

不同采煤方式下地下水时空响应特征 及保水开采效应研究

邓丽霞^{1,2,3}, 李 宁^{1,2,3}, 韩培东⁴

(1. 河南省地质局矿产资源勘查中心, 郑州 450000; 2. 河南省自然资源科技创新中心
(地球物理深部探测研究), 郑州 450000; 3. 河南省自然资源科技创新中心(天空
地遥感智能监测研究), 郑州 450000; 4. 太原理工大学 矿业工程学院, 太原 030024)

摘 要: 地下水资源对社会可持续、稳定发展以及生态环境平衡具有重要的地位, 为了减少煤矿开采对地下水资源的影响, 本文研究充填开采、限高开采和综放开采条件下对地下水时空变化特征的影响, 利用 Visual MODFLOW 地下水数值模拟软件, 构建了地下水流数值模型, 对含水层、隔水层、开采边界进行了概化, 得到不同采煤方式下含水层、隔水层概化模型以及开采参数概化模型。模拟分析了不同采煤方式对地下水位时空变化特征的影响以及对地下水量时空变化特征的影响。研究得出, 随采动强度由充填向限高、综放增强, 越流系数与导水裂隙带高度同步升高, 含水层与采空区水力联系逐渐强化, 地下水受扰动程度由弱至强依次递增。限高开采和综放开采对第四系与志丹群含水层的水位有较大的影响, 红石峡水源地距离矿区越近, 受到影响越大, 并且采用充填开采时, 对红石峡水源地的影响程度最低。采用充填开采、限高开采、综放开采时, 潜水蒸发量减少了 9 863.73 万 m³/a、9 882.68 万 m³/a 和 9 898.40 万 m³/a。采用充填开采和限高开采, 一定程度上能够减小开采对地下水的影响, 减轻地下水资源的损失量, 一定程度上保护了地下水资源。研究对于煤炭资源和水资源可持续发展具有重要的意义。

关键词: 开采方式; 地下水; 时空变化; 数值模拟; 水位变化

中图分类号: P641.7

文献标志码: A

Study on the Impact of Different Mining Methods on the Spatiotemporal Variation Characteristics of Groundwater

DENG Lixia^{1,2,3}, LI Ning^{1,2,3}, HAN Peidong⁴

(1. Mineral Resources Exploration Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450000, China; 2. Henan Natural Resources
Science and Technology Innovation Center (Geophysical Deep Exploration Research), Zhengzhou 450000, China;
3. Henan Province Natural Resources Science and Technology Innovation Center (Sky-Earth-Space Remote Sensing Intelligent
Monitoring Research), Zhengzhou 450000, China; 4. Mining Engineering College, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Groundwater resources play a crucial role in ensuring the sustainable and stable development of society as well as maintaining ecological balance. To mitigate the impact of coal mining on groundwater resources, this study investigates the effects of backfill mining, height-limited mining, and comprehensive top coal caving (CTC) mining on the spatiotemporal characteristics of groundwater changes. Using the Visual MODFLOW numerical groundwater simulation software, a groundwater flow numerical model was constructed, with aquifers, aquitards, and

收稿日期: 2025-12-25

基金项目: 山西省自然科学基金(202203021221077, 201901D111050)

作者简介: 邓丽霞(1991-), 女, 工程师, 主要研究方向为地质水工环

通信作者: 李 宁(1992-), 男, 工程师, 主要研究方向为地质矿产, E-mail: li179858710@qq.com

mining boundaries generalized to develop aquifer-aquitard conceptual models and mining parameter conceptual models under different mining methods. The simulation analyzed the influence of various mining methods on the spatiotemporal variations of groundwater levels and volumes. The findings indicate that as mining intensity increases from backfill to height-limited and CTC mining, the leakage coefficient and the height of the water-conducting fracture zone rise synchronously, while the hydraulic connection between aquifers and goaf zones strengthens progressively. The degree of groundwater disturbance increases from weak to strong accordingly. Height-limited mining and CTC mining have significant impacts on the water levels of the Quaternary and Zhidan Group aquifers, with the Red Rock Spring water source being more affected as it approaches the mining area. Notably, backfill mining results in the lowest impact on the Red Rock Spring water source. Under backfill, height-limited, and CTC mining methods, the phreatic evaporation volume decreased by 98.637 3 million m³/a, 98.826 8 million m³/a, and 98.984 0 million m³/a, respectively. Backfill mining and height-limited mining can partially reduce the impact of mining on groundwater, mitigate the loss of groundwater resources, and provide a certain degree of protection for groundwater. This research holds significant implications for the sustainable development of coal resources and water resources.

Key words: mining method; groundwater; spatiotemporal variation; numerical simulation; water level variation

0 引言

我国地下水资源丰富,具有储存丰富、水质优良、开采便利、分布广泛的优点,对于矿区的地下水资源,伴随着煤炭资源的开采,水害事故的频发,严重威胁着矿井安全生产^[1-3],矿井常采用疏干排水措施,并且由于煤炭资源的开采,煤层上方的岩层出现垮落和出现大量裂隙,上覆岩层形成导水裂隙带,致使地下水资源的径、补、排的条件发生改变,对地下水资源造成严重的影响,不仅造成地下水位下降,而且造成井泉干涸,致使地表生态环境造成严重的破坏,造成地表植被退化、土壤荒漠化和地表沉降,制约着煤炭资源和水资源可持续发展^[4-7],目前保水开采技术主要有限高开采保水采煤技术、充填开采保水采煤技术和注浆改造保水采煤技术,关于煤矿开采影响下地下水水流规律的研究,国内学者展开了诸多研究,文献[8]采用类比法,计算了小庄矿井开采导水裂缝带高度,并分析了小庄矿井采煤对地下水的影响及保水采煤措施;文献[9]采用理论计算公式,得到孟家湾勘查区了 2-2 煤层开采的最大裂隙带发育高度,并评价了孟家湾勘查区采煤对地下水的影响;文献[10]以霍州煤电集团宝鑫煤矿为例,评价了煤矿采煤对地下水资源的影响;文献[11]采用实验室测定和现场勘查的方法,研究了露天矿区采煤水位下降和土壤重构对地下水补给的影响;文献[12]研究了榆林市煤炭资源整合项目采煤对地下水

环境的影响及保护措施;文献[13]综合分析了采煤活动对地下水环境的影响与防治;研究都取得了一定的成效^[8-13]。

煤矿开采对地下水影响取决于采动对上覆岩层的破坏程度,研究区东部相邻红石峡水源地保护区,水源地水主要接受区内浅层地下水的补给,研究区主采 2 号煤层,煤层开采后,导水裂隙带可能会对红石峡水源地保护区水资源造成影响,致使矿区急需采取保水采煤措施,实现地下水资源保护。为此,本文研究了不同采煤方式对地下水时空变化特征的影响,本文利用 Visual MODFLOW 地下水数值模拟软件分析了不同采煤方式对地下水位、水量时空变化特征的影响。研究为实现煤矿区水资源的保水开采提供理论支持。

1 研究区水文地质条件

研究区位于内蒙古东胜煤炭,地质东部低、西部高,中间低、南北低,海拔 1230~1320 m,地貌为沙丘地貌,东北部有季节性河流。研究区主采 2-2 号煤层,煤层厚度约 6.5 m。

1.1 含水层及隔水层

研究区含水层分为 3 类,主要为碎屑岩类孔隙、裂隙承压水含水层,碎屑岩类孔隙、裂隙潜水含水层,松散岩类孔隙潜水含水层。

1)碎屑岩类孔隙、裂隙承压水含水层。该含水层主要由 2-2 煤底部隔水层、侏罗系中下统延安组~

2-2 煤层孔隙裂隙承压水含水层、侏罗系中统直罗组承压含水层、侏罗系中统安定组弱透水层组成。2-2 煤底部隔水层位于 2-2 煤层底部,主要以粉砂岩、泥岩为主厚约 5.7 m,研究区全区发育,隔水能力一般;侏罗系中下统延安组~2-2 煤层孔隙裂隙承压水含水层主要由细砂岩组成,含水层厚度约 24.9~88.9 m,水位标高为 1 088.9~1 263.9 m,埋深为 6.2~179.6 m,地下水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型,钻孔涌水量 0.28~1.55 L/s,渗透系数为 0.011~0.031 m/d,pH 值为 7.6~9.0,矿化度为 204~4200 mg/L。侏罗系中统直罗组承压含水层以西粒砂岩为主局部夹杂粉砂岩和泥岩,细粒砂岩平均厚度约 185 m,该含水层较厚,单位涌水量为 0.121~0.288 L/s·m,中等富水性,地下水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型,矿化度为 0.8~1.3 g/L,水质比较差,该含水层为研究区直接充水含水层;侏罗系中统安定组弱透水层以粉砂岩、砂质泥岩、泥岩为主,中间夹杂着中粒岩和细砂岩,厚度约 60 m,隔水性能一般,越流量为矿井涌水量 8%~16%。碎屑岩类孔隙、裂隙承压水含水层地下水流场等值线如图 1 所示。

2)碎屑岩类孔隙、裂隙潜水含水层。该含水层主要由下白垩统志丹群潜水含水组构成,主要由粗粒砂岩、泥岩和细粒砂岩组成,厚度约 319.2 m,单位涌水量为 0.535~1.174 L/s·m,富水性为中等-强,地下水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 、 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 型,矿化度小于 1 g/L,矿化度较小,水质相对较好,该含水层为研究区间接充水含水层。碎屑岩类孔隙、裂隙潜水含水层地下水流场等值线如图 2 所示。

3)松散岩类孔隙潜水含水层。该含水层主要由第四系潜水含水层组成,主要由黄土和积沙组成,厚

度约 30.7 m,主要接受大气降水补给,地下水埋深为 0.66~13.18 m,水位降低深度为 3.5~12.0 m,单位涌水量为 0.091~0.622 L/s·m,富水性为弱-中等,渗透系数为 4.5~12 m/d,地下水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,矿化度为 0.6~2.9 g/L,矿化度较小,水质较好。

1.2 地表水系

研究区地表河流为季节性河流——白河,距离研究区约 4 km,该河流由北向东流出,流入陕西的河口水库,源头为乌兰陶勒盖庙,经过黄陶勒盖乡,然后进入陕西省河流面积约 970 km²,在乌审旗境内长 25 km。

在研究区西南 7 km 处,有内陆水系——海流兔河,该河流由北西向东南流出,发源于乌审旗陶利苏木,经过纳林河乡,流入无定河。

2 研究区开采技术评价

随着我国煤矿技术水平的提高,针对厚煤层,主要采用综合机械化放顶煤采煤技术和综合机械化一次采全高采煤技术,为了有效地研究不同采煤技术条件下,对地下水时空变化特征的影响,本文选用了 3 种采煤技术:充填开采、限高开采和综放开采^[14-15]。

1)充填开采。充填开采主要是利用充填技术,将煤炭资源替换出来,从而控制上覆岩层的变形,实现保水开采,常见的是条带充填开采,如图 3(a)所示,该技术能够减少煤层开采对上覆岩层的影响,从而抑制导水裂隙带的发育,实现绿色开采,缺点是浪费煤炭资源^[16-17]。

2)限高开采。主要是限制采煤高度的方法,来实现减少上覆岩层位移破坏,主要适用于厚煤层,上

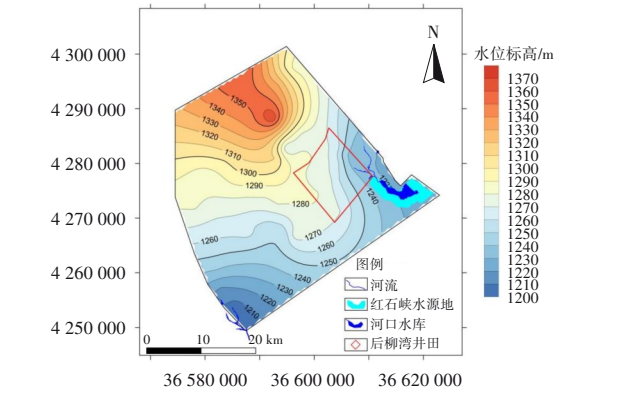


图 1 碎屑岩类孔隙、裂隙承压水含水层地下水流场等值线
Fig.1 Contour lines of groundwater flow field in confined aquifers with pores and fractures in detrital rocks

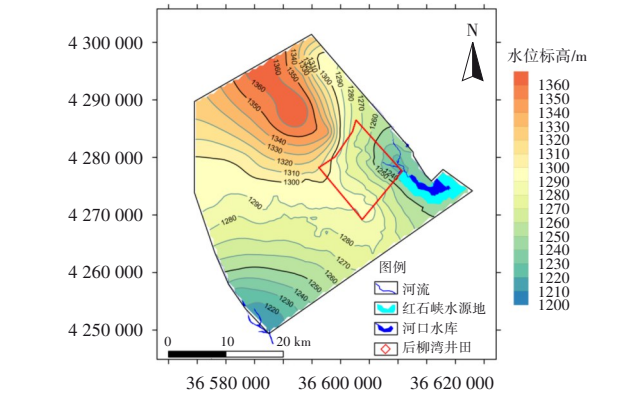


图 2 碎屑岩类孔隙、裂隙潜水含水层地下水流场等值线
Fig.2 Contour lines of groundwater flow field in detrital rock pore and fissure aquifers

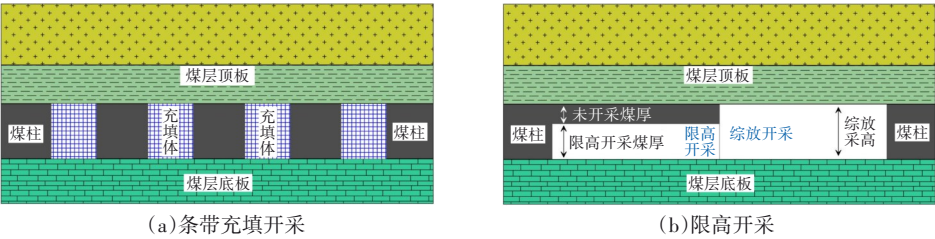


图3 条带充填开采和限高开采示意图

覆岩层富水性强,具有生态价值和供水价值的区域。如图3(b)所示,缺点是浪费煤炭资源^[18-19]。

3)综放开采。该方法为研究煤矿正在使用的方法,该方法能够全部开采煤炭资源,煤炭回收率高,但是造成上覆岩层顶板的破坏,致使破坏地下水及生态环境,矿井临近红石峡水源地,如采用综放开采,可能造成地面裂缝和沉降,影响红石峡水源地的完整性及安全性^[20-21]。

3 地下水流数值模型构建

3.1 含水层、隔水层概化

根据章节1具体研究区水文地质条件,从下向上概化了1个弱透水层和4个含水层,1个弱透水层为安定组弱透水层,4个含水层分别为2-2采煤区、侏罗系延安组至2-2煤顶板含水层、侏罗系直罗组承压含水层以及第四系与志丹群含水层。

为了便于考察导水裂隙带分布,将侏罗系直罗组承压含水层分为3部分:侏罗系直罗组下部承压含水层(占整含水层50%)、侏罗系直罗组中部承压含水层(占整含水层30%)以及侏罗系直罗组上部承压含水层(占整含水层20%)。开采条件下含水层、隔水层概化模型如图4所示。

3.2 开采边界概化

由于2-2煤层的开采,造成上覆岩层结构发生破坏,导致裂隙带发育,致使潜水含水层、弱透水层、

承压含水层中的水涌入矿井,其破坏示意^[22-23]如图5所示。

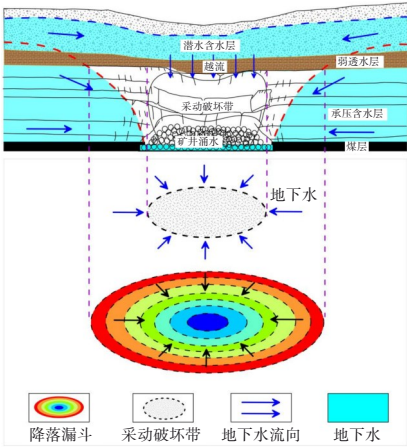


图5 煤层开采后覆岩破坏含水层失水示意
Fig.5 Schematic diagram of aquifer loss due to overlying rock damage after coal seam mining

为了准确反映图5的整个过程,将2-2号煤底板设置为边界,该边界设置为Drain边界,具有矿井排水、不能向含水层流动、底部边界不发生水量交换的特性,其参数赋值计算公式为^[24-25]:

$$\begin{cases} C_{\text{unit}} = \sigma/A, \\ \omega = K/M, \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 为排水沟边界布设面积; M 为含水层厚度; K 为上覆含水层和煤的渗透系数; σ 为上覆含水层和煤的越流系数; C_{unit} 为单宽通量。

3.3 开采参数分区

为了真实模拟在采煤影响下导水裂隙带对含水层、隔水层的影响,本文将开采渗透系数设置为12倍的初始渗透系数。在垂直方向上界限设置为导水裂隙带最大发育高度,并划分开采参数分区;在水平方向上设置采区作为开采参数分区。

3.4 地下水流数学模型

根据章节3.1—3.3,建立了地下水流数学模型^[26-27],如下:

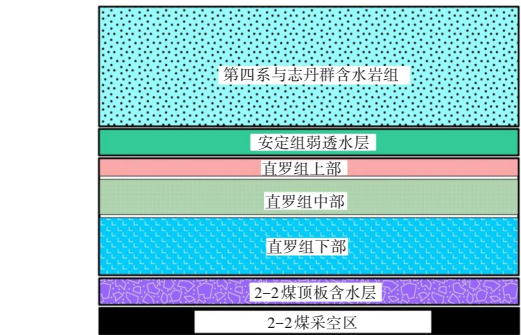


图4 开采条件下含水层、隔水层概化模型

Fig.4 Generalization model of aquifer and aquitard under mining conditions

潜水:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}h\frac{\partial H_1}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}h\frac{\partial H_1}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}h\frac{\partial H_1}{\partial z}\right)+W_1=\mu\frac{\partial H_1}{\partial t};(x,y,z)\in\Omega,t\geq 0, \\ H_1(x,y,z,t)|_{t=0}=H_0(x,y,z);(x,y,z)\in\Omega, \\ Kh\frac{\partial H_1}{\partial \eta}|_{A_1,A_2,A_3,A_4}=q_1(x,y,z,t);(x,y,z)\in A_1,A_2,A_3,A_4,t\geq 0, \end{cases}$$

承压水:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial H_2}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial H_2}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial H_2}{\partial z}\right)+W_2=S_s\frac{\partial H_2}{\partial t};(x,y,z)\in\Omega,t\geq 0, \\ H_2(x,y,z,t)|_{t=0}=H_0(x,y,z);(x,y,z)\in\Omega, \\ T\frac{\partial H_2}{\partial \eta}|_{A_1,A_2,A_3,A_4}=q_2(x,y,z,t);(x,y,z)\in A_1,A_2,A_3,A_4,t\geq 0, \\ Q_D|_{\Gamma_3}=C_r(H_2-H_D), \end{cases}$$

式中： C_r 为含水层渗透性参数； Q_D 为矿井涌水量； Γ_3 为第三类边界； η 为流量的边界外法线方向； q_1 和 q_2 为单宽流量； T 为承压含水层导水系数； h 为潜水含水层厚度； S_s 为承压含水层储水系数； μ 为潜水含水层重力给水度； t 为时间； A_1 — A_4 为渗流区域的第二类边界； W_2 为煤矿开采后，承压含水层补给和排泄水量之和； W_1 为煤矿开采后，潜水含水层补给和排泄水量之和； K_{xx} 为在 x 方向上的渗透系数； K_{yy} 为在 y 方向上的渗透系数； K_{zz} 为在 z 方向上的渗透系数； H_D 为采区排水高度； H_2 为承压含水层水位标高； H_1 为潜水含水层水位标高。

3.5 开采条件下模型概化结果

根据矿井资料和调查，在充填开采条件下，将导水裂隙带高度概化为55 m，未达到延安组；在限高开采条件下，将导水裂隙带高度概化为125 m，达到直罗组的下部；在综放开采条件下，将导水裂隙带高

度概化为185 m，达到直罗组的中部。充填开采条件下采动边界越流系数为 $5.83\times10^{-8}\text{ d}^{-1}$ ，限高开采条件下采动边界越流系数为 $1.33\times10^{-8}\text{ d}^{-1}$ ，综放开采条件下采动边界越流系数为 $1.96\times10^{-8}\text{ d}^{-1}$ ，确定模拟期为20年，单个时间步长为30 d，划分为243时间长，不同采煤方式下含水层、隔水层概化模型如图6所示。

根据式(1)计算得出各个开采条件下的越流系数，各个模型下开采参数概化结果如表1所示。

模型水文地质地质参数分区如表2所示。

4 不同采煤方式对地下水位时空变化特征的影响分析

4.1 对煤层顶板承压含水层的影响

为了研究不同采煤方式对地下水位时空变化特征的影响，本文模拟分析了开采0~20年的地下水位时空变化特征^[28-29]。

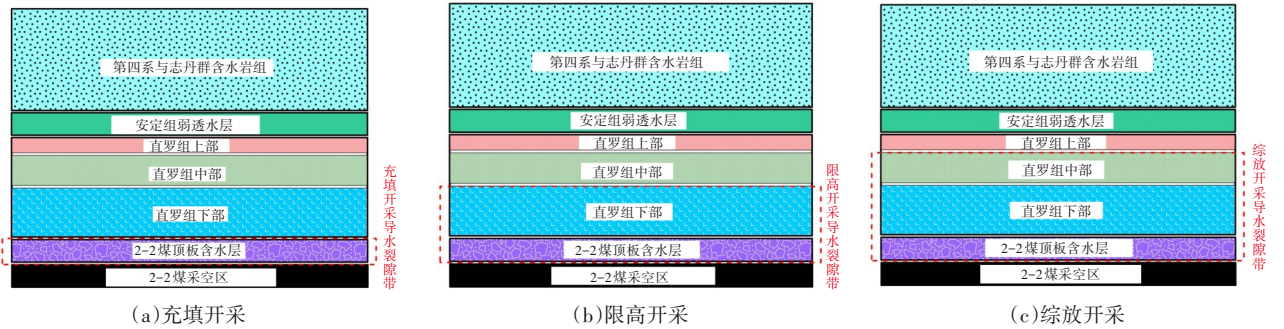


图6 不同采煤方式下含水层、隔水层概化模型

Fig.6 Generalized models of aquifer and aquitard under different coal mining methods

表1 各个模型下开采参数概化结果

Tab.1 Generalization results of mining parameters under various models

序号	开采方式	越流系数(10^{-8} d^{-1})	面积/ km^2	导水裂隙带高度/m	开采渗透系数/ $(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$
1	充填开采	5.8	170	55	0.124
2	限高开采	13.3	170	125	0.124
3	综放开采	19.6	170	185	0.124

表2 模型水文地质地质参数分区

Tab.2 Model hydrogeological and geological parameter zoning					
结构层	分区	弹性释水系数	给水度	渗透系数/(m·d ⁻¹)	
				垂直方向	水平方向
第一层	分区1	—	0.15	0.300	3.00
	分区2	—	0.10	0.124	1.24
	分区3	—	0.05	0.175	1.75
	分区4	—	0.08	0.140	1.40
	分区5	—	0.12	0.275	2.75
第二层	全区	1.00×10 ⁻⁶	—	1.00×10 ⁻⁵	1.00×10 ⁻⁵
第三层	分区1	1.95×10 ⁻⁶	—	0.005	0.05
	分区2	2.55×10 ⁻⁶	—	0.009	0.09
	分区3	2.15×10 ⁻⁶	—	0.017	0.17
第四层	分区1	2.10×10 ⁻⁶	—	0.005	0.05
	分区2	2.55×10 ⁻⁶	—	0.009	0.09
	分区3	2.35×10 ⁻⁶	—	0.017	0.17
第五层	分区1	2.00×10 ⁻⁶	—	0.005	0.05
	分区2	2.00×10 ⁻⁶	—	0.009	0.09
	分区3	2.00×10 ⁻⁶	—	0.017	0.17

4.1.1 充填开采

当采用充填开采时,在充填开采初期,煤层顶板承压含水层的水位变化不明显,研究区井田水位水位整体降幅为0~2 m;在充填开采5年后,煤层顶板

承压含水层的水位变化有一定的变化,研究区井田水位水位整体降幅为5~10 m;在充填开采10年后,煤层顶板承压含水层的水位发生较大变化,研究区井田水位水位整体降幅为5~20 m;在充填开采20年后,煤层顶板承压含水层的水位发生更大变化,研究区井田水位水位整体降幅为10~35 m。充填开采条件下不同开采时间煤层顶板承压含水层的水位等值线如图7所示。

4.1.2 限高开采

当采用限高开采时,在限高开采初期,煤层顶板承压含水层的水位变化不明显,研究区井田水位整体降幅为0~10 m,边界水位不受影响;在限高开采5年后,煤层顶板承压含水层的水位变化有一定的变化,研究区井田水位整体降幅为5~45 m,边界水位降低5~20 m;在限高开采10年后,煤层顶板承压含水层的水位发生较大变化,研究区井田水位整体降幅为10~55m,边界水位降低10~30 m;在限高开采20年后,煤层顶板承压含水层的水位发生更大变化,研究区井田水位整体降幅为15~65 m,边界水位降低15~40 m,形成了完整的降落漏斗,漏斗面积约116 km²。限高开采条件下不同开采时间煤层顶板承压含水层的水位等值线如图8所示。

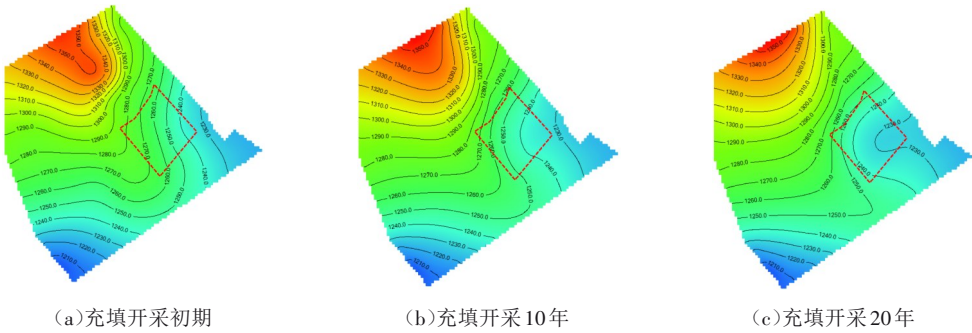


图7 充填开采条件下不同开采时间煤层顶板承压含水层的水位等值线

Fig.7 Contour lines of water level in the confined aquifer of coal seam roof at different mining times under backfill mining conditions

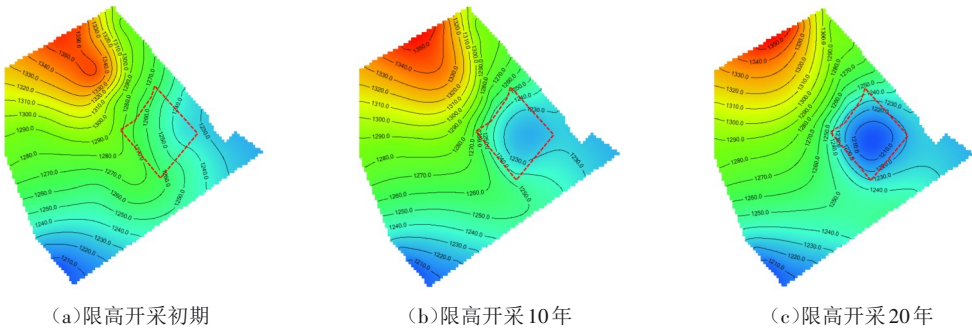


图8 限高开采条件下不同开采时间煤层顶板承压含水层的水位等值线

Fig.8 Isocontour lines of water level in the confined aquifer of coal seam roof at different mining times under limited height mining conditions

4.1.3 综放开采

当采用综放开采时,在综放开采初期,煤层顶板承压含水层的水位变化不明显,研究区井田水位整体降幅为5~20 m;在综放开采5年后,煤层顶板承压含水层的水位变化有一定的变化,研究区井田水位整体降幅为10~60 m;在综放开采10年后,煤层顶板承压含水层的水位发生较大变化,研究区井田水位整体降幅为15~75 m;在综放开采20年后,煤层顶板承压含水层的水位发生更大变化,研究区井田水位整体降幅为20~90 m,形成了完整的降落漏斗,漏斗面积约178 km²,红石峡水源地受到影响。综放开采条件下不同开采时间煤层顶板承压含水层的水位等值线如图9所示。

4.1.4 地下水流线分析

为了更进一步分析不同采煤方式对煤层顶板承压含水层的影响,分析了开采20年后,地下水流线的分布,如图10所示。可知,煤层开采越严重,上覆岩层破坏越严重,致使煤层顶板承压含水层降落漏斗越明显,并逐渐向研究区中部移动。

综上所述,综放开采对煤层顶板承压含水层的水位有较大的影响,红石峡水源地距离矿区越近,受

到影响越大,并且采用充填开采时,对红石峡水源地的影响程度最低,并且限高开采和综放开采,在开采20年后,都形成了完整的降落漏斗,漏斗面积分别为116 km、178 km²。

4.2 对第四系与志丹群含水层的影响

4.2.1 地下水位分析

为了分析不同采煤方式对第四系与志丹群含水层的影响,分析了开采20年后,地下水水位等值线分布,如图11所示。

当采用充填开采时,开采20年后,在研究区西南部,第四系与志丹群含水层的水位降低约0.1~2.0 m,红石峡水源地整体水位下降约0.1~1.0 m;当采用限高开采时,开采20年后,在研究区南部,第四系与志丹群含水层的水位降低约2.0~8.0 m,红石峡水源地整体水位下降约1~2.0 m;当采用综放开采时,开采20年后,在研究区南部,第四系与志丹群含水层的水位降低约3.0~10.0 m,红石峡水源地整体水位下降约2~5.0 m。

不同采煤方式下对第四系与志丹群含水层地下水水位动态变化曲线如图12所示。

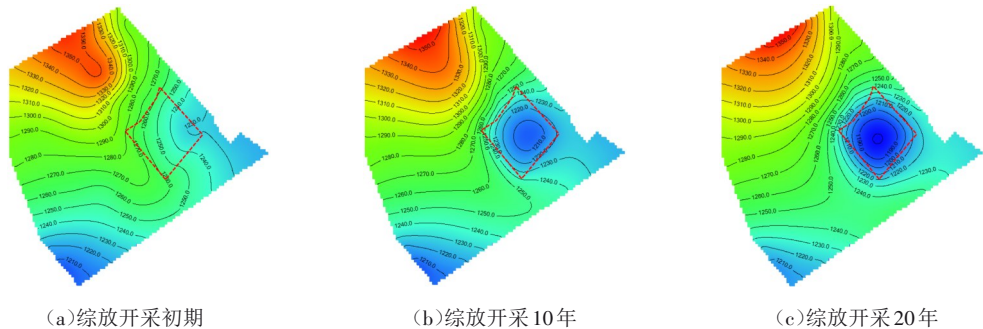


图9 综放开采条件下不同开采时间煤层顶板承压含水层的水位等值线

Fig.9 Isocontour lines of water level in the confined aquifer of coal seam roof at different mining times under the conditions of fully mechanized top coal caving mining

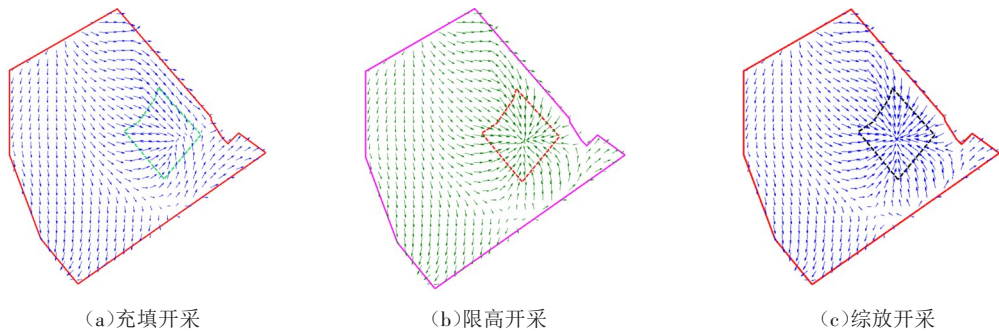


图10 不同采煤方式下开采20年后地下水流线的分布

Fig.10 Distribution of groundwater flow lines after 20 years of mining under different coal mining methods

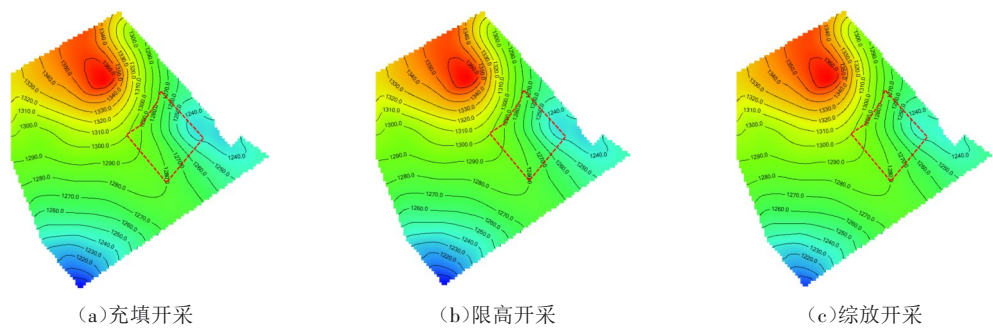


图 11 不同采煤方式下开采 20 年后第四系与志丹群含水层地下水水位等值线分布

Fig.11 Distribution of contour lines of groundwater levels in the Quaternary and Zhidan Group aquifers after 20 years of mining under different coal mining methods

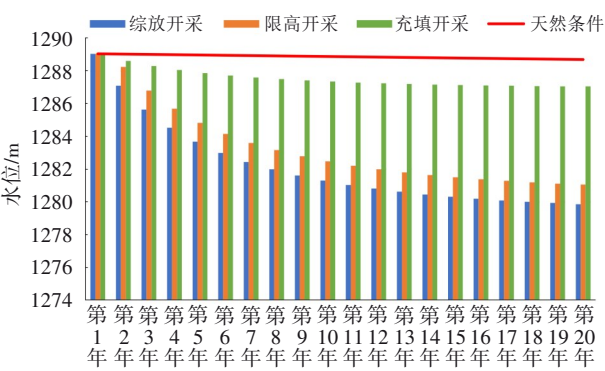


图 12 不同采煤方式下对第四系与志丹群含水层地下水水位动态变化曲线

Fig.12 Dynamic variation curves of groundwater levels in the Quaternary and Zhidan Group aquifers under different coal mining methods

4.2.2 地下水流线分析

为了更进一步分析不同采煤方式对第四系与志丹群含水层的影响,分析了开采 20 年后,地下水流线的分布,如图 13 所示。

当采用充填开采时,开采 20 年后,地下水流的演变逐渐向研究区南部转移,当采用限高开采时,开采 20 年后,地下水流的演变也逐渐向研究区南部转

移,其演变规律和充填开采类似;当采用综放开采时,开采 20 年后,地下水流流向发生较大变化,地下水流的演变逐渐向研究区西南部转移,红石峡水源地局部地下水流场并未发生。

综上所述,在充填开采条件下,将导水裂隙带高度为 55 m,未达到延安组;在限高开采条件下,将导水裂隙带高度为 125 m,达到直罗组的下部;在综放开采条件下,将导水裂隙带高度为 185 m,达到直罗组的中部。限高开采和综放开采对第四系与志丹群含水层的水位有较大的影响,红石峡水源地距离矿区越近,受到影响越大,并且采用充填开采时,对红石峡水源地的影响程度最低。

5 不同采煤方式对地下水量时空变化特征的影响分析

5.1 对地下水侧向径流的影响

本文模拟分析了不同采煤方式对地下水侧向径流的影响^[30-31],天然条件下,第四系与志丹群含水岩组地下水侧向径流排泄量、侧向径流补给量分别为 6 149.52 万 m³/a、13 461.57 万 m³/a;充填开采条件下,第四系与志丹群含水岩组地下水侧向径流排泄量、侧向径流补给量分别为 6 148.06 万 m³/a、

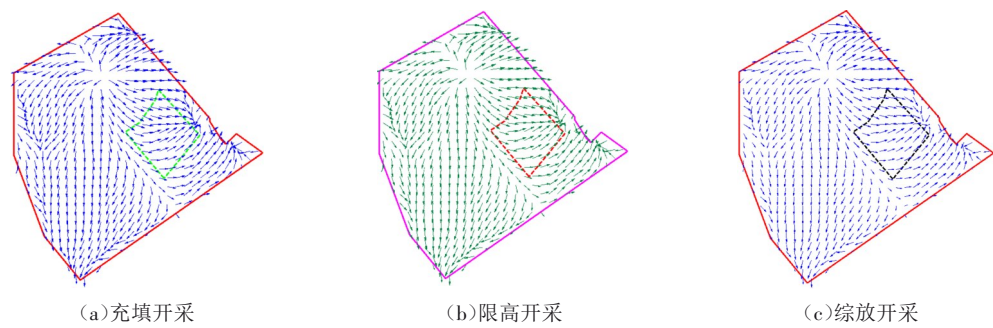


图 13 不同采煤方式开采 20 年后对第四系与志丹群含水层地下水流线的分布

Fig.13 Distribution of groundwater flow lines in the Quaternary and Zhidan Group aquifers after 20 years of mining using different coal mining methods

13 464.12 万 m³/a; 限高开采条件下, 第四系与志丹群含水岩组地下水侧向径流排泄量、侧向径流补给量分别为 6 146.60 万 m³/a、13 467.41 万 m³/a; 综放开采条件下, 第四系与志丹群含水岩组地下水侧向径流排泄量、侧向径流补给量分别为 6 145.14 万 m³/a、13 469.96 万 m³/a, 其折线图如图 14(a) 所示。天然条件下, 侏罗系直罗组含水岩组地下水侧向径流排泄量、侧向径流补给量分别为 227.33 万 m³/a、91.97 万 m³/a, 侏罗系延安组含水岩组地下水侧向径流排泄量、侧向径流补给量分别为 79.21 万 m³/a、33.26 万 m³/a; 充填开采条件下, 侏罗系直罗组含水岩组地下水侧向径流排泄量、侧向径流补给量分别为 194.49 万 m³/a、130.61 万 m³/a, 侏罗系延安组含水岩组地下水侧向径流排泄量、侧向径流补给量分别为 65.15 万 m³/a、47.83 万 m³/a; 限高开采条件下, 侏罗系直罗组含水岩组地下水侧向径流排泄量、侧向径流补给量分别为 185.25 万 m³/a、206.20 万 m³/a, 侏罗系延安组含水岩组地下水侧向径流排泄量、侧向径流补给量分别为 61.64 万 m³/a、78.22 万 m³/a; 综放开采条件下, 侏罗系直罗组含水岩组地下水侧向径流排泄量、侧向径流补给量分别为 182.07 万 m³/a、270.90 万 m³/a, 侏罗系延安组含水岩组地下水侧向

径流排泄量、侧向径流补给量分别为 60.67 万 m³/a、104.28 万 m³/a, 其折线图如图 14(b) 所示。

由图 14(a) 可知, 采用充填开采、限高开采、综放开采时, 第四系与志丹群含水岩组地下水侧向径流排泄量减少了 1.46 万 m³/a、2.92 万 m³/a、4.38 万 m³/a; 第四系与志丹群含水岩组地下水侧向径流补给量增加了 2.55 万 m³/a、5.84 万 m³/a、8.39 万 m³/a, 由图 14(b) 可知, 采用充填开采、限高开采、综放开采时, 侏罗系直罗组含水岩组地下水侧向径流排泄量减少了 32.84 万 m³/a、42.08 万 m³/a、45.26 万 m³/a, 侏罗系延安组含水岩组地下水侧向径流排泄量减少了 14.06 万 m³/a、17.57 万 m³/a、18.54 万 m³/a; 侏罗系直罗组含水岩组地下水侧向径流补给量增加了 38.64 万 m³/a、114.23 万 m³/a、178.93 万 m³/a, 侏罗系延安组含水岩组地下水侧向径流补给量增加了 14.57 万 m³/a、44.96 万 m³/a、71.02 万 m³/a。表明煤炭资源的开采能够减少潜水、承压含水层的地下水侧向排泄量, 增加侧向补给量, 并且其导水裂隙带发育程度越高, 其补给量或者排泄量越大。煤矿开采对承压含水层的影响更大。

5.2 对降雨入渗和蒸发量的影响

1) 对潜水蒸发的影响。当煤炭资源开采后, 潜水水位下降, 导致蒸发极限值的埋深增加, 造成潜水蒸发量减小, 当采用充填开采时, 潜水蒸发量为 23 117.92 万 m³/a; 当采用限高开采时, 潜水蒸发量为 23 098.97 万 m³/a; 当采用综放开采时, 潜水蒸发量为 23 083.25 万 m³/a, 其变化折线图如图 15 所示。

2) 对降雨入渗的影响。根据模拟, 当天然条件下、充填开采条件下、限高开采条件下、综放开采条件下, 降雨入渗基本不变, 都为 13 968.67 万 m³/a, 其变化折线图如图 14 所示。

由图 14 可知, 采用充填开采、限高开采、综放开采

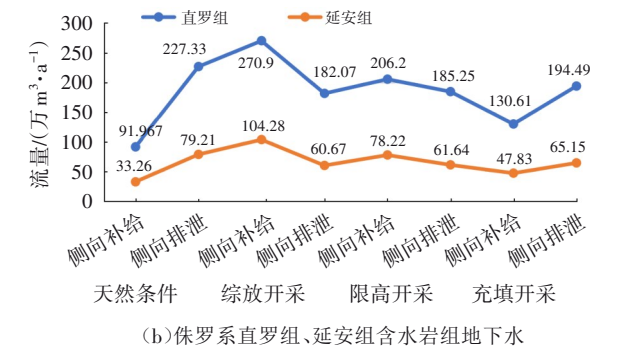
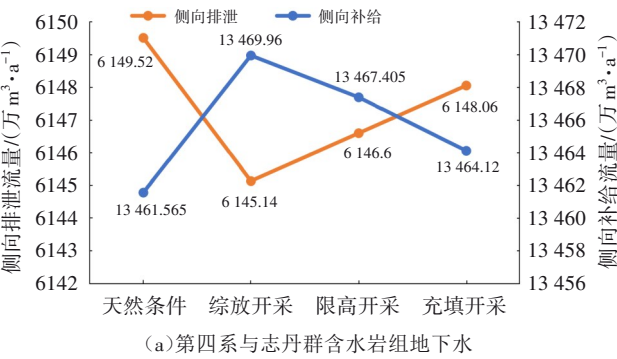


图 14 不同采煤方式对地下水侧向径流的影响

Fig.14 Impact of different coal mining methods on lateral groundwater runoff

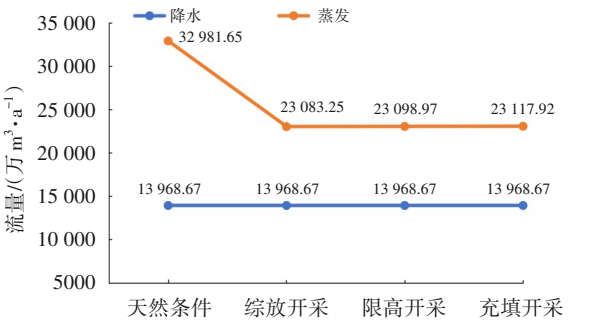


图 15 不同采煤方式对降雨入渗和蒸发量的影响

Fig.15 Impact of different coal mining methods on rainfall infiltration and evaporation

时,潜水蒸发量减少了9 863.73 万 m³/a、9 882.68 万 m³/a 和 9 898.40 万 m³/a。不同采煤方式对降雨入渗量影响不大,基本不发生改变。

5.3 对越流量的影响

本文模拟分析了不同采煤方式对地下水越流量的影响,如图16所示。

由图16可知,不同采煤方式改变了地下水的交换模式,随着时间增加,对第四系与志丹群含水岩组地下水越流量逐渐增加,承压水的越流量一般大于潜水的越流量。并且其导水裂隙带发育程度越高,其越流量越大。

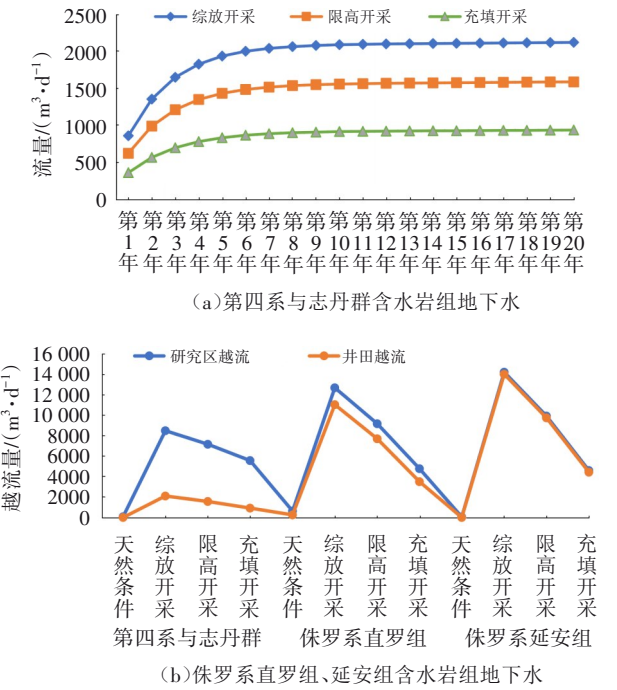


图16 不同采煤方式对地下水越流量的影响
Fig.16 Impact of different coal mining methods on groundwater flow rate

5.4 对矿井用水的影响

本文模拟分析了不同采煤方式对矿井用水的影响,模拟分析了开采20年后,矿井涌水量组成如表3所示。

由表3可知,矿井涌水量主要来自井田越流补给。预测分析了不同采煤方式下开采20年矿井涌水量变化趋势,如图17所示。

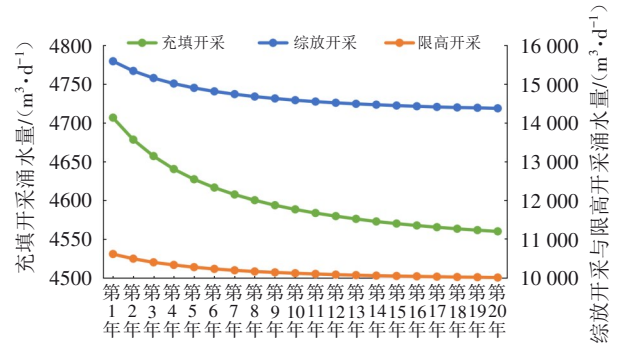


图17 不同采煤方式下开采20年矿井涌水量变化趋势
Fig.17 Trend of mine water inflow changes over 20 years under different mining methods

随着开采时间的增加矿井涌水量逐渐减小,并且其导水裂隙带发育程度越高,其矿井涌水量越小,但是变化越大。

6 结论

本文研究了充填开采、限高开采和综放开采条件下对地下水时空变化特征的影响,利用 Visual MODFLOW 地下水数值模拟软件,分析了不同采煤方式对地下水位时空变化特征的影响以及对地下水量时空变化特征的影响。

1)通过地下水流数值模型的构建,对含水层、隔水层、开采边界进行了概化,得到不同采煤方式下含水层、隔水层概化模型以及了开采参数概化结果,随采动强度由充填向限高、综放增强,越流系数与导水裂隙带高度同步升高,含水层与采空区水力联系逐渐强化,地下水受扰动程度由弱至强依次递增。

2)在充填开采条件下,将导水裂隙带高度为55 m,未达到延安组;在限高开采条件下,将导水裂隙带高度为125 m,达到直罗组的下部;在综放开采条件下,将导水裂隙带高度为185 m,达到直罗组的中部。限高开采和综放开采对第四系与志丹群含水层的水位有较大的影响,红石峡水源距离矿区越近,受到影响越大,并且采用充填开采时,对红石峡水源地的影响程度最低。

表3 不同采煤方式下矿井涌水量组成

Tab.3 Composition of mine water inflow without coal mining method						
序号	开采方式	直接充水含水层	矿井涌水量组成/(m³·d ⁻¹)			矿井涌水量/(m³·d ⁻¹)
			侧向径流量	井田越流补给	损失量	
1	充填开采	延安组	101.8	4 453.9	4.3	14 381.8
2	限高开采	延安组+直罗组	220.9	9 780.7	6.9	10 008.0
3	综放开采	延安组+直罗组	320.2	14 053.0	8.8	4 560.0

3)煤炭资源的开采能够减少潜水、承压含水层的地下水侧向排泄量,增加侧向补给量,并且其导水裂隙带发育程度越高,其补给量或者排泄量越大。煤矿开采对承压含水层的影响更大。

4)采用充填开采和限高开采,一定程度上能够减小开采对地下水的影响,减轻地下水资源的损失量,一定程度上保护了地下水资源。

参考文献:

- [1] 范立民,向茂西,彭捷,等.西部生态脆弱矿区地下水对高强度采煤的响应[J].煤炭学报,2016,41(11):2672-2678.
Fan L M, Xiang M X, Peng J, et al. Groundwater response to intensive mining in ecologically fragile area[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2672-2678.
- [2] 师修昌.煤矿地下水库研究进展与展望[J].煤炭科学技术,2022,50(10):216-225.
Shi X C. Research progress and prospect of underground mines in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(10): 216-225.
- [3] 孙洁.露天矿区采煤水位下降和土壤重构对地下水补给的影响[J].煤矿安全,2021,52(5):59-65.
Sun J. Influence of coal mining water level decline and soil reconfiguration on groundwater recharge in open pit mining area[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(5): 59-65.
- [4] 杨建元,何桂凤,刘红湘.煤炭开采对地下水环境影响及保护措施研究[J].煤炭技术,2015,34(3):20-23.
Yang J Y, He G F, Liu H X. Research on impact of coal mine exploitation on groundwater environment and protection measures[J]. Coal Technology, 2015, 34(3): 20-23.
- [5] 柴建禄.采煤对浅层地下水环境的影响及矿井水生态利用分析[J].煤田地质与勘探,2022,50(7):138-144.
Chai J L. Influence of coal mining on shallow groundwater environment response to coal mining and mine water ecological utilization analysis[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(7): 138-144.
- [6] Hanfu H, Changshen W, Haibo B, et al. Water protection in the western semiarid coal mining regions of China: A case study[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(5): 719-723.
- [7] 李涛.丰墩沟水体下采煤安全开采方案研究与探讨[J].煤炭与化工,2021,44(4):16-20.
Li T. Research and discussion of the safe mining plan for mining under the water body of Fenghougou[J]. Coal and Chemical Industry, 2021, 44(4): 16-20.
- [8] 徐海红,乔皎,王铮.小庄矿井采煤对地下水的影响及保水采煤措施[J].煤田地质与勘探,2014,42(6):64-67.
Xu H H, Qiao J, Wang Z. The influence of underground coal mining on groundwater and measures for water conservation while mining in Xiaozhuang mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(6): 64-67.
- [9] 雷少毅.孟家湾勘查区采煤对地下水的影响评价[J].中国煤炭地质,2010,22(6):38-40.
Lei S Y. Appraisal of coal mining impact on groundwater in Mengjiawan exploration area[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(6): 38-40.
- [10] 张伟,张永波,王兆亮.煤矿采煤对地下水资源的影响评价[J].科学之友,2011(35):7-8.
Zhang W, Zhang Y B, Wang Z L. Coal mining impact assessment of groundwater resources[J]. Friend of Science Amateurs, 2011(35): 7-8.
- [11] 孙洁.露天矿区采煤水位下降和土壤重构对地下水补给的影响[J].煤矿安全,2021,52(5):59-65.
Sun J. Influence of coal mining water level decline and soil reconfiguration on groundwater recharge in open pit mining area[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(5): 59-65.
- [12] 李慧.榆林市煤炭资源整合项目采煤对地下水环境的影响及保护措施[J].环境与发展,2013,25(1):32-33.
Li H. The influence and protection measures of coal resource integration project for Groundwater environment in Yulin City[J]. Environment & Development, 2013, 25(1): 32-33.
- [13] 石晓建.采煤活动对地下水环境的影响与防治[J].当代化工研究,2021(7):125-126.
Shi X J. Influence of coal mining activities on groundwater environment and its prevention[J]. Modern Chemical Research, 2021(7): 125-126.
- [14] 杨征,雷方超,薛晓强,等.采煤对小保当井田地下水资源影响数值模拟研究[J].陕西煤炭,2023,42(5):14-20.
Yang Z, Lei F C, Xue X Q, et al. Numerical simulation on influence of coal mining on groundwater resource in Xiaobaodang mining area[J]. Shaanxi Coal, 2023, 42(5): 14-20.
- [15] 穆鹏飞.采煤对含水层地下水水位和水量的影响[J].黑龙江科技大学学报,2020,30(3):259-263.
Mu P F. Influence of coal mining on groundwater level and quantity of aquifer[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2020, 30(3): 259-263.
- [16] 李学军,张天文,孟杰.煤矿开采对浅层地下水的影响评价[J].煤炭与化工,2023,46(11):60-64.
Li X J, Zhang T W, Meng J. Evaluation of the impact of

- coal mining on shallow groundwater[J]. Coal and Chemical Industry, 2023, 46(11): 60–64.
- [17] 白喜庆, 沈智慧. 峰峰矿区保水采煤对策研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 389–394.
- Bai X Q, Shen Z H. Countermeasure study of water-preserving mining in Fengfeng mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(3): 389–394.
- [18] Huang Y, Xia Z, Xiao B, et al. The sustainable impact of coal mining on water utilization efficiency in the Shengli Mining Area[J]. Sustainability, 2026, 18(10): 4811.
- [19] 李倩, 马龙, 刘廷玺, 等. 采煤对海流兔流域大气降水-地表水-地下水-矿井水转化关系的影响[J]. 中国沙漠, 2022, 42(5): 146–157.
- Li Q, Ma L, Liu T X, et al. Conversion of precipitation, surface water, groundwater and mine water affected by coal mining in the Hailiutu River Basin, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(5): 146–157.
- [20] 刘虎, 周林康. 王家峪煤矿开采对地下水的影响分析[J]. 山西建筑, 2014, 40(6): 233–234.
- Liu H, Zhou L K. Analysis on influence of coal mining on underground water in Wangjiayu mine[J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(6): 233–234.
- [21] 阮学敏, 张嘉勇. 煤炭开采对水环境的影响及评价方法研究[J]. 矿山机械, 2009, 37(10): 45–48.
- Gong X M, Zhang J Y. Effects of coal mining on water environment and evaluation methods[J]. Mining & Processing Equipment, 2009, 37(10): 45–48.
- [22] 肖义, 尚利康, 郭婷婷. 基于GMS的煤层开采对地下水影响的数值模拟研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(3): 135–139.
- Xiao Y, Shang L K, Guo T T. Numerical simulation study on influence of coal mining on groundwater based on GMS[J]. Coal Technology, 2022, 41(3): 135–139.
- [23] 赵春虎, 靳德武, 虎维岳. 采煤对松散含水层地下水扰动影响规律及评价指标——以神东补连塔井田为例[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(3): 79–84.
- Zhao C H, Jin D W, Hu W Y. Study on influence rules and evaluation criteria of groundwater affected by mining in unconsolidated aquifers in Shendong Bulianta coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(3): 79–84.
- [24] 侯恩科, 谢晓深, 王双明, 等. 榆神矿区煤炭开采地下水动态演化数值模拟[J]. 陕西煤炭, 2020(增刊1): 45–50.
- Hou E K, Xie X S, Wang S M, et al. Numerical simulation of groundwater dynamic evolution induced by coal mining in the Yushen mining area[J]. Shaanxi Coal, 2020(S1): 45–50.
- [25] 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 H P, Luo Q B, Kang W D, 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.
- [26] 王启亮. 采煤对水资源的影响评价及防治对策[J]. 山西水利科技, 2010(1): 14–16.
- Wang Q L. Evaluation on influences of coal mining for water resources and control measures[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2010(1): 14–16.
- [27] 狄效斌. 利用地下水动态资料分析煤矿区浅层地下水的变化影响[J]. 南水北调与水利科技, 2012(A2): 77–79.
- Di X B. Analysis of shallow groundwater change in the coal area by using groundwater dynamic data[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012(A2): 77–79.
- [28] 李向全, 张春潮, 侯新伟. 采煤驱动下晋东大型煤炭基地地下水循环演变特征——以辛安泉域为例[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 3015–3026.
- Li X Q, Zhang C C, Hou X W. Characteristics of groundwater circulation and evolution in Jindong large coal base driven by coal mining: An example of Xin'an spring area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 3015–3026.
- [29] 赵耀东, 张朝逢, 杨建. 黄土沟壑型煤炭开采对地下水系统影响的数值模拟研究[J]. 地下水, 2017, 39(2): 1–4.
- Zhao Y D, Zhang C F, Yang J, et al. Numerical simulation of the influence of loess gully coal mining on groundwater system[J]. Underground Water, 2017, 39(2): 1–4.
- [30] Erhu B, Wenbing G, Yi T, et al. Green coal mining and water clean utilization under Neogene aquifer in Zhaojiazhai coalmine of central China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 368: 133134.
- [31] 孙学阳, 邵宪赞, 郑懿敬, 等. 深埋煤层开采对河流安全性的影响评价[J]. 煤矿安全, 2024, 55(5): 195–203.
- Sun X Y, Shao X Y, Zheng Y J, et al. Evaluation of the influences of deep buried coal seam mining on river safety[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(5): 195–203.

(编辑 许军策)