

西部典型煤矿区采动水文生态效应及修复途径

王皓^{1,2,3}, 王强民^{1,2,3}, 董书宁^{1,2,3}, 王晓东^{1,2,3}, 葛光荣^{1,3}, 张溪彧^{1,2,3}, 曹书苗⁴, 张全^{1,3}

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 陕西 西安 710077; 3. 陕西省“四主体一联合”黄河流域中段矿区(煤矿)生态环境保护与修复校企联合研究中心, 陕西 西安 710077; 4. 西安建筑科技大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 西部干旱半干旱矿区已成为保障我国能源战略安全的重要煤炭生产基地, 但大规模高强度煤炭开发诱发了一系列的水资源和生态环境问题, 以水文视角解析生态问题, 系统揭示煤炭开采引发的水文生态效应, 并以水为基提出矿区受损水文生态的修复途径。研究结果表明: 采煤塌陷地裂缝加速了降水入渗和蒸发过程, 裂缝附近区域土壤含水率形成“漏斗区”; 典型煤矿煤层开采导水裂隙带局部直接沟通松散含水层, 地下水流场和资源量较采前发生较大变化, 最大水位降深超 14 m, 平均水位降深超 5 m, 地下水负均衡差超 $2500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 地下水位下降导致河流径流量的衰减量逐渐增加, 最大可达 $172 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 在地下水位埋深小于 5 m 区域, 地下水位下降大幅降低了植被的生态耗水量。针对水资源量短缺、生态水位降低、土壤保水性差、植被用水效率不高, 等现状, 提出了针对性的受损水文生态修复技术途径: ①矿井水适度净化技术, 该技术具有较宽的脱盐率区间, 在面向生态的矿井水适度处理方面更具优势, 处理后的矿井水可为水文生态修复提供合格水源; ②矿井水浅层回灌生态补水技术, 研究区矿井涌水量较大、矿井水质较好、第四系松散含水层储水空间可观, 实施矿井水浅层回灌可抬升矿区不断下降的生态水位; ③矿区损伤土壤重构技术, 在植被根系土壤层下衬垫隔水土层, 可明显提升塌陷区土壤水分和植被耗水量; ④微生物修复技术, 适宜的接菌处理可以扩大根系对土壤水分和养分的吸收范围和面积, 调节与光合作用、糖代谢、谷胱甘肽代谢和 Ca^{2+} 信号转导相关的基因的表达, 提高植被的用水效能和抗旱性。文章研究成果为干旱半干旱矿区的水资源保护和生态环境修复提供科学依据和技术支撑。

关键词: 干旱半干旱区; 煤层开采; 地下水; 水文生态效应; 修复技术

中图分类号: TD167; TD74 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)01-0610-13

Hydroecological effects of mining and its restoration ways in coal mining areas of Western China

WANG Hao^{1,2,3}, WANG Qiangmin^{1,2,3}, DONG Shuning^{1,2,3}, WANG Xiaodong^{1,2,3}, GE Guangrong^{1,3}, ZHANG Xiyu^{1,2,3}, CAO Shumiao⁴, ZHANG Quan^{1,3}

(1. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Xi'an 710077, China; 3. Shaanxi Engineering Research Center of Mine Ecological Environment Protection and Restoration in the Middle of Yellow River Basin, Xi'an 710077, China; 4. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology (Ministry of Education), Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710054, China)

收稿日期: 2024-12-06 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 宫在萍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YG24.1527

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFF1306002); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项重点资助项目(2022-2-TD-ZD005); 陕西省创新能力支撑计划资助项目(2024RS-CXTD-44)

作者简介: 王皓(1981—), 男, 江苏连云港人, 研究员, 博士生导师。Email: wanghao@cctegxian.com

通讯作者: 王强民(1989—), 男, 河南长垣人, 助理研究员, 博士。Email: wangqiangmin@cctegxian.com

引用格式: 王皓, 王强民, 董书宁, 等. 西部典型煤矿区采动水文生态效应及修复途径[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 610-622.

WANG Hao, WANG Qiangmin, DONG Shuning, et al. Hydroecological effects of mining and its restoration ways in coal mining areas of Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 610-622.



移动阅读

Abstract: The mining areas in arid and semi-arid region have become important coal production bases to ensure China's energy strategic security, however, coal development by large-scale and high-intensity mining has triggered a series of water resources and ecological environment problems. The article analyzes ecological issues from a hydrological perspective, systematically reveals the hydrological and ecological effects caused by coal mining, and develops restoration technologies for damaged hydrological ecology in mining areas based on water. The research results are indicated by the follow. The subsidence caused by coal mining accelerates the infiltration and evaporation of precipitation, and the soil moisture near the soil fractures appears "funnel zone". The water conducting fracture connects directly with the loose aquifer in typical coal areas, and the groundwater flow field and resource quantity have undergone significant changes. The maximum water level drop exceeds 14m, the average water level drop exceeds 5m, and the amount of negative balance exceeds $2500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$. The decrease in groundwater level leads to a gradual reduction in river flow, with a maximum of $172 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$. In areas where the groundwater level is less than 5 m, the decrease in groundwater level significantly reduces the ecological water consumption of vegetation. Base on the water resources and ecological environment problems, the hydrological and ecological restoration technologies have been developed, to response to the current situation of water resource shortage, ecological water level reduction, poor soil water retention, and low vegetation water use efficiency. Firstly, the moderate purification technology for mine water by nanofiltration has been developed. The technology has a wide range of desalination rates, and the treated mine water can provide high-quality water sources for hydrological and ecological restoration. Secondly, the ecological reinjection technology has been developed in soil, basing on the large amount of mine water inflow, good mine water quality, and considerable storage space in the Quaternary loose aquifer. The mine water recharge can lift the ecological water level in the mining area. Thirdly, the soil reconstruction technology has been developed, in which a water-resistant soil layer is placed underneath the vegetation root soil layer, which can significantly increase soil moisture and vegetation water consumption in the collapsed area. Fourthly, soil microbial inoculation technology has been developed, and appropriate inoculation treatment can expand the absorption range and area of soil moisture and nutrients by roots, regulate the expression of genes related to photosynthesis, sugar metabolism, glutathione metabolism, and calcium ion signal transduction, and improve the water efficiency and drought resistance of vegetation. The research results provide scientific basis for water resource protection and ecological environment restoration in arid and semi-arid mining areas in western China.

Key words: arid and semi-arid region; coal mining; groundwater; hydroecological effects; restoration ways

0 引言

2023年,我国原煤总产量为47.1亿t,其中西部省份(陕、甘、宁、蒙、青、新)原煤产量在26亿t左右,占全国原煤总产量的比例超55%,是保障我国能源战略安全的重要煤炭生产基地^[1]。但众所周知,西部矿区在地理上普遍位于缺水带、少水带和过渡带,气候干旱、降雨量少,生态环境脆弱且对采矿活动响应十分敏感^[2];大规模的煤炭开采破坏了煤层顶板岩层和土壤结构,导致非饱和带和饱和带地下水的运移特征发生改变,并诱发土壤水分衰减^[3]、地下水位下降^[4]、地表水系干涸^[5]、水资源短缺^[6]、植被退化^[7]等一系列水文生态效应。

在干旱半干旱地区,水文系统与生态系统相互影响,相互依存;水是构成生态环境系统有机体的基本要素,即担负了维系生态的重要责任(正效应),又与所有的破坏类型密不可分(负效应)^[8];因此在认识和揭

示生态问题时不应忽略水文作用^[9]。具体到煤矿区而言,西部矿区煤层开采改变了矿区的水源涵养功能,水又是该区域维持健康生态环境的关键要素,因此西部矿区生态修复要以水为主线,在生态修复中最大程度地保护和利用水资源^[10]。近年来,不同学者围绕煤层开采的水文生态效应与修复开展了一系列的理论研究、技术开发与工程实践活动,归纳起来包括3类:
① 煤炭开采对水文要素的影响,马雄德等认为2001—2011年红碱淖面积减少了47.37 km²,煤炭资源开采对其的影响占主导地位^[5];范立民认为榆神矿区71.5%的水位明显下降区(>8 m)是由高强度煤层开采导致的^[11];MASON等^[12]认为采煤塌陷地裂缝发育区域土壤水蓄水时间短,土壤水分衰减。
② 煤炭开采对植被生态的影响,牛鸿波等^[13]、谭学玲等^[14]、潘东江等^[15]等针对我国西部煤矿区植被演变开展了系列研究,认为矿区植被初级生产力、覆盖度、根系结构均受到采矿活动的干扰,且发生退化的区域主要分布在高强度

煤炭开采区。③矿区受损水文生态修复,针对矿区出现的地下水漏失、土壤质量衰减、分别植被退化等问题,顾大钊^[16]、胡振琪^[17]、毕银丽等^[18]开发了煤矿地下水库技术体系、土壤剖面重构的理论与方法、微生物复垦技术,显著提升了矿区水文生态修复成效。当前我国煤炭开发重心已转向干旱缺水的西部矿区,水这一因子已成为制约西部矿区生态环境的关键要素,但当前主要针对矿区水资源或生态环境进行单要素研究,较少耦合水文与生态两个要素开展系统研究。

2024年2月,国家发展改革委等八部委发布了《国家发展改革委等部门关于加强矿井水保护和利用的指导意见》,提出了“合理选择保水开采工艺,最大程度减轻煤炭开采对水资源的扰动影响……资源型缺水地区,因地制宜将矿井水处理达标后,用于采煤沉陷区修复治理等生态用水”等指导意见,为开展煤矿区水文生态研究提供了遵循。笔者以水文视角解析生态问题,系统揭示煤炭开采引发的水文生态效应,并以水为基提出矿区受损水文生态的修复途径,以期为我国干旱半干旱矿区水资源和生态环境的保护修复提供参考。

1 煤-水-环空间组合特征

陕北榆神矿区作为西部干旱半干旱生态脆弱矿区的典型代表,本节以该矿区为例,详细阐述矿区煤-水-环空间组合特征。榆神矿区位于陕西省榆林市境内,是我国14个大型煤田基地中陕北基地的核心组成部分,总面积约5265 km²,已探明煤炭资源储量

733.5亿t。矿区多年平均降水量400 mm左右,多年平均潜在蒸散发量1200 mm左右;矿区内地表水系较为发育,主要有矿区东北部的窟野河、矿区中部的秃尾河和矿区西南部的榆溪河;在第四系沉积物上生长各类植被,植被以乔木、灌木和草本为主,主要包括旱柳、小叶杨、沙柳、柠条、沙蒿、碱茅等类型,这些植被在改善矿区表生生态环境中发挥了重要作用^[19]。区内80%以上的面积为风沙地貌,地表风积沙厚度大,吸水透水储水能力强,降水后绝大部分入渗补给松散层地下水,一般不产生超渗产流,降雨入渗补给量占地下水总补给量的比例近80%,由于地下水补给量大,且第四系含水层下伏稳定隔水土层,因此区内地下水位埋深普遍较小,地下水与区内河湖与植被生态的关系紧密^[20]。煤层主要赋存在侏罗系延安组,煤层上覆侏罗系砂岩含水层、白垩系砂岩含水层和第四系松散含水层。(图1)矿区从上至下整体呈现出“表生生态-地下水-煤层”的空间组合特征。

区内主采煤层埋藏浅,单层煤厚2~12 m,煤层开采导致上覆岩土层导水裂隙和地裂缝发育,改变了岩土层的原始水文地质参数。区内采煤对水文生态的影响主要表现在:①煤层开采地表塌陷和裂缝改变了土壤的水力学参数和水分运移模式,土壤优势渗流导致土壤水分衰减和养分流失,诱发地表植被退化;②煤层开采诱发区域性地下水位下降,当水位降至生态水位以下时,地表植被退化、河流基流量减小;③大量的矿井水外排导致矿区可用水资源量减少,受损水文生态修复可用水量不足。

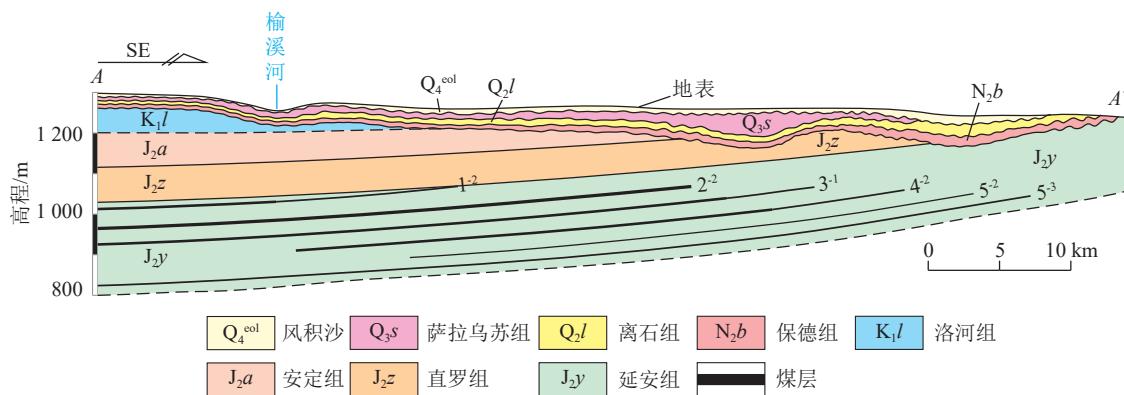


图1 榆神矿区典型剖面含隔水层空间组合关系^[21]

Fig.1 Spatial combination of aquifers and aquifuges for typical geological section in Yushen mining area^[21]

2 煤层开采引发的水文生态效应

2.1 包气带土壤水分迁移规律

矿区内地表裂隙宽度一般在10~50 cm,垂直位移一般在0~250 cm^[22-23];以此为物理背景,采用HYDRUS数值仿真平台探索降水和蒸发条件下采煤地裂

缝对包气带土壤水分迁移的影响。模拟土壤类型为风积沙,通过室内测试获取风积沙的水力学参数,其中饱和含水率 θ_s 为0.34 cm³/cm³、残余含水率 θ_r 为0.034 cm³/cm³、饱和渗透系数 K_s 为403 cm/d,初始含水率通过现场实测获取。模型上边界为大气边界、下边界为自由排水边界、两侧为隔水边界,裂隙宽度、深

度分别设置为 20、180 cm, 采用 Richards 描述土壤水分迁移^[24], 采用 VG 模型描述土壤水分特征曲线^[25]。图 2 显示了单次降水 10 mm/h, 经 15 天蒸发后的包气带土壤水分分布, 可以看出无裂缝时土壤含水率从表层 0.035 cm³/cm³ 逐渐增加至深度 300 cm 处的 0.066 cm³/cm³; 当裂缝存在时, 裂缝改变了土壤水分的分布特征, 表现为裂缝附近区域的土壤含水率较无裂

缝对应深度处的土壤含水率有所降低, 裂缝处土壤的蒸发过程类似抽水井, 使得裂缝周边区域的土壤含水率形成低值“漏斗区”。从图 3 可以看出无裂缝时土壤累计蒸发量为 476 cm², 裂缝存在时土壤累计蒸发量为 548 cm², 是无裂缝条件下土壤累积蒸发量的 1.15 倍, 意味着裂缝的存在加速了土壤蒸发过程, 一定程度降低了植被根系区土壤含水率。

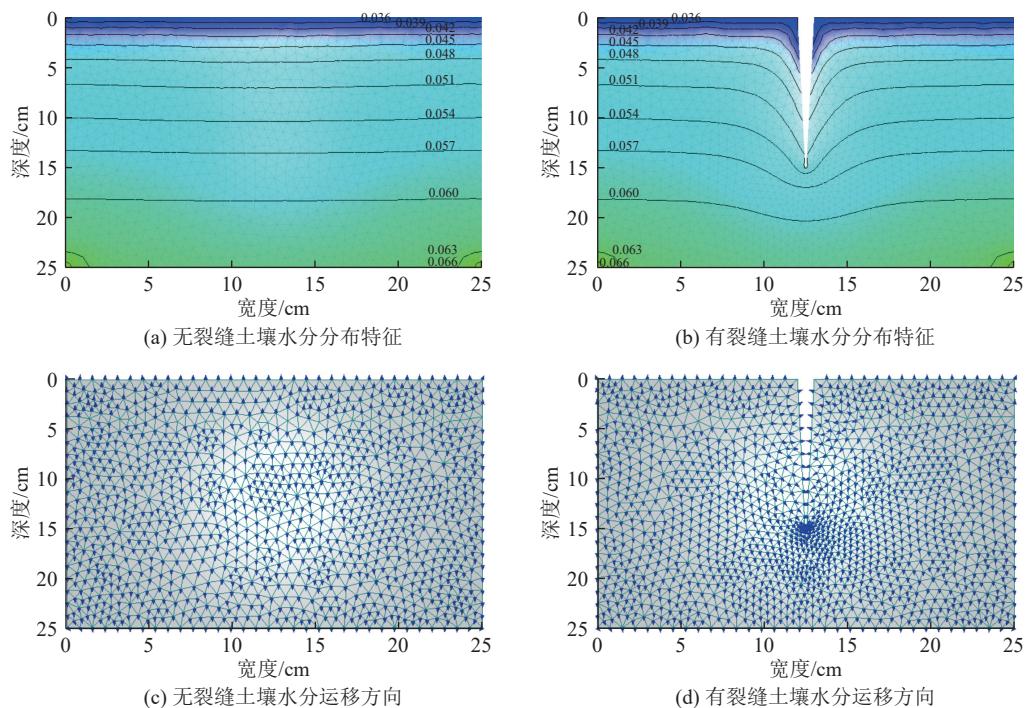


图 2 采煤塌陷地裂缝对土壤水分运移的影响

Fig.2 Effects of mining ground fissure on soil water transport

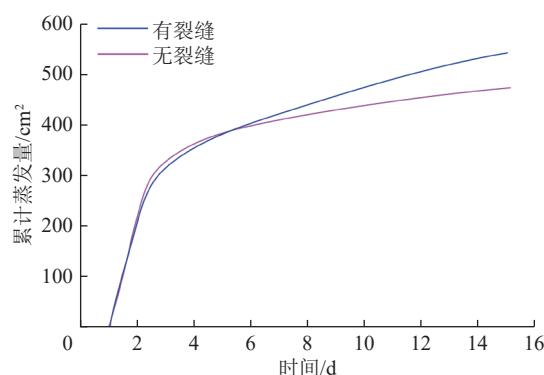


图 3 有无裂缝条件下土壤累积蒸发量变化规律

Fig.3 Variation of soil cumulative evaporation with and without ground fissures

2.2 含水层地下水演变特征

考虑到榆神矿区某典型大水煤矿煤层埋深小、隔水土层部分缺失, 导水裂隙在部分区域发育至松散含水层, 煤层开采地下水演变极为明显, 因此以该煤矿为例, 采用 Visual Modflow 数值仿真平台分析煤层开

采含水层地下水演变特征。根据该煤矿地层岩性、孔隙特征、水文地质参数及其埋藏条件, 在垂向上将模拟区地下水系统概化为 6 层(图 4): 第四系河谷冲积层与上更新统萨拉乌苏组潜水含水层; 第四系中更新统黄土与新近系红土弱透水层; 侏罗系中统风化基岩裂隙承压含水层; 3⁻¹ 煤顶板侏罗系中统直罗组、延安组正常基岩弱透水层; 侏罗系中统延安组 3⁻¹ 煤层弱透水层; 3⁻¹ 煤层以下延安组正常基岩弱透水层(煤层下 30 m)。

模型边界为煤矿边界, 属人为划定边界, 根据研究区实测地下水水流场, 模拟区含水层边界均概化为第二类边界, 模拟区地下水与河流存在水力联系, 且能精确定义河流的位置及形状, 将区内两条常年性沟流概化为河流边界。煤矿导水裂隙带不仅沟通 3⁻¹ 煤层顶板正常基岩和风化基岩, 且在局部可发育至第四系松散含水层, 为精细描述两带发育特征, 将煤层顶板垮落带顶和裂隙带顶分别加密剖分, 并赋予相应的渗透系数; 根据地裂缝发育特征、裂缝区土壤水分运移

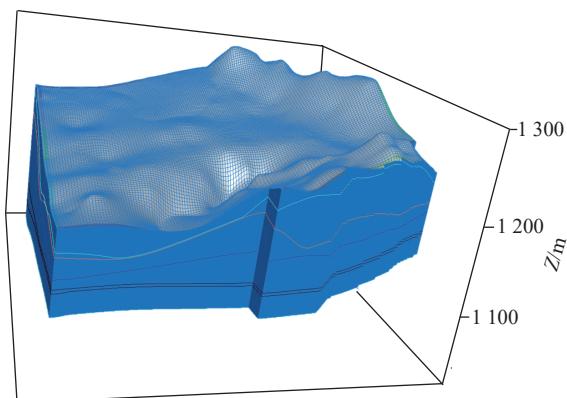


图 4 矿井三维地质概化模型

Fig.4 Three-dimensional geological generalization model of mine

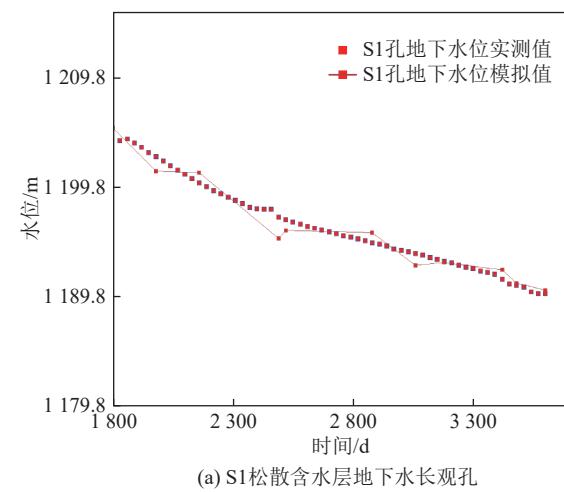
通量等参数,在开采区对入渗系数、蒸发强度进行一定幅度的增加,模型主要水文地质参数如表 1 所示。采

表 1 模型主要水文地质参数

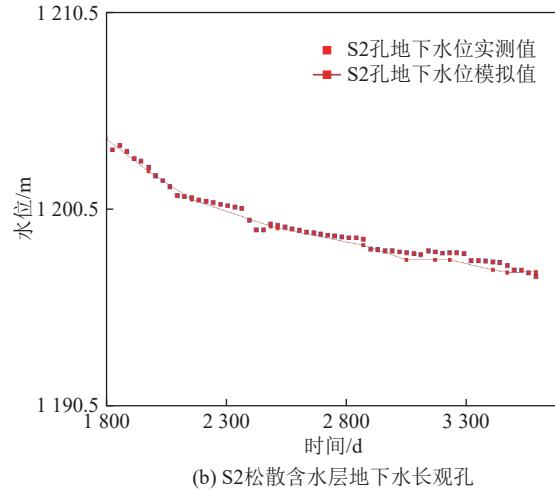
Table 1 Main hydrogeological parameters of the model

含隔水层	水文地质参数
潜水含水层	渗透系数 $K=7.4\sim14.6 \text{ m/d}$ 重力给水度 $\mu=0.07\sim0.12$
弱透水层	渗透系数 $K=0.009 \text{ m/d}$ 重力给水度 $\mu=10^{-6}$
风化基岩含水层	渗透系数 $K=4.2\sim27.3 \text{ m/d}$ 弹性给水度 $\mu_s=10^{-5}$
正常基岩弱透水层	渗透系数 $K=0.0271\sim0.0382 \text{ m/d}$ 弹性给水度 $\mu_s=10^{-6}$

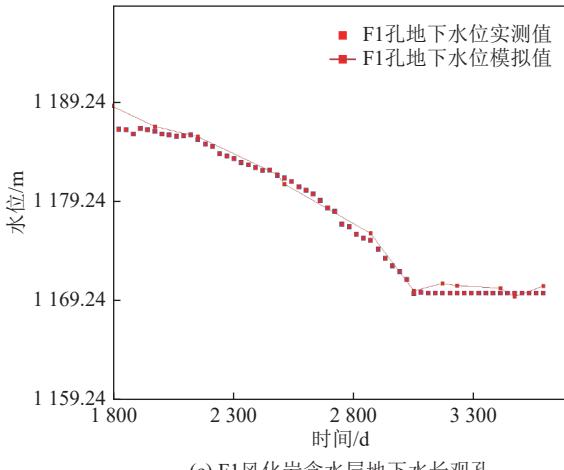
用煤矿多年实测地下水位动态观测资料进行模型识别,识别结果如图 5 所示,从图可见不同含水层各长观孔实测水位与模拟水位吻合程度较好,满足研究要求。



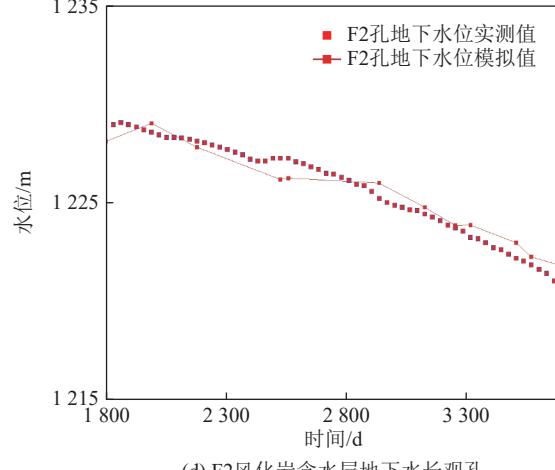
(a) S1松散含水层地下水长观孔



(b) S2松散含水层地下水长观孔



(c) F1风化岩含水层地下水长观孔



(d) F2风化岩含水层地下水长观孔

图 5 模拟区地下水位拟合曲线

Fig.5 Fitted curve of the groundwater table

煤层开采 10 a 后,煤矿松散含水层地下水总体仍由东北流向西南,与初始地下水位相比,该阶段地下水位平均下降 5.1 m,最大降幅为 13.36 m(图 6)。煤

层开采 15 年后,随着采掘范围的扩大,松散含水层疏干范围进一步扩大,地下水位平均下降 6.7 m,最大降幅为 14.8 m。煤层开采 20 a 后,先期开采区域水位开

始回升, 地下水疏干范围有所减小, 地下水位平均下

降 5.6 m, 最大降幅为 14.6 m(图 7)。

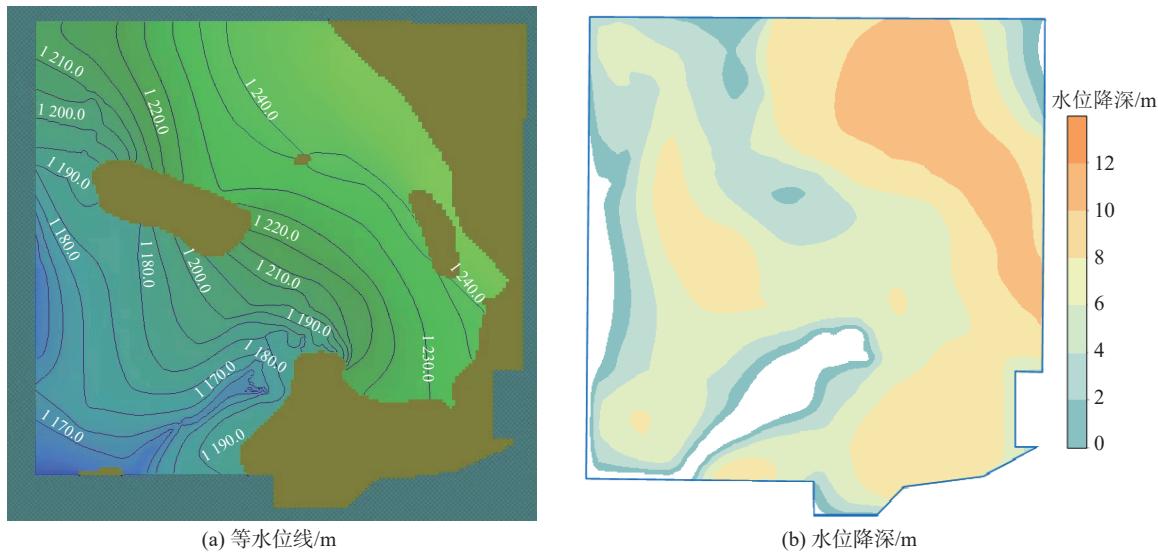


图 6 开采 10 a 后松散含水层地下水等水位线和水位降深

Fig. 6 Water table contour and drawdown of loose aquifer after mining ten years

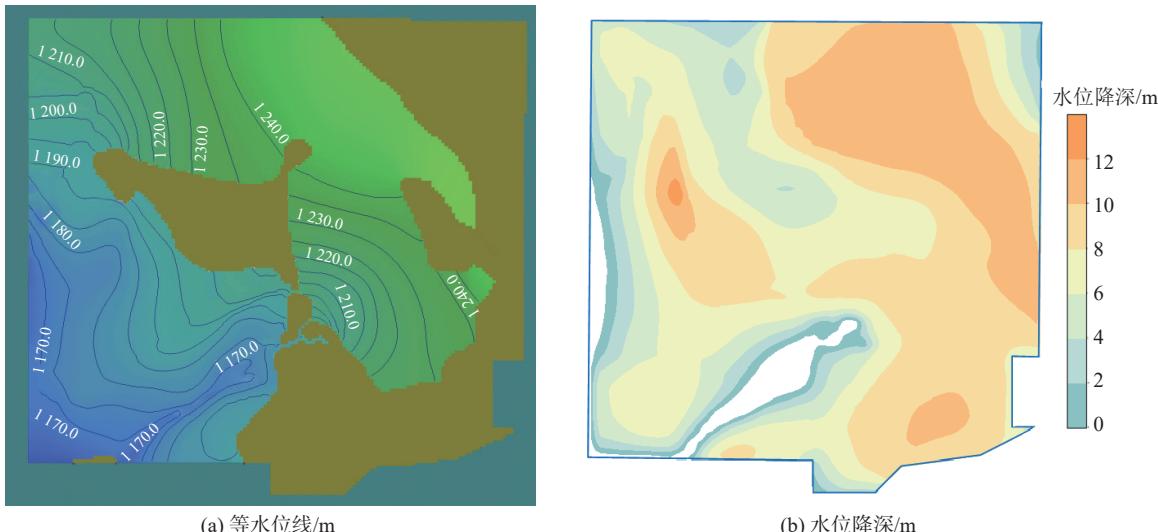


图 7 开采 20 a 后松散含水层地下水等水位线和水位降深

Fig. 7 Water table contour and drawdown of loose aquifer after mining twenty years

2.3 煤层开采对地下水资源量的影响

以 2.2 小节典型煤矿地下水水流数值模型为基础分析煤层开采对水资源量的影响, 天然及煤层开采条件下地下水均衡情况如表 2 示。煤矿天然状态下地下水基本处于均衡状态, 地下水总补给量为 $1889.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 总排泄量为 $1896.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 其中降水是地下水主要补给来源, 占地下水总补给量的 76.6%, 侧向流出是地下水主要排泄项, 占地下水总排泄量的 46.5%。受煤层开采地裂缝等因素影响, 大气降水补给量微弱增加, 增幅为 4.0%; 受煤层开采地下水位下降影响, 地下水侧向流入量和河流渗漏量增大, 增幅分别为 15.0%、112.1%, 地下水侧向流出量、地下水向

河流的排泄量及地下水蒸发量都表现出减小趋势, 减幅分别为 3.1%、26.3%、18.9%。由以上分析可知, 受煤层开采影响, 尽管煤矿地下水总补给量呈增加趋势, 但平均 $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上的涌水量使得区内地下水负均衡差高达 $2558.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

2.4 矿区地下水演变的生态效应

1) 河流径流量对地下水演变的响应。区内河流与潜水含水层具有密切的水力联系。当地下水水位高于河水位时, 地下水向河流排泄, 即为基流量^[26]。煤层开采条件下, 地下水位不断下降, 河流基流量随之减少, 同时也进一步促使了河流的渗漏补给。煤矿内两河流均为常年性河流, 由煤矿西南部排入秃尾河,

表 2 模拟区天然及煤层开采条件下地下水均衡

Table 2 Groundwater balance under natural and mining conditions

单位: $10^4 \text{m}^3/\text{a}$

		补给项	降水入渗	凝结水	灌溉回归补给	河流渗漏	侧向流入
开采前	数量	1 448.2	69.4	58.4	36.5	277.1	
	合计			1 889.6			
	排泄项	蒸发	开采量	河流排泄		侧向流出	
	数量	205.4	317.6	491.8		881.3	
	合计			1 896.1			
	均衡差			6.5			
		补给项	降水入渗	凝结水	灌溉回归补给	河流渗漏	侧向流入
开采20年	数量	1 506.2	69.4	58.4	77.4	318.7	
	合计			2 030.1			
	排泄项	蒸发	开采量	河流排泄	侧向流出	涌水量	
	数量	166.5	317.6	362.3	854.3	2 888.1	
	合计			4 588.8			
	均衡差			2 558.7			

根据 2009—2014 年观测资料, 2 条沟流平均流量为 $953.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。图 8 是基于 2.2 小节地下水水流数值模型预测煤层开采条件下河流径流衰减量随时间的变化, 由图可知随着煤层开采时间增加, 由采动地下水位下降导致的河流径流衰减量逐渐增加, 最大可达 $172 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 后期随着地下水降落漏斗面积的稳定, 河流径流衰减量也逐步趋于稳定。

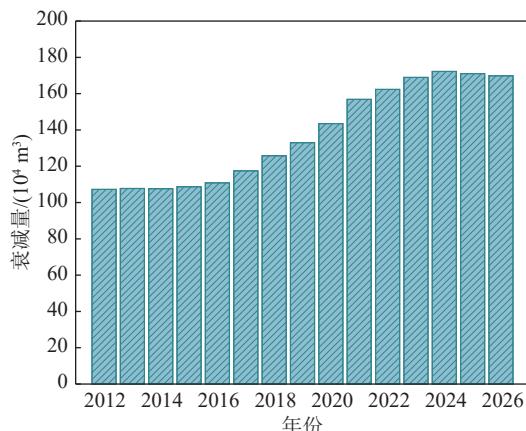


图 8 煤层开采条件下河流径流衰减量随时间变化

Fig.8 Variation of river runoff decrement under mining condition

2) 植被耗水量对地下水演变的响应。通过开展不同水位埋深情景下的旱区典型植被耗水原位试验发现^[27], 当初始水位埋深为 1.0 m 时, 植被根系长度超过水位埋深, 植被可同时利用包气带水分和地下水; 当初始水位埋深为 3.0 m 时, 植被根系长度小于水位埋深, 植被主要消耗包气带中的水分, 对地下水的利用程度显著降低(图 9)。在原位试验的基础上, 利用

变饱和水流模型定量评价植被耗水对水位下降的响应规律, 结果表明植被耗水量与地下水埋深呈幂函数衰减关系(图 10), 当水位埋深小于 5 m 时, 植被耗水量随着水位埋深的增加迅速减少, 地下水位下降对植被耗水影响显著; 当地下水位埋深超过 5 m 后, 植被耗水量下降速率明显降低并趋于稳定, 此时降雨是维持植被生长的主要水源。

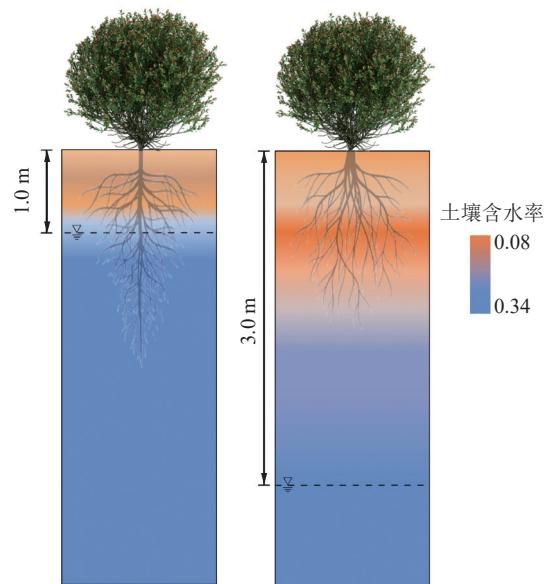


图 9 地下水与植被关系示意

Fig.9 Schematic drawing for the relationship between vegetation and groundwater table depths

3 矿区受损水文生态修复途径

在对煤层开采水文生态效应分析的基础上, 以

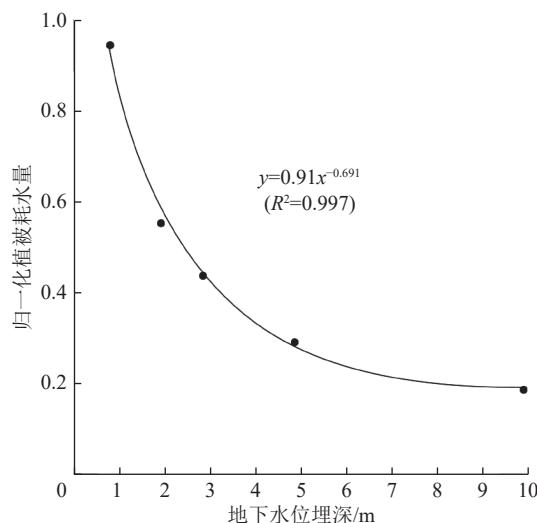


图 10 植被耗水量与地下水位埋深的关系

Fig.10 Relationship between vegetation water consumption and groundwater table depths

“水”为核心,在面向生态的矿井水适度净化、矿井水人工回灌补水、塌陷区土壤重构保水、微生物修复改

善植被用水等4个方面提出适用于西部矿区的受损水文生态修复途径。

3.1 面向生态的矿井水适度净化

我国西部矿区的矿井水多为高矿化度矿井水,水量巨大且分布广泛,是矿区生态用水的潜在水源,但如将未处理的高矿化度矿井水直接作为生态用水,将对矿区生态环境带来不可忽视的次生灾害^[28]。适度净化的目的在于确保出水能够满足相应回用标准要求,同时应尽量避免因过度脱盐而导致的高成本,鉴于此开发了面向生态的矿井水适度净化工艺(图11),开展了矿井水脱盐实验。实验用水为3000 mg/L的NaCl、Na₂SO₄、MgSO₄和CaCl₂型矿井水,试验结果见图12,由图可见矿井水无机盐的去除率由大到小依次为: Na₂SO₄、MgSO₄、NaCl、CaCl₂,表现出对SO₄²⁻离子的截留率明显好于Cl⁻,这主要因为该工艺中选用的荷负电纳滤膜对二价阴离子具有更强的排斥作用,因此纳滤适度净化对于阴离子以SO₄²⁻为主的高矿化度矿井水脱盐效率更具优势。

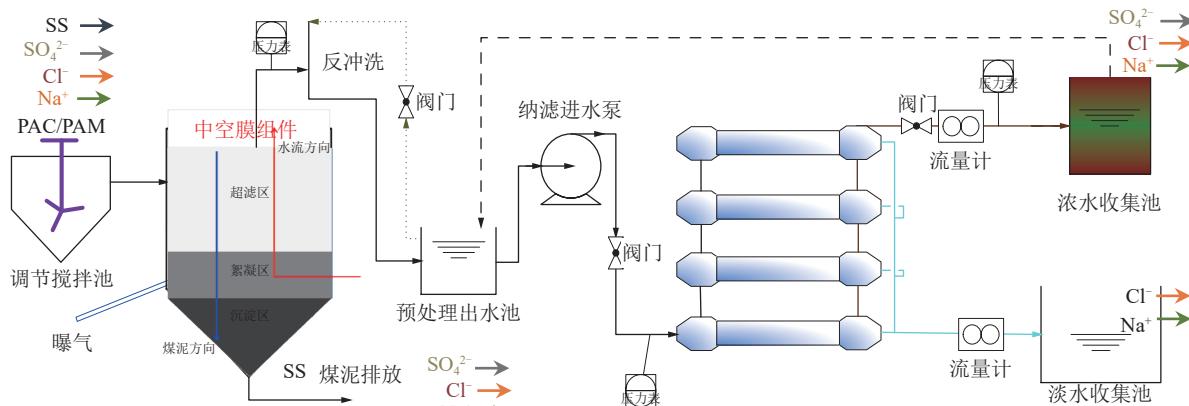


图 11 矿井水适度处理工艺流程

Fig.11 Process flow chart of moderate purification of mine water

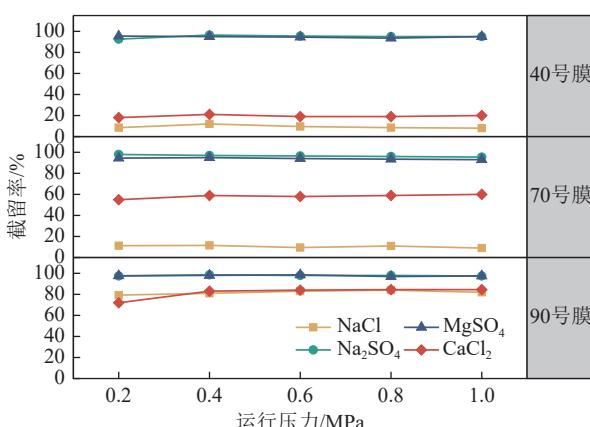


图 12 不同纳滤膜截留率表现

Fig.12 Rejection rates of different nanofiltration membrane

当前榆神及周边矿区TDS在2 000~3 000 mg/L的矿井水化学类型以Na₂SO₄型为主^[29],适宜于采用矿井水适度处理工艺。以矿区某典型煤矿矿井水净化为例,其矿井水TDS为2 476 mg/L,水中二价盐硫酸根离子含量高达1 330 mg/L,不满足生态用水要求(非盐碱土地TDS≤1 000 mg/L);基于原水水质优化组合NE-70和NE-40纳滤膜开展适度净化处理,同时以BW30反渗透勾兑工艺作为对比项,对比具体数据详见表3。由表3可知,适度净化工艺能够在确保产水满足相应生态用水的前提下,将脱盐成本控制在2.04元/吨;采用反渗透工艺,由于设计脱盐率偏高,通过反渗透产水与原水勾兑方案降低水体矿化度,其吨水平均成本为2.31元/吨;相比之下,适度净化工艺的

吨水净化成本较常规脱盐成本降幅达到11.7%。

表3 纳滤适度脱盐与常规脱盐方案对比

Table 3 Comparison of moderate desalination cost between conventional reverse osmosis and nanofiltration

对比指标	适度净化方案	反渗透勾兑方案
脱盐率/%	>59.6	反渗透产水:原水2:1
产水TDS/(mg·L ⁻¹)	<1 000	<1 000
系统回收率/%	85	85
运行压力/MPa	0.39	1.55
吨水电耗/(kWh·m ⁻³)	0.46	0.58
药剂等成本/(元·t ⁻¹)	0.05	0.42
折算吨水成本/(元·t ⁻¹)	2.04	2.31

3.2 矿井水人工回灌补水

矿井水人工回灌不仅可以提高矿井水的利用效率,而且还可以抬升矿区生态水位,间接保护和恢复矿区地表植被生态^[30]。以榆神矿区为例,榆神矿区每开采1吨煤,将产生1.2 m³的矿井水^[31],按照目前区内煤炭产量估算,其每年矿井涌水量将超过1亿m³^[32],大量的矿井水可为回灌提供丰富的水源。其次,浅埋和中深埋煤层开采区矿井水质量较好,尽管存在Na⁺、SS、COD等指标含量超标,但此类指标易于处理,在回灌前对矿井水进行适当的水质处理,辅以回灌过程中包气带对矿井水的天然过滤作用,即可避免矿井水回灌对接受水体造成污染。再者,区内萨拉乌苏含水层厚度为0~166 m,通过统计区内79个钻孔,萨拉乌苏组渗透系数频率及累积频率分布如图13所示,从图中可以看出萨拉乌苏组含水层渗透系数大于5 m/d的占比为24.05%,大于1 m/d的占比为67.09%,反映出含水层渗透性较好,较大的含水层厚度和渗透性为矿井水回灌提供了良好的储水空间。

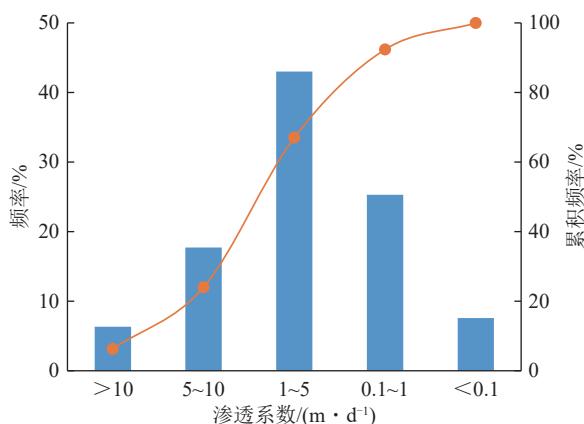


图13 渗透系数频率及累积频率分布

Fig.13 Frequency and cumulative frequency distribution of permeability coefficient

在研究区某典型煤矿开展第四系松散含水层矿井水回灌补水现场示范试验,回灌水源为处理后的矿井水,其水质满足地下水水质满足《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)^[33]中规定的Ⅲ类地下水水质标准,渗流井全井直径为450 mm,下入ø273 mm套管和过滤管,其中套管长度23 m、过滤管长度48 m;回灌试验过程中,单口注水孔稳定注水量约为15 m³/h(持续7 d),总回灌水量为2 520 m³,通过现场观测井实测,注水前观测井平均水位埋深为24.70 m,注水后观测井平均水位埋深为24.10 m,水位平均抬升0.60 m,实现了水资源保护和生态水位抬升的双重功效(图14)。

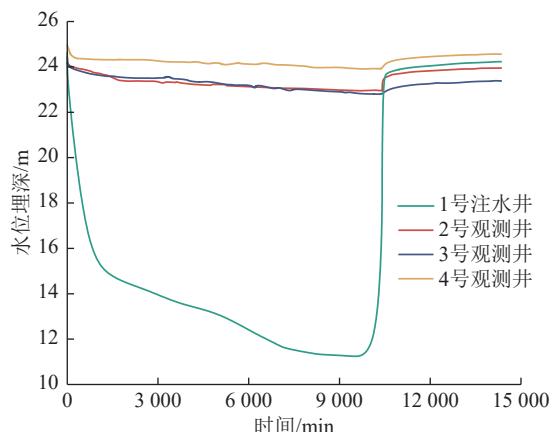


图14 矿井水生态回灌含水层地下水位变化

Fig.14 Groundwater level fluctuation under the influence of mine water injection

3.3 塌陷区土壤重构保水

采煤塌陷地裂缝改变了土壤水的运移规律,地裂缝处土壤水优势流明显且裂缝周边一定范围内土壤含水率明显减小,直接影响矿区植被生长,为了降低采煤塌陷地裂缝对矿区植被的影响,对塌陷区进行土壤剖面人工重构是矿区水文生态修复的有效手段之一^[34]。本文提出了“表土层-蓄水层-隔水层”的重构土壤层状结构,其中表土层为植被根系分布层,其厚度主要取决于植被根系参数;蓄水层一般采用孔隙度较好的沙性岩土,其主要功能是在隔水层上方形成滞水,为植被提供生态用水并避免土壤盐渍化;隔水层一般采用渗透性较差的黏性土,其主要功能是阻碍降水或灌溉水通过优势渗流通道流向土层深部。为验证隔水层重构对土壤水分迁移的影响,在榆神矿区利用当地黄土作为隔水土层开展了土壤重构现场试验,试验结果表明随着隔水土层厚度增加至30 cm,隔水层上方土壤含水率由0.09 cm³/cm³快速增加至0.19 cm³/cm³左右(图15),同时当隔水层厚度为

30 cm 时典型植被累计蒸散发量为 352 mm(图 16), 较未设置隔水层条件下提高 42%, 表明重构隔水层可以阻滞水分向深层土壤的渗漏, 使水分储存在隔水层及以上区域, 进而被根系吸水利用, 为植被需水提供潜在“水库”的功能。

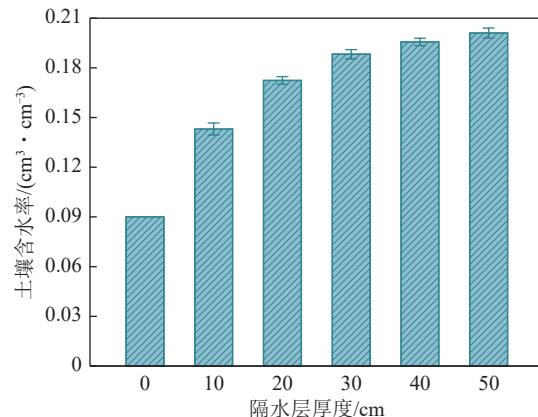


图 15 不同隔水层厚度植被根系层土壤含水率

Fig.15 Soil moisture of vegetation root system for different thicknesses water resisting layer

3.4 微生物修复改善植被用水

以往针对矿山微生物生态修复的研究多聚焦于利用微生物促进土壤养分释放、提高土壤酶活性等, 对微生物提升植被用水及抗旱性能的研究较少。本文开发了基于放线菌的微生物修复材料, 除具有提升土壤质量之外, 在提高植被根系吸水能力、增强植被抗旱性方面具有明显优势。放线菌及其代谢产物含有氨基酸、生长激素、活性酶、抗生素等活性成分, 有

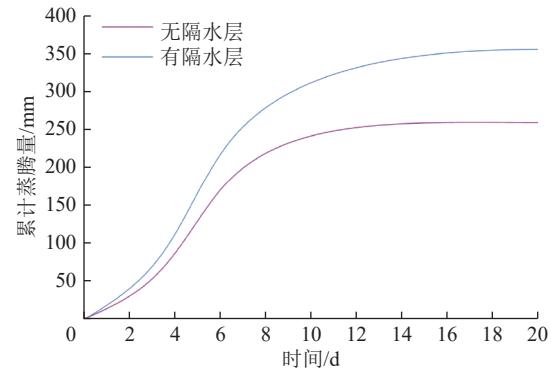


图 16 有无隔水层对植被累计蒸腾量的影响

Fig.16 Variation of cumulative vegetation transpiration with and without water resisting layer

利于刺激根系生长, 现场试验表明放线菌接种根系总根长、平均根直径、总根体积和总根表面积与不接种相比可增加 32.06%~200.14%, 扩大了根系对土壤水分和养分的吸收范围和面积, 提高了植被对土壤水肥的吸收能力(图 17a)。同时, 放线菌通过调节与糖代谢(EGLC、bgIX、ENO 和 pyk)、光合作用(LHC、PsbR、FBP 和 RPE)、谷胱甘肽代谢(DHAR、GST)和 Ca^{2+} 信号转导(RBOH)相关的基因的表达, 显著提高了干旱条件下矿区植被叶片可溶性糖、脯氨酸、谷胱甘肽的含量和抗氧化酶活性, 可缓解干旱对植被造成的膜损伤以及氧化损伤, 从而有助于植被进一步改善渗透调节, 促进抗氧化产物和细胞质物质的积累, 从而增强植被对干旱胁迫信号的响应, 提高植被的抗旱性(图 17b)。

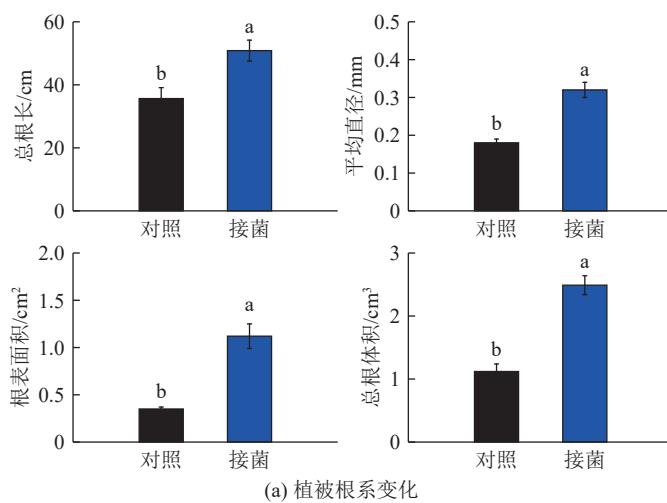


图 17 放线菌对植被根系与糖代谢的影响

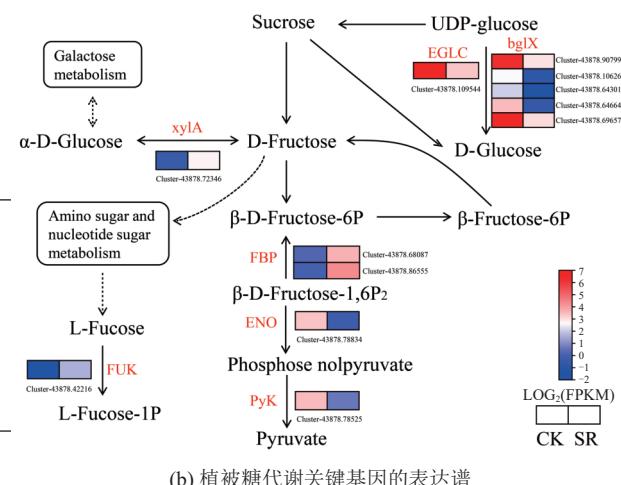
Fig.17 Effects of actinomycetes on vegetation root system and glucometabolic

4 展望

基于上文分析, 形成了干旱半干旱矿区采动水文

生态效应评价与修复技术体系(图 18), 并针对当前研究现状提出后续工作展望, 主要有:

- 1) 煤层开采是矿区水资源和生态环境发生改变



的根本诱因,笔者在本文主要讨论了煤层开采对土壤水、地下水的影响,并揭示了地下水演变对河流径流量及地表植被的影响,但在实际过程中,裂缝区土壤营养元素也会随着裂缝区水分的优势渗流迁移流失,其本质也是水文生态问题,限于篇幅,裂缝区养分迁移及其生态响应的研究将在后续论文中单独阐述。

2)西部矿区高矿化度矿井水分布广泛,本文结合《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)要求,对纳滤适度净化矿井水工艺进行介绍,但当前面向生态需求的高矿化度矿井水处理成本仍较高,需要开展提高植被抗盐性、耐盐植被选种等研究,降低矿区植被对矿井水质的要求,间接降低矿井水生态回用成本。

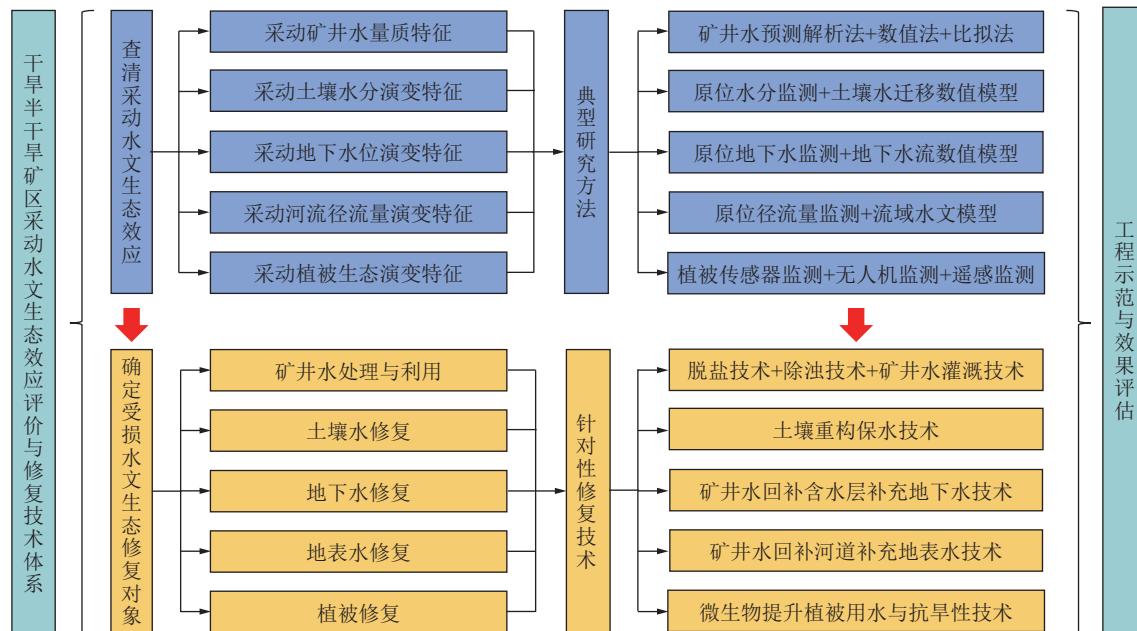


图 18 采动水文生态效应评价与修复技术体系

Fig.18 Technical system of hydroecological effect evaluation and restoration in mining area

3) 矿井水回灌的主要思路是将“灾害水”转化为“资源水”,通过人工方式将煤层开采产生的矿井水回灌至地下含水层,实现地下水资源保护和生态修复的双重目标,但矿井水回灌及相对应的监测方法尚未有健全的规范标准,需要进一步开展矿井水回灌对地下水环境影响的研究,并建立相关指导规范标准。

4) 西部矿区部分煤矿可用水资源量较少,水资源短缺难以支撑大规模高质量的生态修复用水需求,而当前部分煤矿在生态修复实践过程中忽视水资源承载力,造成生态修复效果不能长期稳定维持,需进一步针对不同矿区的自然条件开展水资源承载力与生态修复用水的耦合研究,依据水资源承载力科学规划生态修复规模和目标。

5 结 论

1) 采煤塌陷地裂缝加速了土壤水分入渗和蒸发过程,裂缝附近区域土壤含水率形成低值“漏斗区”;典型煤矿煤层开采导水裂隙带局部直接沟通松散含水层,地下水流动场和资源量较采前发生较大变化,最大水位降深超 14 m,平均水位降深超 5 m,地下水负均衡差超 $2500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

2) 评估了典型煤矿煤层开采地下水演变对河流径流和植被耗水的影响,地下水位下降导致河流流量的衰减量逐渐增加,最大可达 $172 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,在地下水位埋深小于 5 m 区域,地下水位下降大幅降低了植被的生态耗水量。

3) 给出了矿区受损水文生态的修复技术途径。一是纳滤具有宽泛的脱盐率区间,相对反渗透技术在面向生态的矿井水适度处理方面更具优势,处理后的矿井水可为水文生态修复提供水源;二是研究区矿井涌水量较大、矿井水水质较好、第四系松散含水层储水空间可观,实施矿井水回灌可抬升矿区不断下降的生态水位;三是实施塌陷区土壤人工重构,在植被根系土壤层下衬垫隔水土层,可明显提升塌陷区土壤水分和植被耗水量;四是基于放线菌的微生物修复材料可以扩大根系对土壤水分和养分的吸收范围和面积,调节与光合作用、糖代谢、谷胱甘肽代谢和 Ca^{2+} 信号转导相关的基因的表达,提高植被的用水效能和抗旱性。

参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2024(3): 4-21.

- National Bureau of Statistics of China. Statistical communiqué on national economic and social development of people's republic of China (PRC) in 2023[J]. *China Statistics*, 2024(3): 4–21.
- [2] 姚强岭, 于利强, 陈胜焱, 等. 西部生态脆弱矿区采动水资源与生态环境效应[J/OL]. *煤炭学报*, 1–22[2024–10–08]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1695>.
YAO Qiangling, YU Liqiang, CHEN Shengyan, et al. Water resources and ecological environment effects of mining in ecologically fragile mining areas in western China[J/OL]. *Journal of China Coal Society*, 1–22[2024–10–08]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1695>.
- [3] 王强民, 董书宁, 王皓, 等. 西部风沙区采煤塌陷地裂缝影响下的土壤水分迁移规律及调控方法[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1532–1540.
WANG Qiangmin, DONG Shuning, WANG Hao, et al. Influence of mining subsidence on soil water movement law and its regulation in blown-sand area of Western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1532–1540.
- [4] 王皓, 周振方, 杨建, 等. 蒙陕接壤区典型煤层开采地下水系统扰动的定量表征[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(7): 83–93.
WANG Hao, ZHOU Zhenfang, YANG Jian, et al. Quantitative characterization of the disturbance of groundwater system in typical coal seam mining in contiguous area of Inner Mongolia and Shaanxi[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(7): 83–93.
- [5] 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.
- [6] 王皓, 董书宁, 尚宏波, 等. 国内外矿井水处理及资源化利用研究进展[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 222–236.
WANG Hao, DONG Shuning, SHANG Hongbo, et al. Domestic and foreign progress of mine water treatment and resource utilization[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 222–236.
- [7] 马超, 田淑静, 邹友峰, 等. 神东矿区AVHRR/NDVI的时空、开采强度和气候效应[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(9): 2749–2756.
MA Chao, TIAN Shujing, ZOU Youfeng, et al. Dynamic responses of the coalfield ecosystem to mining intensity, spatio-temporal variation, and climate change derived from AVHRR/NDVI in Shendong coalfield[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(9): 2749–2756.
- [8] 彭建兵, 兰恒星. 略论生态地质学与生态地质环境系统[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(6): 877–893.
PENG Jianbing, LAN Hengxing. Ecological geology and eco-geological environment system[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(6): 877–893.
- [9] 李佩成. 论水文生态学的建立及其历史使命[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(1): 1–4.
LI Peicheng. The establishment and historic mission of hydroecology[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(1): 1–4.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] MASON T J, KROGH M, POPOVIC G C, et al. Persistent effects of underground longwall coal mining on freshwater wetland hydrology[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 772: 144772.
- [13] 牛鸿波, 田少国, 祖鹏举, 等. 神东矿区煤炭开采对植被净初级生产力的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(7): 267–277.
NIU Hongbo, TIAN Shaoguo, ZU Pengju, et al. Effect of coal mining on net primary productivity of vegetation in Shendong Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(7): 267–277.
- [14] 谭学玲, 闫庆武, 王瑾, 等. 榆神府矿区植被覆盖的动态变化及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(6): 1645–1653.
TAN Xueling, YAN Qingwu, WANG Jin, et al. The dynamics of vegetation coverage and its influencing factors in Yushenfu coalmine[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(6): 1645–1653.
- [15] 潘东江, 张农, 赵一鸣, 等. 西部矿区植被根系采动损伤特征及细观力学机制[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(2): 373–380.
PAN Dongjiang, ZHANG Nong, ZHAO Yiming, et al. Characteristics and mesoscopic mechanics of vegetation roots damage induced by mining in western mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 373–380.
- [16] 顾大钊. 煤矿地下水理论框架和技术体系[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(2): 239–246.
GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(2): 239–246.
- [17] 胡振琪. 矿山复垦土壤重构的理论与方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2499–2515.
HU Zhenqi. Theory and method of soil reconstruction of reclaimed mined land[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2499–2515.
- [18] 毕银丽, 申慧慧. 西部采煤沉陷地微生物复垦植被种群自我演替规律[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(1): 307–315.
BI Yinli, SHEN Huihui. Effect of micro-reclamation on different planted forest on the vegetation self-succession in the western mining subsidence area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 307–315.
- [19] 杨志. 陕北榆神矿区生态地质环境特征及煤炭开采影响机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
YANG Zhi. Research on the Ecological Geological Environment Characteristics and Coal Mining Impact Mechanism of Yushen Mining Area in Northern Shaanxi Province[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [20] 黄金廷. 鄂尔多斯盆地沙漠高原区降雨入渗补给地下水研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
HUANG Jinting. Research on rainfall recharge in desert plateau of Erdos Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [21] 李智学, 申小龙, 李明培, 等. 榆神矿区最上可采煤层赋存规律及

- 开采危害程度[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(3): 130–139.
- LI Zhixue, SHEN Xiaolong, LI Mingpei, et al. Occurrence regularity of uppermost minable coal seams and their harmful level of mining in Yushen mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(3): 130–139.
- [22] 王双明, 杜华栋, 王生全. 神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 17–26.
- WANG Shuangming, DU Huadong, WANG Shengquan. Analysis of damage process and mechanism for plant community and soil properties at northern Shenmu subsidence mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 17–26.
- [23] 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.
- [24] SIMUNEK J, VOGEL T, VAN GENUCHTEN M TH. The SWMS-2D code for simulation water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media (Version 1.2)[M]. USDA ARS: U. S. Salinity Laboratory, 1994.
- [25] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892–898.
- [26] 刘小莽, 谢佳鑫. 全球河川径流超过一半来自地下水维持的基流[J]. *科学通报*, 2024, 69(31): 4523–4525.
- LIU Xiaomang, XIE Jiaxin. Groundwater sustains more than half of global river flows[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(31): 4523–4525.
- [27] 王强民, 董书宁, 王文科, 等. 生态脆弱矿区高强度植被恢复对地下水补给的影响[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(9): 3245–3252.
- WANG Qiangmin, DONG Shuning, WANG Wenke, et al. Effects of high intensive vegetation restoration on groundwater recharge in ecologically fragile mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3245–3252.
- [28] 郭强, 李井峰, 刘兆峰, 等. 高矿化度矿井水的膜蒸馏处理[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(9): 3494–3502.
- GUO Qiang, LI Jingfeng, LIU Zhaofeng, et al. Membrane distillation treatment of high-salinity mine water[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(9): 3494–3502.
- [29] 王强民, 王皓, 杨建, 等. 西部侏罗系矿区充水含水层水文地球化学特征及矿井水来源综合识别[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(4): 1084–1093.
- WANG Qiangmin, WANG Hao, YANG Jian, et al. Hydrogeochemical characteristics of main water filled aquifers and source indicators of mine water in typical Jurassic mine area of western China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(4): 1084–1093.
- [30] 武强, 王志强, 郭周克, 等. 矿井水控制、处理、利用、回灌与生态环保五位一体优化结合研究[J]. *中国煤炭*, 2010, 36(2): 109–112.
- WU Qiang, WANG Zhiqiang, GUO Zhouke, et al. A research on an optimized five-in-one combination of mine water control, treatment, utilization, back-filling and environment friendly treatment[J]. *China Coal*, 2010, 36(2): 109–112.
- [31] 范立民, 王双明, 刘社虎, 等. 榆神矿区矿井涌水量特征及影响因素[J]. *西安科技大学学报*, 2009, 29(1): 7–11, 27.
- FAN Limin, WANG Shuangming, LIU Shehu, et al. Outcome characteristics and influencing factor of coal mining wastewater in Yushen mining area[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2009, 29(1): 7–11, 27.
- [32] 白进文. 榆林市榆神矿区疏干水外排量与用水规模分析[J]. *陕西水利*, 2023(1): 48–50.
- BAI Jinwen. Analysis of Drainage Water Discharge and Water Use Scale in Yushen Mining Area, Yulin City[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2023(1): 48–50.
- [33] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [34] 王强民, 赵明, 彭鸿杰, 等. 旱区不同层状结构土壤的水分运移过程与模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(4): 84–94.
- WANG Qiangmin, ZHAO Ming, PENG Hongjie, et al. Water transport process and simulation of layered soils with different configurations in an arid region[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(4): 84–94.