

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202603100080

西部干旱半干旱区典型深埋煤层涌水量预测分析

张耀斌^{1,2}, 宫康健³, 杨郑秋^{1,2}, 王路军^{1,2}, 吴宝杨^{1,2,*}, 王旭东⁴, 张秋兰⁵

(1. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211; 2. 煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 102209;
3. 北京市通州区生态环境局, 北京 101101; 4. 神华新街能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017200;
5. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 深部煤炭开采过程中, 不同含水层之间的水力联系是影响矿井安全运行的关键因素。针对西部深埋煤层基建矿区, 需明确首采煤层涌水量的组成及来源, 以指导保水采煤实践。结合数值模拟与水化学分析方法, 通过比拟法以裂采比25倍进行计算, 定量表征首采煤层涌水量组成(模型 $R^2 = 84\%$, $RMSE = 0.33$ m)。在保水采煤情景下, 模拟不同条件下矿井涌水量及地下水场变化, 同时采集不同含水层及涌水样品, 分析水化学类型及离子特征。采动条件下, 第四系-白垩系地下水场未受明显扰动; 2煤与6煤顶板含水层场变化相似, 2煤层开采导致其顶板水位最大降幅约630 m, 并引起6煤顶板含水层越流补给, 水位最大降幅约590 m。同时, 正常涌水量约600 m³/h, 侏罗系含水层对首采煤层涌水的贡献率约为80%。水化学分析表明: 志丹群为HCO₃-Ca·Na型, 直罗组为SO₄·HCO₃-Na型, 延安组为SO₄-Na和Cl-Na型; 涌水为SO₄-Na型, 其主要离子及TDS与直罗组最接近, 但NO₃和F⁻的检出指示有延安组或志丹群水混入, 与数值模拟结果吻合。本研究揭示了采煤条件下涌水量的动态衰减规律和不同含水层之间的越流规律, 定量识别了深部煤矿涌水来源及混合过程, 为西部塔然高勒等深埋矿区煤炭水资源保护提供科学依据。

关键词: 干旱半干旱区; 深埋煤层; 涌水量预测; 数值模拟

中图分类号: P64 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2026)04-1197-13

Prediction of water influx in typical deep-buried coal seam mines in Ordos

ZHANG Yaobin^{1,2}, GONG Kangjian³, YANG Zhengqiu^{1,2}, WANG Lujun^{1,2},
WU Baoyang^{1,2,*}, WANG Xudong⁴, ZHANG Qiulan⁵

(1. National Institute of Clean and Low Carbon Energy, Beijing 102211, China; 2. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102209, China; 3. Beijing Municipal Tongzhou District Ecological Environment Bureau, Beijing 101101, China; 4. Shenhua Xinjie Energy Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017200, China; 5. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In the process of deep coal mining, the hydraulic connection between aquifers will affect the normal operation of the mine. In this study, we selected the western deep-embedded coal seam mining area, and quantitatively characterized the composition of the water influx of the first mining seam by combining numerical simulation and hydrochemical method. The R^2 and RMSE of the model were 84% and 0.33 m, respectively. The

收稿日期: 2026-03-10; 修回日期: 2026-06-22; 编辑: 袁茂文。

基金项目: 支撑能源转型的煤炭清洁高效利用国家科技重大专项(2024ZD1700203)。

作者简介: 张耀斌, 男, 助理研究员, 1993年出生, 水文地质学专业, 主要从事煤炭水资源安全防控等方面的工作。

Email: 337894260@qq.com。

*通信作者: 吴宝杨, 男, 研究员, 1987年出生, 防灾减灾专业, 主要从事煤炭水资源安全防控等方面的工作。

Email: 20029909@ceic.com。

引用格式: 张耀斌, 宫康健, 杨郑秋, 等. 西部干旱半干旱区典型深埋煤层涌水量预测分析[J]. 现代地质, 2026, 40(4): 1197-1209. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202603100080.

ZHANG Yaobin, GONG Kangjian, YANG Zhengqiu, et al. Prediction of water influx in typical deep-buried coal seam mines in Ordos [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40(4): 1197-1209. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202603100080.

final fracture ratio was taken by simulation and calibrated by 25 times. The current mining conditions did not significantly affect the groundwater flow field of the Quaternary-Cretaceous aquifer after water level thinning. There were similar changes for the groundwater flow field morphology between the aquifers in the 2 coal seam roof and the 6 coal seam roof. Mining activities in the 2 coal seam have caused a water level drop of approximately 630 m. Meanwhile, drainage from the mining of the 2 coal seam caused a certain amount of leakage from the 6 coal seam roof aquifer, resulting in a decrease in the water level of the lower 6 coal seam roof aquifer, with a drop of approximately 590 m. The normal drainage volume was approximately 600 m³/h. For water influx in the first mining coal seam, the water volume of Jurassic aquifer accounts for 80%. Samples collected from different aquifers and from artesian water were subjected to hydrochemical analysis. Results indicated that the Zhidan Formation exhibited an HCO₃-Ca·Na type, the Zhiluo Formation an SO₄·HCO₃-Na type, the Yan'an Formation an SO₄-Na and Cl-Na type. The artesian water exhibited an SO-Na type, with its primary ions and TDS characteristics most closely resembling those of the Zhiluo Formation. However, the detection of NO₃⁻ and F⁻ indicated the admixture of water from either the Yan'an Formation or the Zhidan Group, consistent with the model results. This study reveals the dynamic attenuation law of water inflow and the inter-aquifer leakage law under coal mining conditions, and quantitatively identifies the sources and mixing processes of water inflow in deep coal mines. It provides a scientific basis for the protection of coal and water resources in Ta Ran Gao Le deep-buried mining areas of western China.

Key words: arid and semi-arid areas; deeply buried coal seams; water influx prediction; numerical simulation

0 引言

煤矿开采过程中,涌水量是影响矿井安全、生产效率和水资源管理的重要因素之一,合理预测涌水量对矿井水害防治具有重要意义^[1-4]。随着我国煤炭开采战略不断向西部推进,干旱半干旱地区采煤对地下水资源的影响将会受到更大的关注^[5]。且煤炭资源不断向深部推进,涌水量研究是采煤过程中重要的因素。目前,矿井涌水量预测的方法包括确定性方法、不确定性方法和机器学习方法^[6-7],其中,确定性方法包括数值模拟法、水均衡法和大井法^[8-9];不确定性方法包括水文地质比拟法、相关分析法、统计学方法和模糊数学等^[10-11];机器学习方法包括BP神经网络、支持向量机(SVM)、随机森林(RF)、长短期时间序列(LSTM)、门控控制单元(GRU)、卷积神经网络(CNN)、深度置信网络(DBN)和变分模态分解(VMD)等^[12-13]。每一类方法都有各自的限制条件和适用空间,通常情况下,在水文地质条件相对简单的矿区,大多采用水均衡法和大井法^[14-15],此类方法预测精度和计算效率较高^[16];而数值模拟需要长期的观测数据和丰富的钻孔数据等多源信息,但校正完成的模型在涌水量预测方面具有较大的优势^[17-18]。刘谋等通过Visual Modflow预测了陕北某矿区涌水量变化并且分析了潜水位变化对沙漠植被的影响^[19];罗奇斌等利

用数值模拟的方法预测了煤层不同开采方式下涌水量和水位的变化情况^[20];孙刚友等通过大井法和数值模拟法计算了矿区涌水量,得出在水文地质参数齐全的条件下数值模拟的预测结果更加合理^[21]。在水文资料丰富的矿区,可采用不确定性方法进行涌水量预测,通过已开采矿区涌水量、导水裂隙带发育特征和揭露岩层等信息,利用比拟法可计算出目标矿区的涌水量^[22]。随着计算机技术不断进步,机器学习方法在矿井水预测中得到一定的发展,机器学习对于非线性的时序数据具有较强的处理能力,但是方法的选择和因变量的考虑对于预测精度具有较大的影响,对于矿山大数据的处理,深度学习具有更大的优势^[23-24]。

相较于机器学习方法,利用数值模拟可以处理复杂的水文地质单元,定量表征不同煤系含水层之间的水量交换,对于基建矿井,在没有足够数据的情况下,数值模拟可以依靠现有的水文地质数据和物理规律进行推导,适用于不同的矿井环境,提供涌水量的物理解释^[25-26]。本文选取干旱半干旱区深埋煤层矿区,利用数值模拟和水化学方法定量表征矿井涌水量,为矿区安全生产提供可靠依据。

1 材料与方法

1.1 研究区地质及水文地质条件

东胜煤田位于鄂尔多斯盆地北缘,地处伊盟

隆起构造单元内。井田位于东胜煤田中南部，水文地质条件相对复杂，含水层可划分为（图1）：（1）第四系含水层，富水性等级为中等~强；（2）洛河组承压含水层，富水性弱~中等；（3）侏罗系直罗组孔隙裂隙承压含水层，富水性弱；（4）侏罗系延安组2煤顶板含水层，煤层顶板砂岩含水层富水性弱~中等；（5）侏罗系延安组2煤至6煤含水层，富水性弱；（6）三叠系上统延长组碎屑岩类承压水含水层，富水性弱（图1）。井田内潜水主要赋存于白垩系下统洛河组浅部地层中。潜水的主要补给来源为大气降水，其次为农田回灌。井田内承压水主要赋存于侏罗系中统直罗组和中下统延安组砂岩中。白垩系含水层与侏罗系含水层无直接水力联系，为矿床的间接充水含水层。三叠系上统延长组承压含水层是矿床充水的间接充水水源。井田南部存在查干淖尔地下水水源地，水源地主要开采志丹群洛河组地下水。

1.2 水文地质概念模型与数值模型介绍

1.2.1 模型概化

根据钻孔资料和水文地质剖面图，将模型概化为4层结构，自上而下分别为：（1）第四系—白垩系潜水含水层；（2）安定组及直罗组顶部弱透含水层；（3）2煤顶板承压含水层；（4）6煤顶板承压含水层。

1.2.2 模型范围和边界条件概化

矿区位于鄂尔多斯盆地东北部，首先，模型范

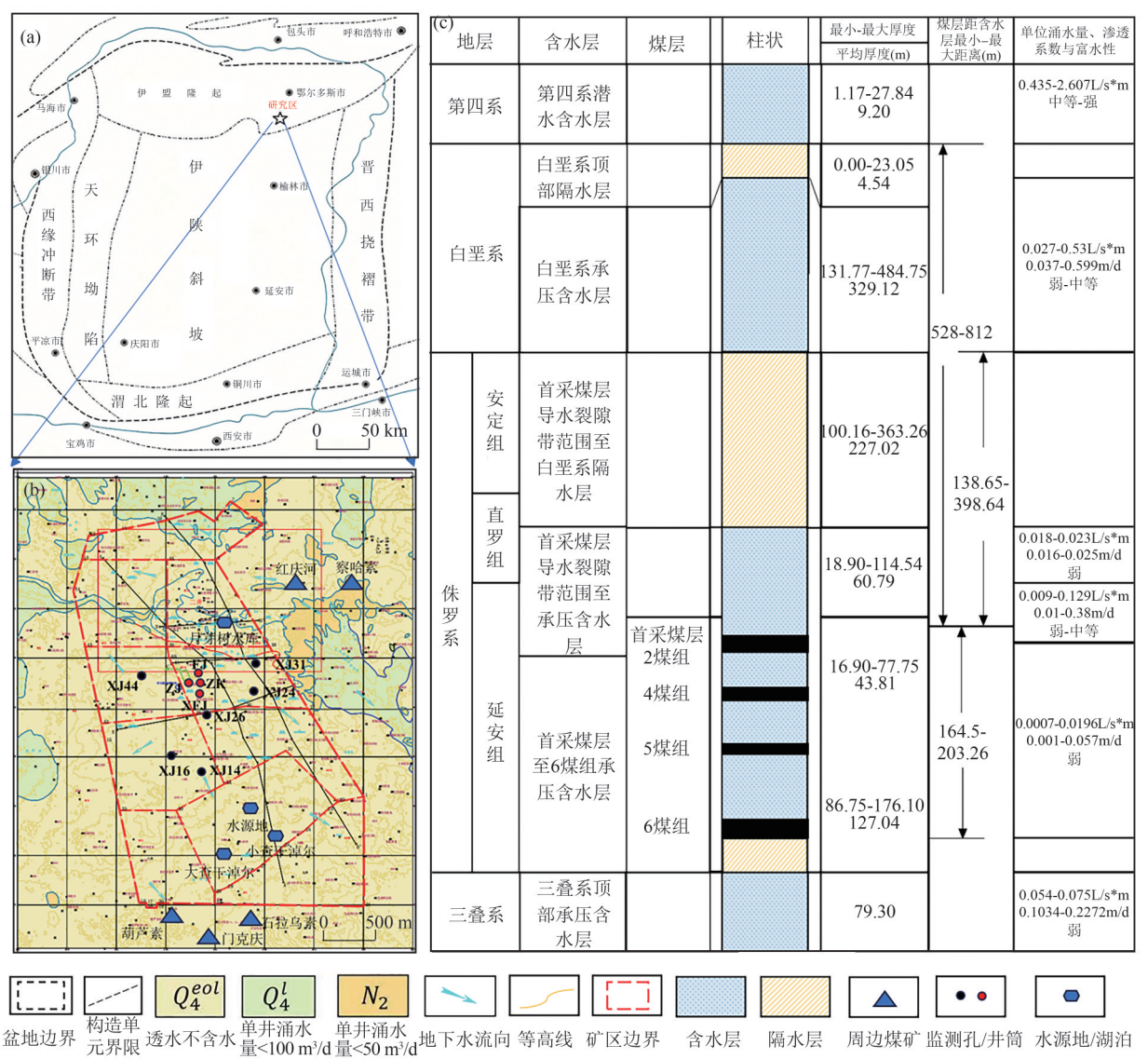


Fig. 1 Regional tectonic map of the Ordos Basin (a), Hydrogeological map of the mining area (b) and Borehole histogram (c)

围需包括整个矿区范围，其次考虑水文地质单元和流域边界。根据研究区地下水系统和流场形态确定模拟边界，模拟区总面积1315.22 km²。2煤顶板含水层在研究区北部接受补给，地下水由北向南流动，最终从南部边界流出，东西两侧看作隔水边界(图2)。6煤顶板含水层在研究区北部接受补给，地下水从北向南流动，故北部为侧向流入边界，南部为侧向流出边界。6煤为模型的底部边界。

1.2.3 参数选取

模型中渗透系数根据野外抽水试验初步确定，然后根据流场和水位过程线进行调整；给水度和储水系数均按照研究区经验参数赋值。

1.2.4 数学模型

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_L \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_L \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \varepsilon$$
$$x,y,z \in \varnothing, t \geq 0$$

$$u \frac{\partial h}{\partial t} = K_L \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + K_L \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + K_L \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial h}{\partial z} (K_z + p) + p \quad x,y,z \in \tau, t \geq 0$$

式中： $\varnothing$ 表示地下水流动区域； h 表示水位标高，m； K_L 、 K_z 分别表示水平渗透系数和垂向渗透系数，m/d； ε 表示源汇项，m³/d； S 表示贮水率，m⁻¹； u 表示给水度； p 表示蒸发和降水强度，m/d。

2 结果与讨论

2.1 导水裂隙带发育特征

导水裂隙带发育高度分别采用相关标准中的公式进行计算。同时收集周边矿井采动条件下的导水裂隙带实测高度(表1)，其中矿区附近的石拉乌素矿首采工作面采厚为5.96 m，导水裂隙带最大发育高度为146.38 m，裂采比为24.56；葫芦素综采工作面采厚为2.6 m，导水裂隙带高度为

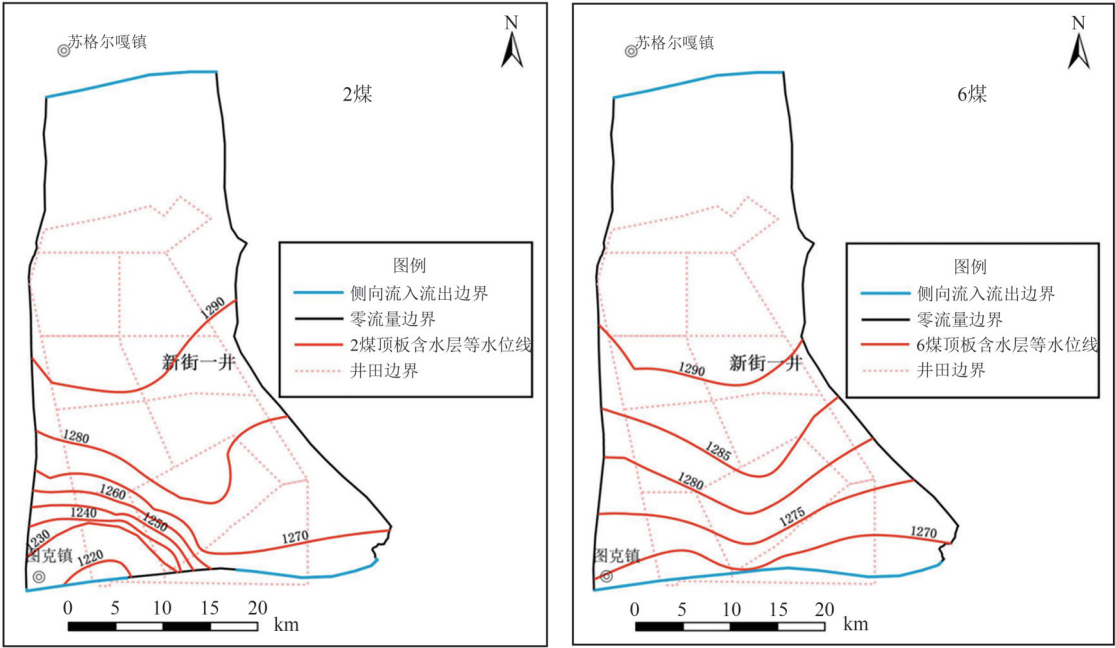


图2 不同煤层顶板含水层边界条件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the boundary conditions of aquifers at the roof of different coal seams

表1 矿井周边生产矿井导水裂隙带实测高度值

Table 1 Measured height values of the water-conducting fissure zone of the producing mines surrounding the mine

矿区名称	矿井名称	煤层厚度	导水裂隙	实测方法	裂采比	来源
		最小~最大值/平均值	实测/m			
呼吉尔特矿区	石拉乌素	4.40~6.50/5.96	146.38	光纤光栅应力应变监测	24.56	[27]
	门克庆	3.85~5.45/4.35	110.00	视电阻率值和电流比值探测	25.29	[28]
	葫芦素	2.55 m	45.60	钻孔电视	17.88	[29]
新街矿区	红庆河	0.80~8.45/6.14 m	106.10	井下仰孔侧漏试验	17.28	[30]
	察哈素	5.87 m	109.20	地面与井下冲洗液漏失量观测与钻孔电视探测	18.60	[31]

45.6 m, 裂采比约 17.54; 红庆河 3-1 煤层平均采厚为 6.14 m, 导水裂隙带发育高度为 106.1 m, 裂采比约为 17.28。为了安全起见, 本次研究导水裂隙带预测采用裂采比 25 倍进行校验。

矿区各煤层开采后的导水裂隙带高度计算结果见表 2, 由计算结果可见, “水工环勘查评价标准”和《煤矿防治水手册》计算的导水裂隙带发育高度值较为接近, 但与裂采比 25 倍的计算结果相差较大。分析其原因, “水工环勘查评价标准”和《煤矿防治水手册》对较厚煤层适应性较差, 而矿区内开采煤层厚度较大, 故二者计算误差较大, 而 25 倍裂采比是根据附近葫芦素、石拉乌素、红庆河矿井等生产矿井在一次采全高情况下生产实测数据获得的经验值, 计算结果更接近矿区实际情况。因此, 本次研究采用 25 倍裂采比计算结果作为依据, 据矿区整体煤层数据计算结果, 初步分析矿区主要可采煤层 $2^{-2\pm}$ 、 2^{-2} 、 3^{-1} 、 5^{-1} 、 6^{-1} 在一次采全高开采过程中形成导水裂隙带高度主要发育至直罗组地层, 可能导通直罗组发育至安定组, 部分区域会发育至白垩系洛河组。由于 3^{-1} 、 5^{-1} 、 6^{-1} 煤层计算的导水裂隙带高度均小于 $2^{-2\pm}$ 和 2^{-2} 煤层的导水裂隙带高度, 故本次研究预测导水裂隙带发育高度选择 $2^{-2\pm}$ 和 2^{-2} 煤层。

新街一井主要可采煤层 $2^{-2\pm}$ 、 2^{-2} 在一次采全高、同时按照 25 倍裂采比计算条件下产生的导水裂隙带发育至延安组、直罗组含水层, 局部发育至安定组和白垩系洛河组含水层, 均不会发育至第四系潜水含水层中。其中新街一井范围内导水裂隙带发育至白垩系洛河组含水层的面积为 1.35 km², 占新街一井总面积的 1.92%。

本次评价将导水裂隙带发育至白垩系洛河组含水层的区域和安定组剩余厚度小于等于 20 m 的

区域划定为保水采煤区(《保水采煤技术规范》), 大于 20 m 的区域划定为自然开采区。限高开采区域 10.03 km²。后续采动条件下涌水量模拟预测以采取保水采煤措施后煤层开采高度进行预测。

2.2 数值模型

2.2.1 边界条件和初始条件

由上述可知, 模型侧向边界为二类边界, 即:

$$K_n \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\tau} = q \quad x, y, z \in \tau, t \geq 0 \quad (3)$$

式中: τ 为含水层的侧向边界; n 为内法线方向; k_n 为边界法向渗透系数, m/d; q 为单位面积边界流入流出量, m³/d。

初始条件:

$$h|_{t=0} = h_0 \quad x, y, z \in \emptyset \quad (4)$$

式中: h_0 为初始时刻地下水位, m。

2.2.2 时空离散

根据已有数据, 初步确定模拟期为 2013 年 1 月 1 日到 2021 年 12 月, 共 108 个月。每个自然月对应一个应力期, 每个应力期 1 个时间步长。

采用 GMS 软件求解地下水流方程, 见式 (1) 和式 (2)。采用四叉树非结构化网格对模型进行剖分。模型垂向上概化为四层, 模型基础网格大小为 200 m × 200 m, 如图 3 所示。

2.2.3 源汇项

降水入渗选择 RCH 程序包处理, 蒸发利用 EVT 程序包处理, 流入边界和流出边界采用 GHB 程序包处理。大气降雨入渗补给: 通过收集鄂尔多斯市气象站的降雨资料, 同时划分降雨入渗系数分区。侧向补给量: 模型 2 煤顶板含水层及 6 煤顶板含水层北侧均接受侧向补给, 是研究区地下水的补给源之一。根据地下水流场, 利用达西断面法求取边界值, 如下式所示。

表 2 矿区煤炭开采后导水裂隙带高度统计

Table 2 Statistics on the height of water-conducting fissure zones after coal mining

煤层 编号	煤厚/综合 采厚/m	导水裂隙带高度/m				裂采比 25 倍计算结果		
		水工环勘查评价 标准	煤矿防治水手册	裂采比 25 倍	保护层厚度	导水裂隙带至 安定组距离/m	导水裂隙带至 洛河组距离/m	
	最小~最大 平均	最小~最大 平均	最小~最大 平均	最小~最大 平均	最小~最大 平均	最小~最大 平均	最小~最大 平均	最小~最大 平均
$2^{-2\pm}$	0.81 ~ 5.243.54	16.51 ~ 78.9054.93	22.91 ~ 75.0656.58	20.25 ~ 13188.45	23.59 ~ 114.3165.3	25.37 ~ 135.0392.12	39.43 ~ 210.13125.77	
2^{-2}	0.25 ~ 9.346.57	8.62 ~ 136.6597.69	15.09 ~ 111.83 86.84	6.25 ~ 233.5164.35	0 ~ 197.6658.36	-97.21 ~ 1781.06	-22.31 ~ 267.8774.63	
3^{-1}	0.3 ~ 6.032.72	9.33 ~ 90.0343.34	15.80 ~ 82.8746.74	7.5 ~ 150.7567.88	23.59 ~ 204.8773.48	29.96 ~ 218.44134.81	95.68 ~ 353.55208.26	
5^{-1}	0.18 ~ 4.921.80	7.64 ~ 74.4030.49	14.08 ~ 71.7935.66	4.5 ~ 12345.07	23.59 ~ 204.8773.48	112.16 ~ 296.41212.80	168.45 ~ 440.18285.79	
6^{-1}	0.57 ~ 10.915.45	13.13 ~ 158.7681.86	19.6 ~ 123.7775.83	14.25 ~ 272.75136.26	23.59 ~ 204.8773.48	7.59 ~ 304.71163.03	21.87 ~ 396.22236.42	

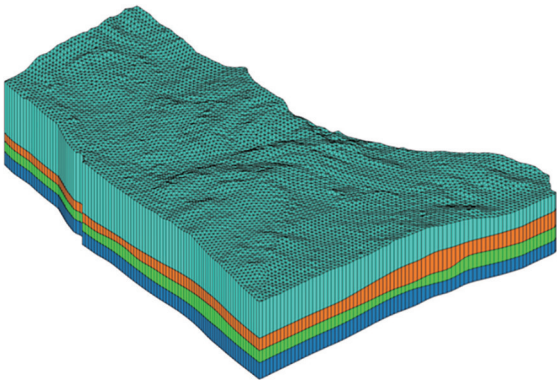


图3 模型网格剖分示意图
Fig. 3 Schematic of model mesh sectioning

$$Q_c = K \cdot I \cdot B \cdot M \tag{5}$$

式中： Q_c 表示侧向径流补给量， m^3/d ，流入为正； K 表示含水层断面附近渗透系数， m/d ； I 表示垂直于断面的水力梯度； B 表示断面长度， m ； M 表示断面所在含水层厚度， m 。

开采量：通过伊旗水利局统计研究区内水源地开采量为700.34万 m^3/a 。

蒸发量：蒸发数据来源于伊旗气象局，查阅相关文献[32–34]，陆面蒸发与水面蒸发折算系数取0.62。本次模拟地下水极限埋深取2.15 m。

湖泊排泄量：统计模拟区内湖泊面积，将其与研究区年水面蒸发量的乘积作为湖泊排泄量的参考值，校正模型均衡项。

2.2.3 模型识别、验证及参数确定

本次以2013年1月统测的枯水期流场作为模型的初始流场，如图4所示，从流场拟合情况来看，模拟流场基本上反映了地下水的流动特征。结合观测点与模拟值的 R^2 和RMSE值可知（图5至图7），拟合较好。模型识别后，第四系—白垩系含水层渗透系数分区、2煤顶板含水层和6煤顶板含水层分区如图8所示。

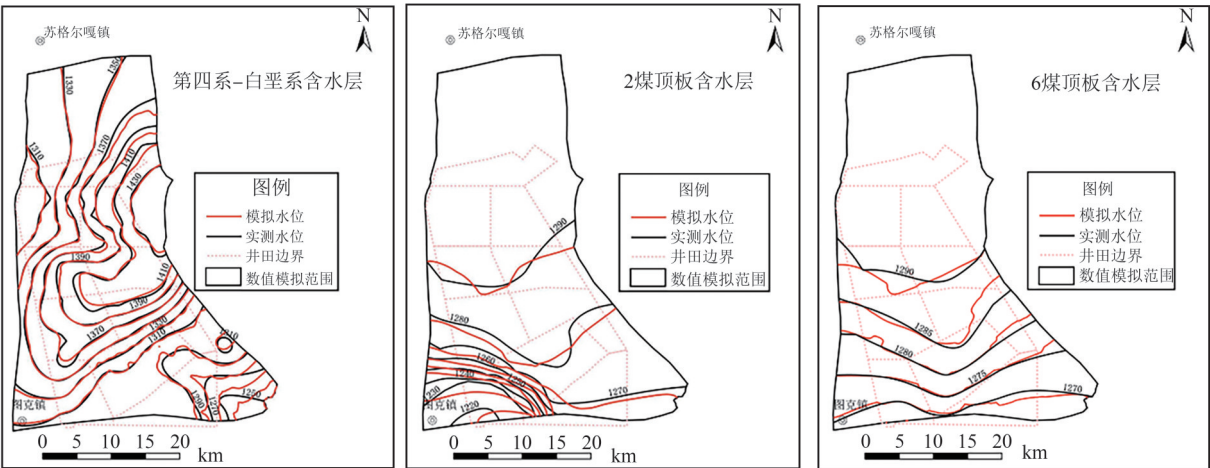


图4 各含水层流场拟合结果
Fig. 4 Fitting results of groundwater flow field in each aquifer

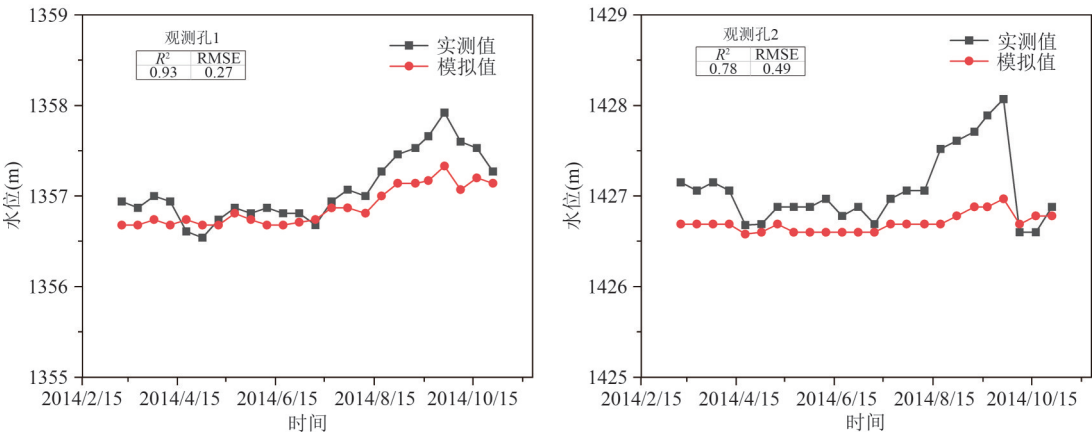


图5 第四系—白垩系含水层观测孔1(XJ24)和观测孔2(XJ31)拟合
Fig. 5 Fitting of water table process lines in observation holes of the Quaternary-Cretaceous aquifer

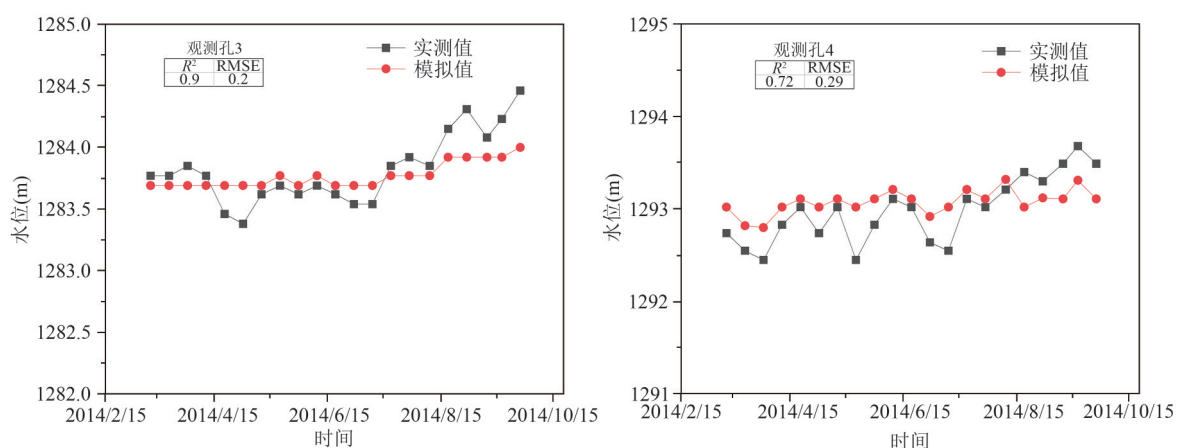


图6 2煤顶板含水层观测孔3 (XJ26) 和观测孔3 (XJ44) 拟合

Fig. 6 Fitting of water table process lines in observation holes of the No. 2 coal seam roof aquifer

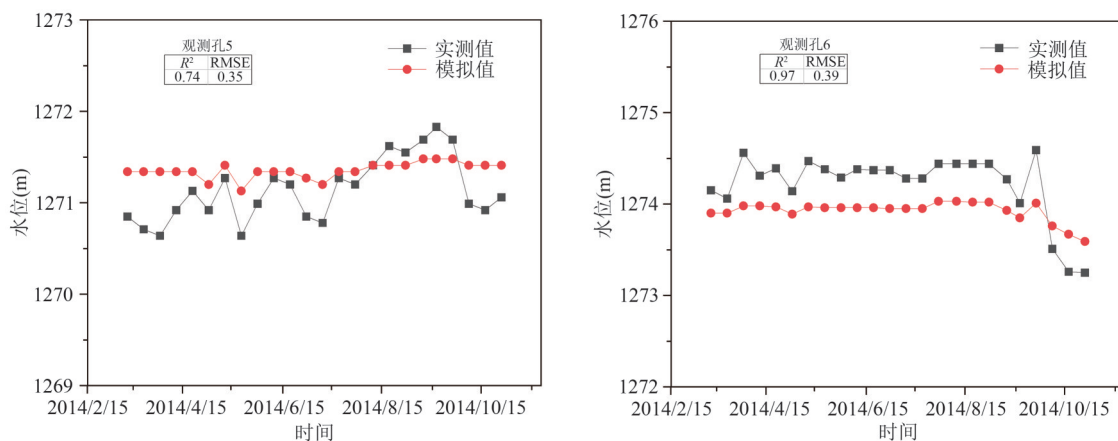


图7 6煤顶板含水层观测孔5 (XJ16) 和观测孔6 (XJ14) 拟合

Fig. 7 Fitting of water table process lines in observation holes of the No. 6 coal seam roof aquifer

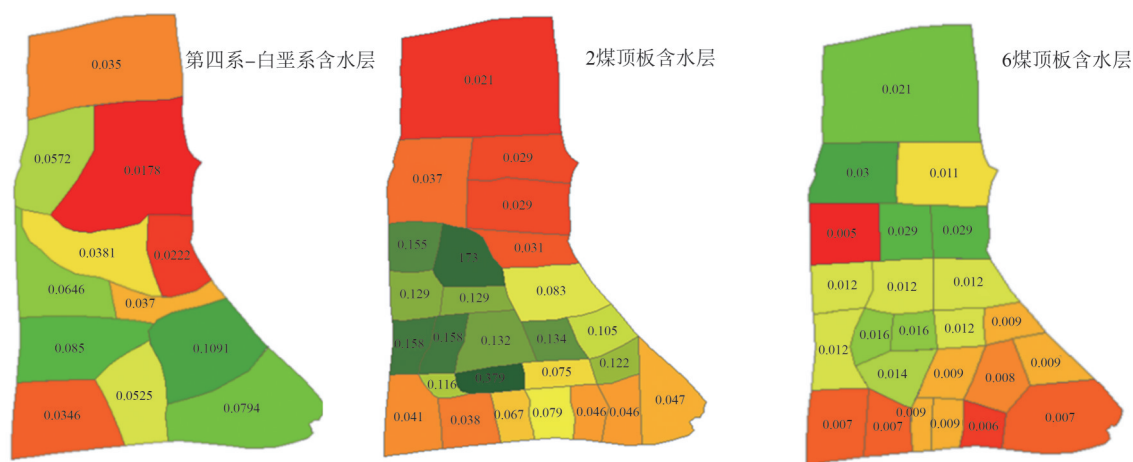


图8 不同含水层水平渗透系数分区

Fig. 8 Horizontal permeability coefficient zoning for different aquifers

2.3 结果分析

本次矿井涌水量预测采用GMS里的Drain模块进行, Drain模块主要用于模拟含水层的水位疏降, 水位降深设置到指定标高, 其在模拟水位疏

降时具有优势, 即使含水层水位降落到指定标高以下也不会影响疏降水量的计算结果。

运用校准后的模型可以对未采动条件下的涌水量进行计算, 但是采煤导致含水层结构和特性

发生了很大的扰动,尤其是导水裂隙带会严重改变煤层顶板的隔水能力,使其渗透性增加^[35-36]。本次模拟将首采工作面范围内煤层顶板含水层排水标高设置为含水层底板标高。通过分析矿井疏降水后的地下水流场,表征不同含水层之间的越流量,刻画涌水量的来源组成。

2.3.1 天然与采动条件下矿井涌水量预测

本次涌水量预测针对一井田的先期开采地段进行模拟预测,首采区面积为37.11 km²(图9),开采规划为42年。一井田2煤先期开采地段内水位疏降的标高为1290 m,含水层底板标高约600 m,在模型中将排水标高设置为2煤含水层底板,将模型运行42年。

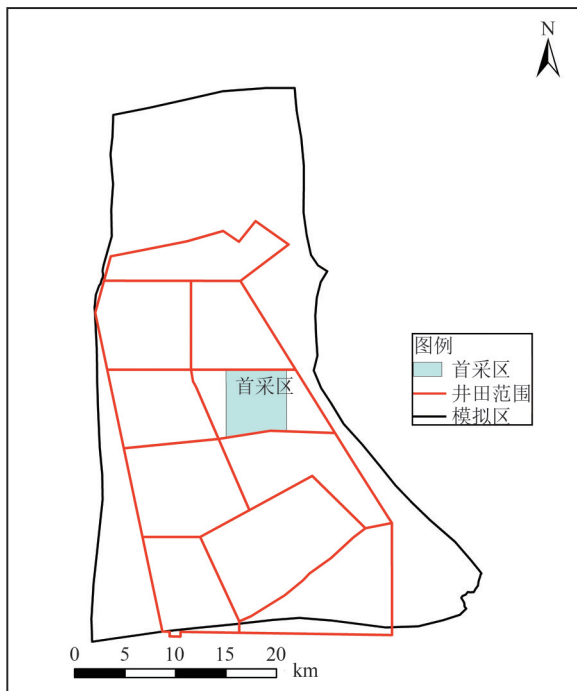


图9 一井田首采区示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the first mining area of a well field

采动条件下矿井涌水量的情景设置如下,情景一将模拟区导水裂隙带发育范围内介质垂向渗透系数增大为天然条件下的10倍,水平方向的渗透系数也增大为天然条件下的5倍。情景二将介质垂向渗透系数增大为天然条件下的10倍,水平方向的渗透系数也增大为天然条件下的10倍,对采动条件下矿井涌水量进行预测。

煤矿开采需要对上覆含水层进行疏干,故模型预测初期涌水量较大,随着时间延续,涌水量逐渐趋于稳定。逐年涌水量的预测结果如表3所示,煤

矿开采初期涌水量较大,天然条件下第5年涌水量为794.91 m³/h,第10年涌水量为664.89 m³/h,模型运行至最后一年,涌水量为557.95 m³/h,这也与实际涌水过程相符。切眼处顶板岩层中形成的“导水裂隙带”首次充分贯通上覆主要含水层,导致地下水集中、快速地涌入采空区,涌水量在短时间内迅速达到峰值。随着工作面持续推进,后方采空区上覆岩层在自重应力下发生垮落、压实,导致涌水量随之出现衰减趋势。当工作面推进至一定距离,采空区压实带趋于稳定,其对垂向补给的阻隔效应与含水层的侧向径流补给达到一种动态平衡。情景一第5年涌水量为893.45 m³/h,第10年涌水量为733.48 m³/h,模型运行至最后一年,涌水量为607.86 m³/h。情景二第5年涌水量为934.59 m³/h,第10年涌水量为765.09 m³/h,模型运行至最后一年,涌水量为630.91 m³/h。

表3 涌水量汇总表

Table 3 Summary of mine surge

年份/涌水量(m ³ /h)	天然条件	情景一	情景二
2027(5年)	794.91	893.45	934.59
2032(10年)	664.89	733.48	765.09
2037(15年)	606.49	664.41	691.54
2042(20年)	569.57	621.27	645.30
2044(22年)	557.95	607.86	630.91

由表3可以看出,天然条件下与采动条件下涌水量无较大差距,原因在于采动条件下情景设置为考虑保水采煤措施下的开采方式,煤层的开采厚度均确保安定组弱透水层至少保留20 m安全厚度,且根据导水裂隙带发育规律,采动条件主要对开采区附近含水层及弱透水层渗透系数影响较大,故采动条件下涌水量与天然条件下涌水量无较大差距。

对于情景一,采动裂隙主要增强了垂向水力联系,水平侧向补给增强有限。涌水量较天然条件增幅约12%,需警惕局部突水。在导水裂隙带发育区域内,针对垂向渗透系数增大的特点,重点对工作面顶板进行预注浆,封堵垂向优势通道,降低顶板水直接涌入采空区的风险。按最大涌水量配置排水能力,确保初期峰值期排水安全;后期可根据实际衰减情况适时调减。

对于情景二,采动裂隙不仅增强垂向导水能力,还显著增强了水平渗透性,可能导致更大范围的侧向径流补给,涌水量增幅达17.6%,排水

压力最大,且越流量可能随水平裂隙扩展而增加。在采区外围补给方向上施工帷幕注浆墙,切断水平方向的侧向径流补给;同时在开采区内部实施超前疏干钻孔,预先降低水压。排水系统按照情景一类推。鉴于水平渗透性增强可能增大洛河组越流量,应在煤层顶板含水层及洛河组布设越流量监测孔,实时计算越流补给量,当其超过涌水量的20%时,启动辅助排水。

2.3.2 矿井涌水量组成定量表征

对首采区涌水量组成进行分析(图10),天然条件下,侏罗系含水层水量占88.60%;情景一中,侏罗系含水层水量占80.50%;情景二中,侏罗系含水层水量占80.70%。矿区开采42年后,三种情景中2煤层采动矿井涌水量的组成主要包括侏罗系含水层水量及白垩系洛河组含水层越流量,其中侏罗系含水层的水量占涌水量的大部分,白垩系含水层越流量较小。

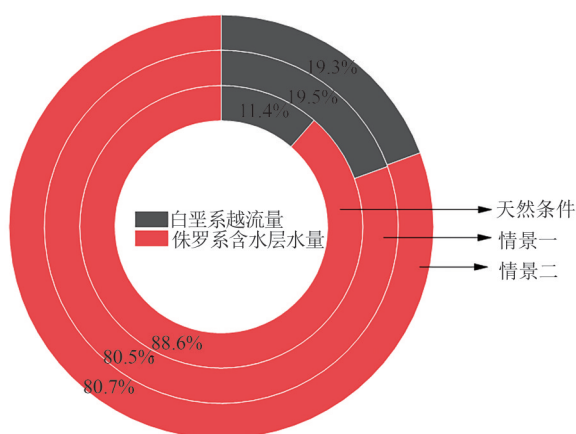


图10 不同情景下涌水量组成

Fig. 10 Composition of surge volume under different scenarios

为了验证涌水来源,采集10件含水层样品和2件涌水样品,含水层样品来源于主井、副井、西风井以及ZK四个钻孔,涌水样品来源于主井,涵盖白垩系志丹群以及侏罗系直罗组、延安组。测试指标包括八大离子以及 NH_4^+ 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 F^- 等。

测试结果显示,志丹群水化学类型为 HCO_3^- - $\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 、 HCO_3^- - $\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型,直罗组为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3^-$ - Na 型,延安组为 SO_4 - Na 型和 Cl - Na 型。在Piper三线图(图11)中,志丹群样品与其他地层分布有明显差异,直罗组和延安组样品阴离子均以 SO_4^{2-} 为主,阳离子以 Na^+ 为主,分布于Piper三线图右侧。本次涌水样品阴离子以 SO_4^{2-} 为主,阳离子以 Na^+ 为主,pH为8.6,TDS平均为1157.1mg/L。在Piper三线图中同直罗组、延安组样品一样位于菱形图右侧,水化学类型为 SO_4 - Na 型。

结合对水化学特征分析,涌水样品中 SO_4^{2-} 和 Na^+ 为主导组分, Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 等其他组分以及TDS、总硬度等指标与志丹群样品的差异显著。同时绘制Durov图并结合其余水化学组分含量特征进行综合分析判断。

分析测试结果显示延安组含水层样品的TDS和总硬度相对较高,TDS介于1688~2622mg/L之间,总硬度平均245.12mg/L。相比之下,本次涌水样品水化学组分以 SO_4^{2-} 和 Na^+ 为主,TDS平均为1157.1mg/L。涌水样品的TDS、总硬度等基本水质指标特征和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量特征更接近直罗组含水层的水化学特征。但涌水样品中部分特征指标 NO_3^- 、 F^- (NO_3^- 平均9.45mg/L、 F^- 平均2.24mg/L),表明涌水样品可能与延安组、志丹群含水层有混合。这也与模型结果基本吻合。

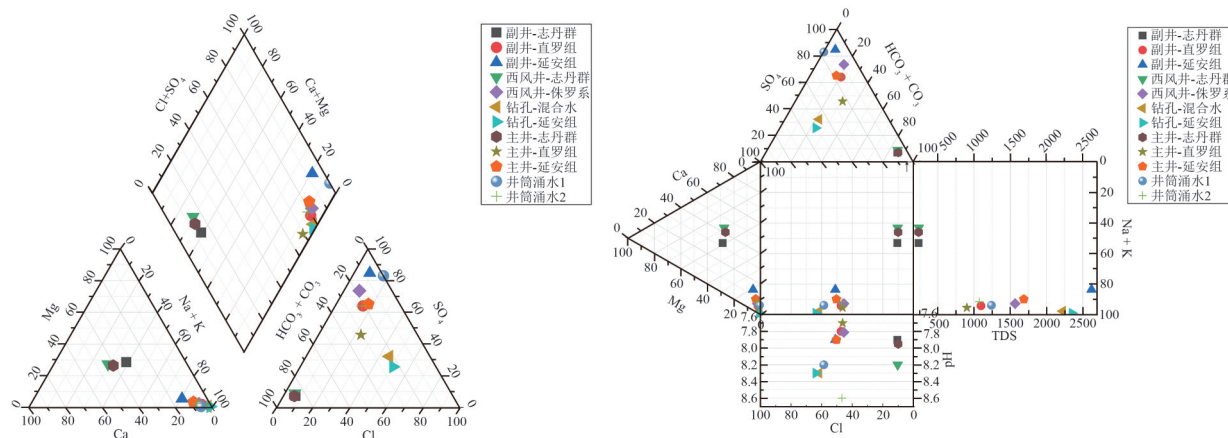


图11 含水层与涌水样品Piper图和Durov图

Fig. 11 Piper diagram and Durov diagram of aquifer and water inflow samples

2.3.3 采动条件下不同含水层之间的水力交换

第四系-白垩系含水层中地下水由东向西和南两个方向流动, 2煤和6煤顶板含水层中地下水由北向南流动。采煤会显著改变地下水流场形态和含水层之间的水力交换, 通过对矿井疏降水后的地下水流场进行模拟, 可知2煤开采以后其导水裂

隙带影响到安定组及直罗组上部隔水层, 局部区域发育至白垩系含水层, 如图12所示。通过对煤矿未开采和煤矿开采条件下第四系-白垩系含水层流场进行对比, 发现无明显变化, 因此, 依照采动条件设置后没有对第四系-白垩系含水层地下水流场形成明显干扰。如图13至15所示, 采动条件

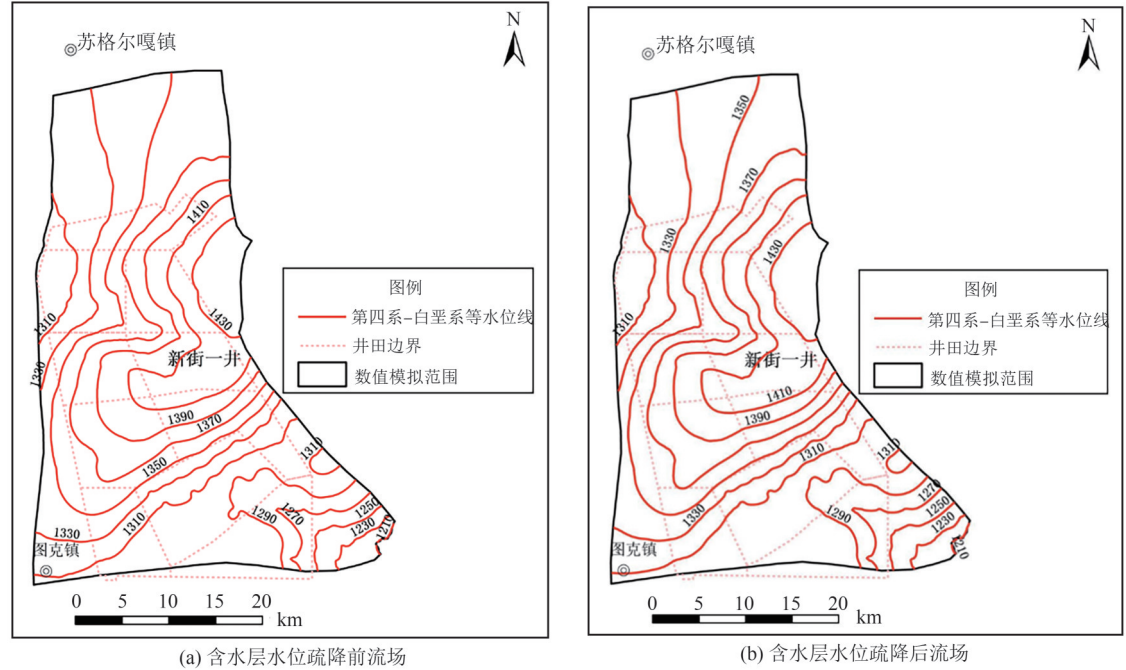


图12 第四系-白垩系含水层流场形态

Fig. 12 Groundwater flow field patterns in the Quaternary-Cretaceous aquifer

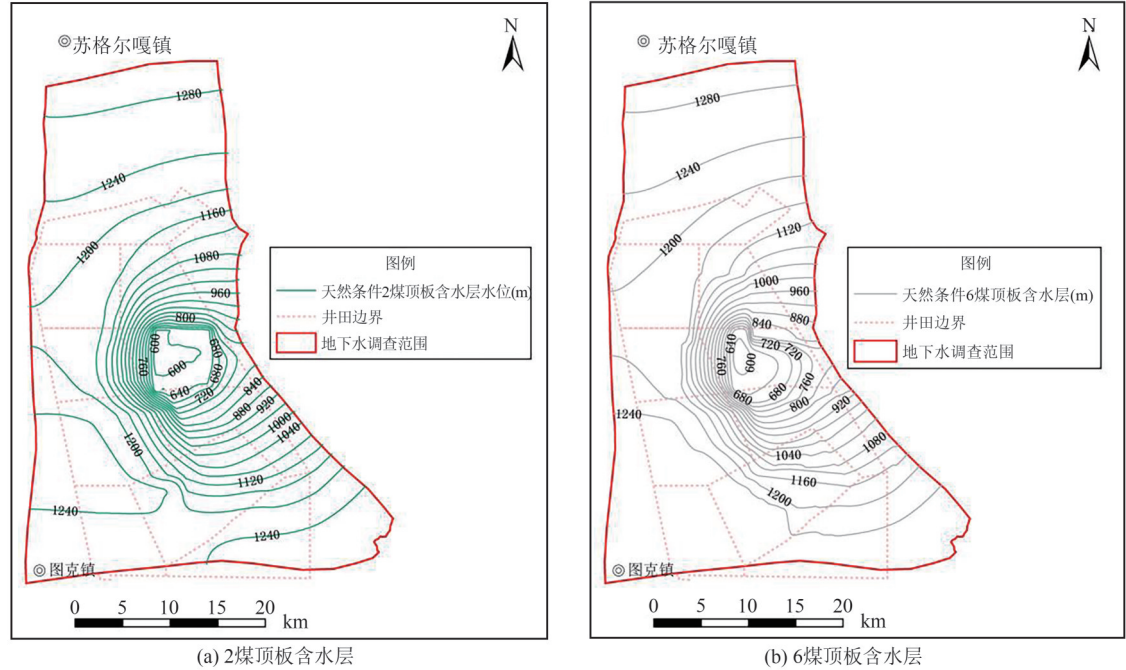


图13 天然条件下煤层顶板含水层流场形态

Fig. 13 Morphology of groundwater flow field in coal seam roof aquifer under natural conditions

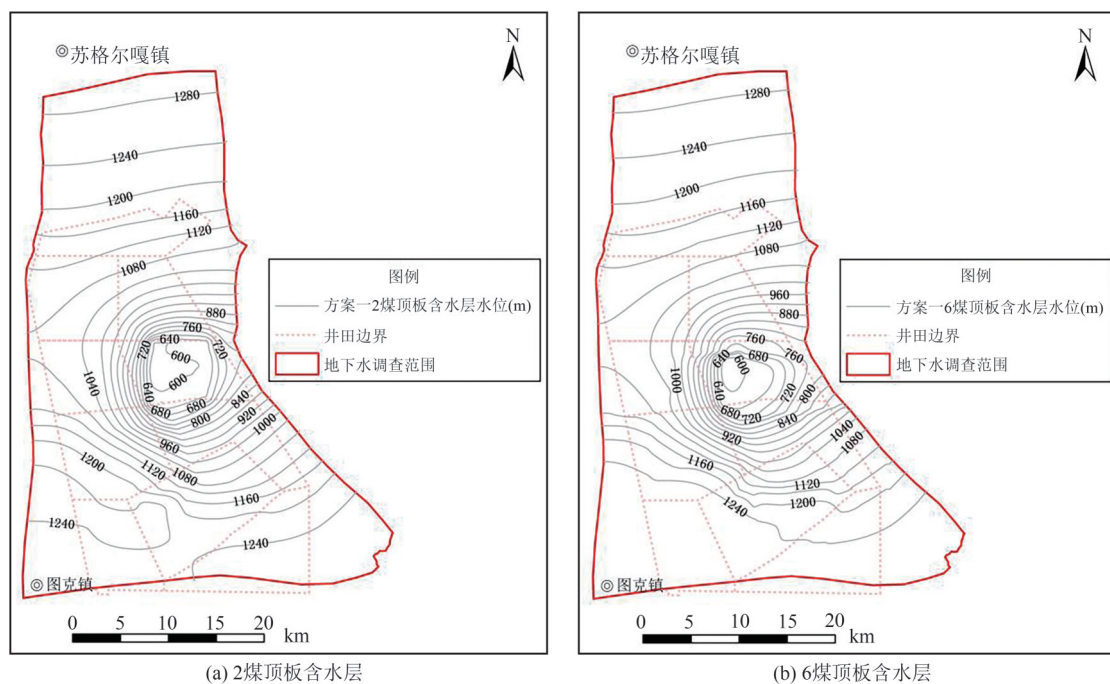


图14 情景一煤层顶板含水层流场形态

Fig. 14 Groundwater flow field morphology in the coal seam roof aquifer in Scenario 1

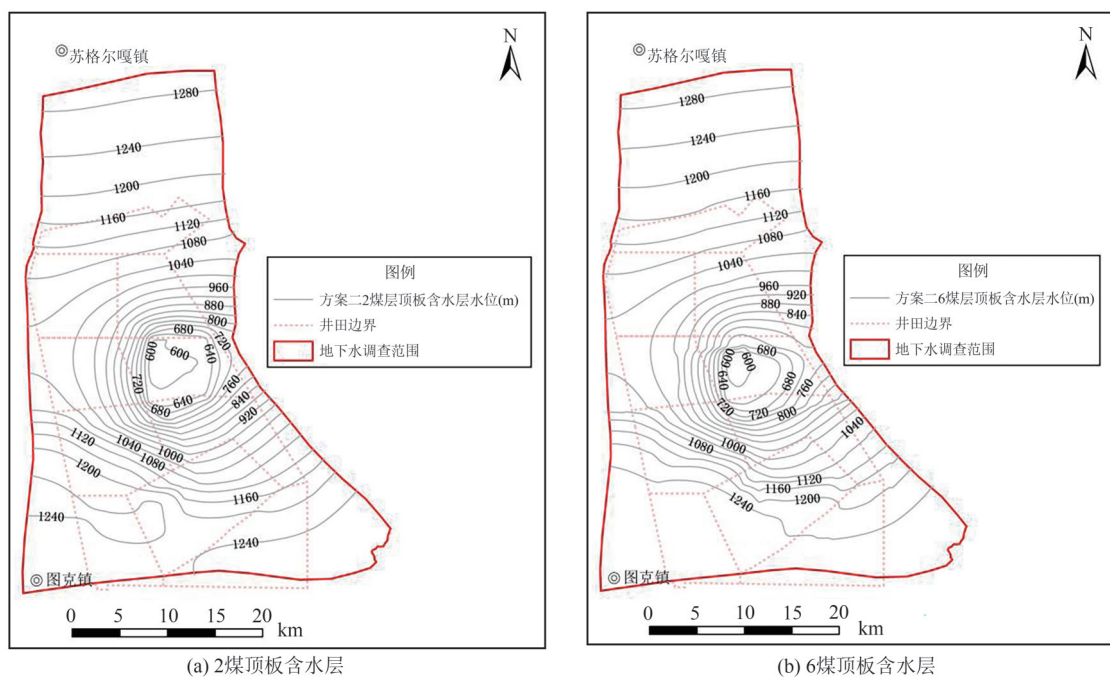


图15 情景二煤层顶板含水层流场形态

Fig. 15 Groundwater flow field morphology in the coal seam roof aquifer in Scenario 2

下2煤顶板含水层和6煤顶板含水层地下水流场形态变化相似, 2煤层的采动使得2煤顶板含水层水位最大降幅达到630 m左右。同时由于2煤顶板含水层和6煤顶板含水层存在一定水力联系, 2煤层开采排水使得6煤顶板含水层对2煤顶板含水层产生一定越流量, 使得下部6煤顶板含水层水位下

降, 最大降幅达到590 m左右, 且首采区周边含水层都有一定的水位降幅。根据地下水流场分布可知, 采煤前后煤系含水层地下水流场形态发生了明显的变化, 采煤后在首采面处形成了显著的降落漏斗, 水力梯度大幅度提升, 且2煤顶板含水层的降落漏斗和水力梯度的变化大于6煤顶板含水层。

3 结 论

(1) 揭示了煤层开采条件下涌水量的动态衰减规律。煤矿开采需要对上覆含水层进行疏干, 故模型预测初期涌水量较大, 随着时间延续, 涌水量逐渐趋于稳定。天然条件下第5年涌水量为 $794.91 \text{ m}^3/\text{h}$, 第10年涌水量为 $664.89 \text{ m}^3/\text{h}$, 模型运行至最后一年, 涌水量为 $557.95 \text{ m}^3/\text{h}$ 。情景一第5年涌水量为 $893.45 \text{ m}^3/\text{h}$, 第10年涌水量为 $733.48 \text{ m}^3/\text{h}$, 模型运行至最后一年, 涌水量为 $607.86 \text{ m}^3/\text{h}$ 。情景二第5年涌水量为 $934.59 \text{ m}^3/\text{h}$, 第10年涌水量为 $765.09 \text{ m}^3/\text{h}$, 模型运行至最后一年, 涌水量为 $630.91 \text{ m}^3/\text{h}$ 。基于涌水量初期大、后期小的衰减规律, 建议在开采前5年按 $934.59 \text{ m}^3/\text{h}$ 配置排水能力, 重点加强2煤顶板含水层的预疏干与钻孔泄压, 防范初期高强度涌水, 避免排水不足导致水害风险; 10年后可根据实际观测数据逐步调减排水强度, 关注越流量增加对6煤顶板含水层的扰动, 适时启动下层煤的辅助排水。

(2) 阐明了涌水水源的混合识别机制。矿区开采42年后, 三种情景中2煤层采动矿井涌水量的组成主要包括侏罗系含水层水量及白垩系洛河组含水层越流量, 其中侏罗系含水层的水量占涌水量的80%左右, 白垩系含水层越流量较小。白垩系志丹群水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型, 侏罗系直罗组为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型, 延安组为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 及 Cl-Na 型。涌水样品为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 型, 其主离子组成及TDS、总硬度等指标与直罗组特征高度相似。然而, 涌水中检出的 NO_3^- 和 F^- 指示其混有延安组或志丹群水源。Piper 三线图与 Durov 图进一步佐证了该混合来源, 与模型计算结果相吻合。建议将 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、TDS、总硬度作为侏罗系水源的主控指标; 将 NO_3^- 、 F^- 作为白垩系或延安组混入的敏感指标。一旦涌水中 NO_3^- 或 F^- 浓度显著升高, 可预警越流或涌水风险。

(3) 揭示了采动条件下不同煤层含水层间的越流耦合机制。目前采动条件没有对第四系-白垩系地下水场形成明显干扰。采动条件下2煤顶板含水层和6煤顶板含水层地下水场形态变化相似, 2煤层的采动使得顶板含水层水位最大降幅达到630 m左右。同时2煤层开采使得6煤顶板含水层对2煤顶板含水层产生一定越流量, 使得下部6煤顶板含水层水位降幅达到590 m左右。且首采

区周边含水层都有一定的水位降幅。采煤后在首采面处形成了显著的降落漏斗, 水力梯度大幅度提升, 且2煤顶板含水层的降落漏斗和水力梯度的变化大于6煤顶板含水层。鉴于2煤开采会显著扰动6煤顶板含水层, 建议优先开采2煤时, 在6煤顶板含水层富水区提前布设水位观测孔与泄压钻孔。

参考文献:

- [1] YAO D, CHEN S, DONG S, et al. Modeling abrupt changes in mine water inflow trends: A CEEMDAN-based multi-model prediction approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 439:140809.
- [2] XU L, CAI M, DONG S, et al. An upscaling approach to predict mine water inflow from roof sandstone aquifers[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612:128314.
- [3] ZHAO J, KONIETZKY H. Numerical analysis and prediction of ground surface movement induced by coal mining and subsequent groundwater flooding[J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 229:103565.
- [4] 范立民, 孙魁, 李成, 等. 榆神矿区煤矿防治水的几点思考[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1):182-188.
- [5] 杨晟, 贾超, 袁涵, 等. 新疆北部某煤矿持续采掘条件下矿井涌水量动态模拟预测[J]. 中国矿业, 2020, 29(02):143-150.
- [6] ZHAI H, WANG J, LU Y, et al. Prediction of the Mine Water Inflow of Coal-Bearing Rock Series Based on Well Group Pumping[J]. Water, 2023, 15(20):3680.
- [7] 辛建帝, 张博龙, 李治龙, 等. 动、静结合法在矿井涌水量中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(10):52-57+21.
- [8] 吴铁卫, 程振雨, 郑洁铭. 鄂尔多斯盆地南部矿区涌水量特征及动态预测方法[J]. 中国煤炭地质, 2023, 35(5):58-60.
- [9] 傅耀军. 矿井涌水量动态预测非稳定释水-断面流法[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(1):52-57.
- [10] HUA Z, ZHANG Y, MENG S, et al. Response Characteristics and Water Inflow Prediction of Complex Groundwater Systems under High-Intensity Coal Seam Mining Conditions[J]. Water, 2023, 15(19):3376.
- [11] 王颖, 刘郑秋, 李成帅, 等. 基于ARIMA-GM模型的矿井涌水量预测[J]. 煤炭技术, 2024, 43(9):154-157.
- [12] 刘慧, 刘桂芹, 宁殿艳, 等. 基于VMD-DBN的矿井涌水量预测方法[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(6):13-21.
- [13] YANG S, LIAN H, XU B, et al. Application of robust deep learning models to predict mine water inflow: Implication for groundwater environment management[J]. Science of The Total Environment, 2023, 871:162056.
- [14] 李路, 乔伟, 甘圣丰, 等. 导水裂隙带动态发育规律及覆岩含水层涌水量预计[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(S1):144-149.

- [15] 杜勇志, 范业承, 刘昊, 等. “水量平衡分析”的露天煤矿水资源综合利用途径[J]. 中国矿业, 2021, 30(S1):94-100.
- [16] 周全超, 刘玲, 李继升, 等. 基于多种解析法和数值法求解巨厚砂岩水文地质参数[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S1):174-182.
- [17] 梁犁丽, 胡宇丰, 柳长顺, 等. 矿井涌水量多方法预测与对比分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(S2):66-68.
- [18] 胡兵, 刘会月, 李媛, 等. Modflow 中关键参数取值对矿井涌水量预测的影响研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(10):247-253.
- [19] 刘谋, 王俊杰, 吴广涛, 等. 矿井涌水量预测及其对沙漠植被的影响[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3):65-75.
- [20] 罗奇斌, 赵宝峰, 毛旭阁, 等. 基于数值模拟方法的煤矿开采涌水量预测分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(6):1100-1110.
- [21] 孙刚友, 胡清珍, 康钦容, 等. 基于大井法和地下水模型系统数值模拟方法的某矿坑涌水量预测对比分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(21):9024-9031.
- [22] 周全超, 王丹丹, 党志伟, 等. 矿井涌水量预测方法及对比分析-以新疆东沟煤矿为例[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S1):211-220.
- [23] 李建林, 高培强, 王心义, 等. 基于混沌-广义回归神经网络的矿井涌水量预测[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4):149-155.
- [24] 丁莹莹, 尹尚先, 连会青, 等. 基于 SSA-CG-Attention 模型的多因素采煤工作面涌水量预测[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(4):111-119.
- [25] 韦华鹏, 罗奇斌, 康卫东, 等. 基于不同开采方式的煤矿涌水量预测及其环境影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1):21-31.
- [26] 王永国, 王明, 许蓬. 巴彦高勒煤矿 3-1 煤层顶板垮落裂缝带发育特征[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(S1):37-42.
- [27] 徐建国, 赵东良, 贺江辉. 白垩系巨厚砂岩下覆岩离层水涌突机理研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(2):58-63.
- [28] 郑雷雷. 门克庆矿侏罗纪 3-1 煤层开采覆岩破坏发育规律研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [29] 张伟胜. 葫芦素煤矿厚砂岩顶板中厚煤层综采覆岩活动规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [30] 李正杰, 黄锐, 王业征, 等. 深部大采高工作面覆岩“三带”发育高度实测[J]. 中国煤炭, 2018, 44(12):41-45.
- [31] 张智强. 察哈素煤矿导水裂隙带高度探测及发育规律研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(3):36-38.
- [32] 李宏儒, 史久林, 田锦州, 等. 大厚度含水层下厚煤层保水开采研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(12):96-101.
- [33] 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.
- [34] 王鹏飞, 李长洪. 深部开采构造型突水危险性数值模拟分析[J]. 中国矿业, 2022, 31(3):97-105.
- [35] 张发旺, 宋亚新, 赵红梅, 等. 神府-东胜矿区采煤塌陷对包气带结构的影响[J]. 现代地质, 2009, 23(1):178-182.
- [36] 张超, 张宇飞, 孙莹洁, 等. 山西阳泉矿区刘村采煤塌陷机理及数值模拟[J]. 现代地质, 2020, 34(2):289-296.