



移动扫码阅读

王皓,周振方,杨建,等.蒙陕接壤区典型煤层开采地下水系统扰动的定量表征[J].煤炭科学技术,2023,51(7):83-93.

WANG Hao, ZHOU Zhenfang, YANG Jian, *et al.* Quantitative characterization of the disturbance of groundwater system in typical coal seam mining in contiguous area of Inner Mongolia and Shaanxi[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 83-93.

蒙陕接壤区典型煤层开采地下水系统扰动的定量表征

王皓^{1,2,3},周振方^{1,2,3,4},杨建^{1,2,3},赵春虎^{1,2,3},曹煜^{1,2,3},冯龙飞^{1,2,3,5},尚宏波^{1,2,3,5},王甜甜^{1,2,3},王昱同^{1,2,3,5},薛建坤^{1,2,3}

(1.中煤科工西安研究院(集团)有限公司,陕西西安 710054;2.陕西省煤矿水害防治技术重点实验室,陕西西安 710077;

3.陕西省“四主体一联合”黄河流域中段矿区(煤矿)生态环境保护与修复校企联合研究中心,陕西西安 710054;

4.西安科技大学地质与环境学院,陕西西安 710054;5.煤炭科学研究总院,北京 100013)

摘要:生态脆弱区煤矿高强度开采扰动地下水系统,造成水资源损失。选取黄河流域中段蒙陕接壤区东南—西北走向剖面典型浅部开采和深部开采矿井为研究对象,利用覆岩破坏理论分析、数值模拟、井下实测3种方法,并通过周边地质和开采条件相似矿井实测数据对比,综合确定了浅埋复合煤层开采和深埋单一煤层开采导水裂隙带发育高度,根据导水裂隙带与顶板主要含/隔水层空间位置关系,划分出浅埋煤层开采直罗组—志丹群含水层充水模式和深埋煤层开采直罗组含水层充水模式;通过概化不同含水层充水模式地下水流系统,构建了典型煤层开采地下水三维非稳定流数学模型,并利用 Visual Modflow 软件建立了2种工况地下水流数值模型,对接续期2023—2024年工作面开采地下水流场和水资源损失量进行了定量预测,并利用涌水量实测数据验证了模型可靠性。结果显示:受扰动的浅埋区志丹群、直罗组含水层,以及深埋区直罗组含水层地下水呈现向采空区汇集现象的同时,流场也伴随采后煤层顶板二次稳定结构的形成而逐步恢复,但围绕采空区附近,充水含水层地下水流场表现出局部高水力梯度现象;另外,2种采煤工况接续期水资源损失量年均分别达到200万m³和730万m³以上。研究结果为区域水资源损失超前精细控制和矿井水资源化利用提供了参考。

关键词:蒙陕接壤区;扰动模式;导水裂隙带;地下水流场演变;水资源损失

中图分类号:TD32 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2023)07-0083-11

Quantitative characterization of the disturbance of groundwater system in typical coal seam mining in contiguous area of Inner Mongolia and Shaanxi

WANG Hao^{1,2,3}, ZHOU Zhenfang^{1,2,3,4}, YANG Jian^{1,2,3}, ZHAO Chunhu^{1,2,3}, CAO Yu^{1,2,3}, FENG Longfei^{1,2,3,5}, SHANG Hongbo^{1,2,3,5}, WANG Tiantian^{1,2,3}, WANG Yutong^{1,2,3,5}, XUE Jiankun^{1,2,3}

(1. CCTEG Xi'an Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Coalmine Water Hazard Control, Xi'an 710077, China;

3. Shaanxi Engineering Research Center of Mine Ecological Environment Protection and Restoration in the Middle of Yellow River Basin, Xi'an 710054,

China; 4. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

5. China Coal Research Institute, Beijing 100013 China)

Abstract: High-intensity mining of coal mines in ecologically fragile areas disturbs the groundwater system and causes water resources loss. The typical shallow and deep mining mines in the middle section of the Yellow River basin are selected as the research objects, and the development height of the water-conducting fracture zone in the shallow composite coal seam mining and the deep single coal seam mining is comprehensively determined by using the theoretical analysis, numerical simulation of overburden damage and the underground measurement, and the comparison with surrounding mines with similar conditions. According to the spatial location relationship between the water-conducting fracture zone and the main roof aquifer/aquiclude, the water filling model of Zhiluo Formation - Zhidan Group

收稿日期:2023-04-04 责任编辑:周子博 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0470

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41807221);陕西省青年科技新星资助项目(人才)(2023KJXX-094);中煤科工集团西安研究院自筹资金顶层设计资助项目(2020XAYDC03)

作者简介:王皓(1981—),男,江苏连云港人,研究员,博士生导师,博士。E-mail: wanghao@cctegxian.com

通讯作者:周振方(1988—),男,河南兰考人,副研究员,博士研究生。E-mail: zhouzhenfang@cctegxian.com

aquifer in shallow coal seam mining and that of Zhiluo Formation aquifer in deep coal seam mining are divided; By generalizing the groundwater flow system of different aquifer water filling modes, the three-dimensional unsteady flow mathematical model of groundwater in typical coal seam mining is constructed, and the numerical model of groundwater flow in two working conditions is established by using Visual Modflow software. The quantitative prediction of groundwater flow field and water resource loss in the mining of the continuous working face is carried out, and the results show that the groundwater from Zhidan Group and Zhiluo Formation aquifers in the disturbed aquifer is converging towards the goaf at the same time, the flow field also gradually recovers with the formation of the secondary stable structure of the roof after mining. Around the goaf, the groundwater flow field shows a local high hydraulic gradient phenomenon; In addition, the average annual water loss of the two coal mining conditions in the continuous period is more than 2 million m^3 and 7.3 million m^3 respectively. The research results provide a reference for the advanced fine control of regional water resources loss and the utilization of mine water resources.

Key words: Shaanxi and Inner Mongolia contiguous area; disturbance model of groundwater system; water conducting fracture zone; evolution of groundwater flow field; loss of groundwater resources

0 引言

蒙陕接壤区聚集全国最具开发潜力的神东、陕北两大煤炭基地,煤层赋存条件好、地质构造简单,2022年煤炭产量近13亿t,占全国煤炭总产量的28.5%,在我国能源保供、促进局地经济高质量发展中发挥了“顶梁柱”、“定盘星”作用。但是,密集分布的矿井群开采高强度扰动顶板地下水系统,大量地下水涌入矿井,加剧了黄河流域中段区域水资源紧张形势^[1]。

以往学者普遍关注区内浅埋煤层开采松散层漏失问题,就松散层水保护问题开展了较多的研究工作,提出了一些卓有成效的解决策略,王双明、范立民团队^[2-3]系统提出了“保水采煤”科学思想,顾大钊团队^[4-5]构建了导储用“煤矿地下水库”技术体系,董书宁团队^[6-9]研发了有针对性的帷幕保水技术等,李文平团队^[10-11]研究了采煤保水关键层工程地质特征,提出保水采煤矿井等级类型划分方法,一定程度上推动了浅埋煤层开采松散层水资源保护技术的进步;在聚焦水资源扰动定量评价方面,虎维岳和赵春虎^[12-14]提出地下水环境系统概念,并利用地下水三维数值仿真技术定量评价了浅埋煤层开采对松散层含水层水位、水量的影响;侯恩科等^[15-16]、靳德武等^[17-18]、杨建等^[19]、王甜甜等^[20]、周振方等^[21]、王昱同等^[22]从水害防治和水文地球化学角度研究了浅埋煤层开采过程涌水量、矿井水水质演化的定量计算。随着开采深度或开采层数的不断增加,煤层开采导水裂隙带发育特征发生变化,垂向上扰动含水层改变或层数更多、影响程度更大,以往开展的浅埋单一煤层开采顶板含水层扰动与当前多煤层重复扰动、深部煤层开采扰动顶板充水模式均有所不同,聚焦盆地边缘浅部至深部煤层开采顶板水扰动程度之间

差异的大尺度剖面对比研究还较少。

通过系统分析蒙陕接壤区煤层顶板大尺度水文地质条件,研究主采煤层开采覆岩导水裂隙带与主要充水含水层交叉关系,划分不同的顶板充水模式,选择典型矿井,建立不同工况地下水扰动数值仿真模型,定量分析地下水流场演变和水量漏失速度。形成系统的地下水扰动定量表征方法,为区域地下水资源保护提供技术参考。

1 研究区概况

蒙陕接壤区位于鄂尔多斯聚煤盆地北部,划分有榆神、榆横、神府等煤矿区(图1),地势总体由西北向东南降低,受到水蚀、风蚀作用影响,区内地形存在明显起伏,高程总体在1000~1500m(图2)。研究区地层由上至下依次发育有第四系、新近系、白垩系、侏罗系,三叠系延长组为基底,地表多被第四系萨拉乌苏组松散层和全新统风积沙所覆盖,渗透性好,为大气降水入渗起到良好的导渗条件。侏罗系延安组为主要含煤地层,目前广泛开采的煤层主要是2煤组和3煤组,埋深从100m以浅至600m以深不等。区域广泛发育的侏罗系安定组和新近系红土层一般认为是相对稳定的隔水层,但存在局部缺失的情况;第四系松散层、白垩系志丹群以及侏罗系直罗组具有相对较好的富导水性,是煤层开采主要的充水水源。

研究矿井分别地处榆神矿区(A矿)和新街矿区(B矿)。A矿主要为浅部2煤组和3煤组复合煤层开采,开采深度200~250m,B矿主要为深部3煤组单一煤层开采,开采深度600~650m。

2 地下水系统扰动模式划分

煤层埋深和开采煤层的不同决定了覆岩地下水

系统扰动程度的差异,因此,确定煤层开采覆岩导水裂隙带发育高度,分析导水裂隙带与顶板主要含/隔

水层空间交叉关系,划分煤层开采地下水系统扰动模式,是定量表征地下水系统扰动程度的基础。

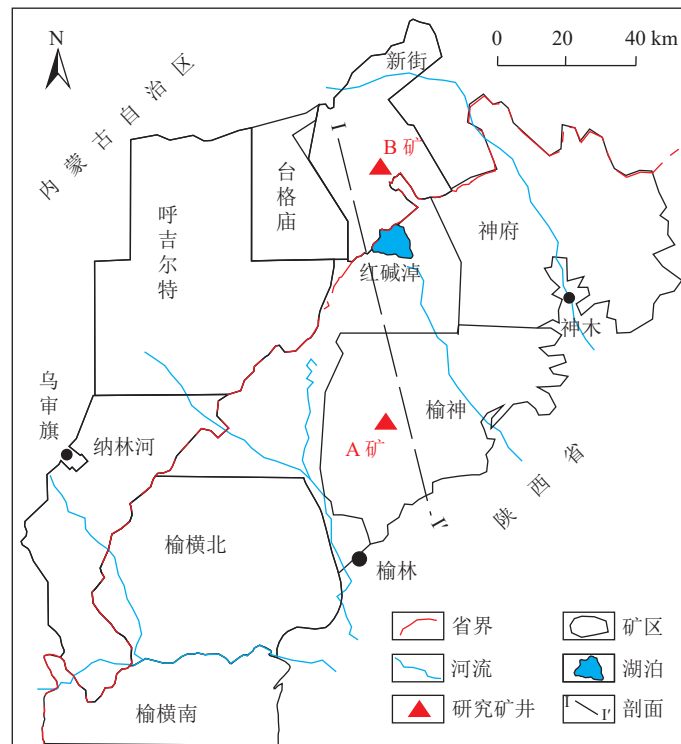


图1 蒙陕接壤区煤矿区划分及研究矿井位置

Fig.1 Coal mining areas division and location in the contiguous area of Inner Mongolia and Shaanxi

2.1 导水裂隙带发育高度确定

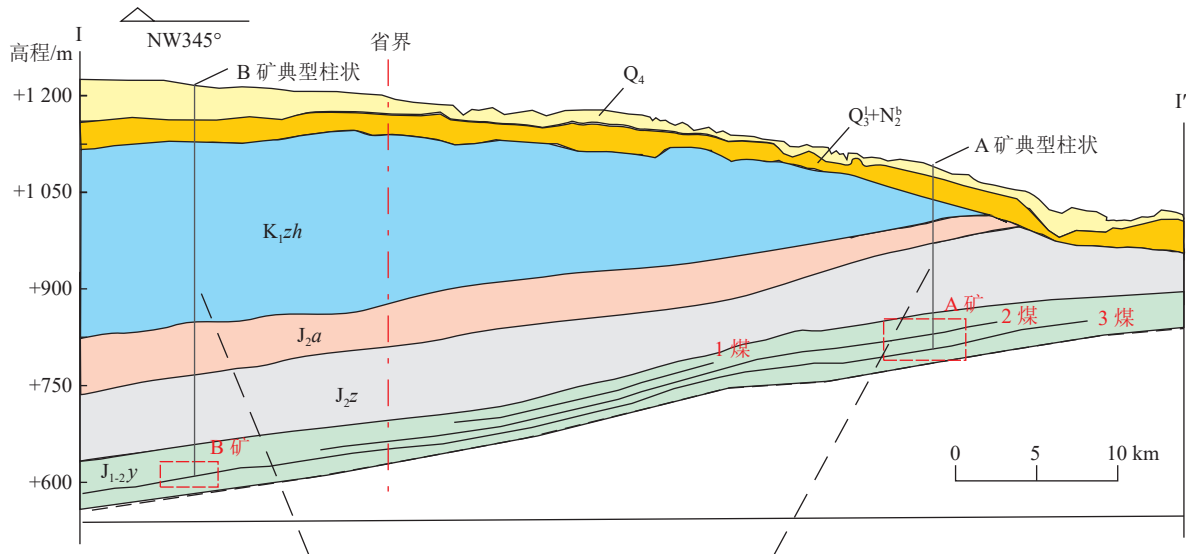
选择 A 矿和 B 矿典型工作面, A 矿 2 煤组采厚 4.0 m、3 煤组采厚 6.0 m, B 矿 3 煤组采厚 6.0 m, 利用《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》^[23] 经验公式进行了理论计算, 利用 FLAC^{3D} 软件进行了数值模拟, 确定覆岩塑性破坏区为导水裂隙带发育范围, 并获取了导水裂隙带现场实测数据, 通过比选, 确定 A 矿和 B 矿典型工作面导水裂隙带发育高度, 工作面倾向导水裂隙带稳定发育特征如图 3 所示; 另外, 为进一步验证研究矿井导水裂隙带发育高度优选结果的可靠性, 收集了周边开采条件和地质条件相对类似的矿井, 通过分析导水裂隙带发育高度和裂采比, 综合分析导水裂隙带发育高度(表 1)。

其中 A 矿为 2 煤组和 3 煤组复合煤层重复开采, 理论计算 2 煤组开采导水裂隙带最大发育高度 70.0 m, 2 煤组和 3 煤组复合开采导水裂隙带最大发育高度 104.9 m, FLAC^{3D} 软件模拟 2 煤组开采导水裂隙带发育高度 70.0 m, 2 煤组和 3 煤组复合开采导水裂隙带发育高度 124.9 m, 井下仰孔注水侧漏法实测 A 矿 2 煤组开采导水裂隙带发育高度 71.5 m, 2 煤组和 3 煤组复合开采导水裂隙带发育高度未实测。

参考周边矿井, 均存在近距离煤层开采覆岩重复扰动现象, 重复开采导水裂隙带发育高度最大不超过 135.3 m, 不沟通第四系松散层。根据以上计算结果推断 A 矿 2 煤组和 3 煤组复合开采导水裂隙带发育高度在 124.9 m 是可信的。

B 矿主采单一 3 煤组, 理论计算 3 煤组开采导水裂隙带最大发育高度 83.5 m, FLAC^{3D} 软件模拟 3 煤组开采导水裂隙带发育高度 105.0 m, 井下仰孔注水侧漏法实测高度 110.3 m, 裂采比 18.4, 导水裂隙带最大波及直罗组含水层或向上继续沟通安定组隔水层, 不沟通白垩系志丹群含水层。参考周边矿井, 3 煤组开采裂采比分别为 31.9 和 22.1, 按照最大裂采比计算, B 矿开采 3 煤层顶板导水裂隙带发育高度为 110.3 m。

另外, 薛建坤等^[24] 收集了鄂尔多斯盆地大量导水裂隙带实测资料, 拟合出相应计算经验公式, 综合确定的 A、B 矿导水裂隙带发育高度与之相符, 最终确定 A 矿 2 煤组和 3 煤组复合开采导水裂隙带发育高度为 124.9 m, B 矿 3 煤组开采导水裂隙带发育高度为 110.3 m。



地层年代		岩性 煤层	地层 柱状 含/隔 水层	层厚/m
第四系	Q ₄	黄土 亚砂		0~33.72 7.73
新近系 上新统	N ₂	粉砂岩		0~5.23
白垩系 下统 洛河组 志丹群	K _{1zh}	细砂岩		136.11~731.19 429.09
		中砂岩		
		粗砂岩		
		中砂岩		
侏罗系 中统 安定组	J _{2a}	砂质泥岩		2.19~196.58
		粉砂岩		36.22
侏罗系 中统 直罗组	J _{2z}	中砂岩		41.40~190.92 118.68
		粗砂岩		
		砂质泥岩		
		粗砂岩		
侏罗系 中下统 延安组	J _{1-2y}	粉砂岩		21.19 (均厚) 6.22 (均厚)
		细砂岩		
		砂质泥岩		
		3煤组		

地层年代		岩性 煤层	地层 柱状 含/隔 水层	层厚/m
第四系	Q ₄	黄土 亚砂土		0~71.96 17.54
新近系 上新统	N ₂	粉砂岩		0~39.18 14.86
白垩系 下统 志丹群	K _{1zh}	细砂岩		0~115.16 33.65
		中砂岩		
		粗砂岩		
		细砂岩		
侏罗系 中统 安定组	J _{2a}	砂质泥岩		0~116.00
		粉砂岩		26.76
侏罗系 中统 直罗组	J _{2z}	中砂岩		0~112.45 38.35
		粗砂岩		
		砂质泥岩		
		粗砂岩		
侏罗系 中下统 延安组	J _{1-2y}	粉砂岩		4.00 (均厚) 26.00 (均厚) 6.00 (均厚)
		2煤组		
		细砂岩		
		3煤组		

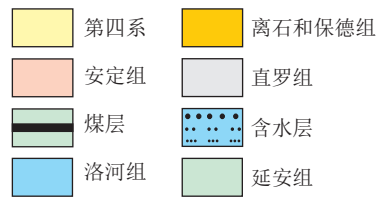


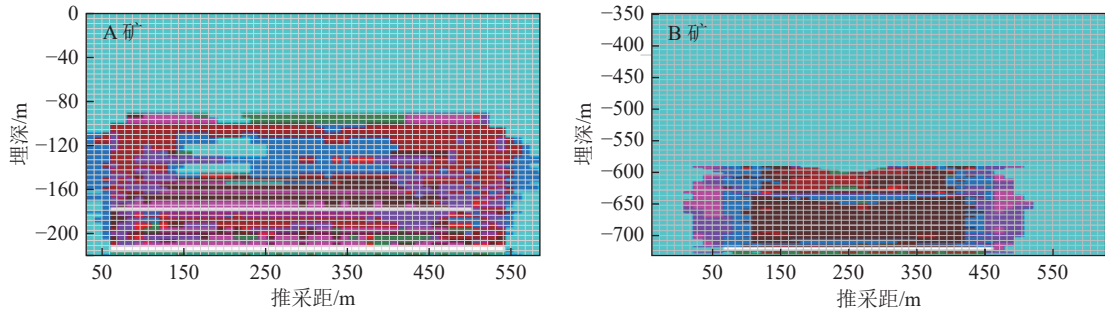
图2 蒙陕接壤区典型水文地质剖面图及水文地质综合柱状简图

Fig.2 Typical hydrogeological profile of the border area between Mongolia and Shaanxi

2.2 含/隔水层结构扰动模式划分

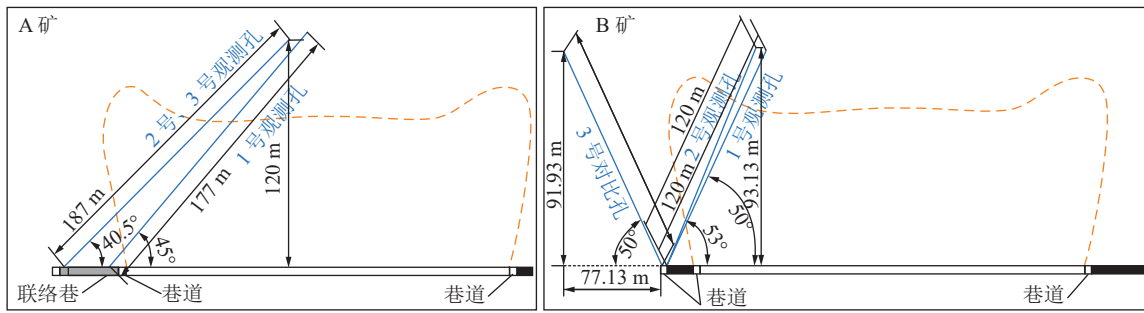
根据主采煤层开采导水裂隙带发育高度与上覆主要含/隔水层的空间接触关系, A矿浅埋复合煤层开采将贯穿直罗组含水层, 突破安定组相对隔水层顶界面, 进入白垩系志丹群含水层, B矿深埋单一煤

层开采将直接沟通直罗组砂岩含水层, 但导水裂隙带包络线上边界未进入安定组相对隔水层(图4), 据此, 将A、B两矿主采煤层开采充水类型分别划分为直罗组-志丹群砂岩复合含水层充水型和直罗组砂岩单一含水层充水型2种类型。



注：覆岩扰动顶板塑性破坏模拟均建立了 1:1 模型，其中 A 矿 2 煤组和 3 煤组工作面采宽均为 300 m，模拟 2 煤组采厚 4.0 m，3 煤组采厚 6.0 m，构建模型尺寸为 600 m (长)×400 m (宽)×220 m (高)；B 矿 3 煤组工作面采宽为 300 m，模拟 3 煤组采厚 6.0 m，构建模型尺寸为 600 m (长)×400 m (宽)×350 m (高)。

(a) 导水裂隙带发育高度数值法预测结果



(b) 导水裂隙带发育高度实测结果

图 3 工作面倾向导水裂隙带稳定发育特征

Fig.3 Stable development characteristics of inclined water-conducting fracture zone of working face

表 1 典型工作面煤层开采导水裂隙带发育高度

Table 1 Development height of water-conducting fracture zone in coal seam mining of typical working face

研究矿井	开采煤层	煤层采厚/m	导水裂隙带高度/m				裂采比	
			理论值	模拟值	实测值	优选值		
A 矿	2煤组	4.0	67.7	70.0	70.0	71.5	71.5	17.9
	下行开采3煤组	6.0	80.3	104.9	124.9	—	124.9	—
A1 矿	2煤组	4.6	70.1	74.3	—	64.4	74.3	14.0
	下行开采3煤组	2.2	75.8	88.2	—	95.2	95.2	—
A2 矿	2煤组	7.8	77.6	93.8	—	87.8	93.8	11.2
	下行开采3煤组	2.8	80.3	104.9	—	135.3	135.3	—
B 矿	3煤组	6.0	74.1	83.5	105.0	110.3	110.3	18.4
B1 矿	3煤组	4.4	69.3	72.9	—	140.5	140.5	31.9
B2 矿	3煤组	4.0	67.7	70.0	—	132.9	132.9	22.1

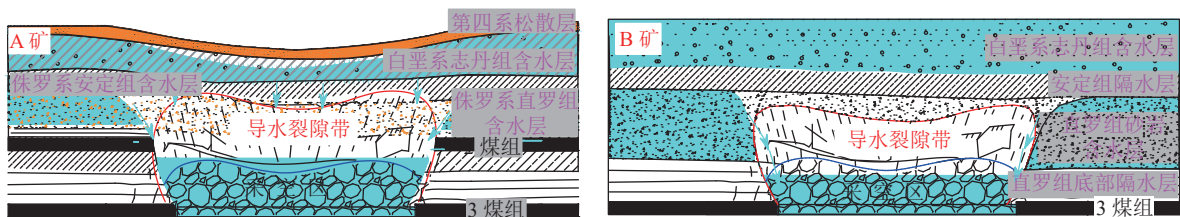


图 4 主采煤层开采顶板含水层扰动模式示意

Fig.4 Schematic of disturbance mode of roof aquifer in mining coal seam

3 开采扰动地下水流数值模型构建

为进一步直观和定量化研究2种典型矿井开采地下水流场扰动特征,根据主采煤层开采覆岩含水层扰动模式,构建了A、B两个矿井地下水流概念、数学和数值模型,并通过模型率定,形成可靠的数值预测模型。

3.1 概念模型构建

根据井田地质构造展布特征、井田水文地质条件,对A、B两矿开采地下水系统进行概化。其中,含/隔水层岩层结构和地下水补径排特征相对清晰,由于研究区地质构造、地表水体不发育,自然稳定隔水或稳定补给边界不存在,模型四周水平边界均为

$$\left\{ \begin{array}{l} S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \varepsilon \quad (x, y, z) \in \Omega, t \geq 0 \\ \mu \frac{\partial h}{\partial t} = K_x \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial h}{\partial z} (K_z + p) + p \quad (x, y, z) \in \Gamma_0, t \geq 0 \\ h(x, y, z, t)|_{t=0} = h_0(x, y, z) \quad (x, y, z) \in \Omega, t = 0 \\ K_n \left. \frac{\partial h}{\partial n} \right|_{\Gamma_1} = q(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ K_n \left. \frac{\partial h}{\partial n} \right|_{\Gamma_2} = 0 \quad (x, y, z) \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{array} \right.$$

式中: Ω 为研究区域; K_x, K_y, K_z 分别为 x, y, z 方向的渗透系数, m/d; $h(x, y, z, t)$ 为 t 时刻的水位标高, m; $h_0(x, y, z)$ 为初始水位标高, m; S_s 为贮水率(1/m); μ 为给水度; ε 为源汇项, 1/d; p 为潜水面上的降水入渗量和蒸发量, 河流、灌溉入渗量, m/d, 根据前文分析, 降水入渗、蒸发作用对新近系隔水层以下的地下水系统影响不大, 模型计算过程不再纳入; Γ_0 为渗流区域的上边界, 即地下水的自由表面; Γ_1 为渗流区域的流量边界; Γ_2 为渗流区域的零流量边界; K_n 为边界法向方向的渗透系数, m/d; q 为第二类边界的水流通量, m/d。

3.3 数值模型构建

1)地质模型剖分。根据A、B井田勘探钻孔资料、地下水流特征和煤矿开采情况,将2个研究矿井(模拟区)垂向地层均分为6个层段,其中A矿第一层是第四系含水层,第二层是白垩系志丹群含水层,第三层是安定组隔水层,第四层是直罗组含水层,第五层是直罗组含水层底至2煤组间的延安组含水层,第六层是2煤组至3煤组底;B矿第一层是第四系含水层,第二层是志丹群含水层,第三层是安定组隔水层,第四层是直罗组含水层,第五层是直罗底至31煤层间的延安组含水层;第六层是31煤层底板(图5)。

开放边界,与井田外含水系统存在密切的水力联系,由于煤层开采一般造成明显的垂向水量交换,模型垂向顶界面均选择地表;研究层段最下部均选择了3煤组,据此,确定模型垂向底界面为3煤组底板隔水层。

3.2 数学模型构建

根据A、B矿井开采水文地质概念模型构建结果,模拟区含水岩组空间分布存在差异,且计算时段处于开采阶段,地下水已形成降落漏斗,水力坡度较大,水流汇集漏斗中心,具有显著的三维非稳定地下水流运动特征,依据地下水渗流连续性方程和达西定律,可用下列偏微分方程和定解条件组成的数学模型对研究区地下水运动进行描述。

根据层段划分结果,利用Visual Modflow软件进行各层面节点剖分,其中,A矿在平面上剖分节点 117×88 个,每个单元格的长宽基本相等,约为100 m,整个模型共计剖分单元10 296个;B矿在研究区平面上剖分节点 92×87 个,每个单元格的长宽基本相等,约为200 m,整个模型共计剖分单元8 004个。对于水位观测孔位置,进行加密剖分,以提高计算精度。

2)参数赋值与模型率定。水文地质参数是表征含水介质储水、释水能力以及地下水渗流速度的指标。因此,水文地质参数选取对模型计算至关重要,其合理与否直接影响到模型的计算精度和结果的可靠性。由于研究矿井以往开展的水文地质工作相对有限,且仅有的水文地质钻孔也仅仅对地表松散层或直罗组含水层进行了水文地质试验,获取的水文地质参数十分有限,周边煤矿开展的水文地质试验多是对渗透系数和单位涌水量两种参数的获取,模型计算需要的给水度和释水系数缺乏实测,不足以支撑地下水数值模型的构建。根据《地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范》(GB50307—1999)^[25],文章对相应岩性岩层赋值(表2、表3、表4)。

根据水文地质概念和数学模型所建立的数值模

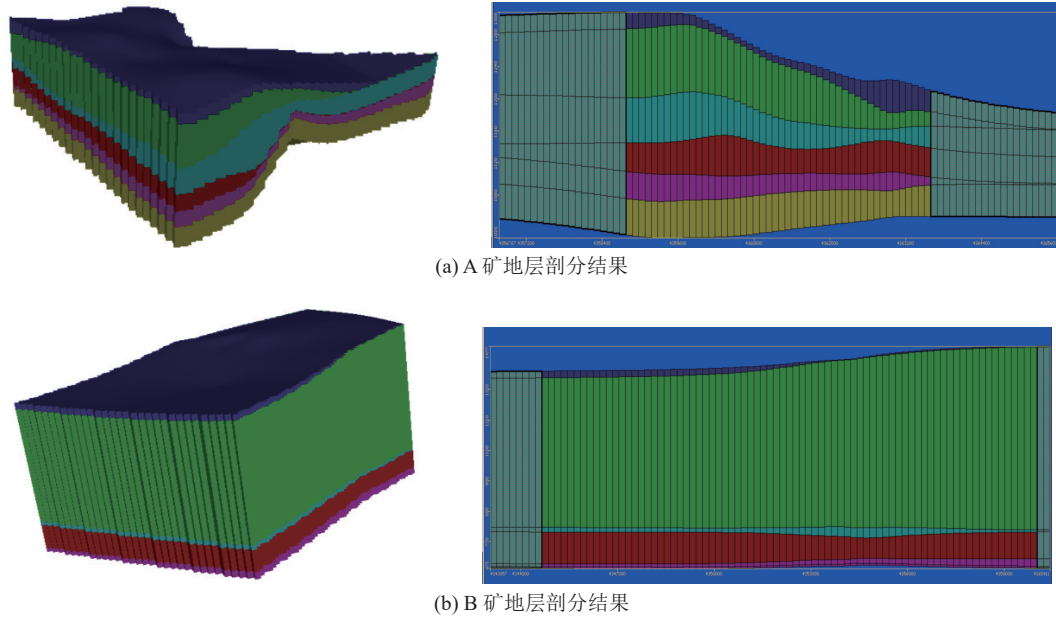


图 5 模型地层剖分结果

Fig.5 Model stratigraphic dissection results

表 2 不同岩性给水度经验值

Table 2 Empirical value of water yield of different lithology

岩性	给水度	岩性	给水度
黏土	0.02 ~ 0.035	细砂	0.08 ~ 0.11
亚黏土	0.03 ~ 0.045	中细砂	0.085 ~ 0.12
亚砂土	0.035 ~ 0.06	中砂	0.09 ~ 0.13
黄土	0.025 ~ 0.05	中粗砂	0.10 ~ 0.15
黄土状亚黏土	0.02 ~ 0.05	粗砂	0.11 ~ 0.15
黄土状亚砂土	0.03 ~ 0.06	黏土胶结砂岩	0.02 ~ 0.03
粉砂	0.06 ~ 0.08	裂隙灰岩	0.08 ~ 0.10
粉细砂	0.07 ~ 0.10	砂卵石	0.13 ~ 0.20

注：参数引自《地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范》^[25]。

表 3 不同岩性渗透系数经验值

Table 3 Empirical value of permeability coefficient of different lithology

岩性	渗透系数/(m·d ⁻¹)	岩性	渗透系数/(m·d ⁻¹)
黏土	0.001 ~ 0.054	细砂	5 ~ 15
亚黏土	0.02 ~ 0.5	中砂	10 ~ 25
亚砂土	0.2 ~ 1.0	粗砂	20 ~ 50
粉砂	1 ~ 5	砂砾石	50 ~ 150
粉细砂	3 ~ 8	卵石	80 ~ 300

注：参数引自《地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范》^[25]。

型, 应反映实际流场的特点。为了获得可靠的预测模型, 必须进行模型率定。利用井田内长观孔水位

表 4 不同土层岩性释水系数经验值

Table 4 Empirical value of specific water release coefficient of different soil layers

土层岩性	释水系数	土层岩性	释水系数
塑性黏土	$1.9 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^{-4}$	密实砂层	$1.9 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-6}$
固结黏土	$2.4 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-4}$	密实砂砾	$9.4 \times 10^{-6} \sim 4.6 \times 10^{-6}$
稍硬黏土	$1.2 \times 10^{-4} \sim 8.5 \times 10^{-4}$	裂隙岩层	$1.9 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-7}$
松散砂层	$9.4 \times 10^{-5} \sim 4.6 \times 10^{-5}$	固结岩层	3.0×10^{-7} 以下

注：参数引自《地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范》^[25]。

观测数据与模型运行的计算结果进行比较分析, 以确认模型的正确性和可靠性。

A、B 两矿地下水流数值模型分别选择 A1 和 B1 直罗组观测孔实测水位数据进行率定, 经反复多次调参计算, 取得了较好的率定效果(图 6)。

4 接续期开采地下水流场和涌水量预测

4.1 接续期开采地下水流场演变特征

利用率定好的地下水流数值模型对 A、B 两个矿井 2023—2024 年接续开采期间主要受影响含水层地下水流场进行了模拟(图 7、图 8)。可以看出, 围绕接续开采工作面附近, 形成了较为明显的地下水降落漏斗, 漏斗中心区水头基本降至开采煤层标高。随着接续工作面更替, 已采工作面顶板围岩应力和岩层结构重分布, 达到新的平衡态, 采空区及覆岩裂隙空间地下水水头出现逐步恢复的现象。

A 矿矿志丹群和直罗组含水层地下水降落漏斗

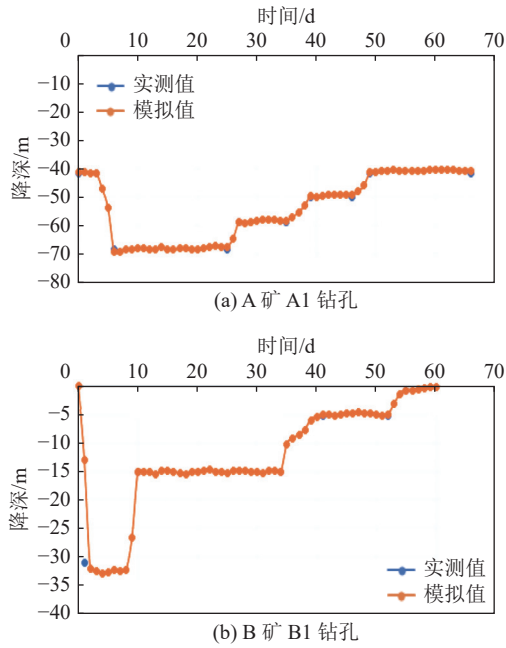


图6 A矿和B矿主采煤层开采地下水流数值模型率定结果
Fig.6 Numerical model calibration results of underground water flow in A and B coal mine

平面位置上表现出明显的差异,主要因为井田地层表现为由东向西埋深增加,地层逐步变厚,井田西南部2煤组和3煤组开采导水裂隙带发育未波及志丹群含水层,但是井田东部安定组缺失,志丹群含水层和直罗组含水层直接接触,具有较好的水力联系,表现为志丹群含水层地下水由西向东径流,补给直罗组含水层。

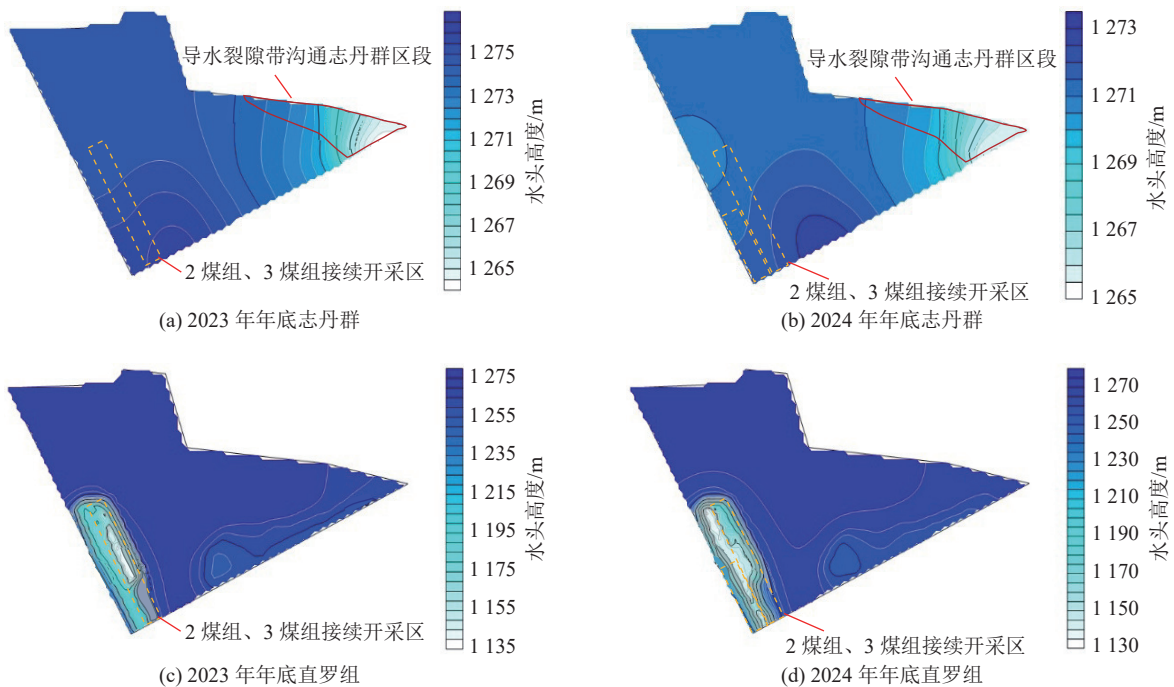


图7 A矿志丹群和直罗组含水层地下水流场演变特征

Fig.7 Evolution characteristics of groundwater flow field in Zhidan Group and Zhiluo Group aquifers of A Mine

与A矿相比,B矿主采煤层埋深大,含水层水头高,漏斗中心区水头降深达到350 m以上,地下水表现为由井田四周向采空区大井运动,另外,围绕采空区形成的高水力梯度区半径约为工作面采宽的2.5倍,由此向外水力梯度快速降低,指示区内直罗组含水层具有渗透性较差的特征,解释了井田内不同水文观测孔水位降深存在百米级差异的原因,与赵春虎等^[26]研究结果是一致的。

4.2 接续期开采矿井涌水量预测

矿井涌水量的组成主要分为采动工作面涌水、老采空区残余涌水、巷道掘进滴淋水3个部分。根据A、B两矿多年涌水量观测结果,老采空区残余涌水量和巷道掘进滴淋水长期保持稳定,矿井涌水量预测可利用长期观测数据,采动工作面涌水量则是影响矿井涌水量变化的主要因素,选择利用上述率定后的数值模型对2023—2024年接续工作面进行预测(表5)。

按照接续开采时段,叠加采动工作面涌水量预测结果,老采空区残余涌水和巷道掘进滴淋水长期观测结果3个部分涌水量,即可获得A、B矿2023—2024年接续开采期间矿井涌水量预测结果(表6),利用2023年1—4月份矿井尺度涌水量实际观测结果进行预测准确度验证,准确度分别为81.3%和78.0%,表明预测结果可靠性较好。此结果同时也定量表征了两矿开采过程对顶板主要含水层水资源的影响程度。

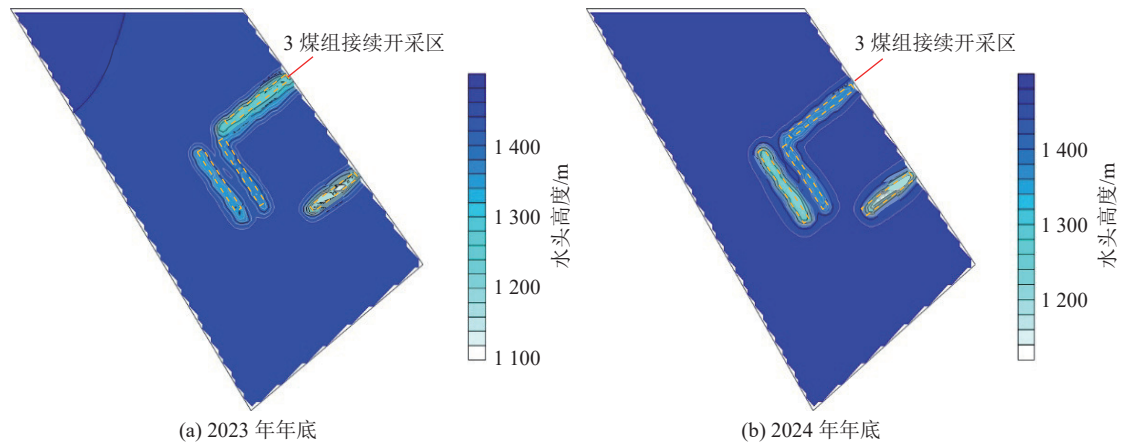


图 8 B 矿直罗组含水层地下水流场演变特征

Fig.8 Evolution characteristics of groundwater flow field in Zhiluo Formation aquifer of B mine

表 5 接续期采动工作面涌水量预测结果

Table 5 Prediction results of water inflow of mining face in the continuous period

研究矿井	年份	接续开采工作面	预测涌水量/(m ³ ·h ⁻¹)
A矿	2023	A01	107.9
	2024	A02	212.7
B矿	2023	B01	164.3
		B02	164.7
		B03	158.1
	2024	B04	188.6
		B02	164.7
	B03	158.1	

表 6 接续期矿井涌水量预测结果及验证

Table 6 Prediction and verification of mine water inflow during the continuation period

研究矿井	年份	涌水量/(m ³ ·h ⁻¹)				2023年 1—4月矿井 观测均值
		采动工作面 预测值	老采空区 残余经验值	掘进巷 道经验值	矿井 预测值	
A矿	2023	107.9	130.0	237.9	193.4	
	2024	212.7	130.0	342.7	—	
B矿	2023	487.1	268.0	79.0	834.1	650.7
	2024	511.4	268.0	79.0	858.4	—

注：采动工作面涌水量预测结果来源于A矿和B矿接续工作面数值计算，老采空区涌水量取值原因主要是近3 a老采空区涌水量基本不随时间和采空区数量变化而发生明显变化，掘进巷道涌水量也基本保持稳定，与开采长度、区域降水无明显关系。

根据计算，A 矿 2023—2024 年接续工作面开采产生的矿井涌水量，换算全年产生水资源损失分别为 207.6 万 m³ 和 300.2 万 m³，主要来源于顶板侏罗纪直罗组砂岩含水层和白垩纪志丹群砂岩含水层；B

矿接续工作面开采全年水资源损失分别为 730.7 万 m³ 和 751.9 万 m³，主要来源于顶板侏罗纪直罗组砂岩含水层。

5 结 论

1) 构建了适用于蒙陕接壤区典型煤层开采地下水系统扰动程度定量刻画的方法体系：①划分地下水系统扰动模式；②构建不同扰动模式地下水模拟数值模型；③定量计算开采扰动地下水流场变化特征，预测接续开采期矿井涌水量，确定水资源损失量。

2) 根据煤层赋存特征、煤层顶板主要含/隔水层展布特征和开采现状，通过多种方法综合分析了 A 矿浅埋 2 煤组和 3 煤组复合开采导水裂隙带发育高度与主要含/隔水层空间交叉关系，划分出顶板直罗组-志丹群砂岩复合含水层充水模式；多种方法综合分析了 B 矿深埋 3 煤组单一开采导水裂隙带发育高度与主要含/隔水层空间交叉关系，划分出直罗组砂岩含水层充水模式。

3) 通过概化不同含水层充水模式地下水流系统，构建了相应的地下水三维非稳定流数学模型，利用 Visual Modflow 软件对 A、B 矿典型煤层开采扰动地下水系统概念模型进行地质体建模，通过区域地质体网格剖分、水文地质参数赋值与率定等，得到了准确可靠的开采扰动地下水流数值模型。

4) 利用率定后的数值模型预测了 A、B 矿接续 2023—2024 年工作面粉采期间直罗组含水层和志丹群含水层地下水流场变化特征和水资源损失量，并利实测涌水量数据验证了模型的可靠性，其中，煤层开采均造成区域地下水向采空区汇集效应，开采结束后，有逐步水位恢复的现象，围绕采空区附近，地下

水流场表现出局部高水力梯度现象;预测 A 矿 2023、2024 年接续开采水资源损失量分别为 207.6 万 m^3 和 300.2 万 m^3 , 相应 B 矿水资源损失量分别为 730.7 万 m^3 和 751.9 万 m^3 。

参考文献(References):

- [1] 曾一凡, 刘晓秀, 武强, 等. 双碳背景下“煤-水-热”正效协同共采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 538-550.
ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, *et al.* Theory and technical conception of coal-water-thermal positive synergistic co-extraction under the dual carbon background[J]. Journal of China coal society, 2023, 48(2): 538-550.
- [2] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 7-14.
WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Limin, *et al.* Study on overburden aquiclude and water protection mining regionalization in the ecological fragile mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 7-14.
- [3] 范立民, 孙强, 马立强, 等. 论保水采煤技术体系[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 196-204.
FAN Limin, SUN Qiang, MA Liqiang, *et al.* Technological system of water-conserving coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 196-204.
- [4] 顾大钊, 李井峰, 曹志国, 等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3079-3089.
GU Dazhao, LI Jingfeng, CAO Zhiguo, *et al.* Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3079-3089.
- [5] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239-246.
GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239-246.
- [6] 董书宁, 柳昭星, 郑士田, 等. 基于岩体宏细观特征的大型帷幕注浆保水开采技术及应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 1137-1149.
DONG Shuning, LIU Zhaoxing, ZHENG Shitian, *et al.* Technology and application of large curtain grouting water conservation mining based on macroscopic and mesoscopic characteristics of rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 1137-1149.
- [7] 董书宁, 杨志斌, 姬中奎, 等. 神府矿区大型水库旁烧变岩水保水开采技术研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 709-717.
DONG Shuning, YANG Zhibin, JI Zhongkui, *et al.* Study on water preserved mining technology of burnt rock aquifer beside the large reservoir in Shenfu mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 709-717.
- [8] 董书宁, 姬亚东, 王皓, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2367-2375.
DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, *et al.* Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2367-2375.
- [9] 郭小铭, 董书宁. 深埋煤层开采顶板基岩含水层渗流规律及保水技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 804-811.
GUO Xiaoming, DONG Shuning. Seepage law of bedrock aquifer and water-preserved mining technology in deep coal seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 804-811.
- [10] 李文平, 王启庆, 李小琴. 隔水层再造——西北保水采煤关键隔水层 N_2 红土工程地质研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 88-97.
LI Wenping, WANG Qiqing, LI Xiaoqin. Reconstruction of aquifuge: The engineering geological study of N_2 laterite located in key aquifuge concerning coal mining with water protection in northwest China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 88-97.
- [11] 李文平, 王启庆, 刘士亮, 等. 生态脆弱区保水采煤矿井(区)等级类型[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 718-726.
LI Wenping, WANG Qiqing, LIU Shiliang, *et al.* Grade types of waterpreserved coal mining coalmines in ecologically fragile area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 718-726.
- [12] 虎维岳, 赵春虎. 蒙陕矿区地下水环境系统及采掘扰动[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(2): 85-89.
HU Weiyue, ZHAO Chunhu. Groundwater environment system and mining disturbance in coal mining area of Shaanxi-Inner Mongolia[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(2): 85-89.
- [13] 赵春虎, 虎维岳, 靳德武. 西部干旱矿区采煤引起潜水损失量的定量评价方法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 169-174.
ZHAO Chunhu, HU Weiyue, JIN Dewu. Method of quantitative evaluation on amount of groundwater inrush from unconfined aquifer caused by mining disturbance in the arid area of Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 169-174.
- [14] 赵春虎, 靳德武, 李智学, 等. 陕北榆神矿区煤层开采顶板涌水规律分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 523-533.
ZHAO Chunhu, JIN Dewu, LI Zhixue, *et al.* Analysis of overlying aquifer water inrush above mining seam in Yushen Mining Area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 523-533.
- [15] 侯恩科, 车晓阳, 龙天文, 等. 浅埋煤层地表沟道采动裂缝涌水量预测方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4154-4162.
HOU Enke, CHE Xiaoyang, LONG Tianwen, *et al.* Prediction method of water inrush from ground cracks in shallow buried seams[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 4154-4162.
- [16] 侯恩科, 席慧琴, 文强, 等. 基于GMS的隐伏火烧区下煤层开采工作面涌水量预测[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2482-2492.
HOU Enke, XI Huiqin, WEN Qiang, *et al.* Prediction of water inflow volume in the coal mining workforce below the concealed fire area based on GMS[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(5): 2482-2492.
- [17] 靳德武, 周振方, 赵春虎, 等. 西部浅埋煤层开采顶板含水层水量损失动力学过程特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 690-700.
JIN Dewu, ZHOU Zhenfang, ZHAO Chunhu, *et al.* Dynamics process analysis of groundwater quantity loss of roof aquifer with shallow seam mining in Western China[J]. Journal of China Coal

- Society, 2019, 44(3): 690–700.
- [18] 靳德武, 刘英锋, 王甜甜. 巨厚砂岩含水层下厚煤层综放减水开采技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 88–95.
JIN Dewu, LIU Yingfeng, WANG Tiantian. Water-reducing mining technology for fully mechanized top coal caving mining in thick coal seams under ultra thick sandstone aquifer[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 88–95.
- [19] 杨 建, 王 皓, 梁向阳, 等. 鄂尔多斯盆地北部深埋煤层工作面涌水量预测方法[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 185–191.
YANG Jian, WANG Hao, LIANG Xiangyang, *et al.* Water inflow forecasting method of deep buried coal working face in northern Ordos Basin, China[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 185–191.
- [20] 王甜甜, 薛建坤, 尚宏波, 等. 蒙陕接壤区矿井水中氟的污染特征及形成机制[J]. 煤炭学报, 2022, 47(11): 4127–4328.
WANG Tiantian, XUE Jiankun, SHANG Hongbo, *et al.* Fluorine pollution characteristics and formation mechanism of mine water in Shaanxi and Inner Mongolia contiguous area[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 4127–4328.
- [21] 周振方, 靳德武, 虎维岳, 等. 煤矿工作面推采采空区涌水双指数动态衰减动力学研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2587–2594.
ZHOU Zhenfang, JIN Dewu, HU Weiyue, *et al.* Double-exponential variation law of water-inflow from roof aquifer in goaf of working face with mining process[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2587–2594.
- [22] 王昱同, 王 皓, 王甜甜, 等. 蒙陕接壤浅埋煤层区矿井水水化学特征及资源化利用研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S2): 423–432.
WANG Yutong, WANG Hao, WANG Tiantian, *et al.* Study on mine water hydrochemical characteristics and resource utilization in shallow buried coal seams in Shaanxi and Inner Mongolia Contiguous Area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S2): 423–432.
- [23] 安监总煤装〔2017〕66号, 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S].
- [24] 薛建坤, 王 皓, 赵春虎, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗系煤田导水裂隙带高度预测及顶板充水模式[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1222–1230.
XUE Jiankun, WANG Hao, ZHAO Chunhu, *et al.* Prediction of the height of water-conducting fracture zone and water-filling model of roof aquifer in Jurassic coalfield in Ordos Basin[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(6): 1222–1230.
- [25] GB50307—1999, 地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范[S].
- [26] 赵春虎, 靳德武, 王 皓, 等. 榆神矿区中深煤层开采覆岩损伤变形与含水层失水模型构建[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2227–2235.
ZHAO Chunhu, JIN Dewu, WANG Hao, *et al.* Construction and application of overburden damage and aquifer water loss model in medium-deep buried coal seam mining in Yushen Mining Area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2227–2235.