

鄂尔多斯盆地北部直罗组古河道砂体分布区 矿井涌水模式

范立民^{1,2}, 孙魁², 马万超², 胡俭³, 马雄德⁴, 王建文⁵, 吴立群⁶, 苗彦平⁷, 荣辉⁶

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 陕西省地质环境监测总站 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. 陕煤集团神木张家峁矿业公司, 陕西 神木 719300; 4. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 5. 陕煤集团神木柠条塔矿业公司, 陕西 神木 719300; 6. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 湖北 武汉 430074; 7. 陕煤集团神木红柳林矿业公司, 陕西 神木 719300)

摘要:近十几年来, 鄂尔多斯盆地北部煤矿开采频频受到了直罗组地下水的威胁, 甚至出现了突水事故。区内以直罗组地下水为充水水源的大水矿井连片分布, 且与直罗组古河道砂体关系密切。为阐释神府南区直罗组古河道砂体分布区矿井涌水模式, 在直罗组古河道砂体空间分布及其对地下水赋存控制作用研究的基础上, 从研究区尺度、井田尺度和工作面尺度, 分析了直罗组古河道砂体与矿井涌水的关系, 提出了直罗组古河道砂体下矿井涌水模式。结果表明: 神府南区直罗组古河道冲刷带沿红碱淖—尔林兔—锦界一线发育, 冲刷带内延安组第5段几乎被冲刷剥蚀殆尽, 在局部地区延安组第4段也遭受了冲刷。根据砂分散体系分析和隔水岩组发育特征, 将冲刷带内充填沉积的古河道砂体分为3级。直罗组古河道砂体富水性的强弱主要受控于砂体规模、物性特征和风化作用, 一级砂体(主河道)区域富水性强于二级砂体(分支河道)及三级砂体(三角洲间湾、分流间湾)区域, 当砂体遭受风化后, 其富水性将进一步增强。基于不同尺度下砂体分级、风化砂体厚度与矿井涌水关系的分析, 提出了研究区东部现阶段古河道砂体下生产矿井的3种涌水模式。强涌水模式, 主要位于一级砂体分布区, 风化砂体厚度一般 ≥ 30 m。中等涌水模式, 主要位于一级砂体的边缘或二级砂体区域, 风化砂体厚度一般10~30 m。弱涌水模式, 主要位于三级砂体区域, 风化砂体厚度一般 < 10 m。

关键词:直罗组含水层; 古河道砂体; 矿井涌水模式; 水资源保护(保水采煤); 鄂尔多斯盆地北部

中图分类号: TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-0917-12

Mine water inflow pattern in the distribution area of paleochannel sand bodies of the Zhiluo Formation in the northern part of the Ordos Basin

FAN Limin^{1,2}, SUN Kui², MA Wanchao², HU Jian³, MA Xiongde⁴, WANG Jianwen⁵, WU Liquan⁶, MIAO Yanping⁷, RONG Hui⁶

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, MNR/Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an 710054, China; 3. Shenmu Zhangjiamao Mining Co., Ltd., Shaanxi Coal Group, Shenmu 719300, China; 4. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 5. Shenmu Ningtiaota Mining Co., Ltd., Shaanxi Coal Group, Shenmu 719300, China; 6. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 7. Shenmu Hongliulin Mining Co., Ltd., Shaanxi Coal Group, Shenmu 719300, China)

收稿日期: 2023-11-06 修回日期: 2023-12-06 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1452

基金项目: 国家自然科学基金联合重点资助项目(U23B2091); 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1805400); 陕西煤业化工集团有限公司2020年度重点科研资助项目(2020SMHKJ-B-J-27)

作者简介: 范立民(1965—), 男, 山西曲沃人, 教授, 博士生导师。E-mail: 498518851@qq.com

引用格式: 范立民, 孙魁, 马万超, 等. 鄂尔多斯盆地北部直罗组古河道砂体分布区矿井涌水模式[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 917-928.

FAN Limin, SUN Kui, MA Wanchao, et al. Mine water inflow pattern in the distribution area of paleochannel sand bodies of the Zhiluo Formation in the northern part of the Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 917-928.



移动阅读

Abstract: In the past ten years, the coal mining operation in the northern part of the Ordos Basin has been frequently threatened by the groundwater of the Zhiluo Formation, and even some water inrush accidents have occurred. In the area, the mines with the groundwater of the Zhiluo Formation as water source are distributed continuously, and are closely related to the paleochannel sand bodies of the Zhiluo Formation. In order to explain the mine water inflow model in the distribution area of the paleochannel sand bodies of the Zhiluo Formation in the southern area of Shenfu, on the basis of the study of the spatial distribution of paleochannel sand bodies in the Zhiluo Formation and their control effect on groundwater occurrence, the relationship between the paleochannel sand bodies and the mine water inflow in the Zhiluo Formation was analyzed from the scale of the study area, the scale of the well field and the scale of the working face, and the mine water inflow model under the paleochannel sand bodies of the Zhiluo Formation was proposed. The results show that the paleochannel scouring zone of the Zhiluo Formation in the southern area of Shenfu is developed along the line of Hongyannao-Erlintu-Jinjie, and the fifth member of the Yan'an Formation in the erosion zone is almost completely eroded, and the fourth member of the Yan'an Formation is also scoured in some areas. According to the analysis of the sand dispersion system and the development characteristics of the aquifer rock group, the paleochannel sand bodies filled and deposited in the scouring zone are divided into three grades. The water-richness of the paleochannel sand bodies of the Zhiluo Formation is mainly controlled by the scale, physical characteristics and weathering of the sand body, and the water-richness of the first-order sand body (main channel) is stronger than that of the second-class sand body (branch channel) and the third-order sand body (delta bay and tributary bay), and its water richness will be further enhanced when the sand body is weathered. Based on the analysis of the relationship between sand body classification, weathered sand body thickness and mine water inflow at different scales, three water inflow modes of production mines under paleochannel sand bodies in the eastern part of the study area were proposed. The strong water inrush mode is mainly located in the distribution area of the first-class sand body, and the thickness of the weathered sand body is generally ≥ 30 m. Medium water inrush mode is mainly located at the edge of the primary sand body or secondary sand body area, the thickness of the weathered sand body is generally 10–30 m. The weak water inrush mode is mainly located in the tertiary sand body area, and the thickness of the weathered sand body is generally < 10 m.

Key words: Zhiluo Formation aquifer; paleochannel sand bodies; mine water inflow pattern; water resources protection(water conservation and coal mining); Northern Ordos Basin

近十几年来,鄂尔多斯盆地北部煤矿开采频频受到直罗组地下水威胁,甚至出现了突水事故,直罗组含水层及其致灾机理与防控技术的研究日益成为研究的热点^[1]。针对直罗组沉积体系的研究,主要有二分法的辫状河、曲流河成因观点^[2-3],以及三分法的辫状河-辫状河三角洲、曲流河-曲流河三角洲和湖泊三角洲成因观点^[4-5],但基本达成共识的是,直罗组为河流或河流三角洲沉积,特别是直罗组下段规模巨大、分布稳定的骨架砂体,其成因类型被解释为辫状河和辫状河三角洲沉积体系的产物。沉积控水理论认为,沉积环境对含水层介质结构等条件具有一定的控制作用^[6-8]。对于河道砂体而言,沉积环境控制了其展布、厚度和内部非均质性,从而影响河道砂体内部地下水的赋存和运移能力,进而影响矿井涌水量。

目前,鄂尔多斯盆地北部有关古河道砂体与矿井涌水量关系的研究,主要集中在榆神矿区东部、神府矿区南部的直罗组浅埋区以及呼吉尔特矿区、东胜矿区的直罗组深埋区。在榆神矿区东部、神府矿区南部,直罗组埋藏浅,局部出露地表,并遭受风化,区内矿井涌水量一直处于稳定增长的态势,近年来的研究表明,

锦界煤矿及柠条塔煤矿南翼矿井涌(突)水来源主要为直罗组砂岩含水层,涌(突)水区域与直罗组古河道冲刷带、直罗组基岩风化带联系密切,且直罗组风化基岩厚度越大,矿井涌水量越大^[9-11]。位于鄂尔多斯盆地北部的呼尔吉特矿区直罗组深埋区,直罗组地下水呈现出“水量大、水压高、富水不均一”的特征。2017年5月,全矿区矿井总涌水量达到7 029.75 m³/h,并呈现出逐年上升趋势。其中,母杜柴登煤矿首采工作面矿井涌水量超过1 000 m³/h,矿井主要充水水源为直罗组底部古河道砂体含水层。通过将葫芦素井田、门克庆井田北翼和南翼、母杜柴登全井田及巴彦高勒井田煤层上部的直罗组古河床冲刷带内的“七里镇”砂岩厚度与钻孔涌水量大小进行对比,发现位于直罗组古河床冲刷带中部砂岩厚度较大区域的钻孔涌水量(平均大于100 m³/h)和矿井涌水量(920~1 200 m³/h)均较大,位于古河床冲刷带两侧的钻孔涌水量(平均小于30 m³/h)和矿井涌水量(稳定在490~592 m³/h)均相对较小^[12-14]。而在东胜矿区,陈丽^[15]通过放水试验对多个工作面上部直罗组沉积环境和富水性进行了研究,研究发现湖泊相、曲流河相、富泥辫状河相、

辫状河相的富水性依次增强,当工作面巷道未掘进至河道冲刷带时,无顶板滴水 and 淋水现象,越接近冲刷带,滴水 and 淋水现象越明显。

以上研究表明,古河道砂体与矿井涌水关系密切。在鄂尔多斯盆地北部直罗组沉积早期,地貌高差较大,物源充足,古气候环境温暖湿润,辫状河-辫状河三角洲普遍发育,且规模较大。河道充填沉积砂体粒度较粗,定向展布明显,侧向延展性好,对地下水的赋存和运移具有较强的控制作用。相比分流间湾或三角洲间湾,主河道砂体具有较强的储水和导水性能,尤其是在后期风化改造作用下,储水和导水性能大幅度提升,地下水水动力条件较强^[16],地下水系统受煤矿采动的影响较为强烈^[17]。随着近年来盆地北部煤炭资源的大规模持续开发,直罗组古河道砂体含水层已经成为矿井充水的重要充水水源,甚至形成连片分布的大水矿井。然而,以往研究,鲜见从古河道砂体角度深入研究矿井涌水和水害防控的相关文献报道。因此,笔者团队聚焦鄂尔多斯盆地北部直罗组古河道砂体,在阐释直罗组古河道砂体空间分布及其对地下水赋存控制作用的基础上,从研究区尺度、井田尺度和工作面尺度,分析直罗组古河道砂体与矿井涌水的关系,提出直罗组古河道砂体下矿井涌水模式,以期

直罗组地下水资源保护和水害防控提供依据^[18]。

1 直罗组古河道砂体空间分布及对地下水赋存的控制

1.1 直罗组古河道砂体空间分布

(1) 直罗组古河道冲刷带空间定位。鄂尔多斯盆地北部针对直罗组古河道砂体的研究主要集中在 20 世纪 80 年代以后。1987 年陕西省煤田地质局一八五队对陕北侏罗纪煤田进行勘探时,对侏罗纪含煤地层聚煤特征和沉积环境进行了研究,根据有限的 20 余个钻孔,初步圈定了直罗组沉积期古河流冲刷带范围^[19-20]。2020 年,笔者研究团队在陕西陕煤陕北矿业公司的支持下,对神府南区 2 497 个钻孔进行了细致统计,并进行了地层对比、直罗组砂分散体系及其与下伏地层接触关系的系列编图,实现了鄂尔多斯盆地北部神府南区直罗组古河道冲刷带的空间定位。研究发现,神府南区直罗组可分为上、中、下 3 段,其中下段为辫状河-辫状河三角洲沉积体系,砂体规模较大,垂向和平面连续性好,呈现泛连式展布。古河道冲刷带沿红碱淖—尔林兔—锦界一线发育,冲刷带内延安组第 5 段几乎被冲刷剥蚀殆尽,在局部地区延安组第 4 段也遭受了冲刷(图 1)^[21]。

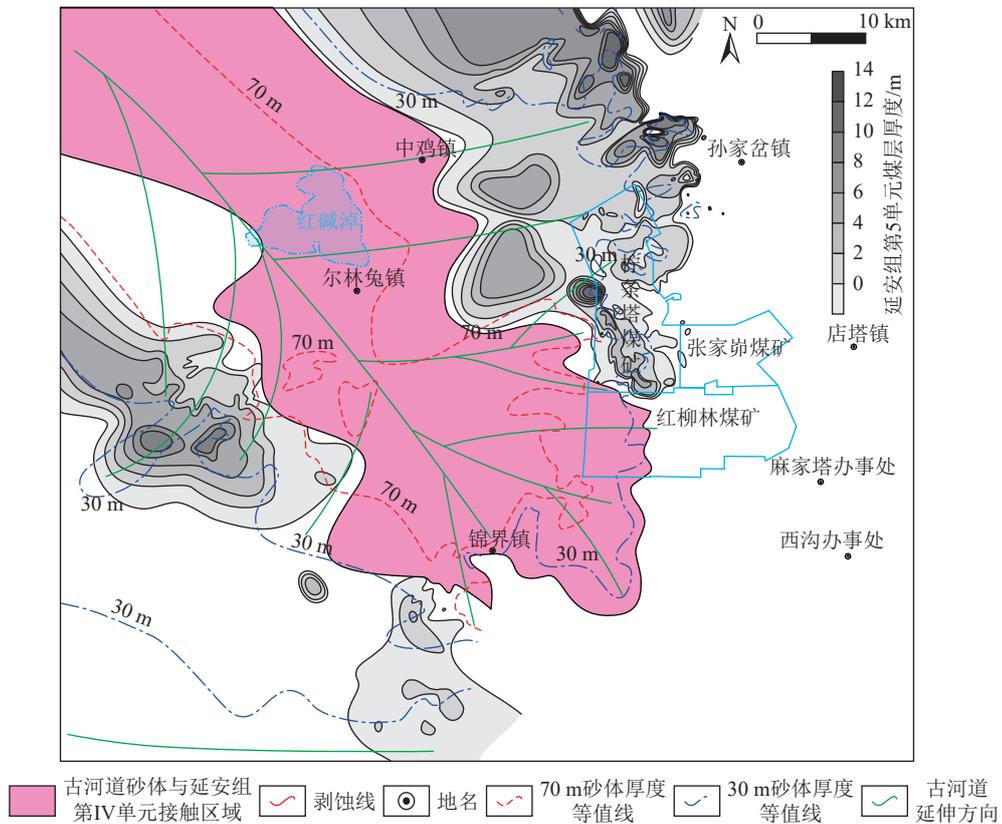


图 1 神府南区古河道冲刷带空间分布^[19]

Fig.1 Spatial distribution of paleo-channel erosion zone in southern Shenfu mining area^[19]

(2) 直罗期古河道砂体空间分布及分级。笔者团队在进行神府南区直罗组古河道砂体赋存特征研究中发现,砂体厚度、砂地比和内部隔水岩组特征存在

一定的差异,在充分考虑沉积环境特征的基础上,参考砂体的厚度、砂地比以及隔水岩组的发育情况,将直罗组古河道砂体分为 3 级(表 1、图 2)。

表 1 直罗组古河道砂体分级标准

Table 1 Classification standard of paleochannel sand bodies of Zhiluo Formation

砂体分级	砂体厚度/m	砂地比	隔水岩组特征
一级砂体	≥60	0.8~1.0	厚度 < 10 m, 层数 < 2
二级砂体	30~60	0.4~0.8	厚度 10~30 m, 层数 2~4
三级砂体	< 30	< 0.4	厚度 > 30 m, 层数 > 4

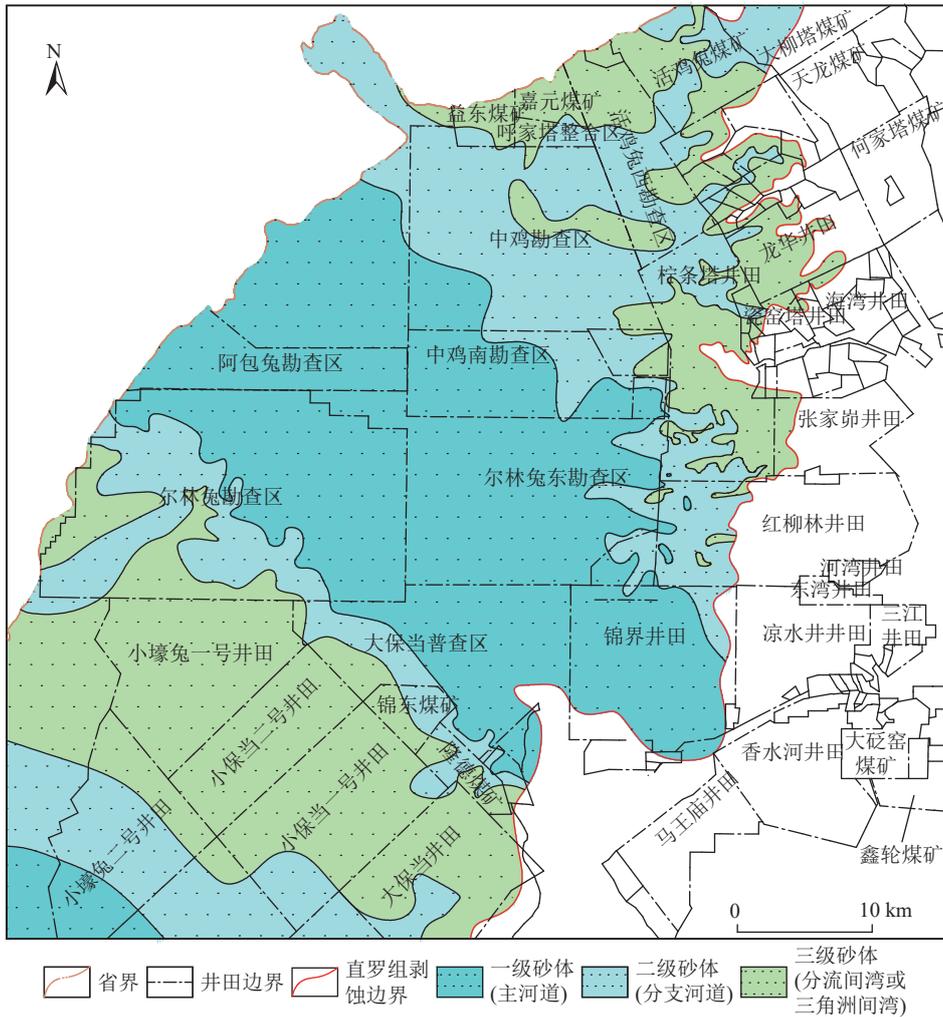


图 2 研究区直罗组古河道砂体分级平面

Fig.2 Grading plan of the paleochannel sand bodies of the Zhiluo Formation in the study area

研究区自西向东发育 2 条主干辫状分流河道,为一级河道砂体,根据以往研究资料,研究区内 2 条主河道均是鄂尔多斯盆地北部乌拉山物源的辫状河三角洲朵体向东南方向的延伸^[21],一条位于研究区中部,沿红碱淖—尔林兔—锦界一线呈 NW—SE 向条带状展布,另一条则位于研究区西南部,亦呈 NW—SE 向展布,为一级河道砂体。据以往研究资料,主河道古水流由 NW 流向 SE。在研究区中部主河道两侧,发

育次一级的分支河道,砂体规模减小,为二级河道砂体。2 条主河道之间和分支河道间,砂体厚度减小,隔水岩组厚度增大,属三角洲间湾和分流间湾的集中发育区,为三级砂体发育区。

1.2 直罗组古河道砂体对地下水赋存的控制

研究区岩石的物性特征与粒度存在一定的相关关系(图 3)。主河道(一级砂体)和分支河道(二级砂体)位置粒度较粗的粗、中粒砂岩物性条件较好,一般

以中等孔隙度、中渗孔隙为主,而分流间湾和三角洲间湾(三级砂体)位置粒度较细的细粒砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩等,物性条件相对较差,一般以低等孔隙度、超低渗~特低渗孔隙为主。究其原因,岩石的物性与泥质杂基质量分数存在反相关关系(图4)。主河道和分支河道沉积区水动力条件较强,沉积物粒度粗,石英和长石等刚性颗粒质量分数高,泥质质量分数小,在漫长的地质历史时期中,这些刚性颗粒抵抗了较多

的地层压力,减弱了压实强度,从而保存了更多的原生孔隙,储水性能和渗透性能较好。而分流间湾和三角洲间湾沉积区域,由于水动力条件弱,沉积了大量的细粒沉积物,泥质杂基含量剧增,在后期的地层压实作用下,塑性颗粒遭受挤压而进入粒间孔隙,造成有效孔隙的减少,储水性能和渗透性能变差。这种物性条件好的粗、中粒砂岩累积厚度越大,储水空间越发育,富水性越强。

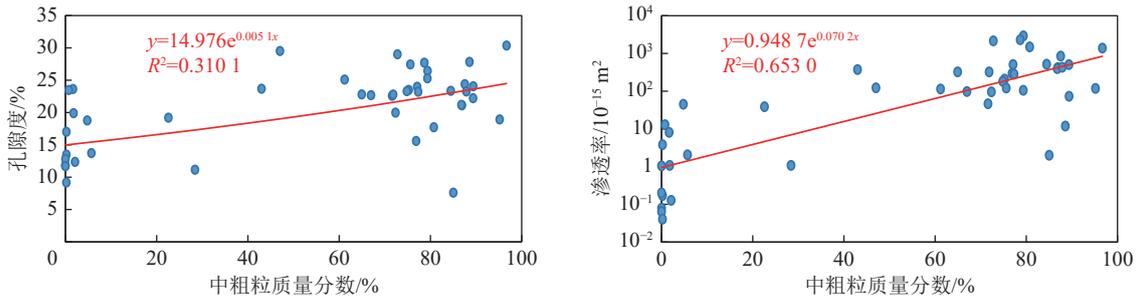


图3 岩石孔隙度、渗透率与中粗粒质量分数的关系

Fig.3 Relationship between rock porosity, permeability and content of medium and coarse grains

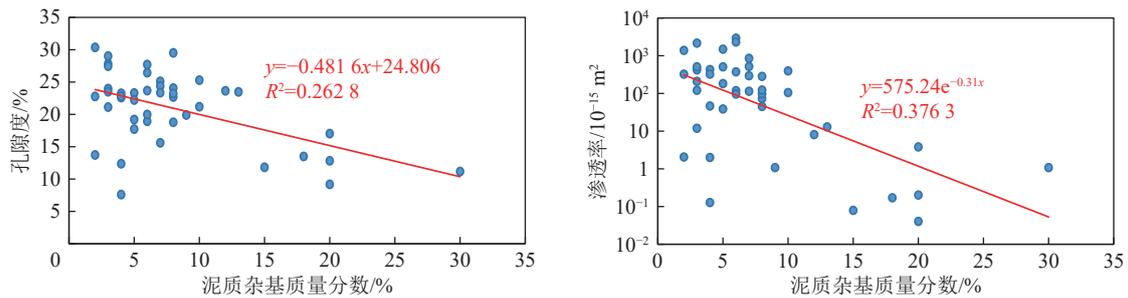


图4 岩石孔隙度、渗透率与泥质杂基质量分数的关系

Fig.4 Relationship between rock porosity, permeability and shale matrix content

基于以上分析,笔者团队分析了直罗组地层厚度、砂体厚度、砂地比、隔水岩组厚度及层数等宏观结构指标与富水性之间的相关性^[22],结果表明:直罗组下段砂体厚度及砂地比是控制富水性的关键要素,从砂体规模分析,直罗组下段中粗粒砂岩厚度约占下段地层厚度的90%以上,且厚度较大。从砂体内部非均质性分析,下段地层砂地比较大,砂体内部的侧向及垂向连通性好,储水空间较大,富水性较好。从砂体的物性条件分析,直罗组下段古河道砂体粗粒砂岩孔隙度18.93%~27.84%,渗透率 $11.91 \times 10^{-15} \sim 851.36 \times 10^{-15} \text{ m}^2$;中粒砂岩孔隙度7.61%~29.52%,渗透率 $2.00 \times 10^{-15} \sim 2156.52 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。依据油气储层评价标准,整体属于中高孔隙度、中高渗透率的优质储层,为多孔介质中地下水的高渗透流体流动单元的形成创造了良好的物质条件。

1.3 直罗组古河道砂体后期风化改造对地下水赋存性能的改善

不可忽视的是,研究区东部直罗组下段古河道砂

体遭受了长期的风化改造。对于河道砂体而言,胶结物含量相对较少,顶部强风化层主要接受物理风化作用,岩石结构遭受破坏,砂岩骨架颗粒之间呈现出不规则的相互支撑的杂乱砂状结构,强度降低,在构造应力和上覆地层压力作用下,岩石破碎,网状裂隙发育。而对于中下部,风化作用以溶蚀和淋滤作用为主,由于河道砂体黏土矿物含量较少,且多充填于石英和岩屑等骨架颗粒之间,在溶蚀淋滤作用下大多数黏土矿物被带走而形成粒间孔,随着地下水与被溶蚀颗粒的接触面积不断增大,水动力和水化学溶蚀速率也会随之加快和加剧,长此以往,形成肉眼可见的风化裂隙,地下水储存能力明显增强。由此可知,对于粗、中粒砂岩为主的古河道砂体,在遭受风化之后,裂隙和孔隙发育,岩石储水空间变得极为发育。

根据研究区不同砂体级别正常基岩与风化基岩含水层抽水试验数据对比可知,直罗组古河道砂体富水性的强弱主要受控于砂体规模、物性特征和风化作

用,一级砂体(主河道)区域富水性强于二级砂体(分支河道)及三级砂体(三角洲间湾、分流间湾)区域,当砂体遭受风化后,其富水性将显著增强(图5)。

2 直罗组古河道砂体与矿井涌水量的关系

2.1 研究区尺度古河道砂体与矿井涌水量的关系

根据研究区以往导水裂隙带高度实际探测结果和 DB61/T 1295—2019《保水采煤技术规范》等,采用 27 倍采高作为导水裂隙带高度计算依据。研究区东部生产矿井导水裂隙带高度均导通至直罗组下段,并存在大面积的完全导通区,直罗组下段古河道砂体含水层是矿井涌水的直接充水水源。笔者将不同级别古河道砂体和风化砂体厚度分别与研究区现阶段生产矿井吨煤涌水量进行空间叠加,研究不同砂体级别和风化砂体厚度与矿井涌水的关系(图6、7)。

在一级砂体(主河道)区域矿井吨煤涌水量均超

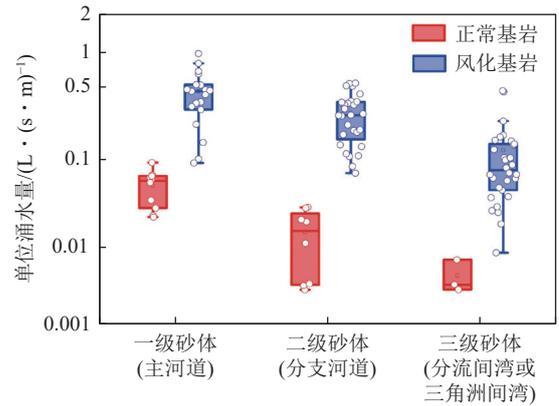


图5 不同砂体级别正常基岩与风化基岩单位涌水量箱型^[22]

Fig.5 Box diagram of per unit water inflow of normal bedrock and weathered bedrock of different sand body grades^[22]

过了 0.8 m³(红柳林煤矿西盘区直罗组分布区尚未开采),主体为相对强和较强富水区,其中一级砂体(主河道)中心区域的锦界煤矿,风化砂体厚度 10~70 m,绝

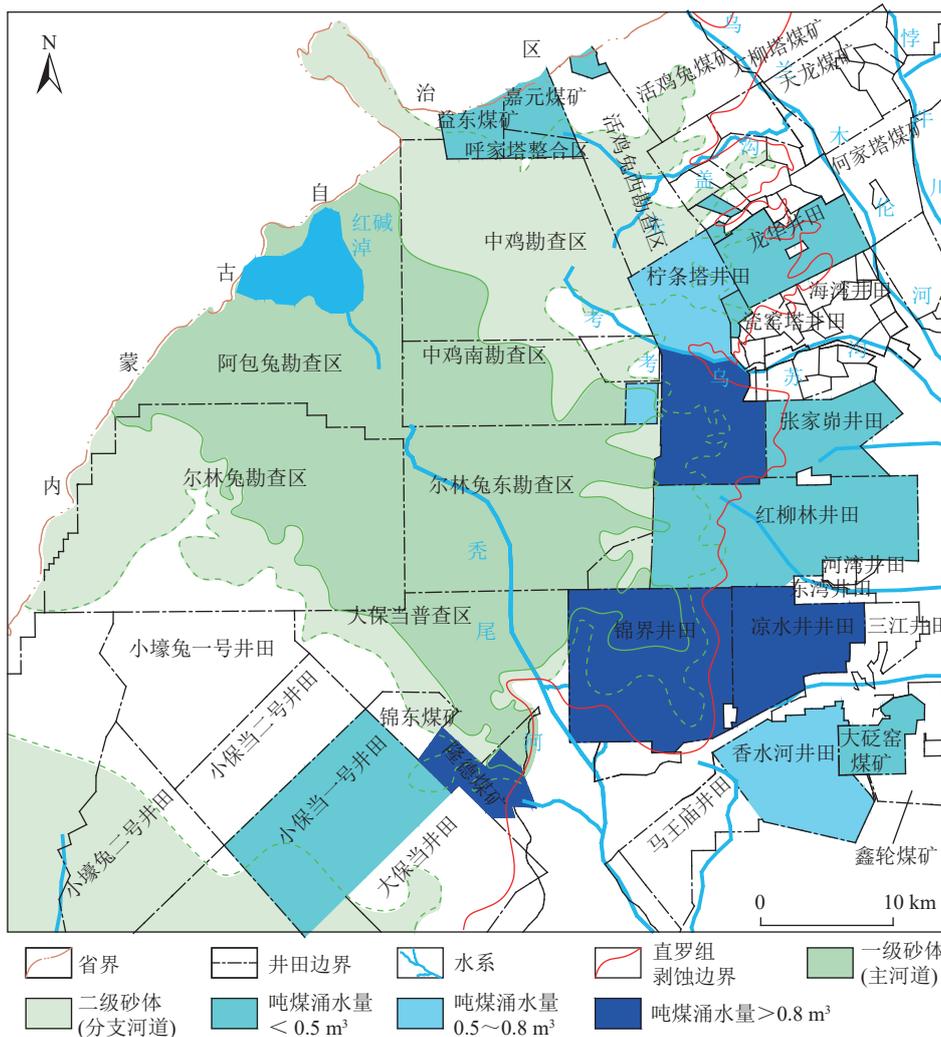


图6 不同级别古河道砂体分布与矿井吨煤涌水量的关系

Fig.6 Relationship between the distribution of different grades of paleochannel sand bodies and the water inflow per ton of coal in the mine

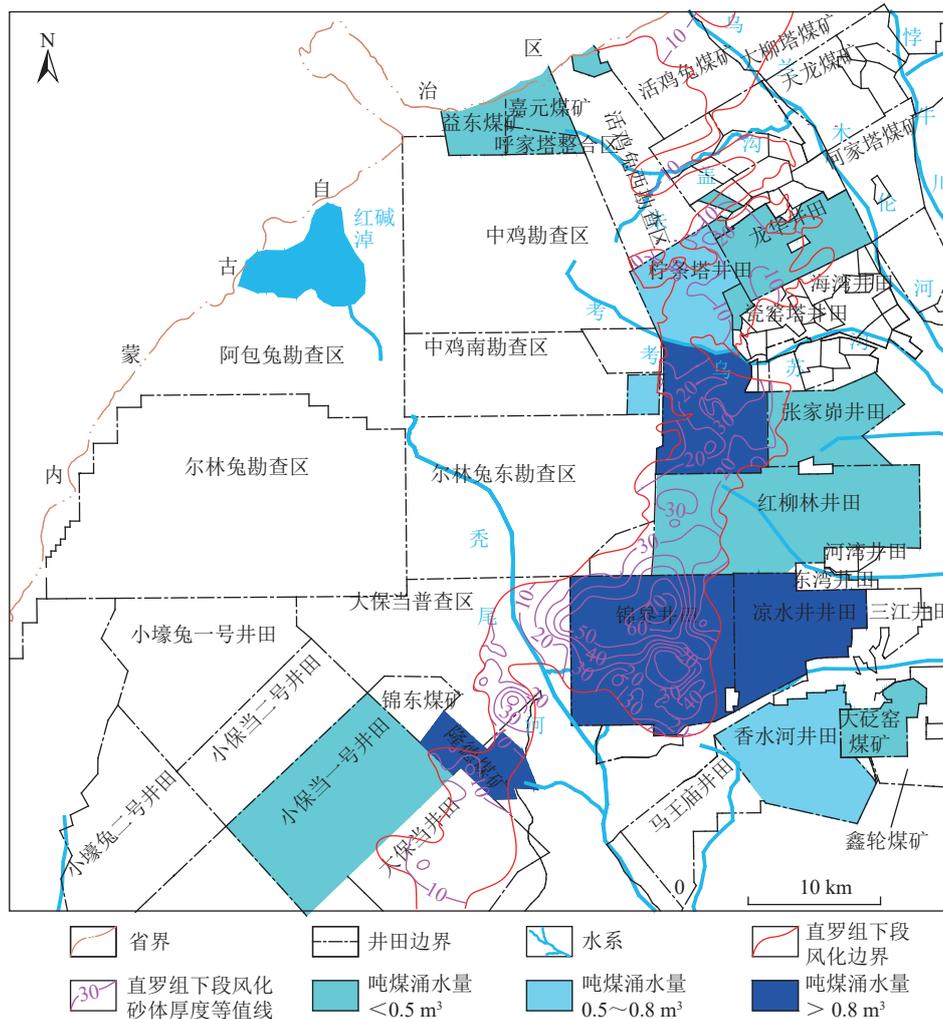


图 7 直罗组下段风化砂体厚度与矿井吨煤涌水量的关系

Fig.7 Relationship between the thickness of the weathered sand body in the lower section of Zhiluo Formation and the water inflow per ton of coal in the mine

大多数区域厚度 $\geq 30 \text{ m}$, 矿井涌水量高达 $4\ 900 \text{ m}^3/\text{h}$, 吨煤涌水量超过 2.38 m^3 , 而主河道侧缘的柠条塔煤矿南翼和隆德煤矿, 风化砂体厚度 $10 \sim 30 \text{ m}$, 绝大多数区域厚度 $\geq 20 \text{ m}$, 矿井涌水量分别为 $1\ 106$ 、 $1\ 008 \text{ m}^3/\text{h}$, 吨煤涌水量分别为 0.81 、 1.77 m^3 ; 二级砂体 (分支河道) 区域, 富水性主体为相对中等, 风化砂体厚度一般为 $10 \sim 20 \text{ m}$, 矿井涌水量一般 $< 600 \text{ m}^3/\text{h}$, 吨煤涌水量一般 $0.5 \sim 0.8 \text{ m}^3$; 三级砂体 (分流间湾) 区域, 古河道砂体厚度较薄, 且以细砂岩和粉砂岩为主, 风化砂体厚度一般 $< 10 \text{ m}$, 且分布不连续, 富水性相对较弱, 矿井涌水量一般小于 $180 \text{ m}^3/\text{h}$, 吨煤涌水量一般小于 0.5 m^3 。

2.2 矿井尺度直罗组古河道砂体与矿井涌水量的关系

柠条塔井田位于直罗组主河道砂体东北部, 开采规模 18.00 Mt/a , 主采 2^{-2} 煤层。根据井田规划, 以井田中部考考乌苏沟为界划分为南北两翼, 北翼地貌类型以黄土沟壑区为主, 南翼地貌类型以风沙滩地为主, 直罗组上部黄土层、红土层广泛发育, 且厚度较大

(图 8)。根据导水裂隙带高度计算结果, 均突破至直罗组古河道砂体, 部分区域完全导穿直罗组古河道砂体和土层, 并波及上部第四系松散沙层。根据以往的矿井涌水量观测结果和涌水来源分析结果, 矿井直接充水水源为直罗组含水层。柠条塔煤矿掘进工作面涌水量较小, 采空区和综采工作面涌水是矿井涌水的主要组成部分。通过统计对比柠条塔煤矿 2011—2020 年井下实测矿井涌水量, 井田北翼和南翼矿井涌水量存在明显差异 (图 9)。柠条塔井田北翼矿井涌水量 $200 \sim 400 \text{ m}^3/\text{h}$, 平均 $280 \text{ m}^3/\text{h}$, 吨煤涌水量 $0.30 \sim 0.59 \text{ m}^3$, 平均 0.42 m^3 , 涌水量总体较小 (图 9)。北翼开采区主要位于分支河道和分流间湾区域, 直罗组古河道砂体厚度一般为 $30 \sim 40 \text{ m}$, 直罗组下段风化砂体厚度一般为 10 m , 已开采区域砂体厚度一般 $< 20 \text{ m}$, 风化砂体厚度一般 $< 10 \text{ m}$ (图 10)。

柠条塔井田南翼矿井涌水量 $800 \sim 1\ 100 \text{ m}^3/\text{h}$, 平均 $830 \text{ m}^3/\text{h}$, 吨煤涌水量 $0.59 \sim 0.81 \text{ m}^3$, 平均 0.61 m^3 ,

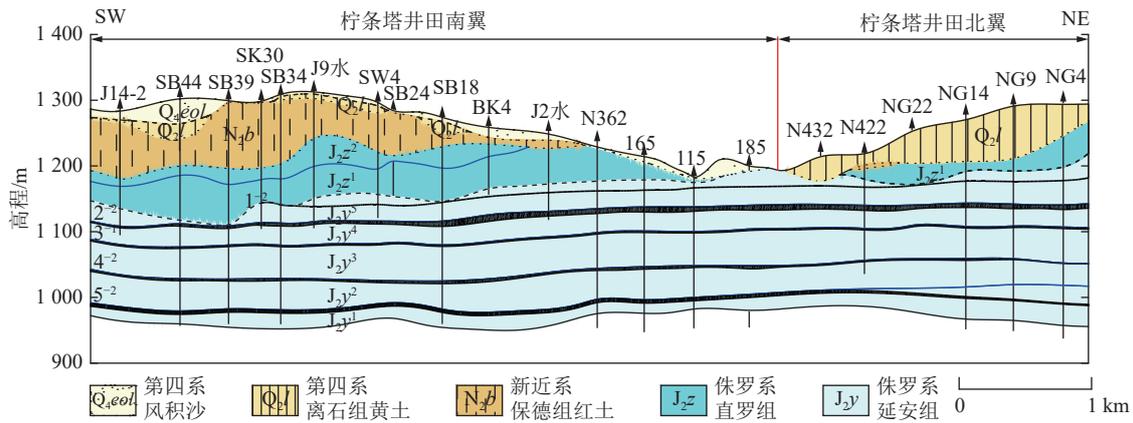


图 8 柠条塔井田地质剖面

Fig.8 Geological profile of Ningtiaotajing field

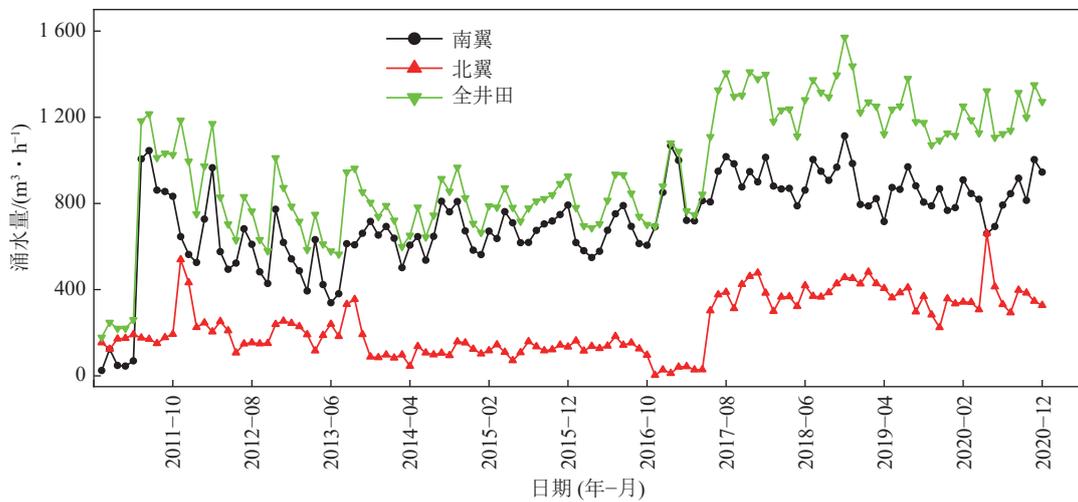


图 9 柠条塔井田矿井涌水量折线

Fig.9 Line chart of water inflow in Ningtiaota mine field

涌水量总体较大,且呈现逐渐增大的趋势(图9)。南翼开采区主要位于主河道砂体的边缘部位,砂体厚度30~60 m,直罗组下段风化砂体厚度10~30 m。其中已开采区域古河道砂体厚度一般>30 m,风化砂体厚度一般>20 m。尤其是南翼西盘区与主河道砂体相连通,S1210南翼首采工作面在沿走向推进61 m处时,发生突水事故,最大涌水量接近1300 m³/h,主要来自直罗组古河道砂体(风化基岩)含水层,另外,S12011工作面回撤通道、S1223、S1227、S1229工作面也发生过出水,出水量150~300 m³/h,涌水来源仍为顶板直罗组砂体(风化基岩)含水层(图10)。

2.3 工作面尺度直罗组古河道砂体与涌水量之间的关系

锦界煤矿31409工作面位于三盘区北部的井田边界处,回采3⁻¹煤层,煤层平均厚度3.28 m,煤层上部为直罗组古河道砂体含水层,厚度0~68 m,基本全部风化。砂体上部土层厚度40~60 m,土层上部第四

系风积沙厚度10~20 m。按照27倍采高对导水裂隙带高度进行计算,未突破至第四系风积沙含水层,矿井直接充水水源为直罗组古河道砂体含水层。

根据工作面回采情况,工作面开切眼至31409工作面回风巷道34联巷处,古河道砂体厚度0~35 m,主体为直罗组主河道的边缘部位,工作面涌水量为392 m³/h;当回风巷道34联巷至工作面回撤巷道处,主体进入直罗组主河道砂体中心区域,砂体厚度35~68 m,工作面涌水量达到1236 m³/h(不包括提前疏放的水量)(图11)。由此可见,直罗组古河道中心部位,砂体厚度大,富水性强,工作面涌水量较大,而河道边缘部位,砂体厚度较小,富水性相对减弱,工作面涌水量较小。

3 直罗组古河道砂体下生产矿井涌水模式

基于上述分析,直罗组古河道砂体及其风化砂体厚度对矿井涌水量具有明显的控制作用,不同级别古

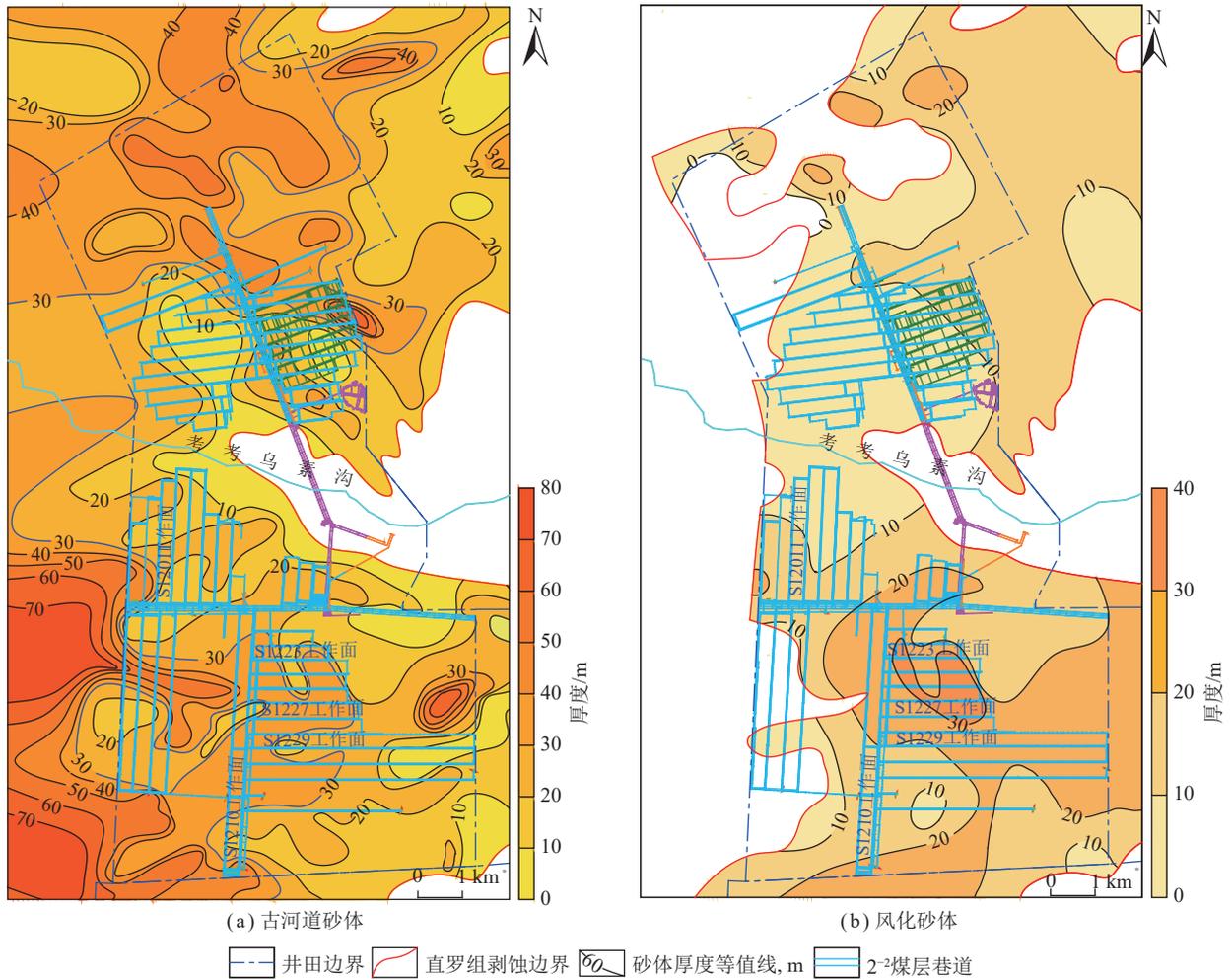


图 10 柠条塔井田直罗组下段古河道砂体、风化砂体厚度等值线

Fig.10 Contour lines of the thickness of the paleochannel sand bodies and weathered sand bodies in the lower section of the Zhiluo Formation in Ningtiaotaijiao Field

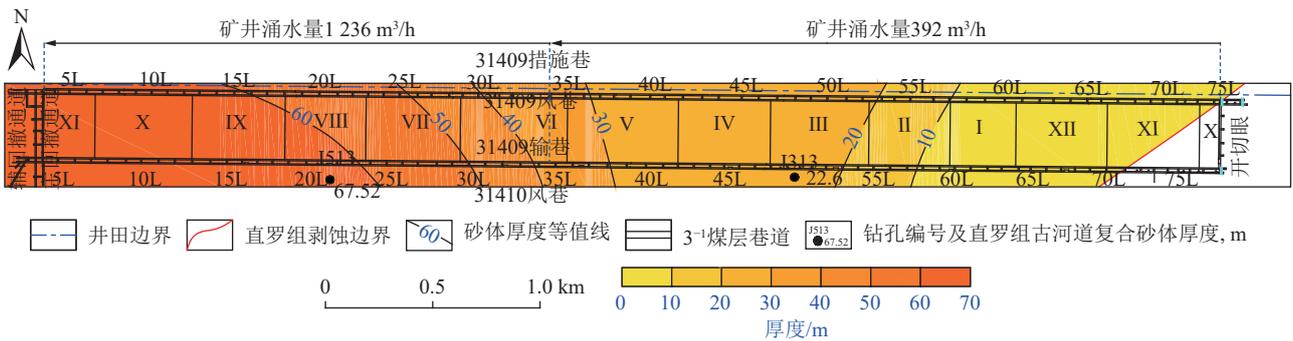


图 11 锦界煤矿 31409 工作面古河道砂体厚度等值线

Fig.11 Thickness contour of paleochannel composite sand bodies in 31409 working face of Jinjie Coal Mine

河道砂体的不同部位及其遭受风化厚度的不同, 矿井涌水量存在差异。结合研究区东部现阶段生产矿井涌水规律, 笔者总结出古河道砂体下生产矿井的3种最基本的矿井涌水模式(图12、13)。

(1) 强涌水模式。主要位于一级砂体分布区, 砂体厚度 ≥ 60 m, 以中、粗粒砂岩为主, 古河道砂体遭受风

化的厚度较大, 一般 ≥ 30 m, 部分区域古河道砂体全部风化, 风化程度强, 砂体的储水性能和渗透性极好(图12(a)), 尤其是在上部土层缺失区域, 第四系萨拉乌苏组与古河道砂体地下水水力联系密切, 古河道砂体补给和径流条件通畅, 矿井涌水量大。该种涌水模式主要分布在锦界井田北部、红柳林井田西区(图13)。

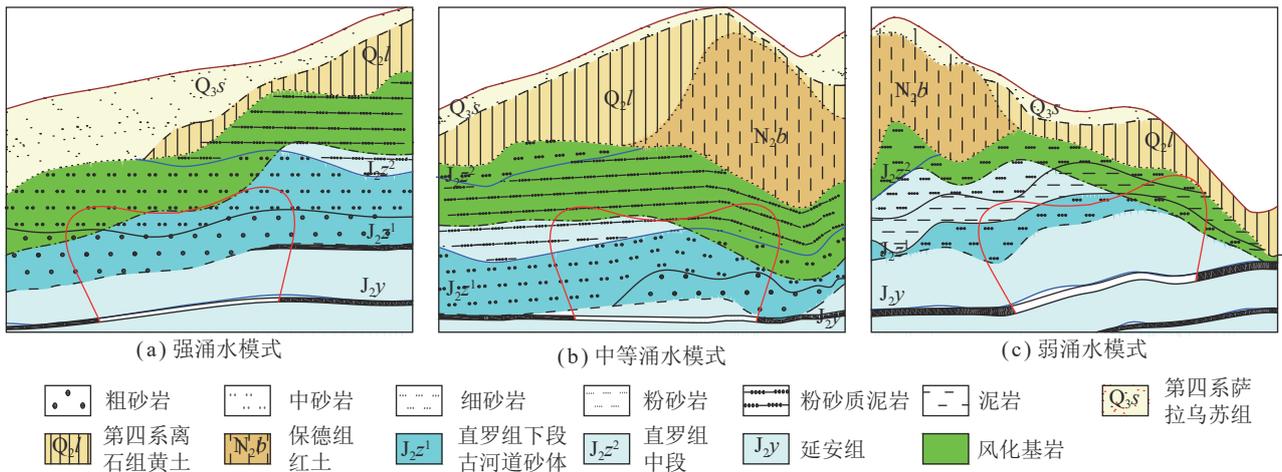


图 12 研究区东部古河道砂体下生产矿井涌水模式

Fig.12 Water inflow patterns of production mines under paleochannel sand bodies in the eastern part of the study area

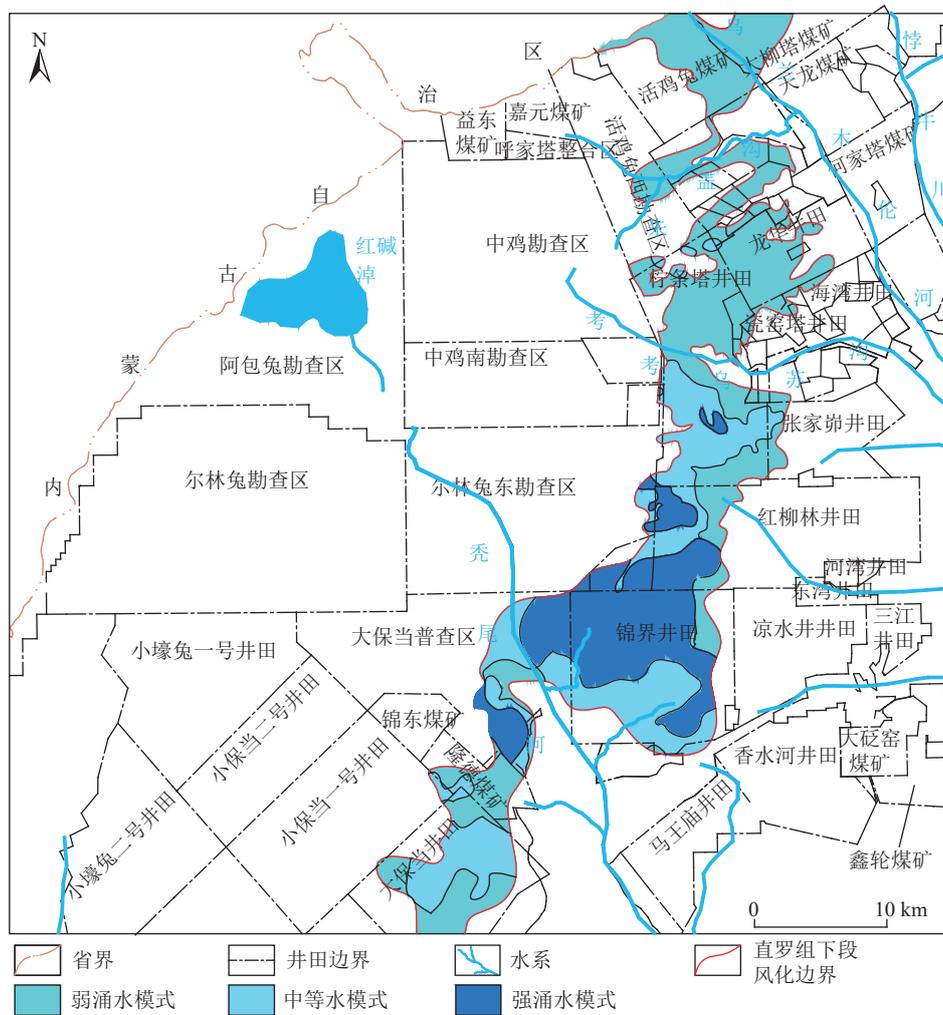


图 13 研究区东部古河道砂体下生产矿井涌水模式空间分布

Fig.13 Spatial distribution of water inflow patterns of production mines under paleochannel sand bodies in the eastern part of the study area

(2) 中等涌水模式。主要位于一级砂体的边缘部位或二级砂体区域。砂体厚度 30~60 m, 以中砂岩为

主, 粗砂岩局部发育, 风化砂体厚度一般 10~30 m (图 12(b))。砂体储水空间和渗透性相比主河道中心

位置有所减弱,但仍有较强的地下水赋存和运移能力,在局部风化砂体厚度较大的区域,往往会形成补给和径流较为通畅的强径流带,在侧向补给充分时,造成矿井涌水量剧增,甚至引发突水。该种涌水模式主要分布在一级砂体边缘部位的柠条塔井田南翼、隆德井田等,二级砂体区域柠条塔井田北翼等(图13)。

(3) 弱涌水模式。主要位于三级砂体区域,砂体厚度 $< 30\text{ m}$,岩性以细砂岩为主,常夹有粉砂岩和泥岩,风化砂体厚度一般 $< 10\text{ m}$ (图12(c))。由于砂体厚度薄,粒度较细,风化砂体厚度小,其储水性和渗透性较差,地下水的侧向补给和运移能力较弱,加之砂体上部土层阻隔,地下水的垂向补给能力较差,矿井涌水量较小。该种类型主要分布在研究区东北部的生产矿井(图13)。

4 结 论

(1) 鄂尔多斯盆地北部神府南区直罗组古河道冲刷带沿红碱淖—尔林兔—锦界一线发育,冲刷带内延安组第5段几乎被冲刷剥蚀殆尽,在局部地区延安组第4段也遭受了冲刷。根据砂分散体系分析和隔水岩组发育特征,将冲刷带内充填沉积的古河道砂体分为三级。

(2) 直罗组古河道砂体富水性的强弱主要受控于砂体规模、物性特征和风化作用,一级砂体(主河道)区域富水性强于二级砂体(分支河道)及三级砂体(三角洲间湾、分流间湾)区域,当砂体遭受风化后,其富水性将进一步增强。

(3) 基于不同尺度下砂体分级、风化砂体厚度与矿井涌水关系密切,提出了研究区东部现阶段古河道砂体下生产矿井3种最基本的涌水模式。强涌水模式,主要位于一级砂体分布区,风化砂体厚度一般 $\geq 30\text{ m}$ 。中等涌水模式,主要位于一级砂体的边缘或二级砂体区域,风化砂体厚度一般 $10\sim 30\text{ m}$ 。弱涌水模式,主要位于三级砂体区域,风化砂体厚度一般 $< 10\text{ m}$ 。

(4) 针对鄂尔多斯盆地北部以直罗组地下水为主要充水水源的连片分布的矿井涌水量较大矿井,建议从区域上查明直罗组古河道砂体空间展布规律及其与矿井涌水的关系,深入研究古河道砂体对地下水赋存和运移的控制机理,精准圈定古河道砂体富水区和强径流区,针对性的开展矿井水害防控工作。

参考文献(References):

[1] 范立民,迟宝锁,王宏科,等.鄂尔多斯盆地北部直罗组含水层研究进展与水害防治建议[J].煤炭学报,2022,47(10):3535-3546.
FAN Limin, CHI Baosuo, WANG Hongke, et al. Research progress

of aquifer of Zhiluo Formation in northern Ordos Basin and suggestions on water hazard prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3535-3546.

[2] 焦养泉,吴立群,荣辉,等.鄂尔多斯盆地直罗组聚煤规律及其对古气候和铀成矿环境的指示意义[J].煤炭学报,2021,46(7):2331-2345.
JIAO Yangquan, WU Liqun, RONG Hui, et al. Coal accumulation regularity of Zhiluo Formation and its indication to paleoclimate and uranium metallogenic environment, Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2331-2345.

[3] 朱强,李建国,俞初安,等.鄂尔多斯盆地塔然高勒地区直罗组上、下段的岩性-岩相特征及对铀成矿的差异性控制作用[J].地球学报,2019,40(3):456-468.
ZHU Qiang, LI Jianguo, YU Rengan, et al. Lithologic-lithographic characteristics of the upper and lower members of the Zhiluo Formation and their differential control of Uranium mineralization in the Tarangaole Area, Ordos Basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2019, 40(3): 456-468.

[4] 焦养泉,陈安平,王敏芳,等.鄂尔多斯盆地东北部直罗组底部砂体成因分析——砂岩型铀矿床预测的空间定位基础[J].沉积学报,2005,23(3):371-379.
JIAO Yangquan, CHEN Anping, WANG Minfang, et al. Genetic analysis of the bottom sandstone of Zhiluo Formation, northeastern Ordos Basin: Predictive base of spatial orientation of sandstone-type uranium deposit[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 371-379.

[5] JIAO Yangquan, WU Liqun, RONG Hui, et al. The relationship between Jurassic coal measures and sandstone-type uranium deposits in the northeastern Ordos basin, China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2016, 90(6): 2117-2132.

[6] 王皓,周振方,杨建,等.蒙陕接壤区典型煤层开采地下水系统扰动的定量表征[J].煤炭科学技术,2023,51(7):83-93.
WANG Hao, ZHOU Zhenfang, YANG Jian, et al. Quantitative characterization of the disturbance of groundwater system in typical coal seam mining in contiguous area of Inner Mongolia and Shaanxi[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 83-93.

[7] 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.

[8] 黄海鱼,丁湘,吴永辉,等.鄂尔多斯盆地北部中侏罗统沉积相特征及其对中深部矿井涌水量的影响[J].西北大学学报(自然科学版),2022,52(3):508-518.
HUANG Haiyu, DING Xiang, WU Yonghui, et al. Sedimentary facies characteristics of the Middle Jurassic in Northern Ordos Basin and their influence on water inflow in the middle and deep mines[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2022, 52(3): 508-518.

[9] 靳德武,刘基,许峰,等.榆神矿区浅埋煤层减水开采中预疏放标准确定方法[J].煤炭学报,2021,46(1):220-229.
JIN Dewu, LIU Ji, XU Feng, et al. Method of determining of pre-drainage standard in water-decrease mining of shallow seam in Yushen mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 220-229.

[10] 姬中奎.柠条塔矿S1210工作面突水条件分析[J].煤矿安全,2014,45(8):188-191.

- JI Zhongkui. Analysis on water inrush condition of S1210 working face in Ningtiaota Coal Mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2014, 45(8): 188–191.
- [11] 苗彦平, 蔚波, 姬中奎, 等. 侏罗纪浅埋煤层开采典型水害模式及分区[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(8): 75–82.
- MIAO Yanping, YU Bo, JI Zhongkui, et al. Typical model of water damage in Jurassic shallow coal seam mining and its zoning[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(8): 75–82.
- [12] 杨建, 刘洋, 刘基. 基于沉积控水的鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田防治水关键层研究[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(4): 34–37.
- YANG Jian, LIU Yang, LIU Ji. Study on key layer of water prevention and control in Ordos Basin Jurassic coalfield based on sedimentary water control theory[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(4): 34–37.
- [13] 梁向阳, 杨建, 曹志国. 呼吉尔特矿区矿井涌水特征及其沉积控制[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(1): 138–144.
- LIANG Xiangyang, YANG Jian, CAO Zhiguo. Characteristics and sedimental control of mine water outflow in Hujirt mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(1): 138–144.
- [14] 吴立群, 王建英, 杨帆, 等. 榆林地区北部侏罗纪古河道砂体与采煤涌(突)水关系分析[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(10): 3599–3609.
- WU Liqun, WANG Jianying, YANG Fan, et al. Relationship between Jurassic ancient channel sand body and coal mining water inrush in the north of Yulin area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3599–3609.
- [15] 陈丽. 东胜矿区侏罗系含水层富水性特征及其影响因素分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- CHEN Li. Analysis on characteristics of the water abundance of Jurassic aquifers of Dongsheng Mine[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [16] 孙魁, 范立民, 马万超, 等. 鄂尔多斯盆地北部直罗组地下水地球化学特征及其指示意义[J/OL]. *煤炭学报*: 1–16[2023–11–24]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0537>.
- SUN Kui, FAN Limin, MA Wanchao, et al. Geochemical characteristics of groundwater about Zhiluo Formation in the northern Ordos Basin and its indicative significance[J/OL]. *Journal of China Coal Society*: 1–16[2023–11–24]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0537>.
- [17] 梅傲霜, 曾一凡, 武强, 等. 西部矿区地下水系统水化学过程及其采动激励效应[J/OL]. *煤炭学报*: 1–17[2023–12–01]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0669>.
- MEI Aoshuang, ZENG Yifan, WU Qiang, et al. Hydrogeochemical processes of groundwater system and its mining-motivated effect in mining areas of Western China[J/OL]. *Journal of China Coal Society*: 1–17[2023–12–01]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0669>.
- [18] 范立民, 孙强, 马立强, 等. 论保水采煤技术体系[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 196–204.
- FAN Limin, SUN Qiang, MA Liqiang, et al. Study on the technological system of coal mining with water conservation[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 196–204.
- [19] 陕西省煤田地质勘探公司 185 队. 陕北早侏罗世含煤岩系及沉积环境[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1989.
- [20] 荣辉, 焦养泉, 高彬, 等. 神府南区中侏罗统直罗组古河道冲刷带的空间定位预测[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(10): 3561–3571.
- RONG Hui, JIAO Yangquan, GAO Bin, et al. Spatial location prediction of paleo-channel scouring zones of Middle Jurassic Zhiluo Formation in the southern Shenfu mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3561–3571.
- [21] 焦养泉, 王双明, 范立民, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪含煤岩系地下水系统关键要素与格架模型[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2411–2422.
- JIAO Yangquan, WANG Shuangming, FAN Limin, et al. Key elements and framework model of groundwater system in Jurassic coal measures of Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2411–2422.
- [22] 孙魁, 苗彦平, 陈小绳, 等. 鄂尔多斯盆地北部直罗组赋存特征及富水性[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(10): 3572–3598.
- SUN Kui, MIAO Yanping, CHEN Xiaosheng, et al. Occurrence characteristics and water abundance of Zhiluo Formation in northern Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3572–3598.