

基于不同开采方式的煤矿涌水量预测及其环境影响分析

韦华鹏, 罗奇斌, 康卫东, 张子琛

Prediction of coal mine water inflow by different mining methods and environment impact analyses

WEI Huapeng, LUO Qibin, KANG Weidong, and ZHANG Zichen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

缓倾层状结构高陡采动斜坡变形特征研究

Deformation characteristics of a high and steep mining slope with gently-inclined layered structure

赵建军, 王子贤, 严浩元, 赖琪毅, 余建乐, 李清森, 朱要强, 董建辉 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 174-183

地下采动下含深大裂隙岩溶山体变形响应特征

Deformation response characteristics of karst mountains with deep and large fissures under the condition of underground mining

钟祖良, 高国富, 刘新荣, 王南云, 李皓 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 97-106

基于水力层析法的某煤矿承压含水层叠加放水试验分析

An analysis of sequential water releasing tests of the confined aquifers in a coal mine based on hydraulic tomography

赵瑞珏, 毛德强, 刘再斌, 姬中奎, 曹祖宝 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 1-9

鄂尔多斯浩勒报吉水源地开采地下水的环境影响分析

Inspection and assessment of the environmental impacts of groundwater exploitation at the Haolebaoji wellfield in Inner Mongolia

王旭升, 尹立河, 方坤, 张俊, 王晓勇 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 5-5

矿山水土污染与防治对策研究

A discussion of soil and water pollution and control countermeasures in mining area of China

张进德, 田磊, 裴圣良 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 157-163

平朔露天煤矿复垦区不同地质层组岩土质量综合评价

Comprehensive evaluation of rock and soil quality of different geological stratum groups in Pingshuo opencast coal mine reclamation area

崔潇, 周妍如, 刘孝阳, 白中科 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 164-173



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201025

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.

WEI Huapeng, LUO Qibin, KANG Weidong, *et al.* Prediction of coal mine water inflow by different mining methods and environment impact analyses[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 21-31.

基于不同开采方式的煤矿涌水量预测及其 环境影响分析

韦华鹏¹, 罗奇斌^{1,2}, 康卫东^{1,2}, 张子琛¹

(1. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069;

2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 煤矿开采不当会对水资源与水环境造成破坏, 尤其在生态环境相对脆弱地区更是如此。针对目前矿井涌水量预测大多以单一工作面或煤矿为评价单元, 对沟域内煤矿群同时长期开采的地下水环境影响重视不够。选择头道河则沟域为研究区, 以地下水勘查、井田勘探资料为依据, 构建了头道河则完整沟域的地下水三维非稳定流数值模型, 根据地下水、地表水监测数据和煤矿群开采涌水量的长观资料进行模型的识别与验证, 以 9#煤矿为典型矿区, 分析综采和条带充填 2 种不同开采方式下矿井涌水量及其对水环境的影响。研究结果表明: (1) 综采状态下, 矿井涌水量增加 $0.70 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 导致地下水溢出量减少 $0.20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 引发矿区及区域地下水水位下降 $0.21 \sim 17.92 \text{ m}$; 条带充填开采状态下, 矿井涌水量增加 $0.11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 导致地下水溢出量减少 $0.04 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 引发矿区及区域地下水水位下降 $0.01 \sim 0.44 \text{ m}$ 。(2) 煤矿按综采方式开采, 导水裂隙带高度大, 将大面积导通第四系潜水含水层, 矿井涌水对水环境影响较大; 若按条带充填方式开采, 导水裂隙带高度大幅变小, 不会导通第四系潜水含水层, 矿井涌水对水环境影响较小。煤矿企业在煤层上覆岩层厚度较薄的地段采煤时, 宜采取条带充填开采的方式。研究结果可为研究区或类似煤田开采方案制定、科学处理好煤炭资源开采与生态环境保护关系等提供依据或参考。

关键词: 矿井涌水量; 数值模拟; 环境影响; 煤矿群开采; 煤矿综采; 煤矿充填开采

中图分类号: P641.4*61

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0021-11

Prediction of coal mine water inflow by different mining methods and environment impact analyses

WEI Huapeng¹, LUO Qibin^{1,2}, KANG Weidong^{1,2}, ZHANG Zichen¹

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwestern University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: Improper mining of coal mines can cause damage to water resources and the water environment, especially in areas with relatively fragile ecological environment. At present, the prediction of mine water inflow mainly focuses on the single working face or mining area, and enough attention has not been paid to the influence of long-term mining of coal groups in the gully on groundwater environment. The Toudaoheze gully is selected as

收稿日期: 2022-01-20; 修订日期: 2022-03-19

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JLM-14)

第一作者: 韦华鹏(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文地质工程地质方面的研究。E-mail: 1094189310@qq.com

通讯作者: 罗奇斌(1982-), 男, 博士, 讲师, 主要从事水资源与水环境方面研究。E-mail: luoqibin@nwu.edu.cn

the study area. Based on the data of groundwater exploration and coal field investigation, a 3D numerical model of groundwater unsteady flow of the whole gully is constructed. The model is identified and verified with the monitoring data of groundwater and surface water and the long-term data of mine water inflow in coal groups. Taking 9# coal mine as a typical area, the mine water inflow and its influence on water environment under the fully mechanized mining and strip filling mining methods are analyzed. The main results show that (1) under the fully mechanized mining method, the increase of mine water inflow is $0.70 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, resulting in the reduction of groundwater overflow of $0.20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ and causing groundwater level to drop between 0.21 and 17.92 m in the mining area and region. Under the strip filling mining method, the increase of mine water inflow is $0.11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, resulting in the reduction of groundwater overflow is $0.04 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ and causing groundwater level to drop between 0.01 and 0.44 m in mining area and region. (2) The water-conducting fracture zone connects with a large area of the Quaternary phreatic aquifer under the fully mechanized mining method, and mine water inflow has a great impact on water environment. If the strip filling method is carried out, the height of the water-conducting fracture zone will be greatly reduced, and the Quaternary phreatic aquifer will not be connected, and mine water inflow will have less impact on water environment. The filling mining method can be adopted when coal mining in the area has small thickness of strata above the coal seam. The results can provide a basis or reference for the formulation of mining schemes in the study area or other similar coal fields, and for scientifically handling the relationship between coal resource mining and ecological environmental protection.

Keywords: mine water inflow; numerical simulation; environmental impacts; collective mining; fully mechanized mining; filling mining

煤矿开采过程中矿井涌水,不仅会对矿区水资源与水环境造成一定程度的破坏,而且还会对矿井安全生产构成威胁。煤矿开采造成的顶板冒裂而引起地下水漏失或疏干,会引发地下水水位下降、泉水断流、地表径流减少等一系列水环境问题^[1-3],还可能诱发突水事故。因此,开展煤矿涌水量预测对煤矿设计和煤矿水害防治工作十分必要^[4-5]。

目前,我国在煤矿水害防治过程中,形成了如解析法、比拟法、数值法、神经网络法等许多矿井涌水量预测的方法^[6-9]。陈酪知等^[10]对各种煤矿涌水量方法的适用性进行了评价,并提出了煤矿涌水量预测方法和新技术结合的展望。李超峰等^[11]提出了煤矿开采过程的渐进式时空动态涌水量预测方法,并对高家堡矿井涌水量进行预测,预测结果精度较高。黄欢^[12]对煤矿涌水量的预测方法进行了分析与总结,认为数值模拟以其较高的预测精度、较宽的适用范围成为预测矿井涌水量的主要发展趋势。侯恩科等^[13]基于 GMS 构建了柠条塔煤矿地下水数值模型,研究了区内火烧岩下矿井涌水量随回采过程的动态变化。刘基等^[14]基于 Modflow 模拟了葫芦素煤矿涌水量随开采进度的动态变化。宫厚健等^[15]通过改变初始流场研究了不同采掘顺序煤矿涌水量。但以往利用数值法预测煤矿涌水量,大多直接对单一煤矿开采进行预测与分

析,没有很好地重视沟域内煤矿群长时间开采对地下水环境共同作用的影响,因不能客观地模拟地下水的激励因素及其响应关系,导致其预测结果误差较大。

条带膏体充填是将条带开采和充填技术有机结合起来,对采空区进行条带式部分充填的煤矿开采工艺^[16-17]。通过抑制煤层顶底板的大幅冒落与塌陷等危害,有效地控制地表沉陷、减小矿坑涌水量,该项技术在国内外得到广泛的推广^[18]。我国对条带膏体充填技术研究起步较晚,但经过多年的研究和探索,逐渐形成了一个完整体系,得到了各类煤矿企业的认可与应用^[19]。但是有关条带膏体充填开采的煤矿涌水量研究还较少。

据此,本文以头道河则沟域煤田为例,构建了沟域地下水流数值模型,模拟沟域煤矿群开采(综采方式)矿井涌水量与地下水水位下降过程。预测了 9#煤矿综采和条带膏体充填开采的煤矿涌水量,分析不同开采方式矿井涌水对水环境的影响,为煤田的矿井涌水防治以及区域煤矿采煤方式的选择提供了科学依据。

1 试验设计与研究方法

1.1 研究区概况

头道河则流域位于榆溪河东侧,属于毛乌素沙漠南缘与陕北黄土高原接壤地带,研究区水文地质图及

剖面图, 见图 1。区内地表绝大部分被第四系全新统风积沙所覆盖, 地层岩性主要为: 侏罗系中统延安组砂泥岩(J_2y)、直罗组砂质泥岩(J_2z)、新近系静乐组红黏土(N_j)、中更新统离石组黄土(Q_2l)、上更新统萨拉乌苏组砂土(Q_3s)及全新统粉细砂(Q_4)。研究区地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙潜水以及碎屑岩类风化壳裂隙潜水与碎屑岩类裂隙承压水。研究

区分布有 16 座煤矿, 9#煤矿位于头道河则沟域群矿的中心部位, 靠近河流与地表水体(石崩水库), 存在突水风险, 该煤矿开采时间长, 积累了长序列矿井涌水量等资料, 因此将 9#煤矿选择为典型矿进行研究。煤矿可采煤层为延安组第三段顶部 3 号煤层, 层位稳定厚度大。矿坑直接充水水源为煤层顶板基岩裂隙水, 间接充水水源为上覆松散层潜水。

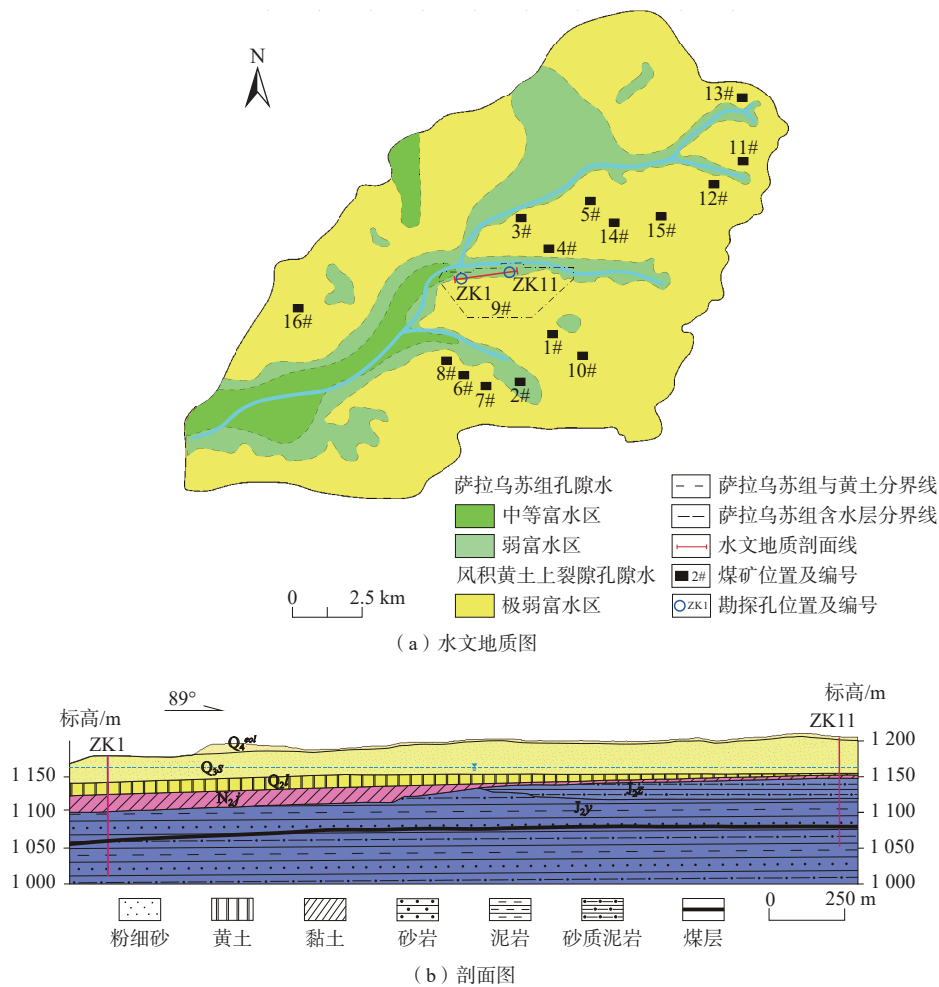


图 1 研究区水文地质图和水文地质剖面图

Fig. 1 Hydrogeological map and hydrogeological profile of the study area

1.2 模型建立

1.2.1 水文地质概念模型

依据头道河则沟域水文地质条件, 综合考虑 9#煤矿开采范围和周围水环境特征等因素, 确定以沟域外围地下水分水岭围闭区域为模型区范围, 面积为 453.07 km², 以潜水面为模型区顶界、以 3 号煤层底板为模型底界。位于流域下游的西南边界, 远离煤矿开采区, 为沟域地表水与地下水的总出口, 是地下水排

泄基准面, 该处地下水水位比较稳定。为了便于数值模型的计算, 综合考虑研究区煤层开采和其顶板冒裂情况, 地层结构自上而下划分为 5 层: ①第四系萨拉乌苏组及黄土层, ②新近系红色黏土层, ③导水裂隙带之上侏罗系砂泥岩层, ④导水裂隙带及其两侧的侏罗系砂泥岩层, ⑤3 号煤层分布区及其采空区。

模型区潜水补给项主要为大气降水、凝结水和农灌回归水以及地表积水的入渗补给; 在煤炭开采状态

下,还可能存在激发河库水的入渗补给。潜水排泄项主要是潜水蒸发蒸腾、沿河的地下水溢出、地下水开采、矿坑涌水及向下游边界处的地下水侧向径流。降水入渗等面状补给采用 Recharge 模块处理,将补给量作用于最上一层活动单元;采用 River 模块模拟地下水溢出或河库水入渗,地下水蒸发及地下水开采分别采用模型中的 ET 模块和 Well 模块处理;地下水侧向径流排泄量,模型依据 Darcy 公式计算。

1.2.2 数学模型

根据研究区水文地质概念模型,其地下水流数学模型为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q \times \delta \\ + W \times \delta = S_s \frac{\partial H}{\partial t}, (x, y, z) \in \Omega, t > 0 \\ H(x, y, z)|_{t=0} = h_0(x, y, z), (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z)|_{\Gamma_1} = h_1, t > 0 \\ - \left[K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \cos(n, x) + K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \cos(n, y) \right] \Big|_{\Gamma_2} = 0, t > 0 \\ \frac{K_r A}{M_r} (H_r - H) = Q_r \\ H = z \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} = K_{xx} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K_{yy} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + K_{zz} \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 \\ - (K_{zz} + \varepsilon) \frac{\partial H}{\partial z} + \varepsilon \end{array} \right.$$

式中: H ——地下水水位标高/m;

H_r ——河库水位标高/m;

μ ——潜水含水层给水度/ m^{-1} ;

S_s ——承压含水层弹性释水率/ m^{-1} ;

Q ——水井开采量/ $(m^3 \cdot d^{-1})$;

W ——矿坑涌水量/ $(m^3 \cdot d^{-1})$;

δ —— δ 函数(分别对应水井、坑道位置坐标);

h_0 ——初始水位标高/m;

h_1 ——排泄基准面水位标高/m;

Q_r ——河库水入渗量或地下水溢出量/ $(m^3 \cdot d^{-1})$;

A ——河库水区计算面积/ m^2 ;

K_r ——河库床淤积层渗透系数/ $(m \cdot d^{-1})$;

M_r ——河库床淤积层厚度/m;

ε ——潜水面垂向交换量/ $(m^3 \cdot d^{-1} \cdot m^{-2})$;

Ω ——计算区范围。

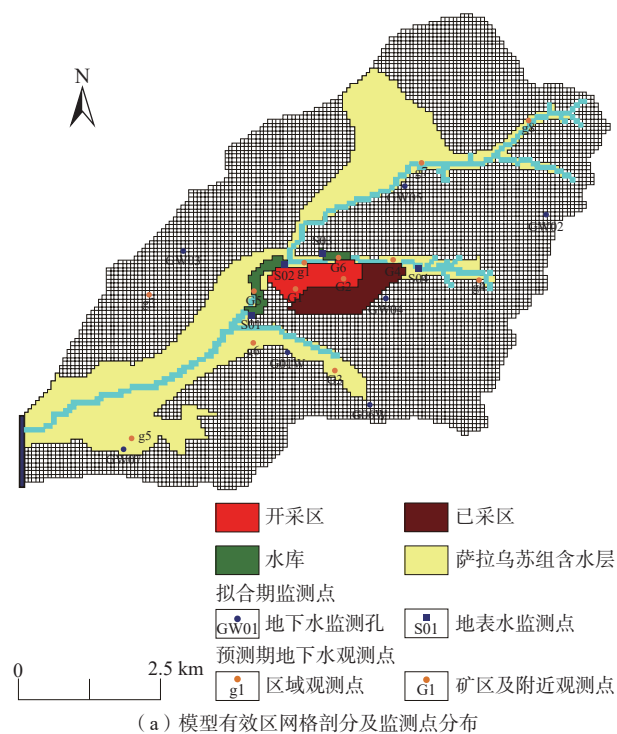
1.2.3 数值模型

通过 Modflow 有限差分求解数学模型。采用 $100 m \times 100 m$ 的网格将整个模型区划分为 226 380 个单元,其

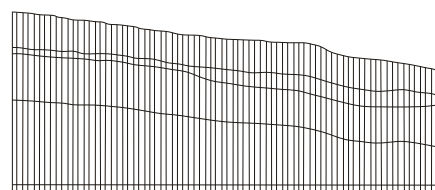
中模型区单元为 125 939 个,有效面积为 $252.4 km^2$ (图 2)。

1.2.4 模型识别

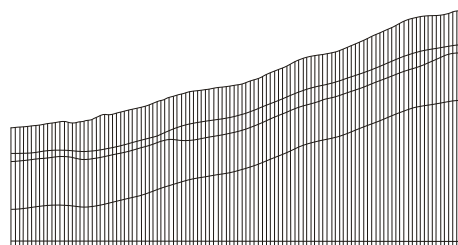
以 2005 年和 2021 年的统测流场作为模型识别的初始流场和模拟末期流场,模拟期为 2005 年 1 月—2021 年 12 月;2005 年煤矿开采模型区天然地下水流场干扰很小,可视为无煤矿开采干扰的时期;模型识别的中后期,区内煤矿开采强度和采空区面积不断增大,模型按照煤矿的开采顺序,采用变采空区空间步长的方法,模拟逐步加大采空区面积的过程;将地下水各项补给量及开采量等数据加入数值模型,以抽水



(a) 模型有效区网格划分及监测点分布



(b) 模型网格剖分纵向剖面示意图



(c) 模型网格剖分横向剖面示意图

图 2 模型区有限差分剖分网格图

Fig. 2 Finite difference meshing of the model area

试验获取的水文地质参数为初值,通过调试水文地质参数,对模型识别期沟域内的矿井涌水量、地下水水位、地表水流量的长观数据以及模拟末期流场等进行模型拟合与分析。

(1)模型区内的 16 座煤矿(图 1),2013 年和 2018 年实测煤矿群总涌水量分别为 12 800, 29 300 m^3/d ;模型模拟的 2013 年和 2018 年煤矿群总涌水量分别为 12 839, 29 341 m^3/d ,模型模拟与实测总涌水量数据的拟合误差小。

(2)模型模拟的 9#煤矿矿坑涌水量、区域地下水水位、地表水流量以及地下水模拟末期流场见图 3—图 6,模型模拟与实测数据时空变化的总体趋势一致,各类数据拟合误差较小。

由此表明,所建数值模型具有较好的仿真性,可用于研究区内 9#煤矿开采区综采和条带充填开采的矿坑涌水量预测及其环境影响分析。

模型识别参数:(1)模型区分布有黄土梁岗、沙盖黄土、沙漠、滩地和河谷等地貌单元。模型识别的大气降水入渗系数分区值为:黄土梁岗区为 0.03,沙盖

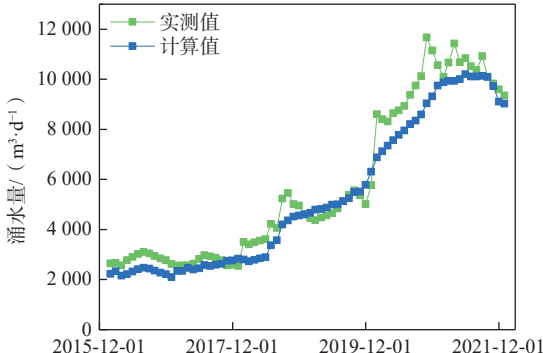


图 3 9#煤矿矿井实测与计算涌水量拟合曲线

Fig. 3 Fitting of the measured and calculated water inflow

黄土区为 0.13,沙漠区为 0.4,滩地区为 0.35,河谷区为 0.28。(2)模型区可分为 11 个水文地质参数分区,模型识别的各分区水文地质参数见表 1。

1.3 试验方案

对于 9#煤矿 3 号煤层,设置 2 种采矿方案,用数值模型对 2 种开采方案的矿坑涌水量及地下水水位下降和地下水溢出量等进行预测与分析。

方案 1:采用综采模式开采。采空区全部放顶,煤层层高 6.98 m,参照中能榆阳煤矿的实测裂采比 27.5,

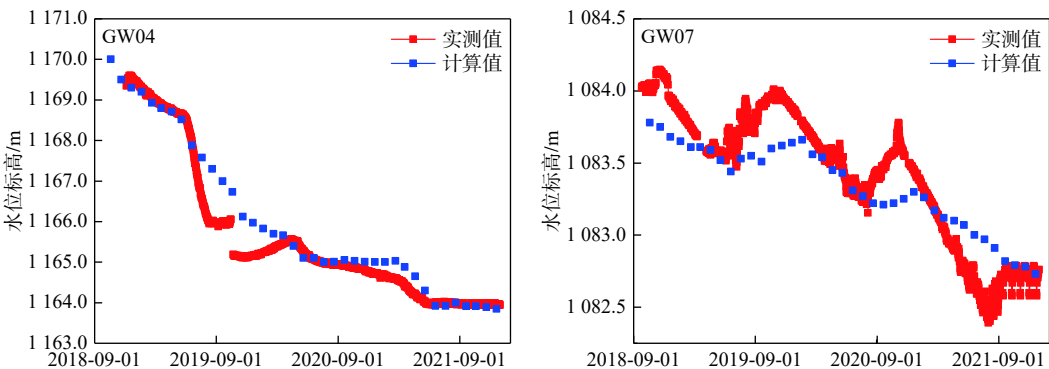


图 4 模型区代表性地下水水位动态拟合曲线

Fig. 4 Dynamic fitting of the representative groundwater levels in the model area

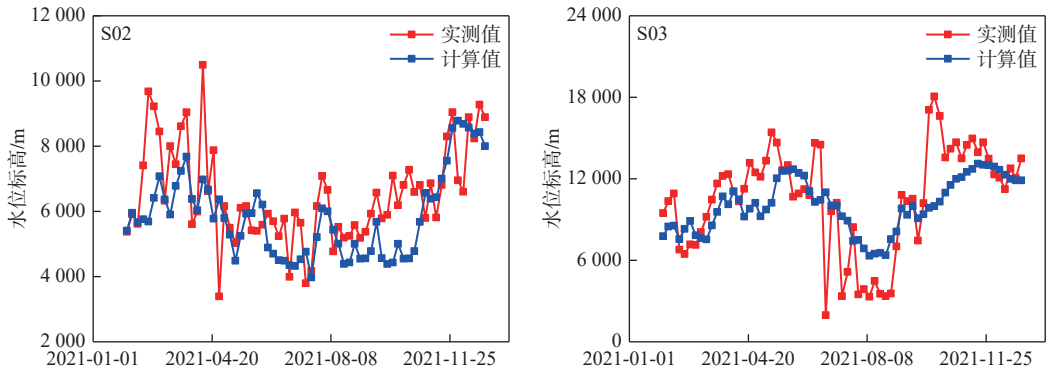


图 5 模型区代表性地表水流量动态拟合曲线

Fig. 5 Dynamic fitting of the representative surface water flow in the model area

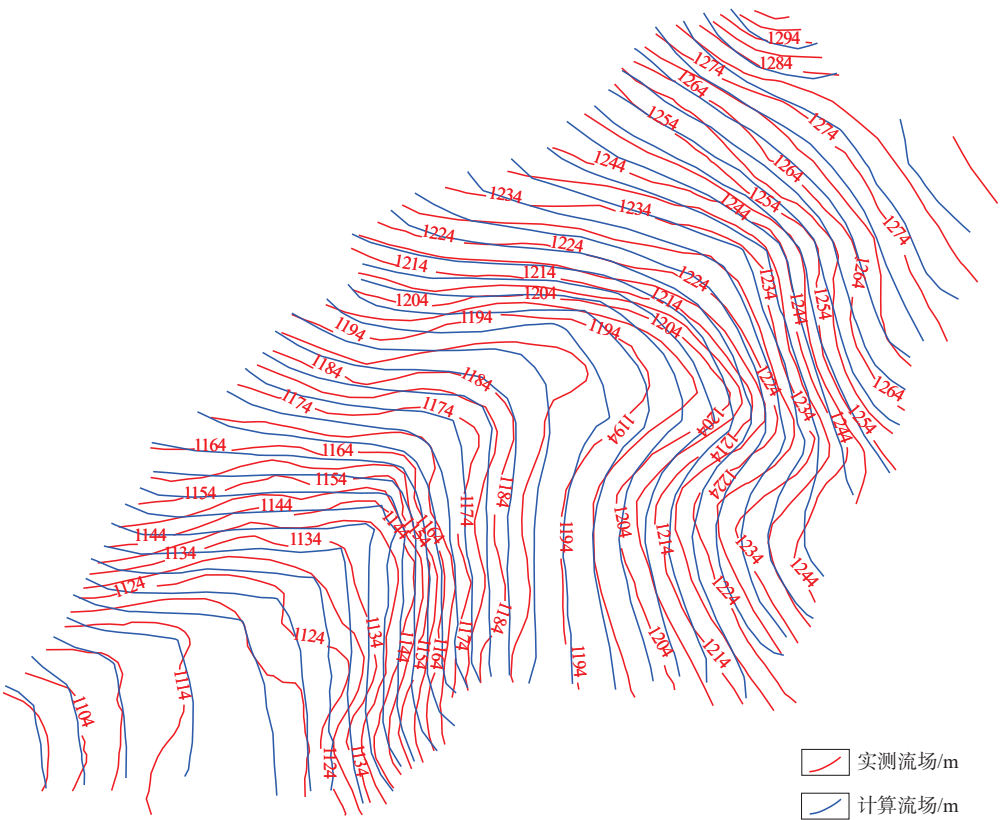


图 6 模型区第四系潜水流场拟合图

Fig. 6 Diagram showing the Quaternary submersible flow field fitting

表 1 模型区水文地质参数分区与参数值

Table 1 Hydrogeological parameter partition and parameter values in the model area

分层	分区编号	地层	渗透系数/(m·d ⁻¹)		给水度	弹性释水率/m ⁻¹	备注
			水平	垂直			
一层	I	河谷区砂土层	1.5	1	0.15		
	II	萨拉乌苏组砂层	1.85	1.85	0.17		
	III	萨拉乌苏组/黄土	0.93	0.05	0.12		上部萨拉乌苏组,下部黄土
	IV	黄土层	0.015	0.025	0.05		
二层	I	新近系岩层	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵		1×10 ⁻²⁰	
	II	侏罗系岩层	0.051	0.000 09		1×10 ⁻⁵	侏罗系原岩层
三层	全区	侏罗系岩层	0.051	0.000 09		1×10 ⁻⁵	导水裂隙带之上原岩层
四层	I	侏罗系岩层	35	55		1×10 ⁻⁵	导水裂隙带
	II	侏罗系岩层	0.051	0.000 09		1×10 ⁻⁵	导水裂隙带的两侧原岩层
五层	I	侏罗系煤层	—	—		1×10 ⁻⁵	采空区
	II	侏罗系煤层	0.08	0.000 5		1×10 ⁻⁵	采空区的两侧原煤层

注:—表示无此数据。

推算采空区导水裂隙带发育高度为 192 m, 煤矿开采区上覆基岩厚度为 69.53~163.13 m, 煤矿开采时矿区导水裂隙带将与第四系潜水完全沟通。

方案 2: 采用条带膏体充填模式开采。每组条带的开采高度为 6.98 m, 条带宽度为 6.5 m, 条带之间煤柱间隔为 19.5 m, 采完条带后, 对每组采空条带用矸石粉煤灰膏体进行充填。参照沟域东北部 12#煤矿充填

开采的实测导水裂隙带发育高度为 5 m, 作为该方案的导水裂隙带发育高度。煤矿开采时导水裂隙带在矿区内全部未导通第四系含水层。

在模型区内共设置模型预测期的区域地下水水位观测点 8 个、9#矿区附近地下水水位观测点 6 个, 模型预测期的观测点位置见图 3。根据煤矿设计的开采年限, 设置模型预测期时长为 22 a。

2 结果与分析

2.1 试验结果

2.1.1 矿坑涌水量

将地下水流模型识别得到的末流场(图 6)作为各方案预测的初始流场;将模型区的补给项按面源加入

模型;计算 2 种开采方案的 9#煤矿涌水量(表 2)。方案 1,煤矿开采预测期末矿坑涌水量为 15 391 m³/d,较预测期初的增加量为 6 961 m³/d;方案 2,煤矿开采预测期末矿坑涌水量为 9 577 m³/d,较预测期初的增加量为 1 147 m³/d。

表 2 各方案的地下水补排量预测成果

Table 2 Prediction results of groundwater recharge and discharge of each scheme						/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	
补排项	天然状态	预测期初	预测期末		变化量		
			方案1	方案2	方案1	方案2	
补给项	大气降水入渗补给量	4.49	4.32	4.49	4.49	0.17	0.17
	凝结水全年平均补给量	0.09	0.09	0.09	0.09	0	0
	农灌回归量	0.27	0.27	0.27	0.27	0	0
	地表积水入渗	0	0.16	0	0	-0.16	-0.16
	激发河库水入渗补给量	0	0	0.098 8	0	0.098 8	0
	合计	4.85	4.84	4.95	4.85	0.11	0.01
排泄项	地下水蒸发量	0.67	0.51	0.41	0.49	-0.1	-0.02
	地下水溢出量	3.83	1.37	1.17	1.33	-0.20	-0.04
	地下水开采量(农业)	0.36	0.36	0.36	0.36	0	0
	矿坑涌水量(9#煤矿)	0	0.843	1.539 1	0.957 7	0.696 1	0.114 7
	矿坑涌水量(头道河则其它煤矿)	0	3.07	3.07	3.07	0	0
	地下水径流流出量	0.04	0.02	0.02	0.02	0	0
	合计	4.90	6.17	6.57	6.23	0.40	0.05
均衡差	-0.05	-1.33	-1.62	-1.38			

2.1.2 地下水水位降深

模型模拟煤矿开采期末 2 种开采方案的矿区及区域地下水水位降深见图 7。方案 1,开采区及附近地下水水位最大降深为 17.92 m,区域地下水水位最大降深为 0.62 m。方案 2,开采区及附近地下水水位最大降深为 0.44 m,区域地下水水位最大降深为 0.06 m。

2.2 试验结果分析

模型区煤矿群开采状态下,模型拟合期末(预测期初)沟域内地下水溢出减少量为 2.46×10⁴ m³/d,占地下水天然溢出量(3.83×10⁴ m³/d)的 64.2%;同时,煤矿开采导致区域(长观孔)地下水水位下降幅度为 1.05~6.15 m(图 4)。煤矿群开采对地下水溢出量和地下水水位影响较大,说明沟域内煤矿群开采的影响不可忽视。因此,在研究区内构建模型进行矿井涌水量预测时,应考虑煤矿群开采对地下水环境的改变。

预测方案 1,因导水裂隙带全部沟通了第四系含水层,导致地下水水位大幅下降,进一步激发了河库水的入渗补给,补给量为 988 m³/d;预测方案 2,由于充填式开采的导水裂隙带高度大幅变小,引起的地下水水位降幅较小,并未诱发河库水的入渗补给。2 种预测方案的数值模拟结果均显示地下水处于负均衡状

态,预测期初的地下水负均衡量(1.33×10⁴ m³/d),主要是煤矿群开采涌水量增加,含水层储存量释放所致;预测期末的地下水负均衡,是预测期初地下水负均衡状态的进一步延续。2 种方案预测期末地下水负均衡量分别为 1.62×10⁴, 1.38×10⁴ m³/d;煤矿综采方式开采进一步加大了地下水的负均衡状态,而条带充填开采较之预测期初的地下水均衡状态的变化并不显著。

3 讨论

为了对比综采与条带充填开采对水环境的作用效果,基于煤矿群开采模型的预测成果,分析 9#煤矿综采与条带充填开采对地下水和地表水的影响。

3.1 矿坑涌水对地下水的影响

(1)地下水水量

根据预测结果,9#煤矿综采方式的矿坑涌水量的增加量约是充填开采方式的 6 倍;2 种开采方式的预测期末地下水溢出量,较预测初期地下水溢出量(13 700 m³/d)分别减少了 2 000, 400 m³/d,综采方式的地下水溢出量的减少量是充填开采方式的 5 倍(表 3)。充填开采较综采可以显著减少煤矿涌水量,可以有效抑制对地下水水位和地下水溢出量的影响。

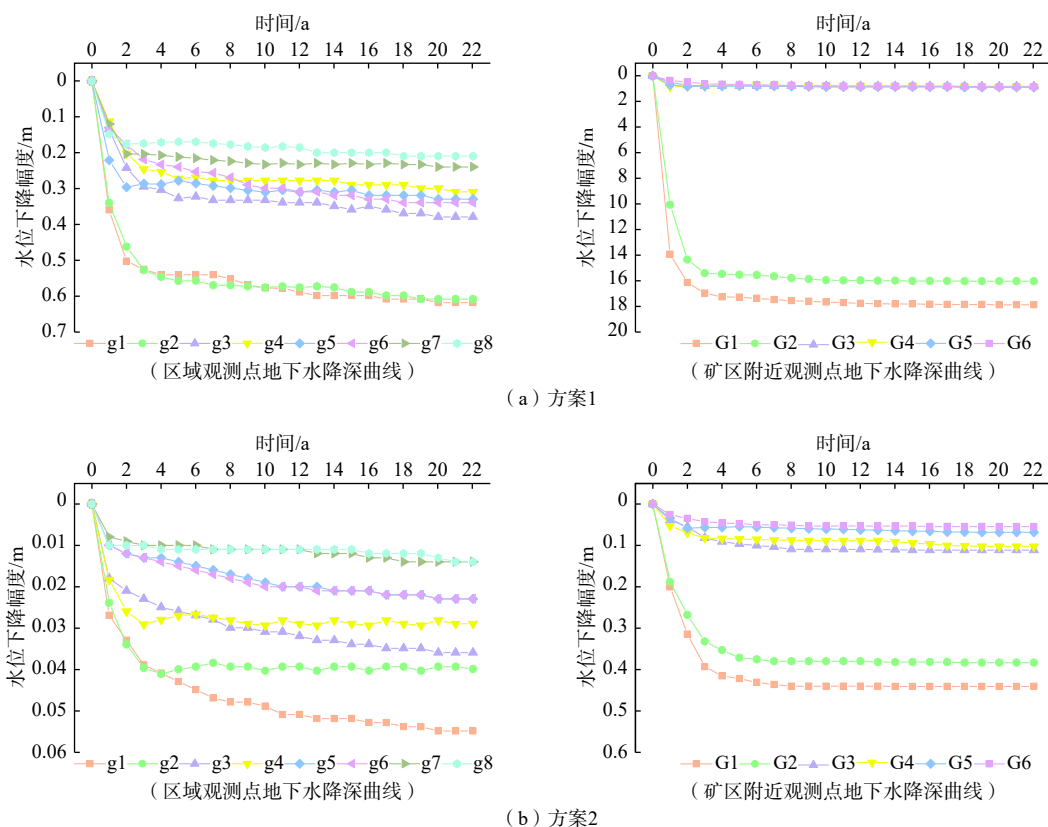


图 7 方案 1 和方案 2 预测观测点的地下水降深曲线

Fig. 7 Groundwater level drawdown of the observation wells under scheme 1 and scheme 2

表 3 预测期末煤矿综采与充填开采预测结果对比

Table 3 Comparison of fully mechanized mining and filling mining at the end of the prediction period

项目	煤矿涌水量 增加量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	溢出量减少量 /($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	矿区及附近地下 水水位下降/m	区域地下水 水位下降/m
综采 (方案1)	6 961	2 000	0.84 ~ 17.92	0.21 ~ 0.62
充填开采 (方案2)	1 147	400	0.05 ~ 0.44	0.01 ~ 0.06

(2) 地下水水位

研究区内由于煤矿的开采影响地下水径流的方向,围绕矿区形成了地下水局部的降落漏斗(图 8)。按综采方式进行采煤,矿区内地下水水位最大降深为 17.92 m,伴随产生超出矿区范围的降落漏斗,影响范围波及附近水库区,由于导水裂隙带导通潜水含水层,将造成第四系潜水含水层水位下降或疏干,对第四系

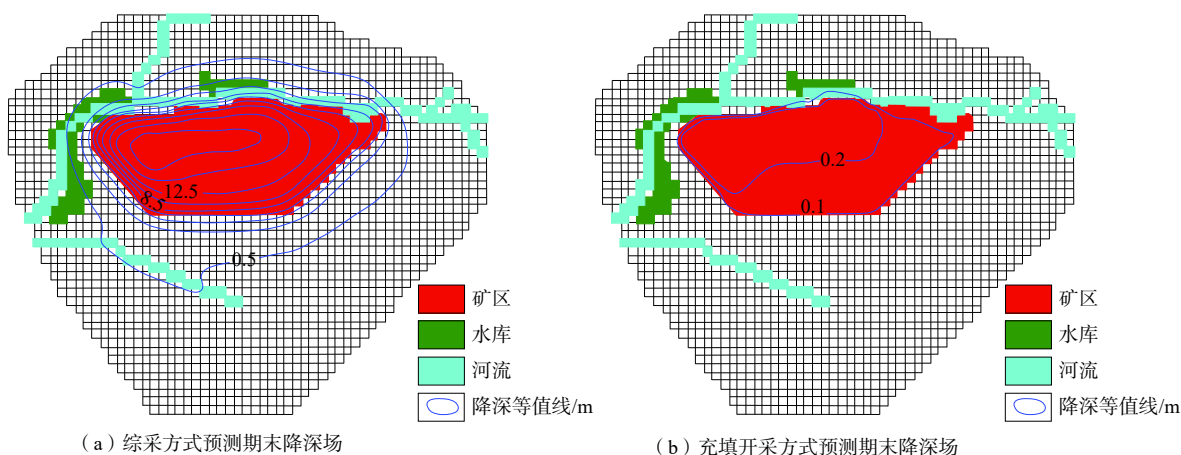


图 8 预测地下水末降深场

Fig. 8 Groundwater level drawdown field at the end of the prediction period

潜能有较大的影响;按充填开采方式采煤引发的煤矿涌水,矿区及区域地下水水位降深小于 0.44 m,降落漏斗影响范围多在矿区内部,对矿区外的区域影响很小。

(3) 萨拉乌苏组含水层地下水水位

研究区内第四系上更新统萨拉乌苏组孔隙潜水含水层富水性较强,具有较好的供水意义,对区内生态环境起着支撑作用,煤矿开采引发的地下水渗漏,会对其造成破坏,进而影响生态环境。因此,萨拉乌苏组是需要重点保护的含水层^[20-22]。

根据区内萨拉乌苏组含水层的地下水水位观测点(g1、g4—g8、G3、G4)的地下水水位降深可知,方案1的地下水水位下降高度为 0.21~0.85 m。煤矿按照综采方式进行采煤,矿坑涌水对萨拉乌苏组含水层地下水水位有一定影响;方案2的地下水水位下降高度小于 0.11 m,说明采用充填开采方式进行采煤时,矿坑涌水对萨拉乌苏组含水层地下水水位的影响很小。

3.2 矿坑涌水对地表水的影响

(1) 沟域地表水径流量

2021 年 2—12 月头道河则沟口的地表水平均流量为 6 503.70 m³/d。综采和充填开采的矿坑涌水,引起的地下水溢出减量占地表水平均流量的比例分别为 30.75%、6.15%。综采方式下,矿坑涌水较大程度地减少了地表水径流量;条带充填式开采,矿坑涌水对地表水径流量的影响程度较低。

(2) 水库库水

在煤矿附近建有石峁水库(库容 2 509×10⁴ m³)及十八墩水库(库容 623×10⁴ m³)。根据水库区地下水观测点 G5 与 G6 的统计数据,绘制沿河的地下水水位与河库水位差值变化曲线,见图 9。按照综采方式采煤时,石峁水库区的大部分地段和十八墩水库区的部分地段以及 2 个水库间的部分河段,地下水水位低于水库水位,说明综采方式矿坑涌水造成的地下水水位下

降将会引起库水漏失(补给地下水),存在诱发库水突水的危险;按照充填开采方式采煤时,水库区及全部河段的地下水水位均高于河库水位,说明 9#煤矿按照充填式方案采煤,矿坑涌水不会对水库库水造成影响。

4 结论

(1)煤矿群采时,涌水量主要袭夺地下水溢出量,引起地下水水位的持续下降。因此,在头道河则沟域内进行涌水量预测时,构建模型必须考虑完整沟域内煤矿群开采对地下水环境的整体影响。

(2)9#煤矿开采的预测期末,条带膏体充填开采的矿井涌水增加量约为综采的 1/6,说明条带充填开采可有效地降低导水裂隙带高度和大幅度减少煤矿涌水量。

(3)9#煤矿 3 号煤层上方覆岩厚度小,以综采方式采煤,导水裂隙带将导通潜水含水层,产生的矿井涌水量对矿区及区域水环境造成一定程度的破坏;若煤层以充填方式开采,矿坑涌水量对矿区及区域水环境影响较小。因此,建议煤矿企业在煤层覆岩厚度较薄且地表需要进行重要保护的地段进行采煤时,应对煤矿采取充填方式开采。

致谢:该研究的地下水监测数据由中国地质环境监测院的国家地下水监测工程项目提供,在此表示真挚的感谢!

参考文献 (References):

- [1] 康宁,武强,曾一凡,等.毛乌素沙漠南缘煤矿开采涌水及其对浅层地下水影响的预测分析[J].西北大学学报(自然科学版),2018,48(6):867-874. [KANG Ning, WU Qiang, ZENG Yifan, et al. Prediction of water yield from coal mining and its influence on shallow groundwater on the southern edge of Mu Us Desert[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2018, 48(6): 867 - 874. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 苏贺.榆神矿区煤矿开采矿井涌水量预测及其环境影响分析:以小保当1、2号井田为例[D].西安:西北大学,2014. [SU He. Forecasting research of mine inflow of coal mining of Yushen coal zone and its environment impact analysis[D]. Xi'an: Northwest University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 彭捷,李成,向茂西,等.榆神府区采动对潜水含水层的影响及其环境效应[J].煤炭科学技术,2018,46(2):156-162. [PENG Jie, LI Cheng, XIANG Maoxi, et al.

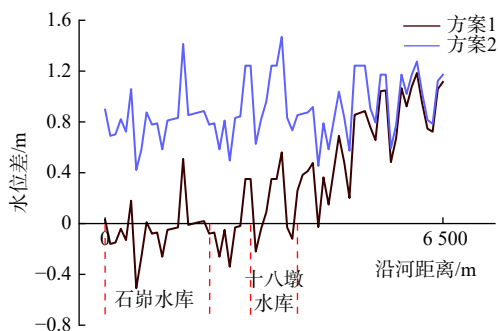


图9 2种方案地下水水位与河库水位差值沿河剖面图

Fig. 9 Difference in groundwater level and reservoir level along the river

- Influence of coal mining on phreatic aquifer and its environmental effects in Yulin-Shenmu-Fugu Area[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 156 – 162. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 虎维岳, 闫丽. 对矿井涌水量预测问题的分析与思考[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 13 – 18. [HU Weiyue, YAN Li. Analysis and consideration on prediction problems of mine water inflow volume[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 13 – 18. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 杜敏铭, 邓英尔, 许模. 矿井涌水量预测方法综述[J]. 四川地质学报, 2009, 29(1): 70 – 73. [DU Minming, DENG Yinger, XU Mo. Review of methodology for prediction of water yield of mine[J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29(1): 70 – 73. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 华解明. 矿井涌水量计算的非稳定流解析法[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(10): 38 – 40. [HUA Jieming. Unsteady flow analytic method in mine inflow computation[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(10): 38 – 40. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 高召宁, 孟祥瑞, 王向前. 矿井涌水量时间序列的长程相关性分析及分维数估算[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 31 – 35. [GAO Zhaoning, MENG Xiangrui, WANG Xiangqian. Analysis of long-range correlation and fractal dimension estimation of time series of mining water inflow[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(3): 31 – 35. (in Chinese)]
- [8] 马秀媛, 李逸凡, 张立, 等. 数值方法在矿井涌水量预测中的应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2011, 41(5): 86 – 91. [MA Xiuyuan, LI Yifan, ZHANG Li, et al. Numerical methods in predicting mine discharge[J]. Journal of Shandong University (Engineering Edition), 2011, 41(5): 86 – 91. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 凌成鹏, 孙亚军, 杨兰和, 等. 基于BP神经网络的孔隙充水矿井涌水量预测[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(5): 55 – 58. [LING Chengpeng, SUN Yajun, YANG Lanhe, et al. Prediction of inrush water of mine with pore water yield based on BP artificial neural network[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(5): 55 – 58. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈酩知, 刘树才, 杨国勇. 矿井涌水量预测方法的发展[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(1): 68 – 72. [CHEN Mingzhi, LIU Shucui, YANG Guoyong. The development of mining water inflow predict method[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(1): 68 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李超峰, 虎维岳. 回采工作面顶板复合含水层涌水量时空组成及过程预测方法[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 1 – 13. [LI Chaofeng, HU Weiyue. Prediction method of mine water inflow regime from a layered extra-thick aquifer[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3): 1 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 黄欢. 矿井涌水量预测方法及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(增刊1): 127 – 130. [HUANG Huan. Prediction method of mine inflow and its development[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(Sup 1): 127 – 130. (in Chinese)]
- [13] 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 coal mining workplace below the concealed fire area based on GMS[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(5): 2482 – 2492. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 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 Houjian, LIU Shouqiang, LI Zhe, et al. Prediction of numerical simulation for mine water inflow based on visual modflow[J]. Coal Technology, 2018, 37(8): 155 – 157. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 胡炳南. 我国煤矿充填开采技术及其发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(11): 1 – 5. [HU Bingnan. Backfill mining technology and development tendency in China coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(11): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李叔磊, 冯涛, 李石林. 条带膏体充填开采地表沉陷研究[J]. 采矿技术, 2012, 12(6): 9 – 11. [LI Shulei, FENG Tao, LI Shilin. Study on surface subsidence of strip paste filling mining[J]. Mining Technology, 2012, 12(6): 9 – 11. (in Chinese)]
- [18] 缪协兴, 巨峰, 黄艳利, 等. 充填采煤理论与技术的新进展及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 391 –

399. [MIAO Xiexing, JU Feng, HUANG Yanli, et al. New development and prospect of backfilling mining theory and technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(3): 391 – 399. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 屈稚林. 麻黄梁煤矿CT301工作面窄条带膏体充填开采技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019. [QU Zhilin. Research on narrow strip paste filling mining technology at CT301 working face of Mahuangliang coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 范立民. 陕北地区采煤造成的地下水渗漏及其防治对策分析[J]. 矿业安全与环保, 2007(5): 62 – 64. [FAN Limin. Analysis of groundwater seepage caused by coal mining in northern Shaanxi and its prevention and control measures[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2007(5): 62 – 64. (in Chinese)]
- [21] 范立民, 王国柱. 萨拉乌苏组地下水及采煤影响与保护[J]. 采矿技术, 2006(3): 422 – 425. [FAN Limin, WANG guozhu. Groundwater and coal mining impact and protection in the Salasu Formation[J]. Mining Technology, 2006(3): 422 – 425. (in Chinese)]
- [22] 张茂省, 卢娜, 陈劲松. 陕北能源化工基地地下水开发的植被生态效应及对策[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1299 – 1312. [ZHANG Maosheng, LU Na, CHEN Jinsong. Ecological effects of vegetations during groundwater exploitation in the Northern Shaanxi Energy & Chemical Industry Base, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(8): 1299 – 1312. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳