



## 矿井水深层回灌过程量质耦合模拟分析

赵春虎, 杨建, 王世东, 周建军, 许峰, 刘基

引用本文:

赵春虎, 杨建, 王世东, 等. 矿井水深层回灌过程量质耦合模拟分析[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 36–44.

ZHAO Chunhu, YANG Jian, WANG Shidong, et al. Coupling simulation of groundwater dynamics and solute transfer in the process of deep reinjection of mine water[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(5): 36–44.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.004>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 我国煤矿区矿井水污染问题及防控技术体系构建

Mine water drainage pollution in China's coal mining areas and the construction of prevention and control technical system  
煤田地质与勘探. 2021, 49(5): 1–16 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.001>

### 高盐矿井水深部转移存储介质特征与水动力演化规律

Medium characteristics and hydrodynamic evolution law of high salinity mine water recharge in deep well  
煤田地质与勘探. 2021, 49(5): 29–35 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.003>

### 基于MODFLOW的闭坑矿井水位回升预测

MODFLOW-based groundwater rebound forecast in abandoned coal mine  
煤田地质与勘探. 2018, 46(z1): 27–32 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.S1.006>

### 高矿化度矿井水深部转移存储介质条件及影响机制

Medium conditons and influence mechanism of high salinity mine water transfer and storage by deep well recharge  
煤田地质与勘探. 2021, 49(5): 17–28 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.002>

### 山东新巨龙煤矿区场地高TDS地下水水化学特征及成因机制

Hydrochemical characteristics and genetic mechanism of high TDS groundwater in Xinjulong Coal Mine  
煤田地质与勘探. 2021, 49(5): 52–62 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.006>



移动阅读

赵春虎, 杨建, 王世东, 等. 矿井水深层回灌过程量质耦合模拟分析[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 36–44. doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.004  
ZHAO Chunhu, YANG Jian, WANG Shidong, et al. Coupling simulation of groundwater dynamics and solute transfer in the process of deep reinjection of mine water[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 36–44. doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.004

## 矿井水深层回灌过程量质耦合模拟分析

赵春虎<sup>1,2</sup>, 杨建<sup>1,2</sup>, 王世东<sup>1,2</sup>, 周建军<sup>1,2</sup>, 许峰<sup>1,2</sup>, 刘基<sup>1,2</sup>

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077;

2. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 矿井水深层回灌是矿井水“转移存储”处理的主要形式, 根据鄂尔多斯盆地煤矿区地质和矿井水特征, 从回灌目的层地下水与矿井水的匹配性、上下岩层的隔水性、回灌层的渗透性以及封闭性角度提出了矿井水回灌目的层选取依据。并以地下水达西定律和 Dupuit 理论为基础, 建立极坐标系完整注水井稳定流数学模型, 得出在稳定注水条件下, 回灌量与注水层渗透系数、厚度、回灌压力、水位埋深以及回灌井直径正相关, 与影响半径负相关, 与回灌层埋深无关。提出了矿井水深层回灌水动力和溶质运移耦合仿真模型构建方法, 并以矿井水回灌试验案例为分析对象, 模拟得出矿井水回灌过程中含水层水压形成以注水井为中心的“高位水丘”, 且注水压力越大, 回灌量增加较为明显, 模型分析结果与现场试验结果基本一致。溶质运移范围形成以注水井为中心的“圆柱状”弥散形态, 特征离子浓度沿回灌井两侧变化剧烈, 回灌层特征离子浓度被迅速稀释, 随着时间的延伸, 弥散稀释范围增加相对较小, 说明矿井水回灌对深部高浓度含水层地下水水化学影响程度不大, 研究成果可为西部煤矿区矿井水高效回灌处理提供科学依据。



语音讲解

**关键词:** 矿井水处理; 回灌; 溶质运移; 渗流; 数值模拟

**中图分类号:** TD32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2021)05-0036-09

### Coupling simulation of groundwater dynamics and solute transfer in the process of deep reinjection of mine water

ZHAO Chunhu<sup>1,2</sup>, YANG Jian<sup>1,2</sup>, WANG Shidong<sup>1,2</sup>, ZHOU Jianjun<sup>1,2</sup>, XU Feng<sup>1,2</sup>, LIU Ji<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The deep well reinjection of mine water is a main form of “transfer storage” treatment of mine water. According to the geological and mine water characteristics of the coal mine area in Ordos Basin, the paper puts forward the basis for selecting the target layer of mine water reinjection from the perspective of good matching between groundwater and mine water in the target layer of reinjection, the water isolation of upper and lower strata, permeability and sealing of the reinjection layer. Based on Darcy's law of groundwater and Dupuit's theory, a mathematical model of steady flow of water injection well in polar coordinate system is established. It is concluded that under the condition of steady water injection, the reinjection quantity is positively correlated with the permeability coefficient, thickness, reinjection pressure, water level burial depth and reinjection well diameter of water injection layer, negatively correlated with the influence radius, and it has nothing to do with the burial depth of water injection layer. The construction method of coupling simulation model of groundwater dynamics and solute transfer in the process of deep mine water reinjection was put forward, and mine water reinjection test was taken as the analysis object. The simulation results show that the formation of water injection well is the “high water

mound” in the process of high-pressure mine water reinjection; the higher the injection pressure is, the more obvious the reinjection amount is. The model analysis results are basically consistent with the field test results. Moreover, the solute transfer range forms a “cylindrical” dispersion shape centered on the water injection well; the ion concentration changes sharply along both sides of the reinjection well; the ion concentration of the aquifer is rapidly diluted. With the extension of time, the increase of dispersion dilution range is relatively small, which indicates that the relative recharge of mine water has little effect on groundwater chemistry of deep high concentration aquifer. The research results are expected to provide scientific basis for efficient recharge of mine water in western coal mining area.

**Keywords:** mine water treatment; reinjection; solute transfer; seepage; numerical simulation

西部煤矿区(包括晋陕蒙宁甘新)位于干旱-半干旱地区,是保障我国能源安全的核心区域,煤炭储量和产量均占全国70%以上,水资源总量仅占全国水资源总量7.9%,高强度的煤炭资源开发过程中,不可避免地排放大量地下水<sup>[1-2]</sup>,仅鄂尔多斯盆地每年矿井水排放量就超过10亿m<sup>3</sup>。孙亚军等<sup>[3]</sup>根据矿井水的组成成分将矿井水污染类型划分为常见组分、酸性、高矿化度、高硫酸盐、高氟<sup>[4]</sup>、碱性及含特殊组分7种类型,各类型的矿井水长期外排易诱发地表水、浅层地下水污染等生态环境负面响应。

党的十九大报告指出:必须树立和践行绿水青山就是金山银山的理念,坚持节约资源和保护环境的基本国策。2015年《内蒙古自治区水功能区管理办法》要求“禁止新增、扩建入河排污口”;2018年《煤炭行业绿色矿山建设规范》中要求“水资源短缺矿区,矿井水利用率要求达到100%”;2020年国家能源局、生态环境部、国家发展和改革委员会联合发布《关于进一步加强煤炭资源开发环境影响评价管理的通知》,提出“矿井水在充分利用后仍有剩余且确需外排的,应满足或优于受纳水体环境功能区划规定的地表水环境质量对应值,含盐量不得超过1000mg/L”等要求。可见国家和地方关于高矿化度矿井水达标排放和资源化回用的政策日益趋严,对西部矿区矿井水处理提出了新的挑战。

矿井水处理可分为“被动资源化”和“主动减排”2种模式。以采煤工艺优化为主、抑制导水裂缝发育为目标的“分层<sup>[5]</sup>、限高<sup>[6]</sup>、条带<sup>[7]</sup>、充填<sup>[8-9]</sup>、并行”等主动减排工艺,仍然面临高成本、低资源采出率的技术难题<sup>[10]</sup>。近年来,将矿井水的主要充水含水层通过注浆加固、建设地下连续帷幕墙体<sup>[11-12]</sup>等也逐步应用于矿井水主动减排的工程实践中,但前期投资费用过大是限制该项技术推广的主要原因。而传统的矿井水处理利用方法多为被动资源化模式,一般是将矿井水由井下水仓排出,针对不同的矿井水质特点,采用混凝、吸附、过滤、沉淀、消毒、除盐、软化等地面处理工艺使矿井水达到复

用水质要求后回用,相关水处理设施存在基建投资大、占地面积大、工序复杂、运营费用高、运行不稳定等特点。顾大钊等<sup>[13-14]</sup>在浅部煤层区开展了以“地下水库”为核心的矿井水“原位储存”保护的工程实践。

矿井水深层回灌是减少矿井水外排的一种被动处理方法,在不改变采煤工艺的条件下,从地面施工钻井,将预处理后的矿井水回灌至深部的含水层中,以实现矿井水“转移存储”,具有施工工艺相对简单、运行成本低等优势。任学勤等<sup>[15]</sup>在河北中关铁矿全封闭注浆帷幕后,通过回灌井将矿井水灌入帷幕外的地下含水层中;李世峰等<sup>[16]</sup>在河北峰峰矿区梧桐庄井田,将矿井水回灌至厚度大、渗透性好、矿化度接近的奥灰含水层,实现矿井水零排放;孙亚军等<sup>[17]</sup>提出将神东矿区煤层上覆的第四系松散层地下水和处理后的矿井水转移存贮到深部的承压含水层的技术思路。曾繁富等<sup>[18]</sup>认为鄂尔多斯乌审旗一带三叠系刘家沟组为典型漏层,并从回灌环境影响、矿产影响角度分析了高矿化度矿井水回灌目的层的可行性;杨光辉等<sup>[19]</sup>、陈歌<sup>[20]</sup>以该地层为回灌层,开展神东煤炭基地呼吉尔特矿区某井田矿井水深层回灌试验,验证了矿井水深层回灌的可行性。

笔者以鄂尔多斯某矿井深层回灌井为研究对象,分析了回灌目的层选取的一般依据,并根据地下水达西定律和Dupuit原理,建立完整注水井稳定流模型,识别深层回灌影响因素。通过建立回灌井水动力和溶质运移耦合仿真模型,定量研究了矿井水深层回灌过程水动力-溶质时空变化规律,以期西部煤矿区矿井水高效回灌处理提供借鉴。

## 1 矿井水深层回灌层选取与回灌量影响因素

### 1.1 矿井水深层回灌层选取依据

鄂尔多斯盆地煤矿区主采侏罗系延安组煤层,埋深一般为100~700m,矿井水主要来源为煤层上覆的延安组、直罗组含水层地下水。据统计,陕西

彬长、榆横矿区, 内蒙古呼吉尔特、纳林河等深部矿区, 生产矿井正常涌水量一般在  $1\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$  以上, 矿井水 TDS 在  $800\sim 13\ 000\ \text{mg/L}$ , 总硬度在  $100\sim 3\ 000\ \text{mg/L}$ , 绝大部分均为高矿化度矿井水<sup>[21]</sup>, 如陕西彬长矿区生产矿井高矿化度矿井水占比 90%, 内蒙古自治区 22 座煤矿中高矿化度矿井水占比 86.4%<sup>[22]</sup>, 且随着煤层埋深的增加, 含水层地下水矿化度增大趋势较为明显。特别在鄂尔多斯深部煤矿区, 涌水量大、矿化度高是矿井水的普遍特征。

根据鄂尔多斯盆地煤矿区地质和矿井水特征, 从安全、效率方面提出一般矿井水回灌目的层选取依据。

(1) 回灌目的层地下水与矿井水要有良好的匹配性。一般要求矿井水回灌层地下水矿化度不小于矿井水最大矿化度, 由于鄂尔多斯煤矿区高矿化度矿井水主要来源为煤层上覆的延安组、直罗组含水层, 根据地下水一般径流和矿化度垂向上的分布规律, 回灌目的层应选择含煤岩系以下地层。

(2) 回灌目的层的上下岩层具有良好隔水性。一是回灌目的层与区域可供利用的地下含水层之间夹有良好的隔水层, 以保障矿井水回灌不会对可利用地下水资源产生污染。二是回灌目的层与煤层底板之间夹有良好的隔水层, 以保障矿井水回灌不会对煤层开采带来突水风险。另外, 鄂尔多斯盆地是一个煤、油、天然气和铀共存的沉积盆地, 因此, 回灌目的层与地区二叠系下统的山西组储气层、三叠系延长组储油层之间要有良好的隔水层<sup>[23]</sup>, 以保障矿井水回灌不会对油气资源开采带来影响。

(3) 回灌目的层具有良好的渗透性和足够的储水空间。矿井水通过高压注入回灌层, 回灌层良好的渗透性能和足够的原生岩层裂隙空间, 是保障矿井水回灌量与回灌效率的基础。同时, 回灌层裂隙宏观空间发育特征是回灌井型选择的重要依据, 如水平裂隙型岩层以垂直井为宜, 垂向裂隙发育为主的岩层可考虑地面定向井。

(4) 回灌目的层具有良好的封闭性, 一般要求区域构造比较简单, 没有发育大型导水断层或破碎带, 回灌水影响的区域内无地表水体出露或出露点, 保障回灌含水层与其他含水层、地表水体间无串层、泄露污染等影响。

另外, 回灌井施工技术难度, 回灌运行费用评估等也是回灌层选取重要考虑因素。

## 1.2 研究区回灌案例

某生产矿井位于鄂尔多斯神府—东胜煤田, 井田自上而下地层依次为: 第四系、白垩系下统志丹群和洛河组、侏罗系中统安定组、中下统延安组、三叠系上统延长组、中统二马营组和尚沟组、下统刘家沟组和二叠系上统石千峰组。主采侏罗系延安组 3<sup>-1</sup> 煤层, 矿井正常涌水量为  $1\ 600\ \text{m}^3/\text{h}$ , 涌水来源为煤层上覆延安组砂岩段和直罗组底部砂岩段, 矿井水水化学类型为  $\text{SO}_4\text{-Na}$  型, 阴离子中  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度最高, 均值  $920\ \text{mg/L}$ , 其次为  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ , 均值分别为  $223.5$ 、 $71.7\ \text{mg/L}$ , TDS 为  $1\ 134\sim 2\ 411\ \text{mg/L}$ , 均值  $1\ 662\ \text{mg/L}$ , pH 值  $7.90\sim 8.33$ 。参考 GB/T 14848—2017《地下水质量标准》中Ⅲ类地下水标准值,  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度和 TDS 均超标。该井田矿井水具有水量大、矿化度高的典型特征。

为实现高矿化度矿井水的零排问题, 井田施工矿井水深层回灌试验井, 并根据鄂尔多斯盆地相关气井<sup>[24-25]</sup>、神华  $\text{CO}_2$  捕集与封存监测井(内蒙古鄂尔多斯市伊金霍洛旗)<sup>[26]</sup>, 以及 MC-1 试验井相关测试成果, 将普遍存在区域性井漏现象的三叠系下统的刘家沟组砂岩层为预处理后的矿井水注水层, 该层厚度  $496\ \text{m}$ (埋深  $1\ 804\sim 2\ 300\ \text{m}$ ), 钻井过程井漏现象明显, 取心较为破碎, 表现出较为良好的渗透性。该层距离上部主采煤层底板  $900\ \text{m}$  左右, 距离地区主要供水含水层白垩系志丹群约  $1\ 800\ \text{m}$ , 距离下部二叠系下统的山西组储气层约  $500\ \text{m}$  以上<sup>[18]</sup>。三叠系刘家沟组上覆为和尚沟组(厚度  $198\ \text{m}$ ), 下伏石千峰组(厚度  $291\ \text{m}$ ), 上下地层以细砂岩与砂质泥岩互层为主, 为厚度稳定、渗透性能极弱的相对隔水层。

据神华 CCS 示范工程深井水样显示, 刘家沟组主要含水层水化学类型为  $\text{Cl-Ca-Na}$  型, 其主要阴离子为  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  质量浓度达  $39\ 740\ \text{mg/L}$ 、占阴离子总量的 94.96%,  $\text{SO}_4^{2-}$  为  $2\ 080\ \text{mg/L}$ 、占 4.96%; 主要阳离子为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ , 分别为  $14\ 510$ 、 $7\ 820\ \text{mg/L}$ , TDS 达  $65\ 111.14\ \text{mg/L}$ , pH 值 5.35。下部石千峰组地下水水化学类型为  $\text{Cl-Ca-Na}$ , TDS 为  $31\ 212.34\ \text{mg/L}$ , pH 值 4.64。顶板和尚沟组地下水水化学类型为  $\text{Cl-Ca-Na}$ , TDS 为  $22\ 488.06\ \text{mg/L}$ , 均明显大于该矿井 TDS。

综上所述, 厚度稳定、钻井液漏失相对明显、上下地层隔水层性能良好、与煤油气储层距离远, 地下水矿化度明显大于矿井水的三叠系刘家沟组满足矿井水回灌层选取要求。该井田矿井水深层回灌

试验井深 2 299.5 m, 井径 215.90 mm(回灌层段), 动力源为井口高压泵, 在回灌压力 6~10 MPa 条件下, 稳定回灌量 65~120 m<sup>3</sup>/h<sup>[19-20]</sup>, 实现了矿井水“转移存储”。

### 1.3 矿井水深层回灌影响因素

矿井水回灌量是回灌井层位选取、回灌工艺设计的重要基础。以前文中垂直完整回灌井案例为分析对象, 矿井水深层回灌过程如图 1 所示。

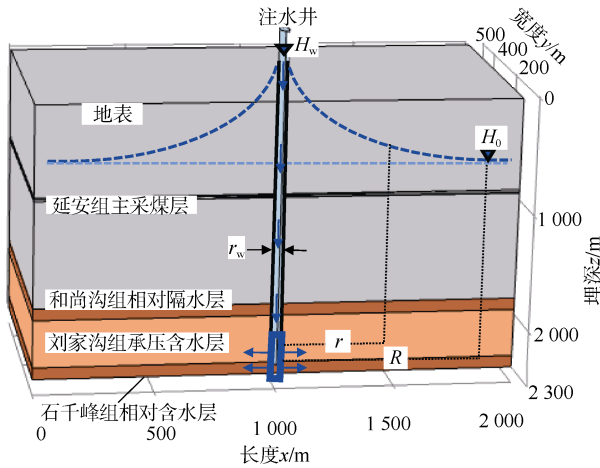


图 1 矿井水深层回灌

Fig.1 Schematic diagram of deep recharge of mine water

将矿井水深层回灌概化为稳定流过程, 根据地下水达西定律和 Dupuit 假定, 在极坐标系中, 稳定流完整井抽注水过程中任意断面流量  $Q$  相等, 回灌量  $Q$  可由下式计算:

$$Q = KA \frac{dH}{dr} \quad (1)$$

注水井注水过程中渗流断面为圆柱面, 即面积  $A=2\pi rM$ , 则:

$$Q = 2\pi KMr \frac{dH}{dr} \quad (2)$$

分离变量积分, 取积分限,  $r$  由  $r_w$ (井径)至  $R$ (影响半径), 水位  $H$  由  $H_w$  至  $H_0$ , 则:

$$Q = \frac{2\pi KM(H_w - H_0)}{\lg \frac{R}{r_w}} \quad (3)$$

式中:  $K$  为注水层渗透系数, m/d;  $M$  注水层厚度, m;  $H$  为回灌过程中注水层水位高程, m;  $H_w$  为注水孔内水位高程, m;  $H_0$  为注水层回灌前水位高程, m;  $r$  为注水孔中心至注水层外围的距离, m;  $r_w$  为注水孔半径, m;  $R$  为影响半径, m。

为便于分析, 定义  $p$  为回灌井孔口压力表读数, MPa;  $L_0$  为注水层回灌前水位埋深, m;  $Z$  为注水层段任一点至地面距离, m。则式(3)中注水井内水头

为  $H_w = p/\rho g + Z$ ,  $H_0 = Z - L_0$ , 由此:

$$Q = \frac{2\pi KM(\frac{p}{\rho g} + L_0)}{\lg \frac{R}{r_w}} \quad (4)$$

由式(4)可见, 承压含水层完整井在稳定注水条件下, 回灌量与注水层渗透系数  $K$ 、厚度  $M$ 、回灌压力  $p$ 、水位埋深  $L_0$  以及回灌井半径  $r_w$  呈正相关, 与影响半径  $R$  呈负相关, 与回灌层埋深  $Z$  无关。

## 2 矿井水深层回灌规律仿真构建

以前节回灌试验井为仿真案例, 开展矿井水深层回灌地下水系统仿真模型的构建。

### 2.1 回灌水动力与溶质运移数学模型

#### 1) 水动力模型

矿井水深层回灌为有压回灌, 为了便于分析, 模型中将水头  $H$  均换算成水压  $p$ , 采用达西非稳定流数学模型刻画回灌过程。

达西非稳定流数学模型:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(n_e \rho) + \nabla \cdot (\rho v) &= Q_m \\ \frac{\partial}{\partial t}(n_e \rho) &= \rho S \frac{\partial p}{\partial t} \\ v(x, y, z, t) &= -\frac{k}{\rho g} \nabla p \end{aligned} \quad (5)$$

根据地下水流连续性原理, 在回灌井与回灌层接触面上具备水压连续和流速连续水动力条件, 因此, 模型可将该接触面定义为一类水头边界:

$$p(x, y, z, t)|_{\Omega} = p_k + 10^{-6} z \rho g \quad (6)$$

回灌量为:

$$Q(x, y, z, t)|_{\Omega} = \iint_{\Omega} v(x, y, z, t) d\Omega \quad (7)$$

回灌层初始条件:

$$p_0(x, y, z)|_{t=0} = 10^{-6} z \rho g \quad (8)$$

式中:  $p_0$  为  $t=0$  时渗流区的初始水压值, MPa;  $p_k$  为回灌井孔口压力, MPa;  $n_e$  为含水层有效孔隙率, %;  $\nabla$  为拉普拉斯算子;  $v$  为地下水达西流速, m/d;  $k$  为含水层渗透率, m<sup>2</sup>;  $S$  为承压含水层弹性给水度, d<sup>-1</sup>;  $t$  为时间, d;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $Q_m$  为地下水质量源, kg/d;  $z$  为回灌井内某点埋深, m;  $\rho$  为注水体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\Omega$  为回灌井与回灌层的接触面区域。

#### 2) 溶质运移对流-弥散模型

水动力弥散是指溶质在多孔介质中机械弥散和分子扩散过程, 机械弥散是由于多孔介质中溶剂(地下水)速度不均一, 水动力梯度驱动的溶质运移现象; 分子扩散是由于溶剂中所含溶质的浓度不均一, 浓度梯度驱动下的一种物质运移现象; 是一个同时



存在、不稳定与不可逆转的过程。在不考虑饱和孔隙介质中溶质的吸附、沉淀、溶解、离子交换、化学反应等作用，溶质运移的对流弥散方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e \times C) = \nabla \cdot (D \times \nabla C) - u \nabla C \tag{9}$$

式(9)中右边第一项为分子扩散驱动的溶质运移过程，第二项为地下水流动驱动的组分运移。

回灌层溶质浓度初始条件： $C(x,y,z)|_{t=0} = C_0$ ；

回灌层外围为无限元定浓度边界条件：

$$C(x,y,z) = C_0$$
；

在回灌井与回灌层接触面上根据水流连续性原理，在模型中可将该接触面定义为一类定浓度边界：

$$C(x,y,z,t)|_{\Omega} = C_1$$
。

式中： $C$  为回灌过程中渗流区特征离子质量浓度，mg/L； $C_1$  为矿井水特征离子质量浓度，mg/L； $u$  为地下水实际流速，m/d； $D$  为水动力弥散系数，m<sup>2</sup>/d，其中  $D = \alpha v$ ， $\alpha$  为弥散度，m。

在溶质运移对流-弥散模型中，通过地下水的实际流速  $u$  与达西流速  $v$  关系( $u = v/n_e$ )，调用水动力模型中的达西流速  $v$  实现水动力模型与溶质运移模型的耦合。

2.2 矿井水深层回灌数值模型

根据区域与 MC-1 矿井水深层回灌试验井地质与水文地质特征，以回灌层刘家沟组砂岩含水层为模拟对象，分别以和尚沟组与石千峰组弱透水地层为模型上下边界，并将回灌含水层外围边界概化成“大范围”的无限展布的充水含水层，以减少“小范围”人为水头边界与流量边界的影响，也减少了模型单元剖分量。

利用有限元三角四面体单元剖分方法，以回灌井孔径尺寸的 1/3 为最小单位剖分标准，对回灌井孔壁进行局部精细剖分。另外，回灌井在非注水层地层段为止水固井段，无注水体渗入，因此，以注水含水层上下面为界，仅构建回灌井与注水含水层直接接触段，并以注水井中心为对称断面，建立含水层与回灌复合刻画计算机模型(图 2)，提高整个模型网络剖分质量。

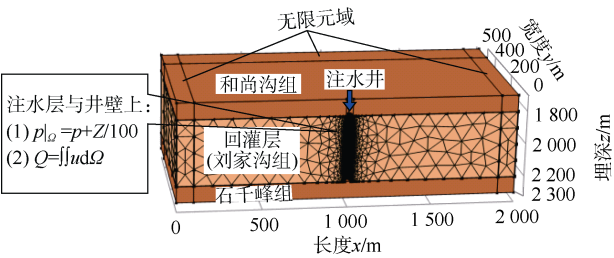


图 2 矿井水深层回灌数值模型

Fig.2 Numerical model of deep recharge of mine water

根据案例的矿井回灌层水文地质特征和矿井水水化学特征，模型主要参数见表 1。

表 1 模型主要参数  
Table 1 Main parameters of the numerical model

参数	数值
注水井直径/mm	216
注水井深度/m	496
回灌层初始水位埋深/m	200
回灌层渗透系数 $K/(m \cdot d^{-1})$	0.011 3
回灌层弹性给水度 $S/d^{-1}$	$5 \times 10^{-8}$
回灌层横向弥散度 $\alpha_t/m$	0.5 <sup>[27]</sup>
回灌层纵向弥散度 $\alpha_l/m$	5 <sup>[27]</sup>
矿井水 $Cl^-$ 质量浓度/( $mg \cdot L^{-1}$ )	70
回灌层 $Cl^-$ 初始质量浓度 $C_0/(mg \cdot L^{-1})$	40 000
井口回灌压力 $p/MPa$	6、7、8

3 矿井水深层回灌仿真案例

3.1 水动力场演化规律

矿井水深层回灌试验井以井口高压泵为动力源，图 3a 是注水前地下水流场的分布图，回灌前

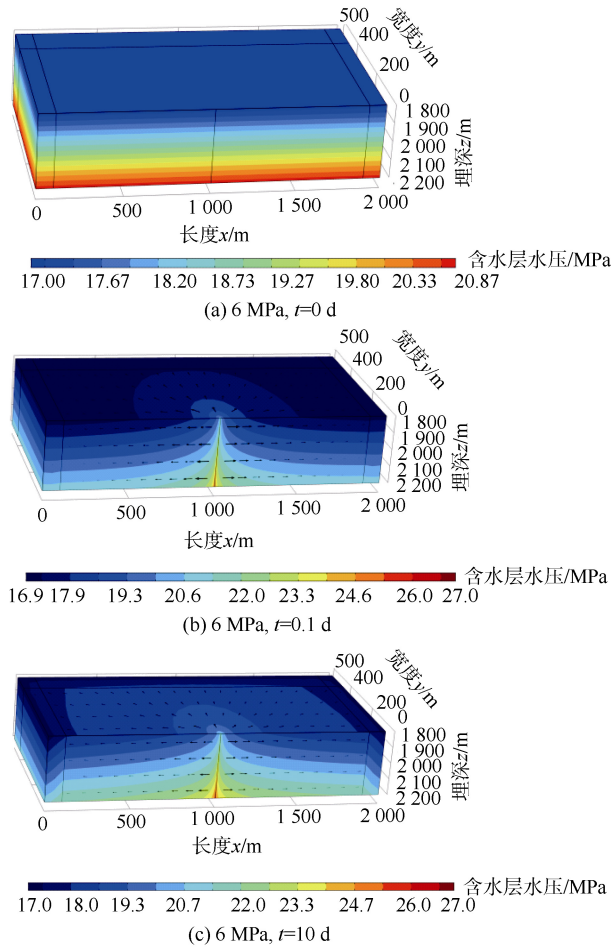


图 3 矿井水深层回灌过程中地下水动力演化

Fig.3 Simulation map of groundwater dynamic evolution in the process of deep groundwater recharge

注水含水层水压重力作用下随埋深增加而增大,回灌过程中,注水井周边注水含水层大面积水压增加明显,形成以注水井为中心的“高位水丘”(图 3b,图 3c),而在回灌井两侧外围水压增加幅度明显减缓(图 4),说明相对高压矿井水回灌会对深部含水层较大范围的地下水动力条件产生影响,形成以注水井为中心的“高位水丘”区,但在外围影响程度相对较小。

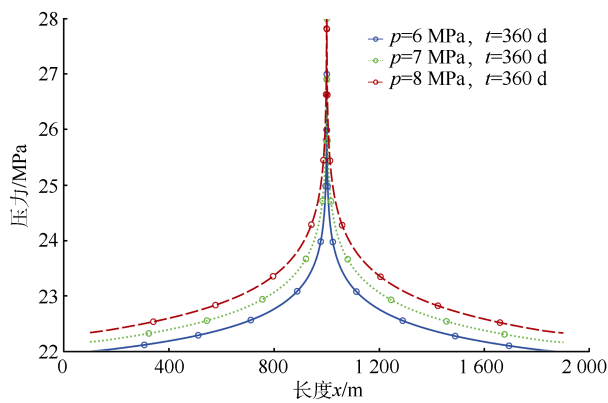


图 4 不同回灌压力下回灌层稳定水压力分布  
Fig.4 Distribution of stable water pressure in reinjection layer under different reinjection pressures

如图 5 所示,定压注水后回灌含水层水压随时间迅速增加至相对稳定状态,注水量随时间衰减至稳定状态,稳定周期约 10 d。注水水压分别在 6、7、8 MPa 条件下,在回灌层底界距离注水孔 100 m 两侧(回灌井在  $x=1\,000\text{ m}$  处),随着注水压力的增加回灌层稳定水压分别为 23.0、23.5、24.0 MPa,即回灌压力增幅在 1 MPa 时,回灌层在距离回灌井 100 m 处的水压相对增幅约为 0.5 MPa。如图 5 所示,注水量随时间表现出明显的衰减趋势,稳定注水量随注水压力的增加而增大,注水水压分别在 6、7、8 MPa 条件下,在  $t=10\text{ d}$  时的注水量分别为 68.2、79.8、

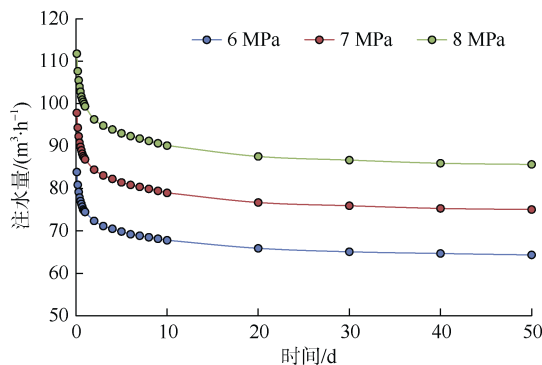


图 5 不同回灌压力下回灌水量随时间变化  
Fig.5 Variation of reinjection amount with time under different reinjection pressures

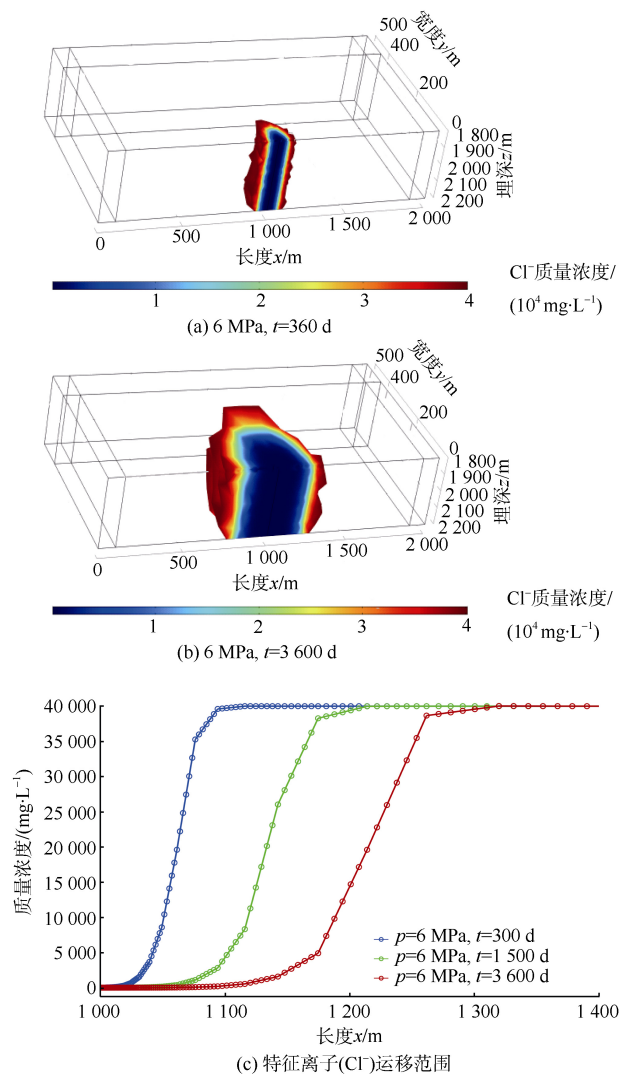
90  $\text{m}^3/\text{h}$ ,即注水压力增加 1 MPa,回灌增量约 10.5  $\text{m}^3/\text{h}$ 。可见,注水压力越大,由于以回灌井为中心的回灌层水压增加幅度不大,更易形成更大的水力梯度,进而使回灌量增加较为明显。根据回灌井试验成果(表 2),在注水压力 6.2~8.5 MPa 条件下,实际稳定回灌量 68.2~98.0  $\text{m}^3/\text{h}$ ,表现出回灌压力越大稳定回灌量越大的一般规律,文献[20]中根据稳定流模型反演得出回灌层渗透系数 0.011 07~0.015 18  $\text{m}/\text{d}$ ,与本模型回灌井反演模拟结果基本一致,可见矿井水深层回灌仿真模型构建可靠性高。

表 2 案例矿井回灌实际试验成果和回灌层渗透系数 Table 2 Results of reinjection test and calculation of permeability coefficient in case mine		
井口压力/ MPa	稳定注水量/ ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ )	反演渗透系数/ ( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ )
7.0~8.5	98.0	0.011 07
6.2	68.2	0.013 44
6.7	71.8	0.015 18

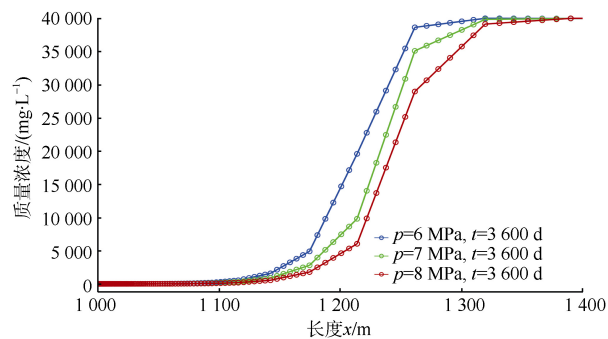
3.2 水化学场演化规律

西部矿区矿井水深层回灌处于探索阶段,文献显示仅有位于鄂尔多斯盆地东缘母杜柴登矿井开展了矿井水深层回灌试验工程,针对弱碱性矿井水与刘家沟组地层酸性地下水“水-水”作用,以及回灌过程中的“水-岩”等相互作用相关研究极少。为了保障回灌量,回灌注水压力一般取 8 MPa 以上,矿井水深层回灌过程中以机械弥散为主,本节为了便于模型分析,未考虑溶质吸附、沉淀、溶解、离子交换、化学反应等复杂作用,采用前文建立的溶质运移对流-弥散模型,以水体中水化学性能稳定的  $\text{Cl}^-$  为特征离子,根据矿井水和回灌含水层地下水水化学特征,设计回灌矿井水  $\text{Cl}^-$  质量浓度为 70  $\text{mg}/\text{L}$ ,回灌含水层下水体初始  $\text{Cl}^-$  质量浓度为 40 000  $\text{mg}/\text{L}$ ,开展回灌过程中特征离子溶质运移规律的仿真分析,以期为矿井水深层回灌过程中溶质迁移规律提供参考。

如图 6 所示,在注水压力为 6 MPa 条件下,  $\text{Cl}^-$  运移范围形成以注水井为中心的“圆柱状”弥散形态,但  $\text{Cl}^-$  质量浓度沿回灌井两侧变化剧烈,中心区回灌层  $\text{Cl}^-$  质量浓度被迅速稀释,但在一定注水影响范围外,  $\text{Cl}^-$  质量浓度被迅速恢复至回灌层原始浓度。且随着时间的延伸,弥散稀释范围呈现增加趋势,但增加的范围相对较小,如  $t=360\text{ d}$  时,弥散半径约为 100 m,  $t=3\,600\text{ d}$  时,弥散半径扩展到 280 m 左右,说明矿井水回灌对深部高矿化度含水层地下水影响范围有限。

图 6 矿井水回灌过程中特征离子( $\text{Cl}^-$ )运移范围Fig.6 Migration range of characteristic ions( $\text{Cl}^-$ ) in the process of mine water recharge

如图 7 所示,在不同注水压力下, $\text{Cl}^-$ 运移范围均以回灌井为中心,形成明显的稀释区,并随时间逐步向外扩大,但注水压力的增加对  $\text{Cl}^-$ 运移范围扩展促进作用并不明显,说明提高注水压力对深部高矿化度含水层地下水影响作用有限。

图 7 不同回灌压力下特征离子( $\text{Cl}^-$ )运移范围Fig.7 Migration range of characteristic ions( $\text{Cl}^-$ ) under different reinjection pressures

## 4 结论

a. 根据鄂尔多斯盆地煤矿区地质和矿井水特征,从回灌目的层地下水与矿井水匹配性、上下岩层的隔水性、回灌层的渗透性以及封闭性角度提出一般矿井水回灌目的层选取依据。并通过建立完整注水井稳定流数学模型,得出承压含水层完整井在稳定注水条件下,回灌量与注水层渗透系数、厚度、回灌压力、水位埋深以及回灌井直径正相关。

b. 提出了以达西非稳定流方程和对流弥散方程为基础的矿井水深层回灌水动力-溶质运移耦合仿真模型的构建方法。

c. 以案例井田矿井水回灌为分析对象,模拟得出高压矿井水回灌会对深部含水层地下水动力条件存在较大范围影响,注水井为中心的“高位水丘”区影响明显,但在外围影响程度相对较小。且注水压力越大,由于以回灌井为中心的回灌层水压增加幅度不大,易形成更大的水力梯度,进而使回灌量增加较为明显。现场试验结果与回灌井模拟结果基本一致。

d. 以水化学性能稳定的  $\text{Cl}^-$ 为特征离子,模拟得出溶质运移范围形成以注水井为中心的“圆柱状”弥散形态,离子浓度沿回灌井两侧变化剧烈,含水层离子浓度被迅速稀释,但在一定注水影响范围外回归至回灌层原始浓度。随着时间的延伸,弥散稀释范围增加相对较小,说明相对低浓度矿井水回灌对深部高浓度含水层地下水化学影响程度不大。

e. 根据现场与室内试验成果,建立考虑高压回灌对回灌含水层压裂增产作用,以及回灌过程中溶质与介质间的吸附、沉淀、溶解、离子交换、化学反应等作用,是进一步定量研究矿井水深层回灌过程水动力-溶质时空变化规律的重要方向之一。

## 参考文献(References)

- [1] 范立民, 马雄德, 冀瑞君. 西部生态脆弱矿区保水采煤研究与实践进展[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1711-1717.  
FAN Limin, MA Xiongde, JI Ruijun. Progress in engineering practice of water-preserved coal mining in western eco-environment frangible area[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1711-1717.
- [2] 武强, 赵苏启, 孙文洁, 等. 中国煤矿水文地质类型划分与特征分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 901-905.  
WU Qiang, ZHAO Suqi, SUN Wenjie, et al. Classification of the hydrogeological type of coal mine and analysis of its characteristics in China[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 901-905.



- [3] 孙亚军, 陈歌, 徐智敏, 等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 304–316.  
SUN Yajun, CHEN Ge, XU Zhimin, et al. Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 304–316.
- [4] 郝春明, 张伟, 何瑞敏, 等. 神东矿区高氟矿井水分布特征及形成机制[J]. 煤炭学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.td.20210317.1110.003.html>  
HAO Chunming, ZHANG Wei, HE Ruimin, et al. Formation mechanisms for elevated fluoride in the mine water in Shendong coal-mining district[J]. Journal of China Coal Society. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.td.20210317.1110.003.html>
- [5] 张杰, 侯忠杰. 榆树湾浅埋煤层保水开采三带发展规律研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2006, 21(4): 10–13.  
ZHANG Jie, HOU Zhongjie. Research on the development law of three zones of water-conserving mining in shallow coal seam of Yushuwan[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2006, 21(4): 10–13.
- [6] MA Liqiang, JIN Zhiyuan, LIANG Jimeng, et al. Simulation of water resource loss in short-distance coal seams disturbed by repeated mining[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(7): 5653–5662.
- [7] 彭小沾, 崔希民, 李春意, 等. 陕北浅煤层房柱式保水开采设计与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3): 301–304.  
PENG Xiaozhan, CUI Ximin, LI Chunyi, et al. Design and practice of room & pillar water-preserved mining for shallowly buried coal seam in north of Shaanxi Province[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3): 301–304.
- [8] 黄庆享, 张文忠. 浅埋煤层条带充填隔水岩组力学模型分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 973–978.  
HUANG Qingxiang, ZHANG Wenzhong. Mechanical model of water resisting strata group in shallow seam strip-filling mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 973–978.
- [9] 马立强, 张东升, 王烁康, 等. “采充并行”式保水采煤方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 62–69.  
MA Liqiang, ZHANG Dongsheng, WANG Shuokang, et al. Water-preserved mining with the method named “backfilling while mining”[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 62–69.
- [10] 范立民. 保水采煤的科学内涵[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 27–35.  
FAN Limin. Scientific connotation of water-preserved mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 27–35.
- [11] 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.
- [12] 张雁, 黄选明, 彭巍, 等. 截水帷幕在露天煤矿截渗减排中的应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1865–1873.  
ZHANG Yan, HUANG Xuanming, PENG Wei, et al. Application of water cutoff curtain in the seepage cutoff and drainage reduction of open-pit coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1865–1873.
- [13] 顾大钊, 张勇, 曹志国. 我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 1–7.  
GU Dazhao, ZHANG Yong, CAO Zhiguo. Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 1–7.
- [14] 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.
- [15] 任学勤, 程晓博, 王文才, 等. 基于“两零循环”的矿井水综合利用技术[J]. 河北冶金, 2019(9): 79–82.  
REN Xueqin, CHENG Xiaobo, WANG Wencai, et al. Comprehensive utilization technology of mine water based on “two zero cycle”[J]. Hebei Metallurgy, 2019(9): 79–82.
- [16] 李世峰, 高文婷, 牛永强, 等. 矿井废水回灌工程试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2012, 29(3): 66–70.  
LI Shifeng, GAO Wenting, NIU Yongqiang, et al. The experimental study on recharge engineering of mine wastewater[J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2012, 29(3): 66–70.
- [17] 孙亚军, 张梦飞, 高尚, 等. 典型高强度开采矿区保水采煤关键技术与实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 56–65.  
SUN Yajun, ZHANG Mengfei, GAO Shang, et al. Water-preserved mining technology and practice in typical high intensity mining area of China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 56–65.
- [18] 曾繁富, 左明星, 宋洪柱, 等. 乌审旗一带刘家沟组作为高矿化度矿井水回灌目的层的可行性分析[J]. 煤炭与化工, 2020, 43(11): 59–62.  
ZENG Fanfu, ZUO Mingxing, SONG Hongzhu, et al. Feasibility analysis of the Liujiagou Group in the Wushen Banner area as a target layer for water recharge in highly mineralized mines[J]. Coal and Chemical Industry, 2020, 43(11): 59–62.
- [19] 杨光辉, 朱开成, 晏嘉. 基于屈服强度理论的深埋砂岩可注性研究[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(8): 62–66.  
YANG Guanghui, ZHU Kaicheng, YAN Jia. Study on deeply buried sandstone water inject ability based on yield strength theory[J]. Coal Geology of China, 2020, 32(8): 62–66.
- [20] 陈歌. 鄂尔多斯盆地东缘矿井水深部转移存储机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
CHEN Ge. Study on the deep transfer and storage mechanism of mine water in the eastern margin of Ordos basin[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [21] 卞伟, 李井峰, 顾大钊, 等. 西部矿区高矿化度矿井水膜蒸馏处理技术[J]. 煤炭科学技术. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/>

- 11.2402.TD.20200207.1604.027.html  
BIAN Wei, LI Jingfeng, GU Dazhao, et al. Technology of membrane distillation treatment for highly-mineralized mine water in western mining area[J]. Coal Science and Technology. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20200207.1604.027.html>
- [22] 葛光荣, 吴一平, 张全. 高矿化度矿井水适度脱盐工艺研究[J]. 煤炭科学技术. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20210129.1629.002.html>  
GE Guangrong, WU Yiping, ZHANG Quan. Study on the moderate desalination process of high salinity mine water[J]. Coal Science and Technology[J]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20210129.1629.002.html>
- [23] 周新平, 邓秀芹, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地延长组下组合地层水特征及其油气地质意义[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(1): 109–120.  
ZHOU Xinping, DENG Xiuqin, LI Shixiang, et al. Characteristics of formation water and its geological significance of lower combination of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(1): 109–120.
- [24] 战沙, 张金功, 席辉. 鄂尔多斯盆地苏里格地区上古生界主要裂缝的测井识别[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(10): 64–66.  
ZHAN Sha, ZHANG Jingong, XI Hui. Logging identification of the main fractures in the upper Paleozoic in Sulige area of Ordos basin[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(10): 64–66.
- [25] 谭聪. 鄂尔多斯盆地上二叠统-中上三叠统沉积特征及古气候演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.  
TAN Cong. Sedimentary characteristics and paleocliamate evolution of the upper Permian and middle upper Triassic strata in Ordos Basin, China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2017.
- [26] 刁玉杰. 神华 CCS 示范工程场地储层表征与 CO<sub>2</sub> 运移规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.  
DIAO Yujie. Study on the reservoir characterization and CO<sub>2</sub> migration underground in the Shenhua CCS demonstration project site[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2017.
- [27] 江成鑫, 赵江, 张洪文. 复杂岩溶条件下锰矿尾矿库地下水溶质运移特征数值模拟研究[J]. 中国环境监测, 2021, 37(1): 95–102.  
JIANG Chengxin, ZHAO Jiang, ZHANG Hongwen. Numerical simulation of solute transport characteristics in groundwater of manganese tailings reservoir under complex karst conditions[J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(1): 95–102.

(责任编辑 周建军 聂爱兰)