

DOI: 10.12401/j.nwg.2023005

神南矿区直罗组含水层对矿井涌水贡献量预测分析

黄金廷^{1,2}, 宁博涵¹, 孙魁^{2,3}, 李宗泽¹, 王嘉玮¹, 宋歌¹

(1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省地质环境监测总站, 陕西 西安 710054)

摘要: 查明矿井涌水的来源及构成比例, 对煤矿安全生产具有重要意义。基于神南矿区水文地质、典型煤矿矿井涌水量、煤矿开采裂采比等数据, 建立了综合考虑延安组(J_{2y})、直罗组(J_{2z})、安定组(J_{2a})、新近系保德组(N_2b)、第四系中更新统离石组(Q_{pI})、上更新统萨拉乌苏组(Q_{pS})、马兰组(Q_{pM})、全新统冲积层(Q_h^{al})和风积沙(Q_h^{col})多个含(隔)水层的地下水流数值模拟模型, 实现了第四系和直罗组含水层地下水流动场的仿真模拟。结果显示, 神南矿区煤矿开采直接影响直罗组含水层。柠条塔煤矿矿井涌水量为 $117\,743.52\text{ m}^3/\text{d}$ ($4\,905.98\text{ m}^3/\text{h}$), 其中直罗组含水层贡献 94.82%, 2-2 煤上覆延安组砂岩贡献 2.79%。

关键词: 矿井涌水量; 多层含水层; 数值模拟; 柠条塔煤矿; 神南矿区

中图分类号: P641; TD742

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)06-0176-10

Contribution of Groundwater in Zhiluo Aquifer to Mine Water in Shennan Mining Area: Numerical Simulation

HUANG Jinting^{1,2}, NING Bohan¹, SUN Kui^{2,3}, LI Zongze¹, WANG Jiawei¹, SONG Ge¹

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Illustration water sources and ratio from different aquifers has significant means to mining water management. In this paper, based on the hydrogeological data, mining water and ratio of the height of the fractured zone to the mining height of typical mine area in Shennan mining area, a numerical simulation model was set up. Totally, 7 layers including aquifer and aquiclude are contained in the model. And it predicted the groundwater flow field of Quaternary and Zhiluo aquifer groundwater in Jurassic system very well via the model calibration. Furthermore, simulation results shows that mining action affects Zhiluo aquifer groundwater directly. For example, Zhiluo aquifer groundwater contributes nearly 94.82 percentage when mining water quantity reaches $117\,743.52\text{ m}^3/\text{d}$ in Ningtiaota mining area.

Keywords: mine inflow; multi-aquifer; numerical simulation; Ningtiaota coal mine; Shennan Mining area

收稿日期: 2022-11-26; 修回日期: 2023-03-07; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金“鄂尔多斯盆地风沙滩区土壤—地下水蒸散发机理研究”(41672250)、“旱区土壤—地下水蒸发与积盐互馈机制研究”(42177076), 陕西省自然科学基金项目“气候变化对黄河流域(陕西段)生态系统影响与风险应对研究”(2021ZDLSF05-09)及陕西省自然科学基金基础研究计划—陕煤联合基金重点资助项目“古河道含水层地下水与煤层开采互馈机制研究”(2019JLZ-03)联合资助。

作者简介: 黄金廷(1979-), 男, 教授, 博/硕士生导师, 主要从事水资源可持续开发利用领域的研究工作。E-mail: hjinting@xust.edu.cn。

煤炭是中国最主要能源之一, 预计至 2030 年, 其生产及消费总量将占据中国能源总量一半以上(郭贤才, 1990; 全国煤化工信息站, 2014; “能源领域咨询研究” 课题组, 2015; Xie, 2022)。陕西省煤炭矿产资源丰富, 含煤面积 $5.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 探明储量 $1700 \times 10^8 \text{ t}$, 其中榆神府矿区探明的煤炭资源量高达 2236 亿 t, 所占比例约为全国探明煤炭资源量的 30%(唐涛, 2011; 曹虎麒, 2015; Liu et al, 2022)。近年来, 随着煤炭资源的开发强度增加, 地层形变产生导水裂隙带、冒落带, 破坏含(隔)水层, 诱发上覆含水层地下水下渗至矿井, 产生矿井突(涌)水风险(侯恩科等, 1994; 伊茂森, 2008; 申涛等, 2011; Xu et al., 2020; 杜臻等, 2023)。因此, 预测分析矿井涌水量, 对煤炭安全生产具有重要的现实意义。

煤层开采产生的冒落带、裂隙带和弯曲变形带, 会直接或间接影响上覆含(隔)水层, 威胁煤矿安全生产(冯立等, 2023)。当煤层上覆多个含(隔)水层时, 准确识别矿井涌水的来源, 对煤矿制定合理的防治水对策, 具有重要的参考意义。目前, 矿井涌水量预测包括大井法、比拟法、数值模拟法等。其中, 数值模拟方法基于求解地下水运动的动力学方程, 具有明确的物理含义, 在矿井涌水量预测中得到广泛应用。例如, 冯更辰等(2011)利用 Visual Modflow 对白涧铁矿区进行矿井涌水量预测研究, 结果表明该矿区主要受到奥灰含水层岩溶水的影响。冯书顺等(2016)对比数值模拟与大井法预测三江平原某矿井涌水量, 发现数值法能够再现实际观测的涌水量。杨彦利等(2018)利用 Visual Modflow 模拟邯郸陶二煤矿伏青灰岩含水层对该矿 2[#]煤层的涌水量并进行有效的预测。张保建(2015)利用数值法同时考虑白垩系孔隙裂隙含水层、直罗组裂隙承压含水层对矿井涌水的影响, 预测分析了东胜煤田田台格庙勘查区矿井涌水量。众多学者采用数值法对涌水量预测研究进行了有益的探索, 但是所建立的模型范围多局限于矿井周围, 这使得模型边界条件概化及矿井内含水层与外侧水量交换具有很大的不确定性。基于此, 笔者以神南矿区 3 个相邻的柠条塔煤矿、红柳林煤矿和张家峁煤矿(红柠张煤矿)作为研究区, 综合考虑到区域水文地质条件, 采用数值法预测分析其矿井涌水量, 解决模型边界条件概化及矿井内含水层与外侧水量交换不够确定的问题, 以期对煤炭开采的矿井涌水防控提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 神南矿区概况

神南矿区位于陕北侏罗纪煤田神木北部矿区的南部, 总面积约为 440 km^2 , 煤炭总资源量约为 67 亿 t, 由 3 个相邻的各持有独立矿权的煤矿组成, 分别为柠条塔煤矿、张家峁煤矿和红柳林煤矿。矿区西部为榆神府勘查区, 北部与朱盖塔井田相邻, 东北部与孙家岔、张家沟井田相邻, 东南部隔乌兰木伦河与新民普查区相望, 南部与榆神矿区的锦界井田和凉水井井田相邻。

1.2 地质及水文地质概况

1.2.1 含(隔)水层

研究区地层由老至新分别为侏罗系中统延安组(J_2y)、直罗组(J_2z)、安定组(J_2a)、新近系保德组(N_2b)、第四系中更新统离石组($Q_p l$)、上更新统萨拉乌苏组($Q_p s$)、马兰组($Q_p m$)、全新统冲积层(Q_h^{al})和风积沙(Q_h^{col})地层。

按地下水赋存条件, 研究区含水层分为新生界松散层孔隙潜水和中生界碎屑岩裂隙潜水及基岩裂隙承压水两大类。新生界松散层孔隙水包括冲积层孔隙潜水、马兰黄土孔隙裂隙潜水、萨拉乌苏组冲积湖积孔隙潜水、离石黄土孔隙裂隙潜水。中生界基岩裂隙承压含水层包括安定组基岩裂隙水、直罗组砂岩裂隙水、延安组基岩裂隙潜水和承压水。除以上两大类含水层外, 还有烧变岩裂隙孔洞潜水含水层, 其分布于乌伦木兰河、勃牛川、考考乌素沟及较大的支沟沟谷两岸厚煤层露头区。区内新近系上新统保德组黏土为隔水层, 分布不连续。

1.2.2 地下水补给、径流、排泄条件

地下水主要接受大气降水入渗补给, 补给量受降水量、降水强度、降水形式、地形地貌、含水层岩性等多种因素制约。区内多年来年平均降水量为 434.10 mm , 集中于 7~9 月。沙漠滩地区地形平缓, 透水性好, 有利于入渗补给, 入渗系数为 $0.20 \sim 0.30$, 黄土丘陵区, 地形破碎, 沟谷坡度大, 入渗系数一般小于 0.10 , 侏罗系烧变岩带岩石破碎, 孔隙裂隙发育, 接受降水补给条件较好。区内地表分水岭与地下分水岭基本一致, 地下水接受入渗补给之后向河谷区和洼地区运移。径流速度取决于含水层岩性及水力坡度 ($5\% \sim 10\%$)。沙漠区地下水汇流相对集中平缓, 黄

土沟谷梁峁区地下水流向分散,基岩承压水以区域侧向补给为主。河流基流排泄和潜水蒸发为地下水的主要排泄方式。

2 水文地质概念模型的建立

2.1 模型范围及结构

研究区东以窟野河和乌兰木伦河为界,西为秃尾河与榆溪河流域分水岭,南部为垂直等水位线边

界,北部取陕蒙行政分界线,南北长,东西宽,面积为 8995 km^2 。研究区南部垂直地下水流线,西部为榆溪河和秃尾河分水岭,概化为零流量边界;北边界有来自东北方向的地下水侧向径流补给,概化流量边界;东边界取乌兰木伦河和窟野河,概化为水头边界;模型区的顶面为潜水面,在该面上发生着降水入渗、潜水蒸发等垂向水交换作用,概化为潜水面边界;模拟区底面为侏罗系延安组泥岩,概化为隔水边界(图1)。

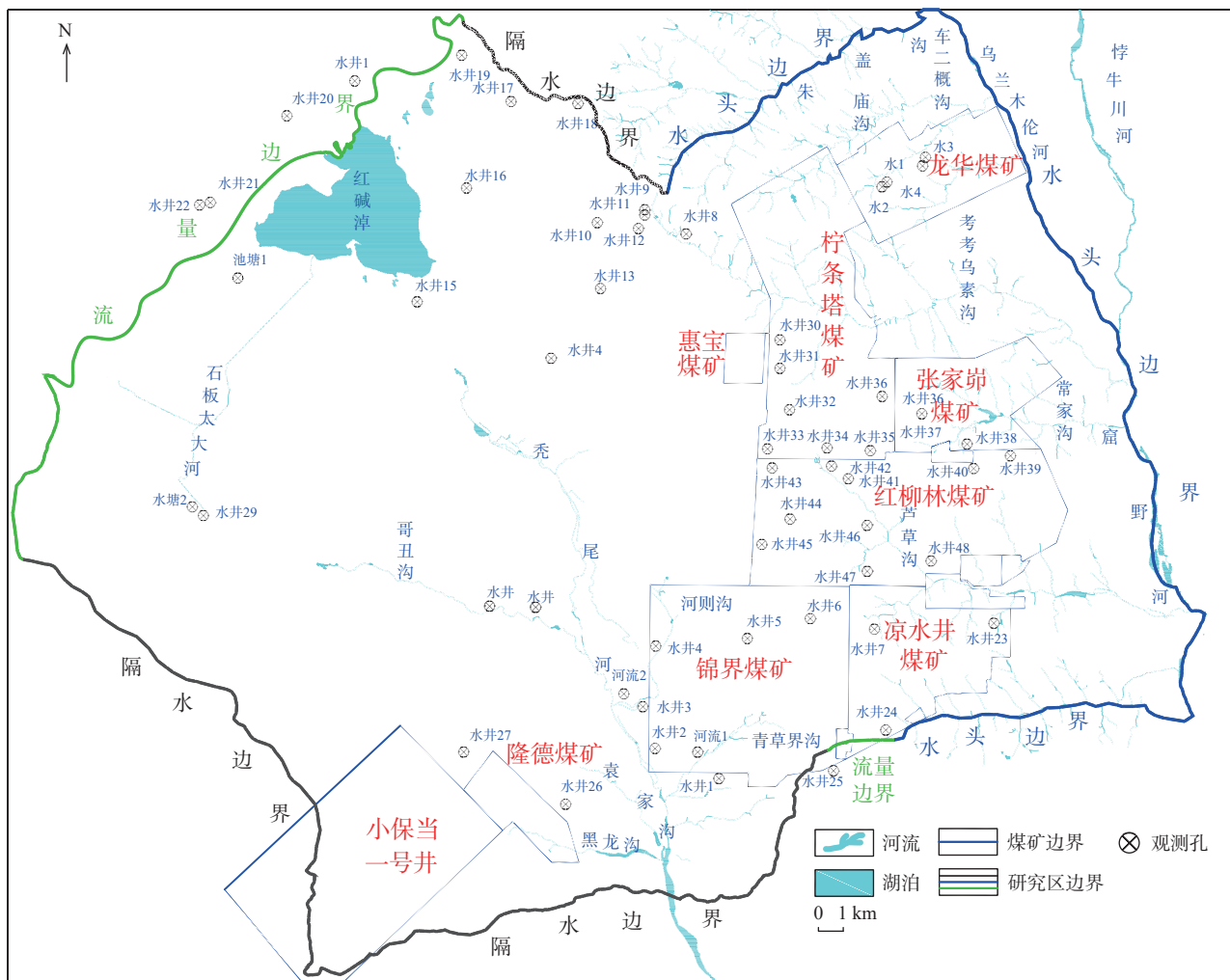


图1 研究区边界示意图

Fig. 1 Map showing the model boundary

根据含隔水层及煤矿开采情况,将模拟区概化为7层,由上至下分别为第四系含水岩组、保德组红黏土隔水层、洛河组砂岩含水岩组、侏罗系中统安定组弱透水层、直罗组碎屑岩风化裂隙含水层、侏罗系中统延安组弱透水层及煤层。模拟范围内

各含水岩组在平面上有不同程度的缺失,数值模型中要求每个模型层应延伸至边界,当其对应的实际地层在某个位置缺失时,根据缺失情况从相邻地层中分割出相应部分使得该模型层在该位置连续分布。

2.2 流量边界的处理

白垩系含水层和直罗组含水层侧向流补给量按达西定律计算 $(Q=K\frac{\Delta H}{\Delta L})$, 其中, 水位来自与相应含水层的地下水动态观测孔。计算得到白垩系和直罗组含水层边界流速分为 0.000 399 5 m/d 和 0.000 093 5 m/d。渗流面积按结构模型直罗组厚度确定。

2.3 降水入渗补给分析

降水入渗是研究区潜水含水层主要补给来源

(韩朝辉等, 2023), 但其入渗量不仅与降雨量有关, 还与研究区地形地貌、岩性、潜水埋深、包气带含水量等因素有关。研究区属于干旱-半干旱气候, 年降雨量较小, 入渗主要受地形及岩性影响。根据数值模拟区的包气带岩性结构, 结合降水入渗系数的经验值, 将模拟区降水入渗系数分为 4 个区(图 2), 对每个区进行赋值, 最终每个区入渗系数和补给强度如表 1 所示。

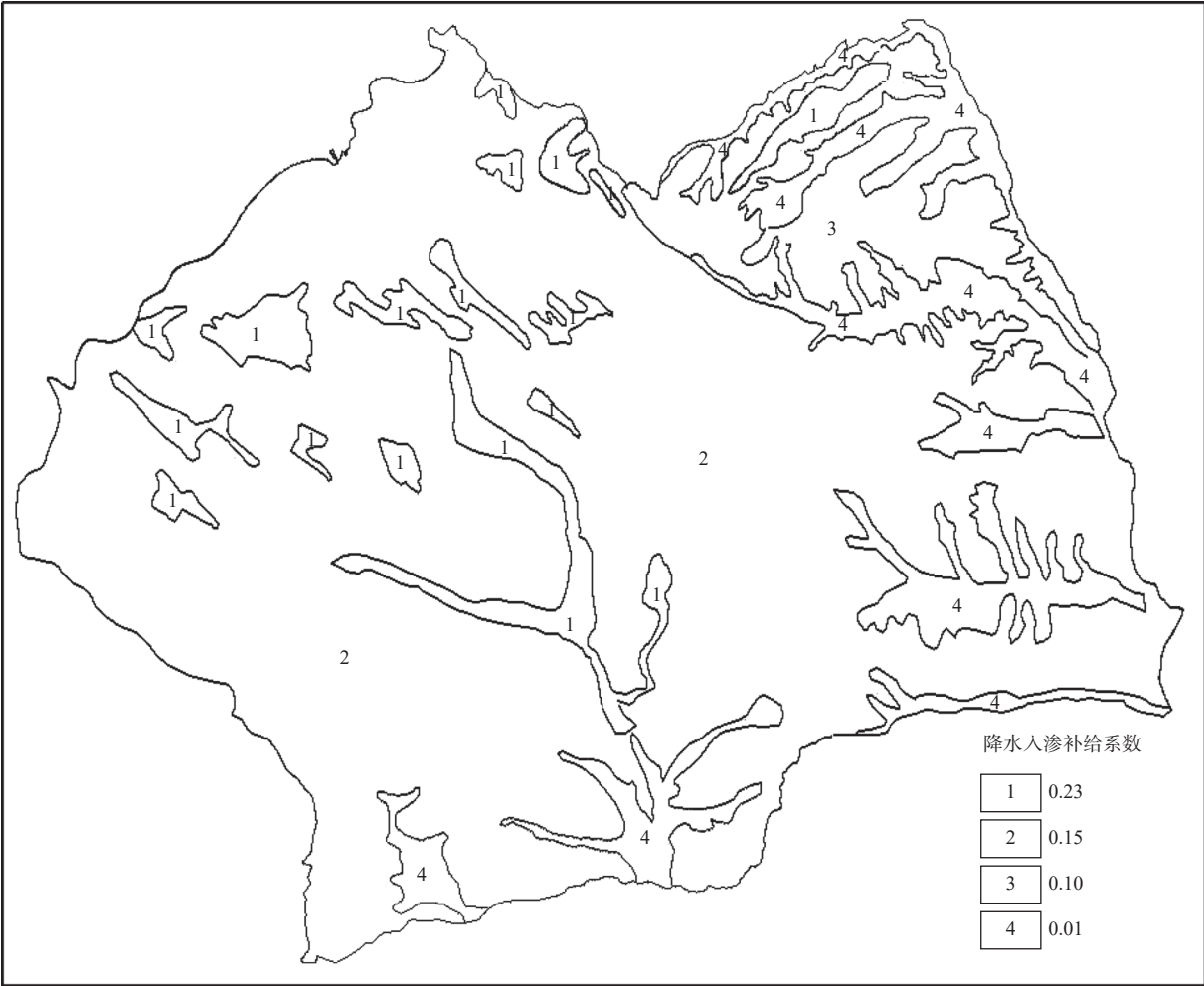


图 2 降水入渗补给系数分区图

Fig. 2 Distribution of recharge coefficient

表 1 包气带岩性、入渗系数及入渗补给强度表

Tab. 1 Lithologic character of unsaturated zone, recharge coefficient and recharge intensity

包气带岩性类型	入渗系数	降水入渗强度 (mm/year)
风积沙	0.23	108.4
萨拉乌苏组沙	0.15	70.7
黄土	0.10	47.2
基岩	0.01	4.7

3 数学模型的建立及求解

根据概化的水文地质概念模型, 地下水流系统的数学模型描述为:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_s \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial H}{\partial z} \right) - q_i \delta_i \\ H(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z) \\ K \frac{\partial H}{\partial n} |_{\Gamma_j} = q_j(x, y, z, t) \\ H(x, y, z) |_{\Gamma_1} = H(x, y, z) \\ \left\{ \begin{array}{l} H = z \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} = K \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 - (K + W) \frac{\partial H}{\partial z} + W \end{array} \right. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (x, y, z) \in D, t > 0 \\ (x, y, z) \in D \\ (x, y, z) \in \Gamma_j, t > 0, j = 2, 3, 4 \\ (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ \text{潜水面 } t > 0 \end{array}$$

式中: D 为渗流区域; H 为含水层水位标高(m); K 为含水层的渗透系数(m/d); S_s 为自由水面以下含水层储水率(1/m); $-\mu$ 为潜水含水层在潜水面上的重力给水度; W 为潜水面的降水补给量、蒸发排泄量等强度的综合(补给为正, 排泄为负)(m/d); $H_0(x, y, z)$ 为含水层的初始水位(m); Γ_1 为研究区东边界(第一类边界); Γ_j 为研究区南、西、北部边界(第二类边界), $j=2,3,4$; $q_j(x, y, z, t)$ 为二类边界的单宽流量(m/d), $j=2,3,4$; n 为渗流区东部、西部、北部边界的法线方向; q_i 为第 i 个单元的开采强度(1/d); δ_i 为第 i 个单元的狄拉克函数。上述数学模型采用地下水数值模拟软件 Visual Modflow 求解。

4 模型的识别与校验

4.1 观测水位动态分析

经 Visual Modflow 计算, J5、J10、J16 等各个观测孔计算值与实测值拟合结果见图 3。实测水位与模拟水位拟合满足收敛条件, 拟合点总体相对误差较小, 拟合效果较好, 水位误差范围一般在 1~2 m。

4.2 流场分析

经 Visual Modflow 将潜水流场末时刻(图 4a)和直罗组流场末时刻的计算值和实测值进行拟合(图 4b)。可见, 识别期结束时, 计算值与实测值拟合整体吻合较好, 地下水流动方向一致, 符合水动力场特征: 总体上由西北部向西南、东北、南 3 个方向径流。

4.3 矿井涌水量分析

红柳林、柠条塔、张家峁矿井涌水量计算结果与实际观测值分别见图 5a~图 5d 所示, 各个矿井涌水量的计算值与实测值总体趋势一致, 模型识别的总体效果较好。

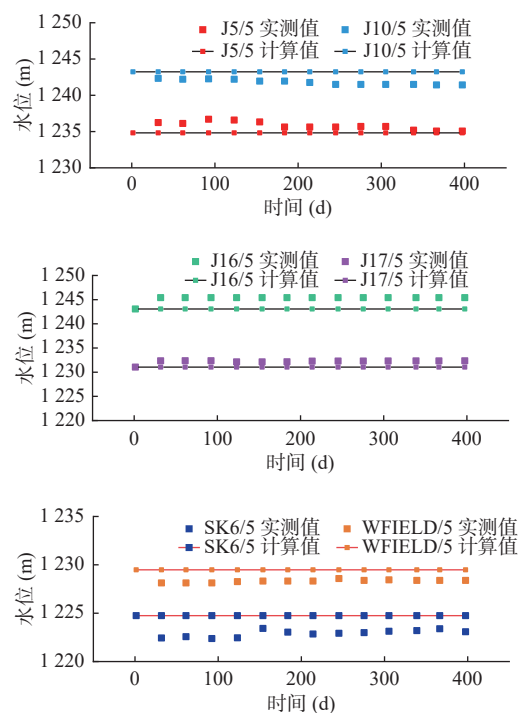


图 3 观测孔水位计算值与实测值拟合图

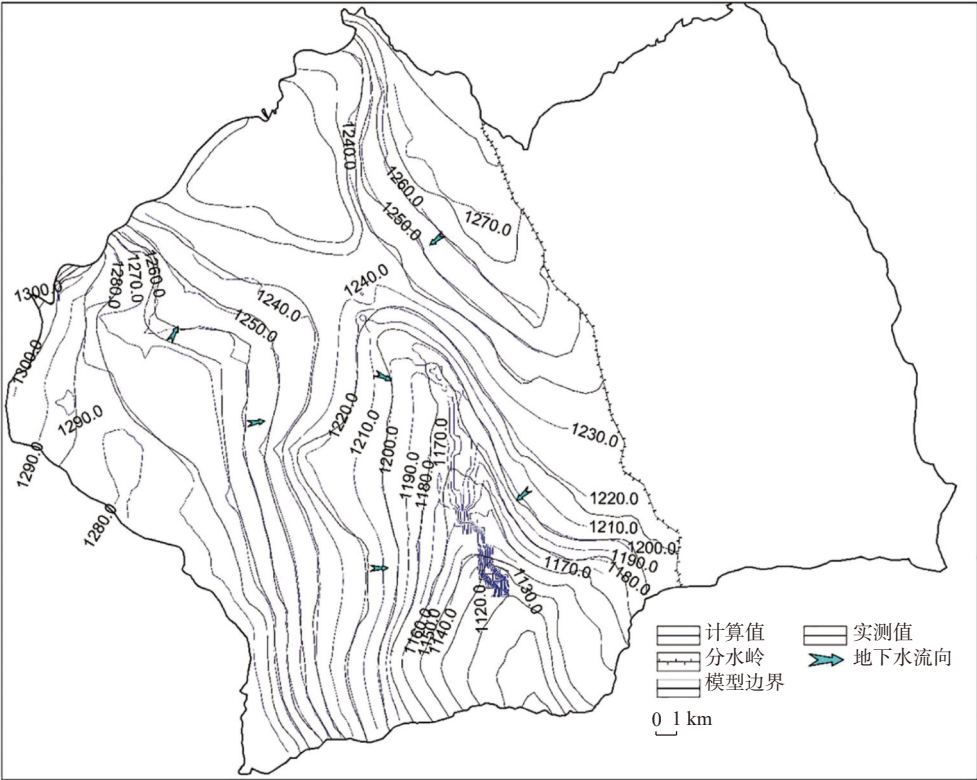
Fig. 3 Comparison between calculated and observed groundwater level in observation wells

从拟合情况可以看出, 模型经过调试, 浅层和深层地下水流场、地下水长观孔动态过程、矿井涌水量的计算等达到了较好的拟合, 数值模型可以代表该地区煤矿开采条件下地下水状态与地下水动态过程。对于深部直罗组含水层, 虽所模拟的水位个别观测孔差别较大, 但宏观趋势与空间分布规律是正确的。因此, 本数值模型进行预测分析可行。

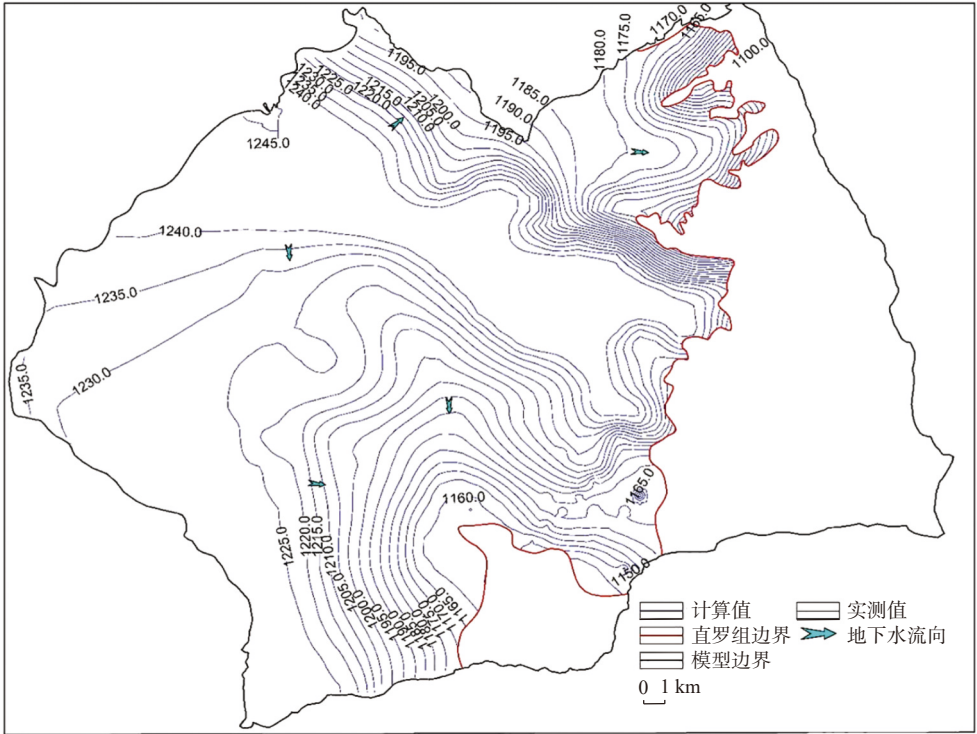
5 矿井涌水量预测分析

5.1 工作面与渗透系数设置

煤矿开采导致地层应力发生变化, 会产生冒落



(a) 潜水流场末时刻拟合图



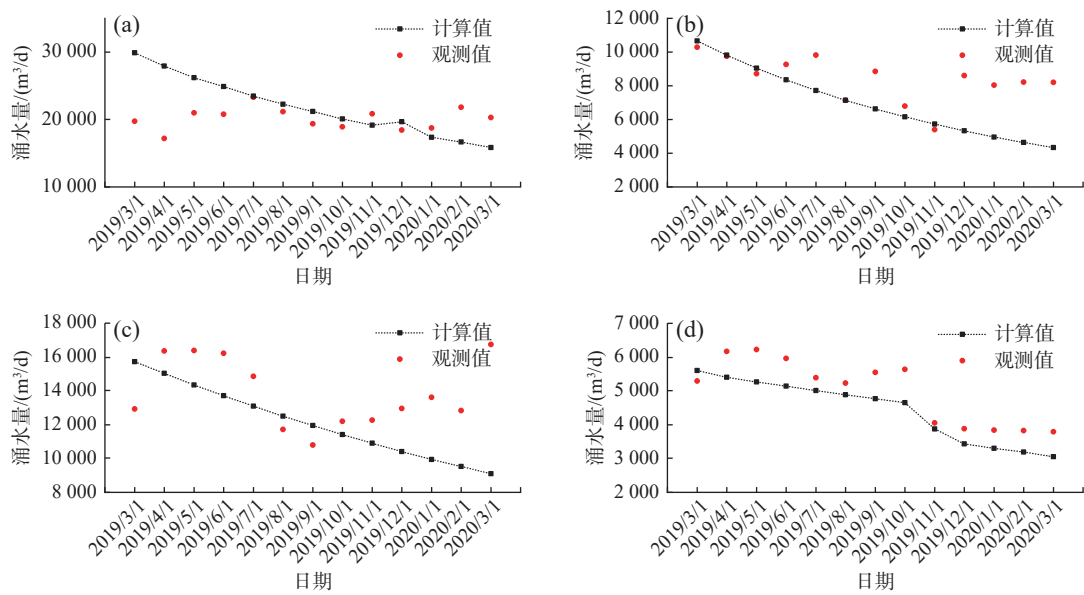
(b) 直罗组流场末时刻拟合图

图 4 潜水流场(a)与直罗组流场末时刻拟合图(b)

Fig. 4 Observation and simulation groundwater flow field of (a) phreatic aquifer and (b) confined aquifer

带、裂隙带和弯曲变形带,其中冒落带与裂隙带(两带)将对含隔水层渗透系数产生较大的影响。如果

“两带”穿透红黏土隔水层,会导致上覆第四系和白垩系含水层地下水下渗,对煤矿安全生产造成影



a. 柠条塔南翼煤矿 2-2 煤开采工作面；b. 柠条塔北翼煤矿 2-2 煤开采工作面；
c. 红柳林煤矿 4-2 煤开采工作面；d. 张家峁煤矿 2-2 煤开采工作面

图 5 实测与计算矿井涌水量对比图

Fig. 5 Observed and calculated mining water

响。因此,预测矿井涌水量,首先预判导水裂隙带的发育规律。根据煤矿实测值确定导水裂隙带高度(表 3),预测规划工作面导高(表 4)。柠条塔井田导高贯穿直罗组水层,未到达地表,隔水土层未受到破坏(表 4)。根据神南矿区柠条塔煤矿、张家峁煤矿和红柳林煤矿的未来 3 年短期开采规划,红柳林煤矿开采工作面在矿区东部,未影响到直罗组含水层,张家峁煤矿开采也未影响到直罗组含水层。因此,

本次仅预测柠条塔煤矿开采对直罗组含水层的影响。根据已有研究结果(陈佩, 2016; 杨志, 2019),因煤矿采动,砂岩及粉砂岩的渗透性将增加至原有渗透系数的 7.65~15.70 倍。考虑柠条塔导水裂隙带高度预测值,本次预测煤矿采掘工作面采用渗透系数增加值的平均值,即柠条塔井田所在区域渗透系数按模型校验结果的 11.65 倍计算,其他区域渗透系数仍按模型的识别结果。

表 3 煤矿导水裂隙带高度实测值表

Tab. 3 Measured height of fracture at two mines

井田	工作面	主采煤层	钻孔号	采厚(m)	实测导高(m)	实测裂采比
张家峁	N15203	5 ⁻² 煤	孔 8	5.60	165.11	29.48
	N15203	5 ⁻² 煤	孔 9	5.60	165.90	29.63
柠条塔	N1112	2 ⁻² 煤	孔 4	4.80	149.28	31.10
	N1114	2 ⁻² 煤	孔 6	4.80	145.23	30.26

表 4 规划工作面导高预测表

Tab. 4 Predicted height of fracture in planning working face

井田	平均采厚(m)		发育高度(m)		导高顶界埋深(m)		导高顶界到达层位	
	4 ⁻² 煤	5 ⁻² 煤	4 ⁻² 煤	5 ⁻² 煤	4 ⁻² 煤	5 ⁻² 煤	4 ⁻² 煤	5 ⁻² 煤
柠条塔	2.65	4.43	71.55	119.61	167.84	185.96	直罗组	直罗组
张家峁	3.51	6.10	94.77	164.7	91.65	87.90	第四系	第四系
红柳林	3.3	4.93	89.1	133.11	119.56	141.72	安定组	直罗组

5.2 预测结果分析

预测期水均衡结果见表 5。预测期地下水总补给量为 $6.82\times 10^5\text{ m}^3/\text{d}$, 其中降水入渗补给为主要的补给来源; 总排泄量为 $3.09\times 10^5\text{ m}^3/\text{d}$, 河流排泄为主要排泄项。均衡差为 $5.94\times 10^5\text{ m}^3/\text{d}$, 为正均衡。对比模型识别校验期, 水均衡为正均衡缘于矿区水位降至煤层底板, 地下水主要向矿区内排泄, 河水排泄量大 幅衰减。

2023 年 4 月 30 日直罗组含水层地下水 流场预测结果见图 6。与模型识别期流场对比发现, 预测期煤矿开采并未改变区域地下水水动力条件, 即流场总体流向没有明显变化。但由于煤矿开采, 在红柳林、张家 峁和柠条塔井田边界水力坡度急剧增大, 表明直罗组的地下水将向煤矿井田内排泄。

矿井涌水量预测结果显示(图 7), 3 个煤矿的涌水量趋势均与拟合数据趋势保持一致, 且逐渐减小,

这与工作面开采形成采空区后导致含水层的水慢慢疏干后的现象保持一致。

表 5 预测期水均衡表

Tab. 5 Water balance in the predicted period

项 目	均衡项	均衡量 (m ³ /d)	占比
补给项	河流补给	3.06×10^4	4.48%
	侧向补给	4.79×10^3	0.70%
	降水入渗补给	6.47×10^5	94.82%
	总补给量	6.82×10^5	100.00%
排泄项	河流排泄	3.09×10^4	34.92%
	矿井涌水	2.1×10^3	2.37%
	河沟排泄	2.82×10^4	31.86%
	蒸散发排泄	2.73×10^4	30.85%
	总排泄量	3.09×10^5	100.00%
均衡差		5.94×10^5	

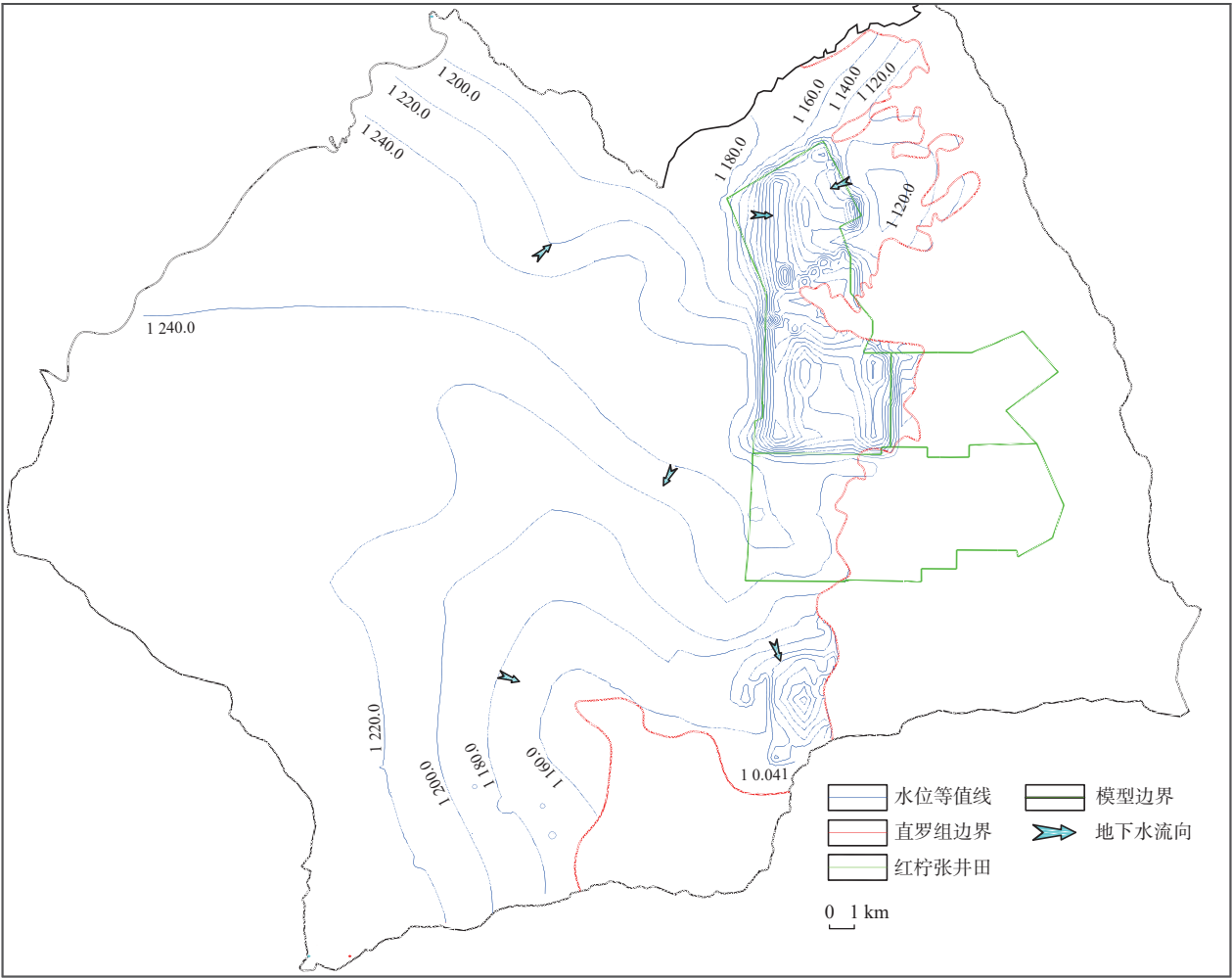


图 6 预测期直罗组含水层地下水流场图

Fig. 6 Groundwater contour lines of Zhiluo aquifer groundwater

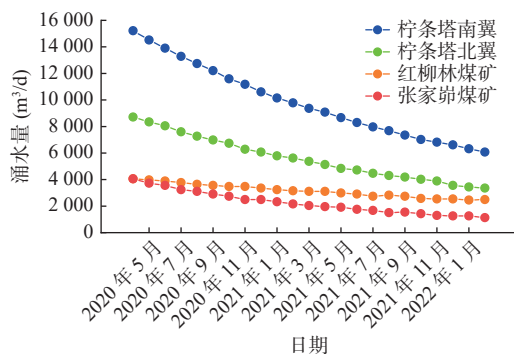


图7 矿井涌水量预测结果图

Fig. 7 Results of predicted mine water inflow in three mines

在预测模拟模型内建立不同层柠条塔井田的水均衡区,统计柠条塔井田水均衡量(表6),确定矿井涌水量。根据柠条塔井田水均衡统计结果可以看出,柠条塔井田主要以侧向流为主,侧向流入量占总流入量的75.67%,侧向流出量占总流出量的95.18%。由于柠条塔井田直罗组含水层无其他源汇项,水量损失全部为煤矿开采所致的矿井排水,由此确定未来矿井涌水量为117 743.52 m³/d(4 905.98 m³/h),其中直罗组砂岩贡献94.82%,2⁻²煤上覆延安组砂岩贡献2.79%。

表6 柠条塔井田水均衡统计表

Tab. 6 Water balance of Ningtiaota coal Mine

流入项	侧向流入量 (m ³ /d)	8 758.79	75.67%
	下层流入量 (m ³ /d)	2 815.78	24.33%
	合计 (m ³ /d)	11 574.57	
流出项	侧向流出量 (m ³ /d)	120 404.38	95.18%
	流出下层量 (m ³ /d)	6 097.92	4.82%
	合计 (m ³ /d)	126 502.30	
均衡差	侧向流差值 (m ³ /d)	-111 645.60	94.82%
	垂向流差值 (m ³ /d)	-3 282.14	2.79%
	合计 (m ³ /d)	-117 743.52	

6 结论

(1)笔者采用数值模拟方法,综合考虑了区域水文地质条件,分析并预测了柠条塔煤矿、红柳林煤矿和张家峁煤矿(红柠张煤矿)矿井涌水量,对解决模型边界条件概化及矿井内含水量与外侧水量交换不够确定的问题进行了探讨。

(2)神府南矿区地下水主要补给来源为大气降水入渗补给,主要排泄项为河流基流排泄。

(3)根据现有煤矿裂采比监测结果,神府南矿区3个矿井煤矿采动的裂隙发育不会影响至上覆红黏土隔水层,不会对上覆第四系含水层产生直接影响。

(4)柠条塔煤矿开采直接影响直罗组含水层,贡献达94.82%。

参考文献(References):

- 曹虎麒. 陕北典型煤矿开采引起含水层破坏机理物理模拟试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- CAO Huqi. Study on failure mechanism physical experiment of aquifers in northern Shaanxi typical mine [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- 陈佩. 煤矿采空区不同部位岩层裂隙率与其渗透性关系的实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- CHEN Pei. Experimental study on the relationship between fracture rate and permeability of rock strata in different parts of coal mine goaf [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- 杜臻, 张茂省, 冯立, 等. 鄂尔多斯盆地煤炭采动的生态系统响应机制研究现状与展望[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 78-88.
- DU Zhen, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Research Status and Prospect of Ecosystem Response Mechanism to Coal Mining in Ordos Basin [J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 78-88.
- 冯更辰, 郝俊杰, 谭俊, 等. VISUAL MODFLOW 模型在白洞铁矿矿区矿井涌水量预测中的应用[J]. 中国岩溶, 2011, 30(3): 271-277.
- FENG Gengchen, HAO Junjie, TAN Jun, et al. Application of VISUAL MODFLOW model in prediction of mine water inflow in Baijian iron mine area [J]. China Karst, 2011, 30(3): 271-277.
- 冯立, 张鹏飞, 张茂省, 等. 新时期榆林煤矿区生态保护修复与综合治理策略及路径探索[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 19-29.
- FENG Li, ZHANG Pengfei, ZHANG Maosheng, et al. Strategies and Practical Paths for Ecological Restoration and Comprehensive Management in Yulin Coal Mining Area in the New Era [J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 19-29.
- 冯书顺, 王国瑞, 马自强, 等. 基于 Visual Modflow 的矿井涌水量预测模拟研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(2): 239-242.
- FENG Shushun, WANG Guorui, MA Ziqiang, et al. Research on simulation of mine water inflow forecast based on Visual Modflow [J]. Coal Technology, 2016, 35(2): 239-242.
- 韩朝辉, 王郅睿, 田辉, 等. 汉中盆地地下水水化学特征及其成因研究[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 263-273.
- HAN Chaohui, WANG Zhirui, TIAN Hui, et al. Hydrochemical

- Characteristics and Genesis of Groundwater in the Hanzhong Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 263–273.
- 全国煤化工信息站. 国务院办公厅发布《能源发展战略行动计划(2014-2020年)》[J]. *煤化工*, 2014, (6): 71–71.
- 郭贤才. 陕西省煤炭资源简况[J]. *西北地质*, 1990, 23(3): 61–63.
- GUO Xiancai. Coal Resources in Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 1990, 23(3): 61–63.
- 侯恩科, 夏玉成, 樊怀仁, 等. 矿井陷落柱的成因分析及其预测[J]. *西北地质*, 1994, 27(2): 18–22.
- HOU Enke, XIA Yucheng, FAN Huairan, et al. Cause analysis and prediction of mine collapse column[J]. *Northwestern Geology*, 1994, 27(2): 18–22.
- “能源领域咨询研究”综合组. 中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究[J]. *中国工程科学*, 2015, 17(9): 1–5.
- The Comprehensive Research Group for Energy Consulting and Research. Strategic research on clean, efficient and sustainable and utilization of coal in China[J]. *China Engineering Science*, 2015, 17(9): 1–5.
- 申涛, 马雄德, 戴国锋. 浅埋煤层开采的矿井水来源判别[J]. *中国煤炭地质*, 2011, 23(10): 35–38.
- SHEN Tao, MA Xiongde, DAI Guofeng. Source discrimination of mine water from shallow buried coal seam mining[J]. *China Coal Geology*, 2011, 23(10): 35–38.
- 唐涛. 我国区域能源协调发展战略中重大能源生产基地建设研究[D]. 成都: 四川省社会科学院, 2011.
- TANG Tao. Research on the construction of major energy production bases in China's regional energy coordinated development strategy [D]. Chengdu: Sichuan Academy of Social Sciences, 2011.
- 杨彦利, 李娟. 基于 MODFLOW 对陶二煤矿矿井涌水量预测研究[J]. *西部探矿工程*, 2018, 30(2): 139–141+146.
- YANG Yanli, LI Juan. Prediction of Mine Water Inflow in Taoer Coal Mine Based on MODFLOW[J]. *Western Exploration Engineering*, 2018, 30(2): 139–141+146.
- 杨志. 陕北榆神矿区生态地质环境特征及煤炭开采影响机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- YANG Zhi. Study on the characteristics eco-geological environment and mining effect mechanism in Yushen coal mine district of northern Shaanxi [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- 伊茂森. 神东矿区浅埋深煤层关键层理论及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- YI Maosen. Study and application of key strata theory in shallow seam of Shendong mining area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- 张保健. 基于 Visual Modflow 的台格庙勘查区矿井涌水量预测[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(S1): 146–149+172.
- ZHANG Baojian. Mine water inflow forecast based on Visual Modflow in Taigemiao exploration area[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(S1): 146–149+172.
- Xie Y, Qi J, Zhang R, et al. Toward a Carbon-Neutral State: A Carbon–Energy–Water Nexus Perspective of China's Coal Power Industry[J]. *Energies*, 2022, 15(12): 4466.
- Liu S, Dai S, Zhang W, et al. Impacts of underground coal mining on phreatic water level variation in arid and semiarid mining areas: a case study from the Yushenfu mining area, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, 8: 269.
- Xu S, Zhang Y, Shi H, et al. Impacts of Aquitard Properties on an Overlying Unconsolidated Aquifer in a Mining Area of the Loess Plateau: Case Study of the Changcun Colliery, Shanxi[J]. *Mine Water and the Environment*, 2020, 39(1): 121–134.