



中国煤炭行业知识服务平台 (中国煤炭期刊网)
www.chinacaj.net



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020年热点论文

《煤炭学报》2021年第1期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

榆神矿区浅埋煤层减水开采中预疏放标准确定方法

靳德武^{1,2}, 刘基^{1,2}, 许峰^{1,2,3}, 王振荣⁴, 庞乃勇⁴

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 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. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 4. 神华神东煤炭集团有限责任公司, 陕西 神木 719315)

摘要:榆神矿区地处干旱半干旱地区, 生态环境十分脆弱。疏放水是榆神矿区顶板水害防治的主要手段, 但过度疏放不仅增加矿井排水负担, 而且不利于保护浅层地下水资源。因此, 在确保防治水安全的前提下, 计算预疏放残余水头、确定预疏放阶段和回采阶段第四系松散含水层漏失量, 从而实现总漏失量最小是煤炭减水开采中的重点研究问题之一。以榆神矿区锦界煤矿为例, 在分析井田含、隔水层赋存特征的基础上, 建立了煤层开采的2种充水模式, 并对顶板含水层进行了富水性分区; 以矿井涌水量实测数据为基础, 分析了涌水量变化规律及其构成比例; 采用 Drain 边界刻画多工作面连续回采内边界, 建立了锦界煤矿采掘扰动条件下地下水数值模型, 研究了两种充水模式下预疏放残余水头在不同工况下的第四系松散含水层总漏失量变化规律, 确定了工作面预疏放结束标准。结果表明: 锦界煤矿煤层顶板为典型的沙(层)-土(层)-基(岩)型结构, 主要充水水源为风化基岩水, 主要充水模式为土层未缺失风化基岩充水型及土层缺失风化基岩和松散层混合充水型。采用 GIS 多元信息融合技术划分的井田富水性分区结果显示, 相对强富水区位于井田二盘区局部地段、三盘区和四盘区大部分地段, 与现场实际基本一致。矿井疏放水量与工作面回采残余涌水量曲线变化趋势基本一致, 各占矿井涌水量的50%左右。通过数值模型计算得出两种充水模式下工作面预疏放结束标准为将充水含水层疏放至煤层底板以上15~20 m, 保留一定的残余水头可进行回采, 无需继续疏放。此时, 第四系松散含水层水资源总漏失量最小, 可起到减水采煤的作用。研究成果为榆神矿区浅埋煤层提供了“减水开采”的新思路。

关键词:减水开采; 预疏放; 充水模式; 第四系含水层; 漏失量; 榆神矿区

中图分类号: TD745.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2021)01-0220-10

Method of determining of pre-drainage standard in water-decrease mining of shallow seam in Yushen mining area

JIN Dewu^{1,2}, LIU Ji^{1,2}, XU Feng^{1,2,3}, WANG Zhenrong⁴, PANG Naiyong⁴

(1. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710054, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Coalmine Water Hazard Control, Xi'an 710077, China; 3. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 4. Shenhua Shendong Coal Group Corporation Limited, Shennu 719315, China)

Abstract: Yushen mining area is located in an arid and semi-arid area, and its ecological environment is very fragile. Drainage is the main method to prevent and control the roof water disaster in Yushen mining area. Excessive drainage

收稿日期: 2020-12-08 修回日期: 2021-01-08 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YG20.1915

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804100); 国家自然科学基金资助项目(41807221)

作者简介: 靳德武(1966—), 男, 陕西蓝田人, 研究员, 博士生导师, 博士。Tel: 029-81778067, E-mail: jindewu@cctegxian.com

通讯作者: 刘基(1985—), 男, 江西临川人, 副研究员, 博士。Tel: 029-85576730, E-mail: liuji@cctegxian.com

引用格式: 靳德武, 刘基, 许峰, 等. 榆神矿区浅埋煤层减水开采中预疏放标准确定方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 220-229.

JIN Dewu, LIU Ji, XU Feng, et al. Method of determining of pre-drainage standard in water-decrease mining of shallow seam in Yushen mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 220-229.



移动阅读

increases the burden of mine drainage. In addition, it is not conducive to protect the shallow groundwater resource. Therefore, under the prerequisite of preventing and controlling water hazards, it is an important subject in water-decrease mining to calculate the pre-drainage residual water head, and determine the amount of water leakage of Quaternary unconsolidated aquifer during pre-drainage and mining, in order to minimize the amount of water leakage of Quaternary in the working face. Taking Jinjie coal mine as an example in this paper, based on the analysis of the occurrence characteristics of aquifer and aquiclude, two water filling modes of coal mining were established. Furthermore, the water-abundance of roof aquifer was divided. Based on the measured data of mine water inflow, the changing rule and component proportion ratio of water inflow were analyzed. The inner boundary of multiple working faces of continuous mining was described by drain boundary, and the numerical model of groundwater flow under excavation disturbance in Jinjie coal mine was established. The change rule of the amount of water leakage in Quaternary unconsolidated aquifer under different pre-drainage residual water head conditions of two water filling modes was studied, and the pre-drainage ending standard of working face was determined. The result showed that the coal seam roof of Jinjie coal mine was a typical sand-soil-bedrock structure. The main water filling source was entirely consisted of bedrock water. The water filling mode mainly included two modes: the water filling mode of weathered bedrock without soil layer missing, and the water filling mode of weathered bedrock with soil layer missing mixed with unconsolidated formation. The GIS multi-information fusion technology was used to divide the water-abundance of mine field, and the result showed that the relatively strong watery zone in the mine field was located in some sections of the second panel, the third panel and almost all the sections of fourth panel, which was basically consistent with the actual situation on site. The variation trend of drainage water quantity was basically consistent with that of mining water inflow curve on working face, each accounting for 50% of total mine water inflow. By means of numerical model calculation, the pre-drainage ending standard of working face under two water filling modes was determined to drain the water head until water-filled aquifer was 15 to 20 m above the coal seam floor, a certain residual head can be retained for mining without further drainage. By this time, the amount of water leakage in Quaternary unconsolidated aquifer reached the minimum value, which can play a role in reducing water while mining. The research result provides a new idea for "water-decrease mining" for shallow coal seam in Yushen mining area.

Key words: water-decrease mining; pre-drainage; water filling mode; Quaternary aquifer; leakage; Yushen mining area

榆神矿区煤层埋深较浅,其开采普遍受到顶板浅层松散含水层的威胁^[1],采用钻孔进行强降深、大流量超前预疏放是顶板水害防治的主要措施^[2-3]。在特定的地质、水文地质条件下,超前疏放顶板含水层水甚至是惟一的手段^[4]。为确保安全,采前尽可能疏放顶板水,将充水含水层水量和水压均减小到一定程度再进行回采。

针对煤层开采顶板涌水规律,赵春虎等^[5]以榆神矿区为例,采用数值分析方法计算分析了3种涌水模式下的顶板涌水规律。针对顶板疏放水钻孔优化布置,刘基等^[6]以“渗流-管流耦合模型”理论为基础,基于含水层-钻孔间水量交换量,计算分析了不同参数的顶板疏放水钻孔涌水量变化趋势。李永涛和杨建^[7]以蒙陕接壤区纳林河二号矿井为例,分析了顶板预疏放后工作面涌水规律,得出首采工作面涌水量与推采步距呈正相关关系的结论。

前人研究工作多集中在顶板水害防治方面,而对于充水含水层疏降至何种程度才是既经济又安全的

问题则较少涉及,而该问题又是生产中迫切需要解决的问题。如果预疏放水量过大,第四系浅层松散含水层漏失严重,则造成水资源浪费;相反地,预疏放水量过小,则顶板含水层难以疏降至安全水头,存在重大安全隐患。因此,需要开展采前预疏放水工程结束标准研究,使采前预疏放阶段和回采阶段第四系松散含水层总漏失量尽可能小,以实现工作面既采煤又减水的目标。

榆神矿区锦界煤矿主采31煤,回采工艺为机械化一次采全高,导水裂隙带直接发育至富水性相对较强的风化基岩,导致矿井涌水量最大达5 499 m³/h,矿井面临排水负担过重和水资源保护的双重压力。笔者通过分析矿井涌水量主控因素,采用数值模拟手段,通过设计不同的预疏放残余水头,探讨预疏放和回采过程中第四系松散含水层漏失量变化趋势,寻求合理的预疏放结束标准,实现工作面在不同充水模式下第四系含水层漏失量最小的减水目标。

1 研究区概况

锦界煤矿地处陕西省神木市境内,位于榆神矿区二期规划区西北部,地貌类型为风沙地貌、黄土地貌和沟谷地貌3类,井田面积 141.77 km^2 。井田内发育两条长年性沟流——青草界沟和河则沟,均为黄河二级支流。气候属半干旱大陆性季风气候,多年平均降水量为 441.2 mm ,多年平均蒸发量为 $2\ 111.2\text{ mm}$ 。地层由老至新为:三叠系上统永坪组(T_3y),侏罗系中统延安组(J_2y)、直罗组(J_2z),新近系上新统保德组(N_2b),第四系中更新统离石组(Q_2l),上更新统萨拉乌苏组(Q_3s)、全新统风积沙(Q_4eol)及冲积层(Q_4al)^[8]。矿井主采煤层为31煤,位于侏罗系延安组地层上部,煤层平均厚度约 3.2 m 。煤层开采受上覆风化基岩和松散层含水层水的威胁,在工作面回采前均进行一定程度的超前预疏放水工作。

矿井自2006年建成投产以来,原煤产量逐年增加,2010年原煤产量达 $1\ 517\text{ 万 t}$,2011年 $1\ 793\text{ 万 t}$,近年来产量基本稳定在 $1\ 700\text{ 万 t}$;矿井远景规划生产能力为 $2\ 000\text{ 万 t}$ 。从涌水量变化趋势来看(图1(a)),自投产以来,矿井涌水量逐年增加,至2011年9月达到最大值,为 $5\ 499\text{ m}^3/\text{h}$,随后矿井涌水量呈下降趋势,截止2020年10月,矿井涌水量约为 $4\ 775\text{ m}^3/\text{h}$ 。矿井涌水主要由5部分组成:大巷及井筒涌水、掘进工作面涌水、采空区涌水、回采工作面涌水以及预疏放水。其中大巷及井筒涌水量较小,为 $50\sim 100\text{ m}^3/\text{h}$;掘进工作面涌水量最小,为 $0\sim 60\text{ m}^3/\text{h}$;采空区、回采工作面涌水以及疏放水量占矿井总涌水量的95%以上(图1(b))。

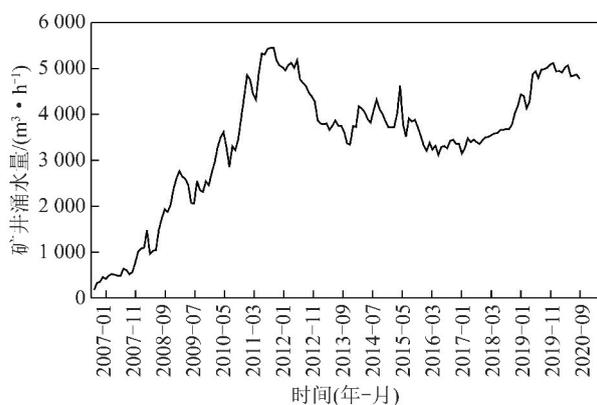
2 矿井(充)涌水特征分析

2.1 含(隔)水层赋存特征

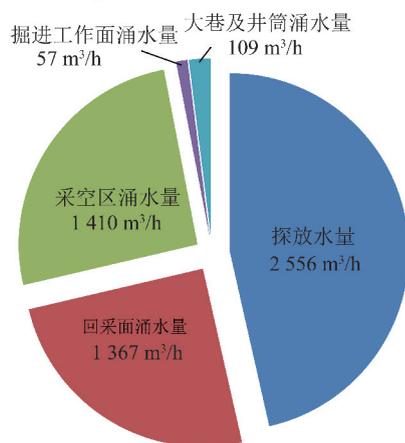
根据钻孔柱状图及覆岩组合特征,井田内煤层顶板为典型的沙(层)-土(层)-基(岩)型结构。

(1)沙层。主要为第四系风积、冲积沙和萨拉乌苏组湖积沙,广泛分布于井田,厚度 $0\sim 73.5\text{ m}$,平均 30.9 m (图2(a))。萨拉乌苏组潜水含水层静止水位埋深 $3.08\sim 20.46\text{ m}$,平均水力梯度 $0.016\sim 0.027$,平均单位涌水量 $0.116\ 0\sim 1.721\ 7\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$,平均渗透系数 $0.813\sim 4.760\text{ m}/\text{d}$,富水性以中等为主,水质为 HCO_3-Ca 型,矿化度 $0.25\sim 0.286\text{ g}/\text{L}$ ^[8]。

(2)土层。埋藏于沙层下部,局部地段出露于地表。主要为第四系离石组黄土(Q_2l)与新近系三趾马红土(N_2b)。土层总厚度 $0\sim 73.95\text{ m}$,厚度变化较



(a) 矿井涌水量历时曲线



(b) 构成分析(2011-09-23)

图1 锦界煤矿矿井涌水量历时曲线及构成分析

Fig. 1 Duration curve and composition analysis of water inflow in Jinjie coal mine

大,局部存在“天窗”区(图2(b))。力学试验表明:黄土层和黏土具有一定的抗剪强度和抗压强度,且有良好的隔水能力^[9-10]。

(3)风化基岩层。位于煤层顶板基岩上部,厚度 $0\sim 83.75\text{ m}$,井田北部厚度普遍较大,一般大于 50 m (图2(c))。岩石风化程度严重至中等,岩石结构破碎,风化裂隙发育,具有较好的渗透性及储水条件。其中含水层平均厚度 45.01 m ,水头高度平均 66.30 m ,静止水位埋深平均 17.98 m ,钻孔平均涌水量 $8.34\text{ m}^3/\text{h}$,平均渗透系数 $0.501\ 0\text{ m}/\text{d}$,单位涌水量介于 $0.017\ 3\sim 0.6\ 504\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$,平均 $0.249\ 52\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$,富水性以中等为主,水质为 HCO_3-Ca 型水,矿化度 $<0.3\text{ g}/\text{L}$ ^[11]。根据水文地质勘探孔和抽水试验成果,风化基岩含水层厚度与单位涌水量之间存在较强的正相关关系,即风化基岩含水层厚度越大,单位涌水量越大,说明基岩风化越强烈,岩层裂隙越发育,富水性越好。风化基岩含水层厚度大于 30 m 的地段其单位涌水量基本都大于 $0.1\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ ^[12]。

(4)基岩层。位于煤层顶板,厚度 $0\sim$

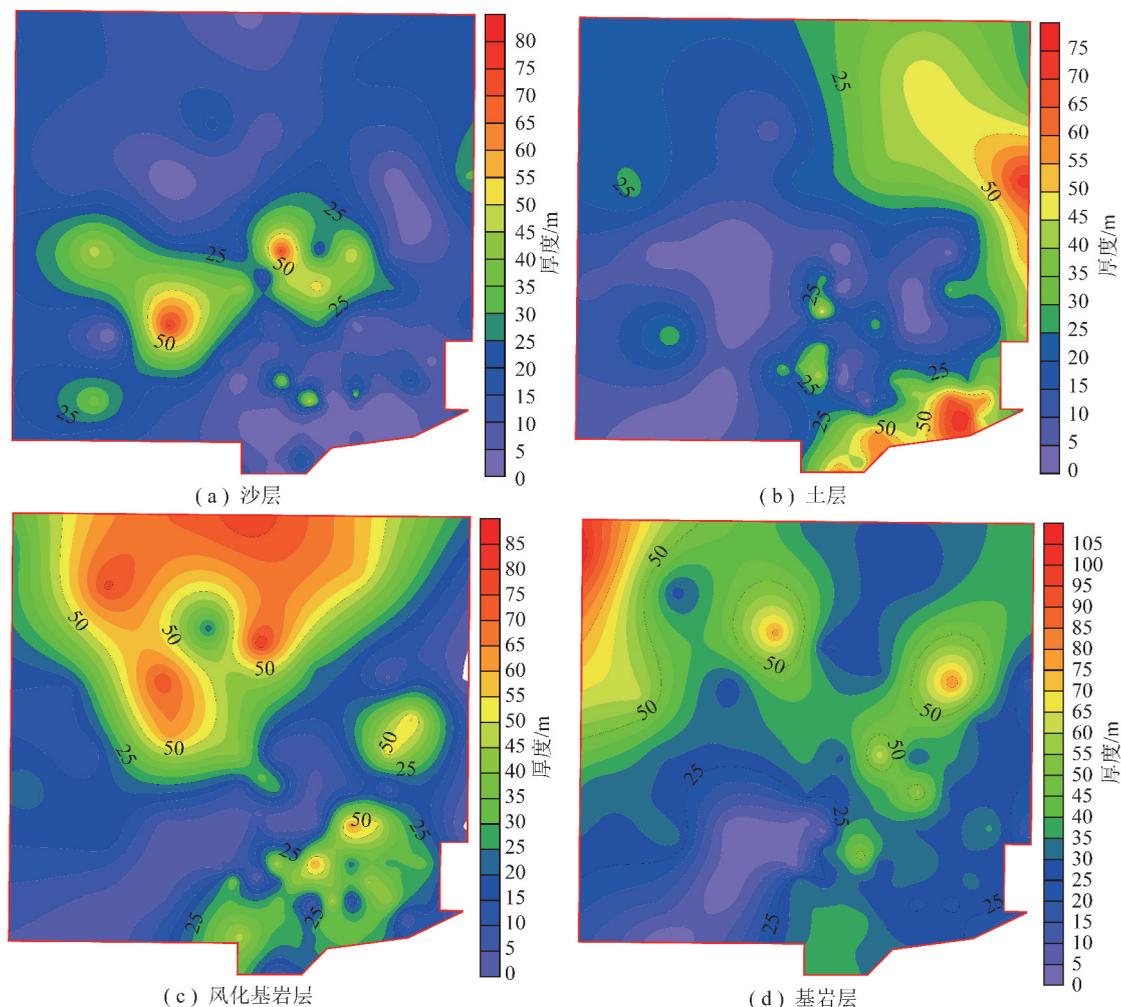


图 2 井田各地层厚度等值线

Fig. 2 Contour of each layer thickness in the mine field

109.14 m(图 2(d))。结构致密,裂隙不发育,富水性较差。单位涌水量在 0.003 02 ~ 0.075 67 L/(s · m),渗透系数为 0.006 079 ~ 0.099 580 m/d^[13]。

2.2 2 种充水模式

通过统计正常基岩和风化基岩厚度之和,并与土层厚度等值线进行叠加可以看出,煤层顶板基岩厚度普遍大于 45 m,只在青草沟沟谷附近厚度较小,煤层开采形成的导水裂隙带(高度为 45.72 m)基本发育至风化基岩中^[14],主要充水水源为风化基岩水,但是井田内存在几处土层缺失“天窗”,即风化基岩和第四系松散层直接接触,上部第四系松散层水通过对风化基岩补给进而对煤层充水,此处煤层开采的充水水源为风化基岩水和第四系沙层水(图 3)。在典型 BB'剖面上,由于隔水地层土层存在缺失区,上覆第四系浅层水可通过“天窗”下漏至导水裂隙带发育空间从而进入井下采空区,而在典型 A—A'剖面上,由于各地层完整未缺失,上覆第四系浅层水不易下渗进入井下采空区。因此,锦界井田内煤层充水模式主要为两

种:土层未缺失风化基岩充水模式(图 4(a))和土层缺失风化基岩和松散层混合充水模式(图 4(b))。

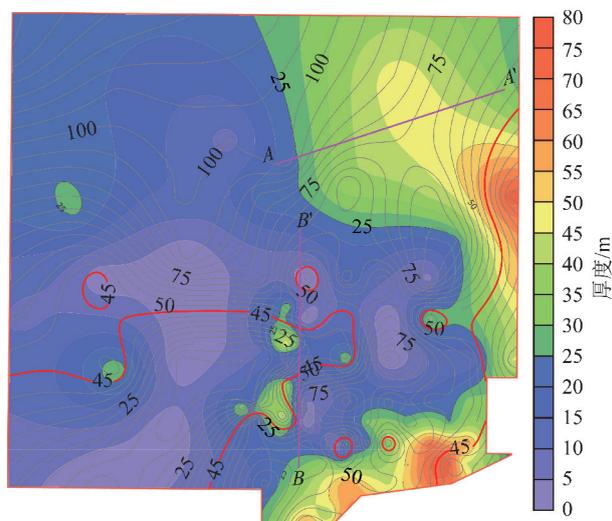


图 3 基岩厚度(线条)和土层厚度(填充)等值线叠加
Fig. 3 Contour overlay of bedrock thickness (line) and soil layer thickness (filling)

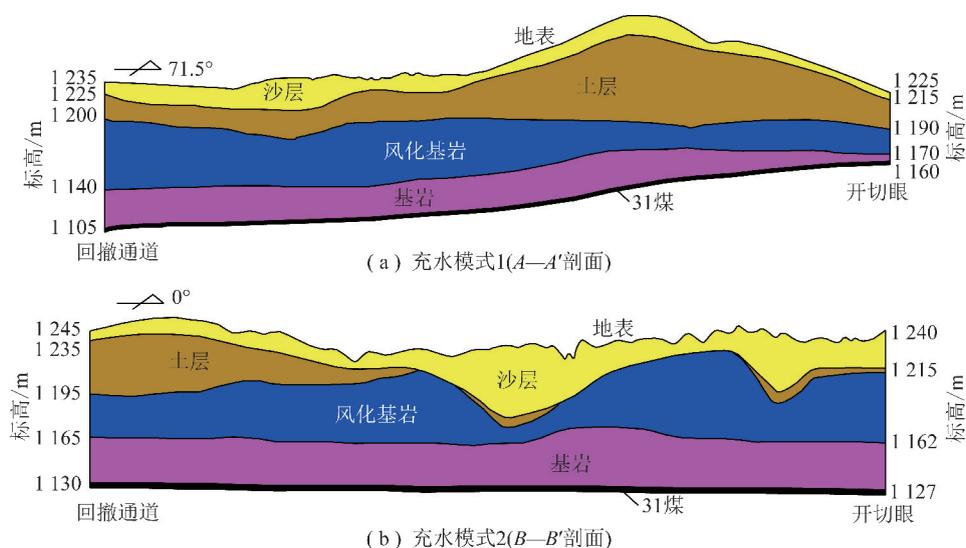


图4 井田煤层开采充水模式

Fig. 4 Water filling mode of coal seam mining

2.3 富水性分区

根据煤层顶板覆岩结构及其富水性特征,分析认为煤层充水含水层富水性基本取决于风化基岩厚度、风化基岩含水层厚度、土层厚度以及沙层含水层厚度4个指标。风化基岩厚度及其含水层厚度则为最重要且是直接影响充水含水层富水性的因素,而沙层则是通过土层局部“天窗”对风化基岩进行补给,因此,土层厚度决定了沙层对充水含水层的补给强度。据此,通过不断调整指标分区阈值,采用GIS多元信息融合技术^[15-16]对充水含水层富水性进行动态划分(式(1)),并与现场进行对比,直到符合现场实际为准,最终确定的富水性评价指标体系(表1)及井田充水含水层的富水性分区图(图5)。

$$F = \sum_{k=1}^4 W(k) F_k \quad (1)$$

式中, F 为煤层顶板含水层综合富水性指数; k 为指标个数; $W(k)$ 为指标权重; F_k 为各指标单因素的富水性指数。

表1 富水性分区说明

Table 1 Description of water abundance zoning

富水性分区	风化基岩厚度	风化基岩含水层厚度	土层厚度	沙层含水层厚度
强富水区	≥ 50	≥ 30	≤ 10	≥ 40
中等富水区	25 ~ 50	20 ~ 30	10 ~ 30	20 ~ 40
弱富水区	<25	<20	>30	<20

由图5可看出,强富水区位于井田二盘区局部地段、三盘区和四盘区大部分地段,且工作面覆盖厚风化基岩的面积越大其涌水量越大。根据井田实际工作面涌水量统计,一盘区工作面涌水量多在100 ~

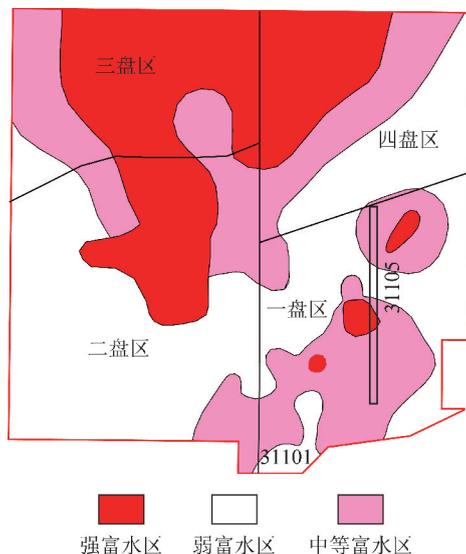


图5 井田富水性分区

Fig. 5 Zoning of water abundance in the mine field

300 m³/h,二盘区工作面涌水量多在200 ~ 400 m³/h,四盘区工作面涌水量多在500 m³/h左右,整体趋势为四盘区涌水量>二盘区涌水量>一盘区涌水量。而在已回采的一盘区,31105工作面涌水量约为500 m³/h,远远大于首采工作面31101工作面(涌水量约为150 m³/h),这是由于31101工作面位于相对弱富水区,而31105工作面位于中等富水区,此外,31105工作面部分地段靠近土层“天窗”区,部分第四系松散层水下渗补给风化基岩。二盘区部分区域存在强富水区直接向弱富水区过度的情况,主要是因为该区域存在土层缺失的“天窗”,使得中等富水区递进为强富水区。因此,二盘区的南部穿过“天窗”区的工作面后期涌水量可能较大,生产中需要采取积极的防范措施。

3 疏放水与残余涌水量构成分析

目前,锦界煤矿在工作面回采前对煤层顶板充水

含水层(风化基岩含水层)进行预疏放,疏放时间大约为 180 d。分析工作面涌水量和疏放水量之间的关系可知(图 6):

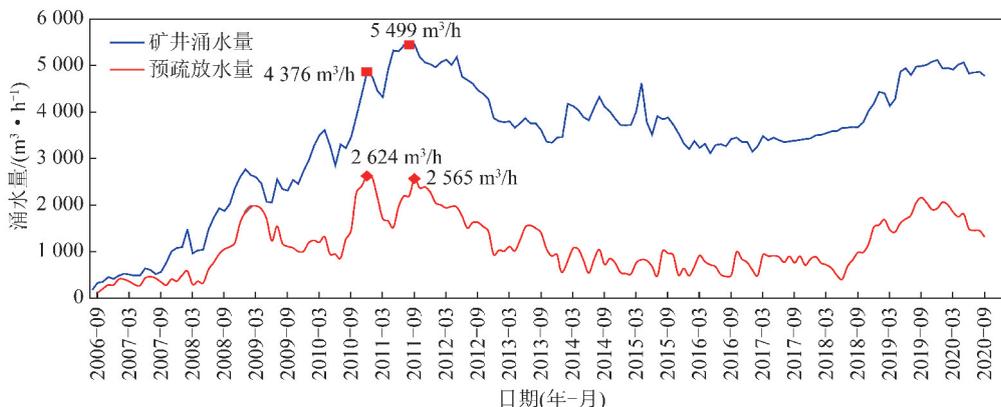


图 6 锦界煤矿矿井涌水量与预疏放水量变化趋势

Fig. 6 Variation trend of water inflow and pre-drainage in Jinjie Coal Mine

(1)疏放水量与工作面回采涌水量曲线变化趋势基本一致,各占矿井涌水量的 50% 左右。

(2)2011 年之后,矿井总涌水量呈减小趋势,减少的量主要是探放水量。矿井涌水量最大时,探放水量同样达到最大。

2011 年后随着盘区先期开采的几个工作面的大量疏放水及采空区大量涌水,后期开采的工作面采前疏放水量大大减少,2014 年 2 月井田的总疏放水量由 2011 年 9 月的 2 556 m³/h 减小至 558 m³/h,减幅达 78%,此时矿井涌水量主要为采空区涌水及工作面涌水。

2011 年前工作面探放水中存在的主要问题:采前预疏放工程基本采用的是最大限度疏放顶板含水层水,可能存在预疏放水量过大,导致更多的第四系松散层水参与其中、浪费水资源的情况。

4 预疏放结束标准确定方法

通过概化锦界井田水文地质条件,建立水文地质概念模型,构建采掘扰动条件下涌水量计算数值模型,通过调整采前疏降残余水头(煤层底板以上水头高度),确定疏放水阶段第四系松散含水层的漏失量,同时,计算相应疏放条件下回采阶段第四系松散含水层漏失量,最后分析疏降残余水头不同工况下的总漏失量变化趋势,确定总漏失量最小时的疏降残余水头,即为预疏放结束标准。

4.1 模型构建

根据矿井水文地质条件分析,煤层开采主要充水含水层包括煤层顶板基岩含水层以及第四系松散含

水层^[17]。因此,本次模拟的垂向范围包括 31 煤、基岩层、风化基岩层、土层以及沙层,其中土层作为相对隔水层,其他地层作为含水层,含水介质为非均质各向异性,平面范围为整个井田(图 7)。地下水流符合达西定律,为非稳定流。

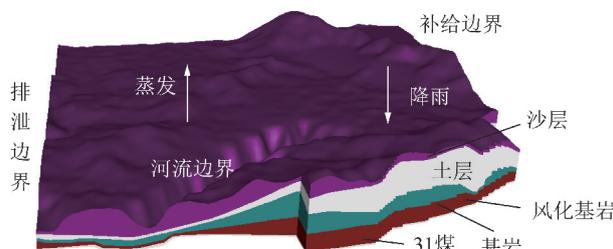


图 7 锦界井田水文地质边界条件概化模型

Fig. 7 Generalization of hydrogeological boundary conditions in Jinjie mine field

区内潜水径流方向为东北向西南青草界沟、河则沟方向;基岩裂隙承压水总体上与区域潜水运动方向基本一致,从井田东北部流向西南。因此,井田北部至东部概化为补给边界,南部与西部概化为排泄边界,均属于流量边界^[18],青草界沟范围概化为河流排泄边界,同时,区内存在大气降雨补给和蒸发排泄(图 7)。

多个工作面连续回采时,采空区成为地下水的主要排泄区,周边高水头含水层水将进入采空区,其流量与水头、煤层底板标高之差成正比关系,计算流量即为进入采空区的涌水量,其连续过程可用 Drain 边界进行概化^[19]。

Drain 边界的计算公式^[20]为

$$Q_{D|s} = \begin{cases} C_D(H - H_D) & H > H_D \\ 0 & H \leq H_D \end{cases} \quad (2)$$

式中, Q_D 为含水层进入工作面采空区的涌水量, m^3/d ; S 为采空区边界; C_D 为含水层水力传导系数, m^2/d ; H 为含水层水头标高, m ; H_D 为工作面煤层底板标高, m 。

根据水文地质条件概化结果, 模拟区工作面煤层开采时地下水呈三维非稳定流, 其运动特征可用下列三维渗流数学模型^[21]来描述:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) \right] = S_s \frac{\partial H}{\partial t}$$

$$H(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z)$$

$$-K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_s = q(x, y, z, t)$$

$$\left\{ \frac{\partial H}{\partial n} \right\} = 0$$

$$\left[H \right]_{r_1} = z$$

$$\left\{ - (K + W) \frac{\partial H}{\partial z} + W \right\} \Big|_{r_1} = \mu \frac{\partial H}{\partial t}$$

$$[Q_D]_s = C_D(H - H_D)$$

式中, H 为地下水水位标高, m ; K 为含水层渗透系数, m/d ; S_s 为含水层弹性释水率, d^{-1} ; W 为模拟区大气降水入渗补给强度和蒸(散)发强度, m^2/d ; μ 为含水层给水度; r_1 为潜水面边界; H_0 为模拟区初始流场, m ; $q(x, y, z, t)$ 为第 2 类变流量边界流量, m^3/d , 流入为正, 流出为负; x, y, z 为空间坐标变量, m ; t 为时间, d ; Ω 为模拟区; n 为各边界面的外法线方向。

利用各勘探阶段抽水试验、放水试验获取的水文地质参数, 采用 MODFLOW 数值模拟软件构建采煤影响下的地下水流数值模型, 计算不同工况下的工作面涌水量。

针对土层缺失的地层接触关系, 在数值模型中缺失区预先设定土层厚度 3 m, 在该区水文地质参数赋值为下一层风化基岩含水层的水文地质参数以刻画此处土层缺失地质条件。

4.2 模型可靠性验证

以一盘区 10 个工作面(31101 ~ 31110 工作面)的实测正常涌水量为基础, 在工作面位置设置 Drain 边界(图 8), 排水标高为煤层底板, 每个工作面回采的时间均为 1 a。运行数值模型, 通过调整水文地质参数和边界条件进行试算, 直到多工作面连续回采涌水量计算值和实测值拟合程度最高为止^[22]。一盘区前 4 个工作面的识别及后 6 个工作面的验证

拟合曲线如图 9 所示, 此时模型的水文地质参数和边界条件是最终状态, 模型可靠, 可以进行后续预测计算。

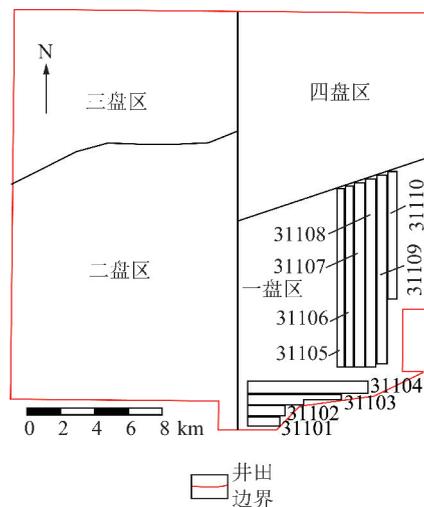


图 8 一盘区工作面布置

Fig. 8 Layout of working face in panel 1

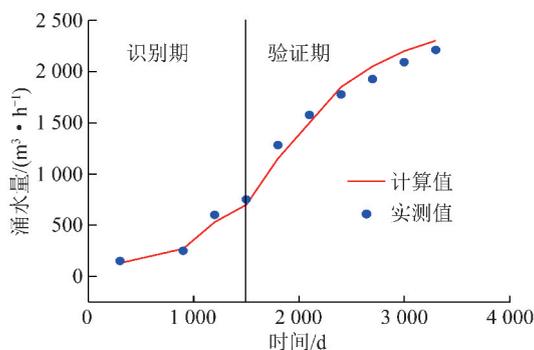


图 9 工作面涌水量计算值和实测值对比

Fig. 9 Comparison of calculated and measured water inflow of working face

4.3 不同充水模式下残余水头

分别选取一盘区和三盘区各 1 个工作面作为充水模式一和充水模式二的代表性工作面, 设置虚拟放水孔, 放水时间为 180 d, 180 d 后工作面进行回采, 回采时间为 300 d。初始水头设置为 1 240 m, 在数值模型中对每一层均设置 Zone budget 分区, 统计计算第四系含水层流向基岩含水层的流量, 分别确定疏放至 10 ~ 30 m 残余水头工况下, 预疏放水阶段和工作面回采阶段第四系松散含水层总漏失量的变化关系(图 10)。

充水模式 1: 土层的渗透系数设定为较小值, 为 0.000 1 m/d 。由图 10(a) 可知, 随着疏降残余水头下降, 预疏放水阶段和回采阶段第四系含水层漏失量逐步增大, 第四系总漏失量逐步增大, 且增幅越来越大。当预疏降残余水头在煤层底板以上 20 m 时, 预疏放水阶段第四系含水层漏失量为 236 m^3/h , 回采阶段第

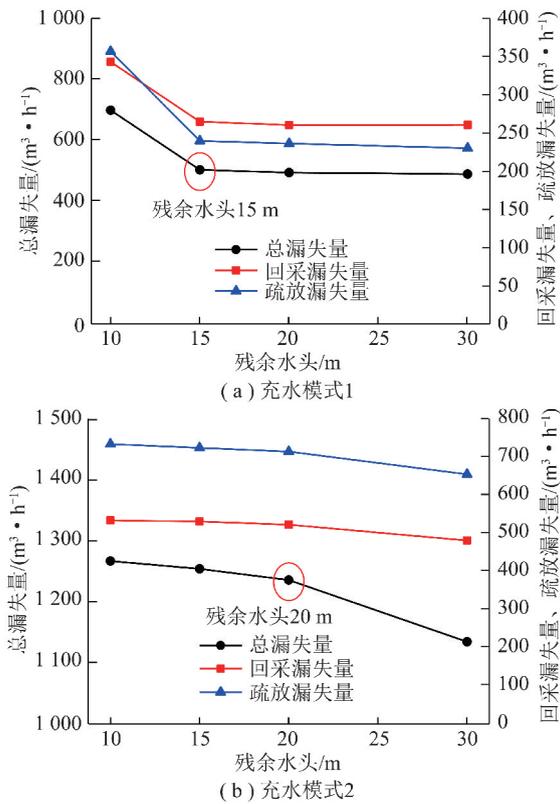


图 10 充水模式 1,2 下工作面第四系总漏失量与残余水头关系

Fig. 10 Relationship between Quaternary total leakage and residual water head of working face under water filling mode 1 and 2

四系含水层漏失量为 $260 \text{ m}^3/\text{h}$, 总漏失量为 $496 \text{ m}^3/\text{h}$; 而当预疏降残余水头在煤层底板以上 15 m 时, 预疏降阶段第四系含水层漏失量为 $240 \text{ m}^3/\text{h}$, 回采阶段第四系含水层漏失量为 $265 \text{ m}^3/\text{h}$, 总漏失量为 $505 \text{ m}^3/\text{h}$, 总水量增幅较小; 而当预疏降残余水头降至为煤层底板以上 10 m 时, 第四系含水层总漏失量突增 (图 10(a))。由图 10(a) 可以推断, 在土层未缺失风化基岩充水模式下, 工作面预疏降残余水头应当控制在煤层底板以上 15 m 左右, 即疏放钻孔残余水压约为 0.15 MPa 后即可进行回采, 该状态下第四系松散含水层总漏失量最小。这与锦界煤矿采前钻孔预疏放实际情况基本一致^[4]。该模式下第四系松散含水层漏失主要是通过间接越流方式补给的, 随着基岩含水层的水位大幅度降低, 第四系松散含水层与基岩含水层之间的水位差逐步增大, 此时高水位含水层易通过土层发生越流补给低水位的基岩含水层, 导致第四系松散含水层水量漏失^[23]。

充水模式 2: 由于第四系与基岩含水层直接接触, 将模型中虚拟土层的渗透系数设定为基岩含水层渗透系数, 即 0.1 m/d 。由图 10(b) 可知, 随着疏降

残余水头降低, 预疏放阶段和回采阶段第四系含水层漏失量逐步增大, 第四系含水层总漏失量同样呈现逐步增大趋势, 且增幅逐步减小。当预疏降残余水头在煤层底板以上 20 m 时, 预疏降阶段第四系含水层漏失量为 $714 \text{ m}^3/\text{h}$, 回采阶段第四系含水层漏失量为 $522 \text{ m}^3/\text{h}$, 总漏失量为 $1236 \text{ m}^3/\text{h}$, 而当预疏降残余水头在煤层底板以上 15 m 时, 预疏降阶段第四系含水层漏失量为 $724 \text{ m}^3/\text{h}$, 回采阶段第四系含水层漏失量为 $531 \text{ m}^3/\text{h}$, 总漏失量为 $1255 \text{ m}^3/\text{h}$, 总水量增幅较小; 而当预疏降残余水头降至煤层底板以上 30 m 时, 第四系含水层总漏失量突减, 但此时残余水头较高, 对于安全生产有潜在风险 (图 10(b))。由图 10(b) 可以推断, 土层缺失风化基岩和松散层混合充水模式下, 工作面预疏降残余水头应控制在煤层底板以上 20 m 左右, 即疏放钻孔残余水压约为 0.2 MPa 后可进行回采, 该状态下残余水头较小, 第四系松散含水层总漏失量相对最小。该模式下第四系松散含水层漏失主要是通过土层缺失区直接渗流补给。随着第四系松散含水层与基岩含水层之间的水力梯度逐步增大, 渗流量逐步增加, 导致第四系松散含水层水量大量漏失^[24]。

对于疏放水工程来讲, 采前预疏放主要是尽可能减少顶板含水层的静储量, 当静储量疏放基本完成后, 则钻孔涌水量主要由动储量构成, 此时钻孔涌水量减幅变小, 继续疏放效果并不明显, 实则为过度或低效疏放^[11]。因此, 在保障安全的前提下, 允许保留有一定的残余水头 ($15 \sim 20 \text{ m}$) 是合理的, 此时第四系松散含水层总漏失量最小, 且采后残余涌水量在可接受范围内, 而过度疏放不仅增加矿井涌水量, 而且破坏浅层地下水资源, 进而对地表十分脆弱的生态环境造成影响。因此, 根据上述方法确定了两种充水模式下工作面预疏放水的结束标准, 为条件类似矿井减水开采中在确定预疏放安全残余水头方法及技术流程方面提供了范例。

5 结 论

(1) 研究区煤层顶板为典型的沙(层)-土(层)-基(岩)型结构, 煤层开采主要充水水源为风化基岩水, 煤层充水模式主要为土层未缺失风化基岩充水模式和土层缺失风化基岩及松散层混合充水两种模式。

(2) 选用风化基岩厚度、风化基岩含水层厚度、土层厚度以及沙层含水层厚度作为充水含水层富水性分区指标, 采用 GIS 多元信息融合技术对充水含水层进行了富水性分区, 结果显示强富水区位于井田二

盘区局部地段、三盘区和四盘区大部分地段。

(3)通过对锦界煤矿水文地质条件进行概化,采用 Drain 边界刻画多工作面连续回采内边界,建立了锦界煤矿采掘扰动条件下三维地下水流数值模型。通过模拟计算得出两种充水模式下工作面预疏放结束标准,即将充水含水层水头疏放至煤层底板(残余水头)15~20 m 以上,达到该状态后可进行回采,无需进行过度疏放。此时,第四系松散含水层水资源量漏失量最小,可起到在西部生态脆弱区减水采煤和浅部水资源保护的双重作用。

参考文献(References):

- [1] 虎维岳,田干.我国煤矿水害类型及其防治对策[J].煤炭科学技术,2010,38(1):92-96.
HU Weiyue, TIAN Gan. Mine water disaster type and prevention and control countermeasures in China[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1): 92-96.
- [2] 刘基.顶板高承压含水层疏水降压可行性研究[J].煤炭工程,2016,48(11):42-45.
LIU Ji. Study on the feasibility of the dewatering and depressurizing of the high pressure roof water[J]. Coal Engineering, 2016, 48(11): 42-45.
- [3] 赵宝峰,曹海东,马莲净,等.煤层顶板巨厚砂砾岩含水层可疏放性评价[J].矿业安全与环保,2018,45(4):102-105.
ZHAO Baofeng, CAO Haidong, MA Lianjing, et al. Drainage feasibility evaluation of thick glutenite aquifer on coal seam roof[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2018, 45(4): 102-105.
- [4] 黄欢.锦界煤矿顶板水疏放技术优化研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2017.
HUANG Huan. Optimization research on dewatering technology of roof water in Jinjie Mine[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2017.
- [5] 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/OL].煤炭学报:1-10[2021-02-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11,2190.td,20201015,1449.002.html>.
ZHAO Chunhu, JIN Dewu, LI Zhixue, et al. Analysis of overlying aquifer water inrush under mining the top mineable seam in yushen mining area[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-10[2021-02-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11,2190.td,20201015,1449.002.html>.
- [6] 刘基,靳德武,王皓.基于含水层-钻孔水量交换的疏放水钻孔涌水量计算及参数优化[J/OL].煤炭学报:1-15[2021-02-01].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2020.0689>.
LIU Ji, JIN Dewu, WANG Hao. Water yield calculation and parameter optimization of drainage boreholes based on water exchange between aquifers and boreholes[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-15[2021-02-01]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2020.0689>.
- [7] 李永涛,杨建.基于顶板水预疏放的首采工作面涌水规律[J].煤田地质与勘探,2019,47(4):104-109.
LI Yongtao, YANG Jian. Water inflow law of the first working face based on water pre-draining from roof[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 104-109.
- [8] 王生全,牛建立,刘洋,等.锦界煤矿矿井涌水规律及其控制因素分析[J].煤矿安全,2014,45(2):145-147.
WANG Shengquan, NIU Jianli, LIU Yang, et al. Gushing water law and its control factors analysis of jinjie coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(2): 145-147.
- [9] 李文平,叶贵钧,张莱,等.陕北榆神府矿区保水采煤工程地质条件研究[J].煤炭学报,2000,25(5):449-454.
LI Wenping, YE Guijun, ZHANG Lai, et al. Study on the engineering geological conditions of protected water resources during coal mining action in Yu-Shen-Fu Mining Area in the North Shanxi Province[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(5): 449-454.
- [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N2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 N2 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] 崔杰,刘洋,王振荣.锦界煤矿水文地质条件分析及探查技术研究[J].煤炭工程,2009(9):72-74.
CUI Jie, LIU Yang, WANG Zhenrong. Hydrogeological condition analysis and exploration technology study of Jinjie Mine[J]. Coal Engineering, 2009(9): 72-74.
- [12] 刘洋,王振荣,牛建立.工作面涌水量预测方法的确定[J].矿业安全与环保,2010,37(5):29-30,34.
LIU Yang, WANG Zhenrong, NIU Jianli. Determination of the method of predicting the water inflow of the working face[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2010, 37(5): 29-30, 34.
- [13] 王生全,牛建立,刘洋,等.锦界煤矿水文地质特征与矿井充水危险性预测[J].煤田地质与勘探,2014,42(6):55-58.
WANG Shengquan, NIU Jianli, LIU Yang, et al. Prediction of hydro-geological characteristics and water filling risk in Jinjie mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(6): 55-58.
- [14] 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.
- [15] 武强,樊振丽,刘守强,等.基于GIS的信息融合型含水层富水性评价方法——富水性指数法[J].煤炭学报,2011,36(7):1124-1128.
WU Qiang, FAN Zhenli, LIU Shouqiang, et al. Water-richness evaluation method of water-filled aquifer based on the principle of information fusion with GIS: Water-richness index method[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1124-1128.
- [16] 曾一凡,武强,杜鑫,等.再论含水层富水性评价的“富水性指数法”[J].煤炭学报,2020,45(7):2423-2431.
ZENG Yifan, WU Qiang, DU Xin, et al. Further research on “water-richness index method” for evaluation of aquifer water abundance[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2423-2431.
- [17] 王振荣,崔杰.锦界煤矿水害防治重点及防治措施[J].水力采

- 煤与管道运输,2009(4):4-7.
- [18] 朱春孝,谢配红,邢立亭,等.西北半干旱地区大水矿床成因机制——以锦界煤矿为例[J].水利与建筑工程学报,2013,11(6):11-15.
ZHU Chunxiao, XIE Peihong, XING Liting, et al. Genetic mechanism of heavy-water deposit in northwest arid region of china—taking jinjie mine as an example [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(6):11-15.
- [19] 刘基,王强民,杨建.基于 Visual Modflow 的矿井涌水量模拟和动态预测研究[J].煤矿安全,2018,49(3):190-193.
LIU Ji, WANG Qiangmin, YANG Jian. Mine inflow simulation and dynamic prediction based on Visual Modflow [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(3):190-193.
- [20] 郭小铭,李博,殷文渊,等. Visual Modflow 预测矿井涌水量过程中边界条件问题探讨[J].矿业安全与环保,2013,40(6):104-107.
GUO Xiaoming, LI Bo, YIN Wenyuan, et al. Discussion on boundary conditions in mine inflow prediction with Visual Modflow [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2013, 40(6):104-107.
- [21] 李俊亭.地下水数值模拟[M].北京:地质出版社,1989.
- [22] 刘基,靳德武,姬亚东,等.复杂水文地质条件下大型帷幕截流工程效果数值仿真分析[J].煤炭学报,2019,44(8):2427-2436.
LIU Ji, JIN Dewu, JI Yadong, et al. Numerical simulation analysis of closure effect of large curtain work with complex hydrogeological conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8):2427-2436.
- [23] 陈崇希,林敏.地下水动力学[M].北京:地质出版社,2011.
- [24] 吴吉春.地下水动力学[M].北京:中国水利水电出版社,2009.