



# 黄河中游榆神府矿区采动含水层失水模式及保护技术

谢晓深 侯恩科 王双明 赵兵朝 龙天文 冯栋 侯鹏飞 张琦

## 引用本文：

谢晓深, 侯恩科, 王双明, 等. 黄河中游榆神府矿区采动含水层失水模式及保护技术[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 197–207.

XIE Xiaoshen, HOU Enke, WANG Shuangming. Syudy on water loss model and prediction technology of aquifer induced by coal mining in Yushenfu Mining Area in the middle reaches of the Yellow River[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 197–207.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0860>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 神东矿区煤炭开采对含水层破坏模式研究

Study on models of aquifer failure caused by coal mining in Shendong Mining Area

煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/034299ef-86f6-42e9-85e6-0d84cbbfa635>

#### 新近系含水层下厚煤层综放安全绿色开采及水资源清洁利用

Safe and green mining of thick coal seam under Neogene aquifer and clean utilization of water resources

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/755289a1-83c0-4de8-ad1c-baa211a8375b>

#### 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>

#### 基于分布式光纤的松散含水层失水沉降规律研究

Study on water loss settlement law of loose aquifer based on distributed optical fiber

煤炭科学技术. 2023, 51(10): 231–241 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1888>

#### 巨厚砂岩含水层下厚煤层综放减水开采技术

Water-reducing mining technology for fully-mechanized top-coal caving mining in thick coal seams under ultra-thick sandstone aquifer

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 88–95 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/49f9f7c1-2bd5-42a1-85ac-09ebc2c588a2>

#### 神南矿区煤炭绿色开采的水资源监测研究

Water resources monitoring of green coal mining in Shennan Mining Area

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 304–311 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.028>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

谢晓深,侯恩科,王双明,等.黄河中游榆神府矿区采动含水层失水模式及保护技术[J].煤炭科学技术,2023,51(12):197-207.

XIE Xiaoshen, HOU Enke, WANG Shuangming, et al. Syudy on water loss model and prediction technology of aquifer induced by coal mining in Yushenfu Mining Area in the middle reaches of the Yellow River[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 197-207.

## 黄河中游榆神府矿区采动含水层失水模式及保护技术

谢晓深<sup>1,2</sup>,侯恩科<sup>2,3</sup>,王双明<sup>2,3</sup>,赵兵朝<sup>1</sup>,龙天文<sup>2,3</sup>,冯栋<sup>2,3</sup>,侯鹏飞<sup>2,3</sup>,张琦<sup>3,4</sup>

(1. 西安科技大学能源学院,陕西西安 710054; 2. 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室,陕西西安 710054; 3. 西安科技大学地质与环境学院,陕西西安 710054; 4. 陕煤集团神木柠条塔矿业有限公司,陕西榆林 719300)

**摘要:**“煤-水”矛盾已成为制约榆神府矿区煤炭安全高效绿色开采的主要因素。为缓解区内煤炭开采与水资源保护之间矛盾,切实保护水资源和生态环境,以榆神府矿区内典型煤矿为例,研究揭示了煤水赋存特点,构建了采动含水层失水模式,初步探讨了水资源保护整体思路和技术。研究成果表明:榆神府矿区内存在地表水和地下水2大类水资源。地表水以海子、地表径流以及泉的形式赋存,地下水则有萨拉乌苏组潜水、烧变岩水和风化基岩水3种重要类型。按照含水层与导水裂隙带的位置关系,将其分为低位含水层和高位含水层2类。低位含水层失水模式为导通漏失型,高位含水层存在非导通垂向渗失和渗流溢出蒸发散失型2种失水模式,前者发生于高位承压含水层中,后者则主要是高位潜水含水层的失水模式。低位含水层可通过导水裂隙带发育高度控制技术、采后顶板注浆加固技术实现水资源保护,高位含水层可通过人工隔水层再造、离层注浆以及协调开采技术实现水资源保护。对于无法实施原位保护流入采空区的水则可通过地下水库存储、净化循环利用和深部回灌等矿井水综合利用技术处理间接实现水资源保护。

**关键词:**煤炭开采;含水层;失水模式;水资源保护;榆神府矿区

中图分类号:TD823.8 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2023)12-0197-11

## Syudy on water loss model and prediction technology of aquifer induced by coal mining in Yushenfu Mining Area in the middle reaches of the Yellow River

XIE Xiaoshen<sup>1,2</sup>, HOU Enke<sup>2,3</sup>, WANG Shuangming<sup>2,3</sup>, ZHAO Bingchao<sup>1</sup>, LONG Tianwen<sup>2,3</sup>,  
FENG Dong<sup>2,3</sup>, HOU Pengfei<sup>2,3</sup>, ZHANG Qi<sup>3,4</sup>

(1. College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an 710054 China; 3. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 4. Shenmu Ningtiaota Coal Mining Company Ltd., Shaanxi Coal and Chemical Industry Group Co., Ltd., Yulin 719300, China)

**Abstract:** The contradiction between coal and water has become the main factor restricting the safe, efficient and green mining of coal in Yushenfu Mining Area. In order to alleviate the contradiction and effectively protect water resources and ecological environment, a typical coal mine in Yushenfu Mining Area is taken as an example. This research reveals the characteristics of coal water occurrence, establishes the water loss model of mining-influenced aquifer, and preliminarily explores the overall strategy and technology of water resources protection. The study indicates that there are two types of water resources in the Yushenfu Mining Area: surface water and groundwater. The surface water exists in the form of lakes, surface runoff and springs, while groundwater includes the Sa'la Wusu Formation confined water, metamorphic rock water, and weathered bedrock water. Based on the relationship between aquifers and water-conducting fracture zones, two types of aquifers are identified: low-level aquifer and high-level aquifer. The water loss model for low-level aquifers is characterized by leakage through connecting pathways. For high-level aquifers, there are two water loss models: non-conductive vertical seepage

收稿日期:2023-06-11 责任编辑:周子博 DOI:10.12438/cst.2023-0860

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(42177174);中央引导地方科技创新专项资助项目(2020ZY-JC-03);陕西省博士后科研资助项目(2023BSHEDZZ297)

作者简介:谢晓深(1992—),男,安徽萧县人,博士后, E-mail: 957184158@qq.com

通讯作者:侯恩科(1963—),男,陕西扶风人,教授,博士生导师, E-mail: houek@xust.edu.cn

and seepage overflow evaporation. The former occurs in high-pressure confined aquifers, while the latter is mainly for high-level phreatic aquifers. For low-level aquifers, protection involves the development of height-controlled technology in water-conducting fracture zones and post-mining roof grouting reinforcement technology. For high-level aquifers, protection measures include the construction of artificial water barriers, separation grouting, and coordinated mining technology. In cases where water cannot be protected in situ and flows into mined-out areas, comprehensive water utilization technologies such as underground water storage, purification, recycling, and deep injection can be employed to indirectly achieve water resource protection in the mining area.

**Key words:** coal mining; aquifer; water loss model; water resources protection; Yushenfu Mining Area

## 0 引言

陕北煤炭基地位于黄河中游是黄河流域九大煤炭基地之一,也是陕西重要的原煤产地<sup>[1-3]</sup>。然而,干旱-半干旱气候使得该地区地下水资源贫乏,生态环境脆弱,加剧了“煤-水-生态”之间的矛盾,制约了煤炭产业的高质量发展<sup>[4-6]</sup>。

榆神府矿区是陕北煤炭基地的一个典型煤矿区,煤炭开发利用程度高。区内萨拉乌苏组沙土层、烧变岩以及风化基岩中蕴含的地下水资源是工农业生产、居民生活的水源,也是生态环境改善的重要基础<sup>[7]</sup>。然而,大规模、高强度的煤炭开发导致水资源量减少、水环境变差,给区内水资源和生态环境带来了一定的负面影响<sup>[8-10]</sup>。为缓解该区采煤与水资源之间相互制约的矛盾,国内外众多学者开展了有关“保水采煤”的研究,在采煤对含水层扰动影响、含水层失水量以及保水采煤分区方面取得了较丰富的研究成果。针对采煤对含水层的扰动影响,范立民等<sup>[5]</sup>通过对比分析榆神府矿区开采前和开采后地下水水位变化,发现煤炭开采的25年间矿区北部浅埋煤层区潜水位下降幅度最大达15 m,部分区域已枯竭,揭示了煤炭开采对地下水的负面影响,认为积极开展“保水采煤”研究能够保护潜水资源;侯恩科等<sup>[11-13]</sup>揭示了榆神府矿区浅埋煤层开采烧变岩含水层和风化基岩含水层渗流场变化规律,划分了矿井保护等级,拓展了“保水采煤”的概念,并在后续研究中,发现了地下水位“先下降后回升至恢复”的动态变化规律<sup>[15]</sup>,揭示了地下水资源自修复特征。为含水层失水途径、失水量的研究奠定了基础。王双明等<sup>[14-15]</sup>研究阐明了生态脆弱矿区地下水位埋深与植被生长之间的耦合关系,确定了潜水的生态价值;揭示了中深部煤层开采对潜水的影响。

针对含水层失水量,靳德武等<sup>[16]</sup>揭示了浅埋煤层开采顶板含水层水量损失的动力学过程及特征;赵春虎等<sup>[17]</sup>重点分析了榆神矿区浅埋、中深埋以及深埋煤层含水层涌水模式和涌水规律。侯恩科等<sup>[18]</sup>针对烧变岩含水层提出了采动水量损失预计方法。

在保水采煤分区研究方面,范立民等<sup>[19]</sup>提出了“五图-三带-两分区”保水采煤技术适用性分区方法;马立强等<sup>[20]</sup>以榆神府矿区中部为研究区,提出了以导水裂隙带发育高度和保护层有效厚度为分区阈值的保水采煤分区方法。李文平等<sup>[21]</sup>以导水裂隙带和残余隔水层隔水性能等指标,建立了4种采煤环境工程模式,并对榆神矿区保水采煤矿井等级类型进行了划分。XU等<sup>[22]</sup>利用层次分析和模糊综合评价方法,对榆神矿区水资源承载能力进行了评价分区。LIU等<sup>[23]</sup>以榆神府矿区203个钻孔为基础数据,构建了采煤潜水资源影响分区方法,并将榆神府矿区采煤对潜水的影响程度划分严重、中等。轻微和无漏失区。

上述研究为解决榆神府矿区煤炭开采与水资源保护相制约的问题提供了丰富的理论和技术指导。但对不同条件下采煤含水层的失水模式没有开展细致研究和归纳总结,含水层失水途径和特征尚未完全明晰,致使水资源保护途径和技术针对性稍弱。为此,以榆神府矿区为研究区,通过分析含水层空间位置,建立了低位、高位含水层失水模式,明确了含水层失水途径和去向,揭示了含水层失水特征和危害性,初步探讨了榆神府矿区水资源保护整体思路。

## 1 研究区自然地理及水资源特点

### 1.1 研究区自然地理及开采概况

榆神府矿区跨榆林榆阳区、神木县和府谷县,主要包括神木北部矿区(含神东陕西部分)、新民矿区、榆神矿区,面积为8369 km<sup>2</sup>(图1)。区内主要由黄土沟壑和风沙滩地2种地貌。黄土沟壑主要分布在东北部(神木北部矿区、新民矿区)和南部区域(榆神一期部分区域),区内地形起伏多变,沟壑林立;风沙滩地主要分布在矿区中部区域,包括榆神一期、二期、三期以及四期部分区域,地形平坦,地表被第四系风积沙覆盖。矿区处在黄河中游,有榆溪河、秃尾河和窟野河等主要河流,其中,窟野河和秃尾河属黄河一级支流,榆溪河为无定河一级支流,均属黄河水

系。此外,各河流均有次一级支流,径流量与季节密切相关。

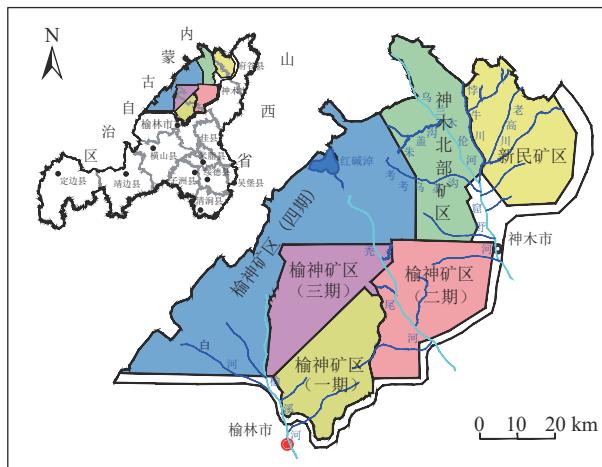


图 1 榆神府矿区位置

Fig.1 Location of Yushenfu Mining Area

区内煤炭资源储量丰富,开采条件相对简单,主采侏罗系延安组煤层,由北至南煤层开采深度逐渐增加,开采规模大、强度较高。

## 1.2 水资源分类

按照水资源赋存状态,将区内水资源分地表水和地下水2大类。地表水以地表径流、地表海子(水泡子)以及泉的形式分布。地表径流包括常年性流水和季节性流水,主要发育在地形起伏较大的黄土沟壑区。地表海子多发育在蕴含丰富潜水资源的风沙滩地的低洼地带。泉水则是地下水出露地表形成,一般发育于浅埋深煤层开采区域。

区内地下水包括潜水和承压水2类,潜水主要赋存于第四系萨拉乌苏组沙土层内,下与离石黄土层、保德红土层和风化基岩层不整合接触,接收大气降水补给,主要分布在矿区中部和东部。烧变岩含水层和风化基岩含水层是区内典型的2个承压含水层。烧变岩是原岩受到煤层自燃灼烧形成的孔隙发育且具有较强储水能力的特殊岩石,按照烧结程度分为类熔岩、烧结岩和烘烤岩3类,储水能力依次递减<sup>[24]</sup>。烧变岩含水层主要分布于榆神府矿区北部和西部。风化基岩含水层是一个独立、重要的含水层,于区内大面积分布,富水性与基岩风化程度、古地形、形成时代以及岩性组合等均有关系,一般来讲风化程度越强、富水性越好。

## 1.3 “煤-水”赋存关系及其特点

研究区内“煤-水”总体呈煤层在下,含水层在上的空间赋存关系,两者垂距变化大,最小约为3.14 m,

最大超过400 m。潜水含水层、风化基岩含水层以及烧变岩含水层垂向关系如图2所示。红土缺失区域内,萨拉乌苏含水层与风化基岩含水层直接接触,水位高者补给水位低者。风化基岩含水层下存在烧变岩含水层,两者相互补给。

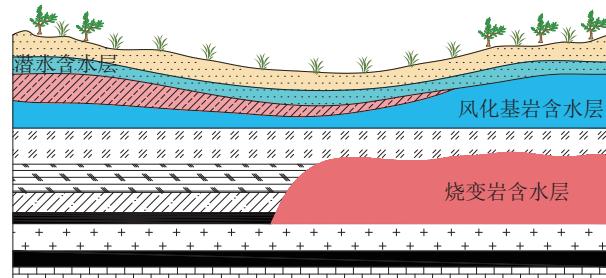


图 2 榆神府矿区地下水资源垂向关系示意

Fig.2 Vertical relationship of groundwater resources in Yushenfu Mining Area

在考虑自然赋存和采动附加损害的基础上,榆神府矿区水资源特点可简要概括为“先天不足-后天有损”。

“先天不足”是指榆神府矿区水资源本身相对贫乏,生态环境脆弱。降雨量相对较少,年平均降雨量为400 mm,近年来有所增加,但依旧不超过600 mm,人均资源量远低于东部地区<sup>[15]</sup>。“后天有损”则是指地下煤炭的采出或多或少对区内水资源造成了一定的损害。特别是,采煤形成的导水裂隙带会导致其发育范围以内的地下水和地表水流入矿井,水资源赋存量减少,局部水流场发生改变(图3)。

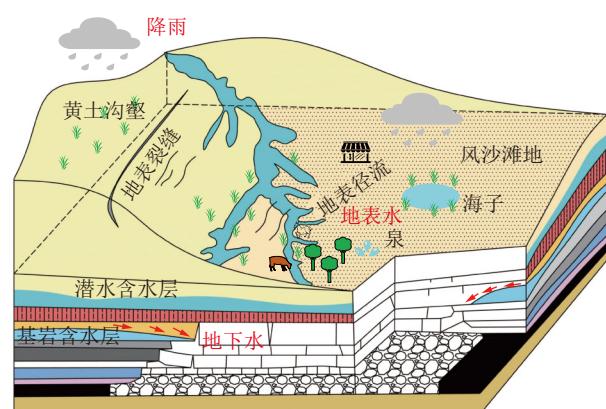


图 3 煤炭开采与水资源的关系示意

Fig.3 Schematic of the relationship between coal mining and water resources

## 2 煤炭开采含水层失水模式

为全面分析煤层开采过程中含水层失水模式,笔者以含水层与煤层之间的相对位置和导水裂隙带

最大发育高度为判据,将含水层分为低位含水层和高位含水层两类,分别构建两者的采动失水模式。

低位含水层判据:  $0 \leq h \leq H_{li}$ ,

高位含水层判据:  $h > H_{li}$ ,

其中,  $h$  为含水层底界至煤层顶界的垂直距离,  $H_{li}$  为导水裂隙带最大发育高度。

分别以榆神府矿区柠条塔煤矿和小保当一号煤矿为例,探讨低位含水层和高位含水层失水特点和失水模式。

## 2.1 低位含水层失水模式

1) 工作面开采及水文地质概况。柠条塔煤矿 S1210 工作面为南翼首采工作面,长×宽为 5 924 m×300 m,主采 2<sup>2</sup> 煤层,采深约 135 m,平均采厚 4.4 m,于 2011 年 5 月开始回采,推进至 61 m 时发生涌水,导致工作面无法生产。经过治理后于 2013 年 4 月另开切眼进行回采,于 2014 年 2 月回采结束,共回采 1 052 m(图 4)。



图 4 柠条塔煤矿 S1210 工作面概况

Fig.4 General situation of S1210 working face in Ningtiao Coal Mine

上覆岩层有正常基岩、风化基岩、红土层和风积沙层,其中风化基岩承压含水层为该工作面主要含水层。工作面内无断层、褶皱等构造。以工作面风化基岩水文孔揭露的资料来看,风化基岩含水层厚度约 15.10 m,底界距离煤层顶界约 42.60 m。含水层全区分布,侧向补给相对充分。

2) 含水层类型。柠条塔煤矿实测裂采比为 26.46~27.30,依此计算,S1210 工作面导水裂隙带高度为 116.42~120.12 m。根据风化基岩含水层位置可知,导水裂隙带贯穿风化基岩含水层,满足低位含水层判据。因此,S1210 工作面风化基岩含水层属于低位含水层(图 5)。

3) 低位含水层失水模式。S1210 工作面采动过程中,SK11 孔风化基岩水位和工作面涌水量变化如图 6 所示。风化基岩水位呈“先下降后回升”的特点,但未恢复至初始水位,水位最大降深约为 70.5 m,稳定降深约为 50.8 m。

2011-05-30—2012-02-11 工作面涌水量监测数据显示,当工作面回采 61 m(2011 年 5 月 30 日)时,顶板初次来压,同时出现涌水,最大涌水量达 1 157 m<sup>3</sup>/h,

平均涌水量 774 m<sup>3</sup>/h。结合风化基岩水位变化和导水裂隙带发育高度可以推断出,风化基岩水沿着导水裂隙涌入采空区,成为了工作面直接充水水源。

由上述内容可知,低位含水层位于导水裂隙带内,含水层被导水裂隙导通或者贯穿。因此,低位含水层失水模式为导通漏失型失水(图 7)。该模式下,含水层受损方式为垂向导通,主要是采后导水裂隙导通含水层造成的。此外,理论上在一些烧变岩含水层赋存区还存在侧向导通的受损方式,一般是巷道掘进过程中侧向导通了同煤层自燃形成的烧变岩含水层。

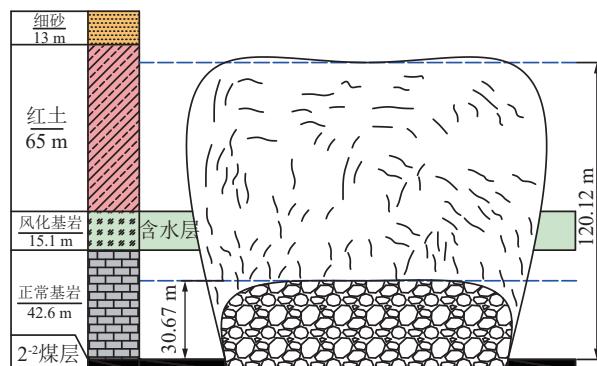


图 5 风化基岩含水层位置与导水裂隙带高度关系

Fig.5 Relationship between the position of aquifer in weathered bedrock and height of water diversion fracture zone

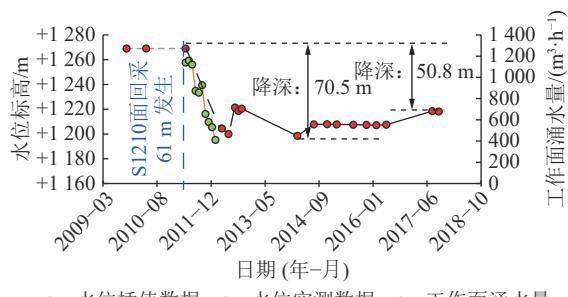


图 6 SK11 孔风化基岩水位变化及工作面涌水量曲线

Fig.6 Water level variation curve of weathered bedrock aquifer and water inflow curve of working face

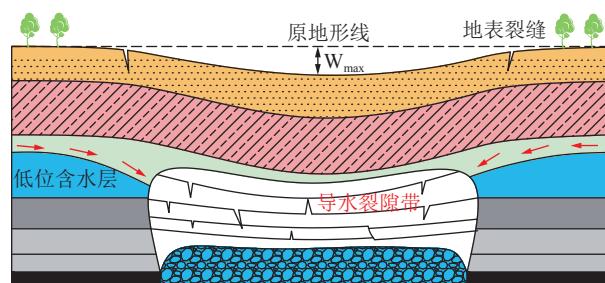


图 7 低位含水层导通漏失型失水模式

Fig.7 Water loss model of conduction and leakage in low aquifer

导通漏失型失水模式特点是:①含水层结构受到直接损害,自然修复难度大;②含水层水位下降明显,降深大,无法恢复至初始水位;③含水层水成为工作面直接充水水源,水资源量减少,工作面涌水量增大;④造成的危害性大,严重时造成水资源枯竭,威胁井下安全。

## 2.2 高位含水层失水模式

1) 工作面开采及水文地质概况。112201工作面是小保当一号煤矿首采面,长×宽约为4 600×350 m,开采<sup>2</sup>煤层,煤层平均厚度为5.8 m,平均埋藏深度为302 m。工作面内无断层、褶皱等构造。工作面于2018年10月开采,至2019年12月结束(图8)。

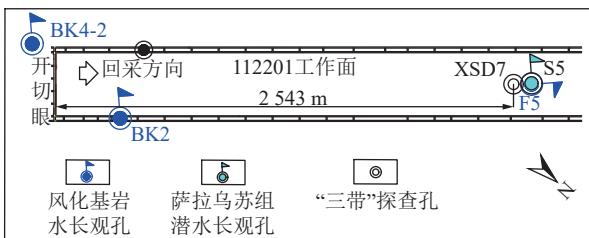


图8 小保当一号煤矿112201工作面概况

Fig.8 General situation of 112201 working face in No.1 Coal Mine of Xiaobaodang

煤层上方有风化基岩承压含水层和萨拉乌苏组潜水含水层,两含水层之间存在平均厚度65 m的红土层。风化基岩全区分布,侧向补给充分;潜水含水层分布局限,侧向补给不充分。工作面内距开切眼2 643 m处有F5水文长观孔和S5水文长观孔,分别监测风化基岩承压含水层和萨拉乌苏组潜水含水层水位。工作面于2019年5月30日回采至F5和S5孔正下方。

2) 含水层类型。由工作面中部XSD7“三带”探查孔揭露的资料可以看出,<sup>2</sup>煤层开采后,导水裂隙带发育高度为157.39 m,而风化基岩底界距煤层顶界的垂直距离为214.4 m,风化基岩底界与距离导水裂隙带顶界的垂直距离为57.01 m,潜水含水层底界距离导水裂隙带顶界的垂直距离为141.71 m。因此,风化基岩含水层和潜水含水层均属于高位含水层。风化基岩含水层属于补给充分的高位承压含水层,潜水含水层属于补给不充分的高位潜水含水层(图9)。

3) 高位承压含水层失水模式。图10是112201工作面内距离XSD7孔前方100 m的F5孔风化基岩含水层水位变化曲线。除却抽水试验影响可以看出,采动过程中风化基岩水位表现出“先下降后回升”的动态变化,在侧向补给充分的条件下可恢复至初始水位;

含水层水没有成为工作面直接充水水源,水资源损失量小;④造成的危害性小,既不会造成水资源枯竭也不会威胁井下生产。

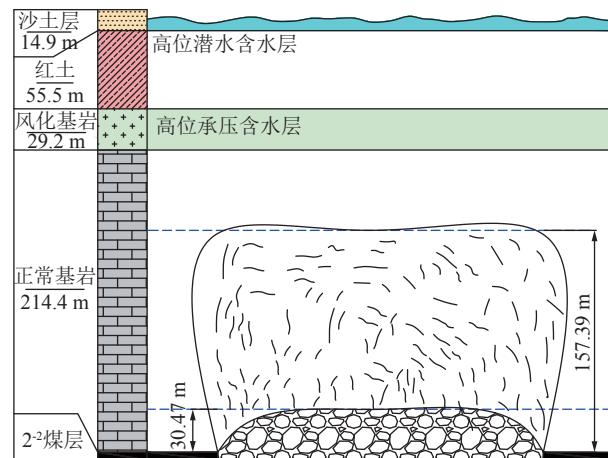


图9 XSD7孔含水层位置及导水裂隙带高度关系

Fig.9 Relationship between aquifer location of XSD7 hole and height of water diversion fracture zone

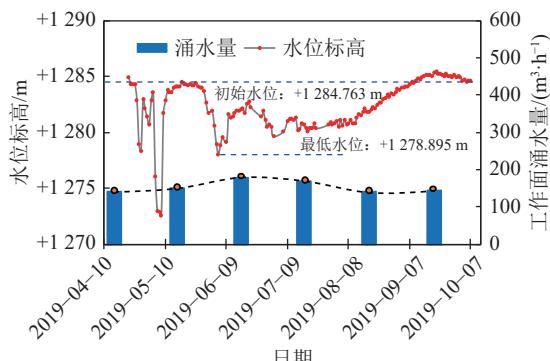


图10 F5孔风化基岩水位与工作面涌水量关系

Fig.10 Relationship between water level of weathered bedrock and water gushing from working face in hole F5

由工作面涌水量数据可知,2019年4月至9月,工作面涌水量分别为140.27、148.76、179.27、170.16、140.52、145.23 m<sup>3</sup>/h,无明显变化。风化基岩水位动态变化与工作面涌水量之间无明显耦合关系,表明采动过程中风化基岩水没有流入井下。

结合导水裂隙发育高度、水位变化以及工作面涌水量变化特征,笔者认为高位承压含水层失水为非导通垂向渗失型(图11),该模式下,含水层通过垂向下渗失水。特点是:①含水层没有受到直接损害、结构相对完整;②含水层水位表现出“先下降后回升”的动态变化,在侧向补给充分的条件下可恢复至初始水位;③含水层水没有成为工作面直接充水水源,水资源损失量小;④造成的危害性小,既不会造成水资源枯竭也不会威胁井下生产。

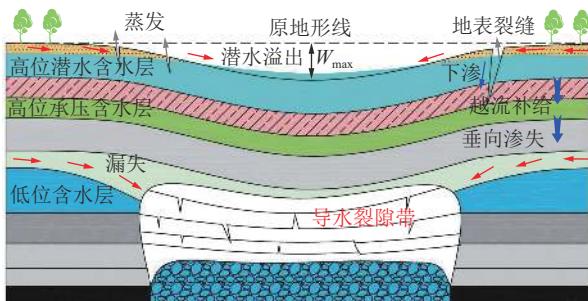


图 11 高位含水层失水模式

Fig.11 Water loss model of high aquifer

4)高位潜水含水层失水模式。图 12 是 112201 工作面 S5 孔潜水位变化与工作面涌水量关系。从图中可以看出,高位潜水含水层水位也表现出“先下降后回升”的变化规律,但由于侧向补给缺乏,水位未能恢复至初始水位。无明显突变的工作面涌水量数据表明潜水没有漏失入井下。



图 12 S5 孔潜水位与工作面涌水量关系

Fig.12 Relationship between groundwater level in hole S5 and water inflow in working face

侯恩科等<sup>[15]</sup>对小保当一号煤矿 112201 工作面潜水含水层水位动态变化和未恢复的原因进行了详细分析,认为采动地表下沉造成了采空区前方和后方水力坡度的变化,使得潜水加速渗流,于低洼处出露补给地表水进而蒸发散失。此外,潜水沿地表裂隙垂向下渗和越流补给也是潜水失水的主要途径。

综上,笔者构建了高位潜水含水层失水模型。高位潜水含水层主要是渗流溢出蒸发型失水(图 10)。该模式下,含水层有垂向渗失,越流补给和溢出蒸发三种失水方式。潜水垂向渗失的途径是贯穿潜水含水层的地表裂隙;潜水越流补给则是下伏承压含水层失水,潜水越过隔水层补给承压水造成的;潜水的溢出蒸发则是指在补给充分的高潜水位区域,采动附加的地表下沉使得潜水出露地表,进而蒸发散失。

高位潜水含水层渗流蒸发型失水特点是:①垂

向渗失是潜水含水层结构受到直接损害造成的,但会随着地表裂隙的自修复和自然修复而愈合;②越流补给造成的水资源量受控于下伏承压含水层水位变化、越流补给时间和隔水层渗透性;③溢出蒸发则与地表下沉量和潜水埋深有关,只有当地表下沉超过潜水埋深时潜水才会溢出地表成湖,进而蒸发散失;④造成危害性较小,不会威胁井下生产。

榆神矿区中部某矿在开采过程中就局部区域存在高位潜水溢出蒸发散失现象(图 13),验证了高位潜水含水层失水模式的存在。



图 13 潜水溢出地表蒸发散失

Fig.13 Diving overflow surface evaporation loss photos

### 3 含水层保护技术

#### 3.1 低位含水层保护技术

从上述 2.1 节中可以看出,煤炭开采主要是通过导水裂隙对低位含水层产生影响,且对含水层影响大。因此,控制导水裂隙带发育高度和封堵导水裂隙是保护低位含水层的两个主要途径。

##### 3.1.1 导水裂隙带发育高度控制技术

1)限高开采技术。导水裂隙带发育高度与采厚密切相关。从图 14 可以看出榆神府矿区导水裂隙带发育高度与采厚呈近似的对数关系,函数关系为: $y = -324.10 + 195\ln(x + 5.01)$ ,  $R^2 = 0.95$ 。因此,降低采高能有效抑制导水裂隙带发育高度。

2)充填开采技术。充填开采是以合适的材料充

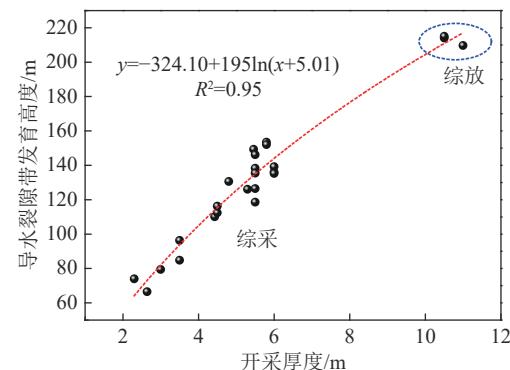


图 14 导水裂隙带发育高度与采厚的关系

Fig.14 Relationship between height of water fracture zone and mining thickness

填采空区实现控制导水裂隙带发育高度, 减沉、矿压弱化的目的, 进而达到保护含水层的开采技术<sup>[17]</sup>。从图 15 中可看出, 采空区充填后上覆岩体支撑体系由“煤壁-液压支架-采空区垮落碎胀矸石”转化为“煤壁-充填采煤液压支架-充填体”组成<sup>[25]</sup>。充填体从回采起始就限制了上覆岩体的活动空间, 基本顶不会发生周期性破断, 从根本上控制了导水裂隙带发育。

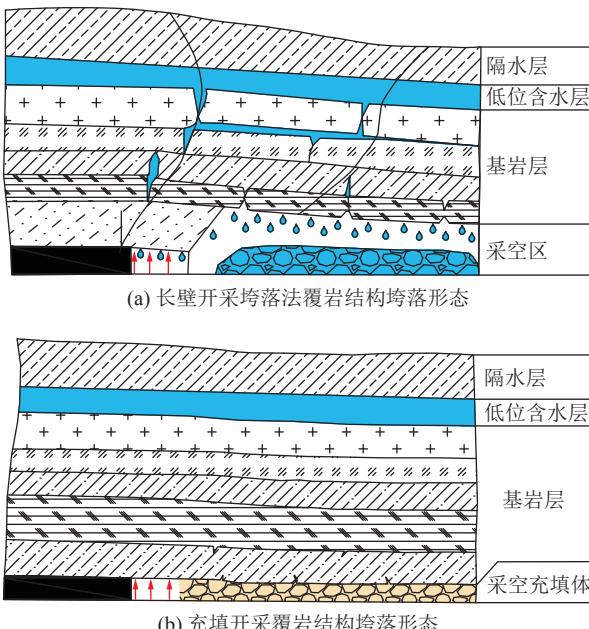


图 15 垮落法和充填开采覆岩垮落形态

Fig.15 Caving method and overlying rock caving pattern in backfilling mining

3) 顶板预裂关键层改性技术。以往研究表明上覆岩体关键层位置与导水裂隙带发育高度密切相关。一般情况下, 当覆岩主关键层与煤层距离较近时, 顶板导水裂隙带发育高度偏大<sup>[26]</sup>。为此, 近年来, 有学者提出通过顶板预裂技术对关键层性质弱化, 使覆岩主关键层位置上移, 继而达到削弱导水裂隙带发育高度, 保护含水层的目的<sup>[27-28]</sup>。技术原理如图 16 所示。

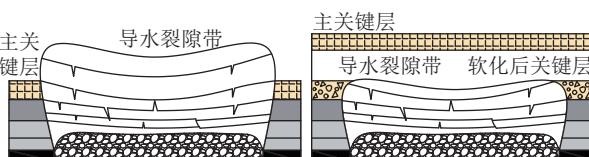


图 16 顶板预裂关键层改性技术原理

Fig.16 Technical principle of modification of key layer of roof pre-splitting

4) 开采参数优化。工作面开采参数也是影响导水裂隙带发育高度的因素。以榆神府矿区内小保当一号煤矿的 112201 工作面为工程背景, 对其进行开

采参数优化数值模拟试验, 结果表明: 当其他开采条件相同时, 适当减小工作面宽度, 增加工作面区段煤柱宽度都有利于抑制导水裂隙带发育高度, 从图 17a、17b 可以看出, 当工作面宽度由 300 m 减小至 270 m 时, 导水裂隙带发育高度减小了 12 m。图 17c、17d 表明当区段煤柱由 35 m 增加至 40 m 时, 导水裂隙带发育高度减小了 9 m。

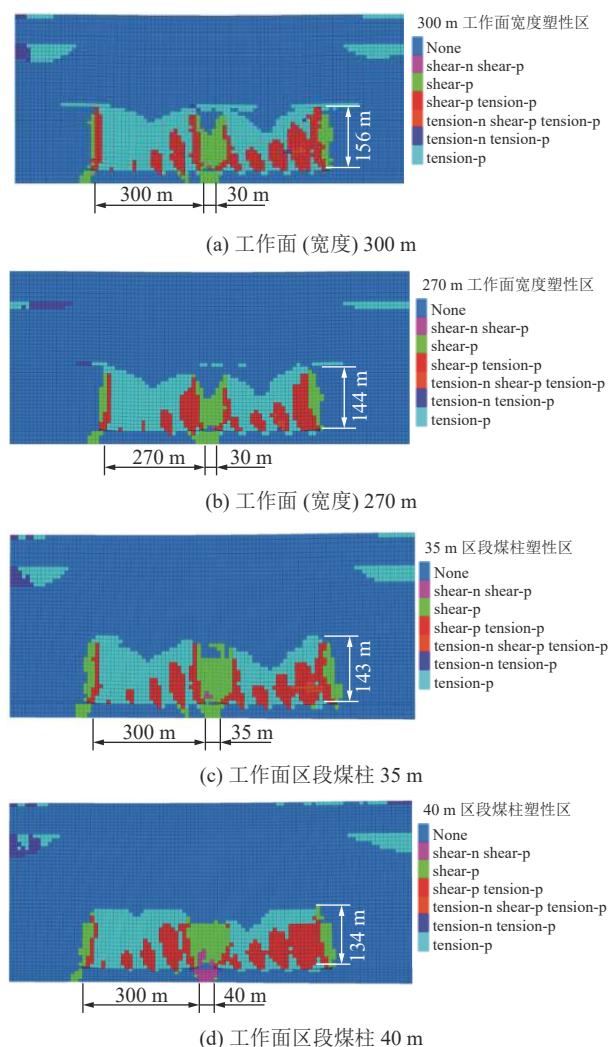


图 17 开采参数对导高的影响

Fig.17 Influence of mining parameters on guide height

就榆神府矿区高强度、大规模的开采而言, 特别是部分正尝试采用超长开采(工作面倾向长度 420~450 m)和小煤柱开采工艺回采煤层的矿井, 增大煤柱宽度和减小工作面宽度的导高控制方法不切合实际且效果也欠佳。

因此, 在采用导高控制技术实现低位含水层保护时, 应结合矿井实际开采和水资源保护情况, 选择符合实际且效果较佳的导高控制技术。

### 3.1.2 采后顶板注浆加固封堵技术

采后顶板注浆加固封堵技术的原理是利用钻孔将注

浆材料注入导水裂隙带适当位置,对导水裂隙进行封堵,减小含水层水资源漏失量,达到消除安全威胁,保护低位含水层的目的(图18)。

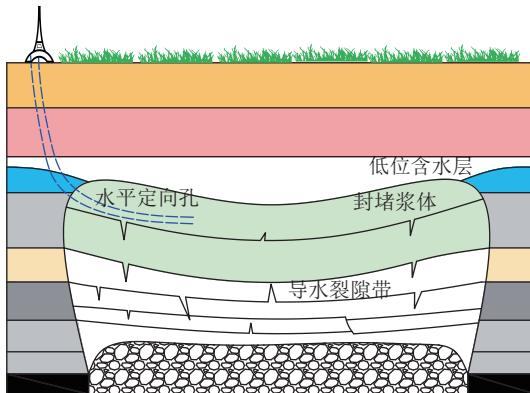


图18 顶板注浆加固封堵技术

Fig.18 Roof grouting reinforcement and plugging technology

该技术难点在于选取注浆封堵位置和注浆材料。注浆位置应处在含水层下方,导水裂隙相对发育的位置能够满足浆液扩散要求,但要避免宽大裂缝造成的浆液漏失。此外,注浆材料不仅要具有扩散性,而且要具有隔水性。该技术的适用条件相对苛刻,适用于低位含水层被导水裂隙带上方小裂隙导通的情况。对于被导水裂隙贯穿或导水裂隙带中下部导通的低位含水层而言,实现水资源保护的难度较大,难以起到有效作用。

陕西彬长高家堡煤矿层采用水泥浆、黄土和粉煤灰等作为注浆材料,利用水平钻孔和对洛河组含水层下导水裂隙带上段的小裂隙进行注浆封堵,效果相对较好<sup>[29]</sup>。为深入研究顶板注浆加固封堵技术和推广奠定了基础。

### 3.2 高位含水层保护技术

从上述2.2节内容可知,高位含水层的失水与岩体渗透性质、裂隙以及地表下沉等有关。增强高位含水层下方岩体隔水性能,减小过水能力,控制裂隙发育和减小地表下沉均是高位含水层的保护途径。

#### 3.2.1 人工隔水层再造技术

人工隔水层再造技术<sup>[30]</sup>是利用水平孔钻探、预裂和注浆技术对高位含水层以下导水裂隙带顶界以上的岩层进行改造,增大岩层的隔水性能,减小高位含水层的垂向渗失量。技术原理如图19所示。技术施工为:钻探-预(压)裂-注浆。预裂的作用是在岩层中产生压裂缝,为浆体提供扩散空间。注浆材料可以选择黄土、红土、膨润土等具有良好隔水性能的软材料,有利于增加岩体隔水性能。

该技术需在工作面回采前施工,难点在于导水

裂隙带最大发育高度的预测。目前,该技术尚无工程实例。

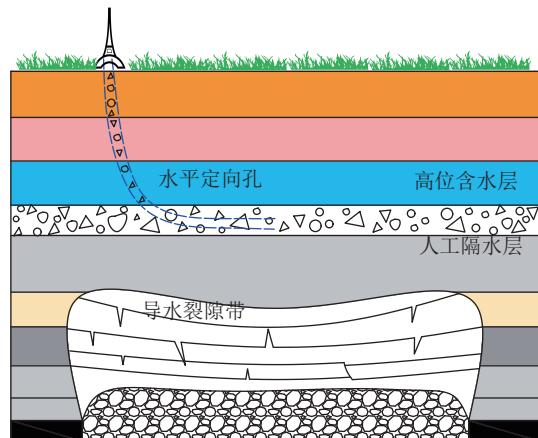


图19 人工隔水层再造技术示意

Fig.19 Technical indication of artificial aquifer reconstruction

#### 3.2.2 离层注浆减沉技术

离层注浆是近年来常用的一种控制地表下沉保护地表建(构)筑体的技术。其原理是采用钻孔对下伏岩层中采动形成的离层空间进行注浆充填,达到支撑岩体,减缓下沉的作用,进而实现建(构)筑体的保护。同样,该技术也可以通过减沉控制地表裂隙发育,达到减小高位含水层水位下降,削弱渗流场变化,防治潜水溢出的目的,继而实现高位潜水含水层的保护(图20)。

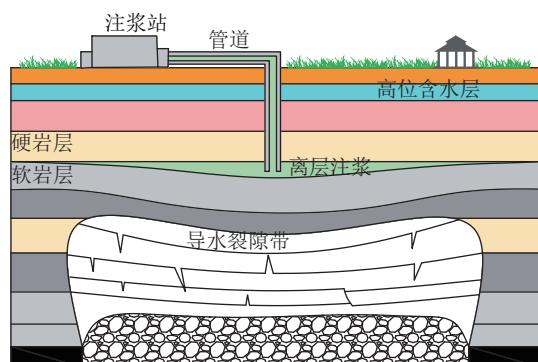


图20 离层注浆减沉示意

Fig.20 A hint of reducing subsidence by separated layer grouting

内蒙古克庆煤矿利用离层注浆技术实现了地表铁路环线下3101工作面的安全回采。离层注浆后地表减沉率达69.5%~71.1%,即保障了铁路环线的安全,又能实现高位含水层的保护<sup>[31]</sup>。

#### 3.2.3 煤层群协调开采技术

地表裂隙是煤层采空后地表非连续变形的产物<sup>[32-33]</sup>。因此,削弱地表非连续性变形,增加其连续性变形是减缓地表裂隙发育的根本。上述3.1.1节

中控制导高发育的技术均可达到减缓地表裂缝发育, 减小地表下沉的目的。此外, 黄庆享等<sup>[34]</sup>在研究浅埋煤层群开采时提出了通过采煤工作面错位布置协调开采达到地表均匀下沉, 减缓地表裂缝发育的方法。

实现地表均匀沉降的煤柱错距范围:

$$L \geq \frac{M_1}{\tan \alpha_1} + \frac{M_2}{\tan \alpha_2}$$

其中,  $L$  为实现地表均匀沉降的合理煤柱错距, m;  $M_1$  为上煤层采高, m;  $M_2$  为下煤层采高, m;  $\alpha_1$  为上煤层顶板回转角, ( $^{\circ}$ );  $\alpha_2$  为下煤层顶板回转角, ( $^{\circ}$ )。

### 3.3 矿井水综合利用技术

对于无法实施原位保护, 漏失入采空区的含水层水可通过发展矿井水综合利用技术进行间接保护, 避免水资源浪费。地下水库存储、矿井水净化循环利用以及深部回灌目前应用较为广泛的矿井水利用技术<sup>[35-37]</sup>。

地下水库是在工作面采空区的基础上, 将安全煤柱用人工坝体连接形成水库坝体, 然后建设完善矿井水入库设施和取水设施形成的。为矿井水的存储提供便利, 也为后续矿井水的净化循环利用以及深部回灌奠定了基础。

矿井水的循环利用是指将矿井水净化处理, 按照所达到水质标准进行循环利用, 比如灌溉、建造生态湿地、饮用等。

深部回灌则是对矿化度高, 现行技术无法完善处理的矿井水而言的。通过在井下进行深部钻探, 将该部分水回灌入深部矿化度高的含水层中留作后续开发利用。

### 3.4 水资源保护总体思路

在上述内容的基础上, 初步构建了水资源保护总体思路(图 21)。水资源保护的总体思路为: 低位含水层可通过采后顶板注浆封堵技术直接实现水资

源保护, 也可通过导高控制技术将低位含水层转化为高位含水层, 改变含水层失水模式, 降低含水层失水量, 进而实现水资源保护; 高位含水层则可为通过人工隔水层再造、离层注浆以及协调开采等技术实现水资源保护。对于无法实现原位保护的低位含水层水会转化为矿井水流人采空区, 可采用矿井水综合利用技术实现水资源保护。

## 4 结 论

1) 按照水资源赋存状态, 榆神府矿区包含地表水和地下水两大类。地表水以海子、径流、泉的形式赋存; 地下水则有萨拉乌苏组潜水、烧变岩水和风化基岩水三种重要类型。区内“煤-水”赋存关系为煤层在下, 含水层在上。水资源特点可简单概括为“先天不足-后天有损”。

2) 以含水层与导水裂隙带的位置关系将含水层分成了低位含水层和高位含水层两类, 分别构建了低位含水层的导通漏失型失水模式, 高位含水层的非导通垂向渗失和渗流溢出蒸发型失水模式, 揭示了各模式下含水层的失水途径、水位表现特征以及水资源损失去向。

3) 根据低位含水层和高位含水层的失水模式, 总结归纳了水资源保护技术和途径。其中, 低位含水层可通过导水裂隙带控制技术、采后顶板注浆加固封堵技术实现水资源保护; 高位含水层可通过人工隔水层再造、离层注浆以及协调开采技术实现水资源保护。

4) 对于无法实施原位保护, 流入采空区的矿井水可通过地下水库存储技术、净化循环技术以及深部回灌技术间接实现水资源保护。初步构建了含低位含水层、高位含水层和矿井水综合利用的水资源保护整体思路, 为榆神府矿区水资源保护提供参考。

### 参考文献(References):

- [1] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211-1221.  
PENG Sunping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211-1221.
- [2] 卞正富, 于昊辰, 雷少刚, 等. 黄河流域煤炭资源开发战略研判与生态修复策略思考[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1378-1391.  
BIAN Zhengfu, YU Haochen, LEI Shaogang, et al. Strategic consideration of exploitation on coal resources and its ecological restoration in the Yellow River basin of China[J]. Journal of China

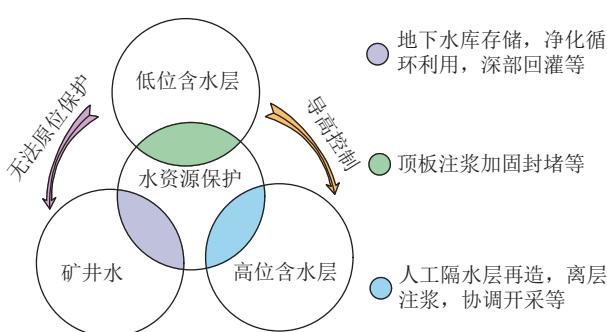


图 21 水资源保护整体思路

Fig.21 Overall idea of water resources protection

- [Coal Society](#), 2021, 46(5): 1378–1391.
- [3] 范立民, 吴群英, 彭捷, 等. 黄河中游大型煤炭基地地质环境监测思路和方法[J]. [煤炭学报](#), 2021, 46(5): 1417–1427.  
FAN Limin, WU Qunying, PENG Jie, et al. Thoughts and methods of geological environment monitoring for large coal bases in the middle reaches of the Yellow River[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2021, 46(5): 1417–1427.
- [4] 柳宁, 赵晓光, 解海军, 等. 榆神府地区煤炭开采对地下水资源的影响[J]. [西安科技大学学报](#), 2019, 39(1): 71–78.  
LIU Ning, ZHAO Xiaoguang, XIE Haijun, et al. Influence of coal mining on groundwater resources in Yushenfu Area[J]. [Journal of Xi'an University of Science and Technology](#), 2019, 39(1): 71–78.
- [5] 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 Limin, XIANG Maoxi, PENG Jie, et al. Groundwater response to intensive mining in ecologically fragile area[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2016, 41(11): 2672–2678.
- [6] 王双明, 申艳军, 孙强, 等. 西部生态脆弱区煤炭减损开采地质保障科学问题及技术展望[J]. [采矿与岩层控制工程学报](#), 2020, 2(4): 5–19.  
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al. Scientific issues of coal detraction mining geological assurance and their technology expectations in ecologically fragile mining areas of Western China[J]. [Journal of Mining and Strata Control Engineering](#), 2020, 2(4): 5–19.
- [7] FAN Limin, MA Liqiang, YU Yihe, et al. Water-conserving mining influencing factors identification and weight determination in northwest China[J]. [International Journal of Coal Science & Technology](#), 2019, 6(1): 95–101.
- [8] 李涛, 高颖, 郭亮亮, 等. 沙漠浅滩煤炭大规模开采潜水影响研究[J]. [矿业研究与开发](#), 2019, 39(12): 100–103.  
LI Tao, GAO Ying, GUO Liangliang, et al. Study on the impact of large-scale coal mining on Phreatic Aquifer in desert shoal[J]. [Ming R & D](#), 2019, 39(12): 100–103.
- [9] 仵拨云, 彭捷, 向茂西, 等. 榆神府矿区保水采煤受保护萨拉乌苏组含水层研究[J]. [采矿与安全工程学报](#), 2018, 35(5): 984–990.  
WU Boyun, PENG Jie, XIANG Maoxi, et al. Research on Salawusu formation aquifer protected by water preserving mining in Yushenfu mining area [J]. [Journal of Mining & Safety Engineering](#), 2018, 35(5): 984–990.
- [10] 彭捷, 李成, 向茂西, 等. 榆神府矿区采动对潜水含水层的影响及其环境效应[J]. [煤炭科学技术](#), 2018, 46(2): 156–162.  
PENG Jie, LI Cheng, XIANG Maoxi. Influence of coal mining on phreatic aquifer and its environmental effects in Yulin-Shenmu-Fugu Area[J]. [Coal Science and Technology](#), 2018, 46(2): 156–162.
- [11] 侯恩科, 纪卓辰, 车晓阳, 等. 基于改进 AHP 和熵权法耦合的风化基岩富水性预测方法[J]. [煤炭学报](#), 2019, 44(10): 3164–3173.  
HOU Enke, JI Zhuochen, CHE Xiaoyang, et al. Water abundance prediction method of weathered bedrock based on improved AHP and the entropy weight method[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2019, 44(10): 3164–3173.
- [12] 侯恩科, 车晓阳, 冯洁, 等. 榆神府矿区含水层富水特征及保水采煤途径[J]. [煤炭学报](#), 2019, 44(3): 813–820.  
HOU Enke, CHE Xiaoyang, FENG Jie, et al. Abundance of aquifers in Yushenfu coal field and the measures for water-preserved coal mining[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2019, 44(3): 813–820.
- [13] 侯恩科, 谢晓深, 王双明, 等. 中深埋厚煤层开采地下水位动态变化规律及形成机制[J]. [煤炭学报](#), 2021, 46(5): 1404–1406.  
HOU Enke, XIE Xiaoshen, WANG Shuangming, et al. Dynamic law and mechanism of groundwater induced by medium-deep buried and thick coal seam mining. [Journal of China Coal Society](#), 2021, 46(5): 1404–1406.
- [14] 王双明, 侯恩科, 谢晓深, 等. 中深部煤层开采对地表生态环境的影响及修复提升途径研究[J]. [煤炭科学技术](#), 2021, 49(1): 19–31.  
WANG Shuangming, HOU Enke, XIE Xiaoshen, et al. Study on influence of surface ecological environment caused by middle deep coal mining and the ways of restoration[J]. [Coal Science and Technology](#), 2021, 49(1): 19–31.
- [15] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱区煤炭开发与生态水位保护[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] 斯德武, 周振方, 赵春虎, 等. 西部浅埋煤层开采顶板含水层水量损失动力学过程特征[J]. [煤炭学报](#), 2019, 44(3): 690–700.  
JIN Dewu, ZHOU Zhenfang, ZHAO Chunhu, et al. Dynamics process analysis of groundwater quantity loss of roof aquifer with shallow seam mining in Western China[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2019, 44(3): 690–700.
- [17] 赵春虎, 斯德武, 李智学, 等. 陕北榆神矿区煤层开采顶板涌水规律分析[J]. [煤炭学报](#), 2021, 46(2): 523–533.  
ZHAO Chunhu, JIN Dewu, LI Zhixue, et al. Analysis of overlying aquifer water inrush above mining seam in Yushen mining area. [Journal of China Coal Society](#), 2021, 46(2): 523–533.
- [18] 侯恩科, 童仁剑, 冯洁, 等. 烧变岩富水特征与采动水量损失预计[J]. [煤炭学报](#), 2017, 42(1): 175–182.  
HOU Enke, TONG Renjian, FENG Jie, et al. Water enrichment characteristics of burnt rock and prediction on water loss caused by coal mining[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2017, 42(1): 175–182.
- [19] 范立民, 马雄德, 蒋泽泉, 等. 保水采煤研究 30 年回顾与展望[J]. [煤炭科学技术](#), 2019, 47(7): 1–30.  
FAN Limin, MA Xiongde, JIANG Zequan, et al. Review and thirty years prospect of research on water-preserved coal mining[J]. [Coal Science and Technology](#), 2019, 47(7): 1–30.
- [20] 马立强, 余伊何, SPEARING A J S. 保水采煤方法及其适用性分区——以榆神矿区为例[J]. [采矿与安全工程学报](#), 2019, 36(6): 1079–1085.  
MA Liqiang, YUYIHE, SPEARING A J S. Water conservation mining method and its applicability: a case study in Yushen mining area[J]. [Journal of Mining & Safety Engineering](#), 2019, 36(6): 1079–1085.
- [21] 李文平, 王启庆, 刘士亮, 等. 生态脆弱区保水采煤矿井(区)等級类型[J]. [煤炭学报](#), 2019, 44(3): 718–726.

- LI Wenping, WANG Qiqing, LIU Shiliang, et al. Grade types of water-preserved coal mining coalmines in ecologically fragile area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(3): 718–726.
- [22] XU Yujun, MA Liqiang, Naseer Muhammad Khan. Prediction and maintenance of water resources carrying capacity in mining area—a case study in the Yu-Shen mining area[J]. *Sustainability*, 2020, 12: 7782.
- [23] LIU Shiliang, LI Wenping. Zoning and management of phreatic water resource conservation impacted by underground coal mining: A cause study in arid and semiarid areas[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 224: 677–685.
- [24] 胡鑫, 孙强, 晏长, 等. 陕北烧变岩水—岩作用的劣化特性[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(4): 76–84.
- HU Xin, SUN Qiang, YAN Changgen, et al. Deterioration characteristics of water-rock interaction on combustion metamorphic rocks in northern Shaanxi[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(4): 76–84.
- [25] 张强, 杨康, 张昊, 等. 固体充填开采矿压显现弱化规律及表征研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(3): 479–488.
- ZHANG Qiang, YANG Kang, ZHANG Hao, et al. Research on weakening law and quantitative characterization of strata behavior in solid filling mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3): 479–488.
- [26] 许家林, 王晓振, 刘文涛, 等. 覆岩关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(2): 380–385.
- XU Jialin, WANG Xiaozhen, LIU Wentao, et al. Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(2): 380–385.
- [27] 赵旦实. 基于顶板预裂爆破关键层改性防治压架突水灾害[J]. *山西焦煤科技*, 2017(11): 8–11.
- ZHAO Danshi. Technologies on prevention and control of water inrush hazard stress caused support-crushing based on pre-splitting blasting in key stratum above roof[J]. *Shanxi Coking Coal Science & Technology*, 2017(11): 8–11.
- [28] 付翔. 顶板预裂爆破技术在防治技术上覆承压含水层突水中的应用[J]. *能源技术与管理*, 2016, 41(4): 59–61.
- [29] 李金龙, 张允强, 徐新启, 等. 高家堡煤矿煤层顶板注浆加固堵水技术探讨[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(S1): 20–25.
- LI Jinlong, ZHANG Yunqiang, XU Xinqi, et al. Reinforcement and water plugging technology of roof grouting in Gaojiaobao coal mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(S1): 20–25.
- [30] 赵春虎, 王皓, 靳德武. 煤层开采覆岩预裂—注浆改性失水控制方法探讨[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(2): 159–167.
- ZHAO Chunhu, WANG Hao, JIN Dewu. Discussion on roof water loss control method of coal seam based on pre-splitting grouting reformation(P-G)[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(2): 159–167.
- [31] 赵辉. 覆岩离层注浆充填开采方案及应用分析[J]. *煤炭技术*, 2021, 40(3): 12–14.
- ZHAO Hui. Application analysis of mining project grouting and filling of overburden separated layer[J]. *Coal Technology*, 2021, 40(3): 12–14.
- [32] 卢家欣, 汤伏全, 赵军仪, 等. 黄土矿区开采沉陷与地表损害研究述评[J]. *西安科技大学学报*, 2019, 39(5): 859–866.
- LU Jiaxin, TANG Fuquan, ZHAO Junyi, et al. Review of study on mining subsidence and ground surface damage in loess mining area[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2019, 39(5): 859–866.
- [33] 余学义, 王昭瞬, 杨云. 大采深综放开采地表移动变形规律[J]. *西安科技大学学报*, 2019, 35(4): 555–563.
- YU Xueyi, WANG Zhaoshun, Yang Yun. Surface movement and deformation law of fully-mechanized caving mining with large mining depth[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2019, 35(4): 555–563.
- [34] 黄庆享, 杜君武. 浅埋煤层群开采的区段煤柱应力与地表裂缝耦合控制研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(3): 591–598.
- HUANG Qingxiang, DU Junwu. Coupling control of pillar stress and surface cracks in shallow coal seam group mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(3): 591–598.
- [35] 孙亚军, 张梦飞, 高尚, 等. 典型高强度开采矿区保水采煤关键技术与实践[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 56–65.
- SUN Yajun, ZHANG Mengfei, GAO Shang, et al. Water-preserved mining technology and practice in typical high intensity mining area of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 56–65.
- [36] WANG Qiqing, LI Wenping, LI Tao, et al. Goaf water storage and utilization in arid regions of northwest China: A case study of Shennan coal mine district[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 33–44.
- [37] 顾大钊, 李井峰, 曹志国, 等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(10): 3079–3089.
- GU Dazhao, LI Jingfeng, CAO Zhiguo, et al. Techonlogy and engineering development strategy of water protection and utilization mine in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10): 3079–3089.