



## 高强度采矿活动对地下水影响的数值模拟研究

吕情绪 狄军贞 李果 林鑫

引用本文:

吕情绪, 狄军贞, 李果, 等. 高强度采矿活动对地下水影响的数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 193–199.

LYU Qingxu, DI Junzhen, LI Guo. Numerical simulation study on the impact of high intensity mining activities on groundwater[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 193–199.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0721>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 煤炭高强度重复采动地下水资源漏失规律研究

Study on law of groundwater resources leakage under high intensity repeated mining

煤炭科学技术. 2022, 50(11): 131–139 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bd6ac8f7-562f-4b80-adc8-5b8e15b0a4ed>

##### 蒙陕接壤区典型煤层开采地下水系统扰动的定量表征

Quantitative characterization of the disturbance of groundwater system in typical coal seam mining in contiguous area of Inner Mongolia and Shaanxi

煤炭科学技术. 2023, 51(7): 83–93 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0470>

##### 台格庙矿区地下水水化学特征与演变规律研究

Study on chemical characteristics and evolution law of groundwater in Taigemiao Mining Area

煤炭科学技术. 2023, 51(9): 284–291 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1439>

##### 榆神矿区地下水与生态环境演化特征

Evolution characteristics of groundwater and eco-environment in Yulin–Shenmu Mining Area

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0c79e1ce-8587-446c-9681-61f9ed4c5c49>

##### 煤矿地下水库研究进展与展望

Research progress and prospect of underground mines in coal mines

煤炭科学技术. 2022, 50(10): 216–225 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d4ed6c75-a76e-4733-a37a-43e84bc31dbd>

##### 煤矿覆岩裂隙地下水渗流特征的试验研究

Experimental study on characteristics of groundwater fracture in coalmine overlying rock

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 168–176 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1405>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

吕情绪,狄军贞,李 果,等. 高强度采矿活动对地下水影响的数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 193–199.

LYU Qingxu, DI Junzhen, LI Guo, *et al.* Numerical simulation study on the impact of high intensity mining activities on groundwater[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 193–199.

## 高强度采矿活动对地下水影响的数值模拟研究

吕情绪<sup>1</sup>,狄军贞<sup>2</sup>,李 果<sup>1</sup>,林 鑫<sup>2</sup>

(1. 神华神东煤炭集团有限责任公司, 陕西 神木 719315; 2. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:** 为探究高强度采矿活动对地下水的影响, 选取内蒙古神东煤矿区某井田为研究对象, 该煤矿为平面上开采面积占比大、空间上开采尺寸大、时间上开采速度快为特点的高强度开采方式。在收集整理相关水文气象、勘测资料的基础上, 利用 GMS(Groundwater Modeling System) 数值模拟软件建立符合研究区水文地质条件的地下水流模型, 对研究区未来 10 年采动影响下的地下水水位及流场进行预测分析, 并对地下水水均衡状态进行分析。研究结果表明: 高强度采动对直罗组含水层的扰动影响最大, 在开采盘区内形成了多个水位降落漏斗, 降落漏斗中心水位下降幅度由第 1 年末的 105 m 增大到第 10 年末的 351 m, 该层地下水整体水位与径流条件均发生改变。高强度采动对志丹群含水层的扰动影响较小, 仅在矿井上方局部位置水流场发生改变, 10 年间, 采掘中心处水位由 20 m 下降至 116 m。通过水均衡分析可知, 地下水总补给量为 357 589.74 m<sup>3</sup>/d, 总排泄量为 357 563.62 m<sup>3</sup>/d, 误差为 0.007 3%, 其中降雨入渗是研究区的主要补给来源, 占比 51.90%, 其次为河流补给, 占比 45.21%; 河流排泄为主要排泄方式, 占比达 78.24%, 其次为潜水蒸发, 占比 9.82%, 矿井排水占比 4.52%。志丹群和直罗组含水层补给排泄分别占区域总均衡量的 12.0% 和 5.7%, 其中矿井排水量为直罗组含水层的主要排泄方式, 占比 71.3%。研究结果为保护矿区生产安全与可持续发展提供一定依据。

**关键词:** 煤炭开采; 地下水数值模拟; 地下水流场; 地下水模拟系统

中图分类号: TD741

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)05-0193-07

### Numerical simulation study on the impact of high intensity mining activities on groundwater

LYU Qingxu<sup>1</sup>, DI Junzhen<sup>2</sup>, LI Guo<sup>1</sup>, LIN Xin<sup>2</sup>

(1. Shenhua Shendong Coal Group Co., Ltd., Shenmu 719315, China; 2. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In order to explore the impact of high-intensity mining activities on groundwater, a mine field in Shendong Coal Mine Area of Inner Mongolia is selected as the research object. This mine is characterized by a large proportion of mining area on the plane, a large mining size in space and a fast mining speed in time. Based on the collection of relevant hydrometeorological and survey data, the Groundwater Modeling System numerical simulation software was used to establish a Groundwater flow model in accordance with the hydrogeological conditions of the study area. The Groundwater level and flow field under the influence of mining in the study area in the next 10 years were predicted and analyzed. The equilibrium state of groundwater is also analyzed. The results show that the disturbance of Zhiluo group Aquifer is most affected by high intensity mining, and several water level drop funnels are formed in the mining area. The water level in the center of the drop funnels increases from 105 m at the end of the first year to 351 m at the end of the tenth year, and the overall groundwater level and runoff conditions of this layer are changed. The influence of high intensity mining on the aquifer of Zhidan Group is small, and the water flow field changes only in the local position above the mine. In 10 years, the water level at the mining center decreases from 20 m to 116 m. According to the water balance analysis, the total groundwater recharge is 357 589.74 m<sup>3</sup>/d, and the total ex-

收稿日期: 2022-05-21

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0721

基金项目: 神东煤炭集团委托开发资助项目(HT[2020]5055)

作者简介: 吕情绪(1967—), 男, 内蒙古东胜人, 高级工程师。E-mail: 10022824@chnenergy.com.cn

通讯作者: 狄军贞(1979—), 男, 甘肃甘谷人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: dijunzhen@126.com

cretion is 357 563.62 m<sup>3</sup>/d, with an error of 0.007 3%. Rainfall infiltration is the main recharge source in the study area, accounting for 51.90%, followed by river recharge, accounting for 45.21%. River drainage was the main way of discharge, accounting for 78.24%, followed by phreatic evaporation, accounting for 9.82%, and mine drainage, accounting for 4.52%. The recharge and discharge of the Zhidan group and Zhiluo group account for 12.0% and 5.7% of the total mean measurement in the region, respectively, and mine drainage is the main discharge mode of the Zhiluo Formation aquifers, accounting for 71.3%. The research results provide some basis for the protection of production safety and sustainable development in mining areas.

**Key words:** coal mining; numerical simulation of groundwater; groundwater flow field; GMS

## 0 引言

我国正处于工业化、城镇化加快发展的历史阶段,能源需求总量仍有增长空间<sup>[1]</sup>。在相当长时期内,煤炭仍是保障我国能源安全稳定的基础能源,将持续为我国宏观经济的高增长作出贡献<sup>[2]</sup>。煤炭资源与地下水资源联系紧密,在开采过程中会引发含水层疏干、河沟断流等一系列环境问题,还可能发生矿井水害事故,严重威胁生产<sup>[3-6]</sup>。我国内蒙古地区煤炭资源储量丰富、赋存稳定,易于进行大规模、高效率、高强度的开采,但内蒙古地区植被稀少、荒漠化严重,本就干旱的气候遇上高强度的开采,水资源短缺形势日益严峻,因此更应重视该地区煤矿的地下水资源保护。采矿活动对地下水扰动研究归根结底是对地下水流运动的探究。目前,针对煤矿地下水流场变化的数值模拟研究已有大量报道<sup>[7-10]</sup>,ZHANG 等<sup>[11]</sup>认为平顶山十矿-270 m 水平与-300 m 水平同属一个水文地质单元,遂采用比拟法,以掘进面积作为变量,来预测采掘-300 m 时矿井涌水量,预测结果符合实际。张凤娥等<sup>[12]</sup>采用数值模拟法建立了神府矿区大柳塔矿区地下水平面渗流模型,模拟预测了采矿活动下地下水渗流场的动态变化过程,分析了地下水水位随采掘范围变化而波动的动态规律。白晓等<sup>[13]</sup>运用地下水流数值模型和降水量预测模型,预测分析了峰峰矿区岩溶地下水资源量和地下水流场的变化。由此可见,数值模拟法应用于矿区地下水演变具有重要意义。GMS(Groundwater Modeling System)是美国杨百翰大学环境模型实验室联合美国军队排水工作站研发的三维可视化地下水模拟软件。该软件集成了多种所需的地下水模拟系统,将它们以模块化的形式分类,主要包含了解决地下水三维流动问题的 MODFLOW、解决地下水溶质传输问题的 MODPATH、MT3D、解决饱和和非饱和地下水流及溶质传输问题的 FEMWATER 模块,还有 MAP、TINs、GIS 等多种辅助模块,对解决地下水问题的功能十分齐全。模拟过程中能根据研究区实际水文地质条件插入并调节点、线、面等对象,解

决研究区不规则边界概化的难题;不仅如此,GMS 软件还可以利用钻孔数据生成 Solid 模型,该建模方法能刻画逼真的地层空间结构,含、隔水层分布状态一目了然,可视化效果明显;数值软件不仅自身功能强大,还可与其他系统提供数据兼容,达到联合使用的效果,充分发挥其信息处理和分析功能<sup>[14-18]</sup>。

现以内蒙古神东矿区某井田为例,利用数值模拟法,预测矿区高强度开采下地下水流场的动态变化,探究高强度采动条件下地下水均衡状况和多含水层系统水流场的演变规律。

## 1 研究区概况

### 1.1 自然地理概况

研究区如图 1 所示,位于内蒙古与陕西交界处,属温带大陆性半干旱气候,年降雨量小、蒸发量大,研究区位于乌兰木伦河一级阶地的西缘,总体地势呈西北高、东南低的楔形特征。井田内径流主要有乌兰木伦河、补连沟和呼和乌素沟。

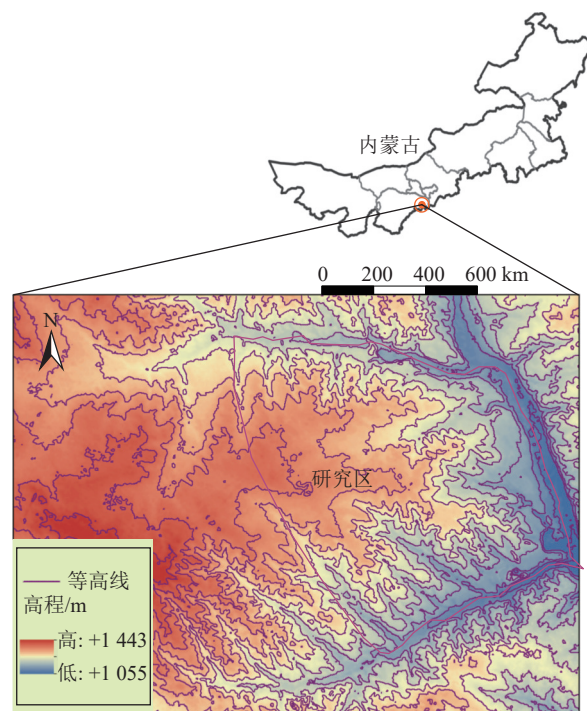


图 1 研究区位置与等高线地形

Fig.1 Location and contour map of study area



1.2 采掘概况

目前该煤矿开设计能力为 28 Mt/a, 工作面高达 5.5 m, 深度达 500 m, 工作面长度 300 m, 推进长度 4 500 m。根据范立民<sup>[19]</sup>对高强度开采的定义(表 1), 该煤矿属于空间高强度开采。采用多盘区开采方式和全部垮落、一次采全高的长壁综合机械化采煤方法。

表 1 煤炭资源开采强度划分指标  
Table 1 Coal resources exploitation intensity classification index

采高/m	开采强度			
	平面开采比 ≥ 60%	平面开采比 60% ~ 30%	平面开采比 30% ~ 10%	平面开采比 ≤ 10%
≥ 4.50	极高	高	中	低
1.30 ~ 4.50	高	中	中	低
≤ 1.30	中	低	低	低

2 地下水数值模型的建立

2.1 水文地质概念模型

2.1.1 含、隔水层概化

通过对研究区地层结构和岩性进行剖析, 将含水层自上而下划分为第四系孔隙潜水含水层、第三系红土隔水层、白垩系志丹群含水层、侏罗系安定组隔水层、侏罗系直罗组含水层和侏罗系延安组隔水层, 共 3 个含水层和 3 个隔水层。研究选取矿井的主要充水来源志丹群和直罗组含水层为模拟的目标含水层, 地层模型与剖面情况如图 2 所示。

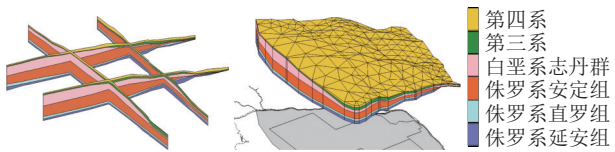


图 2 地层结构与剖面

Fig.2 Stratigraphic structure and section

2.1.2 边界条件概化

水平方向上: 根据水文地质资料分析, 研究区北面的呼和乌素沟、南面的活鸡兔沟、东面的乌兰木伦河切割出一个较为独立、完整的水文地质单元, 活鸡兔沟和呼和乌素沟为季节性河流, 故设定为定流量边界; 东侧乌兰木伦河设置为定水头边界; 西侧边界为人为设定的边界, 采用软件中的通用水头模块进行模拟, 流量为软件系统自动运算调整。

垂直方向上: 上方松散含水层可接受大气降水入渗和灌溉回归入渗补给, 主要排泄方式为人工开

采和侧向径流。底部边界为 12 煤至 22 煤底板, 渗透能力较差, 可作为垂向上的隔水边界。

2.1.3 地下水流动特征概化

区内含水层岩性各不相同, 地层介质的渗透性能随空间位置和水流方向的不同而变化, 可将含水层概化为非均质各向异性。地下水系统各运动要素随时间发生改变, 且含水层在垂向上存在相互的水力联系, 因此将研究区含水层概化为三维非稳定流。

2.2 水流模型模拟

2.2.1 模型离散

模拟区面积约 276 km<sup>2</sup>, 根据水文地质条件的概化和研究精度要求, 在水平方向和垂直方向上离散为有限数量的长方体, 圈定的平面网格尺寸为 327.8 m × 286 m, 剖分 75 行 75 列, 共 5 625 个单元格; 垂向上 6 层共 33 750 个单元格, 其中研究区活动单元格为 18 028 个。

2.2.2 模型识别与验证

模型识别验证过程中需要遵循以下原则<sup>[20]</sup>: ①以流场为校正依据, 需保证模拟地下水流场与实际流场走向与形态基本接近; ②以水位为校正依据, 需保证模拟地下水水位与实测水位变化趋势一致, 两者差值满足精度要求; ③区域地下水均衡量应该相差不大, 接近于公式计算补给排泄变化量; ④校正的水文地质参数要与实际情况对应, 不能出入太多。模拟校正过程以 2016 年全年地下水位观测资料为基础, 1 个月为 1 个应力期, 每个应力期内划分若干时间步长; 再以 2019 年全年地下水位观测资料为依据, 对模型参数进行再校正。采用试算法, 不断地调整试算水文地质参数, 使计算值落在 95% 置信区间范围内。由图 3、图 4 可看出模型水位拟合程度较好, 校正后的水文地质参数见表 2。

再以 2016 年 12 月模拟水位为初始水位, 在模型中输入 2017—2019 年各项模拟要素, 一个月为一个时间步长, 共 36 个时间步长; 根据 2019 年全年观测水位, 对模型进行验证, 观测孔水位拟合状态如图 5 所示。模拟结果误差均在允许区间内; 误差值紧密地散落在 y=x 曲线两侧, 说明拟合精度较高, 模拟结果可信度高, 水流模型校核情况较为理想。

3 煤矿开采对含水层水流场的影响

根据矿井开采计划, 通过软件对研究区 2020—2029 年这 10 年的地下水非稳定流模型进行计算, 开采盘区疏干排水量以 2019 年各盘区涌水平均值为基础, 每 2 年增加 3%。预测得到直罗组含水层水位

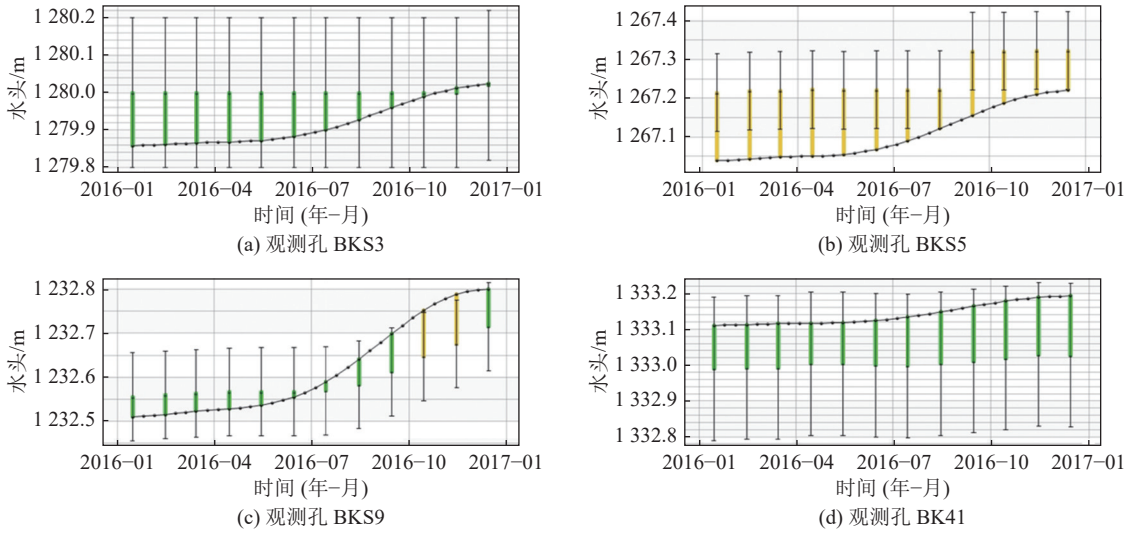


图 3 白垩系含水层观测孔校核情况

Fig.3 Check of observation holes in the Cretaceous aquifer

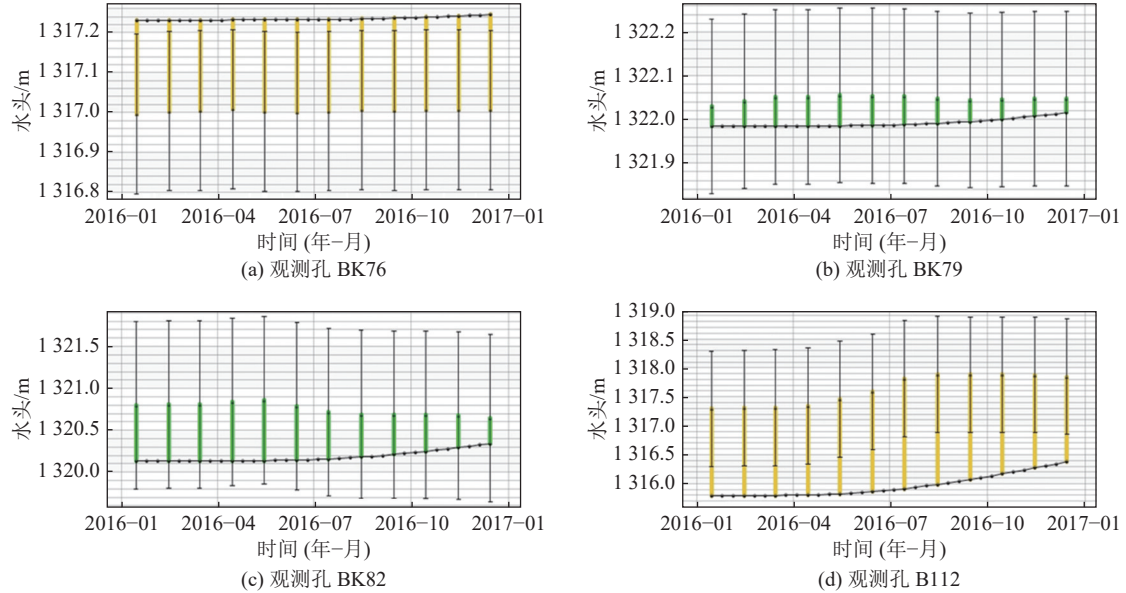


图 4 直罗组含水层观测孔校核情况

Fig.4 Check of observation holes in Zhiluo Formation

表 2 校正后水文地质参数  
Table 2 Corrected hydrogeological parameters

分区	各向渗透系数/(m·d <sup>-1</sup> )			储水率 $S_2/\text{m}^{-1}$	给水度 $S_y$
	$K_x$	$K_y$	$K_z$		
第一含水层	3.95	3.95	$3.95 \times 10^{-1}$	—	$3.0 \times 10^{-2}$
第一隔水层	$2.1 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-4}$	$5.5 \times 10^{-5}$	—
第二含水层	$2.3 \times 10^{-1}$	$2.3 \times 10^{-1}$	$2.3 \times 10^{-2}$	$6.4 \times 10^{-6}$	—
第二隔水层	$5.8 \times 10^{-3}$	$5.8 \times 10^{-3}$	$5.8 \times 10^{-4}$	$7.9 \times 10^{-7}$	—
第三含水层	$1.5 \times 10^{-1}$	$1.5 \times 10^{-1}$	$1.5 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-6}$	—
第三隔水层	$2.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^{-8}$	—

流场变化如图 6 所示。可以看出:①煤矿开采后,在盘区内形成了多个沿抽排水孔为中心的水位降落漏斗,第 5 年末地下水径流条件发生改变,由原先的西北向东南改变为四周向漏斗中心汇聚,在三、四盘区内表现得最为显著。越靠近漏斗中心水力梯度越大、地下水径流速度越快。②随着采空区面积的逐年增大,与初始流场相比,直罗组降落漏斗面积逐渐增加,影响半径不断扩大,漏斗中心处水位持续下降,水位下降幅度从第 1 年末的 105 m 到第 5 年末的 337 m,导致周边地下水向漏斗中心补给加剧,该层地下水水位整体下降,至 10 年末,该层地下水水位才趋于稳定,水位下降幅度在 351 m 左右。因此,开采活动

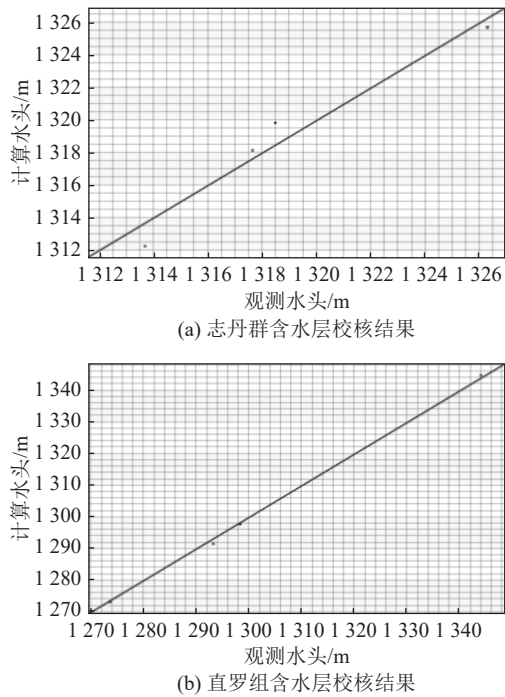


图5 2019年1月志丹群和直罗组含水层校核结果  
Fig.5 Check results of Zhidan Group and Zhiluo Formation aquifer in January 2019

对直罗组含水层影响程度较大。

根据数值软件对研究区未来10年地下水流变化的动态模拟,将志丹群含水层第1年末、3年末、5年末、10年末的预测水位流场与2016年初始水位流场相比较(图7)。

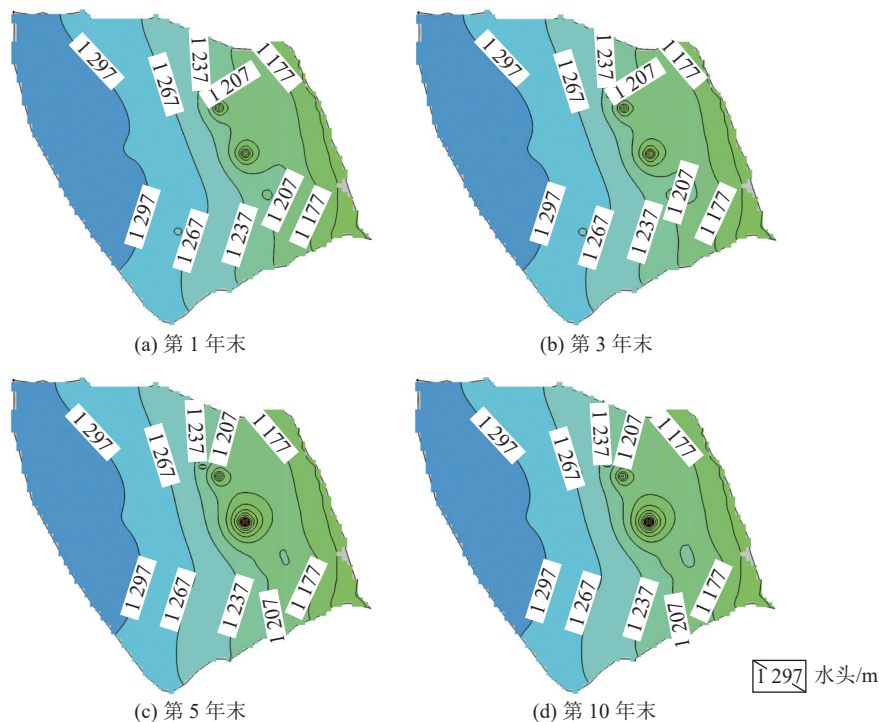


图6 直罗组含水层水流场  
Fig.6 Flow field of Zhiluo Formation aquifer

显变化,水位下降情况较为缓和,下降最大处为三盘区,水位下降了20 m。②随着开采年份、开采强度的增加,志丹群含水层水流场发生改变,第3年末,水位降落漏斗面积持续增大,漏斗中心水位下降了33 m。③到第5年末,降落漏斗面积进一步扩大,四周地下水逐渐向漏斗中心处补给,由于上部第四系潜水含水层渗透性较好,对下层的补给能力较强,因此,远离采掘区上方的地下水受扰动程度较弱,靠近采掘区上方的地下水流场及水位受影响程度相对较大。④第10年末,志丹群降落漏斗下降高度达116 m,面积扩大速率逐渐下降,地下水流场变化程度趋于平缓。

利用GMS软件中的Flow Budget模块得到地下水区域均衡量,地下水总补给量为 $357\,589.74\text{ m}^3/\text{d}$ ,总排泄量为 $357\,563.62\text{ m}^3/\text{d}$ ,误差为0.0073%,说明研究区处于均衡状态,模拟计算补给排泄量差距小,说明所建立的水流模型较为合理。

由表3水均衡统计可知,降雨入渗是研究区的主要补给来源,占比51.90%,其次为河流补给,占比45.21%;河流排泄为主要排泄方式,占比达78.24%,其次为潜水蒸发,占比9.82%,矿井排水占比4.52%。

补给总量与排泄总量均为 $42\,903\text{ m}^3/\text{d}$ ,占区域总补给项和总排泄项的12.0%,补给排泄处于均衡状态。补给总量与排泄总量均为 $20\,297\text{ m}^3/\text{d}$ ,占区域总补给项和总排泄项的5.7%,补给排泄处于均衡状态(图8、图9)。



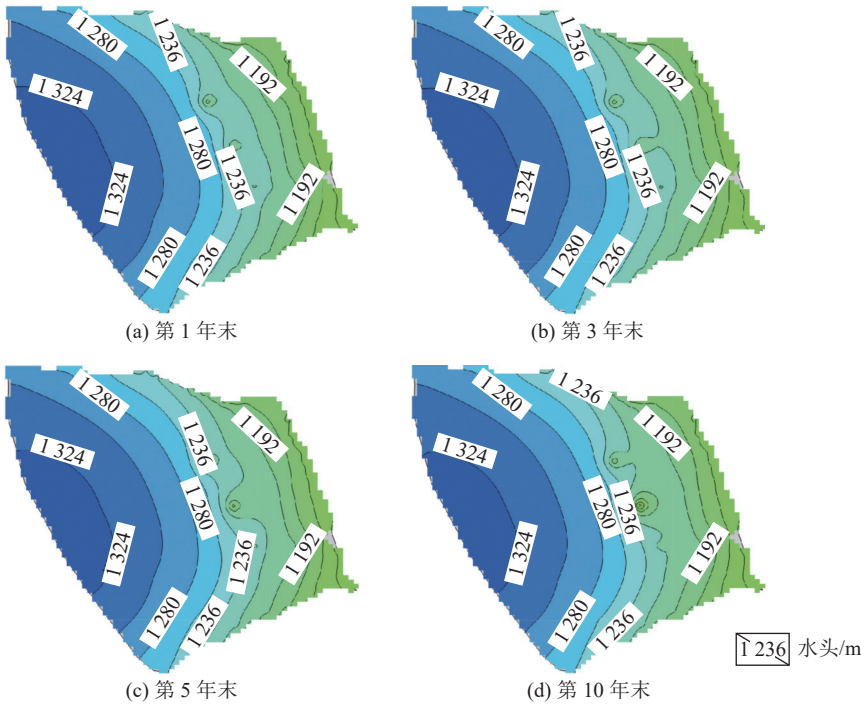


图 7 志丹群含水层水流域  
Fig.7 Flow field diagram of Zhidan Group aquifer

表 3 地下水均衡情况  
Table 3 Groundwater balance

水均衡项	类型	水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	类型占水均衡项比例/%
补给项	降雨入渗补给	185 591.06	51.90
	侧向补给	10 332.68	2.89
	河流补给	161 665.4	45.21
	小计	357 589.74	100
排泄项	潜水蒸发	35 122.67	9.82
	侧向排泄	26 522.79	7.42
	河流排泄	279 766.16	78.24
	矿井排水	16 152	4.52
	小计	357 563.62	100
均衡差		26.12	
误差		0.007 3%	

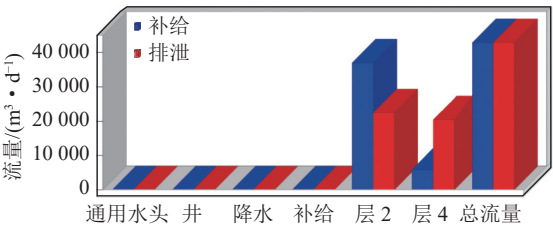


图 8 志丹群含水层的区域水均衡计算  
Fig.8 Regional water balance calculation chart of Zhidan Group aquifer

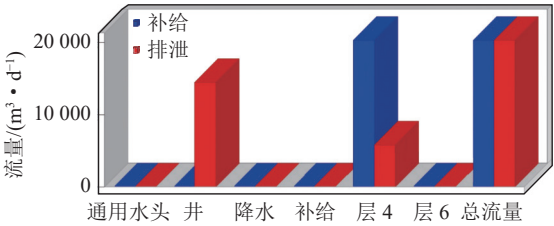


图 9 直罗组含水层的区域水均衡计算  
Fig.9 Regional water balance calculation chart of Zhiluo Formation aquifer

4 结 论

1)在采矿活动中,第 1 年末,漏斗中心水位下降了 105 m;随着采掘强度的加大,水位降落漏斗的面积逐渐扩大,第 3 年末下降了 176 m;第 5 年末地下水径流条件发生改变,降落漏斗中心水位下降幅度增加到 337 m;至第 10 年末,降落漏斗面积增大不明显、水位下降不显著,稳定在 351 m 左右。

2)志丹群含水层地下水流域并未发生较大改变,仅在矿井上方的局部区域水流域发生改变。第 1 年末水位降落漏斗逐渐出现,漏斗中心水位下降 20 m,至第 10 年末,采掘中心处水位下降了 116 m。

3)根据区域均衡与层间均衡分析,区域地下水总补给量为  $357\,589.74\text{ m}^3/\text{d}$ ,总排泄量为  $357\,563.62\text{ m}^3/\text{d}$ ,误差为 0.007 3%,说明研究区处于均衡状态,模拟计算补给排泄量差距小,说明所建立的水流模型

较为合理。降雨入渗是研究区的主要补给来源, 占比 51.90%, 其次为河流补给, 占比 45.21%; 河流排泄为主要排泄方式, 占比达 78.24%, 其次为潜水蒸发, 占比 9.82%, 矿井排水占比 4.52%。志丹群和直罗组含水层补给排泄分别占区域总均衡量的 12.0% 和 5.7%, 其中矿井排水量为直罗组含水层的主要排泄方式, 占比 71.3%。

#### 参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2019年国民经济和社会发展统计公报[N]. 中国信息报, 2020-03-02(002).  
National bureau of statistics. Statistical bulletin of the people's republic of china on national economic and social development 2019[N]. China Information News, 2020-03-02(002).
- [2] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期 (2030、2050) 发展战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
China energy medium - and long-term development strategy research project team. Research on china's energy medium - and long-term (2030, 2050) development strategy[M]. Beijing: Science Press.
- [3] 叶贵钧, 张 莱, 李文平, 等. 陕北榆神府矿区煤炭资源开发主要水工环问题及防治对策[J]. 工程地质学报, 2000, 8(4): 446–455.  
YE Guijun, ZHANG Lai, LI Wenping, *et al.* The main hydro-engineering-environmental-geological problems arose from the exploitation of coal resource in yu-shen-fu mine area of northern shanxi and their prevention measures[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2000, 8(4): 446–455.
- [4] 张耀辉, 熊祖强, 李西凡, 等. 复杂水文地质条件下矿井水害综合防治技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 167–174.  
ZHANG Yaohui, XIONG Zuqiang, LI Xifan, *et al.* Study on technology of mine water disaster prevention and control in underground mine under complex hydrogeological conditions[J]. *Coal science and technology*, 2021, 49(3): 167–174.
- [5] 胡振琪, 理源源, 李根生, 等. 碳中和目标下矿区土地复垦与生态修复的机遇与挑战[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 474–483.  
HU Zhenqi, LI Yuanyuan, LI Gensheng, *et al.* Opportunities and challenges of land reclamation and ecological restoration in mining areas under carbon neutral target[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 474–483.
- [6] 魏建平, 温志辉, 苑永旺, 等. 应力对含瓦斯煤解吸特征影响的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 35–43.  
WEI Jianping, WEN Zhuihui, YUAN Yongwang, *et al.* Study on influence of stress on desorption characteristics of coal containing gas[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(5): 35–43.
- [7] 刘 伟. 巍山煤矿开采对地下水影响的数值模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.  
LIU Wei. Numerical simulation study about mining influence on groundwater in weishan coal mine[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [8] MU W, WU Q, XING Y, *et al.* Using numerical simulation for the prediction of mine dewatering from a karst water system underlying the coal seam in the Yuxian Basin, Northern China[J]. *Environmental Earth Encees*, 2018, 77(5): 215.
- [9] 沈 冲. 基于GMS的安徽某铁矿矿井涌水量研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.  
SHEN Chong. A dissertation submitted to hebei university of engineering for the academic degree of master of engineering [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019.
- [10] SHAO Aijun, MENG Qingxin, WANG Shiwen, *et al.* Prediction of mine inrush water based on BP neural network method[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 989–994: 1814–1820.
- [11] ZHANG Kai, CAO Bin, LIN Gang, *et al.* Using Multiple methods to predict mine water inflow in the Pingdingshan No. 10 Coal Mine, China[J]. *Mine Water and the Environment*, 2017, 36(1): 154–160.
- [12] 张凤娥, 刘文生. 煤矿开采对地下水场影响的数值模拟: 以神府矿区大柳塔井田为例[J]. 安全与环境学报, 2002(4): 30–33.  
ZHANG Feng'e, LIU Wensheng. A numerical simulation on the influence of underground water flow regime caused by coal mining: a case study in daliuta, shenfu mining area[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2002(4): 30–33.
- [13] 白 晓, 边 凯, 贾亚琳, 等. 基于Modflow和ARIMA模型的峰峰矿区岩溶地下水模拟及预测[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(17): 84–90.  
BAI Xiao, BIAN Kai, JIA Yalin, *et al.* Numerical simulation of karst groundwater and dynamic prediction based on modflow and arima model in fengfeng mining area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(17): 84–90.
- [14] 李亚娇, 张 强, 李家科, 等. Visual MODFLOW与GMS研究综述[J]. 人民黄河, 2021, 43(4): 89–93, 130.  
LI Yajiao, ZHANG Qiang, LI Jiako, *et al.* Overview of research on visual MODFLOW and GMS[J]. *Yellow River*, 2021, 43(4): 89–93, 130.
- [15] 王 浩, 陆垂裕, 秦大庸, 等. 地下水数值计算与应用研究进展综述[J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 1–12.  
WANG Lu, LU Chuiyu, QIN Dayong, *et al.* Advances in method and application of groundwater numerical simulation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(6): 1–12.
- [16] SUN Wenjie, WU Qiang, LIU Honglei, *et al.* Prediction and assessment of the disturbances of the coal mining in Kailuan to karst groundwater system[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2015, 89/90: 136–144.
- [17] 沈 冲. 基于GMS的安徽某铁矿矿井涌水量研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.  
SHEN Chong. Study on gushing water volume of an iron mine in anhui province based on GMS[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019.
- [18] 初道忠, 赵忠琦. 基于GMS的大庄子矿区矿井最大涌水量预测研究[J]. 山东理工大学学报 (自然科学版), 2020, 34(5): 42–46.  
CHU Daozhong, ZHAO Zhongqi. Prediction of maximum water inflow in dazhuangzi mining area based on GMS[J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 34(5): 42–46.
- [19] 范立民. 榆神府区煤炭开采强度与地质灾害研究[J]. 中国煤炭, 2014, 40(5): 52–55.  
FAN Limin. On coal mining intensity and geo-hazard in Yulin-Shenmu-Fugu mine area[J]. *China Coal*, 2014, 40(5): 52–55.
- [20] 李全友, 任印国, 程忠良. 地下水数值模拟模型识别和验证方法与标准[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 30–31.  
LI Quanyou, REN Yinguo, CHENG Zhongliang. Identifying and verifying method & standard of groundwater numerical model[J]. *South-to-north Water Transfers and Water Science & Technology*, 2012, 10(2): 30–31.