

基于越流条件下的采空积水形成机理研究

刘 翔, 许光泉

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年4月9日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月23日

摘 要

针对深部煤层开采中越流作用下采空区大量积水问题, 以西部某矿为研究对象, 通过水文地质调查与数值模拟相结合系统揭示了多含水层协同作用下采空积水的形成机理。研究表明: 煤层开采形成的采动裂隙首先沟通侏罗系含水层, 使其成为主要充水水源并持续增强主导作用; 侏罗系中统含水层水位下降形成以采空积水区为中心的地下水降落漏斗, 导致与白垩系含水层水压差增大; 采动裂隙与先天构造裂隙带叠加后形成白垩系含水层越过弱透水层的垂向越流补给通道, 促使白垩系水成为采空区间接补给水源。研究成果对保障西部地区类似矿井的水害防治及安全开采提供了理论支撑。

关键词

越流, 采空积水, 数值模拟, 煤炭开采

Study on the Formation Mechanism of Gob Water Accumulation Based on Crossflow Conditions

Xiang Liu, Guangquan Xu

College of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Apr. 9th, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 23rd, 2025

Abstract

Aiming at the problem of large amount of water accumulation in the mining airspace under the action of crossflow in deep coal seam mining, a mine in the west is taken as the research object, and the formation mechanism of gob water accumulation under the synergistic action of multiple

aquifers is systematically revealed through the combination of hydrogeological investigation and numerical simulation. The study shows that: the mining fissures formed by coal seam mining firstly communicate with the Jurassic aquifer, making it become the main water filling source and continue to enhance the dominant role; the water level of the middle Jurassic aquifer drops to form a ground-water descent funnel centered on the gob water accumulation, resulting in the increase of the difference in the water pressure between the waterlogged area and the Cretaceous aquifer; the mining fissures are superimposed on the tectonic fissure zones to form a vertical crossflow recharge channel for the Cretaceous aquifer to cross over weakly permeable layers, prompting the Cretaceous water to become a water recharge channel, which will lead to the formation of the water from the Cretaceous aquifer. The combination of the mining fissure and the innate tectonic fissure zone formed a vertical crossflow recharge channel of the Cretaceous aquifer through the weakly permeable layer, which prompted the Cretaceous water to become an indirect recharge source of the mining area. The research results provide theoretical support for the prevention and control of water hazards and safe mining in similar mines in the western region.

Keywords

Crossflow, Gob Water Accumulation, Numerical Simulation, Coal Mining

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来随着浅部资源枯竭与开采强度提升,深部煤层开发已成为必然趋势,但开采深度的增加导致顶板砂岩水害问题日益凸显[1]-[5]。我国西部矿产资源尤为丰富,但其地质构造复杂,侏罗系中统砂岩含水层与煤层间距较小,高强度开采导致采动裂隙发育,导致顶板突水事故频发,如麦垛山煤矿、红柳煤矿等典型矿区均发生过顶板突水事件[6][7],其成因与砂岩含水层的富水性以及开采扰动下裂隙发育密切相关,严重威胁矿井安全生产。越流是指含水层间通过弱透水层发生垂向水力联系,煤层开采引发的层间越流补给是深部水害演化的重要环节,当采动裂隙穿透侏罗系与白垩系之间的相对隔水层时,原本独立的两个水力系统将产生垂向水力联系,形成跨层越流补给通道,目前有大量学者对含水层之间的越流问题展开了研究[8]-[10]。闫欣璐[11]等通过数值模拟等方法研究表明,越流过程受裂隙渗透性、水力梯度及隔水层阻水能力的综合控制。杨宇[12]等通过建立数学模型来定量评价越流系数对越流强弱的影响,对越流的机理从物理层面进行了细致分析。

采空区大量积水本质上是多充水水源协同作用的结果[13][14],丁艳青[15]等通过数值模拟识别出了三河尖煤矿采空区积水的积水途径并还原了其完整的演化过程。对于因采空区积水而导致的突水问题,Niu [16]等通过数值模拟方法系统分析了采空区积水与矿井突水二者之间的联系,研究表明突水现象是开挖扰动与采空区积水共同作用的结果。前人对于侏罗系煤层顶板砂岩水害问题展开了一定研究,然而对于此类多含水层协同作用下的采空区积水模式研究较少,由于越流的存在,使井下水文地质条件变得更加复杂,显现出了越流系统动态演化的复杂性,矿井开采安全问题受到了严峻挑战[17][18],越流条件下的采空区积水问题已成为矿井开采中亟需解决的关键难题,为此,以西部某矿为例,通过资料分析、数值模拟等方法直观揭示采空区积水形成机理,研究成果旨在为深部矿井水害防治提供新的理论视角和技术路径。

2. 研究区概况

2.1. 自然地理

某矿位于我国西北沙漠高原地貌单元, 矿井面积为 40.67 km²。地势西北高东南低。地表以第四系风积沙为主, 植被稀疏, 表现为南高北低、两侧高中间低的汇水地形。矿区属半干旱温带高原大陆性气候, 日照充足, 干燥少雨, 冬长夏短, 平均年降水量为 396 mm, 且集中于夏季。

2.2. 地层与构造

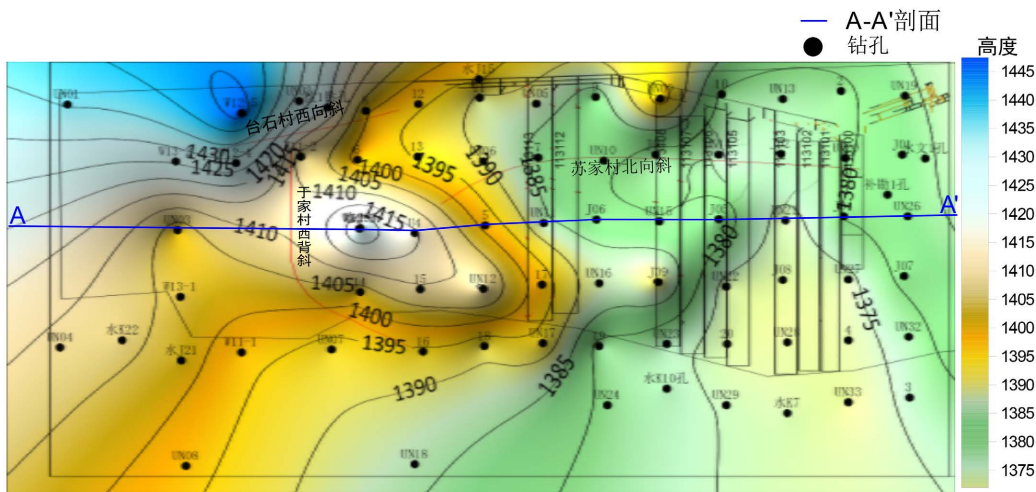


Figure 1. Schematic topography of a mining area
图 1. 某矿区地形示意图

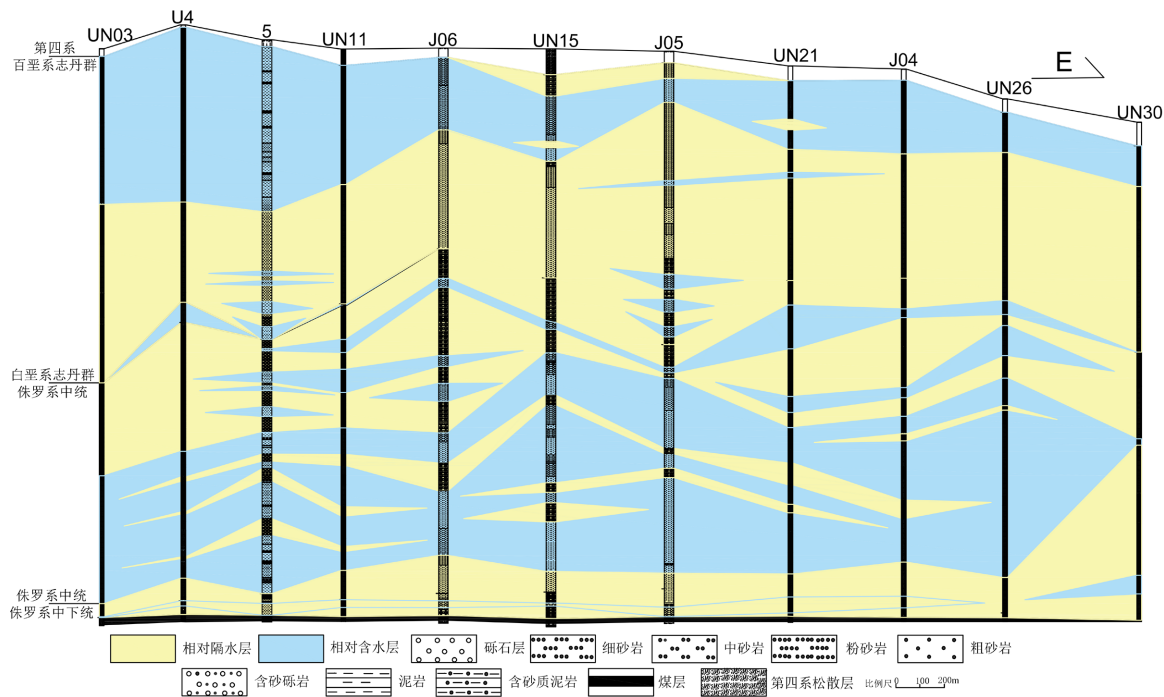


Figure 2. Hydrogeologic profile of a mine site
图 2. 某矿区水文地质剖面图

据钻探成果分析, 研究区内地层由老至新依次为: 侏罗系中下统延安组(J_{1-2y})、侏罗系中统(J₂)、白垩系下统志丹群(K_{1zh}), 矿区水文地质剖面图如图 1 所示。区域构造呈东西走向、向北倾斜的单斜形态, 地层倾角 1~3°, 局部达 10°。矿区内发育台什村西向斜、于家村西背斜、苏家村北向斜、泊江海子矿西背斜和泊江海子矿南背斜等构造。

某矿区的平面地形起伏如图 1 所示, 其水文地质剖面图如图 2 所示。

2.3. 水文地质条件

2.3.1. 含水层

研究区含水层自上而下分为第四系松散潜水含水层、白垩系下统志丹群潜水-承压含水层、侏罗系中统承压含水层、侏罗系中下统延安组承压含水层。采空区充水水源主要来自侏罗系中统承压含水层和白垩系下统志丹群潜水-承压含水层。

白垩系下统志丹群潜水-承压含水层的厚度为 136.50~283.52 m, 岩性以砂岩及砂砾岩为主, 受该地区地形地貌影响, 其地下水位埋深差异较大, 在 1.20~47.65 m 之间。单位涌水量 q 为 0.005~0.0457 L/s·m, 富水性较弱, 渗透系数为 0.00183~0.0187 m/d。水化学类型为 Ca-Cl、Ca-Cl-SO₄ 等, pH 值在 7.3~8.3 之间。

侏罗系中统承压含水层厚度为 72.43~285.57 m, 以中粗砂岩、砂岩为主, 局部发育一定厚度泥岩, 单位涌水量 q 为 0.00079~0.113 L/s·m, 渗透系数 K 为 0.00043~0.06085 m/d, 自然条件下, 含水层富水性弱至中等、地下水径流条件差。水化学类型较为复杂, 主要为 Na-Cl、Na-SO₄·Cl·HCO₃ 和 Na-Cl-SO₄ 等, pH 为 8.92~9.23。

2.3.2. 隔水层

研究区内隔水层自上而下分为白垩系与侏罗系之间的隔水层、侏罗系中统与中下统之间的隔水层、侏罗系中下统延安组底部隔水层。其中起主要隔水作用的为白垩系与侏罗系之间的隔水层, 其厚度为 40~60 m, 以砂质泥岩为主, 渗透性较差, 对白垩系与侏罗系含水层水力交换有阻断作用。

3. 地下水动态变化特征

3.1. 地下水动态变化特征

3.1.1. 白垩系含水层动态变化特征

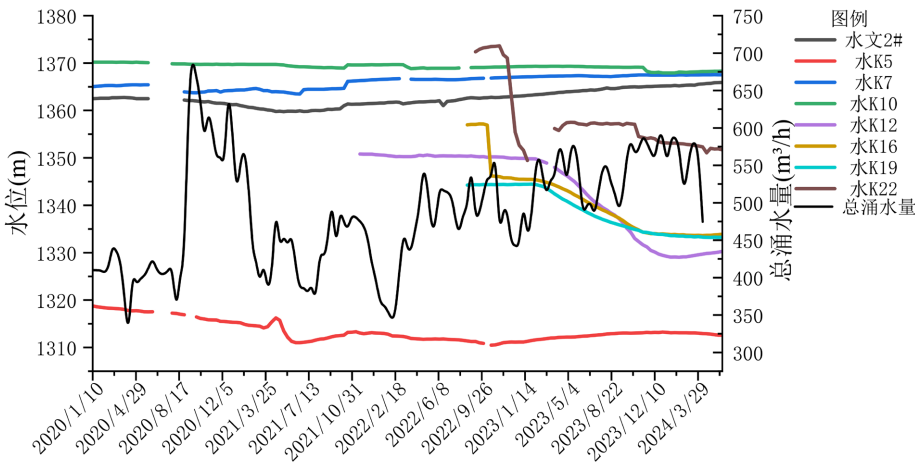


Figure 3. Changes in the water level of the cretaceous aquifer and the total water influx in the mine under mining conditions
图 3. 开采条件下白垩系含水层水位及矿井总涌水量变化情况

观测期间涌水量总体呈振荡上升的趋势, 白垩系含水层水位除水文 2 和水 K7 观测孔水位呈轻微上升外, 其余观测孔均呈下降趋势(图 3), 其中最明显的是水 K22 观测孔水位降幅达 24.16 m, 观察该点位置发现其距离 113107 工作面较近, 推测是受开采影响。对水文 2 和水 K7 钻孔资料分析推测为区域出现泥化现象导致渗透性降低, 且距离开采工作面较远故排泄通道受阻, 由于其靠近开采边界, 受白垩系含水层侧向补给, 因此水位出现上升现象。

在二盘区工作面进行回采之前, 矿区已对煤层上覆含水层进行了疏放水实验, 结果显示侏罗系含水层水位下降, 白垩系含水层水位无明显变化; 而目前工作面回采后, 白垩系含水层水位呈下降趋势, 说明其与工作面开采必然存在一定关系。煤层开采后形成的冒落带和裂隙带沟通了侏罗系含水层及白垩系含水层, 一方面侏罗系水位不断下降与白垩系含水层水位形成一定的水头差, 在水压作用下白垩系水位向下进行渗透, 另一方面裂隙发育穿过弱透水层为白垩系水向下越流提供了垂向通道。

3.1.2. 侏罗系含水层动态变化特征

随着矿井开采的不断推进, 涌水量呈振荡上升的趋势, 侏罗系含水层水位总体呈下降趋势(图 4), 但受沉积环境、地质构造及地下径流等作用的影响, 含水层的不同区域富水性和渗透性具有一定差异, 导致各观测孔水位下降幅度出现一定差异, 其中水 J11 在四年间降幅达 79 m, 水 J15 降幅达 40 m, 观察钻孔坐标发现其距离采空区较近, 表明侏罗系含水层地下水位受开采影响较大。

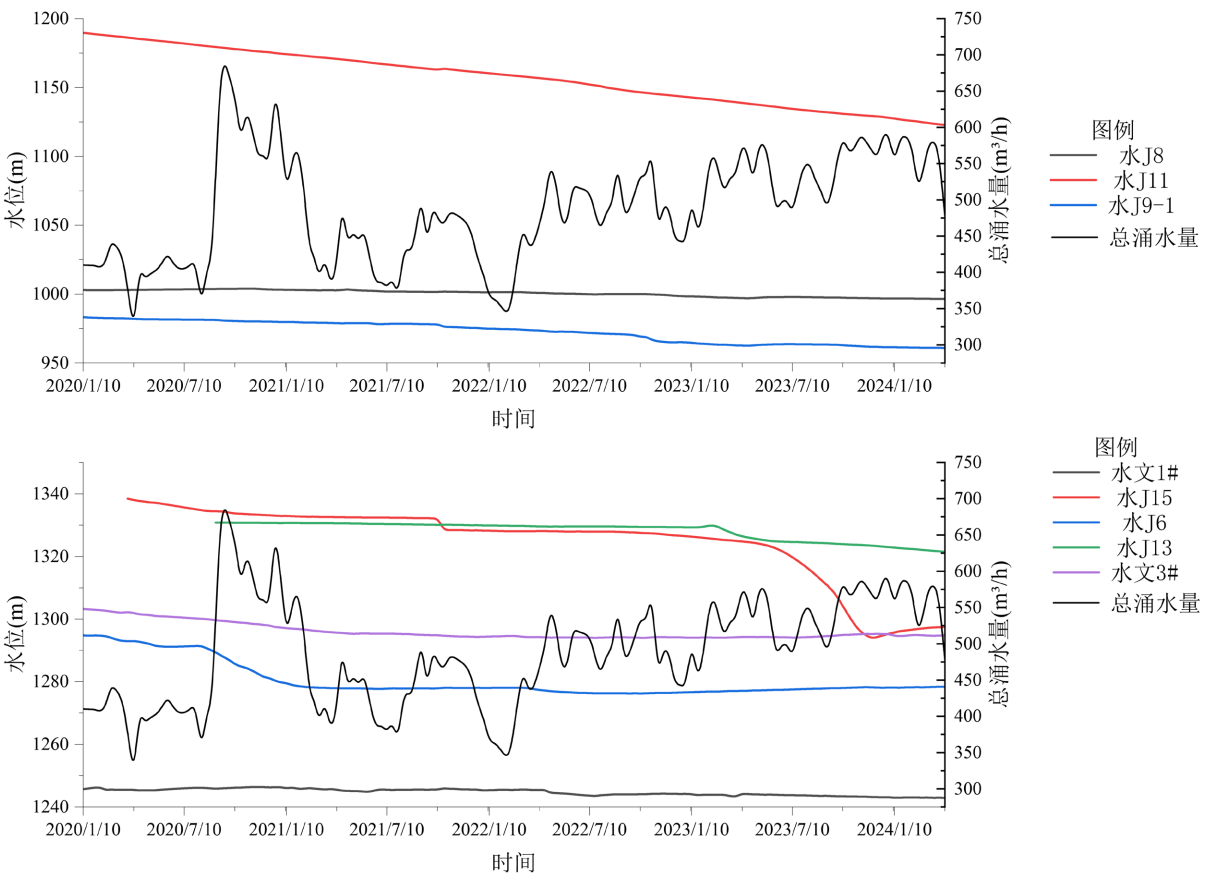


Figure 4. Changes in the water level of the Jurassic aquifer and the total water influx in the mine under mining conditions
图 4. 开采条件下侏罗系含水层水位及矿井总涌水量变化情况

3.2. 矿井充水条件分析

井下的主要充水通道为开采产生的冒落带-裂隙带, 其沟通侏罗系中统含水层, 其次为继续向上发育且越过弱透水层沟通白垩系含水层的裂隙, 使白垩系水向下的越流补给成为矿井充水的第二水源; 另外, 侏罗系含水层存在的褶皱、断层等也会成为含水层向采空区补给的渗流通道。

4. 地下水数值模拟

为进一步探究采空积水形成过程, 系统揭示越流条件下的采空积水形成机理, 以数值模拟的方法构建含水层模型, 模拟工作面回采后含水层地下水水流场变化情况, 进而通过模型计算分析采空积水各项充水水源。

4.1. 水文地质概念模型

以白垩系承压含水层、两含水层中间的弱透水层及侏罗系中统承压含水层为模拟对象, 构建二维非稳定流数值模型。模型范围覆盖整个矿区, 并扩展至地下水初始流场形成的区域性降落漏斗边界, 确保边界为无限补给边界。基于钻孔岩芯分析与抽水试验结果, 含水层介质不同区域渗透系数等参数都有较大差别, 且模拟周期内流体在各个截面上的状态都随时间发生改变, 故将含水层概化为非均质各向异性的非稳定流模型。

白垩系含水层补给项为四周地下水侧向补给, 排泄项为越过弱透水层进行越流; 侏罗系补给项为四周地下水侧向补给及地下水越流, 排泄项为向采空区汇水。

4.2. 数学模型

根据达西定律和水均衡原理将模拟区地下水流概化成非均质各向异性非稳定二维地下水流系统, 并建立相应的数学模型。即:

白垩系含水层模型:

$$\begin{cases} K_k \left(\frac{\partial^2 h_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_k}{\partial y^2} \right) - \frac{K'}{M} (h_k - h_j) = Ss_k \frac{\partial h_k}{\partial t} \\ (x, y) \in \Omega \\ H(x, y, 0) = H_0(x, y) \quad (x, y) \in \Omega \\ H(x, y, t)|_{\Gamma_1} = H(x, y, t) \quad (x, y) \in \Gamma_1 \end{cases}$$

侏罗系含水层模型:

$$\begin{cases} K_j \left(\frac{\partial^2 h_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_j}{\partial y^2} \right) + \frac{K'}{M} (h_k - h_j) = Ss_j \frac{\partial h_j}{\partial t} \\ (x, y) \in \Omega \\ H(x, y, 0) = H_0(x, y) \quad (x, y) \in \Omega \\ H(x, y, t)|_{\Gamma_1} = H(x, y, t) \quad (x, y) \in \Gamma_1 \end{cases}$$

式中: K ——渗透系数(m/d), K_k 、 K_j 、 K' 分别为白垩系和侏罗系的渗透系数以及隔水层的垂向渗透系数;

H 、 H_0 ——地下水水头标高和初始水头标高(m);

h_k 、 h_j ——白垩系和侏罗系含水层水位标高(m);

M ——白垩系和侏罗系间隔水层厚度(m);

Ss ——贮水率, (m^{-1});

t ——时间(d);
 ΓI ——一类边界;
 Ω ——模拟区域。

4.3. 水流模型

依据侏罗系中统和白垩系承压含水层的厚度变化特征以及含水层内部结构特点，对研究区域进行网格剖分，剖分为 200 行 100 列的网格，共 20,000 个单元格。模拟时间为 2023 年 1 月 10 日至 2024 年 4 月 10 日，其中 2023 年 1 月 10 日~2024 年 1 月 10 日作为模型识别期，2024 年 1 月 10 日~4 月 10 日为模型的验证期。通过识别验证确定模型符合实际矿井地下水动态特征，模型立体图如图 5 所示。

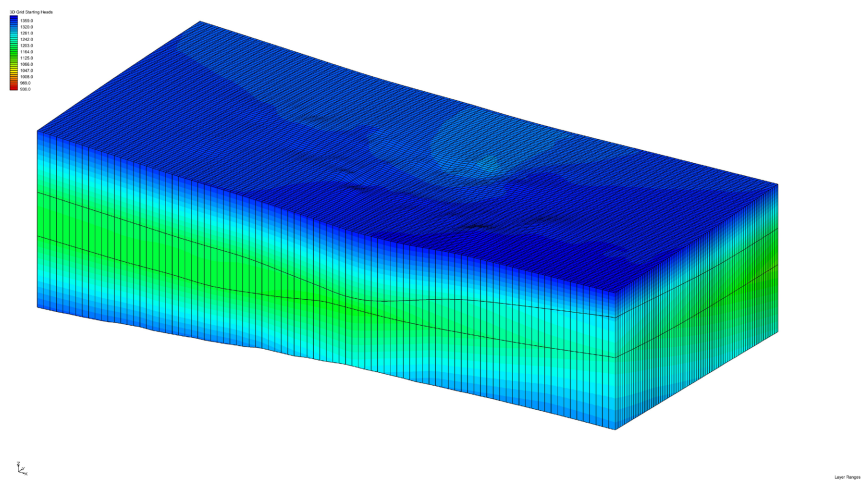


Figure 5. Three-dimensional view of the study area model
图 5. 研究区模型立体图

4.4. 水文地质参数分区

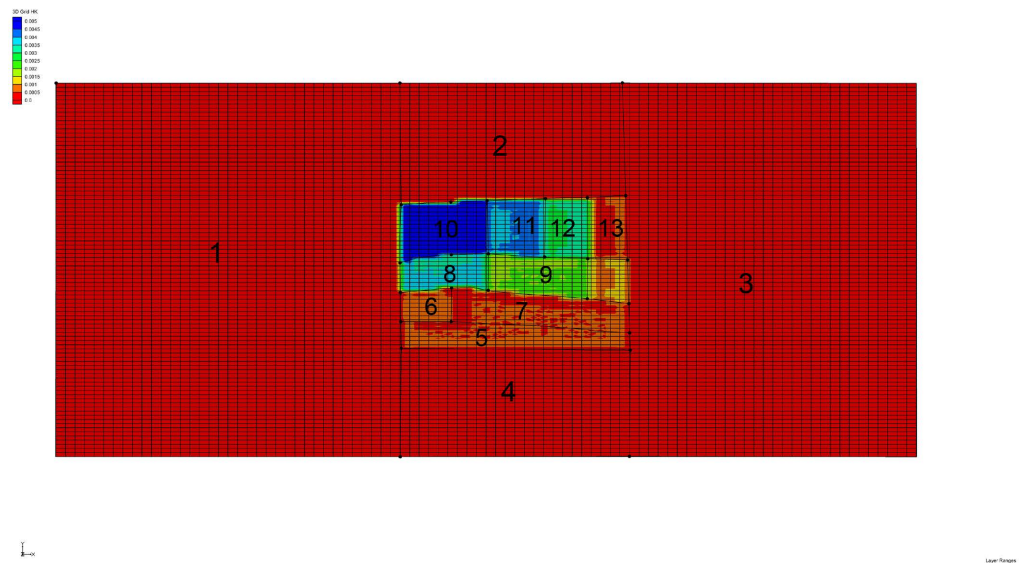


Figure 6. Partitioning of permeability coefficients of water barriers
图 6. 隔水层渗透系数分区

经模型识别与验证发现, 含水层渗透系数、贮水率对地下水流场的形态具有较大影响, 结合 **GMS** 软件中的 **PEST** 模块进行参数反演, 然后再进行手动调参进行微调, 最终得到符合模型预期的水文地质参数, 其中隔水层渗透系数分区如图 6, 具体参数见表 1。

Table 1. Statistical table of hydrogeological parameters of aquiclude
表 1. 隔水层水文地质参数统计表

渗透系数分区编号	水平渗透系数(m/d)	垂向渗透系数	贮水率(1/m)
1	0.0001	0.000002	0.0008
2	0.0002	0.000004	0.0009
3	0.0002	0.000004	0.0009
4	0.0003	0.000006	0.001
5	0.0005	0.00001	0.0007
6	0.0006	0.000012	0.0007
7	0.0005	0.00001	0.0007
8	0.0035	0.000117	0.0006
9	0.002	0.000067	0.00055
10	0.001	0.000033	0.0005
11	0.0045	0.00015	0.00045
12	0.004	0.00008	0.00043
13	0.003	0.00006	0.0004
14	0.0005	0.00001	0.0004

5. 采空积水形成机制分析

5.1. 采空积水形成分析

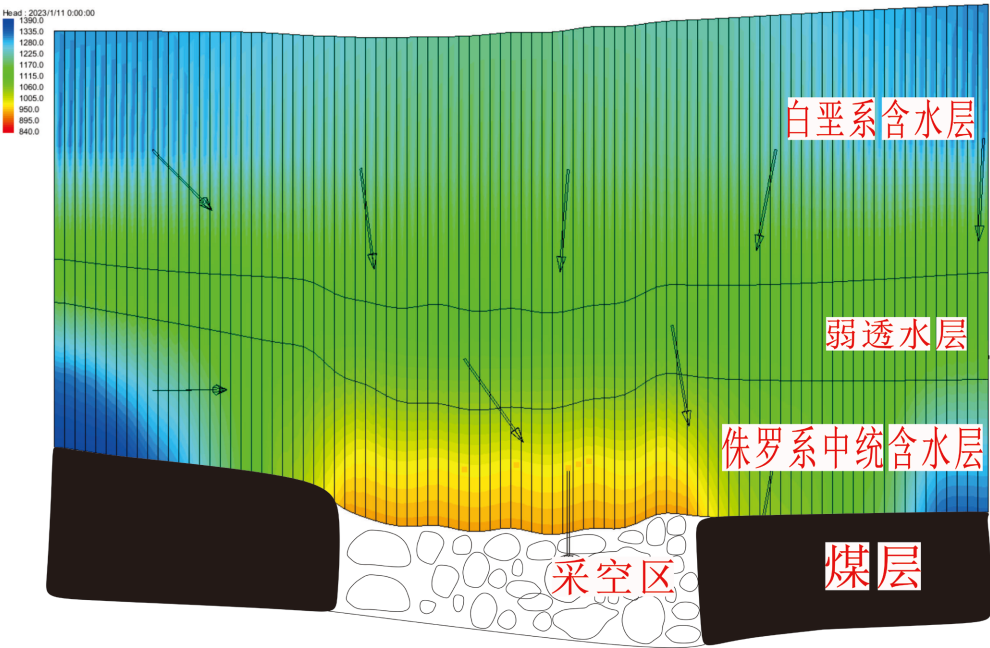


Figure 7. Schematic diagram of aquifer overflow
图 7. 含水层越流示意图

越流条件下的多含水层地下水数值模拟表明当工作面回采后, 侏罗系水位不断下降, 与此同时, 白垩系水位也有略微下降, 对白垩系源汇项进行分析, 白垩系四周均为无限补给, 排泄方式为越过弱透水层向下进行越流补给。

煤层开采后, 采动裂隙带发育至侏罗系中统含水层, 成为采空积水的垂向补给通道, 侏罗系中统含水层通过采动裂隙向下对采空区进行持续充水, 导致水位不断下降, 与上部白垩系含水层形成了巨大水位差, 在水压和局部渗流通道作用下形成垂向越流补给(图 7), 越流范围如下图 8 所示, 主要越流范围在一盘区工作面上方区域。

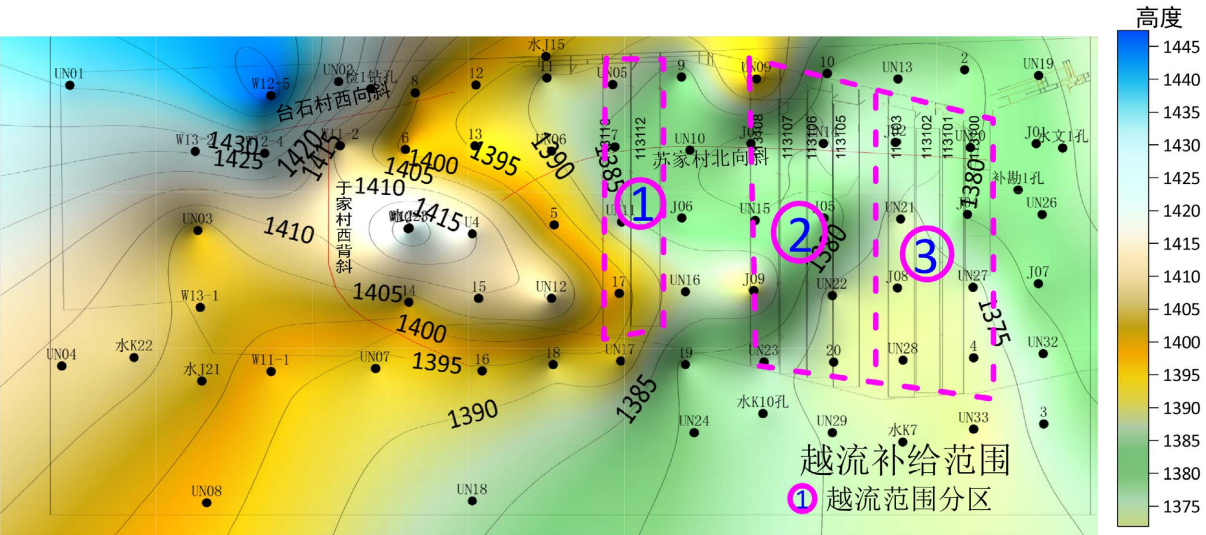


Figure 8. Schematic diagram of the extent of transboundary flow
图 8. 越流范围示意图

5.2. 采空积水量计算

5.2.1. 越流量计算

通过达西定律推导得到越流量计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n K_i A_i J_i = \sum_{i=1}^n K_i A_i \frac{\Delta H_i}{L_i} \quad (1)$$

式中:

Q ——地下水越流补给量, L³/T;

n ——计算分区的个数;

Q_i ——第 i 个计算分区的越流量, L³/T;

A_i ——第 i 个分区的面积, m²;

K_i ——第 i 个分区的弱透水层垂向渗透系数, L/T;

J_i ——第 i 个分区的水力坡度;

ΔH_i ——第 i 个分区的白垩系含水层水位与侏罗系中统含水层水位差, 侏罗系含水层在一盘区范围内的水位已降至侏罗系含水层底板, m;

L_i ——第 i 个分区越流层(弱透水层)厚度, m。

采动影响会导致渗透系数发生变化[19], 以数值模拟中经过参数反演和手动调整后给出的渗透系数

值及其他水文地质参数作为计算的参考依据, 以主要越流通道, 即采空区上方投影三个面的面积作为越流补给的过水断面面积, 结合钻孔资料, 由上述公式计算得出地下水从 2023 到 2024 年的越流量如下表 2 所示, 2023 至 2024 年间, 白垩系含水层水位和侏罗系含水层水位差不断增大, 越流条件进一步优化, 因此越流量随着总涌水量的增加而不断增大。

Table 2. Calculation table of crossflow volumes from 2023 to 2024
表 2. 2023~2024 年越流量计算表

时间	越流 区域	水头差 $\Delta H_i/m$	区域面积 A_i/m^2	隔水层厚 度 L_i/m	隔水层垂向渗透 系数 $K_i (m/d)$	单个越流量 $Q_i (m^3/h)$	累计越流量 $Q (m^3/h)$	总涌水量 (m^3/h)
2023/ 1/10	1	353.23	1,505,464	97.62	9.00E-05	20.43	48.49	487.07
	2	331.21	3,058,200	101.61	4.50E-05	18.69		
	3	329.19	2,048,236	89.94	3.00E-05	9.37		
2023/ 7/10	1	371.46	1,505,464	97.62	9.00E-05	21.37	50.08	516.75
	2	339.41	3,058,200	101.61	4.50E-05	18.93		
	3	331.76	2,048,236	89.94	3.00E-05	9.44		
2024/ 1/10	1	378.96	1,505,464	97.62	9.00E-05	21.68	50.86	574.57
	2	343.35	3,058,200	101.61	4.50E-05	18.76		
	3	335.94	2,048,236	89.94	3.00E-05	9.56		
2024/ 4/10	1	383.21	1,505,464	97.62	9.00E-05	21.76	51.27	576.63
	2	345.93	3,058,200	101.61	4.50E-05	19.18		
	3	336.76	2,048,236	89.94	3.00E-05	9.53		

5.2.2. 侧向补给量计算

侏罗系含水层侧向补给量按东西南北分为四部分计算向采空区的侧向补给量, 计算公式如下, 侏罗系侧向补给量计算结果如表 3 所示。

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n K_i A_i J_i = \sum_{i=1}^n K_i A_i \frac{\Delta H_i}{L_i} \tag{2}$$

式中:

- Q——侏罗系侧向补给量, m^3/h ;
- n——补给方向的个数;
- Q_i ——单个方向的补给量, m^3/h ;
- A_i ——单个方向过水断面的面积, m^2 ;
- K_i ——单个方向的水平渗透系数, m/d ;
- J_i ——单个方向的水力坡度;
- ΔH_i ——单个方向的上的侏罗系含水层水位与采空区水位差, m ;
- L_i ——单个方向上的径流长度, m 。

受采动影响, 不同方向的侏罗系中统含水层渗透系数在模拟中会发生微小改变, 从而对各个方向上的补给量产生一定影响, 下表中的渗透系数均为各个阶段在某一方向分区的渗透系数加权平均值。计算发现(表 3)侏罗系含水层侧向补给量从 $441.09 m^3/h$ 增加至 $528.73 m^3/h$, 且侏罗系含水层西侧的补给量占

侏罗系含水层总补给量一半以上，表面侏罗系含水层由西侧向采空区汇入是侏罗系含水层的主要径流方向。

Table 3. Calculation table of Jurassic lateral recharge from 2023 to 2024
表 3. 2023~2024 年侏罗系侧向补给量计算表

时间	补给方向	前后水头差 ΔH /m	过水断面面积 A_i /m ²	区域平均渗透系数 K_i (m/d)	区域补给量 Q_i (m ³ /h)	侏罗系含水层补给量(m ³ /h)
2023 /1/10	西	315.19	718787.92	0.035	259.57	441.09
	南	193.24	799877.76	0.018	65.12	
	东	280.05	652335.26	0.012	63.07	
	北	192.45	893386.37	0.012	53.33	
2023 /7/10	西	319.21	718,787.92	0.037	277.90	464.19
	南	195.64	799,877.76	0.018	65.93	
	东	293.71	652,335.26	0.012	66.14	
	北	195.63	893,386.37	0.012	54.21	
2024 /1/10	西	328.44	718,787.92	0.038	293.67	528.09
	南	203.94	799,877.76	0.0235	89.73	
	东	298.69	652,335.26	0.015	84.08	
	北	201.91	893,386.37	0.013	60.62	
2024 /4/10	西	328.39	718,787.92	0.038	293.62	528.73
	南	204.17	799,877.76	0.0235	89.83	
	东	299.67	652,335.26	0.015	84.36	
	北	202.94	893,386.37	0.013	60.93	

5.2.3. 采空积水量构成分析

通过对越流量和侏罗系含水层侧向补给量的数据变化进行分析，二者在数量上均随着时间推移呈持续增长趋势，而越流量增大的幅度相对侏罗系侧向补给量较小，这一差异源于二者之间渗透性的差异，侏罗系碎屑岩裂隙孔隙含水层受构造裂隙网络控制，具备较强的导水能力，而白垩系含水层因存在弱透水层阻隔，越流补给受垂向渗透系数制约，其补给效率显著低于侧向径流。

Table 4. Flow rate and error statistics for each component
表 4. 各部分流量及误差统计

时间	白垩系越流量(m ³ /h)	侏罗系侧向补给量(m ³ /h)	采空积水量(m ³ /h)	误差
2023/1/10	48.49	434.02	487.07	0.94%
2023/7/10	50.08	462.19	516.75	0.87%
2024/1/10	50.86	519.12	574.57	0.80%
2024/4/10	51.02	521.41	576.63	0.73%

对不同时间段越流量、侏罗系含水层侧向补给量及采空积水量进行误差分析如表 4，两者补给量之和与矿井涌水量间维持高度耦合关系(误差 < 1%)，即随着矿井涌水量的不断增大，越流量与侏罗系侧向补给量也在不断增大，且二者之和约等于矿井涌水量，且误差由 0.94%降至 0.73%，说明数值模型对矿井地

下水的反映不断精确。从表中可以看到侏罗系侧向补给量和白垩系越流量虽为同步上升, 但侏罗系越流补给在采空积水中的主导地位却在不断强化, 这是因为随着采掘活动形成的强降落漏斗扩展, 侏罗系含水层因更优的导水能力可更快响应水力梯度变化, 形成更加优势的补给通道。

6. 结论

本文以鄂尔多斯盆地某矿为研究对象, 通过水文地质调查、理论分析与数值模拟相结合的方法, 系统揭示了越流条件下采空积水的形成机理及越流补给的演化特征, 为类似地质条件矿井的水害防治提供了理论依据, 研究成果对保障西部地区煤矿安全开采具有重要理论价值, 主要结论如下:

1) 采空积水形成机制: 煤层开采后形成的冒落带与裂隙带沟通了白垩系与侏罗系含水层, 导致白垩系承压水通过垂向越流向侏罗系含水层补给, 而侏罗系中统含水层通过采动裂隙持续向采空区充水。数值模拟结果表明, 白垩系含水层越流补给量逐渐增大, 而侏罗系中统含水层通过原有裂隙和采动裂隙持续向采空区进行补给, 并形成了以采区为中心的水位降落漏斗, 导致积水水位逐年上升, 对采空区积水的治理已迫在眉睫。

2) 越流补给特征: 越流量随时间呈递增趋势, 但受限于补给通道及水压差, 在采空积水水源中贡献度呈弱化趋势。模型计算表明, 2023~2024 年越流量由 $48.49 \text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $51.27 \text{ m}^3/\text{h}$, 而总涌水量由 $487.07 \text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $576.63 \text{ m}^3/\text{h}$, 其增幅远大于越流量增幅, 表明采空积水主要来源为侏罗系含水层, 且其主导地位在不断加强, 次要来源为白垩系越流补给。

对于迫在眉睫的采空积水问题, 未来应当对侏罗系煤层进行一定的井下疏放水防治。

参考文献

- [1] 刘云飞, 景宇, 张致赫, 等. 鄂尔多斯煤炭开采与区域可持续发展路径研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(19): 106-108.
- [2] 李德彬. 侏罗系煤田顶板砂岩水疏放后采空区涌水规律及预测方法[J]. 煤矿安全, 2019, 50(5): 194-198.
- [3] 孙文洁, 李文杰, 杨文凯, 等. 煤炭矿山水环境问题类型划分及治理模式[J]. 煤矿安全, 2023, 54(5): 35-41.
- [4] 李东, 刘生优, 张光德, 等. 鄂尔多斯盆地北部典型顶板水害特征及其防治技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3249-3254.
- [5] 赵世军, 鹿存金, 边凯, 等. 银星一号煤矿侏罗系煤层顶板砂岩水害特征及防治技术[J]. 煤矿安全, 2022, 53(12): 76-84.
- [6] 武强, 崔芳鹏, 赵苏启, 等. 矿井水害类型划分及主要特征分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 561-565.
- [7] 曾一凡, 朱慧聪, 武强, 等. 我国煤层顶板水害研究现状与防控路径[J/OL]. 煤炭学报: 1-18. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0039>, 2025-03-27.
- [8] 薛禹群, 吴吉春, 谢春红. 越流含水层系统地下水污染数值模拟[J]. 地质学报, 1997(2): 186-192.
- [9] 陶宗涛, 邵超, 程晓嫫, 等. Aquifer Test 计算越流承压含水层水文地质参数方法研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(11): 91-94.
- [10] 樊娟, 侯恩科, 靳德武, 等. 越流含水层系统中渗透系数随深度衰减的抽水试验解析模型[J]. 地球科学, 2024, 49(6): 2148-2157.
- [11] 闫欣璐, 唐书恒, 傅小康, 等. 含水层越流补给对煤层气井产能影响的数值模拟: 以栉庄南区块为例[J/OL]. 现代地质: 1-18. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2024.130>, 2025-03-25.
- [12] 杨宇, 田慧君, 张昊, 等. 具有越流补给的含水煤层渗流模型求解与典型曲线[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(1): 95-99.
- [13] 张宏升, 张国强, 李波. 煤矿采空区积水形成机制与处置技术研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(1): 185-189.
- [14] 狄效斌. 同忻井田采空区积水贮存分布特征及突水预测[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(3): 24-27.
- [15] 丁艳青, 逢仁昊, 钱静, 等. 关闭煤矿采空区积水量预测及其演化过程分析[J/OL]. 煤炭学报: 1-11. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0593>, 2025-02-21.

-
- [16] Niu, X., Feng, G., Liu, Q., Han, Y. and Qian, R. (2022) Numerical Investigation on Mechanism and Fluid Flow Behavior of Goaf Water Inrush: A Case Study of Dongyu Coal Mine. *Natural Hazards*, **113**, 1783-1802.
<https://doi.org/10.1007/s11069-022-05369-w>
- [17] 穆金霞. 泊江海子矿 3-1 煤顶板涌(突)水危险性评价与防治措施研究[J]. 煤炭与化工, 2022, 45(3): 77-81.
- [18] 李振兴, 刘春平. 内蒙古泊江海子矿煤层顶板涌(突)水危险性分区评价[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(4): 45-49.
- [19] 梁涛, 刘晓丽, 王思敬. 采动裂隙扩展规律及渗透特性分形研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3729-3739.