



神府煤田勘查开发的地质科技创新与贡献

范立民

引用本文:

范立民. 神府煤田勘查开发的地质科技创新与贡献[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 1–22.

FAN Limin. Geological technological innovations and contributions in the exploration and development of the Shenhua coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(3): 1–22.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.25.02.0099>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于透明地质的唐家会煤矿奥灰水防治技术

Prevention and control technology of Ordovician water in Tangjiahui Coal Mine based on transparent geology

煤田地质与勘探. 2022, 50(1): 101–108 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.11.0619>

论保水采煤技术体系

Technological system of water-conserving coal mining

煤田地质与勘探. 2023, 51(1): 196–204 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.11.0865>

唐家会煤矿透明地质保障系统构建及示范

Construction and demonstration of the transparent geological guarantee system in Tangjiahui Coal Mine

煤田地质与勘探. 2022, 50(1): 1–9 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.11.0623>

透明地质保障技术构建方法

Construction method on transparent geological guarantee technologies: A case study of Wuhai Mining Area

煤田地质与勘探. 2022, 50(1): 136–143 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.10.0601>

西北生态脆弱区浅埋煤层保水开采隔水层稳定性评价方法

A method for evaluating aquiclude stability in the water conservation-based mining of shallowly buried coal seams in ecologically vulnerable areas in northwest China

煤田地质与勘探. 2023, 51(11): 92–98 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.04.0176>

神府东胜矿区高强度开采顶板涌水特征及防治技术

Characteristics of roof water inflow and control technology for high intensity mining in Dongsheng Mining Area, Shenhua Coalfield

煤田地质与勘探. 2022, 50(2): 72–80 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.07.0379>



移动阅读

范立民. 神府煤田勘查开发的地质科技创新与贡献[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 1–22. doi: 10.12363/issn.1001-1986.25.02.0099

FAN Limin. Geological technological innovations and contributions in the exploration and development of the Shengfu coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(3): 1–22. doi: 10.12363/issn.1001-1986.25.02.0099

神府煤田勘查开发的地质科技创新与贡献

范立民

(中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 【背景】神府煤田(即陕北侏罗纪煤田)的发现和探明, 是我国“六五”期间煤炭工业最重要的成就, 由此拉开了我国煤炭工业战略西移的序幕。神府煤田勘探与发现的道路曲折, 科技创新成就珍贵, 总结煤田地质勘查和研究进展, 对我国西部煤炭主产区的地质工作、绿色开发具有重要启示和借鉴。【进展】一是聚煤模式和聚煤规律的研究, 从早期的河流沉积和煤层呈鸡窝状分布的不当认识, 转变到大型湖泊三角洲沉积以及发育 5 个连续沉积的煤层(组)的客观认识, 促进了普查找煤工程部署和快速完成。二是煤田勘探从早期按部就班套用“规范”, 转变到榆神矿区勘探阶段大胆创新, 提出了“沙漠煤田综合勘探技术”并推广应用, 大幅度缩短了勘探周期, 降低了勘探成本, 提高了对煤层、地层和各类地质界线的控制程度, 在 20 世纪 90 年代末期国家地质勘探投入不足的情况下, 促成了榆神矿区及早开发。三是保水采煤科学理念的提出和科学技术体系的创建, 创新了煤田开发生态环境保护的思路和方法。在神府煤田开发初期就关注到地下水水位管控和生态环境保护, 建成了我国首张省级煤矿地下水监测预警网, 监测站点涵盖神府煤田所有煤矿和规划区, 促进了煤田开发的可持续发展。四是突水溃沙灾害、地面沉降和地裂缝等灾害防控、生态修复技术创新与应用, 促进了绿色矿区建设, 建成了和谐矿区、绿色矿山。【启示】国家重大需求是推动神府煤田发现与勘探的重要契机, 科技创新是推动煤田勘探进展和科学勘探的主要驱动力, 产-学-研的有机结合是科技创新和产业发展的最佳途径。【展望】高分辨沉积环境研究、透明地质大模型构建、深部煤层开采采矿井水源头减水、高强度采煤条件下含水层结构保护和生态修复, 无疑是今后神府煤田地质科技创新的重要方向。

关 键 词: 沉积环境; 聚煤规律; 保水采煤(保水开采); 透明地质; 突水溃沙; 综合勘探; 生态脆弱矿区; 神府煤田

中图分类号: TD1; P621 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2025)03-0001-22

Geological technological innovations and contributions in the exploration and development of the Shengfu coalfield

FAN Limin

(School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: [Background] The discovery and exploration of the Shengfu coalfield (i.e., a Jurassic coalfield in northern Shaanxi Province) represent the most significant achievement in China's coal industry during the 6th Five-Year Plan of the country, marking the onset of the strategic westward shift of China's coal industry. The complex discovery and exploration processes of the Shengfu coalfield have yielded valuable technological innovations. A summary of advances in the geological exploration and research of this coalfield will provide significant implications and references for the geologic work and green development of major coal-producing areas in West China. [Advances] First, research on the coal

收稿日期: 2025-02-11; 接收日期: 2025-02-25

基金项目: 陕西秦创原特厚煤层保水开采“科学家+工程师”创新团队建设项目(2024QCY-KXJ-055)

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

© Editorial Office of *Coal Geology & Exploration*. OA under CC BY-NC-ND

accumulation patterns has shifted to an objective understanding of large-scale lacustrine and deltaic sedimentary environments and five continuously deposited coal seams (formations) from the early misconception of a fluvial sedimentary environment and a chicken-nest-shaped distribution of coal seams. This shift has promoted the deployment and rapid completion of reconnaissance surveys and coal prospecting. Second, coalfield exploration has shifted from the early application of prescribed norms to bold innovations in the exploration stage of the Yushen mining area. Specifically, the integrated exploration technology for coalfields in desert areas was proposed and widely applied, significantly shortening the exploration cycle, reducing exploration costs, and enhancing the control over coal seams, strata, and various geological boundaries. As a result, despite insufficient national investment in geological exploration in the late 1990s, this technology accelerated the development of the Yushen mining area. Third, the introduction of the scientific concept of water-preserved coal mining and the establishment of the corresponding scientific and technological system represent innovations in the philosophy and methods of ecological conservation in coalfield development. Groundwater level control and ecological conservation were emphasized even during the initial exploitation of the Shengfu coalfield. China's first provincial-level monitoring and early warning network has been established for groundwater in coal mines within the coalfield, with monitoring stations covering all coal mines and planning areas in the Shengfu coalfield. This facilitates sustainable coalfield development. Fourth, the technological innovations and application in the prevention and control of water inrushes, sand collapse, land subsidence, and geofractures, as well as relevant ecological restoration, have accelerated the construction of green mining areas, creating green mines in harmonious mining areas. [Implications] The huge national demand creates a great opportunity for the discovery and exploration of the Shengfu coalfield. Technological innovations act as the driving force behind the exploration progress and scientific exploration of the coalfield. Furthermore, the organic industry-university-institute collaboration represents the optimal approach to technological innovations and industrial development. [Prospects] The geological technological innovation targets of the Shengfu coalfield will undoubtedly include investigating sedimentary environments using high-resolution survey methods, constructing large transparent geological models, reducing mine water production through source control for deep coal seam mining, and achieving aquifer structure protection and ecological restoration under high-intensity coal mining.

Keywords: sedimentary environment; coal accumulation law; water-preserved coal mining; transparent geology; water inrush and sand inrush; integrated exploration; ecologically fragile mining area; Shengfu coalfield

1982年12月8日,陕西省一八五煤田地质勘探队(下称185队)提交了《陕北侏罗纪煤田榆(林)神(木)府(谷)区普查找煤地质报告》,提交煤炭资源储量877亿t,宣告了神府煤田的发现。2023年4月20日,陕西省煤田地质集团有限公司在榆林举办“神府煤田发现40周年座谈会”,笔者作为长期从事神府煤田地质工作的科技人员应邀参加,并在随后的绿色勘查论坛作报告。回顾神府煤田发现、勘探历程,无不体现着科技创新的力量,每一次创新理念、技术的提出和应用,都极大地促进了勘探精度的提高、速度的加快和科学开发进程。煤田发现初期,盆地分析及沉积环境新理论的引入和快速应用,科学认识了煤田形成环境与煤层赋存规律,促进了勘探工程(钻探工程)部署的优化调整^[1-6]。煤田开发初期,开展了突水溃沙、含水层结构保护和地下水库建设技术创新和应用,为浅埋煤层安全、绿色、高效开采提供了技术保障^[7-12]。煤田开发南移过程中,沙漠煤田综合勘探技术创新及快速应用,极大地促进了榆神矿区勘探步伐^[13]。煤田开发后,保水采煤问题的提出和科学体系构建,为矿区生态修复、减损减沉和生态环境保护提供了理论和技术支撑,促进了绿色矿区建设^[14-15]。笔者以37年来的亲身经历和大量文献阅读为基础,回顾神府煤田发现与勘查过程中的地质科技创新和贡献,期待有益于新一轮地质找矿突破,有益于矿井

地质保障技术的提升和绿色矿山建设。

1 煤田发现前地质工作

1.1 煤田发现前的地质工作及认识

在神府煤田发现之前,也进行过大量地质工作,奠定了20世纪80年代初期神府煤田发现的地质基础。20世纪初,就有地质学家在陕北一带从事石油地质、煤田地质考察,撰写了丰富的考察、调查、研究报告。段中会等^[16]曾就神府煤田地质工作进行了总结。在季成龙主编的煤田地质勘探史料中^[17],也有详细论述。重要地质调查工作见表1。

1992年前后,时任185队总工程师的刘世昉(神木县尔林兔人)回忆说,小时候就听老人们讲,神木有煤,就是没有价值,呈鸡窝状。然而,通过地质工作者数十年的不懈努力,对神府煤田地质条件有了系统了解和掌握,也在一定范围内开展了普查或勘探,否定了过去认识。但梳理发现,20世纪80年代之前,一直没有把神府煤田作为一个整体进行系统调查和评价,对神府煤田没有整体认识和准确评价。

1.2 现代沉积学的引入

改革开放后,随着国际交流的不断增多,国外先进的沉积学理论和知识不断被引入到我国。如1985年科

表1 神府煤田发现之前的重要地质调查工作统计
Table 1 Statistics of important geological surveys before the discovery of the Shenfu coalfield

时间	任务来源	调查单位(个人)	主要工作量或认识	报告名称	提交资源量
1917—1923		王竹泉等	侏罗纪煤系煤层厚0.67~4.00 m, 向西缓倾, 倾角1°~4°, 属烟煤	《中国地质图》太原榆林幅说明书	预测榆林-太原侏罗纪煤904.5亿t
1923—1933		潘钟祥、王竹泉等	地层、古生物研究	陕北古期中生代植物化石	
1931—1942		张广石	调查全省73个县中, 51个县123处有煤	《陕西矿产一览表》《陕西之煤业》《陕西煤炭业过去现在将来》等	总储量为719.5亿t 陕北660亿t
1956	陕西省工业厅	陕西省工业厅经济资源调查勘探队		府谷神木与横山靖边沿线地质矿产初步了解报告	
1958-07		郑州煤田地质学校 (现河南地矿职业学院)	1:10万地质图, 2 500 km ²	陕西省北部榆林神木区域侏罗纪煤田踏勘报告	
1958	国家计划项目 《第一次全国煤田预测》	陕西省煤炭工业局		陕西省煤田预测报告	4 091亿t(其中探明26亿t)
1958-09—12		榆林煤田勘探队(陕西省一八六煤田地质勘探队前身, 下称186队)	钻孔7个, 进尺474 m	金刚寺井田简易地质报告	232万t
1958-11	陕西省煤炭工业局	省局工作组配合榆林煤田地质勘探队	调查煤矿点数10处	陕北府谷、神木两煤田概要说明	估算侏罗纪煤384亿t, 石炭纪煤51亿t
1959		186队	普查面积662.45 km ²	陕北侏罗纪煤田横山矿区波罗韩岔间普查勘探报告	C1+C2级13.98亿t
1960		186队	普查面积309.41 km ²	陕北侏罗纪煤田榆林矿区归德堡至古城滩间普查勘探报告	7 432万t
1961-05		186队	榆林、靖边、绥德普查面积约1 167 km ²	陕北侏罗纪煤田韩岔吴家园子杨桥畔间地质资料	C1级+C2级资源储量17 348万t
1963-11		西北煤田地质局194勘探队	神木、府谷普查面积6 000 km ²	陕北神木府谷地区煤田地质初步踏勘报告	估算石炭-二叠纪煤29.44亿t; 侏罗纪煤24.96亿t
1974—1981	国家计划项目 《第二次全国煤田预测》	陕西省煤田地质勘探公司	划分出渭北石炭-二叠纪煤田、黄陇侏罗纪煤田、陕北侏罗纪煤田、陕北三叠纪煤田、陕北石炭-二叠纪煤田	陕西省煤田预测报告	全省含煤5.84万km ² , 埋深2 000 m以浅资源总量2 926.7亿t, 其中探明资源的含煤面积5 831 km ² , 探明资源储量268.3亿t
1974		陕西省地质局第14队		陕西省榆林地区横山-定边普查及横山塔湾煤矿地质报告	C+D级储量3 579.5万t
1976		185队		陕北侏罗纪煤田横山县樊家河井田精查地质报告, 波罗井田精查地质报告	樊家河井田: 3 989万t; 波罗井田: 7 552.30万t

学出版社就组织翻译出版了国际著名沉积学家 H. G. 里丁的巨著《沉积环境和相》^[18]。20世纪80年代后期, 毛邦倬等^[19]、陕西省煤田地质勘探公司还翻译了一批国际沉积学会议论文^[20]。现代沉积学的引进和消化, 无疑促进了我国沉积学及煤田沉积学的研究。陈钟惠^[21]较早编著出版了《含煤岩系沉积环境》教材。武汉地质学院煤田教研室也在20世纪70年代末修订了《煤田地质学》教材^[22-23]。

随着现代沉积学的引入和消化, 我国煤田沉积环境研究也在80年代开始出现了繁荣的局面, 涌现出一批优秀成果, 并在后续的煤炭资源勘查、开发中发挥了理论指导作用。如第三次全国煤田预测^[24]、全国煤炭资源评价与沉积环境研究^[25-26], 西北地区侏罗纪煤田沉积

体系构建与聚煤规律研究^[27], 区域构造演化与聚煤作用、聚煤盆地分析研究流程和主要参数厘定等, 都直接或间接地接受和创新了国际沉积学成就^[28-29]。张泓等^[30]从20世纪80年代就致力于鄂尔多斯盆地构造演化、应力场演化与煤聚集的关系研究, 较早提出了鄂尔多斯聚煤盆地形成的构造环境, 为神府煤田等侏罗纪煤田勘查评价、聚煤规律研究奠定了基础。

这些成就, 一方面系统揭示了我国西北地区, 包括神府煤田在内的形成演化过程与聚煤作用。另一方面揭示神府煤田侏罗纪含煤地层主要形成于滨湖大型三角洲沉积环境, 煤层具有厚度大、侧向相对稳定的基本聚集特征, 昭示出潜力巨大的勘查前景。**图1**是神府煤田矿区划分及主要井田(煤矿)分布。

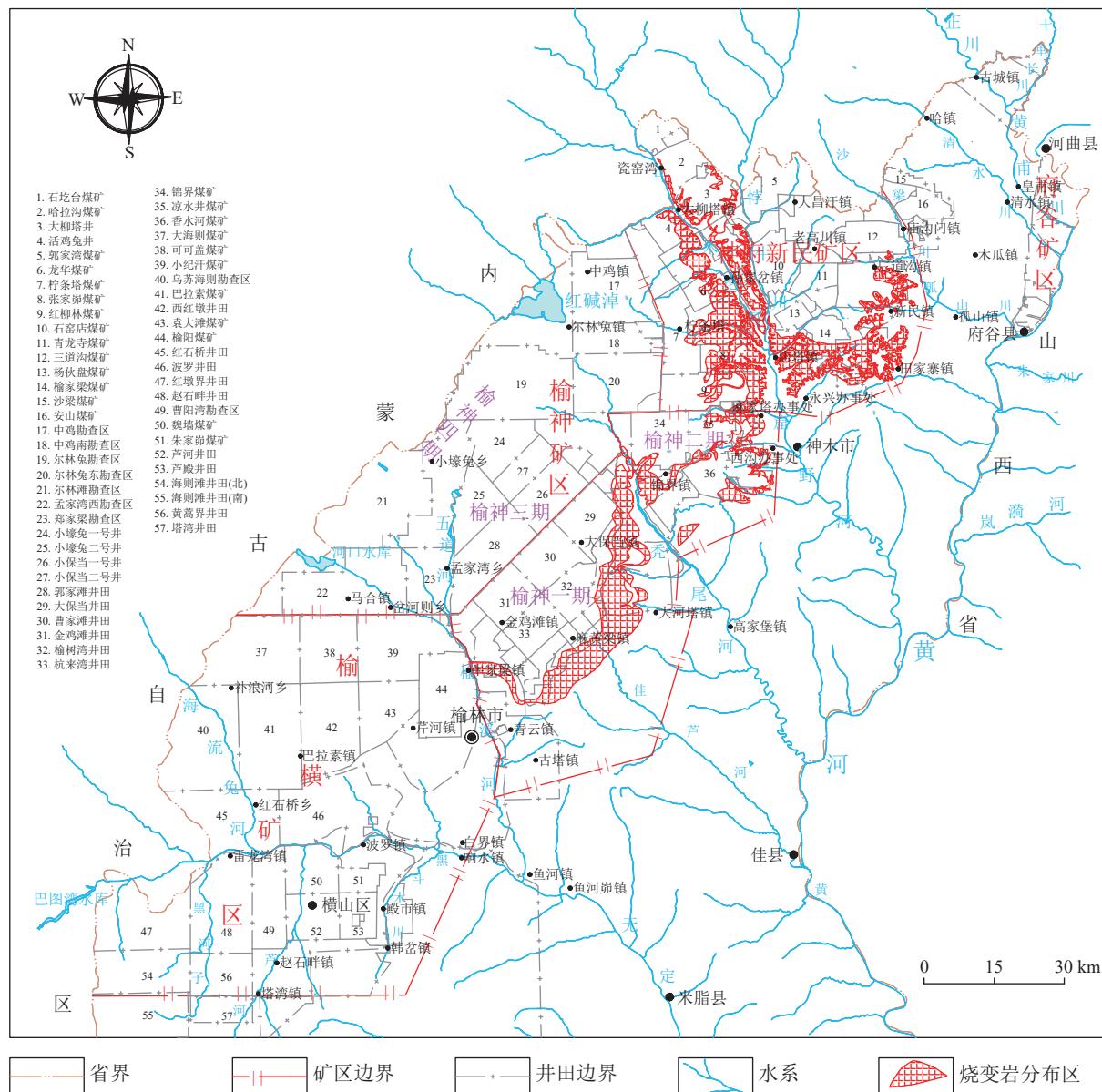


图 1 神府煤田各矿区及主要矿井分布
Fig.1 Distribution of various mining areas and main mines in the Shenfu coalfield

2 聚煤规律创新认识

神府煤田沉积环境与聚煤规律的研究,从国家部署大范围普查找煤就开始了,尤其是 1980 年前后,开始从区域上认识神府煤田的煤层发育规律。普查报告提交后,又专门开展沉积环境研究,进一步证实了普查设计前提出的 5 个煤层(组)及其稳定程度的论断。

2.1 5 层连续沉积煤层(组)的提出

李季是 185 队神府煤田普查找煤项目组的骨干成员,参加了普查全过程。根据他的回忆手稿,他带领的先遣调查组最早提出了神府煤田有 5 层连续沉积的煤层(组),指出这 5 层煤层(组)稳定发育于窟野河以西的广袤沙漠之下。

1980 年 7 月,185 队副队长兼总工程师季成龙带领

吴昌廉、赵凤桐、王田曲、李季等 5 人第一次赴榆林地区进行路线地质调查,明确 186 队负责府谷地区,185 队负责神木附近及神榆之间的广阔区域,工作任务是找煤。

对于神木境内的煤层、岩层出露区,过去没做过系统的地表地质调查工作,只是根据煤层自然现象和已开采煤矿点推断地下煤层埋藏情况,形成地下有煤和无煤两种观点。也有专家认为,神木地区虽然有煤层,但不稳定,没有工业价值。在榆林城以北的荒漠地区,20 世纪 50 年代石油系统曾施工了几个钻孔,没有发现煤层。对于石油钻孔所取得的地质资料,不同的人有不同的解释,故石油系统的钻孔也不能对掩盖区地下是否有煤下定论。

1980 年 9 月,李季、劳炎明、刘子勋等开展陕北煤

田第二次野外调查,任务是对185队工作区是否有煤作出结论。1980年11月,李季、劳炎明、刘子勋、王田曲、文体善、陈其祥、赵云祥、谢光华等8人再次赴神木开展野外踏勘工作,踏勘过程中,调查组对工作区地下是否有煤,仍然存在截然不同的两种意见。其中,持地下无煤观点的人,认为神木地区只有1层煤,而且是鸡窝煤,掩盖区下不可能有煤,先前的石油钻孔就是证据。

在这两种意见争论不休的情况下,李季决定在野外进行煤层露头追索和煤层对比,形成了20万分之一地形地质草图。追索结果显示,同一煤层能从高家堡追索到神木县城北部柠条塔一带,说明煤层层位是稳定的。那么,柠条塔的煤必然会随地层的倾斜向西部延伸,故考考乌素沟以西的广袤沙漠之下也必定会有煤赋存。因此,项目组得出窟野河以西区域有煤的结论,野外调查显示工作区共发育5层煤(组),柠条塔的煤是最下部的5号煤层,此编号一直为后来所用。

2.2 湖泊三角洲沉积

2.2.1 神府煤田延安组沉积环境与聚煤规律

1983年初,185队王绪柱提出《陕北侏罗纪煤田沉积环境与聚煤规律研究》项目建议书,1984年获煤炭工业部批准,1987年结题。所出版的专著有效指导了神府煤田、东胜煤田的早期普查勘探^[1]。该项目研究否定了富县组河流相沉积的传统认识,提出富县组是夹有小型河流相及冲积-洪积相的浅水湖泊沉积,延安组以大型内陆湖泊三角洲相为主体的湖泊三角洲-湖湾-浅湖沉积序列,聚煤作用主要发育在湖泊三角洲废弃和湖泊淤浅沼泽化阶段。将含煤地层划分为5段,每段顶部发育1个煤层(组)。第一至第四段,泥炭沼泽面积大,地势平缓,少有或没有流动水体,煤层结构简单,煤质优良。第五段,泥炭沼泽面积缩小,流动水携带的矿物质部分进入泥炭沼泽,煤层夹矸增多,煤的灰分、硫分有增高趋势。成煤期后,燕山运动造成本区整体抬升,直罗期的直罗河横穿尔林兔-瑶镇一带,使第三段及以上遭受不同程度的冲刷剥蚀,冲刷区宽度22~37 km。

该成果表明,两种沉积环境的聚煤特点有所不同。一是三角洲朵体废弃后聚煤,在三角洲的前端及靠近湖湾的部位首先形成沼泽及泥炭沼泽,然后向三角洲平原及湖湾蔓延,进而使泥炭沼泽遍布全区;富煤带分布较广,其范围主要受三角洲朵体大小的控制,富煤中心一般都在废弃三角洲平原前端和靠近湖湾的朵叶体边缘,为结构简单的中厚煤层,多为特低灰、特低硫、特低磷的优质煤;丝质体+半丝质体含量及灰分产率较湖湾区略低。二是湖湾淤浅后聚煤,煤层分叉变薄,尖灭带范围主要受湖湾规模控制;多为结构较复杂的薄-中厚煤层,也为特低灰、特低硫、特低磷的优质煤;相对于三

角洲朵体煤层,煤的灰分产率、丝质体+半丝质体含量较低,而硫含量略高^[1,31]。

随后,李思田领衔承担原地矿部重点科技攻关项目《鄂尔多斯盆地沉积环境及其与油气成生的关系》,与185队密切合作,首次将层序地层学理论引入煤田沉积环境与聚煤规律研究^[32-33]。通过详细追踪,将延安组划分为10~11个体系单元(相当小层序),归并到5个成因地层单元,这与185队早期提出的延安组五段划分一脉相承;识别并划分了延安期冲积沉积体系与湖泊-三角洲沉积体系,全面剖析湖泊-三角洲沉积体系聚煤作用特点。结合含煤地层古生物学研究,论证了富县组、延安组为温暖气候下的沉积产物,首次系统阐述了神府煤田成煤植物群特征。同时,圈定了40多个富煤单元,其中50%以上是新提出的。相关研究成果,为后续的煤炭资源勘查工程部署、重点开发区规划提供了科学依据。

经原能源部科技司推荐,185队的“陕北侏罗纪煤田找煤、成煤规律研究与勘探”成果获1989年度国家科学技术进步二等奖,主要获奖人有劳炎明、林文英、王觉艺、白宗镛、王绪柱。1992年,李思田教授团队上述研究成果也获国家科学技术进步二等奖。

2.2.2 榆横矿区延安组沉积期大型湖泊三角洲淤浅机制与聚煤规律

神府煤田发现后,原地矿部与原煤炭工业部经过协商,将北纬38°30'以南划为地矿部勘查范围,以北为煤炭工业部勘查范围。由此,陕西省地质矿产勘查开发局第八地质队进行了榆横矿区普查和沉积环境、聚煤规律研究,阐释了大型湖泊三角洲的形成演化与淤浅机制。研究认为,榆林-横山地区延安组沉积总体上由冲积平原体系、湖泊体系、河湖三角洲体系组成,三角洲平原不断从NW向SE方向扩展。延安组早-中期沉积环境是湖泊扩张,三角洲推进建设,湖泊退缩淤浅。区内三角洲具有前三角洲不发育,层序顶部厚度大、分布面积广的废弃相特征,表明盆地浅水碎屑湖泊发育稳定,碎屑供应充足时容易被三角洲和决口的砂泥质充填淤浅。决口沉积使三角洲间湾封闭,造成三角洲朵体大面积连片对接,促使三角洲平原快速扩展,为煤的聚集提供了极为有利的沉积场所^[34-35]。这一创新认识,为后续30年来的勘探开采实践所证实。

2.3 直罗组聚煤规律

延安组沉积后,气候逐渐变暖,沉积环境由大型湖泊三角洲转变为大型河流沉积为主。以往的研究鲜有直罗组煤层的报道。近年来,焦养泉教授团队在野外调查过程中发现直罗组含可采煤层,局部地区煤层厚度较大,神府、东胜一带煤层最大厚度达到3.98 m,连续沉积。焦养泉等^[36]认为,神府煤田成煤始于富县组沉积

末期,终于直罗组沉积早中期,结合区域露头调查和大量钻孔资料对比,发现直罗组下段下亚段沉积时期,鄂尔多斯盆地内具有较大范围的聚煤作用,聚煤区围绕盆地沉降中心呈环带状展布,与延安组煤层分布具有相同的特点,说明此时的古气候尚处于潮湿环境。从直罗组下段上亚段沉积期开始,全盆地聚煤作用步调不尽一致。此阶段,盆地南部、中部和东部聚煤作用终结,古气候已转变为干旱型。盆地北部、西部,聚煤作用持续发育,自东向西聚煤层位逐渐抬升,目前见到最高的聚煤层位位于贺兰山二道岭地区的直罗组中上段,煤层最厚达6.60 m。

2.4 煤系沉积环境研究展望

神府煤田已经发现并规模性开发,沉积环境研究似乎在神府煤田已经完成了历史使命。其实不然,高精度的沉积环境研究,仍然是神府煤田开发过程中的客观需求。

例如,煤田内张家峁煤矿³⁻¹煤层存在局部顶煤冲刷带,厚度较小,不足煤层厚度的1/3,但直接影响综采截齿的使用寿命。由于该冲刷带的存在,每天耗费截齿的成本达到10万元以上。先后尝试过槽波勘探、三维地震等多种物探技术方法,都无法解释小于1/3煤厚的冲刷带。为此,煤矿企业邀请焦养泉教授团队预测全井田冲刷带分布。该团队采用沉积学方法,研究揭露了冲刷带分布及发育特征,预测出全井田所有冲刷带,并被已揭露冲刷带证实。最近3年(2021—2024年)的开采实践,进一步证实了这一成果的准确性。

因此,以聚煤盆地沉积学理论为指导^[37],开展高精度的沉积环境研究,精细揭示煤层厚度变化、冲刷带、煤层顶板岩性及变化规律(涉及顶板支护等煤矿安全问题),研究煤系矿产资源及富集规律,无疑是煤矿安全、高效、绿色开采的客观需要。

3 煤田勘探技术方法创新

神府煤田勘探工作一开始就受到原煤炭工业部高度重视,1980年列入原国家计划委员会、煤炭工业部重点地质勘查项目计划。

3.1 普查找煤设计方案调整与实施

1980年,185队、186队联合组成陕北煤田普查分队,分别赴神木和府谷县地质踏勘。在区域地质和煤田预测的基础上,1981年3月编制提交普查找煤设计。最初准备把主要工程量布设在悖牛川以东的新民区,后来根据185队野外调查成果,认为在窟野河以西的广袤沙漠区赋存连续煤层。由此,将找煤普查区扩大到窟野河以西、榆林老县城(现榆林市区)以北的广大区域。这一决策对神府煤田的发现和勘查、开发进程产生了深

远影响。

最初的普查找煤共设计钻孔122个,工程量6万m,其中陕西省煤田地质勘探公司批准钻孔48个,工程量2.227万m。后又根据原煤炭工业部提出的“缩小范围、集中力量、保证重点”的战略要求,削减10个钻孔,实际完成38个钻孔,工程量17 292.44 m。在先期控制性钻孔施工过程中,发现孔孔见煤,而且煤层层数与李季等前期预测的基本一致,横向煤层厚度、高程等初步对比清楚,说明了煤层沉积稳定的特点。这一初步成果,为调减钻孔奠定了基础。

普查找煤设计先后经过4次调整,工作量大幅度缩减,除了节省2/3的勘查经费外,还使勘查周期由5~6 a缩短为1 a多,为神府煤田开发争取了宝贵的历史性机遇。事实上,这一系列设计调整决策并非是因应某种客观形势的需要,而更多的是体现了实事求是、科技创新的科学精神,这种精神的实质在几年后全国矿产储量委员会发布的《煤炭资源地质勘探规范》中得到了充分体现。

3.2 神木北部矿区地球物理勘查

神木北部矿区面积1 267 km²,1987年完成的详查报告,提交煤炭资源量145.99亿t。详查地质工作基本上遵循传统的勘探方法,即地质填图、钻探、测井、抽水试验等手段。在此基础上,鉴于地质条件特点,采用了磁法勘查技术圈定烧变岩边界。在16个井田勘探阶段,部分井田引入地震勘探,使勘查程度得到较大提高。因为钻探工程按照规范部署,本文仅简要阐述磁法与地震勘探技术创新。

3.2.1 磁法探测烧变岩边界

神府煤田在地质历史时期曾经多次发生煤层自燃,至今仍有活火点存在。在窟野河、秃尾河及其支流沿岸形成面积约697 km²的烧变岩。烧变岩的存在,一方面烧失了煤炭资源,必须查明其分布范围,尤其是多煤层自燃区域,勘查难度较大;另一方面,烧变岩孔隙、裂隙发育,在窟野河、秃尾河西岸的烧变岩,由于煤层底板向西北倾斜,容易形成富水区^[38-40],对煤矿安全生产造成危害。

岳建华等^[41]根据深、浅烧变岩层磁异常及磁性干扰信号的频率差异,采用小波多分辨分析概念和Malat算法,实现了多煤层自燃叠加磁异常的去噪和分离处理,结合理论模型试算,研究了截断误差、磁异常采样密度和烧变岩层间距离等对小波分解结果的影响。于景村(于景邨)^[42]根据烧变岩磁性分布规律和实测磁异常特征,建立了烧变岩地质-地球物理模型。采用归一化方法,以上层烧变岩几何参数为单位,改变下层烧变岩几何参数,对两层烧变岩叠加磁异常进行正演模拟;分析两层烧变岩叠加磁异常特征,确定了根据叠加磁异常

识别下层烧变岩存在的条件。

马奎特法(Marquardt algorithm)是一种用于解决非线性最小二乘问题的优化算法。在神木北部矿区详查阶段,万兆昌等^[43]以马奎特法和垂向二阶导数法解释迭加磁异常,以电阻率法和瞬变电磁场法勘探多煤层自燃区,圈定活鸡兔矿煤层自燃边界,经过钻探勘查验证,符合实际。祁明星等^[44]研究了火区磁异常特征,通过对烧变岩露头区、钻孔剖面上磁异常的分析,提出了磁法圈定烧变岩分布范围的方法,较好地确定烧变岩分布范围。

3.2.2 煤层连续性地震探测

1986年以来,陕西省煤田地质物探测量队(下称物测队)开始在神府煤田开展地震勘探。具有经济价值的可采煤层厚度与地震波波长相比可视为薄层,而薄层反射波一般在常规地震时间剖面上是不易识别的。对煤层而言,其厚度虽薄,但由于其与顶、底板岩层波阻抗差异较大(反射系数在0.3以上),煤层反射在地震时间剖面上通常呈突出的优势强波,这就为用地震法直接勘查煤层提供了基础。王中锋^[45]基于上述认识,在神府煤田沙漠覆盖区利用地震勘查信息预测煤层厚度变化、煤层分岔合并带、煤层火烧边界、煤层冲刷带,提高了勘查精度,也加快了包括榆神矿区等的勘查进程。

朱芳香等^[46-48]认为,神府煤田煤层厚度变化范围大(0~14 m),而其调谐厚度为8 m,地震勘查技术以往基于薄层理论的煤厚解释方法对其不完全适用。由此,进一步采用高分辨率地震、电法、磁法等探测技术进行煤炭资源和煤矿采区勘查,尤其是利用地震勘查技术解释了煤层厚度及其变化趋势,提高了煤层的勘查精度。其中,对于选用的9种参数,通过楔型模型正演,得出不同参数适用于不同煤厚变化范围,以便对不同地区有针对性地选用合适参数来解释煤厚。最后,用煤厚反演程序对榆神矿区进行煤厚预测,经过后续钻孔验证,预测精度较高。

3.3 榆神矿区综合勘查技术创新与实践

榆神矿区早期叫大保当普查区,185队历时7 a的地质勘查,于1993年提交了《陕北侏罗纪煤田榆(北)神(西)大保当区普查地质报告》,控制面积2 823.50 km²,提交煤炭储量269.92亿t。随后,榆神矿区的详查工作历尽曲折,直到1998年在国家开发银行支持下,才完成“先期开发区”460 km²的详查。2005年完成3期规划区详查。之后,榆神矿区各区块详查陆续完成。

沙漠地区煤田综合勘查技术创新,源于20世纪90年代初期185队和物测队合作开展的大柳塔井田等综合勘查工作。20世纪90年代中期开始,随着煤田开发,对地质条件查明程度的要求逐渐提高。面向这些需求,

进一步利用地震勘查技术,查明了煤层及其顶界面起伏形态、突水含水层厚度及空间形态、风化基岩分布范围及形态、烧变岩边界及含水性等地质条件,解决了煤矿安全生产中的一些地质难题,初步形成了“透明地质”的雏形。

1995年开始,原煤炭工业部等部委部署榆神矿区的详查,但由于资金缺乏,一直没有安排榆神矿区详查。为此,185队、物测队提出了地震、磁法、钻探、采样测试等相结合的“综合勘查”思路和方法。其中,地震勘查技术解决煤层的连续性及厚度变化趋势,磁法技术解决榆神矿区东部边界的烧变岩边界、烧变岩富水性等问题,少量控制性钻孔一方面验证地震、磁法勘查成果,一方面完成煤质、岩石物理力学样品采集,从而以最小的投入,取得最大的地质效果^[13]。这一成果获2005年度陕西省科学技术一等奖,主要获奖人是王双明、范立民、王国柱等。与其他成果一起,形成了比较完善的煤田综合勘查技术体系^[49]。

3.4 矿井透明地质保障技术与实践

“透明地质”^[50]是近年来的一个新概念,也是基于大数据技术发展的新方向。20世纪90年代,以彭苏萍为代表的煤田地质科技工作者,就注意到矿井地质保障技术及其精细化勘查难题,并通过理论创新和工程实践,形成了符合中国复杂地质条件的矿井地质保障科学技术体系,有效指导了煤矿安全生产,避免了大量事故发生,提高了生产效率^[51-53]。王国法等^[54-55]基于神府煤田榆家梁煤矿的典型案例,提出了构建基于时空数据模型的智能自主割煤工作面无人化开采模式,融合多源异构地质数据建立智能开采工作面多属性地质数据库,构建基于绝对坐标的43101工作面高精度时空地质模型,并基于时态地理信息系统平台(4DGIS)进行三维地质模型可视化,实现地质模型的任意剖切,结合随采地质雷达获取煤厚、煤层顶底板和煤岩界面数据进行动态修正,实现基于高精度地质模型的采煤机自主截割。

神府煤田1987年开始建设,1996年1月6日第一座现代化煤矿(大柳塔煤矿)建成投产。大柳塔煤矿投产前的试采综采工作面所在1203盘区,由范立民、任安生负责,曾经进行了全方位的“透明地质”勘查评价工作。该盘区共设4个综采工作面,开采1²煤层,煤层厚度3 m左右,一次采全高。根据煤层厚度、覆岩厚度及物理力学性质、松散沙层厚度、含水层厚度及富水性、1²煤层开采导水裂隙带发育高度等因素进行综合评价,划分出不宜综采区、不安全区和相对安全区,同时提出了相应的工程措施。随后,大柳塔煤矿根据此建议采取了工程措施,保障了试采工作面的顺利开采。由此可见,该项目要深入解剖盘区地质条件、开采技术条

件,实现盘区地质条件“透明化”。

之后的 30 多年来,神府煤田大部分综采工作面均采用这一技术方法,在采前进行补充勘探和评价,划分区域,分区施策,形成了透明地质最早的勘查评价模式。近年来,程建远^[56-57]、刘再斌^[58]、夏玉成^[59]等明确提出了“透明地质”的概念及科学内涵,在部分矿井构建了透明地质大模型,为煤矿智能化开采提供了地质保障。

3.5 煤田勘查技术创新的展望

随着神府煤田大规模煤炭资源勘查工作结束,地质勘查工作的主要任务转向到服务于矿井生产,而智能化矿井建设更需要高精度的透明地质条件支撑。因此,未来神府煤田地质勘查,要向多手段、高精度方向发展。重点是查明各类隐蔽致灾地质因素,查清落差很小的断层、煤层小范围的冲刷带、煤层厚度及底板起伏、岩性的厘米级勘查与精细控制,煤层自燃边界和剥蚀边界等各类边界的米级控制,并建立透明地质模型,为智能化开采提供高精度地质保障。

4 保水采煤科学理念提出及实践

1985 年 6 月 15—16 日,时任中共中央总书记胡耀邦同志视察神府煤田,为神木市题词“开发地下的黑色宝库,建设地上的绿色长城”。这也是国家对神府煤田开发的期待。为此,煤田开发初期,笔者亲眼目睹了煤田采掘引起的水位下降和生态环境问题,关注到水资源保护对绿色开发的重要性,保水采煤应运而生。

4.1 保水采煤科学理念的提出

1990—1991 年,笔者在煤矿补充水文地质勘查中发现,神府煤田磁窑湾煤矿突水溃沙后,突水点上方的植被死亡枯萎,突水点下游的饮马泉流量衰减并干涸,突水点附近的顺沟渠水库也同期干涸。分析认为,这些现象是突水溃沙引起这一区域萨拉乌苏组水位下降所致。1992 年笔者发表论文,明确提出了煤田开发必须保护好萨拉乌苏组地下水的科学理念^[7]。

1994—1995 年,笔者两次提出开展陕北侏罗纪煤田水文地质环境综合研究的项目建议书,但未获上级勘查主管部门批准。然而,这一建议引起了中国煤炭地质总局叶贵钧教授的关注,在他的力荐下,列入原煤炭工业部“九五”重点科技攻关计划,由中国煤炭地质总局牵头,185 队、中国矿业大学共同攻关。确定的题目为《中国西部侏罗纪煤田(榆神府区)保水采煤与地质环境综合研究》,这是第一次使用“保水采煤”一词。该项目系统研究了萨拉乌苏组、烧变岩含水层分布及富水性,研究了煤层上覆岩土层结构、研究了 2² 煤层开采对萨拉乌苏组含水层的扰动机理,首次划分了保水采煤地质条件分区,奠定了保水采煤研究的基本思路和方

法,也为后续的榆神矿区规划提供了重要参考资料。

值得提及的是,在该项目研究过程中,笔者提出,对于红碱淖内流区不做评价,也不支持开发。30 年来的实践证明,陕西省有意无意地采纳了这一建议,在红碱淖内流区没有批准建设煤矿。

4.2 保水采煤的实现途径

2005 年,笔者提出通过合理选择开采区域和采用合适的采煤方法,实现保水采煤的途径。20 多年来,这一“实现途径”仍然没有改变,而且也是唯一的选择。

4.2.1 合理选择开采区域(规划问题)

合理选择开采区域,就是要在查明地质条件基础上,基于含水层结构保护需求,开展区域性煤炭工业大规划^[60]。其中,采煤对含水层结构扰动强烈且无法通过工程措施减损的区域,规划为禁采区;虽然采煤对含水层结构扰动强烈,但可以通过工程措施减损,并保障生态水位合理埋深的区域,规划为限制性开采区;采煤对含水层结构扰动轻微或无扰动的区域,规划为鼓励开采区。

按照上述思路,重新审视神府煤田开发规划,合理确定神府煤田开发总规模,不能无限制地扩大产能。2014 年,笔者参加谢克昌、彭苏萍等牵头开展的“能源金三角”发展战略研究,对榆林、鄂尔多斯、宁东三地在现有技术和水资源条件下的最大煤炭产能进行了论证,提出了“金三角”区域原煤生产总规模宜控制在 10 亿 t/a 左右^[61-64]。近年来,随着保水采煤技术的推广应用^[65]和其他节水、调水措施实施,生产总规模可适度扩大,但多大合适,暂时没有科学论断。因此,应开展一次系统的调查评价,优化区域性煤炭开发规划,合理确定开发规模和矿井布局,减轻减缓采煤对含水层结构的扰动,有效管控地下水水位。

4.2.2 采用合适的采煤技术方法(保水采煤技术)

2005 年,笔者提出“采用合适的采煤方法”实现保水采煤目标,通过调整采煤方法,减少对含水层结构的损伤。2011 年以来,笔者团队及各煤矿企业通过大量工程实践,研发了多种保水采煤技术,并不同程度地得到推广应用。张家峁煤矿为了保护常家沟水库地表水,在工作面与水库之间通过帷幕注浆保水技术,实现了保水采煤目标和煤矿安全。柠条塔煤矿为了保护封闭状烧变岩含水层,也采用了帷幕注浆技术,将烧变岩含水层与采煤产生的导水裂隙带隔离,实现保水目标。西湾露天煤矿东边帮外是富水性强的烧变岩含水层,露天开挖后,烧变岩水通过东边帮渗漏,该矿采用封堵方法保护了强富水的烧变岩含水层。榆树湾、杭来湾煤矿均采用了分层限高保水开采技术,前者已开采 20 个工作面,后者在 301 盘区开采了 10 个工作面,都实现了萨拉

乌苏组地下水水位的稳定控制。榆卜界、金牛、永乐等地方煤矿，采用连采连充保水采煤技术，煤层采出率提高到95%以上，萨拉乌苏组地下水水位稳定管控在原有状态^[11,66-67]。

4.3 保水采煤研究主要进展

4.3.1 早期煤炭开采引起的地下水问题

神府煤田开发初期，主要以窟野河流域浅埋煤层开采为主。这一区域煤层埋深100 m左右，最深不足300 m，开采过程中导水裂隙带直接发育到地表，造成了第四系地下水水位大幅度下降，部分区域水位下降幅度超过15 m，甚至疏干第四系地下水，引起泉眼、民井、小溪断流干涸。早在20年前，笔者根据零星调查资料，就提出了一些意见和建议^[68-69]，如暂停在窟野河流域新设立采矿权，现有采矿权应通过调整优化，大幅度减少中小型煤矿(≤ 120 万t/a)，同等产量下，减少开采面积，以减小对含水层结构的扰动。

2015年在陕西省财政支持下，笔者主持开展了神府煤田8 910 km²的全域水文地质调查。通过与煤田开发前数据对比，发现1994年前调查区分布有泉(群)2 580处，流量为4 997.059 7 L/s。而2015年残存泉(群)376处，总流量996.392 L/s^[70]。潜水水位变化方面，调查区73.0%的区域地下水位未发生明显变化，但有7.3%区域地下水位下降幅度超过8 m，尽管比例小，但面积达758.9 km²，高强度采煤是造成水位下降的主要因素^[71]。同时，水位下降引起了湿地、水体面积萎缩和减小^[72]。

研究发现，造成上述现象的主要因素，是窟野河流域地下水循环深度较浅。煤炭开发前，地下水循环的主要底界面是第四系底部隔水层(基岩顶界面)以上。煤炭开采后，地下水循环深度增加，循环速度减缓，循环的底界面延深到各煤层开采的工作面底部^[73]。

4.3.2 生态水位及合理埋深

2006年，杨泽元等^[74]针对榆神矿区沙漠地貌条件，在野外监测和试验研究基础上，以沙柳、沙蒿、小叶杨、旱柳4种典型植被为例，揭示了沙漠区基于生态安全的地下水位埋深阈值，定义了生态水位概念及合理埋深。随后，笔者团队^[75-76]在新一轮神府煤田保水采煤综合研究过程中，采纳了这一结果，并确定为矿区规划和煤矿开采应遵守的水位保护“底线”，即控制沙漠区地下水水位埋深在1.50~15 m范围内，最佳水位埋深是1.50~5.00 m。生态水位及合理埋深研究，体现在《鄂尔多斯盆地生态脆弱区煤炭开采与生态环境保护关键技术》项目中，该项目同时揭示了煤-水地质特征及组合类型，研发了固液耦合模拟实验装置和导水裂隙带高度实测技术，编制了我国第一幅采煤方法规划图，系统解决了

高效高回收率采煤与生态环境保护并重的技术难题。该项目成果荣获2011年度国家科技进步奖二等奖，获奖人员有王双明、范立民、黄庆享等。

4.3.3 围岩控制及导水裂隙带发育高度

神府煤田煤炭开采对含水层结构的损伤集中反映在顶板破坏高度上，围岩控制无疑是顶板减损的关键技术。导水裂隙带发育高度是保水采煤研究和工程实践的一个关键参数。20世纪70年代以来，煤炭科技界针对我国东部煤田开发大量实测资料基础上，建立了导水裂隙带预测的经验公式^[77]，有效指导了适合当地地质条件和开采技术方法的采动损害控制、煤矿水害防控。

随着神府煤田开发，采煤工作面尺寸不断增大，一次开采的高度也逐渐加大。从1996年大柳塔煤矿投产时的一次采高4~5 m，到2008年神府煤田毗邻的上湾煤矿一次采高8.80 m。2022年以来，康红普等研制了一次采高10 m的特大采高综采工作面，并在曹家滩煤矿投入生产，取得良好效果。围岩控制、顶板损伤及监测、含水层结构损伤及监测等数据齐全，获取了一系列导水裂隙带发育高度的数据^[78-79]。

针对神府煤田导水裂隙带发育高度，不同学者建立了不同的预测模型。赵兵朝^[80]基于室内模拟实验，提出了基于概率积分法的浅埋煤层开采导水裂隙带最大发育高度预测模型。张杰^[81]以神府煤田浅埋煤层为例，研究了长壁开采工作面间歇式开采条件下，顶板围岩稳定性、关键层演化及裂隙带演化规律，为浅埋煤层保水开采提供了理论基础。浦海^[82]构建了隔水关键层模型，分析了长壁开采条件下隔水层隔水稳定性问题，揭示了隔水关键层渗流条件，为神东矿区保水采煤提供了基础。夏玉成等^[83]研究了榆神矿区采动条件下渗流场、应力场演化机理和防控机制，预测了不同开采力度时的地下水流场演化规律，为榆神矿区规划和科学开采提供了重要依据。

1998年，笔者^[84]主持实施了神府煤田第一个综采工作面的导水裂隙带钻孔探测，实测了浅埋煤层开采导水裂隙带发育高度。随后，以185队为主的地质勘查单位，在神府煤田各大型煤矿探测了上百个综采工作面的导水裂隙带发育高度，建立了适合神府煤田地质及开采条件的导水裂隙带发育高度经验公式，写入DB61/T 1295—2019《保水采煤技术规范》。近年来，导水裂隙带预测技术不断完善，以关键层理论为指导的理论计算、模拟等较好地预测了煤层开采覆岩裂隙发育规律^[85-87]，有效指导了含水层结构保护的采煤区域选择、采煤方法改进，形成了T/GRM 056—2022《煤矿导水裂隙带探测技术规范》。针对部分煤矿，陈海富以榆树湾、银河煤矿为原型，通过现场调查和室内模拟，提出了不同采

高条件下导水裂隙带发育高度,将榆树湾煤矿 20116、20118 工作面开采高度从原计划的 5.10 m 提高到 5.80 m。银河煤矿 30305、30306 工作面采高从 5.50 m 提高到 6.50 m。煤炭采出率分别提高 13.7% 和 18.2%。通过对 4 个采煤工作面上方潜水水位的监测,年变幅未超过 0.50 m,均实现了保水开采目标^[88]。

4.3.4 保水采煤地质条件分区

保水采煤地质条件分区是矿区规划的基础。1998 年,笔者参与完成的原煤炭工业部“九五”重点科技攻关项目,首次划分了保水采煤地质条件分区。2003 年,为了落实陕西省发展和改革委员会指示,服务于国家煤液化工程项目选址需求,对神府煤田保水采煤地质条件进行分区,在此基础上 2008 年重新划分了分区,编绘了我国第一幅基于生态水位保护的区域性采煤方法规划图,划分出无水开采区、限制开采区、限定开采区和自然开采区,对应长壁综采区、长壁限高综采区、长壁限定开采区、无水综(开)采区^[11,65]。李智学^[89]对榆神矿区进行了划分,划分方法及分区结果与以往划分没有实质性差别。

2017 年以来,笔者两次修订保水采煤地质分区图,完善了分区的指标体系,划分出转移储存保水区(地下水库保水区)、裂隙自修复保水区、工程措施保水区、原位自然保水区和无水开采区。这一划分更符合神府煤田地质条件、开采实际和采动后修复。“保水采煤技术”由此获 2024 年度中国煤炭工业协会技术发明一等奖,获奖人有范立民、马立强、李涛、蒋泽泉等。

4.3.5 含水层再造与隔水层再造

含水层再造是笔者与张发旺几乎同时提出的新观点^[39,90]。2006 年,笔者在《煤炭工程》发文,提出了利用废弃后采空区,进行密实、封堵等人工干预措施,形成新的含水层。张发旺在同期出版的专著中也论述了含水层再造问题。

2017 年,李文平等^[91]提出了隔水层再造的技术构想,发现 N₂ 红土隔水性能受采动破坏后,具有很好的自我恢复功能,并从其地质结构组成、水-土相互作用及其流变特性方面,解释了隔水性自然恢复机理;由此提出隔水层再造及其应具备的主要工程地质属性。李涛等^[92]开展了一系列 MICP(微生物诱导碳酸钙沉积)再造隔水土层室内实验研究,0~20 ℃ 常温条件下保育 3 个月再接种后的微生物样品活性有一定影响,但仍可用于采动土体裂隙修复。蒋泽泉等^[93]研究了神府煤田红土隔水层的隔水性能及采动条件下的隔水性变化规律,为隔水层再造提供了思路和方法。

2020 年以来,武强、曾一凡等^[94]在榆神矿区曹家滩煤矿的 2 个采后工作面实施“隔水层再造”工程试验,

取得良好效果。

4.3.6 保水采煤标准体系构建及进展

2017 年 11 月 3 日,钱鸣高院士在给笔者的电子邮件中,希望尽快制定保水采煤领域标准规范,满足煤炭行业水资源保护的标准供应需求。为此,笔者^[95]主持制定了我国第一个保水采煤领域陕西省地方标准 DB61/T 1295—2019《保水采煤技术规范》,填补了空白。发布后,内蒙古、山西、宁夏等省/自治区的煤矿企业以及自然资源、生态环境、水利、能源等部门提出,可否制定一个适合全国的保水采煤技术标准,满足其他省区的标准需求。为此,为了尽快满足需求,2022 年制定了团体标准 T/GRM 054—2022《保水采煤技术规范》、T/GRM 056—2022《煤矿导水裂隙带探测技术规范》。2023 年制定了 T/GRM 078—2023《保水采煤术语》等标准,初步满足了社会需求。同步启动了国家标准研制,2023 年 8 月 6 日国家标准化管理委员会批准了笔者提出的推荐性国家标准《煤矿区含水层结构保护技术规范》(计划号: 20230899-T-334) 制定计划,2024 年 6 月通过全国自然资源与国土空间标准化委员会组织的评审,进入报批阶段。在这个标准中,首次定义了“含水层结构”的概念。即“目标含水层的空间展布形态、导水、阻水性质及其赋存环境”。而“目标含水层”是指煤炭开采过程中应保护的含水层及其赋存环境。

推荐性国家标准《煤矿科技术语 保水采煤》也在积极推进中。至此,保水采煤领域的标准体系初步形成。

4.3.7 地下水水位管控监测预警网

2018 年,陕西省煤矿地下水监测网建设列入省级基建工程。通过 1 a 建设,笔者主持建成了涵盖陕西境内所有煤矿和煤炭规划区的地下水监测预警网,每个煤矿至少有 1 个监测站点,开发了监测预警信息平台,实现了煤矿区主要含水层地下水水位实时动态监测监控^[96-97]。随后,部分国有煤炭企业加密了其所属矿区的监测站点,如陕煤集团所属红柳林、柠条塔、张家峁 3 个煤矿,在 400 km² 范围内,设置了 64 个地下水监测站点和 8 个地表水监测站点,实现了“全域覆盖”的监测网^[98]。2024 年 5 月以来,笔者团队骨干成员孙魁、彭捷等对神府煤田的 121 个省级监测站点进行了统一维护和修缮,确保监测站点正常运行和数据采集。

4.3.8 政策法规鼓励推广“保水采煤技术”

保水采煤从 1992 年提出到 2010 年初步应用、2015 年后煤炭企业主动作为并推广应用,至今已经走过了 30 多年历程。2013 年以来,国家层面、省级政府层面的有关文件、地方性法规等不同程度地要求推广应用保水采煤技术。2015 年,国家税务总局还出台了利用充填保水采煤技术的矿井,给予一定的退税优惠,

有效促进了保水采煤技术的推广应用。

《国家能源发展十二五规划》(2013年1月国务院发布)将保水采煤技术列为重点推广的新技术。2014年6月《国务院办公厅关于印发能源发展战略行动计划(2014—2020年)的通知》文件的第二部分“主要任务”中,明确要求“推广充填、保水等绿色开采技术”,再一次将保水采煤技术列入国家战略规划。

2020年《中华人民共和国煤炭法》修订稿中增加了“国家鼓励因地制宜采用保水开采等绿色开采技术”等内容(尚未发布)。

2020年陕西省人大常委会新修订的《陕西省煤炭石油天然气开发环境保护条例》,增加了“合理选择煤炭、石油、天然气开采区域”等体现保水采煤(石油天然气)理念的表述。

2022年11月23日内蒙古自治区人大常委会发布的《内蒙古自治区煤炭管理条例》第十四条明确:鼓励采用保水开采、充填开采等绿色开采技术。

2022年12月30日贵州省人民政府发布的《贵州省能源领域碳达峰实施方案》(黔能源发[2022]15号),提出“因地制宜推进保水开采、先采气后采煤、矸石不升井等绿色开采技术。”

4.3.9 保水采煤科学技术体系

近20年来,保水采煤技术快速发展,理论体系不断完善,技术种类逐年增加。缪协兴等^[99]在2007年以神东矿区为例,研究了浅埋煤层的保水采煤方法。李涛^[100]、马立强^[101]、张东升^[102]等揭示了高强度采煤的保水采煤机理,提出了煤-水协同开发的技术路径和实现方法。范立民等^[103]精选全国范围内13处典型案例,涵盖了煤层顶板、底板含水层结构保护,露天煤矿外围含水层结构保护和矿区地表水保护等,同时介绍了保水采煤技术方案编制方法,为形成完善的保水采煤理论技术体系、工程实践奠定了基础。

2022年,经中关村绿色矿山产业联盟推荐,中国矿业大学保水采煤创新团队的“综合保水采煤技术”入选自然资源部《矿产资源节约和综合利用先进适用技术目录(2022版)》,包括含水层扰动评价、导水裂隙带发育高度预测、保水采煤地质条件分区、限高保水采煤、壁式条带充填保水采煤、连采连充保水采煤、注浆保水采煤、固体充填保水采煤等8项技术。至此,构建了比较完善的保水采煤科学技术体系,工程应用也取得显著成果。

4.4 保水采煤技术研究展望

30年来,我国保水采煤技术研究和工程实践取得丰硕成果。但是,采煤技术不断进步,开采工作面尺寸逐渐增大,采高从20世纪80年代的3.50 m增加到

2010年前后的8.80 m。随着采高的不断加大,采动损害也随之变化,不同采高条件下顶板、底板含水层的扰动机理和程度仍然是保水采煤面临的难题。为此,以矿区地下水水位管控、生态环境保护为目的,以含水层结构保护为目标,仍然需要在以下几个方面进行科技投入和应用。

(1)植被多样性与生态水位的合理埋深。2006年杨泽元等揭示的沙柳、沙蒿等4种神府煤田沙漠区典型植被,适宜的生态水位埋深是1.50~5.00 m。但神府煤田沙漠区的植物远不止这4种,杜松、臭柏等保护区被划定为禁采区,还有大量植物、农作物等,如何满足植物多样性条件的最佳地下水水位埋深,仍然是保水采煤领域亟待研究的课题。

(2)受保护含水层的高精度刻画与描述。神府煤田发现40多年来,笔者及185队先后编制过多个版本的萨拉乌苏组厚度、含水层厚度等值线及富水性分区图。近年来,随着勘查程度的提高,积累了丰富的数据和资料,尤其是煤炭开采区,实施了一大批钻孔。搜集、分析整理这些数据,对萨拉乌苏组、烧变岩、洛河组、直罗组、风化基岩等富水性中等及以上的含水层进行系统研究,深入剖析煤层与含(隔)水层的组合关系、空间发育与分布特征,确定具有生态价值和供水价值的含水层,研究现代采矿技术条件下保水采煤分区指标体系和分区方案,也是亟待完成的基础工作。

(3)大采高条件下的采动损伤机理及防控技术。随着采矿技术的进步,采动损伤规律也会随之发生变化。目前大采高已经成为神府煤田中深部矿区开采的首选技术。因此,大采高条件下,采动损伤机理、顶板基岩破坏高度亟待积累数据,进行综合研究。同时,根据大采高条件下采动损伤机理和各矿井地质条件,制定切实可行的含水层结构损伤防控技术,也是保水采煤面临的重大难题。

(4)低成本高效率的绿色充填保水开采材料工艺与装备。充填保水采煤技术被认为是最彻底的含水层结构保护终极技术。但存在诸多难题,一是经济可行性,亟待研发低成本的充填材料、充填工艺和装备;二是技术可行性,亟待研发单面年产1 000万t以上的随采随充充填技术与装备;三是环保可行性,亟待研发不损伤地表环境的充填技术、不污染地下充填层位岩层和水的充填材料。因此,低成本高效率的绿色充填保水开采材料工艺与装备,仍然是亟待解决的重大难题。

(5)地下水水位管控的监测预警网建设与运维。2018年,笔者团队主持建成神府煤田地下水监测预警网和信息平台。但运行以来,发现监测站点偏少,部分监测站点无法监测到煤矿开采对地下水位的扰动效应。

因此,进一步优化、加密、完善监测站点部署和系统功能,更新提升监测数据采集、自动分析与报告等功能,建设智能化地下水监测预警系统^[104],无疑也是保水采煤面临的重大建设工程。

5 矿井地质灾害防控与生态修复

5.1 突水溃沙灾害

突水溃沙是神府煤田浅埋煤层开采最早出现的煤矿地质灾害,也是最早通过工程措施防治成功的矿井地质灾害。

5.1.1 挖进中搁浅的磁窑湾煤矿

1990年4月20日和12月28日,神府煤田磁窑湾煤矿(设计能力45万t/a)在巷道掘进过程中发生了2次冒顶事故,大量的萨拉乌苏组粉细砂涌入巷道,造成这个建设中的煤矿搁浅。笔者当时正负责前石畔井田水文地质工程地质勘探,磁窑湾煤矿位于该井田范围内。事故发生后,通过补充勘探和抽水试验,发现掘进巷道处煤层顶板基岩最薄只有3.71m,导致顶板裂隙与松散的萨拉乌苏组含水层贯通,在强大的水动力作用下,两次涌入巷道的沙子达到10 000 m³以上,造成巷道被埋,煤矿停建^[7]。为此,浅埋煤层突水溃沙灾害防控,成为神府煤田开发初期面临的重大技术难题。

5.1.2 突水溃沙灾害防控工程实践

随着神府煤田开发进程加快,突水溃沙防控也成为建设者的重要任务。1995年2月28日晚,原华能精煤公司生产处(神东矿业集团公司生产处)紧急召集185队研讨即将投产的大柳塔煤矿20601综采工作面突水溃沙防控难题,笔者提出可以通过控制水动力的方法来控制突水溃沙灾害。为此,精煤公司委托185队承担这一任务,在20601工作面切眼附近一带部署强排水钻孔,同时在井下实施泄水钻孔,将工作面切眼及附近区域地下水水位降到基岩界面以下,防止突水溃沙。1995年3月—8月工程实施,8月13日开始回采,到8月29日第一次放顶,没有发生突水溃沙,首次突水溃沙防控措施取得圆满成功^[105-107]。这一技术措施,解决了影响神府煤田安全开采的重大技术难题。

项目实施过程中,将从20601工作面上覆萨拉乌苏组含水层抽取的地下水和矿井井下排出的矿井水,异地排放到母河沟泉域补给区,利用沙层对矿井水的净化机理^[108],补给母河沟泉域地下水。这一异地存储,形成了神府煤田另外一项煤炭开发地质保障技术——地下水异地存储技术,为我国西北缺水矿区水资源保护提供了新路径。30多年来,区内浅埋煤层开采一直采用这一技术防控突水溃沙灾害,取得重大经济社会效益。

5.1.3 突水溃沙防控的基础研究

2013年,国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“西部高强度采煤条件下地质灾害与环境保护基础研究”(2013CB227900)启动,旨在深入研究西部侏罗—白垩系富煤区域地层结构和水沙动力学特征,科学分析采动岩体结构关键层、隔水关键层以及水沙两相渗流的稳定性,揭示高强度开采下突水溃沙等重大地质灾害和环境损伤的形成机理,提出预测和评价方法。通过本项目研究,揭示了富煤区域地层结构及水沙动力学特征。

基于采动岩体力学行为研究,揭示了大面积顶板切落、突水溃沙等地质灾害的发生机理,形成了防治突水溃沙等重大地质灾害与环境损伤的采煤理论和方法^[109-113]。以多因素融合为基础的突水溃沙评价研究,在突水溃沙机理分析的基础上,讨论了突水溃沙灾害形成的影响因子,选取沙层厚度、含水层富水性、有效隔水层厚度和采动空间等作为研究榆神府矿区突水溃沙的关键因素,编制了无量纲图,采用熵权法确定了各因素的权重,在GIS平台下构建了基于多因素融合技术的榆神府矿区突水溃沙评价模型,以此为基础对榆神府矿区突水溃沙危险性进行综合分区,经验证,评价结果较为合理,构建的评价模型适用于榆神府矿区突水溃沙危险性评价^[114-115]。

5.2 矿井水害防控

5.2.1 主要突水含水层及突水水源识别

神府煤田发现初期,在神木北部矿区各井田勘探阶段,哪些含水层是矿井突水的主要水源,有不同认识。韩树青等认为,萨拉乌苏组和烧变岩是矿井突水的主要水源,井田勘探阶段主要工程量应投入到这两个含水层中,延安组及上覆直罗组富水性微弱,不是矿井涌水的主要水源,也难以对矿井产生威胁。另一种观点以原陕西省矿产储量委员会水文地质专业主管刘岳松为代表,观点恰好相反,认为直接充水水源是延安组各煤层的顶板砂岩,应重点查明。

为此,1990年4月20—23日,根据刘岳松的建议,185队在西安召开了一次神府煤田水文地质问题咨询会。邀请中国地质科学院岩溶研究所崔光中研究员、长安大学李俊亭教授、煤炭科学研究总院地质勘探分院李竞生研究员等5位专家进行研讨。185队白宗镛队长主持会议,笔者参加会议。杨保国工程师以石圪台井田为例,汇报了神木北部矿区水文地质条件,通过三天研讨交流,形成一致意见,同意韩树青等人的观点,神木北部矿区未来矿井充水的主要水源是萨拉乌苏组和烧变岩,在勘查过程中,应重点查明^[116]。专家们同时指出,随着勘查程度的深入,可能还会有新的发现,应随时关注其他富水性中等以上的含水层,尤其是大面积分布的中等富水性含水层。

随后的30年,这一观点一直指导着神府煤田水文地质勘查工程部署。然而,煤炭开采过程中,尤其是2006年锦界等矿区南部的几处大型煤矿投产后,遇到了直罗组、延安组风化基岩含水层突(涌)水现象,形成了矿井涌水量大的矿井,并发生过突水事件。红柳林、柠条塔等煤矿为此设立水文地质专项,在其矿业权范围内进行了大量勘查、研究,查清了矿业权范围内的水文地质条件。但直罗组、延安组风化基岩弱富水含水层的持续供水能力特别强,具有源源不断的供水潜力,其地下水补给径流排泄条件似乎并没有查明。2020—2022年,笔者团队从区域上进行了系统研究,首次揭示了直罗组砂岩含水层、延安组风化基岩含水层的水文地质条件,提出了直罗组弱富水含水层持续供水机理和防控措施^[117-122]。根据矿井水与各含水层中微生物种群特点,在分析矿井涌水量特征的基础上,采集了区内主要含水层和矿井涌水点的30个水样,开展了水样高通量微生物测序研究。对测序结果采用Alpha多样性分析、Beta多样性分析及微生物构成差异分析,系统研究了矿井水体中微生物群落特征,揭示了榆树湾矿井充水水源主要来自萨拉乌苏组和直罗组含水层^[123]。

多年来的研究和实践表明,神府煤田在浅埋煤层赋存区,矿井充水的主要水源是萨拉乌苏组、烧变岩含水层地下水;在中深埋煤层分布区,直接充水水源主要是直罗组砂岩、延安组风化基岩含水层。在井田勘探及生产过程中,应进一步加强水文地质勘查研究,达到《煤矿防治水细则》提出的“勘探清楚”这一目标^[124],才能准确判断直接充水含水层和矿井水主要来源。

因此,在防治水领域,一是要精细化开展含水层、隔水层识别,科学划分含水层及其赋存的空间范围,精细探测获取含水层的水文地质参数,较准确地预测采煤工作面的涌水量(误差≤10%);二是要精细探测煤层顶板覆岩结构类型及工程地质参数,研究关键层、亚关键层的发育特征及采动损伤机理,提出基于矿井水源头减水的防治水路径和技术方案。

5.2.2 矿井突水危险性预测与评价

近年来,我国煤矿防治水取得重大突破,在煤矿水害防控、水资源利用与保护等方面,都取得重要进展^[125]。神府煤田煤矿水害以顶板水为主,矿井突(涌)水的主要水源一是第四系萨拉乌苏组,二是烧变岩,三是煤层顶板的风化基岩和直罗组巨厚砂岩含水层。其中萨拉乌苏组为突水水源的矿井,主要分布于窟野河上游的乌兰木伦河流域、秃尾河流域,包括神木北部矿区石圪台、哈拉沟、大柳塔煤矿一带及神府南区柠条塔、红柳林一带,即神府新民矿区大部分矿井。烧变岩为突水水源的矿井,主要分布于各大沟谷沿岸烧变岩分布区(图1)。

风化基岩和直罗组巨厚砂岩含水层为突水水源的矿井,主要分布于神府南区柠条塔煤矿南翼、红柳林、锦界煤矿以及榆神矿区小保当、曹家滩、榆树湾、金鸡滩、杭来湾等大型矿井和榆横矿区小纪汗矿井等。前两类矿井的特点是瞬时涌水量巨大,来势凶猛,但涌水量衰减较快,持续时间短。第三类矿井的特点是涌水量稳定,持续时间长,甚至伴随着矿井生产的全过程,往往形成大水(涌水量大于1000 m³/h)矿井,矿井水根治的难度较大。针对神府煤田以顶板水害为特点,近年来,大部分矿井采用武强发明的三图-双预测技术方法^[126],进行了突水危险性预测和分区,按照分区特点,进行有针对性的施策,取得良好效果,有效指导了煤矿水害防控,神府煤田开发以来,未发生重特大煤矿水害事故。

但,不可否认,神府煤田浅埋煤层开采区突水危险性较大,早期多以疏干地下水的方式防控,但一直没有进行区域性突水危险性评价,部分矿井也由此付出惨重代价。如,郝家梁煤矿就因为没有科学评价突水危险性,在突水前兆明显条件下判断失误,造成突水溃泥事故,5人遇难。

查阅大量资料发现,在突水危险性评价方法方面,尽管有大量文献述及,但缺乏煤矿突水危险性评价的标准^[127]。为此,笔者2023年主持制定了T/GRM 074—2023《煤矿突水危险性评价规范》,对煤层顶板、底板突水危险性评价均给出了具体的评价方法。

建议相关部门按照煤矿隐蔽致灾因素管理的有关规定,组织开展一次神府煤田区域性的突水危险性评价工作,找出突水危险性大的区域,有针对性地采取措施,确保煤矿安全和地下水系统保护。

5.2.3 矿井水害防治技术进展

在煤矿水害的工程措施防止领域,我国科技人员近年来进行了大量创新实践,研究了矿井水害形成机理和防控技术,解决了神府煤田各类水害治理难题^[128-131]。发现了富水煤层,提出了以煤层水突水的水害防控技术方法,在巴拉素煤矿等进行工程应用,取得较好效果^[132]。揭示了烧变岩水害突水机理和过程,研发了以帷幕注浆为主的烧变岩水害防控技术方法,一方面,保护了烧变岩含水层结构不受采动损害,实现了保水采煤目标。董书宁、姬中奎等还针对封闭状烧变岩强富水含水层水害进行了帷幕注浆治理^[133-135]。另一方面,保障了煤矿井下安全,未发生突水事故和灾害,实现了安全生产。针对榆神矿区普遍存在的井筒突(涌)水、顶板淋水等难题^[136],研发了井筒外围探测-评价-注浆治理-检测一体化的技术方法,在曹家滩煤矿主副斜井井筒治理中得到成功应用,使斜井井筒涌水量从97 m³/h以上降低到10 m³/h以下,同时保障了井筒井壁稳定^[137]。

5.2.4 深埋区水害防控的误区及科学防控方法

神府煤田煤层埋藏深度较大区域,防治水工作长期存在一定的误区。

一是,没有查清矿井水来源的含水层及其水文地质条件。如秃尾河以西的广大区域,分布着一批矿井涌水量大于 $1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 的大水矿井,普遍特点是煤层上覆导水裂隙带没有贯通萨拉乌苏组含水层,矿井水多源于煤层顶板的基岩含水层。但含水层没有查清,也没有研究清楚。2024年笔者剖析了《煤矿防治水细则》提出的“勘查清楚”的科学内涵及应该达到的查明程度,指出要查清含(隔)水层的几何形态、物质组成、内部结构构造、煤层与含(隔)水层空间组合关系、地下水形成与演化机理等,才算“勘查清楚”^[124,138]。根据“勘查清楚”的水文地质条件和矿井设计,科学划分煤矿防治水的“三区”,提出源头减水技术措施^[139],才能实现水害的有效防控。因此,绝大部分矿井没有达到这一要求,即使进行了水文地质补充勘探,也未必达到这一目标。所以,矿井水的源头控水减水,也只是纸上谈兵。

二是,弱富水或中等富水的直罗组含水层采动条件下的释水机理不清。直罗组厚度大,但并非全组含水,上段在神府南区为相对隔水层,下段含水,且地下水补给范围极大,采动条件下动水资源丰富,最终导致形成了富水性弱,但持续为矿井采掘空间供水的能力特别强大。为此,认真研究包括直罗组古河道砂岩含水层在内的巨厚砂岩含水层,无疑是神府煤田深部区域开采面临的重要课题。

5.3 地面塌陷与地裂缝防控

煤层采动损害是一个普遍现象,近年来,王双明等从理论上对包括神府煤田在内的煤层采动复合损伤机理和防控技术进行了系统研究,提出了系统性的减损开采技术路径,为神府煤田绿色开采指明了方向^[140-141]。

神府煤田大型煤矿开采的地面塌陷首次出现在大柳塔煤矿1203工作面。1993—1995年,185队对1203工作面进行了采动岩层移动与地面变形监测研究,通过采前的高精度大比例尺($1:1\,000$)地形图测量,采动过程中每周3次进行高精度测量。工作面开采结束后,监测了18个月,直到地面变形停止为止^[142]。通过这次高精度监测,发现地面塌陷、地裂缝发育规律,即地面塌陷范围呈椭圆状,其椭圆的长轴与工作面切眼平行,椭圆形塌陷坑外围顺着采煤推进方向发育半椭圆状的地裂缝。这一规律,被后续30年的多个煤矿监测数据所证实^[143-144]。

5.4 生态修复理念及实施

早期的生态修复方式是人工填埋大的地裂缝、地面塌陷。主要目的是避免人、羊群误入造成伤害。21

世纪以来,生态修复转变为以恢复、改善生态环境为目标的修复模式。

2013年以来,彭苏萍等^[145]聚焦西部煤炭开发中水—土—生态保护这一关键科学问题开展研究,明确干旱—半干旱地区生态修复的核心是水资源保护与利用,构建了地下和露天矿山人工与自然协同的水—土(土壤)—生(生态)立体耦合修复科学理论,在浅埋煤层开采形成的松软裂缝发育区,促进水—土—生(生态)再分配,并利用微生物修复技术,使矿区生态环境持续改善,实现了神府煤田脆弱生态矿区开采“金山银山”,再造“绿水青山”的思维转变。这一理论和技术体系,在大柳塔、石圪台、哈拉沟、柠条塔、张家峁、红柳林、曹家滩等数十处煤矿建成了示范区,取得重大经济社会效益^[14-15]。

在此基础上,范立民等^[146]在红柳林、柠条塔、张家峁等煤矿,构建了涵盖地质环境(地表水、地下水、地面沉降、地裂缝、地面变形等)、生态环境(植被种群、植被覆盖度、植被演替等)、矿区排放物(固体、液体、气体排放物等)等多要素的监测网和信息系统,促进了矿区生态修复效果的实时管控。

5.5 矿井灾害防控与生态修复展望

进一步重视突水溃沙灾害的区域性预测与防控技术问题。先前对榆神府矿区突水溃沙灾害危险性分区的地质数据有限,预测的精度亟待提高。2021年7月15日,榆林市华瑞郝家梁煤矿30108综采工作面发生突水溃泥沙事故,5人遇难。原因在于,30108工作面切眼布置于十八墩河支沟河床下方,该地段3号煤层顶板覆岩结构异常,回采过程中顶板煤(岩)柱失效,采空区顶板局部切落式冒顶,上富含水层及地表水裹挟泥沙溃入工作面。因此,在矿井灾害防控领域,应建立神府煤田地质数据库和灾害智能预测系统,构建涵盖地质勘探数据、采掘揭露数据的大数据系统,将煤层、沙层、含水层、隔水层、岩层、小构造等数据进行分类入库,构建基于采动条件下的突水溃沙灾害、顶板冒落灾害等智能预测模型,实现各煤矿、采区、工作面的精准预测预警,无疑是神府煤田面临的重大课题。

在矿井水害防控方面,目前最主要的是贯彻《煤矿防治水细则》要求,达到“勘查清楚”的目标^[124],科学评价弱富水含水层对矿井水的持续供水能力和防控因素,有针对性地提出多期次古河道砂岩、松散层含水层下煤层开采的防治水技术路径和关键技术。在生态修复领域,研究采动条件下,脆弱生态的自修复功能,充分发挥自修复机理的作用,辅助人工修复,维系原生生态环境系统,适度增加植被覆盖度和开发式修复区,实现矿区持续健康发展。

6 主要启示

神府煤田勘探开发改变了我国煤炭工业战略布局，也为保障国家能源安全做出了重大贡献。回顾40年来神府煤田地质研究和科技创新成就，无疑对今后的煤田地质工作，甚至找矿突破和矿产资源开发，都具有一定的意义。

6.1 科技创新是神府煤田勘探开发进程的主要动力

神府煤田勘探开发的全过程，都闪耀着科技创新的火花和科技创新的巨大推动力。在1980年提出，煤田初期的普查重点在窟野河以东的新民区；以李季等为主的地质工作者，通过艰苦细致的野外调查和对比分析，1980年就提出了神府煤田具有5层连续沉积的煤层，窟野河以西的广袤沙漠下，是煤田分布的主体区域。在普查找煤初期，以白宗镛为主的地质工作者，提出了先分散施工控制性钻孔的意见并得以实施。结合李季的认识，将普查找煤设计的122个钻孔调减到38个，先完成大面积普查，满足国家战略决策需求。科技创新，第一次在煤田普查阶段发挥了不可替代的作用。

随后，185队开展的沉积环境、聚煤规律、孢粉研究，煤炭科学研究院西安分院开展的聚煤规律研究，王双明等完成的全盆地聚煤规律与煤炭资源评价研究，李思田教授团队完成的鄂尔多斯盆地沉积环境与能源矿产赋存规律研究，也进一步证实了早期5层连续沉积煤层(组)，煤层厚度大、稳定性好、连续沉积及在窟野河以西大面积稳定分布等特点。这些科学认识，都极大地指导了勘探工程部署，也被30多年来的勘探、采掘工程所证实。

6.2 产-学-研有机结合是科技创新和产业发展的巨大动力

在神府煤田发现初期，185队王绪柱就提出了进行沉积环境、聚煤规律研究的超前性科研计划，并获得原煤炭工业部支持，列入部二类科研项目。李思田教授团队全程指导了这一项目。该项目最早提出神府煤田延安组主要形成于湖泊三角洲沉积环境的科学认识，揭示了含煤地层沉积和聚煤规律。在后续30多年的勘查、采掘过程中，进一步证实了研究成果的超前性、科学性。

在地质勘探阶段，185队、物测队较早地与中国地质大学、中国矿业大学合作。185队与李思田教授团队共同研究钻孔部署方案，以最佳的钻孔部署和最少的工程量投入，取得最佳地质效果。物测队与中国矿业大学刘天放教授团队等合作，研究沙漠区地震采集、数据处理技术和解译方法，实现了浅层地震勘探的重大突破，成功用地震勘探技术解译了煤层厚度及变化趋势、各类地质界面和岩性，奠定了后续榆神矿区综合勘探技术

创新和大范围推广应用的基础。

在保水采煤研究阶段，1996年立项的“我国西部侏罗纪煤田(榆神府区)保水采煤与地质环境综合研究”项目，主要研究工作由185队与中国矿业大学共同完成，借助了185队的丰富钻孔数据和实践经验，以及185队科技工作者对保水采煤的深刻理解，与中国矿业大学的实验模拟平台结合，实现了第一次保水采煤综合研究的有机结合，为后续深化研究奠定了基础。在保水采煤工程技术措施方面，煤矿企业、地勘单位与中国矿业大学(北京)武强院士团队合作，实现了煤层顶板水害的精准预测、隔水层受损区的隔水性再造、含水层水位恢复等，为生态水位管控提供了技术保障。

在生态修复与矿井灾害防控方面，地勘、煤矿企业与中国矿业大学(北京)彭苏萍院士团队、中煤科工西安研究院(集团)有限公司董书宁研究员团队密切合作，借智推动，助力矿井灾害的超前性预防和生态修复的科学性、可行性，促进了开发式治理和各类水、光、土、岩、生物资源的科学利用，最大程度发挥了各种资源的效益。

特别感谢盲审专家高效率、高质量的评审。由于水平有限，挂一漏万，不妥之处，还望读者批评指正。

后记：185队是神府煤田发现与勘探的功勋队伍，从神府煤田发现到90年代初，涌现出一大批优秀地质工作者。《陕北侏罗纪煤田榆(林)北神(木)西普查找煤地质报告》扉页署名的编写人员是白宗镛、王觉艺、王绪柱、劳炎明、林文英、李季、潘继光、赵洪林、赵文勤、陈全福、王建华、陈其祥、赵云祥、田西平、谢光华、齐龙章、赵文沛、贾小吾、高世贤、任安生、胡瑜生、张晓立、郑国侠、杨克宏、蔡哲、寇文峰、王志中、郭守营、姚建民、寇贵德、李治民、李三原、崔林生、张飞驹、刘世昉、李百忍、齐黎明、华春生、刘金兰、朱金德、沙宽智等。《陕北早中侏罗世含煤岩系沉积环境》一书的作者是王绪柱、王建华、赵云祥、李宝珠、朱玉琴等。《神木北部矿区详查地质报告》主编是林文英，项目负责人是陈全福、刘子勋。神木北部矿区大柳塔、朱盖塔、肯铁岭(现柠条塔煤矿南翼)、柠条塔、石圪台、柠条塔露天区(现柠条塔煤矿南翼北部)、活鸡兔、前石畔(现哈拉沟煤矿)等井田勘探的项目负责分别是田西平、邓韬、谢福源、葛管社、鲁文宇、陈全福、寇文峰、段中会。从找煤报告到神木北部矿区详查、各井田勘探报告，水文地质专业的主要负责人是韩树青、赵洪林、牛建国、杨保国等。测井专业是王汝墀、吴永光等。工程地质专业是赵文沛、段中会。煤质专业是张飞驹、董静、侯飞龙等。测量专业是赵文勤。钻探专业周宗余、唐国贤等。

他们长期奋战野外一线，不计个人得失，淡泊名利，精益求精，无私奉献。1992年1月17日，185队被国务院授予“全国地质勘查功勋单位”。1995年7月3日，原中共中央政治局常委宋平同志在185队大保当工区简陋的活动板房里，听取榆神矿区勘查进展和地质条件汇报后，挥毫为185队题词“艰苦奋斗 献身煤海”。这是对185队全体地质工作者的最高褒扬！

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 王绪柱,赵云祥,朱玉琴,等.陕北早中侏罗世含煤岩系沉积环境[M].西安:陕西科学技术出版社,1989.
- [2] 王双明,吕道生,佟英梅,等.鄂尔多斯盆地聚煤规律及煤炭资源评价[M].北京:煤炭工业出版社,1996.
- [3] 李思田,程守田,杨士恭,等.鄂尔多斯盆地东北部层序地层及沉积体系分析:侏罗系富煤单元的形成、分布及预测基础[M].北京:地质出版社,1992.
- [4] 李思田.含能源盆地沉积体系:中国内陆和近海主要沉积体系类型的典型分析[M].武汉:中国地质大学出版社,1996.
- [5] 李宝芳.鄂尔多斯盆地中部下中侏罗统沉积体系和层序地层[M].北京:地质出版社,1995.
- [6] 晋香兰,张泓.鄂尔多斯盆地侏罗系成煤系统[J].煤炭学报,2014,39(增刊1): 191–197.
JIN Xianglan, ZHANG Hong. Jurassic coal system in the Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(Sup.1): 191–197.
- [7] 范立民.神木矿区的主要环境地质问题[J].水文地质工程地质,1992,19(6): 37–40.
FAN Limin. Environmental geology in Shenmu mining area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1992, 19(6): 37–40.
- [8] 范立民.论保水采煤问题[J].煤田地质与勘探,2005,33(5): 50–53.
FAN Limin. Discussing on coal mining under water-containing condition[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(5): 50–53.
- [9] 顾大钊.晋陕蒙接壤区大型煤炭基地地下水保护利用与生态修复[M].北京:科学出版社,2015.
- [10] 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. Technological system of water-conserving coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 196–204.
- [11] 范立民,马雄德.保水采煤的理论与实践[M].北京:科学出版社,2019.
- [12] 范立民,马立强,蒋泽泉,等.保水采煤知多少[M].武汉:中国地质大学出版社,2023.
- [13] 王双明,范立民,王国柱.沙漠煤田综合勘探技术在榆神矿区的应用[J].煤炭工程,2007,39(1): 37–39.
- [14] 彭苏萍,毕银丽.西部干旱半干旱煤矿区生态环境损伤特征及修复机制[J].煤炭学报,2024,49(1): 57–64.
PENG Suping, BI Yinli. Properties of ecological environment damage and their mechanism of restoration in arid and semi-arid coal mining area of Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 57–64.
- [15] 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 Suping, 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.
- [16] 段中会,贺丹,杨宏科.神府煤田的地质工作历史与展望[J].中国煤炭地质,2023,35(6): 38–43.
DUAN Zhonghui, HE Dan, YANG Hongke. History and prospect of geological work in Shenhua Coalfield[J]. Coal Geology of China, 2023, 35(6): 38–43.
- [17] 季成龙.陕西省煤田地质勘探史[R].西安:陕西省煤田地质勘探公司,1989.
- [18] 里丁 H G.沉积环境和相[M].周明鉴,陈昌明,张疆,等,译.北京:科学出版社,1985.
- [19] 斯科特 A C.煤及含煤地层研究新进展[M].毛邦倬,译.西安:陕西科学技术出版社,1992.
- [20] 陕西省煤田地质勘探公司,鄂尔多斯项目管理办公室 编.煤及含煤地层沉积学译文集—第十一届国际沉积学大会《煤和含煤地层》专辑[R].西安:陕西省煤田地质勘探公司,1987.
- [21] 陈钟惠.煤和含煤岩系的沉积环境[M].武汉:中国地质大学出版社,1988.
- [22] 武汉地质学院煤田教研室.煤田地质学(上册)[M].北京:地质出版社,1979.
- [23] 武汉地质学院煤田教研室.煤田地质学(下册)[M].北京:地质出版社,1981.
- [24] 毛节华,许惠龙.中国煤炭资源预测与评价[M].北京:科学出版社,1999.
- [25] 张韬.中国主要聚煤期沉积环境与聚煤规律[M].北京:地质出版社,1995.
- [26] 张韬.大型湖泊三角洲与聚煤作用[M].北京:地质出版社,1993.
- [27] 张泓,李恒堂,熊存卫,等.中国西北侏罗纪含煤地层与聚煤规律[M].北京:地质出版社,1998.
- [28] 李思田,杨士恭,黄家福,等.论聚煤盆地分析的基本参数和流程[J].煤田地质与勘探,1983,11(6): 1–11.
- [29] 李思田.沉积盆地分析中的沉积体系研究[J].矿物岩石地球化学通报,1988,7(2): 90–92.
LI Sitian. Study on sedimentary system in sedimentary basin analysis[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1988, 7(2): 90–92.
- [30] 张泓,何宗莲,晋香兰,等.鄂尔多斯盆地构造演化与成煤作用:1:500 000鄂尔多斯盆地地质构造图简要说明[M].北京:地质出版社,2005.
- [31] 范立民,寇贵德,侯飞龙.榆神低硫煤中硫含量特征及成因探讨[J].中国煤田地质,2003,15(2): 12–13.
FAN Limin, KOU Guide, HOU Feilong. Probe into features and geneses of sulfur content in low-sulfur coal of Yushen mining area[J]. Coal Geology of China, 2003, 15(2): 12–13.

- [32] 李思田, 杨士恭, 解习农, 等. 鄂尔多斯延安组湖泊三角洲沉积体系的演化以及这一体系与赣江三角洲的比较沉积学研究[J]. 地质科学译丛, 1990(1): 92–93.
- [33] 焦养泉, 李思田, 杨士恭. 三角洲–湖泊沉积体系及聚煤研究: 以鄂尔多斯盆地神木地区延安组Ⅱ单元为例[J]. 地球科学, 1992, 17(2): 113–120.
JIAO Yangquan, LI Sitian, YANG Shigong. Delta-lacustrine depositional system and coal accumulation research[J]. Earth Science, 1992, 17(2): 113–120.
- [34] 李智民, 陈磊, 温道明. 陕北侏罗纪煤田榆横地区延安组沉积环境分析和聚煤特征[J]. 陕西地质, 1985, 3(2): 15–30.
LI Zhimin, CHEN Lei, WEN Daoming. Analysis on the sedimentary environment of Yan'an Formation and the features of accumulation coal in Jurassic Coalfield in Yulin and Hengshan areas, the north of Shaanxi[J]. Geology of Shaanxi, 1985, 3(2): 15–30.
- [35] 李智民. 鄂尔多斯盆地侏罗纪坳陷湖泊的淤浅机制和聚煤作用[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [36] 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.
- [37] 焦养泉. 聚煤盆地沉积学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2015.
- [38] 韩树青, 范立民. 对陕北侏罗纪煤田水文地质勘探方法的意见[J]. 煤田地质与勘探, 1991, 19(3): 45–46.
- [39] 范立民, 蒋泽泉. 烧变岩地下水的形成及保水采煤新思路[J]. 煤炭工程, 2006, 38(4): 40–41.
- [40] 范立民, 仵拨云, 向茂西, 等. 我国西部保水采煤区受保护烧变岩含水层研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 1–6.
FAN Limin, WU Boyun, XIANG Maoxi, et al. Study on protective burnt rock aquifer in water preserved coal mining area of western China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 1–6.
- [41] 岳建华, 曹璎璐, 李志聃. 多煤层自燃磁异常的小波分析[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3): 296–300.
YUE Jianhua, CAO Yinglu, LI Zhidan. Wavelet analysis of magnetic anomaly resulted from spontaneous ignition of a multiple coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 296–300.
- [42] 于景村. 多层烧变岩磁异常正演模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(4): 386–388.
YU Jingcun. Forward modeling of magnetic anomaly of the multilayer burned coal tanks[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(4): 386–388.
- [43] 万兆昌, 祁明星, 陈双喜. 综合物探圈定多煤层自燃边界[J]. 中国煤田地质, 1996, 8(2): 53–56.
- [44] 祁明星, 万兆昌. 陕北煤田火区磁探工作方法及效果[J]. 物探与化探, 1987, 11(4): 291–297.
QI Mingxing, WAN Zhaochang. Techniques and effects of magnetic prospecting in fire area of the northern Shaanxi Coalfield[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1987, 11(4): 291–297.
- [45] 王中锋. 沙漠覆盖区煤层的地震勘探及效果[J]. 中国煤田地质, 1998, 10(1): 56–58.
- [46] 朱芳香, 王中锋, 万兆昌. 地球物理探测在陕北侏罗纪煤田勘探中的应用[J]. 陕西煤炭, 2001, 20(4): 36–39.
ZHU Fangxiang, LIU Tianfang. Study on coal-layer thickness interpretation method of Jurassic Coal Field in northern Shaanxi Province and its effect of application[J]. Coal Geology of China, 2002, 14(1): 60–63.
- [47] 朱芳香, 刘天放. 陕北侏罗纪煤田煤厚解释方法研究及应用效果[J]. 中国煤田地质, 2002, 14(1): 60–63.
ZHU Fangxiang, LIU Tianfang. Study on coal-layer thickness interpretation method of Jurassic Coal Field in northern Shaanxi Province and its effect of application[J]. Coal Geology of China, 2002, 14(1): 60–63.
- [48] 冯西会, 王中锋, 朱芳香. 毛乌素沙漠地震勘探历程及效果[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(6): 30–32.
FENG Xihui, WANG Zhongfeng, ZHU Fangxiang. The course and effect of seismic prospecting in Mu Us Desert[J]. Coal Geology of China, 2008, 20(6): 30–32.
- [49] 王佟. 中国煤炭地质综合勘查理论与技术新体系[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [50] 卢新明, 阚淑婷. 煤炭精准开采地质保障与透明地质云计算技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2296–2305.
LU Xinming, KAN Shuting. Geological guarantee and transparent geological cloud computing technology of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2296–2305.
- [51] 彭苏萍. 中国煤矿高产高效矿井地质保障系统[J]. 河北煤炭, 1999(增刊1): 1–4.
- [52] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331–2345.
PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2331–2345.
- [53] 彭苏萍, 李恒堂. 煤矿安全高效开采地质保障技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [54] 王国法, 巩师鑫, 申凯. 煤矿智能安控技术体系与高质量发展对策[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(5): 1–8.
WANG Guofa, GONG Shixin, SHEN Kai. Intelligent security control technology system and high-quality development countermeasures for coal mines[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(5): 1–8.
- [55] 王国法, 张建中, 薛国华, 等. 煤矿回采工作面智能地质保障技术进展与思考[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 12–26.
WANG Guofa, ZHANG Jianzhong, XUE Guohua, et al. Progress and reflection of intelligent geological guarantee technology in coal mining face[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 12–26.
- [56] 程建远, 李鹏, 晋香兰. 神奇的透明地质[M]. 北京: 应急管理出版社, 2024.
- [57] 程建远, 朱梦博, 王云宏, 等. 煤炭智能精准开采工作面地质模型梯级构建及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2285–2295.
CHENG Jianyuan, ZHU Mengbo, WANG Yunhong, et al. Cascade construction of geological model of longwall panel for intelligent precision coal mining and its key technology[J]. Journal of

- China Coal Society, 2019, 44(8): 2285–2295.
- [58] 刘再斌, 董书宁, 李鹏, 等. 智能开采透明工作面技术架构与展望[J]. 智能矿山, 2020, 1(1): 46–51.
- [59] 夏玉成, 孙学阳, 苗霖田, 等. 智能时代的矿井地质工作展望: 矿井开采智能地质保障技术体系架构[J/OL]. 煤田地质与勘探, 2024: 1–14 [2024-11-26]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MDKT20241126001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- XIA Yucheng, SUN Xueyang, MIAO Lintian, et al. Prospects for mine geological work in the Age of Intelligence: The architecture of intelligent geological support technology system for coal mining[J/OL]. Coal Geology & Exploration, 2024: 1–14 [2024-11-26]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MDKT20241126001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [60] 范立民. 陕北煤炭基地规划中几个关键技术问题的探讨[J]. 陕西煤炭, 2005, 24(1): 3–6.
- FAN Limin. Discussion on some key problems in the planning of Shaanbei Coal Base[J]. Shaanxi Coal, 2005, 24(1): 3–6.
- [61] 谢克昌. 能源“金三角”发展战略研究[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [62] 彭苏萍, 张博, 王佟, 等. 煤炭资源与水资源[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [63] 谢和平. 煤炭安全、高效、绿色开采技术与战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [64] 孙学阳, 夏玉成. 陕北侏罗纪煤田地质环境承载力研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [65] 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.
- [66] 马立强, 张东升, 王砾康, 等. “采充并行”式保水采煤方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 62–69.
- MA Liqiang, ZHANG Dongsheng, WANG Shuokang, et al. Water-preserved mining with the method named “backfilling while mining” [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 62–69.
- [67] 马立强, 王砾康, 余伊河, 等. 壁式连采连充保水采煤技术及实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 902–910.
- MA Liqiang, WANG Shuokang, YU Yihe, et al. Technology and practice of continuous mining and backfilling with wall system for water conservation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(5): 902–910.
- [68] 范立民. 黄河中游一级支流窟野河断流的反思与对策[J]. 地下水, 2004, 26(4): 236–237.
- FAN Limin. Consideration & countermeasure on water interception of Kuye River 1st level branch in middle reaches of Yellow River[J]. Groundwater, 2004, 26(4): 236–237.
- [69] 马雄德, 王文科, 范立民, 等. 生态脆弱矿区采煤对泉的影响[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(1): 32–36.
- MA Xiongde, WANG Wenke, FAN Limin, et al. Coal mining impacting on springs in ecologically fragile mining area[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(1): 32–36.
- [70] 范立民, 向茂西, 彭捷, 等. 毛乌素沙漠与黄土高原接壤区泉的演化分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 207–218.
- FAN Limin, XIANG Maoxi, PENG Jie, et al. Evolution analysis on springs in contiguous area of Maowusu Desert and Loess Plateau[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 207–218.
- [71] 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.
- [72] 马雄德, 范立民, 张晓团, 等. 榆神府矿区水体湿地演化驱动力分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1126–1133.
- MA Xiongde, FAN Limin, ZHANG Xiaotuan, et al. Driving force analysis for water and wetlands evolution at Yushenfu mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1126–1133.
- [73] 冀瑞君, 彭苏萍, 范立民, 等. 神府矿区采煤对地下水循环的影响: 以窟野河中下游流域为例[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 938–943.
- JI Ruijun, PENG Suping, FAN Limin, et al. Effect of coal exploitation on groundwater circulation in the Shenfu mine area: An example from middle and lower reaches of the Kuye River Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 938–943.
- [74] 杨泽元, 王文科, 黄金廷, 等. 陕北风沙滩地区生态安全地下水位埋深研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(8): 67–74.
- YANG Zeyuan, WANG Wenke, HUANG Jinting, et al. Research on buried depth of eco-safety about groundwater table in the blown-sand region of the northern Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2006, 34(8): 67–74.
- [75] 范立民, 马雄德, 杨泽元. 论榆神府区煤炭开发的生态水位保护[J]. 矿床地质, 2010, 29(增刊 1): 1043–1044.
- [76] 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.
- [77] 国家安全监督总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 等. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [78] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 1–30.
- KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 1–30.
- [79] 苏超, 康红普, 姜鹏飞, 等. 基于连续实测的煤巷围岩掘-采期间采动应力演化与破坏模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(9): 2201–2213.
- SU Chao, KANG Hongpu, JIANG Pengfei, et al. Analysis on mining-induced stress evolution and surrounding rock failure mode of roadway during heading-mining period based on continuous measurement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(9): 2201–2213.
- [80] 赵兵朝. 榆神府矿区保水开采覆岩导水裂隙带发育高度研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016.
- [81] 张杰. 浅埋煤层长壁间隔式保水开采技术基础研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2020.

- [82] 浦海. 保水采煤的隔水关键层模型及力学分析[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2014.
- [83] 夏玉成, 代革联. 生态潜水流场的采煤扰动与优化调控[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [84] 范立民, 蒋泽泉. 厚煤层综采区冒落(裂)带高度的确定[J]. 中国煤田地质, 2000, 12(3): 31–33.
- [85] 赵兵朝, 冯杰, 赵阳, 等. 覆岩导水裂隙带发育高度动态演化规律研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(2): 176–183.
- ZHAO Bingchao, FENG Jie, ZHAO Yang, et al. Study on dynamic evolution law of development height of overburden water-flowing fractured zone[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(2): 176–183.
- [86] 周振方, 董书宁, 董阳, 等. 蒙陕接壤区典型煤层开采顶板周期性变形破坏及涌水响应特征[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(8): 101–110.
- ZHOU Zhenfang, DONG Shuning, DONG Yang, et al. Periodic roof deformation and failure and associated water inflow characteristics during the mining of typical coal seams in the Inner Mongolia–Shaanxi contiguous area[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(8): 101–110.
- [87] 许家林, 王晓振, 刘文涛, 等. 覆岩主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.
- [88] 陈海富. 榆树湾煤矿特厚煤层采动覆岩破坏规律及保水采煤方法适应性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
- [89] 李智学. 陕北侏罗纪煤田榆神矿区地质控水规律及保水采煤地质分区研究[M]. 北京: 地质出版社, 2022.
- [90] 张发旺, 周骏业, 申保宏, 等. 干旱地区采煤条件下煤层顶板含水层再造与地下水资源保护[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [91] 李文平, 王启庆, 李小琴. 隔水层再造: 西北保水采煤关键隔水层 N₂ 红土工程地质研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 88–97.
- LI Wenping, WANG Qiqing, LI Xiaoqin. Reconstruction of aquifuge: The engineering geological study of N₂ laterite located in key aquifuge concerning coal mining with water protection in Northwest China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 88–97.
- [92] 李涛, 高颖, 张嘉睿, 等. 陕北保水采煤背景下 MICP 再造隔水土层的试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2984–2994.
- LI Tao, GAO Ying, ZHANG Jiarui, et al. Experimental study on reconstruction of aquiclude by MICP under the background of water preserved coal mining in northern Shaanxi[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2984–2994.
- [93] 蒋泽泉, 王建文, 王宏科. 浅埋煤层关键隔水层隔水性能及采动影响变化[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(4): 26–31.
- JIANG Zequan, WANG Jianwen, WANG Hongke. Impermeability and mining impacts of key aquifuges for shallowly buried coal seams[J]. Coal Geology of China, 2011, 23(4): 26–31.
- [94] 曾一凡, 包涵, 武强, 等. 新近系保德组沉积薄弱区红土阻水性能及其资源开发意义[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(10): 62–71.
- ZENG Yifan, BAO Han, WU Qiang, et al. Water-blocking performance of laterite in weak deposition areas of Neogene Baode Formation and its significance of resource exploitation[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(10): 62–71.
- [95] 范立民, 马雄德, 吴群英, 等. 保水采煤技术规范的技术要点分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 81–87.
- FAN Limin, MA Xiongde, WU Qunying, et al. Analysis on technical points of water-preserving coal mining technical specifications[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 81–87.
- [96] 范立民, 孙魁, 李成, 等. 西北大型煤炭基地地下水监测背景、思路及方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 317–329.
- FAN Limin, SUN Kui, LI Cheng, et al. Background, thought and method of groundwater monitoring in large coal base of Northwest China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 317–329.
- [97] 彭捷, 李成, 向茂西, 等. 榆神府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, et al. 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.
- [98] 吴群英, 彭捷, 迟宝锁, 等. 神南矿区煤炭绿色开采的水资源监测研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 304–311.
- WU Qunying, PENG Jie, CHI Baosuo, et al. Research on water resources monitoring of green coal mining in Shennan mining area[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 304–311.
- [99] 缪协兴, 孙亚军, 浦海, 等. 干旱半干旱矿区保水采煤方法与实践[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
- [100] 李涛. 西部生态脆弱矿区煤–水协调开采技术与实践[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2020.
- [101] 马立强, 金志远, 张东升. 浅埋近距离煤层保水开采机理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [102] 张东升. 我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2022.
- [103] 范立民, 王亮, 胡运兵, 等. 保水采煤技术应用典型案例选编[M]. 北京: 地质出版社, 2024.
- [104] 邢联国, 杜文凤, 梁喆, 等. 煤矿地下水实时跟踪监测预警系统设计[J]. 工矿自动化, 2017, 43(8): 72–75.
- XING Zhenguo, DU Wenfeng, LIANG Zhe, et al. Design of real-time tracking monitoring and early warning system for coal mine groundwater[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(8): 72–75.
- [105] FAN Limin. Study on geological disaster from water inrush and sand bursting in mine of Shenfu Mining District[C]//CCMRI. Groundwater hazard control and coalbed methane development and application techniques: Proceedings of the International Mining Tech'96 Symposium. Xi'an: 1996.
- [106] 范立民. 神府矿区矿井溃砂灾害防治技术研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(4): 35–38.
- FAN Limin. Controlling technological study on suffusion hazard of coal shaft in Shenfu Mining Area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1996, 7(4): 35–38.
- [107] 武强, 安永会, 刘文岗, 等. 神府东胜矿区水土环境问题及其调控技术[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(3): 54–57.
- WU Qiang, AN Yonghui, LIU Wengang, et al. Water-soil envir-

- onment issues and its controlling technology in Shendong mining field[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(3): 54–57.
- [108] 范立民, 杨宏科. 沙层对矿井污水的净化作用及矿井水的利用: 以榆神府矿区萨拉乌苏组沙层为例[J]. 国土资源科技管理, 2000, 17(6): 21–23.
FAN Limin, YANG Hongke. Purification of sand layer in mine-shaft sewage and a new approach to utilization of mine-shaft sewage[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2000, 17(6): 21–23.
- [109] 973 计划(2013CB227900)“西部煤炭高强度开采下地质灾害防治与环境保护基础研究”项目组. 西部煤炭高强度开采下地质灾害防治理论与方法研究进展[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 267–275.
Research Group of National Key Basic Research Program of China (2013CB227900) (Basic Study on Geological Hazard Prevention and Environmental Protection in High Intensity Mining of Western Coal Area). Theory and method research of geological disaster prevention on high-intensity coal exploitation in the west areas[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 267–275.
- [110] 杨斌, 杨天鸿, 徐曾和, 等. 中国西部矿区厚松散层的溃沙临界流速与水沙流动特征[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(11): 1648–1652.
YANG Bin, YANG Tianhong, XU Zenghe, et al. Critical velocity of sand inrush and flow characteristics of water-sand in thick unconsolidated formations of mine in Western China[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2018, 39(11): 1648–1652.
- [111] 杨鑫, 徐曾和, 杨天鸿, 等. 西部典型矿区风积沙含水层突水溃沙的起动条件与运移特征[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 21–28.
YANG Xin, XU Zenghe, YANG Tianhong, et al. Incipience condition and migration characteristics of aeolian-sand aquifer in a typical western mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 21–28.
- [112] 杨天鸿, 师文豪, 李顺才, 等. 破碎岩体非线性渗流突水机理研究现状及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1598–1609.
YANG Tianhong, SHI Wenhao, LI Shuncai, et al. State of the art and trends of water-inrush mechanism of nonlinear flow in fractured rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1598–1609.
- [113] 范立民, 马雄德, 李永红, 等. 西部高强度采煤区矿山地质灾害现状与防控技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 276–285.
FAN Limin, MA Xiongde, LI Yonghong, et al. Geological disasters and control technology in high intensity mining area of Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 276–285.
- [114] 范立民, 马雄德, 蒋辉, 等. 西部生态脆弱矿区矿井突水溃沙危险性分区[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 531–536.
FAN Limin, MA Xiongde, JIANG Hui, et al. Risk evaluation on water and sand inrush in ecologically fragile coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 531–536.
- [115] 范立民, 马雄德. 浅埋煤层矿井突水溃沙灾害研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 8–12.
FAN Limin, MA Xiongde. Research progress of water inrush hazard in shallow buried coal seam mine[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 8–12.
- [116] 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.
- [117] 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.
- [118] 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 Wanchoao, 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.
- [119] 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.
- [120] 孙魁. 陕北侏罗纪煤田北部直罗组古河道复合砂体及其控水机制[D]. 西安: 西安科技大学, 2022.
SUN Kui. Paleochannel sand bodies of Zhiluo Formation in northern Shaanxi Jurassic Coalfield and their water control mechanism[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [121] 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.
- [122] 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 Bing, 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.
- [123] 范立民, 李涛, 高颖, 等. 生态脆弱煤矿区水体中微生物群落特征及矿井充水指示[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 255–266.
FAN Limin, LI Tao, GAO Ying, et al. Characteristics of microbial communities in water bodies of ecologically fragile coal mining areas and indications for mine water filling[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 255–266.
- [124] 华照来, 范立民, 李增林, 等. 论《煤矿防治水细则》中的“勘探

- 清楚”问题[J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(10): 39–44.
- HUA Zhaolai, FAN Limin, LI Zenglin, et al. On the issue of “clear exploration” in the “detailed rules for coal mine water prevention and control” [J]. Coal Geology of China, 2024, 36(10): 39–44.
- [125] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795–805.
- WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795–805.
- [126] 武强, 黄晓玲, 董东林, 等. 评价煤层顶板涌(突)水条件的“三图—双预测法”[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 60–65.
- WU Qiang, HUANG Xiaoling, DONG Donglin, et al. “Three maps—two predictions” method to evaluate water bursting conditions on roof coal[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 60–65.
- [127] 孟召平, 高延法, 卢爱红. 矿井突水危险性评价理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- YIN Shangxian, WANG Yuguo, LI Wensheng. Cause, countermeasures and solutions of water hazards in coal mines in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 214–221.
- [128] 尹尚先, 王玉国, 李文生. 矿井水灾害: 原因·对策·出路[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 214–221.
- DONG Shuning, JI Zhongkui, YANG Fan, et al. Some key scientific problems on water hazards frequently happened in China’s coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 66–71.
- [129] 董书宁. 对中国煤矿水害频发的几个关键科学问题的探讨[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 66–71.
- DONG Shuning. Some key scientific problems on water hazards frequently happened in China’s coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 66–71.
- [130] 董书宁, 樊敏, 郭小铭, 等. 陕西省煤矿典型水灾隐患特征及治理技术[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 902–916.
- DONG Shuning, FAN Min, GUO Xiaoming, et al. Characteristics and prevention and control techniques of typical water hazards in coal mines in Shaanxi Province[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 902–916.
- [131] 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.
- [132] 方刚, 梁向阳, 黄浩, 等. 巴拉素井田煤层富水机理与注浆堵水技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2470–2483.
- FANG Gang, LIANG Xiangyang, HUANG Hao, et al. Water-rich mechanism of coal seam and grouting and blocking water technology in Balasu mine field[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2470–2483.
- [133] 黄选明, 张雁, 王明星, 等. 我国露天煤矿截水帷幕关键技术进展[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(7): 1–9.
- HUANG Xuanming, ZHANG Yan, WANG Mingxing, et al. Key technical progress of water cutoff curtain technology in open-pit coal mines in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(7): 1–9.
- [134] 薛小渊, 苗彦平, 姬中奎, 等. 烧变岩积水边界区回采工作面防治水技术研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(11): 152–156.
- XUE Xiaoyuan, MIAO Yanping, JI Zhongkui, et al. Research on water control technology of mining face in burnt rock water accumulation boundary area[J]. Coal Technology, 2023, 42(11): 152–156.
- [135] 董书宁, 杨志斌, 姬中奎, 等. 神府矿区大型水库旁烧变岩水保水开采技术研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 709–717.
- DONG Shuning, YANG Zhibin, JI Zhongkui, et al. Study on water-preserved mining technology of burnt rock aquifer beside the large reservoir in Shenfu Mining Area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 709–717.
- [136] 王路, 张东升, 李强, 等. 基于砂化层破碎带冲蚀-渗流耦合模型的多孔介质水-砂混合流运移规律研究[J/OL]. 矿业安全与环保, 2024: 1–10 [2024-07-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1062.TD.20240704.1511.003.html>.
- WANG Lu, ZHANG Dongsheng, LI Qiang, et al. Study on migration law of water-sand mixed flow in porous medium based on erosion-seepage coupling in the fracture zone of sandy layer[J/OL]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024: 1–10 [2024-07-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1062.TD.20240704.1511.003.html>.
- [137] 高彬, 姬中奎, 杨帆, 等. 浅埋煤层过沟掘进巷道顶板淋水治理技术[J]. 煤矿安全, 2020, 51(9): 94–97.
- GAO Bin, JI Zhongkui, YANG Fan, et al. Treatment technology of roof watering in ditch driving roadway of shallow coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(9): 94–97.
- [138] 华照来, 范立民, 李增林, 等. 古河道砂岩含水层水资源保护与水害防治方法[J]. 绿色矿山, 2024, 2(1): 64–74.
- HUA Zhaolai, FAN Limin, LI Zenglin, et al. Methods for water resource protection and water hazard prevention in sandstone aquifers of ancient river channels[J]. Journal of Green Mine, 2024, 2(1): 64–74.
- [139] 曾一凡, 于超, 武强, 等. 煤矿防治水“三区”划分方法及其水害防治意义[J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3605–3618.
- ZENG Yifan, YU Chao, WU Qiang, et al. “Three zones” method for coal mine water hazard control and its significance[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3605–3618.
- [140] 王双明, 孙强, 胡鑫, 等. 煤炭开采地质体复合损害与减损保障[J/OL]. 煤田地质与勘探, 2025: 1–10 [2025-01-15]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MDKT20250114001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, HU Xin, et al. Coal mining-induced composite damage to geological bodies and geological guarantee against damage reduction[J/OL]. Coal Geology & Exploration, 2025: 1–10 [2025-01-15]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MDKT20250114001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [141] 王双明, 孙强, 耿济世, 等. 西部矿区采动损害及减损开采的地质保障技术框架体系[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(9): 1–13.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, GENG Jishi, et al. Geological support technology framework system for mining induced hazards and damage reduction mining of geological conditions in western mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(9): 1–13.
- [142] 范立民, 杨宏科. 神府矿区地面塌陷现状及成因研究[J]. 陕西

煤炭技术, 2000, 19(1): 7–9.

- [143] 侯恩科, 谢晓深, 冯栋, 等. 浅埋煤层开采地面塌陷裂缝规律及防治方法[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 30–40.

HOU Enke, XIE Xiaoshen, FENG Dong, et al. Laws and prevention methods of ground cracks in shallow coal seam mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(12): 30–40.

- [144] 侯恩科, 慕佳欣, 谢晓深, 等. 浅埋煤层开采地表裂缝发育规律及形成演化机理[J/OL]. 煤田地质与勘探, 1-11[2025-02-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.P.20250122.1641.002.html>.

HOU Enke, MU Jiaxin, XIE Xiaocheng, et al. The development law and formation evolution mechanism of surface cracks in shallow coal seam mining[J/OL]. Coal Geology & Exploration, 1-11[2025-02-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.P.2025-0122.1641.002.html>.

0122.1641.002.html.

- [145] 彭苏萍, 毕银丽. 钱鸣高院士指导西部干旱半干旱煤矿区生态修复研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 857–860.

PENG Suping, BI Yinli. Academician Mingao Qian directed ecological restoration research of arid and semi-arid coal mining areas in Western China[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 857–860.

- [146] 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.

(责任编辑 范章群)