



新疆伊犁矿区侏罗系含水介质特征与地下水赋存运移规律

徐智敏 陈天赐 刘栓栓 孙亚军 任冬冬 邰博程 张盼杰

引用本文:

徐智敏, 陈天赐, 刘栓栓, 等. 新疆伊犁矿区侏罗系含水介质特征与地下水赋存运移规律[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 140–151.

XU Zhimin, CHEN Tianci, LIU Shuanshuan. Characteristics of water-bearing media in Jurassic strata and groundwater occurrence and migration law in Yili Mining Area, Xinjiang[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 140–151.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0335>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

祁东煤矿构造控水特征和地下水运移规律

Characteristics of structural water control and groundwater migration in Qidong Coal Mine
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 292–305 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0996>

陕北侏罗系砂岩宏观微观特征及其富水性响应机制

Responding mechanism of macro-micro characteristics and water abundance on Jurassic sandstone in Northern Shaanxi Province
煤炭科学技术. 2023, 51(7): 167–178 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0367>

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>

近距离煤层顶板水害立体防控技术研究——以蒙陕深部矿井为例

Study on stereoscopic prevention and control technology of roof water disaster in contiguous coal seam in deep mines of Inner Mongolia and Shaanxi
煤炭科学技术. 2021, 49(12): 165–172 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/755d4553-343f-4617-8ac1-39c1c85387e2>

榆神府矿区地下水水化学特征及形成机理

Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Yushenfu Mining Area
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 383–394 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1050>

鄂尔多斯盆地南北部侏罗系煤层含气性差异分析

Analysis of gas bearing property difference of Jurassic coal between Southern and Northern Ordos Basin
煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/259ac011-a68c-4411-b29f-8de8e8fdd419>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

徐智敏, 陈天赐, 刘栓栓, 等. 新疆伊犁矿区侏罗系含水介质特征与地下水赋存运移规律[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 140–151.

XU Zhimin, CHEN Tianci, LIU Shuanshuan, *et al.* Characteristics of water-bearing media in Jurassic strata and groundwater occurrence and migration law in Yili Mining Area, Xinjiang[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 140–151.

新疆伊犁矿区侏罗系含水介质特征与地下水赋存运移规律

徐智敏^{1,2}, 陈天赐¹, 刘栓栓^{1,4}, 孙亚军^{1,2}, 任冬冬³, 邹博程¹, 张盼杰³

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 矿山灾害防治技术基础研究国家级专业中心实验室, 江苏 徐州 221116;

3. 克矿新疆能化有限公司伊犁一矿, 新疆 伊犁 835300; 4. 陕西小保当矿业有限公司, 陕西 榆林 719302)

摘要:以新疆伊犁矿区为研究区, 结合该区天山雪融水径流强、侏罗系富煤地层渗透性不均一等典型水文地质特征, 通过采用现场取样、电镜扫描、压汞实验、X-衍射、抽水试验等方法, 系统研究矿区主要含(隔)水层的宏观水文地质条件、微观含水介质特征及地下水赋存规律, 揭示其特殊地层地貌条件下的含水层水动力学特征及地下水运移规律。结果表明: 研究区侏罗系主采煤层顶底板砂岩含水层有效孔隙率范围为 17.1%~29.5%, 新近系与侏罗系隔水层有效孔隙率范围为 17.6%~29.0%, 含(隔)水层均含有较高的黏土矿物, 遇水膨胀泥化, 特殊的微观结构及矿物成分使含(隔)水层表现出孔隙率高、渗透性较差的含水介质特征; 区域上, 第四系孔隙含水层与侏罗系主采煤层顶底板砂岩含水层富水性较弱, 部分区域表现出中等富水, 以静储量为主, 具有区块化特征; 系统研究了主要含(隔)水层的水动力学特征与运移规律, 第四系受山前宏观地貌及含水介质条件影响, 形成了以“斜坡过境流”为代表并以孔隙潜水形式高强度流动的水动力学特征, 同时受到下部新近系泥岩隔水层阻隔, 与煤系顶板砂岩含水层无水力联系, 对煤层回采存在影响的主要为 5 煤底板砂岩含水层, 并针对该层施工了“横向截流, 侧向掩护”的“厂”字形大范围疏降且疏降效果显著, 为井下回采创造了良好的水文地质条件。相关研究成果揭示了研究区侏罗系富煤地层受沉积环境影响所形成的特殊含水介质特征及储水控水规律, 可为研究区及西部矿区相似开采条件下矿井防治水工作提供一定的理论及工程依据。

关键词: 侏罗系; 含水介质特征; 水动力学特征; 储水控水; 顶底板防治水

中图分类号: TD745; P641

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)07-0140-12

Characteristics of water-bearing media in Jurassic strata and groundwater occurrence and migration law in Yili Mining Area, Xinjiang

XU Zhimin^{1,2}, CHEN Tianci¹, LIU Shuanshuan^{1,4}, SUN Yajun^{1,2}, REN Dongdong³, HUAN Bochong¹, ZHANG Panjie³

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Fundamental Research Laboratory for Mine Water Hazards Prevention and Controlling Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Yili NO.1 Mine, Yankuang Xinjiang Energy & Chemical Co., Ltd., Yili 835300 China; 4. Shaanxi Xiaobaodang Mining Co., Ltd., Yulin 719302, China)

Abstract: Taking the Yili mining area in Xinjiang as an example, combined with the typical hydrogeological characteristics of the Tianshan Mountains, such as strong snowmelt runoff and uneven permeability of Jurassic coal-rich strata, the macroscopic hydrogeological conditions, microscopic water-bearing media characteristics and water-rich law of the main aquifers (aquicludes) layers in the mining area were systematically studied by means of field sampling, electron microscope scanning, mercury injection experiment, X-ray diffraction and pumping test. The hydrodynamic characteristics and migration law of aquifers under special stratigraphic and geomorphological conditions are revealed. The results show that the effective porosity range of the sandstone aquifer in the roof and floor of the Jurassic main coal

收稿日期: 2023-03-05

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0335

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(42130706); 国家自然科学基金面上资助项目(42172272); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020ZDPY0201)

作者简介: 徐智敏(1981—), 男, 四川简阳人, 副教授, 博士, 博士生导师。E-mail: xuzhimin@cumt.edu.cn

seam in the study area is 17.1%-29.5%, and the effective porosity range of the Neogene and Jurassic aquiclude is 17.6%-29.0%. The aquifers (aquicludes) layer contains high clay minerals, which are expanded and argillized in water. The special microstructure and mineral composition make the aquifers (aquicludes) layer show the characteristics of high porosity and poor permeability. In the study area, the water abundance of the Quaternary pore aquifer and the Jurassic main coal seam roof and floor sandstone aquifer is weak, and some areas show moderate water abundance, mainly static reserves, with block characteristics. The hydrodynamic characteristics and migration law of the main aquifers (aquicludes) are systematically studied. The Quaternary system is affected by the macro-geomorphology and hydrogeological conditions of the piedmont, showing the dynamic characteristics of 'slope transit flow' in the form of pore phreatic water with high intensity flow. At the same time, it is blocked by the lower Neogene mudstone aquifuge and has no hydraulic connection with the sandstone aquifer of the roof of the coal measures. The sandstone aquifer of the 5# coal seam floor mainly affects the coal seam mining, in view of this layer, the "factory" shape of "lateral closure and lateral cover" was constructed in a large range and the dredging effect was remarkable, which created good hydrogeological conditions for underground mining. The relevant research results reveal the characteristics of special water-bearing media and the law of water storage and water control formed by the Jurassic coal-rich strata in the study area under the influence of sedimentary environment, which can provide certain theoretical and engineering basis for water prevention and control under similar mining conditions in the study area and western mining area.

Key words: jurassic system; characteristics of water-bearing medium; hydrodynamic characteristics; water storage and control; roof and floor water disaster prevention and control

0 引言

我国煤炭资源储量十分丰富,2022年在我国能源消费结构中煤炭占比56.2%^[1],是我国的主体能源。近些年我国煤炭开采重心逐渐向西迁移,且西部地区煤炭资源储量大、埋深浅,其中埋深小于2000 m的煤炭地质储量约为2万亿t^[2-3],2022年西部各省份煤炭产量相比全国总产量占比已经超过67%^[4-5],已成为大型煤炭生产基地的主要聚集区域。侏罗系煤层作为该地区的主产煤层,其地质及水文地质条件与东部地区主采的石炭-二叠系含煤地层具有较大差异,成煤时代、自然地理条件、特殊的陆相沉积背景及新构造运动等因素均对该地区含(隔)水层构建起到控制作用,进而导致富煤地层含水介质条件复杂,富水性不均一,给矿井防治水工作的开展带来新的考验^[6-7]。因此,对西部地区侏罗系富煤地层的特殊含水介质条件及储水控水规律的研究,成为了在该地区顺利开展生产活动的重点^[8-9]。

在相关研究中,冯洁等^[10]利用沉积微相划分和微观孔隙实验室测试的方法,研究了侏罗系微观孔隙结构与富水性的关系,揭示了区域沉积控水机理。杨鹏等^[11]研究了侏罗系砂岩的微观孔隙结构类型与含水层富水特征,对评价顶板突水危险性具有重要意义。张玉军等^[12]通过对覆岩结构类型和采动隔水层稳定性进行系统研究,探讨了黏土隔水层对导裂带发育的抑制作用。田继军等^[13]基于现代沉积学、煤田地质学的方法,绘制了塔里木盆地单井岩性剖面图和沉积相展布图,系统探究了侏罗系沉积演化及聚煤的主控因素。文献[14-16]通过室内渗流试

验、电镜扫描、压汞试验等,获取了西部侏罗系弱胶结砂岩高孔隙率的微观介质特征及动水条件下“溶盐增渗”效应。总体上,近些年针对西部矿区侏罗系含煤地层的地下水循环条件、水动力学特征等研究方面取得了较大进展,但由于伊犁矿区地表松散砾石层厚度大,覆盖各含隔水层露头,导致主采煤层顶底板主要充水含水层水力联系复杂、富水性差异大,使水文地质条件进一步复杂化,因此,针对该区富煤地层含水介质条件及特殊地貌条件下的含(隔)水层储水控水规律,有待进一步研究。

为精确查明研究区富煤地层含水介质条件及储水控水规律,笔者在深度挖掘课题组前期积累的西部矿区相关成果数据与资料的基础上,采用电镜扫描、压汞试验、X-衍射等手段,系统研究新近系泥岩隔水层、侏罗系煤层顶底板含(隔)水层的微观介质特征;同时根据现场群孔抽水试验及室内数据处理,研究主要含水层的富水特征,进而阐明含水层循环条件及水动力学特征,获取地下水赋存的规律;基于研究区宏观水文地质条件、侏罗系含水层微观介质特征及其赋存规律,揭示主要含(隔)水层的水动力学特征及地下水运移规律,为研究区矿井涌水量计算、井下疏降水工程的开展提供理论依据。

1 研究区水文地质结构特征

1.1 矿区侏罗系富煤地层条件

伊犁一矿位于伊南煤田,煤系地层为侏罗系西山窑组,该层形成时代较晚、岩层成岩程度较差,主要发育三角洲和湖泊沉积相^[17-18],主采煤层属特厚稳定煤层,结构简单,由浅至深方向上逐渐发育;煤

系地层上覆白垩系,新生界新近系、第四系地层,其中,第四系松散层及侏罗系砂岩含水层为主要的含水层组。

1.2 矿区宏观水文地质条件

伊犁矿区位于伊犁河谷以南,为单斜储水构造单元。含水层主要补给来源为南天山冰雪融水、大气降水以及地表过境河流。

受山前冲洪积扇的影响,从山前到河谷平原方向上,地下水的赋存存在较大差异^[17]。一方面,冲积扇的地下水补给主要来自山区径流和冰雪融水,具有一定的季节性和年际变化性;另一方面,冲积扇地下水的流动方向和路径也受到地层结构、地下水位、地表水位、地下水水化学特征等因素的影响。研究区自然地理位置如图 1 所示。

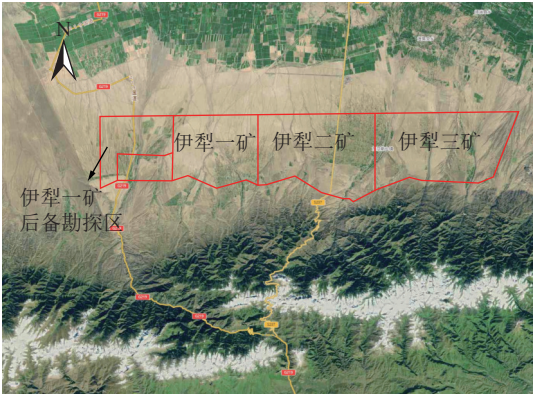


图 1 矿区自然地理位置示意

Fig.1 Schematic of natural geographical location of the minefield

1.3 矿区水文地质结构

研究区位于山前冲洪积扇顶部和中部的斜坡地带,为地下水补给、径流区(图 1、图 2)。南部山前的第四系含水层隐伏露头线,构成地下水的补给边界,新近系含(隔)水层隐伏于下,接受第四系潜水含水层的垂向渗透浅补给,向北泥质岩层厚度逐渐增大,构成了隔水边界。矿井水文地质结构特征如图 2 所示。

矿区总体上为近东西走向、向北倾的单斜构造。含水层自上而下发育有第四系含水层及侏罗系煤层顶板砂岩含水层、底板砂岩含水层(图 2、图 3)。其中主采煤层的直接充水含水层为顶底板砂岩含水层;第四系含水层在山前接受天山雪融水及少量大气降水补给,径流条件较好。隔水层主要由新近系泥岩及侏罗系泥岩、粉砂岩、煤互层组成,与含水层呈厚度不等的互层,隔水层厚度和隔水性强度均表现出较大差异。

研究区具有西部煤矿区地表水与地下水转换频繁、地下水径流特征不明的典型水文地质特征。因此,在研究宏观水文地质条件及结构特征的基础上,针对含隔水层微观介质条件、含水层赋存规律及水动力学特征进行精细化研究评价,可为矿井防治水工作的开展提供理论依据。

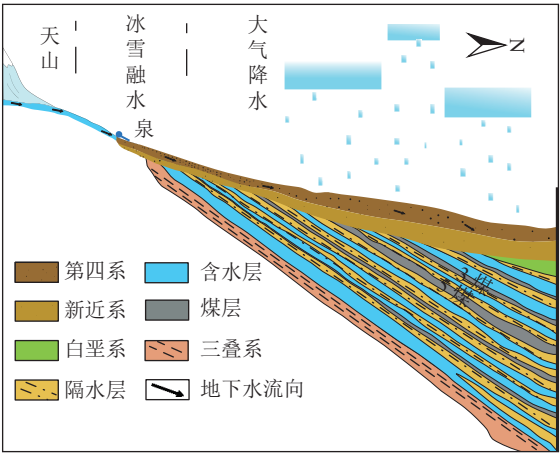


图 2 矿区水文地质结构特征示意

Fig.2 Schematic of hydrogeological structure characteristics of the minefield

地层		柱状	厚度/m	含水层
系	组			
第四系			20~350	第四系孔隙含水层
新近系			0~314	
白垩系	东沟组		0~490	
侏罗系	头屯河组		12~257	
			5~30/13.5	3 顶砂
	西山窑组	3 煤	4	
			3~27/16	5 顶砂
		5 煤	17.6	
			5~21/15	5 底砂

图 3 研究区综合水文地质柱状图

Fig.3 Comprehensive hydrogeological histogram of the study area

2 研究区侏罗系的介质特征

含水层介质条件是研究自身或与相邻含水层地

下水储存、运移特征的关键因素。与大多数东部矿区石炭-二叠系富煤地层相对埋藏较深、地下水运动以裂隙流为主不同,西部矿区主要富煤地层多数形成于侏罗-白垩系,相对成煤时代较晚,埋藏较浅,岩石胶结程度总体较弱^[19],孔隙率一般为东部碳-二叠系含煤地层孔隙率的 4~8 倍^[14-15,20-23](表 1),含水层具有以孔隙为主的“孔隙-裂隙”双重含水介质特征^[14],其运动过程较复杂,易形成富水区。

表 1 东西部含煤地层孔隙率差异对比

Table 1 Porosity difference comparison of coal-bearing strata between East and West China

研究区位置	含煤地层	孔隙率/%
山东聊城河北煤田	石炭-二叠系	2.5
河南洛阳偃龙煤田	石炭-二叠系	3
安徽淮南张集煤田	石炭-二叠系	5
陕西榆神矿区	白垩系	10
青海海西冷湖油田	侏罗系	6.3~17.4
新疆哈密大南湖矿区	侏罗系	19.9
新疆塔里木盆地东南	侏罗系	24.2

为分析评价研究区各含水层(图 3)介质条件及特征,通过现场钻孔取样、室内扫描电镜、压汞试验、X-衍射、岩石薄片鉴定等方法进行测试研究,进一步为煤系主要含(隔)水层水动力学特征、储水控水规律研究提供依据。

2.1 主要含水层的介质条件及特征

矿井主采侏罗系西山窑组 3、5 煤,对回采可能产生影响的含水层包括第四系含水层及侏罗系煤层顶、底板砂岩含水层(包括 3 顶砂、5 顶砂和 5 底砂含水层,如图 3 所示)。

2.1.1 第四系含水层

根据研究区域补勘资料,第四系含水层主要为区域天山山前冲洪积层,由分选性差的砾石、砂土及黏土等组成,结构松散,形成了较好的区域地下水径流通道,洪积扇顶部和中部主要为区域地下水补给、径流区,亦为伴生泉的少量地下水排泄区(图 2)。

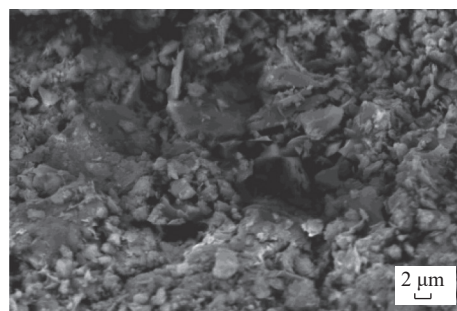
2.1.2 3 煤顶板砂岩含水层

根据矿区钻孔揭露资料,3 煤顶板砂岩含水层厚度约 0.8~30.85 m,平均厚度 19.12 m,为 3、5 煤开采顶板直接充水含水层。

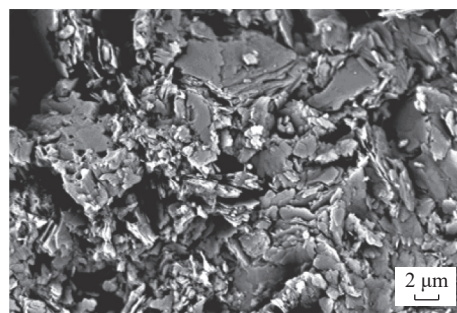
在水文地质补勘过程中,针对 3 煤顶板砂岩含水层进行了钻孔取心,并进行室内相关分析测试,其中电镜扫描结果如图 4 所示。

测试结果表明,3 煤顶板为泥质砂岩含水层,矿

物成分中黏土矿物仅次于石英矿物,占比 26%~33%,黏土矿物中蒙脱石及高岭石占比达 94%;同时 3 煤顶板砂岩含水层存在较多不同孔径的孔隙,条带状粒间孔隙较发育,总面孔隙率达到 20%;岩样的有效孔隙率(以孔径 $\geq 10\text{ }\mu\text{m}$ 为有效孔隙,此时重力水可以沿有效孔隙运移^[24-25])高达 29.5%,渗透率为 $242\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 。总体上,3 煤顶板砂岩含水层渗透性较好,储水能力较强。



(a) 石英及黏土矿物



(b) 伊利石及石英

图 4 3 煤顶板砂岩岩样电镜扫描图

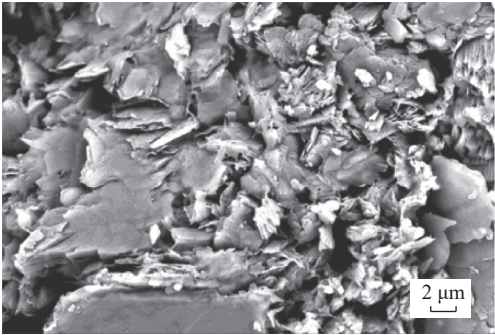
Fig.4 Scanning electron micrographs of rock samples of No.3 coal seam roof sandstone aquifer

此外,3 煤顶板和底板均有泥岩存在,其中,3 煤与新近系之间地层中泥岩占比为 9.16%~59.01%。作为软岩的泥岩分布在 3 煤上下,虽随着地理位置变化厚度有起伏,但该层的存在对于 3 煤回采形成的导水裂隙的闭合十分有利。

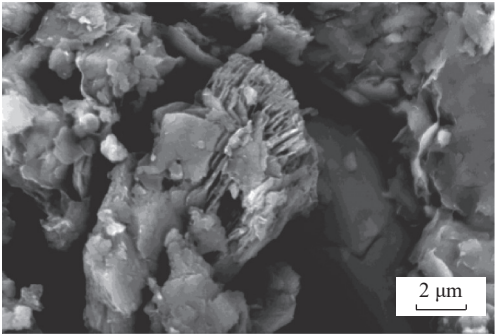
2.1.3 5 煤顶板砂岩含水层

同样地,针对 5 煤顶板砂岩含水层进行了钻孔取心,并进行室内测试,电镜扫描结果如图 5 所示。

测试结果表明,5 煤顶板砂岩含水层岩样主要为泥质、碳质胶结,矿物成分以黏土矿物为主,并含有石英及云母碎屑颗粒,黏土矿物中蒙皂石及高岭石含量占比达到 80%;岩样的有效孔隙率为 22.8%~23.8%,但约 76% 的孔径小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ (以孔径 $<10\text{ }\mu\text{m}$ 为无效孔隙,此时在一般水头大小条件下重力水难以运动^[24-25]),渗透率为 $0.22\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 。总体上,5 煤顶板砂岩含水层渗透性较差,储水能力较弱。



(a) 黏土矿物及岩石碎屑



(b) 高岭石

图 5 5 煤顶板砂岩岩样电镜扫描图

Fig.5 Scanning electron micrographs of rock samples of No.5 coal seam roof sandstone aquifer

2.1.4 5 煤底板砂岩含水层

选取 5 煤底板砂岩含水层岩样进行分析测试, 相关测试结果表明, 该层岩性以含砾粗砂岩为主, 其次为细砂岩, 泥质胶结疏松, 岩样中石英矿物、黏土矿物占比分别约为 60%、32%, 黏土矿物主要为高岭石及伊蒙混层。黏土矿物与有机质之间发育裂隙(图 6), 岩样有效孔隙率为 17.1%~24.3%, 渗透率为 $0.02\times10^{-3}\sim1.88\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。总体上, 5 煤底板砂岩含水层虽然有效孔隙率高, 但较高的黏土矿物含量, 导致其渗透率相对较低, 透水性较弱。

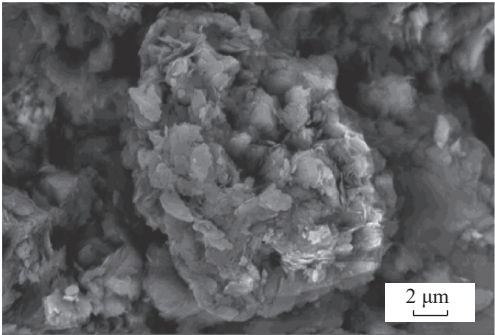
总体上, 根据上述各主要含水层岩样微观介质条件相关测试结果, 矿区第四系含水层和 3 煤顶板砂岩含水层渗透性较好, 5 煤顶、底板砂岩含水层渗透性均较差。

2.2 主要隔水层的介质条件及特征

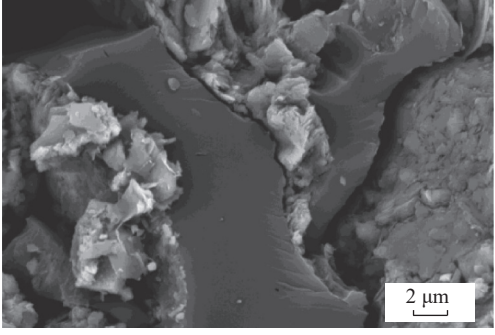
矿区主要含水层与主采煤层之间的主要隔水层包括新近系泥岩隔水层、5 煤底板隔水层, 具体如图 3 所示。

2.2.1 新近系泥岩隔水层

新近系泥岩隔水层是阻隔下部 3、5 煤顶板砂岩含水层接收上部第四系冲洪积含水层、大气降水以及天山雪融水过境流补给的关键层, 其阻隔水能力对煤层开采的防治水工作影响巨大。因此, 为针对



(a) 黏土矿物



(b) 有机质及裂隙

图 6 5 煤底板砂岩岩样电镜扫描图

Fig.6 Scanning electron micrographs of rock samples of No.5 coal seam floor sandstone aquifer

性研究新近系泥岩隔水层介质条件及特征, 同样地进行了钻孔取心, 并进行室内电镜扫描、全岩黏土矿物 X-衍射、压汞试验等测试, 测试结果见表 2。

表 2 新近系泥岩隔水层岩样测试结果
Table 2 Rock sample test results of neogene mudstone aquiclude

测试项目	测试结果
电镜扫描	石英、黏土矿物为主
X-衍射	石英矿物: 65%, 黏土矿物总量: 33%
全岩黏土矿物X-衍射	蒙皂石及高岭石占比: 95%
压汞试验	有效孔隙率: 28.8%, 总面孔率: 3%, 渗透率: $0.52\times10^{-3}\sim0.85\times10^{-3}\mu\text{m}^2$

根据岩样测试结果, 新近系泥岩隔水层主要为粉砂质泥岩, 由泥质及部分粉砂级碎屑颗粒构成, 虽然新近系隔水层有效孔隙率较高, 但总面孔率较低, 同时由于其较高的黏土矿物含量, 遇水易膨胀泥化, 因此, 该层整体隔水性能较好, 可有效阻隔上、下部含水层的水力联系, 同时, 该层良好的阻隔水能力为其上部第四系含水层地下水径流特征研究、井下涌水量预测提供依据。

2.2.2 5 煤底板隔水层

5 煤底板隔水层是 5 煤底板砂岩含水层与 5 煤

回采之间的隔水关键层。岩样测试结果表明,该层岩性为硅质泥岩或炭质泥岩,块状结构,主要含石英、黏土矿物等,其中石英、黏土矿物占比分别约为 56%、30%,黏土矿物中伊蒙混层及高岭石占比超过 80%。有效孔隙率为 17.6%~23.6%,渗透率为 $0.52 \times 10^{-3} \sim 1.90 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。总体上,5 煤底板隔水层渗透率低,具有良好的阻隔水能力。电镜扫描结果如图 7 所示。

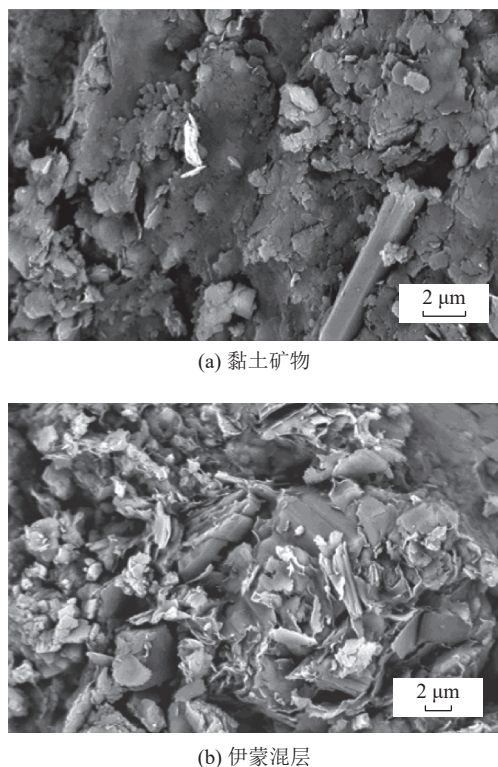


图 7 5 煤底板隔水层岩样电镜扫描图

Fig.7 Scanning electron micrographs of rock samples of No.5 coal seam floor sandstone aquiclude

总体上,新近系泥岩隔水层与 5 煤底板隔水层均具有较高的粘土矿物含量,使其具备良好的阻隔水能力,在天然状态下可有效阻隔上下含水层之间的水力联系。

3 研究区地下水的赋存规律

为研究矿区主要含水层的地下水赋存规律,对主采煤层顶、底板含水层进行群孔、多次抽水试验,在充分暴露含水层边界条件的基础上,通过室内求参、模型矫正获取其渗透性及富水性,进一步为矿井涌水量预测、矿井充水强度评价及井下安全生产提供依据。

3.1 第四系孔隙含水层赋存规律

根据研究区勘探资料,第四系孔隙潜水含水层的有效厚度为 4.4~46.0 m,由天山山前向外呈扇形

逐渐增大,其地下水属第四系孔隙潜水,并接受大气降水与天山山前雪融水补给(图 2)。

为定量评价第四系孔隙含水层富水性变化规律,整理分析该含水层四次抽水试验资料(表 3),4 组抽水试验孔抽水流量 0.21~2.51 m^3/h ,降深 4.49~15.81 m,较小的抽水流量引起含水层较大的水位降深,同时根据含水层单位涌水量结果,表明第四系孔隙含水层整体上为弱富水含水层,部分区域为中等~弱富水(如图 8 所示,由于不同含水层抽水试验在矿区更大范围内开展,受限于图片展示范围,部分抽水试验孔未在图中进行标注展示,图 9—图 11 同理),其渗透性在山前较大,向外逐渐变差。

表 3 第四系含水层现场抽水试验结果
Table 3 Results of field pumping test of the quaternary aquifer

抽水试验孔	抽水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	水位降深/m	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	单位涌水量/ ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
Q-1	0.212	4.49	0.1	0.041
Q-2	0.47	12.35	0.134	0.038
Q-3	2.51	15.81	0.65	0.109
Q-4	0.96	7.6	1.474	0.128

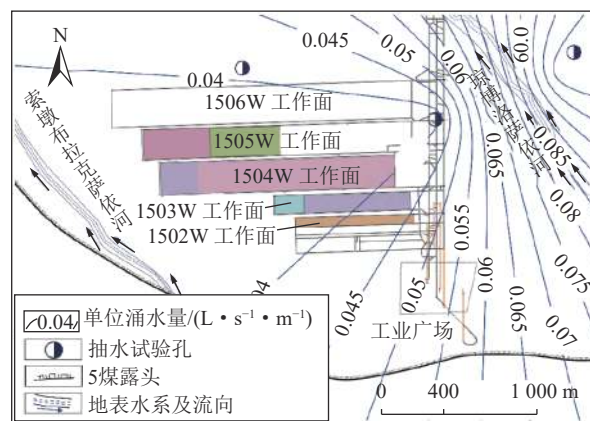


图 8 第四系含水层单位涌水量等值线

Fig.8 Contour of unit water inflow of the quaternary aquifer

3.2 煤层顶板砂岩含水层赋存规律

3.2.1 3 煤顶板砂岩含水层

矿区范围内 3 煤顶板砂岩含水层厚度由天山山前向外逐渐增大,钻孔揭露最大厚度可达到 367.4 m。根据该层抽水试验资料(表 4),总体上为渗透性差,富水性弱,部分区域为中等~弱富水(较符合前文 3 煤顶板砂岩含水层微观介质特征研究结论)的含水层(图 9)。

3.2.2 5 煤顶板砂岩含水层

同样地,根据 5 煤顶板砂岩含水层抽水试验资

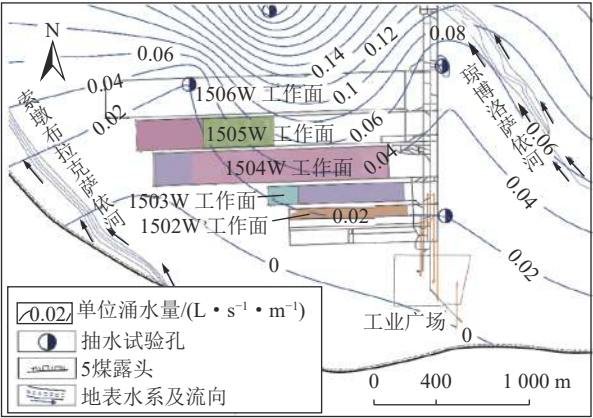


图9 3煤顶板砂岩含水层单位涌水量等值线
Fig.9 Contour of unit water inflow of No.3 coal seam roof sandstone aquifer

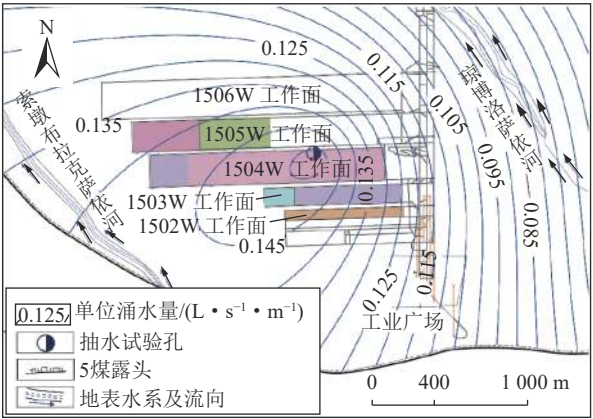


图10 5煤顶板砂岩含水层单位涌水量等值线
Fig.10 Contour of unit water inflow of No.5 coal seam roof sandstone aquifer

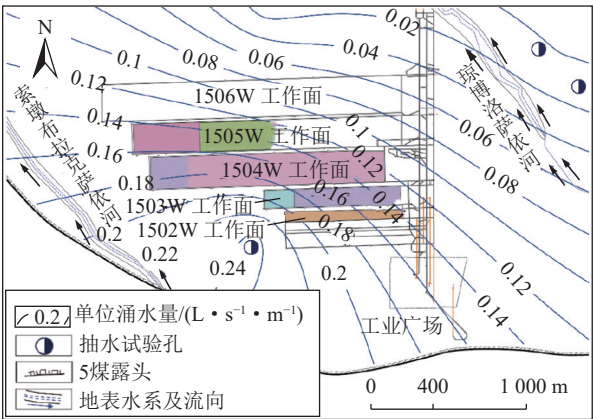


图11 5煤底板砂岩含水层单位涌水量等值线
Fig.11 Contour of unit water inflow of No.5 coal seam floor sandstone aquifer

料(表5),整体上表现为弱富水,但有部分区域表现为中富水(图10),具有区块化特征。

3.3 煤层底板砂岩含水层赋存规律

5煤底板砂岩含水层上距5煤底板14.2~36.5 m,

表4 3煤顶板砂岩含水层现场抽水试验结果

Table 4 Results of field pumping test of No.3 coal seam roof sandstone aquifer

抽水试验孔	渗透系数/(m·d ⁻¹)	单位涌水量/(L·s ⁻¹ ·m ⁻¹)
KB-1	0.084	0.02
KB-2	0.052	0.038
KB-3	0.082	0.109
KB-4	0.048	0.128
KB-5	0.073	0.008
KB-6	0.002	0.000 6
KB-7	0.197	0.023
KB-8	0.369	0.306

表5 5煤顶板砂岩含水层现场抽水试验结果

Table 5 Results of field pumping test of No.5 coal seam roof sandstone aquifer

抽水试验孔	渗透系数/(m·d ⁻¹)	单位涌水量/(L·s ⁻¹ ·m ⁻¹)
ZK2401	0.173	0.03
井检2	—	0.016
3-2	0.954	0.152
5顶砂-1	0.563	0.023
5顶砂-2	0.015	0.001 6

平均24.5 m,层厚5.32~20.64 m,平均厚度15.22 m,沿走向变化较大,沿倾向相对稳定。

据前期钻孔抽水试验结果(表6),5煤底板砂岩含水层渗透系数为0.006~1.162 m/d,单位涌水量在0.001~0.244 L/(s·m),平均为0.061 L/(s·m),结合前文该层具有较高的黏土矿物含量,表明该含水层整体富水性总体偏弱,但有部分区域表现为渗透性强、中等富水且存在一定突水危险性,具有区块化特征(图11、图12)。

表6 5煤底板砂岩含水层现场抽水试验结果

Table 6 Results of field pumping test of No.5 coal seam floor sandstone aquifer

抽水试验孔	平均渗透系数/(m·d ⁻¹)	平均单位涌水量/(L·s ⁻¹ ·m ⁻¹)
KB-4	0.006	0.001
KB-6	0.219	0.047
KB-8	0.048	0.01
5底砂-1	1.162	0.244
5底砂-2	0.027	0.003

总体上,研究区第四系含水层与煤系顶、底板砂岩含水层总体富水性均较弱,部分区域中等富水,具有区块化特征。

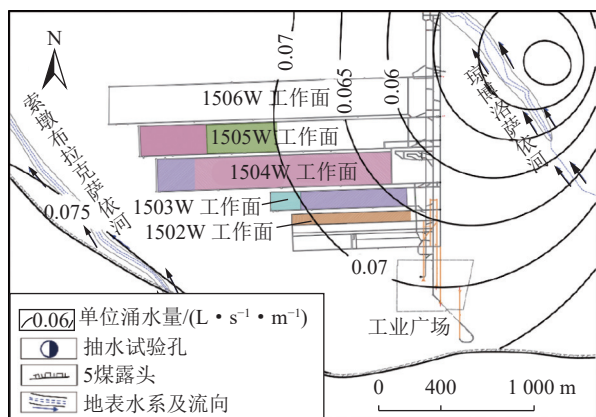


图 12 5 煤底板砂岩含水层突水系数等值线

Fig.12 Contour of water inrush coefficient of No.5 coal seam floor sandstone aquifer

4 研究区地下水的运移规律

在获取研究区宏观水文地质条件、含(隔)水层微观介质条件及煤系主要充水含水层富水规律的基础上,结合现场勘察、井下放水试验等,对研究区主要含水层的水动力学特征及含(隔)水层的储水控水规律进行研究,可为矿区高效疏排水并最大限度减小对地下水生态环境^[26]的影响提供依据。

4.1 第四系含水层

首先,第四系冲洪积含水层在山前接受天山雪融水及少量大气降水补给,其补给来源相对充足;其次,根据第四系含水层介质条件及其地下水赋存规律表明,该层结构松散,透水性高,是地下水径流的良好通道;最后,山前近似南高北低的地势差(地层坡度 $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$)为地下水径流提供了动力条件。综上,当第四系含水层地下水受下部新近系泥岩隔水层阻隔后,在山前表现出“斜坡过境流”的动力学特征,主要以松散层孔隙潜水形式、由高向低高强度流动。

在山前具有大量泉出露,其水温接近气温,表明其补给来源为第四系含水层,且含水层中融雪径流强度较大。此外,在山前该层进行抽水试验时,由于“斜坡过境流”的径流特征影响,试验孔下方形成两侧不同影响半径的非对称降落漏斗,如图 13 所示。

矿井首采面回采过程中,第四系含水层在不受降雨影响条件下,观测孔水位上下波动小于 1 m,变化幅度微弱;其次,根据前文新近系泥岩隔水层介质条件及特征分析,其透水性弱,可有效阻隔第四系含水层向深部补给;最后,在矿井多个工作面回采期间,井下实际观测涌水量远小于假设导裂带沟通第四系含水层或第四系含水层补给煤层顶板砂岩含水层条件下的预计涌水量。综上所述,第四

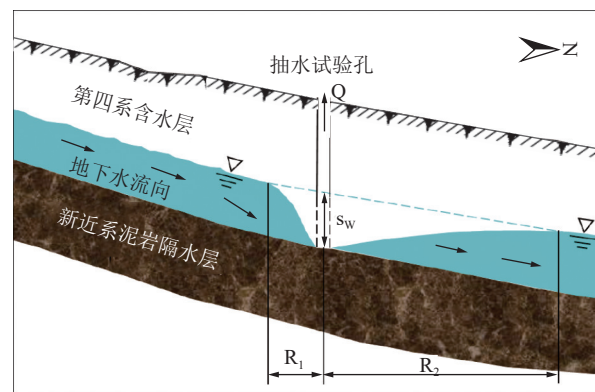


图 13 非对称降落漏斗示意

Fig.13 Asymmetric landing funnel diagram

系含水层及其部分补给来源的大气降水、天山雪融水对煤层顶板砂岩含水层及井下涌水影响较小,并进一步证实新近系泥岩隔水层具备良好的阻隔水能力。

4.2 煤系顶板砂岩含水层

针对主采 3、5 煤顶板砂岩含水层,为 3、5 煤层开采直接充水含水层,但其总体富水性较弱,静储量较小,且不接受上部第四系含水层和下部含水层补给,对矿井生产影响较小。

4.3 5 煤底板砂岩含水层

4.3.1 含水层“溶盐增渗”效应

5 煤底板砂岩含水层与上下含水层无水力联系,虽然其本身渗透率较低、透水性较弱且 5 煤底板隔水层隔水能力较好,但部分区域与 5 煤之间有效隔水层厚度仅有 1~7 m,在富水性较好、水头压力较高区域,可通过底板渗水进入 5 煤回采工作面。

根据 5 煤底板砂岩含水层地下水赋存规律,该层渗透性较好,但其补给量有限,具有良好的可疏降性。在该层放水试验水压小于 1 MPa 时,涌水为正常清水,当揭露水压达到 1 MPa 时,涌水“变混”并含大量灰白色、灰黄色砂粒(图 14)。



图 14 含水层放水试验涌水“变混”情况

Fig.14 Water “mixing” in the discharge test of the aquifer

新疆哈密大南湖矿区与伊犁矿区主采煤层均属侏罗系西山窑组,结合课题组前期在哈密大南湖矿区开展的相似地层现场抽水试验、疏降水工程以及室内渗流试验等^[15-16,27]等相关成果经验,在该矿区井筒施工阶段,侏罗系西山窑组砂岩含水层疏降前后渗透系数由 0.306 m/d 增大至 0.506 m/d,增加了约 1.6 倍,随着后期工作面回采,疏排水量不断增大,渗透系数急剧增大至 4.33 m/d;通过哈密大南湖矿区相似地层岩样的室内渗流试验,在 0.45 MPa 渗透压条件下(由于空间尺度效应,哈密大南湖矿区侏罗系相似地层岩样室内渗流试验渗透压在未达到伊犁矿区

现场放水试验时实际揭露水压 1 MPa 的条件下,便产生渗流水“变混”情况),试验前后岩样渗透性会产生突变,最高可增大 10 倍,另外,动水条件下岩样中可溶性盐及高岭石溶出,导致渗流水相比渗流前高纯水呈现不同程度的“变混”、TDS 增大,进而导致渗流试验前后岩样孔隙率增大 1.82%~11.38%,平均增幅约为 4.16%(表 7、图 15)。综上,认为本区砂岩含水层由于胶结程度差、力学强度低,在地下水高渗透压及较强径流时,碎屑颗粒崩解,胶结物溶解,导致放水孔中涌水“变混”,同时,岩层孔隙增大,储水性及透水性增强,也即产生“溶盐增渗”效应^[16,27]。

表 7 渗流试验前后部分含水层岩样及渗流水各参数对比

Table 7 Comparison of parameters of part of the aquifer rock samples and seepage water before and after seepage test

岩样编号	岩样渗透系数/(m·d ⁻¹)		岩样孔隙率/%		渗流水TDS含量/(mg·L ⁻¹)		渗流水悬浮物含量/mg	
	突变前	突变后	试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后
YP-1	—	—	27.33	30.44	—	—	—	—
YP-2	0.000 04	0.000 27	31.05	32.25	0	160	0	389
YP-9	—	—	25.47	26.16	—	—	—	—
YP-15	0.000 07	0.000 34	29.14	29.67	0	280	0	230
YP-16	—	—	30.70	31.77	—	—	—	—
YP-21	0.000 24	0.002 40	34.45	35.69	0	140	0	171
YP-22	—	—	32.84	34.34	—	—	—	—
YP-23	—	—	32.23	33.35	—	—	—	—

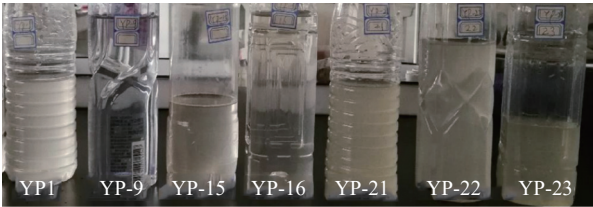


图 15 渗流出水“变混”情况

Fig.15 Water “mixing” situation of seepage experiment

4.3.2 含水层疏降工程

随着伊犁矿区开采向西及北部延深,5 煤底板砂岩含水层水压逐渐增大。为避免因水压增大产生“溶盐增渗”效应,降低该层突水隐患,保证后续煤层安全开采,结合其单斜构造特征及近南北向的地下水径流方向,在区域上开展了“横向截流,侧向掩护”的“厂”字形大范围疏降(图 16)。随着各工作面布设逐渐向北部延深,结合井下采掘安排,在各工作面巷道内沿近似垂直地下水流向施工“截流”疏降孔(回采期间,随着工作面推进各孔渐次关闭),在浅部以横向截断 5 煤底板砂岩含水层径流,减少含水层向深部补给,进而控制深部区域回采期间的含水层

初期揭露水压及径流强度,避免因产生“溶盐增渗”效应而导致含水层储水性及透水性增大;在矿区浅部沿近似垂直地下水流向及大巷中沿近似平行地下水流向方向,随着工作面布设及大巷掘进逐渐向北

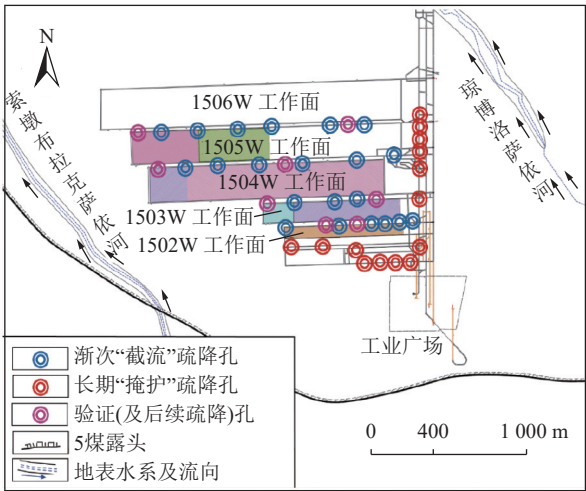


图 16 矿区 5 煤底板砂岩含水层疏降平面示意

Fig.16 Schematic plan of No.5 coal floor sandstone aquifer drainage in the mining area

部延深,渐次施工“厂”字型“掩护”疏降孔群,对该层进行长期疏放,以阻断其侧向补给,掩护后续工作面开采。同时,在各工作面下巷布设疏降效果验证孔,并在疏放水后工作面若未达到安全开采水压时对含水层继续疏降。

根据井下采掘工程依次施工的“厂”字形疏降工程,对5煤底板砂岩含水层累计放水已超过33.86万 m^3 ,疏降效果十分显著。其中,工业广场区域疏降水位可达到52 m,1502 W、1503 W和1504 W工作面区域疏降水位均能达到10~35 m,最大可超过102 m;

1505 W工作面区域群孔总疏降强度最大可达到约110 m^3/h ,在疏降约15 d后,工作面东、西侧含水层水位降深分别可达到45、35 m以上。疏放水后期,各疏降孔涌水量均由初期的15~20 m^3/h 衰减至小于5 m^3/h ,表明工作面区域残余水量有限;其次,疏降水后工作面实际揭露含水层水压均小于0.5 MPa,回采期间工作面最大涌水量均小于5 m^3/h ,实际揭露情况远小于疏降前的水压和预计涌水量,满足安全开采要求,为井下回采创造了良好的水文地质条件。各区域疏放水概况见表8。

表8 各工作面区域疏放水概况
Table 8 Overview of water drainage in each mining panel

位置	孔号	部分疏降孔水位/m			区域平均疏降强度/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	揭露含水层水压/MPa	
		疏降前	疏降后	疏降水位		疏降前	疏降后
工业广场	水文验证孔	1 296.97	<1 244.94	>52.03	—	—	—
1502 W	5底砂-1	1 264.17	<1 162	>102.17	80	1.22	0.33
	FS5	1 214	<1 180	>34			
	FS6	1 214	<1 180	>34			
	FS7	1 214	<1 180	>34			
1503 W	5底砂-3	1 229.3	<1 217.2	>12.1	65	1.14	0.3
1504 W	FS10	1 161	<1 138	>23	70	0.8	0.2
1505 W	FS13	1 089	<1 044	>45	110	0.6~1.05	0.3
	1 505 W-6	1 127	<1 092	>35			

5 结 论

1)通过扫描电镜、X-衍射、压汞试验等方法,系统研究了伊犁矿区富煤地层微观含水介质条件及特征。研究区主要含(隔)水层有效孔隙率均较高,其中侏罗系主采煤层顶底板砂岩含水层有效孔隙率范围为17.1%~29.5%,新近系与侏罗系隔水层有效孔隙率范围为17.6%~29.0%。

2)研究区主要含(隔)水层黏土矿物含量均较高,遇水膨胀泥化导致煤系砂岩含水层渗透性较差,但同时又增强了新近系泥岩隔水层与5煤底板隔水层的阻隔水能力。

3)通过各主要含水层现场群孔抽水试验,总体上第四系孔隙含水层与煤系顶底板砂岩含水层富水性较弱,部分区域表现出中等富水,以静储量为主,均具有区块化特征。

4)系统研究了主要含水层的水动力学特征与储水控水规律,矿区范围内第四系表现出“斜坡过境流”的动力学特征,但受下部新近系泥岩隔水层阻隔,与煤系顶板砂岩含水层无水力联系;对煤层回采存在

影响的为5煤底板砂岩含水层,并针对该层施工了“横向截流,侧向掩护”的“厂”字形大范围疏降,根据疏降孔水位降深及工作面揭露水压、涌水量等表明其疏降效果显著。相关研究成果可为研究区及西部相似开采条件下防治水工作提供一定的理论及工程依据。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国2022年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 中国国家统计局, 2023.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022: 275-279.
- [3] 中国煤炭工业协会, 2021煤炭行业发展年度报告[R]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2022.
- [4] 董书宁, 姬亚东, 王 皓, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2367-2375.
DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, et al. Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2367-2375.
- [5] 王双明, 段中会, 马 丽, 等. 西部煤炭绿色开发地质保障技术研究现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2): 1-6.

- WANG Shuangming, DUAN Zhonghui, MA Li, *et al.* Research status and future trends of geological assurance technology for coal green development in Western China[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(2): 1–6.
- [6] 霍超. 新疆煤炭资源分布特征与勘查开发布局研究[J]. *中国煤炭*, 2020, 46(10): 16–21.
- HUO Chao. Research on distribution characteristics and exploration and development layout of coal resources in Xinjiang[J]. *China Coal*, 2020, 46(10): 16–21.
- [7] 邱春生, 丁湘, 黄浩. 深埋侏罗系煤层顶板水探放技术实践—以呼吉尔特矿区葫芦素矿井为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2016, 44(6): 96–100.
- DI Chunsheng, DING Xiang, HUANG Hao. Practice of exploration and discharge technology of roof water in deep Jurassic coal seam: with Hu Lusu coal mine in Hujert mine area as example[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2016, 44(6): 96–100.
- [8] 宋洋, 迟宝明, 谷洪彪, 等. 新生代以来伊犁盆地演化对霍城地区第四系含水层建造的影响[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(9): 156–163.
- SONG Yang, CHI Baoming, GU Hongbiao, *et al.* Study of cenozoic evolution of Yili Basin Impaction on the quaternary aquifer construction in Huocheng Area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(9): 156–163.
- [9] 武强, 申建军, 王洋. “煤-水”双资源型矿井开采技术方法与工程应用[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 8–16.
- WU Qiang, SHEN Jianjun, WANG Yang. Mining techniques and engineering application for “Coal-Water” dual-resources mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 8–16.
- [10] 冯洁, 侯恩科, 王苏健, 等. 陕北侏罗系沉积控水规律与沉积控水模式[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1614–1629.
- FENG Jie, HOU Enke, WANG Sujian, *et al.* Law and model of Jurassic sedimentary water control in Northern Shaanxi Province[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1614–1629.
- [11] 杨鹏, 杨伟峰, 马荣坤. 锦界煤矿侏罗系砂岩微观孔隙结构类型及富水性研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(8): 188–194.
- YANG Peng, YANG Weifeng, MA Rongkun. Study on microscopic pore structure types of Jurassic sandstone and water abundance in Jinjie Coal Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(8): 188–194.
- [12] 张玉军, 宋业杰, 樊振丽, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗系煤田保水开采技术与应用[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(4): 159–168.
- ZHANG Yujun, SONG Yejie, FAN Zhenli, *et al.* Technology and application of water-preserving mining in Jurassic coalfield in Ordos Basin[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(4): 159–168.
- [13] 田继军, 何静, 韦波, 等. 塔里木盆地西南缘侏罗系沉积演化及聚煤主控因素研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(2): 35–44, 102.
- TIAN Jijun, HE Jing, WEI Bo, *et al.* Study on Jurassic sedimentary evolution and main control factors of coal accumulation in southwest margin of Tarim Basin[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(2): 35–44, 102.
- [14] 徐智敏, 高尚, 孙亚军, 等. 西部典型侏罗系富煤区含水介质条件与水动力学特征[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(2): 444–451.
- XU Zhimin, GAO Shang, SUN Yajun, *et al.* A study of conditions of water bearing media and water dynamics in typical Jurassic coal rich regions in western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 444–451.
- [15] 刘钦. 哈密矿区侏罗系弱胶结砂岩结构及渗流模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018: 23–24.
- LIU Qin. Study on the Structure and Seepage Model of Jurassic Weak Cemented Sandstone in Hami Mining Area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018: 23–24.
- [16] 刘钦, 孙亚军, 徐智敏, 等. 侏罗系弱胶结砂岩孔隙介质特征及其保水采煤意义[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(3): 858–865.
- LIU Qin, SUN Yajun, XU Zhimin, *et al.* Pore media characteristics of weak cemented sandstone and its significance for water-preserved coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(3): 858–865.
- [17] 倪仕琪, 宋继叶, 蔡煜琦, 等. 伊犁盆地南缘郎卡地区中侏罗统西山窑组沉积特征及演化[J]. *沉积学报*, 2021, 39(2): 434–445.
- NI Shiqi, SONG Jiye, CAI Yuqi, *et al.* Sedimentary characteristics and evolution of the Middle Jurassic Xishanyao Formation in the Langka area, Southern Margin of the Yili Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(2): 434–445.
- [18] 焦国华, 张卫平, 谢利华, 等. 准噶尔盆地南部侏罗统三工河组沉积体系及其控制因素[J]. *古地理学报*, 2023, 25(3): 628–647.
- JIAO Guohua, ZHANG Weiping, XIE Lihua, *et al.* Depositional system and their controlling factors of the Lower Jurassic Sangonghe Formation in southern Junggar Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2023, 25(3): 628–647.
- [19] 王强民, 王皓, 杨建, 等. 西部侏罗系矿区充水含水层水文地球化学特征及矿井水来源综合识别[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(4): 1084–1093.
- WANG Qiangmin, WANG Hao, YANG Jian, *et al.* Hydrogeochemical characteristics of main water filled aquifers and source indicators of mine water in typical Jurassic mine area of Western China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(4): 1084–1093.
- [20] 石守桥, 吴复柱, 边凯. 弱胶结覆岩导水裂隙带高度预测及三维空间发育特征[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(6): 1154–1160.
- SHI Shouqiao, WU Fuzhu, BIAN Kai. Height prediction and three-dimensional development characteristics of water-conducting fracture zone in weakly cemented overburden[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(6): 1154–1160.
- [21] 钟大康, 朱筱敏, 文应初. 准噶尔盆地阜东斜坡侏罗系砂岩成岩作用、孔隙演化及次生孔隙预测[J]. *中国海上油气*, 2003, 17(4): 27–29.
- ZHONG Dakang, ZHU Xiaomin, WEN Yingchu. Diagenesis, pore evolution and secondary porosity prediction of Jurassic sandstone in Fudong slope, Junggar Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2003, 17(4): 27–29.

- [22] 张云鹏,李玉宏,郭 望,等.柴达木盆地北缘侏罗系陆相低熟页岩孔隙发育特征及主控因素[J].地质学报,2021,95(2): 565-577.
ZHANG Yunpeng, LI Yuhong, GUO Wang, *et al.* Characteristics and main controlling factors of pore structures in low thermal maturity continental shale of Jurassic, northern Qaidam basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(2): 565-577.
- [23] 李 锟,于炳松,王黎栋,等.塔里木盆地东南地区侏罗系低孔渗砂岩储层成岩作用及孔隙演化[J].现代地质,2014,28(2): 388-395.
LI Kun, YU Bingsong, WANG Lidong, *et al.* Diagenesis and pore evolution of jurassic low-porosity and low-permeability sandstone reservoir in Southeastern Tarim Basin[J]. *Geoscience*, 2014, 28(2): 388-395.
- [24] 司马立强,马 骏,刘俊丰,等.柴达木盆地涩北地区第四系泥岩型生物气储层孔隙有效性评价[J].岩性油气藏,2023,35(2): 1-10.
SIMA Liqiang, MA Jun, LIU Junfeng, *et al.* Evaluation of pore effectiveness of Quaternary mudstone biogas reservoirs in Sebei area, Qaidam Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(2): 1-10.
- [25] 张 浩,毛 锐,金力新,等.高含黏土岩心有效孔隙度实验新方法-以准噶尔盆地玛湖凹陷上乌尔禾组砾岩储层为例[J].地球物理学进展,2022,37(4): 1669-1676.
ZHANG Hao, MAO Rui, JIN Lixin, *et al.* New experimental method for effective porosity of high clay content cores: a case study on conglomerate reservoirs of Upper Urho Formation in Mahu sag, Junggar Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(4): 1669-1676.
- [26] ZENG Yifan, MENG Shihao, WU Qiang, *et al.* Ecological Water Security Impact of Large Coal Base Development and its Protection[J]. *Journal of Hydrology*, 2023: 129319.
- [27] 崔思源.大南湖矿区侏罗系弱胶结含水介质及水动力特征研究[D].徐州:中国矿业大学,2017: 50-59.
CUI Siyuan. Study on Hydro-dynamic Field and Media Characteristics of Weakly-Cemented Jurassic Aquifer in Dananhu Area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 50-59.