



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

生态保护型煤炭开采技术与实践

李全生 李淋 方杰 郭俊廷 李军 徐祝贺 李晓斌

引用本文:

李全生, 李淋, 方杰, 等. 生态保护型煤炭开采技术与实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 28-37.

LI Quansheng, LI Lin, FANG Jie. Ecological protection coal mining technology system and engineering practice[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 28-37.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1962>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术

Ecological protection and restoration technology of large-scale open-pit coal mining area in the northern sand-proof belt
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 323-333 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1902>

露天煤矿绿色开采生态环境评价体系模糊评判研究

Study on evaluation model and application of green mining ecological environment evaluation system in open-pit coal mine
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5ac1606a-275a-44ce-99fa-ad72adf94ba0>

东部草原区露天煤矿减损开采与生态系统修复技术及应用

Technology and application of damage reduction mining and ecosystem restoration of open-pit coal mines in eastern grassland area
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 484-492 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1766>

基于保障生态地下水位的露天煤矿主动保水技术研究

Research on active water conservation technology in open-pit coal mine based on ecological protection groundwater level
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 49-57 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.006>

基于GT-ANP理论的生态脆弱区煤-水协调绿色开采度评价

Evaluation of coal water coordinated green mining degree in ecologically fragile area based on GT-ANP theory
煤炭科学技术. 2021, 49(8): 203-210 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4414e8d9-978c-428c-bcb0-d36e3b8a3d99>

关于煤炭工业绿色发展策略的若干思考——基于生态修复视角

Some thoughts on green development strategy of coal industry: from aspects of ecological restoration
煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/daa798c3-3985-410d-8610-a2cc03b92fd2>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李全生, 李 淋, 方 杰, 等. 生态保护型煤炭开采技术与实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 28–37.

LI Quansheng, LI Lin, FANG Jie, *et al.* Ecological protection coal mining technology system and engineering practice[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 28–37.

生态保护型煤炭开采技术与实践

李全生^{1,2,3}, 李 淋^{1,2}, 方 杰³, 郭俊廷³, 李 军², 徐祝贺³, 李晓斌³

(1. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100011; 2. 中国矿业大学(北京), 北京 100083;

3. 煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 102209)

摘要: 针对生态脆弱区煤炭规模化高效开采造成生态影响范围大、周期长和强度高, 缺乏统筹开采全周期源头减损与生态全要素系统技术, 导致矿区生态修复成本高、效率低和效果差的问题, 提出了生态保护型煤炭开采理念, 露天开采损伤传导途径和井工开采损伤传导模型、生态损伤定量分析方法和矿区生态修复决策方法, 研发了露天矿节地减损开采、生态型地层重构、分布式水资源集-储-用、基于“生态修复窗口期”协同修复技术; 研发了井工开采损伤传导控制、含水层生态功能恢复、装配式楔形地下水库坝体构筑、沉陷区分时分区生态修复技术。建成蒙东矿区生态保护型露天开采示范工程, 宝日希勒露天矿示范区植被盖度由开发前 30% 提高到 59%, 胜利露天矿示范区植被盖度由开发前 5% 提高到 39%; 建成神东井工生态保护型煤炭开采示范工程, 植被盖度由开发前不足 10% 提高到 70%。研究成果为生态保护型煤炭开采提供了科技支撑, 具有广泛的应用和推广价值。

关键词: 露天开采; 井工开采; 生态保护; 减损开采; 生态修复; 绿色开采

中图分类号: TD824

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)04-0028-10

Ecological protection coal mining technology system and engineering practice

LI Quansheng^{1,2,3}, LI Lin^{1,2}, FANG Jie³, GUO Junting³, LI Jun², XU Zhuhe³, LI Xiaobin³

(1. China Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China; 2. China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

3. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102209, China)

Abstract: In view of the large-scale and efficient coal mining in ecologically fragile areas, which causes a large scope, long cycle and high intensity of ecological impacts, and the lack of a systematic technology that integrates the whole cycle of mining, source reduction and ecological elements, which leads to high costs, low efficiency and poor results in the ecological restoration of mining areas. This paper puts forward the concept of ecological protection coal mining, the damage conduction pathway of surface mining and the damage conduction model of shaft mining, the quantitative analysis method of ecological damage and the decision-making method of ecological restoration in mining areas. It has developed land-saving and loss-reducing mining for open pit mines, ecological stratigraphic reconstruction, distributed water resources collection, storage and use, and synergistic restoration technologies based on the "ecological restoration window period". It has researched and developed technologies for damage conduction control in well mining, ecological function restoration of aquifers, construction of assembled wedge-shaped groundwater reservoir dams, and ecological restoration of subsidence zones in time zones. An ecologically protected open pit mining demonstration project has been completed in the mengdong mining area, with the vegetation cover in the baorixile open pit mine demonstration area increasing from 30% to 59% of the pre-exploitation area, and that in the shengli open pit mine demonstration area from 5% to 39% of the pre-exploitation area. A demonstration project for ecologically protected coal mining in the shengdong wells has been completed, with vegetation cover increasing from less than 10% to 70% of the pre-exploitation area. The research results provide scientific and technological support for eco-protective coal mining and have wide application and promotion value.

Key words: open pit mining; shaft mining; ecological protection; loss-reducing mining; ecological restoration; green mining

收稿日期: 2023-12-22

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2023-1962

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501100, 2023YFF1306000)

作者简介: 李全生(1965—), 男, 河南洛阳人, 教授级高级工程师, 博士生导师。E-mail: quansheng.li@chnenergy.com.cn

通讯作者: 李 淋(1991—), 男, 湖北咸宁人, 博士。E-mail: L393374811@163.com

0 引言

习近平总书记指出，“能源的饭碗必须端在自己手里”。^[1]我国作为世界最大的煤炭生产和消费国，年产煤炭 40 亿 t 以上。在相当长时期内煤炭仍是我国能源安全的基石^[2]。然而，我国约 80% 的煤炭产自北方防沙带和黄河流域等生态脆弱区，生态安全面临巨大挑战^[3-4]。煤炭开采引起地表塌陷、水土流失、植被退化等生态损伤，规模化开采具有生态影响范围大、周期长、强度高、恢复难的问题，年损毁土地百万亩以上，但累计修复率不足 30%，影响脆弱区生态安全。国内外相关学者针对上述问题开展了研究^[5-9]。李全生等^[10-12]提出了井工煤矿减损开采理论与技术体系。刘英等^[13-15]针对新疆戈壁煤矿露天开采造成的生态环境扰动进行了定量分析。李军等^[16-18]研究了煤炭开采对于植被扰动范围的定量监测和评价方法。孙茹等^[19]以整个安徽省矿区为研究区域，针对高潜水位采煤沉陷区积水时空演化特征开展了研究。张凯等^[20]以内蒙古神东布尔台煤矿为研究区域，探究了煤炭开采下土壤含水率的变化及其对土壤质地和植被的响应。赵靖等^[21]以淮南矿区为研究对象，针对因采高较大且经过断层而引起的片帮、冒顶和突水等问题提出了选用新型高分子注浆材料对煤壁进行注浆加固。煤炭开采引起的采动损伤传导机理不清、损伤控制难，且缺乏减少开采生态损伤与近自然生态恢复（有机结合的生态保护技术。为此，笔者提出生态保护型煤炭开采原理与方法，研发生态保护型煤炭开采技术并应用示范，为煤矿开发工作提供借鉴。

1 采煤面临的生态保护难题

“富煤、贫油、少气”是我国化石能源资源禀赋，煤炭在相当长时间内是我国能源安全的“压舱石”。2018—2022 年煤炭在我国一次性能源消费占比保持在 60% 左右，燃煤发电约占全国总发电量 60%（图 1）。然而煤矿区生态安全直接关系到北方防沙带、黄河流域等生态脆弱区的生态保护，黄河流域产能占比为山西（29.0%）、陕西（16.6%）、宁夏（2.1%），北方防沙带产能占比为新疆（9.2%）、内蒙古（26.1%）。而生态脆弱区特点为表土瘠薄、寒旱缺水、物种多样性少、抗干扰差，因此需要统筹能源安全与生态安全。

无论是露天开采还是井工开采，煤炭基地生态损伤的根源都是由于开采造成地层的变形、破断、运动及其造成损伤的传导（图 2）。在采出地下煤层过

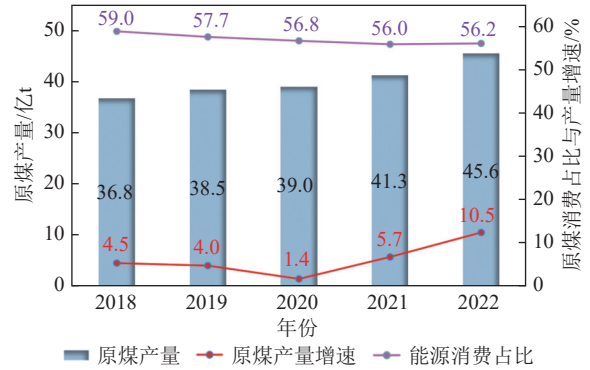


图 1 2018—2022 年我国煤炭产量及消费占比

Fig.1 Share of China's coal production and consumption from 2018 to 2022



图 2 煤炭规模化开采与脆弱生态保护问题突出

Fig.2 Coal scale mining and fragile ecological protection highlight the problem

程中，形成了新的空间和自由面，改变了岩层的边界条件，形成应力重新分布和变形能的扩散传导，导致岩层变形，产生裂隙、破断、沉降等采动损伤；采动损伤的传导扩散，引发地表沉陷、裂缝，水土流失、植被退化等生态损伤。

2 生态保护型煤炭开采内涵与框架

2.1 生态保护型煤炭开采内涵

采动损伤和生态损伤治理的根本途径：一是缩减采动空间与阻断能量传导，二是生态要素功能系统仿生修复^[22]。依据开采对矿区生态的影响规律，运用系统工程思想，基于开采损伤传导，着眼开采全周期，通过开采过程最大程度减少生态损伤与近自然稳定型生态系统仿生修复相结合（图 3），实现煤炭规模化开采与生态保护相协调、矿区生态系统正向演替和“开发金山银山，再造绿水青山”的目标。

2.2 生态保护型露天开采损伤传导途径

露天开采岩土剥离形成的自由面和空间是损伤传导的源头，应力释放、岩土位移、水土流失、水位下降等是露天开采生态损伤传导的主要途径。生态

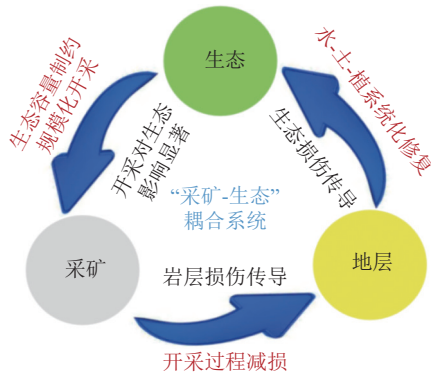


图3 基于“采矿-生态”系统的生态保护型开采

Fig.3 Ecological conservation mining based on the “mining-ecology” system.

损伤的根源是煤炭开采形成空间及变形能扩散传导，揭示岩土层剥离-“应力场-裂隙场-渗流场”演化-水土生境损伤-土地挖损压占-周边生态退化的开采损伤传导途径(图4)。

2.3 生态保护型井工开采损伤传导模型

覆岩损伤传导理论是损伤控制与修复的基础^[23]。假设煤层地应力近似等于上覆岩层重力，则地应力所造成的体积应变 ε_v 可由下式计算：

$$\varepsilon_v = \frac{\gamma H}{K} \quad (1)$$

式中： γ 为容重； H 为岩体的埋深； K 为煤体的体积模量。

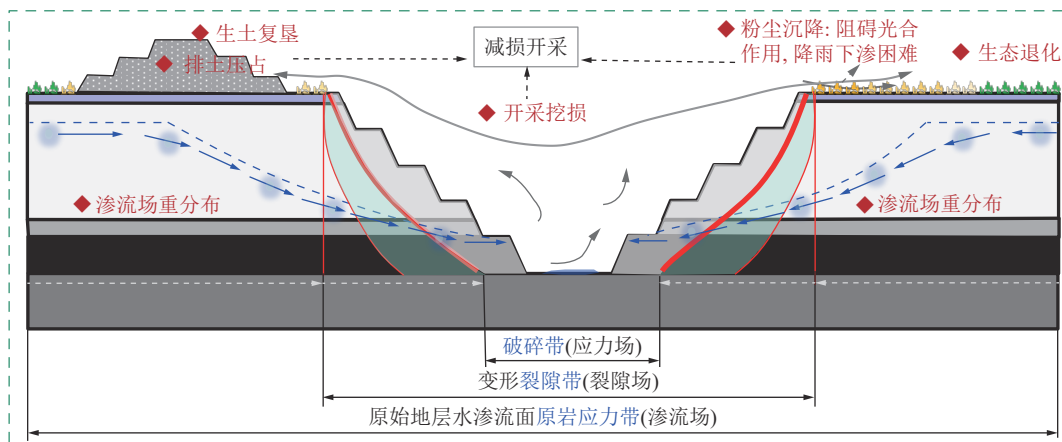


图4 露天开采损伤传导途径

Fig.4 Principle of damage conduction in open pit mining

一般认为煤层未开采前属于弹性状态，则该部分体积应变所积累的应变能 E_d 计算如下：

$$E_d = \frac{1}{2} K \varepsilon_v^2 M L v t \quad (2)$$

式中： v 为工作面推进速度，m/d； L 为工作面长度，m； M 为采高，m； t 为推进时间。

根据式(2)可估算出开采一定体积煤层所释放的总能量，假设为采动损伤能量。假设能量传递过程中某一岩层的极限弹性体应变为 ε_u ，当应变超过 ε_u 时，岩体进入损伤区域。则极限损伤能量临界值 E_u 为

$$E_u = \frac{1}{2} K_0 \varepsilon_u^2 V_m \quad (3)$$

式中： V_m 为岩体体积； K_0 为弯曲下沉带内发生极限弹性应变岩体的弹性模量。

根据式(3)可依次求出每一岩层损伤所需要的能量，结合媒体开采释放的总能量(式2)可大致求出损伤拱的范围。基于能量守恒的开采损伤传导模型(图5)。统计西部矿区部分工作面的“三带”高度、

松散层厚度以及充分采动后的地表下沉系数，通过空间守恒拟合获得各分带的耗散系数。

$$(1-q)M = 0.11H_1 + 4.2 \times 10^{-3}H_2 + 4.5 \times 10^{-3}H_3 \quad (4)$$

式中： q 为下沉系数； H_1 、 H_2 、 H_3 依次为垮落带、裂隙带及弯曲下沉带厚度，m。

2.4 生态损伤定量分析方法

采动损伤量化表征是损伤界定、控制与修复的基础。结合现场实测与数值模拟进行覆岩损伤表征，提出适用于覆岩损伤描述的损伤本构模型。

$$\sigma_{ij} = \frac{G}{G^0} E_{ijkl} \varepsilon_{kl} + \frac{1}{3} \left(1 - \frac{G}{G^0} \right) \delta_{ij} E_{mmkl} \varepsilon_{kl} \quad (5)$$

式中： E_{ijkl} 为基体弹性常数张量； E_{mmkl} 为岩体弹性常数张量； ε_{kl} 为基体应变张量； G 为岩体剪切模量； G^0 为基体剪切模量； δ_{ij} 为 Kronecker 符号。

在此基础上，将煤层开采研究范围内塑性单元体积总和与观测空间体积之比定义为覆岩损伤度，实现了开采区域三维空间覆岩损伤定量表征(图6)。

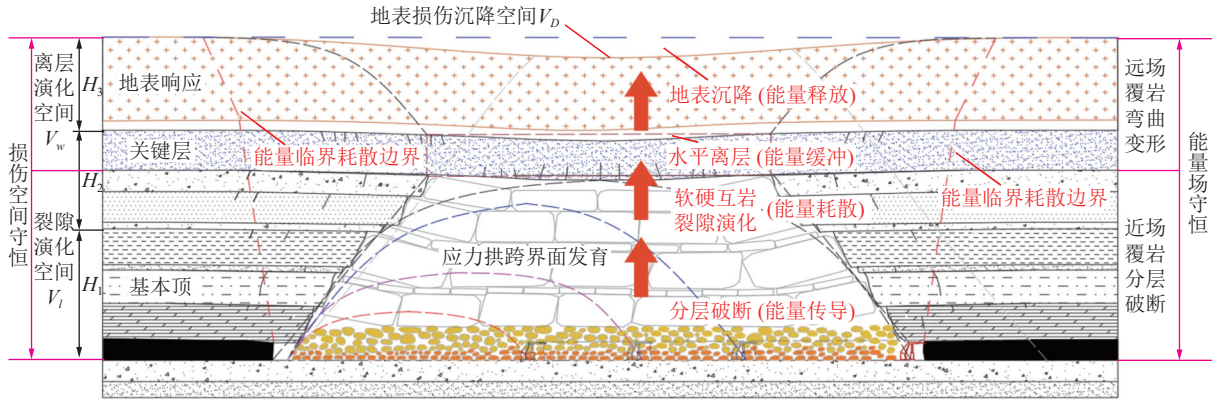


图5 基于能量守恒的开采损伤传导模型

Fig.5 Mining damage conduction model based on spatial and energy conservation

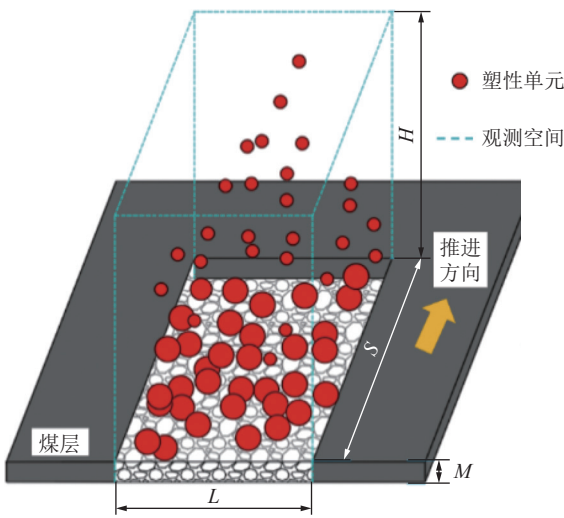


图6 覆岩损伤度计算模型示意

Fig.6 Schematic diagram of the calculation model of overburden damage degree

2.5 矿区生态修复决策方法

构建集遥感卫星、激光雷达、地表移动观测、井下矿压观测一体化的开采与生态参数长时序高精度监测体系,发明基于人工神经网络的生态演变定量建模与损伤主因子辨识技术,提出“信息采集-定量建模-孪生仿真-辅助决策”的矿区生态修复决策方法(图7)。

3 生态保护型煤炭开采技术

以内蒙古露天煤矿和神东井工煤矿区为研究对象,针对生态损伤传导控制、生态地层重构和谁资源保护利用问题,研发8项关键技术,建成2个示范区。煤炭生态保护技术路线如图8所示。

3.1 露天矿节地减损靠帮开采技术

针对露天开采导致土地挖损压占的问题,通过边坡岩土体冻融循环试验研究,在寒区冻融循环下

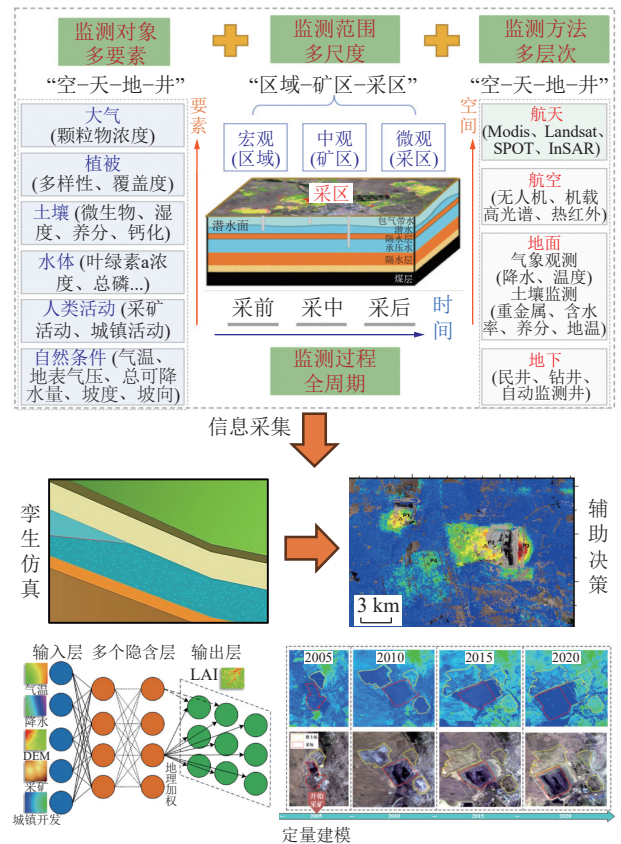


图7 矿区生态修复决策

Fig.7 Decision-making for ecological restoration of mining areas

岩土体强度随时间整体呈负指数关系递减边坡失稳规律(图9),研发冻结期节地减损边坡靠帮开采技术,在冻结期最大强度期内完成靠帮开采,同时在融化强度拐点期内完成内排压帮,实现节地减损开采(图10)。

3.2 露天矿生态型地层重构技术

针对常规露天矿生态修复局限于地表2m以浅的问题,研发了表土稀缺区露天矿排土场土壤-储水-隔水的近地表结构及精细化生态型构建方法,仿

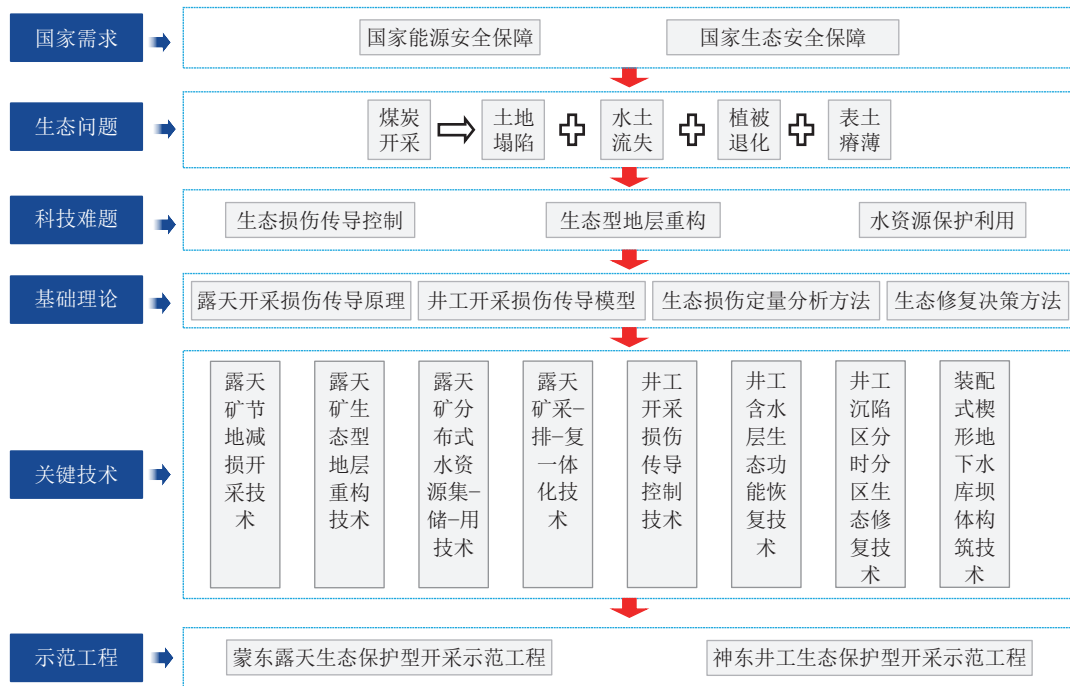


图8 煤炭生态保护技术路线
Fig.8 Coal ecological conservation technology route

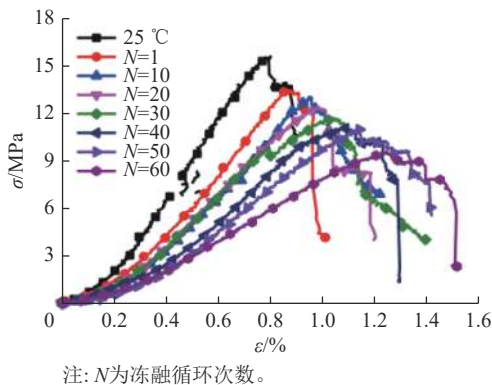


图9 边坡岩土体冻融循环(-10℃)
Fig.9 Freeze-thaw cycles in slope geotechnical bodies (-10℃)

自然层序的松散岩体含/隔水层重构的生态型排土场地层重构方法(图11),实现了含、隔水层重构并与原始含、隔水层有效连通,开采生态影响范围缩小30%。

3.3 露天矿分布式水资源集-储-用技术

针对矿区分季节、分方向用水特点,研发了软岩区露天矿排土场分布式集水控蚀、土壤生态水位控制、地下生态蓄水池建设等技术,实现矿井水立体存储和跨季节调配(图12),建成储水容量122万m³的世界首座露天矿地下生态蓄水池。

3.4 基于“生态修复窗口期”协同修复技术

针对北方露天矿生产和生态季节性特征,提出了基于气温与岩土剥排时空复合影响的“生态修复

窗口期”确定方法(图13),建立了露天开采全周期岩土“采运储用”动态规划模型^[24],露天矿生态修复期缩短1a以上。

3.5 井工开采损伤传导控制技术

针对井工开采损伤传导控制问题,提出了煤层顶底板分类方法与标准,发明了基于人造拱壳的覆岩沉降减损、变采宽协调开采和超大工作面等减少非均匀沉降的减损开采方法(图14),研发了覆岩空间注浆充填的损伤传导阻截减损技术,通过高层裂隙注浆,减少岩层下沉量,增加弯曲下沉带损伤空间分布,通过垮落带注浆,增加岩层下沉量,增加垮落带损伤空间分布(图15),非均匀沉降面积减少45%以上。

3.6 含水层生态功能恢复技术

针对含水层生态功能恢复问题,揭示了地下水流失的主通道分布于采空区边界采动张拉裂隙区的特征(图16),发明了促进水-气-岩作用形成衍生物充填覆岩导水裂隙主通道的含水层修复方法(图17),地下水流失量减少36%~59%。

3.7 装配式楔形地下水库坝体构筑技术

针对采动或矿震诱发矿井水渗漏问题,研发了装配式楔形地下水库坝体构筑技术,地下水库坝体上部为楔形密封顶梁,下部为坝体基座的装配式坝体结构(图18),充分利用侧向压力,将侧向压力作用由坝体破坏力变为坝体的加固力,有效解决储存矿井水渗漏难题。

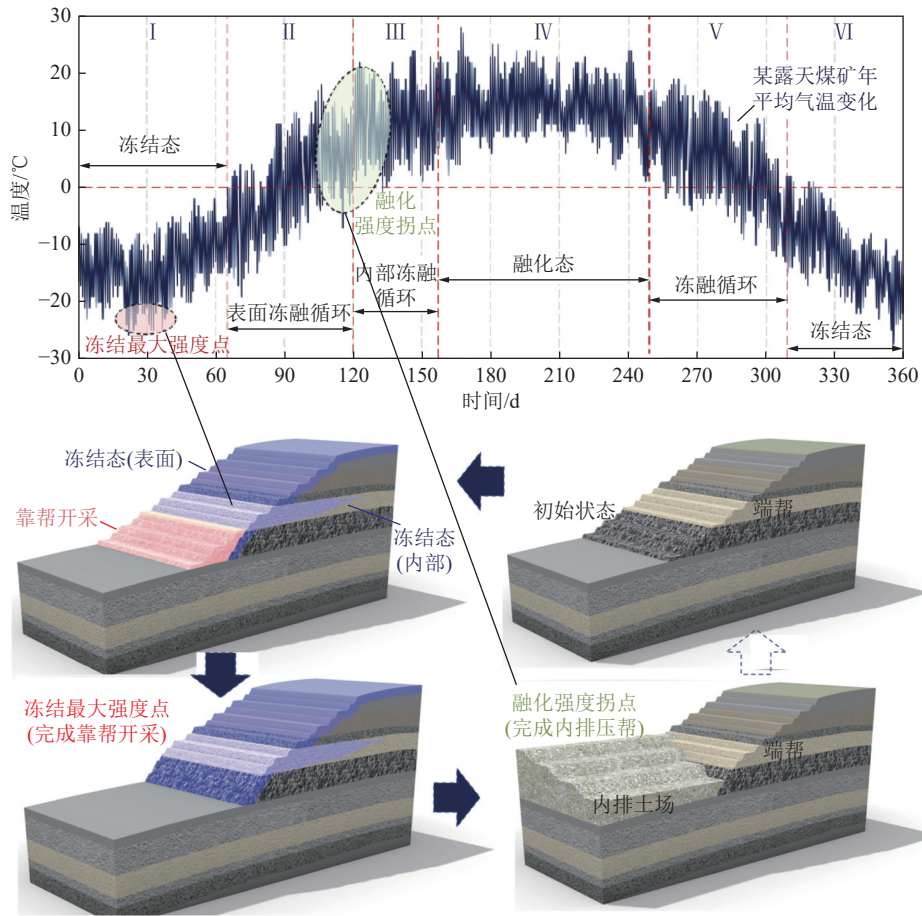


图 10 露天矿冻结期靠帮开采技术

Fig.10 Mining techniques for leaning against a gang during freezing period in open pit mines

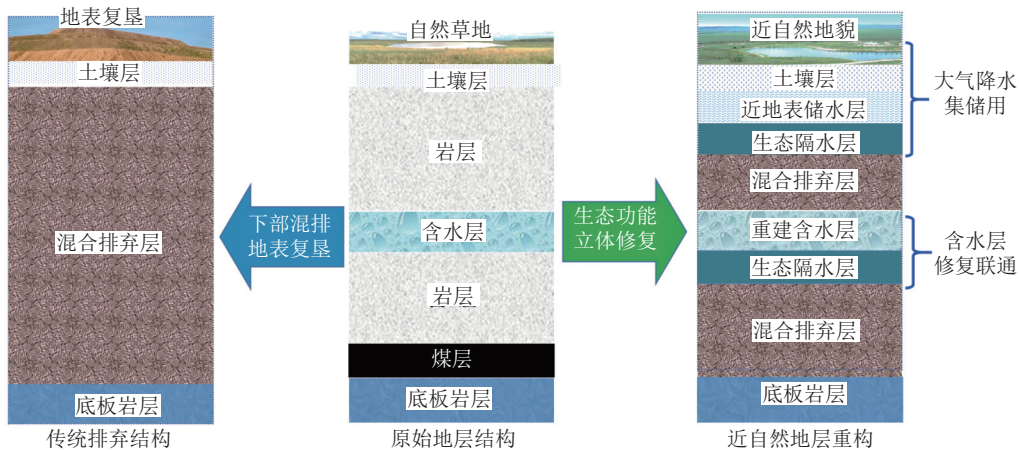


图 11 排土场近自然层序重构

Fig.11 Reconstruction of near-natural stratigraphic sequences in drainage field

装配式施工工艺参数计算:

$$S = \frac{K_1 PF}{tL} \quad (6)$$

$$E = \frac{K_2 PF}{dL} \quad (7)$$

式中: S 为顶梁临水面厚度, m ; K_1 为调整系数; P 为抗水压强度, MPa ; F 为坝体截面积, m^2 ; t 为坝体

抗剪强度, MPa ; L 为槽体周长, m ; E 为掏槽深度, m ; K_2 为调整系数; d 为人工坝体和煤柱抗压强度较小值, MPa 。

3.8 沉陷区分时分区生态修复技术

针对沉陷区生态修复问题, 研发了基于地表动态移动变形时空辨识的沉陷区分时分区土壤修复、边缘裂缝精准注浆封堵技术(图 19), 发明了钻孔抽

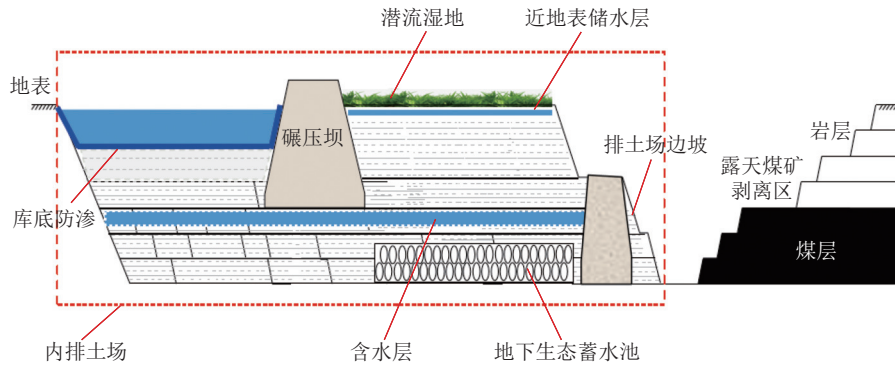


图12 分布式水资源集-储-用

Fig.12 Distributed water resources collection-storage-use

取矿井水、孔内分段净化与水质自动监测的矿井水智能生态灌溉等土壤水分保持技术(图20),生态修

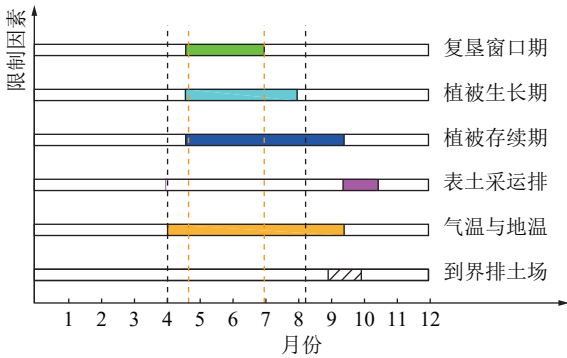
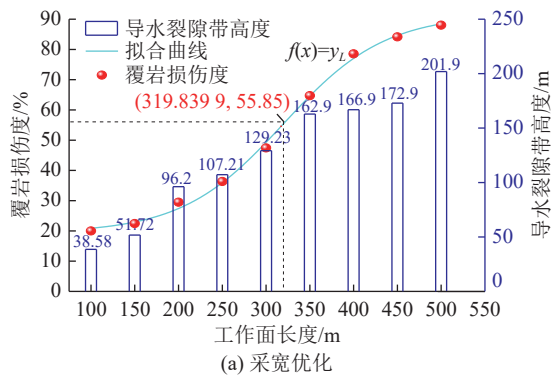
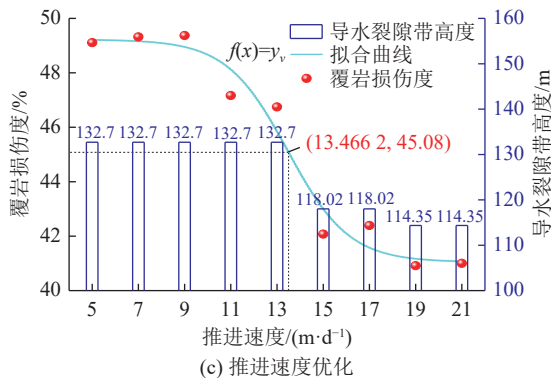


图13 生态修复窗口期

Fig.13 Ecological restoration window



(a) 采宽优化



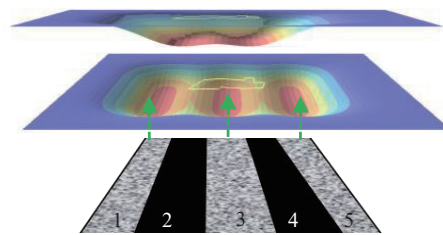
(c) 推进速度优化

复效率提高40%以上。

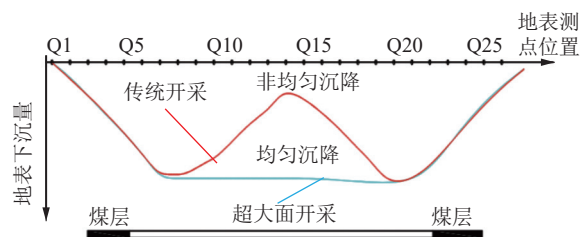
4 实践应用

4.1 蒙东露天生态保护型开采示范工程

东部草原区主要包括呼伦贝尔草原区和锡林郭勒草原区,地貌景观以低山丘陵为主。区域土壤厚度30 cm左右,养分含量低,植物丰度较低,物种较单一,生态抗干扰能力弱。通过“减损-重构-保水-修复”的生态保护型露天开采技术应用,建成了蒙东矿区生态保护型露天开采示范工程,示范面积1466/m²,宝日希勒示范区植被盖度由开发前的30%提高到59%,胜利示范区植被盖度由开发前的5%提高到39%。



(b) 多工作面协调跳采



(d) 超大工作面沉降曲线

图14 非均匀沉降调控

Fig.14 Non-uniform settlement regulation

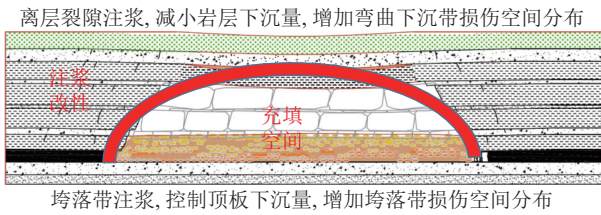


图 15 覆岩空间注浆充填
Fig.15 Grouting of overburden space

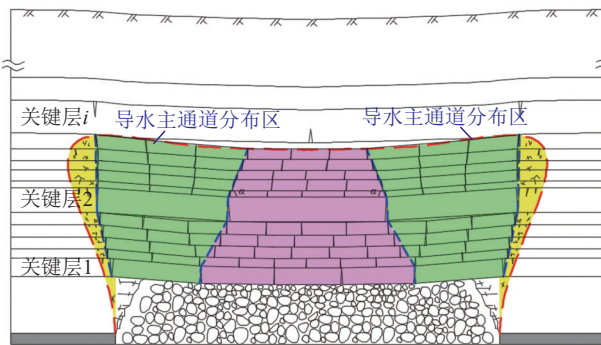


图 16 导水主通道分布模型
Fig.16 Model of distribution of main channel of conductive water

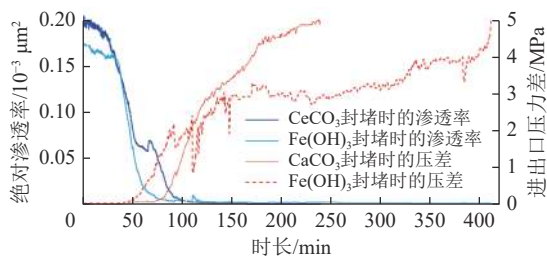
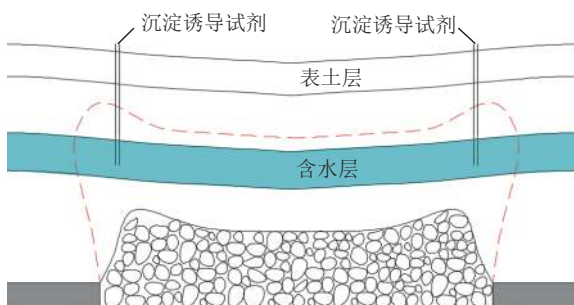


图 17 导水主通道诱导修复
Fig.17 Induced repair of the main channel of the conductive water

4.2 神东井工生态保护型开采示范工程

神东矿区是我国重要的煤炭生产基地, 该区煤层赋存条件好、构造简单, 以埋深浅、采厚大、超大工作面、快速开采为主要特征, 开采引起了覆岩及地

表的高强度损害, 使覆岩含水层及地表生态受到破坏。通过“减损-保水-修复”的生态保护型井工开采技术应用, 建成神东井工“生态保护型”煤炭开采示范工程。植被盖度由开发前的不足 10% 提高到 70%。

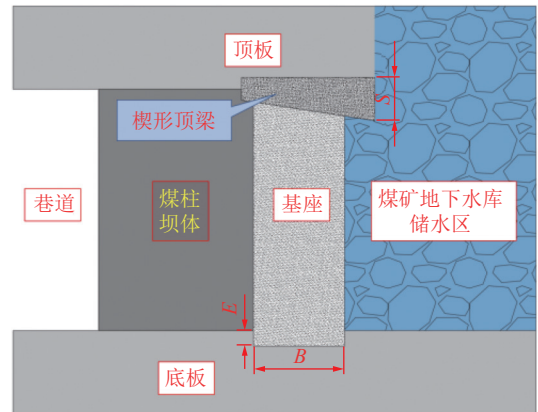


图 18 人工坝体井下装配式施工工艺
Fig.18 Artificial dam shaft assembly construction process

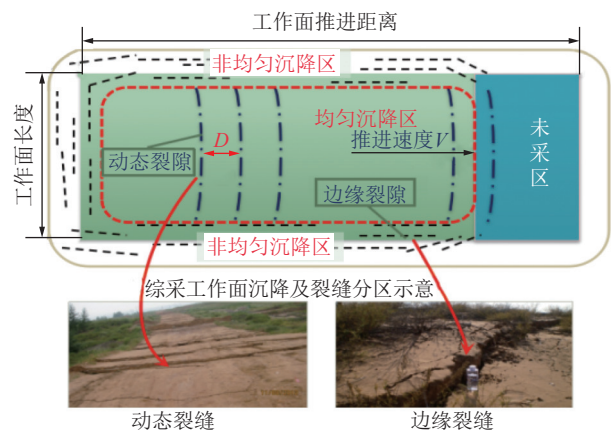


图 19 分时分区修复技术
Fig.19 Split-zone restoration techniques

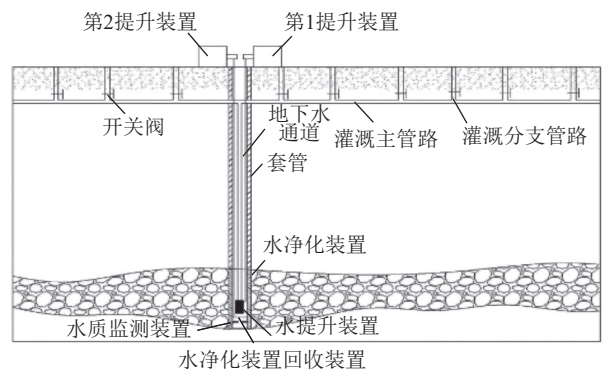


图 20 矿井水智能直排生态灌溉系统
Fig.20 Intelligent direct drainage eco-irrigation system for mine water

5 结 论

1) 针对生态脆弱区煤炭规模化高效开采对生态

影响范围大、周期长、强度高的难题,提出了生态保护型煤炭开采内涵、露天开采损伤传导途径,建立了井工开采损伤传导模型,提出了生态损伤定量分析和矿区生态修复决策方法,为生态保护型煤炭开采技术研发提供基础。

2)研发了露天矿节地减损开采、生态型地层重构、分布式水资源集-储-用技术、基于“生态修复窗口期”协同修复技术,建立了“减损-重构-保水-修复”的生态保护型露天开采技术体系。建成了蒙东矿区生态保护型露天开采示范工程,示范面积2.2万亩,宝日希勒示范区植被盖度由开发前的30%提高到59%,胜利示范区植被盖度由开发前的5%提高到39%。

3)研发了井工开采损伤传导控制、含水层生态功能恢复、装配式楔形地下水库坝体构筑、沉陷区分时分区生态修复技术,建立了“减损-保水-修复”的生态保护型井工开采技术体系。建成神东井工“生态保护型”煤炭开采示范工程,植被盖度由开发前的不足10%提高到70%。

参考文献(References):

- [1] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11-22.
YUAN Liang. Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 11-22.
- [2] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15.
- [3] 赵玉国, 吉莉, 董霁红等. 蒙东典型大型露天矿生态储存指标体系及过程分析: 以宝矿、敏矿、胜利矿为例[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 271-280.
ZHAO Yuguo, JI Li, DONG Jihong, et al. Analysis of index system and state of ecological storage of typical large open-pit mines in Eastern Inner Mongolia: taking Baorixile, Yinmin and Shengli No. 1 Open-Pit Coal Mine as examples[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 271-280.
- [4] 李全生. 东部草原区大型煤电基地开发的生态影响与修复技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3625-3635.
LI Quansheng. Progress of ecological restoration and comprehensive remediation technology in large-scale coal-fired power base in the eastern grassland area of China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3625-3635.
- [5] 刘具, 秦坤. 我国煤炭绿色开采技术进展[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(6): 7-15.
LIU Ju, QIN Kun. Progress of green coal mining technology in China[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2023, 50(6): 7-15.
- [6] 孙文洁, 李文杰, 杨文凯, 等. 煤炭矿山水环境问题类型划分及治理模式[J]. 煤矿安全, 2023, 54(5): 35-41.
SUN Wenjie, LI Wenjie, YANG Wenkai, et al. Classification of water environment problems in coal mine and treatment mode[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(5): 35-41.
- [7] 袁亮, 吴劲松, 杨科. 煤炭安全智能精准开采关键技术与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 861-868.
YUAN Liang, WU Jinsong, YANG Ke. Key technology and its application of coal safety intelligent precision mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2023, 40(5): 861-868.
- [8] 王双明, 耿济世, 李鹏飞, 等. 煤炭绿色开发地质保障体系的构建[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 33-43.
WANG Shuangming, GENG Jishi, LI Pengfei, et al. Construction of geological guarantee system for green coal mining[J]. Coalfield Geology and Exploration, 2023, 51(1): 33-43.
- [9] HUERTAS José I, HUERTAS María E, IZQUIERDO Sebastián, et al. Air quality impact assessment of multiple open pit coal mines in northern Colombia[J]. Journal of environmental management, 2012, 93(1): 121-129.
- [10] 李全生. 井工煤矿减损开采理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 988-1002.
LI Quansheng. Reduction theory and technical system of underground coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 988-1002.
- [11] 李全生, 李晓斌, 张凯, 等. 基于“空天地”一体化技术的岩层采动损伤监测与应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 402-413.
LI Quansheng, LI Xiaobin, ZHANG Kai, et al. Rock strata mining damage monitoring and application based on “space-sky-surface” integrated technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 402-413.
- [12] 李全生, 许亚玲, 李军, 等. 采矿对植被变化的影响提取与生态累积效应量化分析[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2420-2434.
LI Quansheng, XU Yaling, LI Jun, et al. Extraction of the impact of mining on vegetation changes and quantitative analysis of ecological cumulative effects[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2420-2434.
- [13] 刘英, 许萍萍, 毕银丽, 等. 新疆戈壁煤矿露天开采对生态环境扰动定量分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 959-974.
LIU Ying, XU Pingping, BI Yinli, et al. Quantitative analysis of coal mining disturbance on environment in Xinjiang Gobi Open-pit mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 959-974.
- [14] 刘英, 魏嘉莉, 毕银丽, 等. 红沙泉露天煤矿碳储量时空动态变化分析[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 214-224.
LIU Ying, WEI Jiali, BI Yinli, et al. Spatiotemporal dynamic change analysis of carbon storage in desertification open-pit mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 214-224.
- [15] 岳辉, 朱蓉, 刘英, 等. 荒漠化露天矿土壤湿度监测模型的构建: 以红沙泉矿区为例[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 300-311.
YUE Hui, ZHU Rong, LIU Ying, et al. Construction of soil moisture monitoring model in desertification open-pit mining area:

- taking Hongshaquan Mining Area as an example[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 300–311.
- [16] 李 军, 彭传盈, 张成业, 等. 基于大样本的露天开采植被扰动范围一般性统计规律: 以神东煤炭基地为例[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 975–985.
- LI Jun, PENG Chuanying, ZHANG Chengye, *et al.* General statistical rules of vegetation disturbance range by open-pit mining based on a large sample: a case study of Shendong coal base[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 975–985.
- [17] 李 军, 彭苏萍, 张成业, 等. 矿区生态环境定量遥感监测评价技术框架与应用[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(1): 9–25, 88.
- LI Jun, PENG Suping, ZHANG Chengye, *et al.* Quantitative remote sensing-based monitoring and evaluation of the ecological environment in mining areas: technology framework and application. [J]. *Journal of Mining Science*, 2022, 7(1): 9–25, 88.
- [18] 李 军, 刘举庆, 游 林, 等. 多源大数据支持的土地储备智能决策模型集研究[J]. *地球信息科学学报*, 2022, 24(2): 299–309.
- LI Jun, LIU Juqing, YOU Lin, *et al.* An intelligent decision model set for land reserve based on multi-source big data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2022, 24(2): 299–309.
- [19] 孙 茹, 朱晓峻, 张鹏飞, 等. 高潜水位采煤沉陷区积水时空演化特征研究: 以安徽省矿区为例[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(12): 215–224.
- SUN Ru, ZHU Xiaojun, ZHANG Pengfei, *et al.* Study on temporal and spatial evolution characteristics of water accumulation in coal mining subsidence area with high groundwater level: taking Anhui Province Mining Area as an example[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(12): 215–224.
- [20] 张 凯, 王顺洁, 高 霞, 等. 煤炭开采下神东矿区土壤含水率的空间变异特征及其与土质和植被的响应关系[J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(6): 53–61.
- ZHANG Kai, WANG Shunjie, GAO Xia, *et al.* Spatial variability of soil moisture content and the response relationship between soil moisture content and soil quality and vegetation under coal mining in Shendong mining area[J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 42(6): 53–61.
- [21] 赵 靖, 段昌瑞, 康志鹏, 等. 过断层大采高工作面注浆加固材料选择及应用研究[J]. *煤炭技术*, 2023, 42(1): 21–24.
- ZHAO Jing, DUAN Changrui, KANG Zhipeng *et al.* Research on selection and application of grouting reinforcement materials for large mining height working face through fault[J]. *Coal Technology*, 2023, 42(1): 21–24.
- [22] 李全生, 刘举庆, 李 军, 等. 矿山生态环境数字孪生: 内涵、架构与关键技术[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(10): 3859–3873.
- LI Quansheng, LIU Juqing, LI Jun, *et al.* Digital twin of mine ecological environment: Connotation, framework and key technologies[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(10): 3859–3873.
- [23] 徐祝贺, 李全生, 张国军, 等. 神东矿区多煤层开采覆岩破坏及导水裂隙带高度特征研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023, 5(6): 71–81.
- XU Zhuhe, LI Quansheng, ZHANG Guojun, *et al.* Study on the feature of overlying rock failure and the height of water-conducting fracture zone after multi-seam coal mining in Shendong Mining Area[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(6): 71–81.
- [24] 李全生, 李 淋. 东部草原区露天煤矿减损开采与生态系统修复技术及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 484–492.
- LI Quansheng, LI Lin. Technology and application of damage reduction mining and ecosystem restoration of open-pit coal mines in eastern grassland area[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 484–492.