feflow、Visual Modflow 数值模拟软件应用较为成熟^[3]。宫厚健等、韩汝宁、张保健等、许珂^[4-7]通过 Modflow 数值模拟的方法对地下水运移及流场变化进行动态模拟, 预测矿区开采后的涌水量; 黄天瑞等^[8]、任晓波等^[9]通过 Feflow 软件建立三维模型, 对矿区内地下水三维流场进行模拟, 分析地下水流场的演化规律; 冯翔^[10]利用 GMS 软件建立山西同富新煤矿地下水流场, 由此预测煤层开采时的矿井涌水量; 王鸿等人^[11]通过 GMS 软件, 在黄土灌溉典

型区域, 开展三维地质建模, 直观展示研究区各层地下水分布情况。国外学者也在该领域进行了深入研究, Singh 等^[12]通过 Modflow 软件, 对印度某煤矿的地下水流场进行了模拟和分析, 深入探讨了开采活动对地下水系统的影响; Fernandez 等^[13]通过 Feflow 软件, 对西班牙北部石灰岩露天矿的地下水流动进行了模拟分析, 其研究成果为理解复杂地质条件下的地下水行为提供了重要参考。相较于其他地下水模拟软件, Feflow 提供了更为丰富的图形显示和数据结果分析工具^[14], 本文通过相似模拟实验与数值模拟相结合的方法, 模拟导高裂隙发育规律, 并以此为依据建立煤层采后地下水流场, 预测各层地下水的演化规律及各含水层主控因子。

1 研究区概况

矿区位于鄂尔多斯盆地北部沙漠高原的中东部, 地表被第四系覆盖, 零星出露白垩系地层, 地下水含水层系统与矿区特征基本一致^[15]。

矿区地势总体为北高南低, 中部海拔最高, 超过

收稿日期: 2025-01-20

基金项目: 国家能源投资集团科技项目 (GJNY-21-129)

作者简介: 张戈一(1992—), 男, 汉族, 河北张家口人, 硕士, 工程师, 主要从事矿井水保护与利用等方面的研究工作, E-mail: itkf55@163.com。

1 500 m, 为整个矿区的分水岭^[6]; 西部巴嘎淖尔海拔相对较低, 约 1 250 m, 为矿区流域最低点; 东南部红碱淖海拔最低, 水面高程约 1 220 m, 为红碱淖流域最低点。矿区地层主要岩性(见图 1)从上到下依次为: 第四系全新统风积沙含水层(Q₄)、白垩系下统洛河组砂砾岩含水层(K_{1zh})、侏罗系安定组砂质泥岩隔水层(J_{2a})、侏罗系直罗组中粗砂岩含水层(J_{2z})、煤层顶板侏罗系延安组砂岩含水层(J_{1-2y})、煤层底板三叠系上统延长组泥岩隔水层(T_{3y}), 详见图 1、图 2。志丹群与第四系含水层之间具有不完整隔水层, 从整个矿区而言, 两层具有直接水力联系^[7], 安定组隔水层组成岩性为砂质泥岩, 中、粗粒砂岩以透镜体形式存在于泥岩类中, 有一定阻水效果, 相比周边岩性为薄弱区域, 相对渗透性较大。区内可构成矿井充水的水源有大气降水、地表水、地下水, 其中大气降水和地表水为间接充水水源, 地下水的径流补给为主要充水水源, 充水通道为断层、裂隙等构造因素形成的天然通道以及开采导致的导水裂隙带发育和钻孔封闭不严导致的人为通道。研究区分布 8 个矿井, 首开井为一井, 作为本次主要研究对象。

2 导水裂隙带高度

通过相似模拟实验, 构建与矿区地质条件相似的

模型, 在实验室环境中模拟煤层开采过程, 真实地反映煤炭开采后覆岩的实际状态, 精准确定导水裂隙带发育高度, 进而为数值模拟法参数的确定提供依据, 为研究各含水层相互影响及时空演化规律奠定基础。

2.1 相似模拟实验设计

本次相似模拟实验, 依据矿区一井的工程地质条件, 采用一次采全高, 模拟上覆岩层以及隔水层的应力变形情况和移动破坏规律^[8]。模型尺寸为 210 cm×30 cm×180 cm(分别对应长宽高), 模型强度、外力、大小相似比为 1/200, 容重相似比为 1/1, 时间相似比为 1/50, 根据现场钻孔资料, 依据地层实际情况, 按照比例进行物理模型设计^[9], 如图 3 所示。

2.2 实验结果分析

对 2⁻² 煤开展模拟开采作业时, 采用从右向左的逐步开挖方式, 每次开挖距离为 6 cm。每完成一次开挖, 需等待覆岩移动趋于稳定, 方可进行下一阶段。

当工作面推进至 40 cm 时, 直接顶未发生垮落, 煤层顶板开始出现离层, 此时裂隙高度约为 1 mm。

累计推进长度达到 90 cm 时, 工作面上方 10 cm 处的岩层出现明显垮落断裂, 垮落带内的岩石呈现出块状与巨块状。与此同时, 在工作面上方 30 cm 处, 发

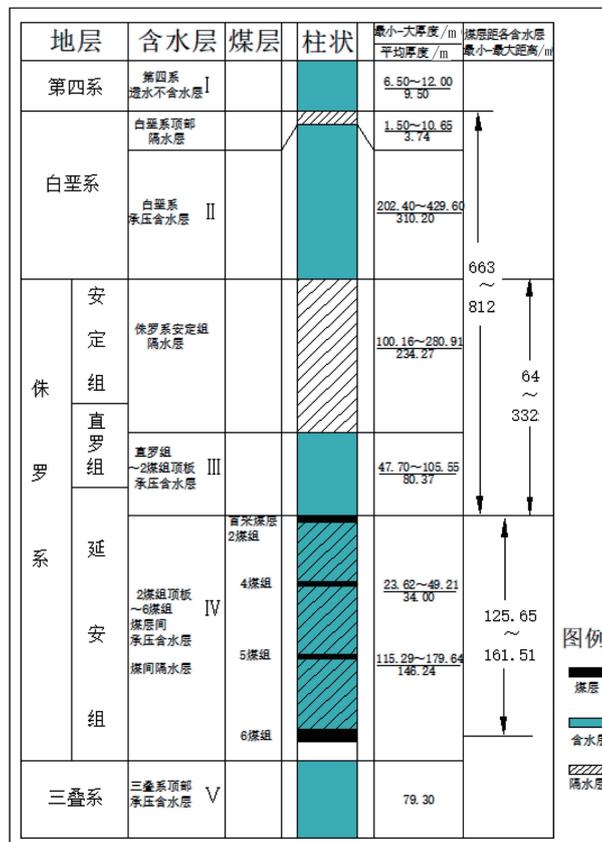


图 1 研究区典型地层柱状图

Fig. 1 Typical stratigraphic histogram of the study area

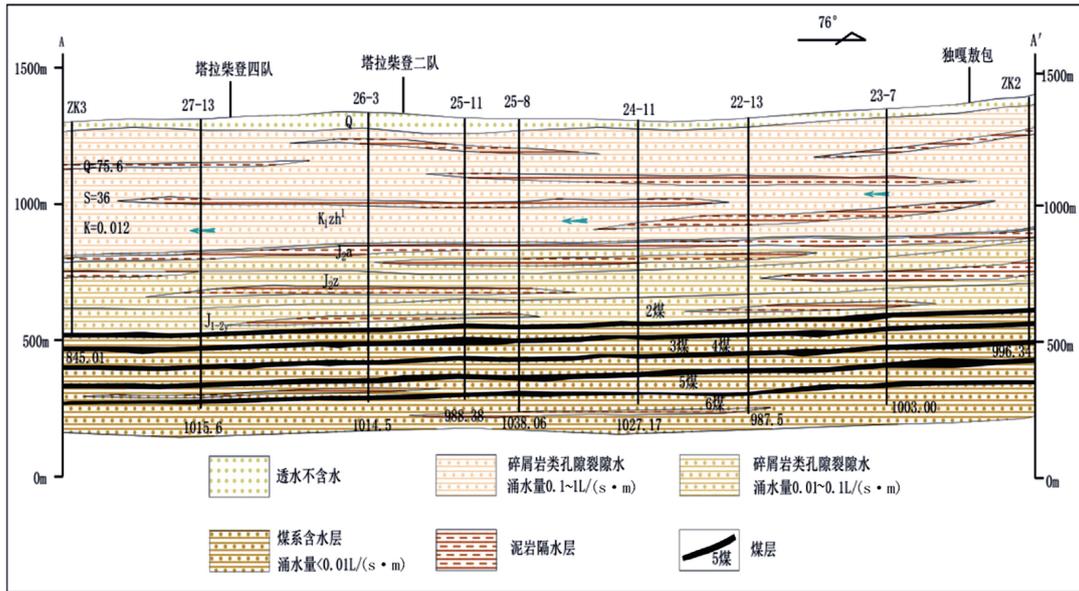


图 2 研究区典型地层剖面图
 Fig. 2 Typical stratigraphic profile of the study area

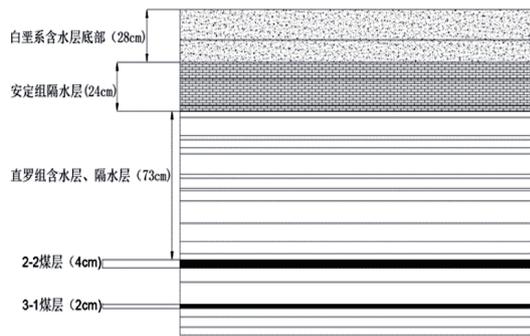


图 3 模型铺设示意图
 Fig. 3 Model laying diagram

育出较为宽大的离层裂隙。

累计推进长度达到 168 cm 时,工作面上方 70 cm 处发育出众多细小的离层裂隙,其发育高度已接近直罗组含水层顶板。在工作面上方 36 cm 处,发育有贯通的垂向裂隙,该垂向裂隙成为矿井水充水水源的主要因素,详见图 4。

累计推进长度达到 172 cm 时,工作面上方的细小裂隙发育至安定组含水层,而垂向裂隙虽继续发育,

但并不显著。

当推进长度达到 176 cm 时,工作面上方细小裂隙依旧发育至安定组含水层,垂向裂隙持续发育,不过并未形成贯通两个含水层的垂向裂隙,详见图 5。

工作面累计推进长度达到 188 cm 时,工作面上方细小裂隙发育至白垩系含水层,垂向裂隙停止发育。此时垂向裂隙的发育高度为 72 cm,距离白垩系含水层底板 20 cm,详见图 6,至此模拟开采过程结束。

依据相似模拟比例进行换算可知,2⁻²煤开采后,覆岩垮落带的最大高度为 36 m,垂向裂隙带高度则为 148 m。

3 三维地质模型构建

3.1 模型概化

依据井田地质结构与水文地质条件,对地层结构予以概化。将矿区模型划分为 5 层,涵盖 3 个含水层与 2 个隔水层,依次为第四系风积沙松散含水层、白垩系下统志丹群含水层、侏罗系中统安定组隔水层、直罗组及延安组含水层,以及侏罗系下统延安组煤层

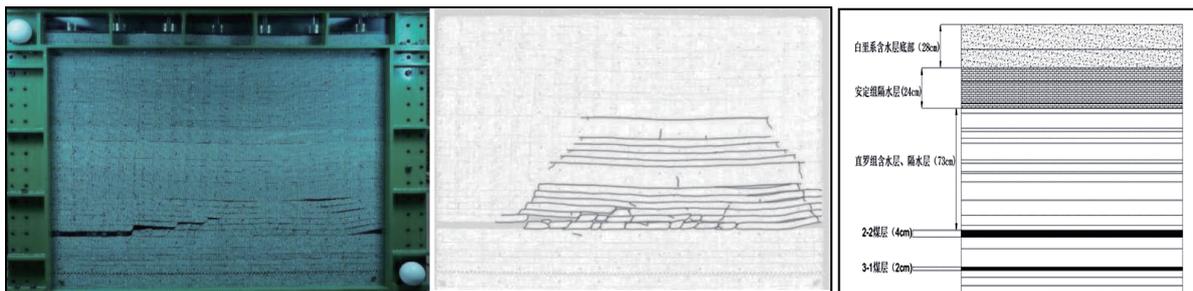


图 4 采掘工作面推进距离 168 cm 裂隙发育
 Fig. 4 Development of cracks at an advancing distance of 168 cm in the mining face

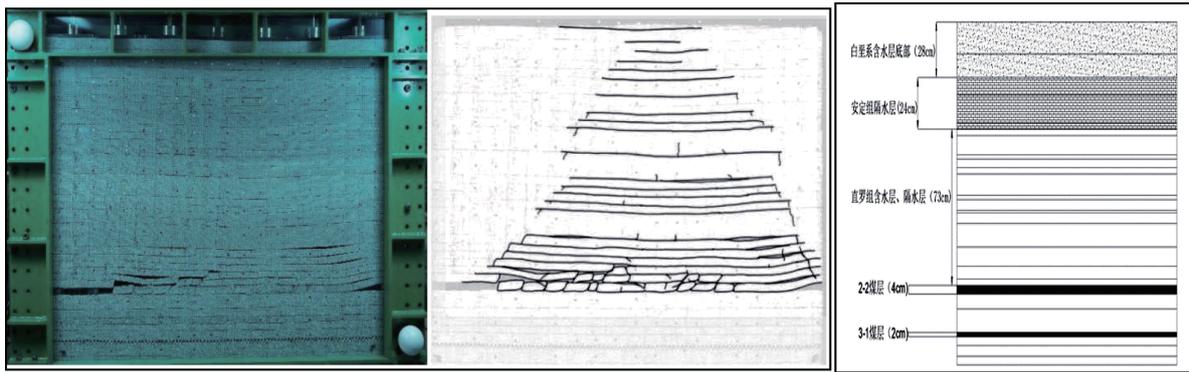


图5 采掘工作面推进距离 176 cm 裂隙发育
 Fig. 5 Development of cracks at a advancing distance of 176 cm in the mining face

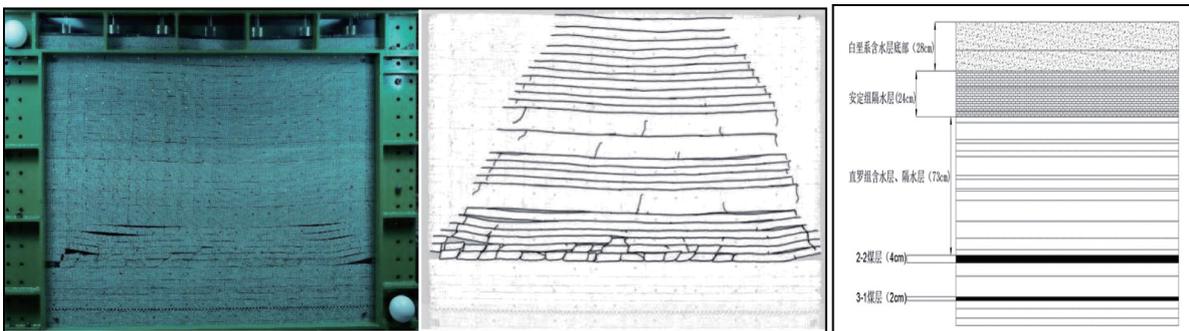


图6 采掘工作面推进距离 188 cm 裂隙发育
 Fig. 6 Development of cracks at a advancing distance of 188 cm in the mining face

底板隔水层。基于地质条件展开三角形剖分, 剖分后的模拟区域共计 26 410 个单元格、16 536 个节点, 三维地质模型概化情况详见图 7。

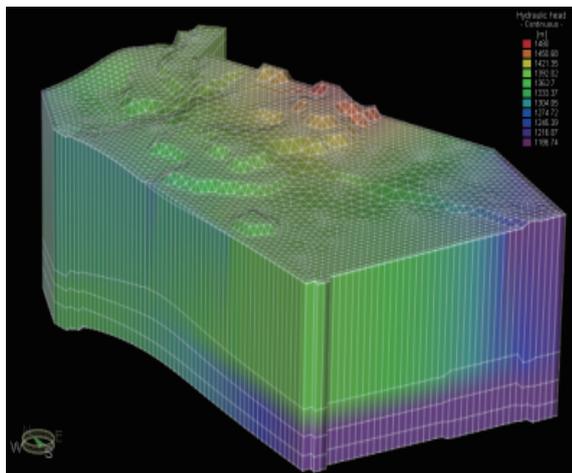


图7 三维地质概化模型
 Fig. 7 3D geological generalization model

矿区边界根据水文地质资料进行人为划定边界, 对于第四系及志丹群岩、土层, 地下水流动方向受地表分水岭控制, 地表分水岭横穿矿区一井区域, 水体流动方向由地表分水岭向西北和东南方向流动, 西北沿通格朗河流出, 设为第二类边界条件, 东南沿高梨河流出, 设为第二类边界条件, 故模型西北、东南为流出边界; 地表分水岭受降雨及苏贝淖-红碱淖三级地

下水系统的影响, 设为第一类边界条件; 对于直罗组岩层来说, 地下水流动方向为由北向南流动, 模型北部以矿区北部边界作为地下水边界条件, 设为第一类边界条件, 模型南部以矿区南部边界作为地下水边界条件, 设为第一类边界条件, 东部和西部设为第二类边界条件, 为 0 流量边界。水文地质边界条件示意图见图 8。

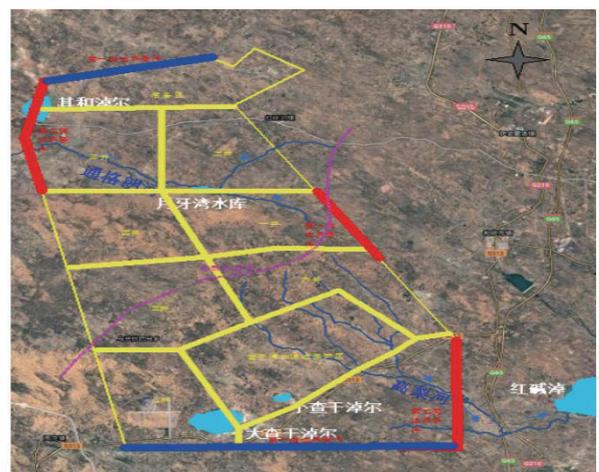


图8 水文地质边界条件示意图
 Fig. 8 Schematic diagram of hydrogeological boundary conditions

3.2 数学模型

根据地下水动力学方程^[20], 结合矿区水文地质模

型, 其地下水流场数学模型详见公式(1)~公式(3):

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \varepsilon \quad x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \quad (1)$$

$$K_n \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = q \quad x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0 \quad (2)$$

$$h|_{t=0} = h_0 \quad x, y, z \in \Omega \quad (3)$$

式中: Ω 为模拟区范围; h 为地下水位标高(m); S 为含水层的储水率(1/m); K_x 、 K_y 为含水层的水平渗透系数(m/d); K_z 为含水层的垂向渗透系数(m/d); ε 为含水层的源汇项(1/d); h_0 为含水层初始时刻地下水位值(m); Γ_1 为含水层的侧向和底部边界; n 为含水层的内法线方向; K_n 为含水层边界法向渗透系数(m/d); q 为单位面积边界流入流出量(m/d), 流入为正, 流出为负, 隔水边界为零。

3.3 模型参数选取与验证

3.3.1 模型参数选取

第四系含水层垂向渗透系数选取范围为 0.86~24.90 m/d, 源汇项净补给量的平均值为 12.33 mm, 标准差为 19.21 mm, 局部存在补给量汇集区域及蒸发集中区域, 此区域源汇项补给量为 150~600 mm/a。

根据《矿区水文地质报告》中 47 个抽水实验结果确定志丹群含水层垂直渗透系数范围为 0.017 8~0.091 m/d。

安定组隔水层由粉砂岩、砂质泥岩、泥岩、泥质砂岩组成, 其性质稳定, 从整个区域来说, 安定组隔水层属于完整隔水层, 根据 19 组室内渗透率实验结果显示, 安定组泥质岩类及粉砂岩渗透系数为 $5.31 \times 10^{-5} \sim 2.04 \times 10^{-3}$ m/d, 越流区域垂直渗透系数为 0.02 m/d。

直罗组含水层由侏罗系直罗组中下部含水层以及延安组上部含水层共同构成, 经研究首采煤层导水裂隙带发育高度一般到达该层, 岩性为中、粗粒砂岩, 局部为含砾砂岩。根据水文地质报告中 62 个抽水实验结果确定垂直渗透系数参数范围为 0.000 7~0.14 m/d。

表 1 水文地质参数

Table 1 List of hydrogeological parameters

含隔水层分区	渗透系数 /(m·d ⁻¹)		
	K_x	K_y	K_z
第四系含水层	3.95~12	3.95~12	3.95~12
志丹群含水层	0.178~1.5	0.178~1.5	0.017 8~0.15
安定组隔水层	0.000 531~0.020 4	0.000 531~0.020 4	0.000 0531~0.002 04
安定组越流区域	0.2	0.2	0.02
直罗组含水层	0.007~1.4	0.007~1.4	0.000 7~0.14
延安组隔水层	1e-7	1e-7	1e-8

各岩层渗透系数见表 1。

3.3.2 模型参数验证

本次选取的水文观测孔观测周期为 2022 年 8—12 月, 数据量未达到一个水文年, 但其涵盖丰水期和枯水期, 对于志丹群含水层水位而言, 其本身水位变化幅度小于 4 m, 峰值滞后丰水期 1~2 个月, 选取丰水期平均值具有一定代表性; 直罗组含水层现场露头少, 受气候因素影响极小, 承压水位比较稳定, 变化幅度一般小于 0.5 m, 因此使用平均值代替全年水位具有代表性。模拟结果如图 9, 均方根为 0.356 037 2, 相关性系数为 0.999 990 4。

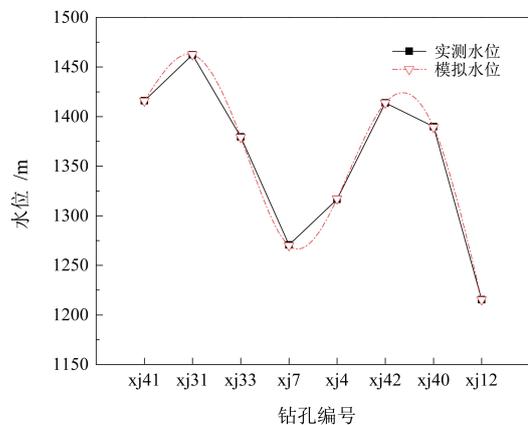


图 9 实测水位和模拟水位拟合

Fig. 9 Fitting diagram of measured water level and simulated water level

4 矿区地下水流场时空演化规律分析

4.1 白垩系下统志丹群含水层流场分析

白垩系下统志丹群含水层是研究矿区的主要含水层之一, 上层为第三系上新统三趾马红土, 下层为侏罗系中统安定组隔水层^[2], 通过前期研究的结论得知矿区开采对上覆岩层的破坏程度, 煤层开采导水裂隙带发育高度未贯穿安定组隔水层。

由图 10 可知, 白垩系下统志丹群含水层开采前、后等水位线变化不明显, 无局部小区域降水漏斗出现。志丹群流场水位整体无变化, 局部水位变化为 2~3 m。根据钻孔 xj-4 的水位变化显示, 矿区生态水源保护地水位变化微弱, 采后 20 年水位下降 0.3 m, 根据钻孔 xj-33 的水位变化显示, 矿区生态保护区巴彦淖尔附近水位上升 3 m。

根据数值模型对白垩系下统志丹群含水层的地下水流向模拟结果, 对比初始流场图 11 分析可知, 白垩系含水层的地下水初始流向和第四系含水层地下水的流向相同, 由地表分水岭向四周沟谷和河流流动, 且越靠近河谷地下水流动越快。在煤炭开采过程中,

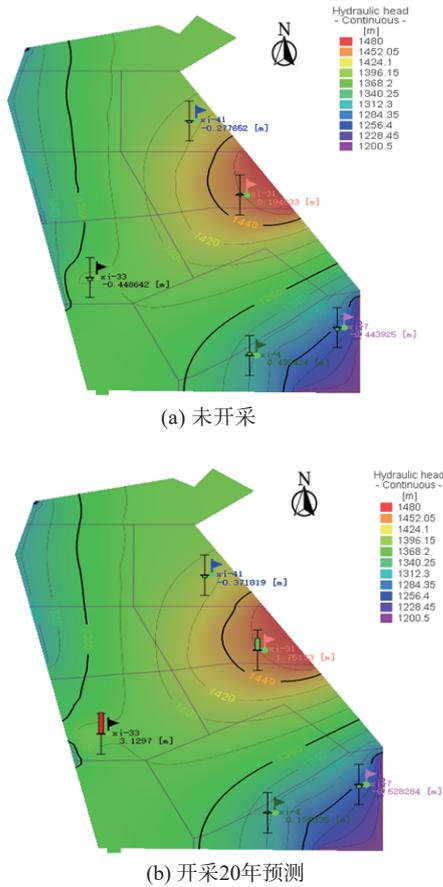


图 10 白垩系含水层等水位线对比
 Fig. 10 Comparison chart of water level in the Cretaceous Period aquifer

在白垩系含水层有一定的水位降深现象,但是发生水位降深面积不是很大,流向变化较小。

4.2 直罗组及延安组含水层流场分析

直罗组及延安组裂隙承压含水层是煤层上层覆岩的含水层,它是矿区涌水的主要来源,它的含水量直接影响矿区的安全生产,研究其水位变化情况,可以对矿区的排水提供一定依据。

使用数值模型对矿区的地下水进行模拟,由图 12 可知,在煤炭开采过程中矿区一井的直罗组及侏罗系下统延安组含水层均出现了明显的水位降落漏斗,特别是由于矿区煤层埋藏较深,含水层较厚,水位降深漏斗最为明显,漏斗附近钻孔 xj-40 水位下降最高达到了 49.28 m,降水漏斗直径达到了 4.5 km。矿区二井在一井开采过程中也受到一定影响,钻孔 xj-41 水位降低了 0.6 m。

使用数值模型对研究矿区的主要含水层地下水的流场进行计算,分析研究矿区主要含水层的流场,可以得知主要含水层的地下水的排泄情况。通过对比分析同一含水层不同时期地下水的流场图可知矿区对地下水开采的影响情况,与矿区等水位线图进行相互验证。

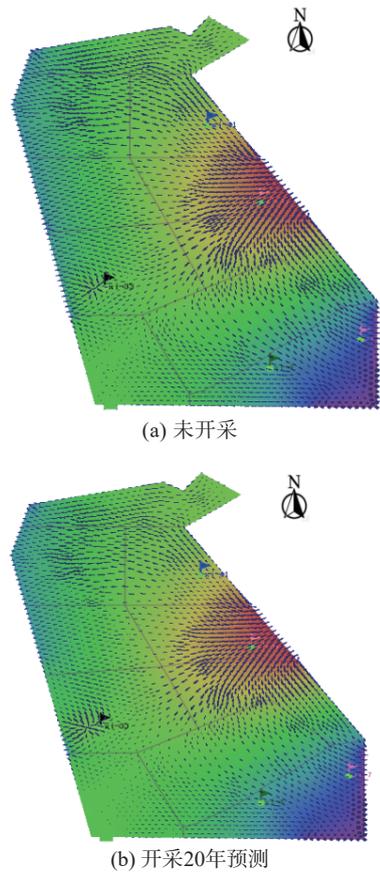
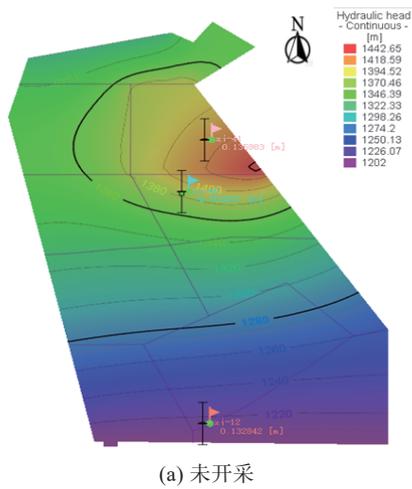


图 11 白垩系含水层地下水流向对比
 Fig. 11 Comparison chart of direction of groundwater in the Cretaceous Period aquifer

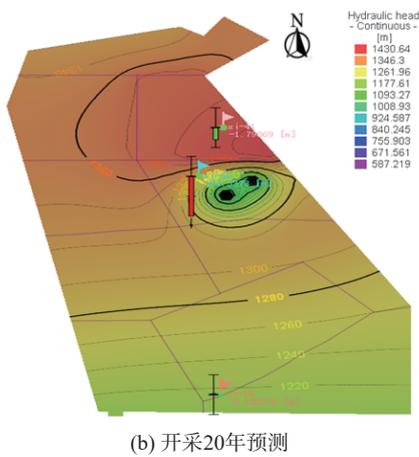
如图 13 所示,在未开采前,直罗组及侏罗系延安组裂隙承压含水层的地下水流向,一方面是向河谷流动,特别是靠近高梨河的区域流速较大,另一方面,在安定组越流区域附近,由于渗透系数相比其他区域较大,渗透性强,所以靠近该区域地下水流动速度明显大于其他区域。在煤矿开采中由于煤炭开采对地下水的影响,在采空区上方由于下层渗透系数的增大和采煤过程中导水裂隙带的形成,地下水的流向出现了明显的变化,朝着采空区涌水点流去。形成了一个以涌水点为中心的流向变化区域,也揭示了等水位线图降水漏斗的形成。

4.3 地下水水资源主控因子及水均衡分析

通过表 2 可知,研究区第四系含水层地下水的主要补给源为降雨、河流补给,次要补给源为矿区边界侧向补给。其中研究区第四系含水层平均每日降水总量和河流补给总量为 14 798 m³/d, 占总补给项的 49.27%, 矿区边界侧向补给总量为 13 508 m³/d, 占总补给项的 44.97%。研究区第四系含水层地下水的每日总排泄量为 29 297 m³/d, 主要以地表径流及向下层含水层补给 2 种方式进行排泄。河流排泄为主要排泄源, 向下层含水层补给为辅助排泄源。综上所述,地



(a) 未开采



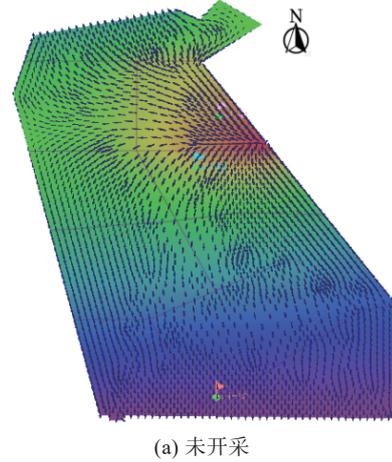
(b) 开采20年预测

图 12 直罗组及延安组含水层等水位线对比
Fig. 12 Comparison chart of water level in the aquifer of Zhiluo and Yanan formation

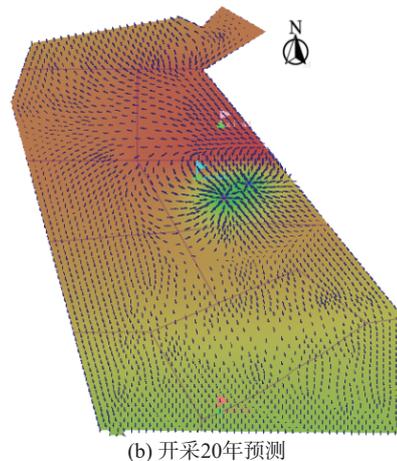
表 2 主要含水层地下水均衡

Table 2 Groundwater budget in main aquifers

含水层	补给排泄	类型	水量 / (d·m ³)	占比 / %
第四系	补给项	侧向补给	13 508	44.97
		降雨+河流补给	14 798	49.27
		越流补给	78 2.32	2.6
		释水补给	947.88	3.16
	排泄项	径流排泄	29 297	97.54
白垩系志丹群	补给项	岩层储水	739.74	2.46
		径流补给	18 330	98.03
		释水补给	336.93	1.81
	排泄项	其他补给	30.59	0.16
		径流排泄	18 550	99.21
侏罗系直罗组及延安组	补给项	岩层储水	147.52	0.79
		释水补给	4 531.3	26.59
	排泄项	径流补给	12 509	73.41
		岩层储水	8.3	0.05
	矿井排水	17 032	99.95	



(a) 未开采



(b) 开采20年预测

图 13 直罗组及延安组含水层地下水流向对比
Fig. 13 Comparison chart of direction of groundwater in the aquifer of Zhiluo and Yanan formation

下水补给量的主控因子为降水补给和河流补给,排泄量的主控因子为河流排泄和向下补给。

志丹群含水层的主要补给来源为第四系含水层侧向径流补给,补给总量为 18 330 m³/d, 占总补给量的 98.03%。主要排泄项为侧向径流排泄,排泄量为 18 550 m³/d, 占总排泄量的 99.21%。因此,志丹群含水层地下水补给量的主控因子为径流补给,排泄量的主控因子为径流排泄。

对于直罗组及延安组含水层,对比“大井法”计算结果^[2],设置两口抽水井,将地下水水位降到煤层底板以下,矿井开采涌水量近似为 17 032 m³/d,直罗组及延安组含水层中补给主要来源为径流补给和岩石破碎后的弹性释水补给,主要排泄源为矿井水排水。因此,直罗组及延安组的地下水补给量的主控因子为径流补给,排泄量的主控因子为矿井排泄。

5 结论与展望

(1) 2⁻²煤开采后覆岩垮落带最大高度为 36 m,裂隙带高度为 148 m,导水裂隙带高度未发育到白垩系志丹群含水层。

(2) 煤炭开采过程中,直罗组及延安组水位下降明显,并形成降落漏斗,xj-40 水位下降达到了 49.28 m,降落漏斗直径达到了 4.5 km;白垩系志丹群含水层,开采前、后等水位变化不明显,局部水位变化 2~3 m,根据 xj-4 的水位变化程度显示,矿区生态水源保护地水位变化微弱,采后 10 年水位下降 0.139 m,采后 20 年水位下降 0.231 m。

(3) 矿区一井涌水量为 17 032 m³/d,第四系含水层主要补给源为降雨、河流补给,次要补给源为矿区边界侧向补给,排泄的主控因子为河流排泄,向下层含水层补给为辅助排泄源;志丹群含水层地下水补给源的主控因子为径流补给,排泄量的主控因子为径流排泄。直罗组及延安组含水层地下水补给源的主控因子为径流补给,排泄量的主控因子为井排泄。

(4) 随着煤炭开采活动的持续推进以及对生态环境保护的日益重视,2⁻²煤开采相关研究仍有广阔的拓展空间。在覆岩垮落与导水裂隙带研究方面,可进一步借助相似模拟实验与数值模拟结合,深入探究不同开采工艺、开采强度下覆岩破坏的动态演化过程,为矿井顶板管理与水害防治提供更精准的理论支持。对于地下水水位变化及涌水量研究,一方面,利用先进的监测技术,如分布式光纤传感等,实现对各含水层水位、涌水量更实时、精细的监测,为模拟实验提供更丰富的数据;另一方面,开展多因素耦合作用下的地下水动力场模拟研究,考虑气候变化、开采扰动等因素对地下水补给、排泄的综合影响,从而更科学地评估矿区水资源可持续性。此外,在生态保护方面,以矿区生态水源保护地为重点,建立长期的生态水位

与生态环境响应关系模型,通过模拟预测不同开采方案下生态环境的演变趋势,为制定科学的生态保护策略提供依据,助力煤炭资源开采与生态环境保护的协调发展。

参考文献:

- [1] 曹志国,何瑞敏,王兴峰.地下水受煤炭开采的影响及其储存利用技术[J].煤炭科学技术,2014,42(12):113-116+128.
CAO Z G, HE R M, WANG X F. Coal mining affected to underground water and underground water storage and utilization technology[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(12): 113-116+128.
- [2] 张凤娟,杨子龙,邢学睿,等.岩溶区地下水数值模拟分析及开采方案比选[J].中国矿业,2024,33(1):200-204.
ZHANG F J, YANG Z L, XING X R, et al. Numerical simulation analysis of groundwater in karst area and comparison of mining schemes[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(1): 200-204.
- [3] 张成行,郑洁铭,徐智敏,等.基于水化学特征的顺和煤矿太灰水动力条件分析[J].煤炭工程,2020,52(6):126-129.
ZHANG C H, ZHENG J M, XU Z M, et al. Hydrodynamic conditions analysis of Taiyuan Formation limestone aquifer in Shunhe Coal Mine based on hydrochemical characteristics[J]. Coal Engineering, 2020, 52(6): 126-129.
- [4] 宫厚健,刘守强,李哲,等.基于 Visual Modflow 的矿井涌水量数值模拟预测研究[J].煤炭技术,2018,37(8):155-157.
GONG H J, LIU S Q, LI Z, et al. Prediction of numerical simulation for mine water inflow based on Visual Modflow[J]. Coal Technology, 2018, 37(8): 155-157.
- [5] 韩汝宁.基于 Dimine 与 Visual Modflow 协同建模的矿区水文地质模型研究[J].中国矿业,2018,27(7):139-143.
HAN R N. Research of mine hydrogeological model based on collaborative modeling with Dimine and Visual Modflow[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(7): 139-143.
- [6] 张保建.基于 Visual Modflow 的台格庙勘查区矿井涌水量预测[J].煤炭科学技术,2015,43(S1):146-149+172.
ZHANG B J. Mine water inflow forecast based on Visual Modflow in Taigemiao Exploration Area[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(S1): 146-149+172.
- [7] 许珂.台格庙矿区顶板涌(突)水危险性评价与矿井涌水量预测[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.
XU K. Roof aquifer water inrush risk evaluation and mine water inflow prediction in Taigemiao coal mine[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2016.
- [8] 黄天瑞,李贵仁,赵珍.北洛河铁矿深部开采放水试验及数值模拟分析[J].中国矿业,2015,24(11):107-112.
HUANG T R, LI G R, ZHAO Z. The dewatering test for deep mining and numerical simulation analysis in Beiminghe iron mine[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(11): 107-112.
- [9] 任晓波,刘守强,吴瑞芳.基于子域解析元素法的煤矿疏降水量预测研究[J].煤炭工程,2021,53(7):108-113.
REN X B, LIU S Q, WU R F. Prediction of coal mine dewatering rate based on subdomains-analytic element method[J]. Coal Engineering, 2021, 53(7): 108-113.
- [10] 冯翔.基于 GMS 三维地下水模型的矿井涌水量预测研究[D].北京:中国地质大学(北京),2017.
FENG X. The mine water inflow prediction research based on three-dimensional groundwater model in GMS[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [11] 王鸿,姚云琦,马建花,等.基于 GMS 的三维地质建模与地下水数值模拟——以永靖县黑台为例[J].兰州大学学报(自然科学版),2023,59(5):601-609+619.
WANG H, YAO Y Q, MA J H, et al. 3D geological modeling and

- groundwater numerical simulation research based on GMS: A case study of the Heitai terrace, Yongjing Country[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2023, 59(5): 601–609+619.
- [12] SINGH M K, et al. Groundwater flow modeling for cachar, India using MODFLOW: a case study[J]. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2020(4): 1–11.
- [13] FERNANDEZ P, ALVAREZ ALVAREZ, et al. Groundwater numerical simulation in an open pit mine in a limestone formation using MODFLOW[J]. International Journal of Mine Water, 2016, 35: 145–155.
- [14] 董东林, 王存社, 陈书客, 等. 典型煤矿地下水运动及污染数值模拟[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
DONG D L, WANG C S, CHEN S K, et al. Numerical simulation of groundwater movement and pollution in typical coal mines[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [15] 靖晶. CO₂ 储存过程多因素影响的数值模拟研究——以鄂尔多斯盆地石千峰组为例[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
JING J. Numerical simulation of multiple factors influence on CO₂ storage process: A case study of shiqianfeng formation in ordos basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- [16] 李海祥, 曹志国, 王路军, 等. 台格庙矿区地下水水化学特征与演变规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 284–291.
LI H X, CAO Z G, WANG L J, et al. Study on the chemical characteristics and evolution law of groundwater in Taigemiao mining area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 284–291.
- [17] 杨建. 蒙陕接壤区深埋型煤层顶板水文地质及水文地球化学特征[J]. 煤矿安全, 2016, 47(10): 176–179+183.
YANG J. Hydrogeological and hydrogeochemical characteristics of deep buried coal seam roof in Shaanxi and Inner Mongolia Contiguous Area[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(10): 176–179+183.
- [18] 李海祥, 曹志国, 吴宝杨, 等. 煤矿覆岩裂隙地下水渗流特征的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 168–176.
LI H X, CAO Z G, WU B Y, et al. Experimental study on characteristics of groundwater fracture in coalmine overlying rock[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 168–176.
- [19] 吴宝杨, 李全生, 曹志国, 等. 煤矿地下水高盐矿井水封存对地下水的影响[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2360–2369.
WU B Y, LI Q S, CAO Z G, et al. Influence of high salt mine water stored in underground reservoir of coal mine on groundwater[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2360–2369.
- [20] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
XUE Y Q. Groundwater dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.
- [21] 吕情绪, 狄军贞, 李果, 等. 高强度采矿活动对地下水影响的数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 193–199.
LU Q X, DI J Z, LI G, et al. Numerical simulation study on the impact of high intensity mining activities on groundwater[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 193–199.
- [22] 崔春兰. 鄂尔多斯新街矿区台格庙 3 矿井涌水量预测[J]. 煤炭技术, 2015, 34(1): 140–143.
CUI C L. Forecasting water inflow of Taigemiao No. 3 Mine of Xinjie Coal Mine in Erdos[J]. Coal Technology, 2015, 34(1): 140–143.

Evolution Characteristics of Groundwater System in Deep Mining Areas in Western China Based on Feflow Software

ZHANG Geyi¹, WANG Lujun¹, ZHANG Suo², ZHAO Ze³, ZHANG Yong¹

1. Beijing Low Carbon and Clean Energy Research Institute State Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102211, China;

2. Shenhua Xinjie Energy Co., Ltd., Erdos 0172003, Inner Mongolia, China;

3. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: In the deep mining area of western China, there are abundant and high-quality Quaternary phreatic water and Cretaceous Luohe Formation aquifers, which serve as crucial recharge sources for the Chagannao Water Plant's drinking water supply and lake wetlands. This region exhibits high requirements for groundwater resource protection and sensitive water environments. This study aims to provide a reliable basis for future safe coal mining and comprehensive water resource utilization in the mining area. The research first determines the development height of water-conducting fracture zones after mining the 2–2 coal seam through similar simulation experiments. Subsequently, numerical simulation methods are employed to qualitatively describe the mutual influences and spatiotemporal evolution patterns among aquifers, while quantitatively analyzing the main controlling factors of aquifer recharge/discharge and mine water inflow. Key findings include: (1) The maximum height of water-conducting fractures reaches 148 m, not penetrating the Anding Formation aquiclude; (2) Mining activities cause significant water level decline in Zhiluo and Yan'an Formations, forming depression cones, while the Cretaceous Zhidan Group aquifer shows negligible water level changes; (3) The mine water inflow is calculated to be 17 032 m³/d. This study reveals the evolution patterns of overburden fracture fields and seepage fields during coal mining, and provides theoretical support for implementing "water-preserved coal mining" strategies in the area.

Keywords: development height of the water-conducting fissure zone; numerical simulation; evolution characteristics of aquifer; mine water inflow; water resources protection

引用格式: 张戈一, 王路军, 张锁, 赵泽, 张勇. 基于 Feflow 软件的西部某深部矿区地下水系统演变特征研究[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(2): 29–37.

ZHANG Geyi, WANG Lujun, ZHANG Suo, ZHAO Ze, ZHANG Yong. Evolution characteristics of groundwater system in deep mining areas in western China based on Feflow software[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(2): 29–37.