



北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术

李全生 李淋 方杰 周伟 雷少刚 包玉英 崔明

引用本文：

李全生, 李淋, 方杰, 等. 北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 323–333.
LI Quansheng, LI Lin, FANG Jie. Ecological protection and restoration technology of large-scale open-pit coal mining area in the northern sand-proof belt[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 323–333.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1902>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于无人机倾斜摄影测量技术的露天矿生态修复研究

Study on ecological restoration of open pit mines based on UAV oblique photogrammetry technology
煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a26bf3d9-c86d-410b-b9d5-d10ff41f4f85>

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.est.2021.04.006>

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>

准格尔矿区露天矿开采扰动效应评价

Evaluation on disturbance effect of open-pit mine in Jungar Mining Area
煤炭科学技术. 2018(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7f1adb79-47de-4ecc-adc1-0aba042f9363>

我国露天煤矿开采技术综述及展望

Summary and prospect of open-pit coal mining technology in China
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/71d7fc23-0d4f-4c9e-b663-3da2191e65bd>

露天开采土地扰动强度量化及演化规律研究

Land disturbance intensity quantification and evolution law of open-pit mining
煤炭科学技术. 2020, 48(11): 98–105 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5c94a9c6-3a83-4f24-8d9d-f0b08a7e1082>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

碳中和科学与工程



李全生, 李 淋, 方 杰, 等. 北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 323–333.

LI Quansheng, LI Lin, FANG Jie, et al. Ecological protection and restoration technology of large-scale open-pit coal mining area in the northern sand-proof belt[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 323–333.

移动扫码阅读

北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术

李全生^{1,2,3}, 李 淋^{1,2}, 方 杰³, 周 伟⁴, 雷少刚⁴, 包玉英⁵, 崔 明⁶

(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国家重点实验室, 北京 102209; 4. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221116; 5. 内蒙古大学, 内蒙古 呼和浩特 010021;
6. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091)

摘要: 北方防沙带是我国防治沙化和荒漠化的关键地带, 是“三北”工程的核心区, 区内土壤贫瘠、风速大、干旱缺水、植被稀少、生态恢复力低, 而大型露天煤矿开采与生态保护矛盾突出, 直接影响区域生态安全和国家能源保供, 迫切需要开展大型露天矿区生态保护修复研究。针对北方防沙带大型露天煤矿区开采引起的土地破坏、扬尘起沙、水位下降、土壤沙化、植被退化等问题。以北方防沙带面积和露天煤炭产量占比均最大的内蒙古的大型露天煤矿区为研究区, 秉承“减损开采—立体保水—造土活土—系统修复—集成监管”的研究思路, 揭示大型露天矿岩土损伤—生态退化传导机理、生态减损开采机制、重建生态自维持机制, 研发生态保护型减损开采、生态化设计、水资源保护与综合利用、抗侵蚀地貌重塑、排土场活土层精细重构、土壤改良与提质增容、菌-藻-草联合修复、生态系统退化监管等关键技术, 形成适合北方防沙带露天煤矿区生态保护与修复技术体系, 建成大型露天矿区生态保护修复集成示范区。创建低成本、高效率、可持续、可复制的大型露天矿区生态保护修复模式, 为保障我国北方防沙带大型露天矿区科学开采与生态安全提供支撑, 实现煤炭开发能源保供与生态保护相协调、“开发金山银山, 再造绿水青山”的目标。

关键词: 北方防沙带; 露天矿; 生态保护; 减损开采; 系统修复

中图分类号:X171 文献标志码:A 文章编号: 0253-2336(2024)01-0323-11

Ecological protection and restoration technology of large-scale open-pit coal mining area in the northern sand-proof belt

LI Quansheng^{1,2,3}, LI Lin^{1,2}, FANG Jie³, ZHOU Wei⁴, LEI Shaogang⁴, BAO Yuying⁵, CUI Ming⁶

(1. China Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China; 2. China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102209, China; 4. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 5. Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 6. Institute of Ecological Conservation and Restoration, China Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China)

Abstract: The northern sand-proof belt is the key zone for preventing and controlling desertification and sandification in China, and it is the core area of the “Three Norths” project, which is characterized by infertile soil, high wind speed, drought and water shortage, sparse vegetation, and low ecological resilience, and the contradiction between large-scale open-pit coal mining and ecological protection is prominent, which directly affects the regional ecological security and the national energy security, and there is an urgent need to carry out the research on the ecological protection and restoration of large-scale open-pit mining areas. The study of ecological protection and restoration of large-scale open-pit mining area is urgently needed. To address the problems of land destruction, dust and sand, falling water level, soil sanding, and vegetation degradation caused by large-scale open-pit coal mining in the northern sand belt, the study is based on the area

收稿日期: 2023-12-13 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.12438/cst.2023-1902

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFF1306000); 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室 2020 年开放基金资助项目(GJNY20-113-20)

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。Tel: 010-57337365, 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

of the northern sand belt and the size of the open-pit coal mine. Taking the large-scale surface coal mining area in Inner Mongolia, which has the largest area and proportion of surface coal production in the northern sand belt, as the research area, the research idea of “loss-reducing mining - three-dimensional water preservation - soil creation and soil revitalization - systematic restoration - integrated supervision and management” is revealed. Adhering to the research idea of “loss-reducing mining - three-dimensional water conservation - soil creation and living soil - system restoration - integrated supervision”, the research area reveals the transmission mechanism of geotechnical damage and ecological degradation of large-scale surface mines, the mechanism of ecological loss-reducing mining, the mechanism of ecological self-sustainability, and develops key technologies such as loss-reducing mining with ecological protection, ecological design, water resource protection and comprehensive utilization, erosion-resistant geomorphological remodeling, fine reconstruction of the living soil layer in the discharge site, soil improvement, and quality enhancement and capacity increase, and joint restoration of fungus-algae-grass, ecosystem degradation supervision and other key technologies, form an ecological protection and restoration technology system suitable for the open-pit coal mine area in the northern sand-proof belt, and build a large-scale integrated demonstration area for ecological protection and restoration of the open-pit mine area. We will create a low-cost, high-efficiency, sustainable and replicable ecological protection and restoration model for large-scale open-pit coal mining areas, provide support for scientific mining and ecological safety in large-scale open-pit coal mining areas in the northern sand-proof belt of China, and realize the goal of coordinating energy supply and ecological protection in coal development and the goal of “developing the gold and silver mountains and recreating the green mountains and green water”.

Key words: northern sand-proof belt; open-pit mines; ecological protection; loss-reducing mining; systematic restoration

0 引言

2022年北方防沙带露天煤矿产量近9亿t,其中内蒙古占比59.6%,新疆占35.8%。北方防沙带露天煤区开发在保障我国能源供应的同时,也引起了地下水位下降、土地压占挖损、植被退化、景观破損等生态问题^[1-2]。因此,研究北方防沙带大型露天矿区生态保护与修复技术具有重要意义。露天开采是澳大利亚、美国、德国和加拿大等采矿大国的主要开采方式^[3]。国外露天矿绿色开采起源于19世纪美国、德国在矿坑周边局部环境的保护;19世纪中期西方国家开始兼顾环境保护与资源高效安全开采;21世纪以来,西方国家将露天开采与污染治理、矿区绿化等环境保护概念融合,在粉尘治理及生态修复等方面开展了综合研究。我国从20世纪80年代开始重视矿区生态修复^[4]。经过长期研究与实践,相继在生态修复规划^[5-6]、水资源影响^[7-8]、地貌重塑^[9]、复垦区环境评价^[10-11]、矿业生命周期与可持续发展等方面取得一系列成果。李全生等^[12-15]建立了煤炭生态型露天开采理论,创建了东部草原区大型露天煤矿减损开采与生态修复技术体系;李树志等^[16]提出了东部草原区露天矿排土场仿自然地貌土地整形方法,宋子岭等^[17]研究了露天开采对土、水、气产生的不利影响;才庆祥等^[18-20]建立了露天煤矿生产与生态重建一体化系统模型;赵玉国等^[21]构建了蒙东典型大型露天矿生态储存指标体系,揭示了露天矿生态储存效应,朱晓昱等^[22]分析了呼伦贝尔草原区1992—2015年不同草地类型分布时空变化。大型露天煤矿开采在北方防沙带引起的生态环境问题具有特殊性,

脆弱生态系统采动损伤后恢复难度更大,现有研究成果难以解决北方防沙带大型露天矿区高强度开采与脆弱生态保护之间的矛盾。因此亟需研究北方防沙带大型露天矿区开采与生态保护基础理论和成套关键技术。

1 露天煤矿区特征与存在的生态问题

1.1 露天煤矿区环境特征

北方防沙带是我国防治沙化和荒漠化的关键地带,是“三北”工程的核心区,区内土壤贫瘠、风速大、干旱缺水、植被稀少、生态恢复力低^[23-25]。2022年,北方防沙带露天煤炭产量(图1)占全国露天产量80%以上,大型露天煤矿采剥量巨大,单矿每年可达上亿立方米;采损面积大,单矿可超过20 km²;地形地貌改变剧烈,边坡和粉尘控制难度大,生态影响程度高,大型露天煤矿开发与脆弱生态保护矛盾突出。

1.2 露天煤矿区开采存在问题

目前,我国缺乏针对北方防沙带露天矿区尺度的全生命周期生态化开采设计、减损开采、系统修复理论与技术研究,主要表现在以下5个方面。

1)露天开采岩土-生态损伤机理和生态减损机制不清,全生命周期生态化设计缺乏^[26-28]。大型露天矿区开发引起的岩层破損、土地挖损压占和地下水位下降等影响生态的关键要素及权重不明,北方防沙带大型露天矿区岩土损伤传导并影响脆弱生态系统、减损开采机制不清、全周期生态化设计和减损开采技术缺乏。

2)大型露天矿区伴生矿物资源与水资源生态综合利用率低^[29]。一方面,大型露天矿区的风化煤、煤

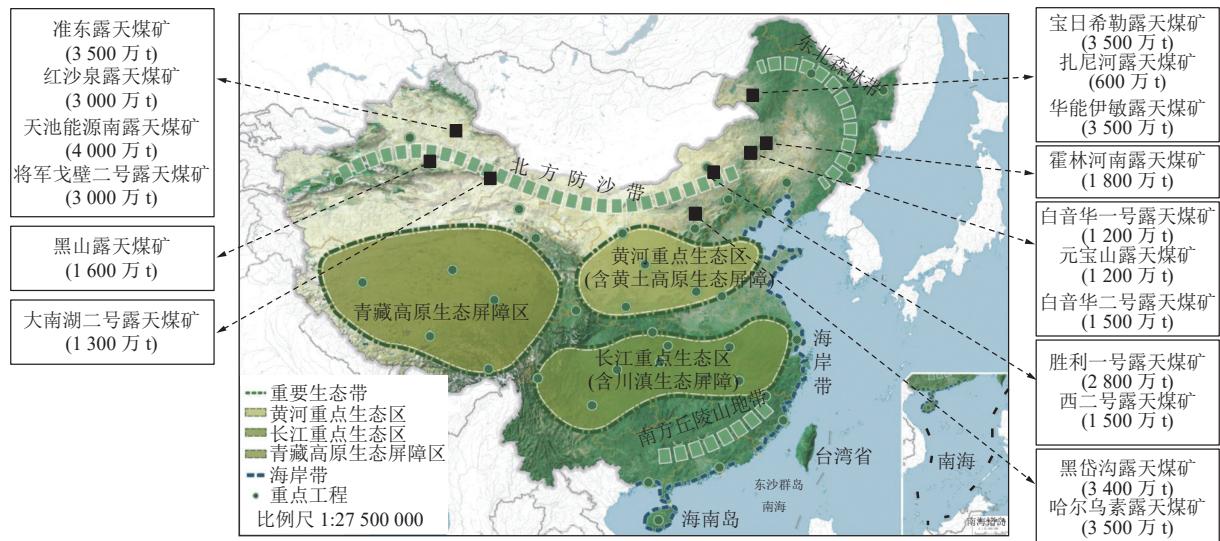


图 1 我国主要大型露天煤矿分布

Fig.1 Distribution of major large-scale open pit coal mines in China

矸石、伴生矿物和粉煤灰多以“固废”排放并影响矿区生态，其低成本资源化和生态化利用已成为制约北方防沙带大型露天矿区高质量发展的重要问题。另一方面，矿区形成的矿坑积水、地表径流等水资源生态蓄积利用程度低，导致生态浇灌成本高。

3)露天矿生态修复“重植被、轻土壤”，低成本矿山土活化与熟化技术缺乏^[30]。露天矿排土场生态修复过程存在“重植被、轻土壤”等问题，土壤提质增容技术缺乏，导致土壤质量不高、生态系统稳定性差，排土场土壤—植被生态系统退化严重。

4)大型露天矿区损毁生态系统修复和维持成本高^[31]。大型露天矿区损毁生态系统地貌—土壤—植被联合修复程度低，普遍存在与周边自然景观融合度差、边坡抗侵蚀能力低、坡体稳定性差、水土流失严重、植被难以定植和重建生态系统难以自维持等问题。

5)大型露天矿区生态退化机理不清，生态监管薄弱^[32-33]。大型露天矿区受损生态系统的退化机理以及多尺度扩散过程不清，生态监测技术与监测数据基础薄弱，缺乏中高分辨率、长时序、高频次协同观测，难以动态掌握矿山生态退化状况，主动及时的生态保护修复集成监管模式亟待建立。

2 露天煤矿区生态保护型开采科学问题与技术路线

2.1 露天煤矿区生态保护型开采科学问题

1)大型露天矿区岩土损伤生态退化传导机理。针对北方防沙带大型露天矿“揭盖式”开采引起的矿区“漏水、漏肥、起沙、扬尘”等典型问题，揭示开采岩土损伤—生态退化传导过程；分析露天煤矿开采

生态退化的根源及主控因素，揭示露天开采多场作用下岩土损伤传导与多尺度下生态退化响应，为矿区生态损伤控制提供理论基础如图2所示(图2中，例：T1-1为T1时间节点生态系统所处的一种状态；A为当前生态系统整体优于原始生态系统；B为当前生态系统整体劣于原始生态系统)。

2)大型露天矿区生态减损开采机制。针对北方防沙带大型露天矿生态影响范围大，生态损伤受开采方法、开采工艺与参数、地质条件与生态本底等要素影响显著等问题，揭示煤炭开采与生态保护时空影响机理和生态减损开采机制；建立以损伤因子调控为核心的减损开采动力学模型，提出露天矿全生命周期减损开采调控策略与方法，实现大型露天矿区生态系统减损开采与管控。

3)大型露天矿区重建生态系统自维持机制。针对北方防沙带大型露天矿水蚀风蚀严重、土壤抗侵蚀能力差、生物多样性低，重建生态系统自维持能力低等问题，揭示排土场重建生态系统自维持机制和抗侵蚀机理，建立以地貌—植被—土壤—微生物要素特征及耦合关系为核心的系统自维持评价模型，掌握露天矿排土场近自然抗侵蚀地貌重塑和生物联合修复技术原理和方法，实现系统自维持。

2.2 露天煤矿区生态保护型开采技术路线

以北方防沙带面积和露天煤炭产量占比均最大的内蒙古的大型露天煤矿区为研究区，秉承“减损开采—立体保水—造土活土—系统修复—集成监管”的总体研究思路，揭示3大科学问题，研发5类关键技术，建设2个集成示范区。研究技术路线如图3所示。

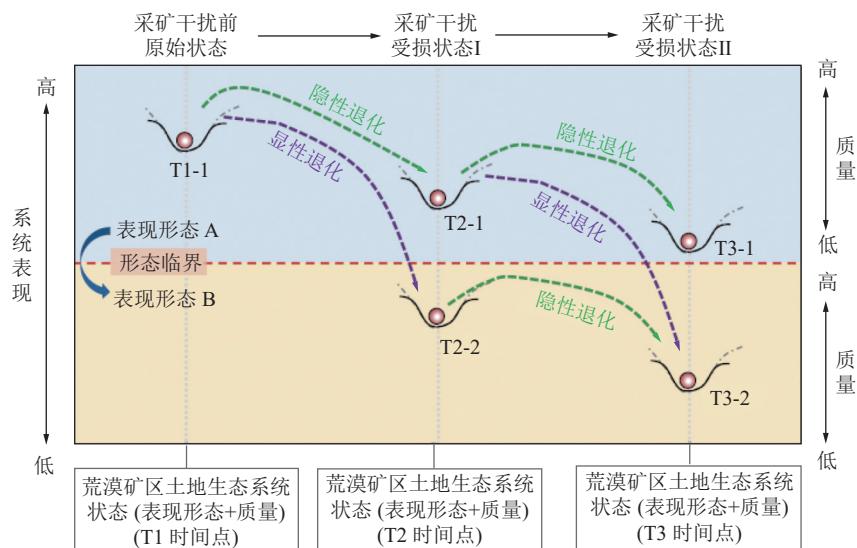


图2 露天矿生态退化响应

Fig.2 Ecological degradation response of open pit mines

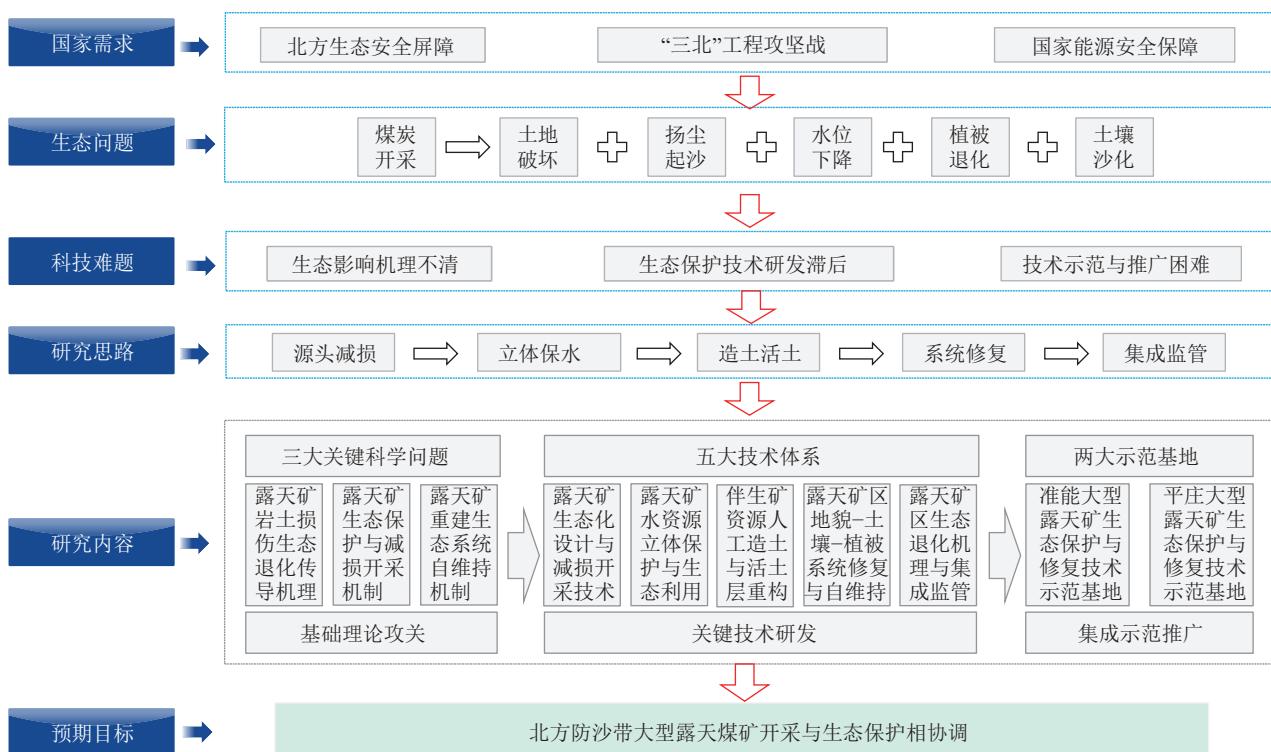


图3 研究技术路线

Fig.3 Technical line of research

3 露天煤矿区生态保护型开采理论基础

3.1 生态损伤传导机理与减损开采理论基础

1) 北方防沙带露天开采岩土损伤传导机理。研究露天矿“揭盖式”开采应力场、裂隙场、渗流场和温度场作用下岩土损伤规律，揭示露天开采过程中“土地挖损压占-应力重布-岩体损伤-裂隙扩展-边坡位移”的岩土损伤传导机理(图4)。

借鉴静水压力模型分析不平衡地应力的发展规律：

$$\sigma_3 = K_0 \gamma H \quad (1)$$

式中： σ_3 为不平衡应力，即排土场堆载体对基底软岩挤压产生的侧向应力，kPa； K_0 为侧压系数； γ 为上覆岩体的容重，kN/m³； H 为岩体深度，m。

2) 北方防沙带露天开采生境损伤传导机理。针

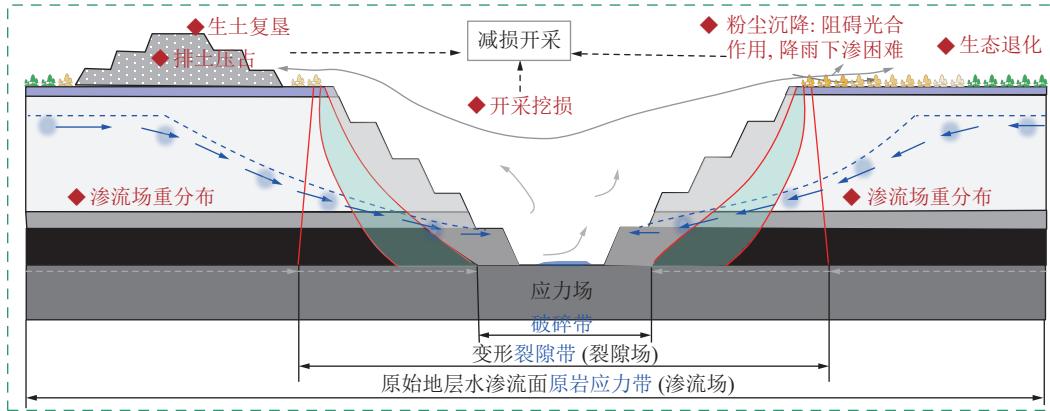


图4 露天开采岩土损伤传导机理

Fig.4 Geotechnical damage conduction mechanism in open pit mining

对北方防沙带露天开采引发漏水、漏肥、起沙、扬尘的特点,研究开采岩土损伤引起近地表层、地下水水位等生境损伤规律,揭示露天开采生境损伤传导机理。

3)露天煤矿减损开采机制。研究开采方法、开采工艺与参数等要素对生态因子损伤的影响规律,建立以损伤因子调控为核心的减损开采系统动力学模型,提出露天矿全生命周期减损开采调控策略与方法。

3.2 水资源立体保护与生态利用理论基础

1)露天矿区大气降水-地表水-地下水转化关系。露天矿区水文地质单元边界及地下水赋存规律,厘定矿区典型水文地质参数,查明降水、地表水、地下水水文地球化学特征,揭示露天矿区大气降水-地表水-地下水转化关系。大气降水、地表水和地下水之间存在下列关系:

$$P = Y + Z + I_1 \quad (2)$$

式中: P 为降落到地表的水; Y 为地表径流; Z 为地表蒸发量; I_1 为地下水。

2)露天矿开采地下水流场演变规律。基于露天开采“应力场-裂隙场-渗流场”三场演化、地下水渗流理论及多尺度仿真分析方法,构建区域三维地下水数值仿真模型,研究露天开采地下水流场补、径、排演变特征,研究植被耗水、根系与包气带地下水位的关系,厘定最佳适宜地下水位埋深,揭示地下水位下降对表生生态影响规律,评估露天矿开采地下水影响范围及其生态效应。

3)露天矿开采地下水影响范围控制方法。研究开采工艺规模与参数、截水、回灌等对地下水影响范围的控制机理,提出基于水资源保护的露天矿地下水影响范围控制方法。

根据地下水稳定流分析的“大井法”^[34],含水层

地下水向露天采坑的侧向排泄量 Q :

$$Q = 1.366K \frac{M(2h - S)S}{\lg R_0 - \lg r_0} \quad (3)$$

式中: Q 为地下水向露天采坑的侧向排泄量, m^3/d ; K 为渗透系数, m^3/d ; M 为含水层厚度, m ; h 为水头高度, m ; S 为由于矿坑排水产生的水位降深值, m ; R_0 为引用影响半径, m ; r_0 为假想“大井”的半径(即为揭露区域的引用半径), m 。

3.3 伴生矿物资源人工造土与排土场活土层精细重构理论基础

1)排土场土壤重构机理。基于水分运移和养分循环模型,阐明北方防沙带自然发育典型植物群落土壤层序结构、植物根系分布及功能微生物特征规律,揭示排土场土壤重构机理。

2)排土场土壤质量评价体系。研究北方防沙带露天矿区排土场土壤的主要物理、化学及生物特征,揭示指标间的相关关系,提出排土场活土层质量的关键评价指标和评价方法。

3)伴生矿物资源关键功能组分赋存规律与活化机理。研究伴生矿物资源的物质组成、结构特征及其功能,解析伴生矿物资源关键功能组分微观尺度赋存状态及分配规律,阐明伴生矿物资源功能组分活化机理。

3.4 地貌-土壤-植被系统修复与自维持理论基础

1)排土场重建生态系统自维持机制。研究植物与土壤微生物种内种间相互作用关系和演替规律,解析植被-土壤-微生物系统养分获取、分配及运输过程,揭示重建生态系统植被-土壤-微生物耦合规律和协同关系。

2)排土场地形地貌水蚀调控机制。基于排土场高分辨率数字高程模型,构建地形因子指标体系;构

建排土场降雨径流模型,研究地形地貌-产流汇流-土壤水蚀的耦合传导过程和规律,揭示排土场地形地貌水蚀调控机制。

3)排土场微地形风蚀调控机制。利用高分辨率遥感影像,分析排土场微地形要素类型及其空间分异规律;基于排土场土壤风蚀风沙流结构特征,研究微地形-地表风场-土壤风蚀耦合传导过程和规律,揭示排土场微地形风蚀调控机制。

3.5 生态退化机理与保护修复集成监管理论基础

1)露天矿区星-空-地联合生态观测网络构建。联合无人机遥感、矿卡车载实时感知平台,构建与“矿大南湖号”矿业卫星相匹配的星-空-地协同的露天开采与生态观测网络;研究多源观测数据的辐射一致化和时空匹配方法,实现剥采排复全过程星-空-地协同监测。

2)露天矿区米级生态地质参数定量遥感反演。建立高分多谱矿业卫星、无人机、矿卡多平台、被动协同的米级高分辨率矿区关键生态地质参数遥感反演与融合方法;构建矿区粉尘、植物群落土壤侵蚀、边坡位移等时序遥感监测方法与数据。

归一化植被指数,即近红外通道与可见光通道反射率之差与之和的商。计算公式为

$$I_{NDV} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (4)$$

式中: I_{NDV} 为植被指数; ρ_{NIR} 为近红外通道地表反射率; ρ_R 为红光通道地表反射率。

3)植被覆盖度指数,是指植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比。目前主要运用植被指数近似估算植被覆盖度,采用基于归一化植被指数的改进的像元二分模型。

$$W = \frac{I_{NDV} - I_{NDV,soil}}{I_{NDV,veg} + I_{NDV,soil}} \quad (5)$$

式中: W 为植被覆盖度; $I_{NDV,soil}$ 为无植被像元 I_{NDV} 值; $I_{NDV,veg}$ 为纯植被像元的 I_{NDV} 值。

4)露天矿剥采排复扰动空间与过程时序监测。提出联合多时相、多尺度的光学与微波遥感数据提取剥采排复扰动空间与时序过程监测方法,建立剥采排复与生态数据的时空匹配方法,实现露天开采与生态退化修复全过程的时序监测。

4 露天煤矿区生态保护型开采技术体系

4.1 生态损伤传导机理与减损开采关键技术

针对我国北方防沙带大型露天矿“揭盖式”开采生态损伤传导机理不清和开采损伤时空控制难的问题(图5)。

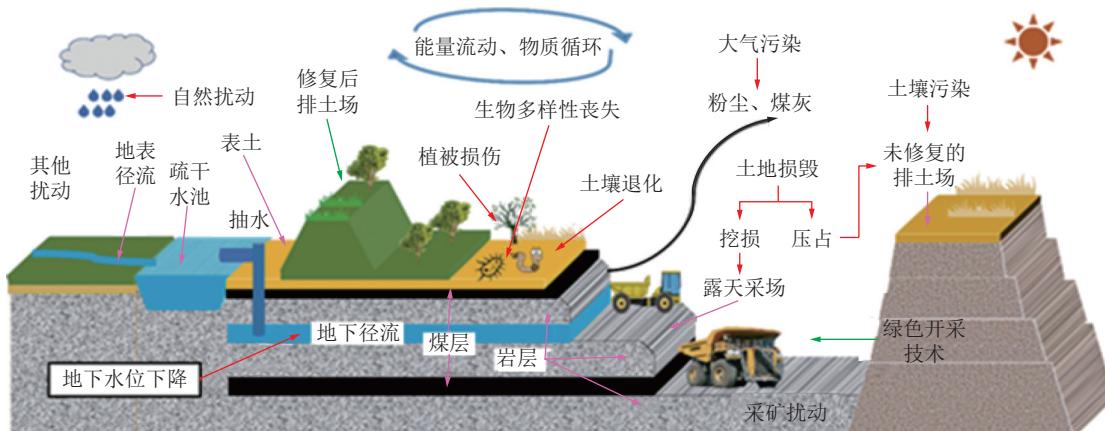


图5 露天矿生态损伤
Fig.5 Ecological damage in open pit mines

1)露天矿采排空间实时调配技术。提出挖损、压占、修复不同阶段露天矿土地分类方法,研究基于矿业专用卫星遥感数据的岩土类型识别、采场形态参数自动提取和土石方量计算方法,构建露天开采全生命周期土地占用评价标准与方法。

2)露天矿采排复一体化时空节地技术。研究露天矿单位资源开采量土地占用面积和持续时间变化规律,建立采排时空控制、边坡角度、土地占用的关

系模型,研发开采工艺系统空间优化和边坡稳定性分区的内排调控节地技术。

3)露天矿松散层精细化采储的保土技术。提出基于生态修复目标的矿区开采松散层分类方法,研究不同类型土壤采储用时间与物理特性变化规律,研发近地表层高效选采和低损伤储运技术,研制北方防沙带近地表层高效精准选采装置。

4)露天煤矿精准靠帮开采与边坡稳定协调技术。

基于实时监测预警分析,揭示露天开采边坡变形时空响应与失稳机制,研发边坡空间形态动态优化设计方法和控制技术,形成露天矿精准靠帮-快速回填开采技术。

5)露天煤矿粉尘沙尘运移规律及其控制技术。研究高强度开采、快速推进下粉尘沙尘运移规律,揭示局地小气候效应下粉尘沙尘运移阻滞机制,建立高精度露天煤矿采场空气质量预报模型,提出粉尘沙尘控制的采排模式,研发粉尘沙尘运移通道控制与生态阻滞的控制技术,创建阻滞带配置模式。

6)露天矿全生命周期生态化设计。建立露天开采生态保护型煤炭产能评价模型,构建涵盖水土气植生态保护、资源开发、区域发展等评价指标的全生命周期综合效益评价方法研发基于海量数据集的全生命周期数字孪生技术,构建露天矿减损开采优化决策模型,提出露天矿生态化设计方法。

4.2 水资源立体保护与生态利用关键技术

针对北方防沙带大型露天矿地下水水资源流失严重、矿坑水保护与利用率低、重建植被灌溉成本高等问题。

1)露天矿大气水快速凝结与零碳集水装置。精细化提取排土场地型地貌参数,研究露天矿排土场大气水含量时空分布;揭示露天矿排土场大气水凝结(露水)形成机制,研究微地貌形态和表层土壤结构参数对大气水凝结速率影响规律;研发集吸附、解吸、冷凝、收集功能于一体的大气水快速凝结技术与零碳集水装置。

2)露天矿分布式大气降水蓄用调配技术。揭示降水后排土场土壤水文响应过程,构建排土场降水-地表径流模型;研究排土场近自然缓渗层控水-滞留层颗粒级配蓄水-表土层用水的降水立体蓄用技术(图6);研发排土场分布式蓄水技术,形成截水-集水-蓄水-用水一体化的大气降水分布式蓄用调配体系,实现控制边坡侵蚀与保障植被生态用水。

3)露天矿坑水地表-坑底安全联合储存技术。研发涵盖选址、防渗、边坡稳定的排土场地表矿坑水储存技术;研发基于矿坑水排泄位置和水量预测、清污分流的采场坑底储存技术。

4)露天矿坑水深部安全储存技术。研究煤层顶板损伤含/隔水层重构技术,开发隔水层材料及含水层构造的施工工艺,实现重构含/隔水层与原始含/隔水层联通;研究深部含水层的回灌可行性与安全性,研发矿坑水深部回灌储存技术。

5)大气降水-地表水-矿坑水联合调配技术(图7)。预测区域需水变化规律,研发大气降水、地表水、地下

水、矿坑水多水源联合调配模型,提出适应露天矿生态环境保护与修复需求的水资源调配模式与方案。

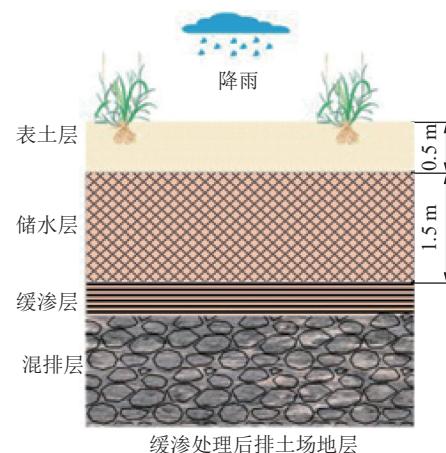


图6 降水立体蓄用

Fig.6 Three-dimensional storage of precipitation

4.3 伴生矿物资源人工造土与排土场活土层精细重构关键技术

针对北方防沙带大型露天矿区伴生矿物与固废生态利用率低,排土场土壤质量差、生态系统稳定性低等问题。

1)伴生矿物提质除杂、活化改性技术。研究伴生矿物各关键功能组分提质除杂、活化改性的控制变量,确定最佳工艺参数,获得人工造土所需功能活性组分。

2)伴生矿物资源人工造土技术。研究活化改性组分的复配规律,解析各组分成土过程中的物质演变特征,研究人造土壤的土壤学指标,研发伴生矿物人工造土技术。

3)煤基保水缓释多孔硅材料合成技术。研究提取剂浓度、反应时间、反应温度等条件对合成多孔硅材料保水缓释性能的影响,研制煤基固废制备高活性多孔硅材料。

4)基于煤基固废和农林废弃物合成保水增肥土壤改良剂技术(图8)。研究煤基多孔硅保水剂、生物菌种、污泥等原料配比、温度、湿度等条件对土壤改良剂保水性能、氮磷钾及有机质等肥效指标的影响,研制具备保水缓释、无机/有机组合肥效的多固废新型土壤改良剂制备技术。

5)基于低温微生物发酵技术的活土层生态功能精细重构(图9)。揭示北方防沙带排土场活土层生态功能重构机制,建立活土层生态功能评价指标体系;筛选驯化高效低温发酵菌,形成具备不同生态服务功能的活土层基质材料;优化活土层重构工艺。

6)排土场矿山土活土层快速熟化技术(图10)。

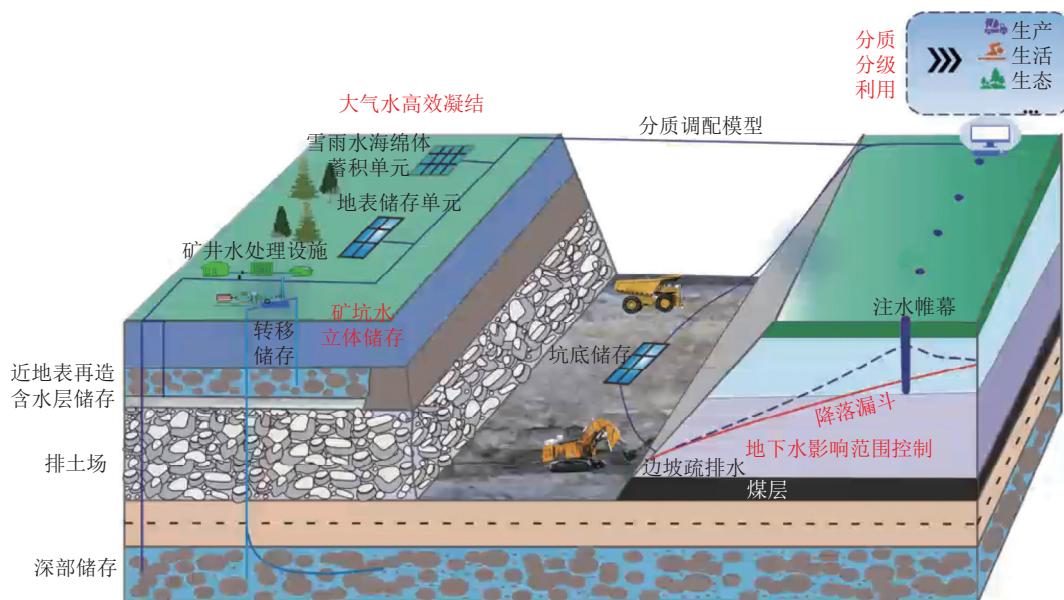


图 7 水资源联合调配蓄用

Fig. 7 Joint allocation of water resources for storage



图 8 保水增肥土壤改良

Fig.8 Water retention and fertilization soil improvement



图 9 微生物发酵技术

Fig.9 Microbial fermentation technology

研究土壤团聚结构、养分周转和微生物群落多样性的演化规律,揭示外源生物介导下矿山土活土层熟化机理;基于微波活化脱碳-热解技术,研制固废基多孔吸附材料,优化施配比例,研制复合生物熟化菌肥。

4.4 露天矿区地貌-土壤-植被系统修复与自维持关键技术

针对北方防沙带生态脆弱、大型露天矿排土场水蚀风蚀严重、土壤抗侵蚀能力差、群落生物多样性

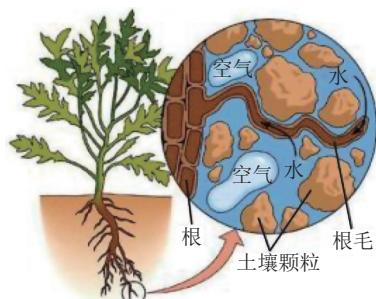


图 10 活土层重构和熟化

Fig.10 Reconstruction and maturation of living soil layer

低、重建生态系统自维持能力低等问题。

1)排土场抗侵蚀近自然地貌重塑与微地形改造技术(图 11)。研发与露天矿区采排复工艺匹配的排土场抗侵蚀近自然地形地貌重塑技术,优化地形、实现减流缓流及侵蚀调控;针对排土场土壤水蚀风蚀,研发抗侵蚀微地形改造技术,提出阻沙保土微地形单元及空间组织模式,提高土壤抗侵蚀能力。

2)露天矿区抗逆植物筛选与配置模式构建。筛选和培养适合防沙带露天矿不同地形、地貌和土壤

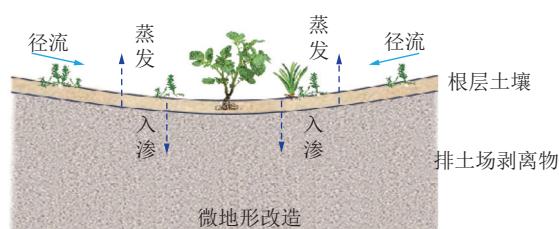


图 11 微地形改造

Fig.11 Microtopographic modifications

状况的抗逆植物类群(藻、藓、草、灌、乔),构建适宜不同立地条件的抗逆植物优化配置模式。

3)露天矿区抗侵蚀生物材料研制。研制基于藻类和藓类的抗侵蚀生物结皮材料;研制基于畜禽粪便和秸秆等生物质材料、具有土壤改良功能的抗侵蚀复合生物材料;开发新型抗逆环保生物毯。

4)防沙带露天矿山土功能微生物菌剂研制。基于防沙带露天矿区功能微生物多样性,分离筛选具有抗逆促生等功能的优良菌株,研发高密度扩繁技术及生产工艺,获得保藏性能好、适应性强的菌剂。

5)排土场藻(藓)生物结皮层构建技术(图12)。运用研制的抗侵蚀生物结皮材料,结合优良促生菌和生物胶等辅助材料,提出藻(藓)的接种方法和工艺流程,研发排土场藻(藓)结皮层构建技术。

6)排土场菌-藻(藓)-草(灌、乔)联合修复技术。研发排土场菌-藻(藓)-草(灌、乔)优化配置模式,近自然重构排土场土壤微生物和植物群落,提升重建生态系统自维持能力(图13)。

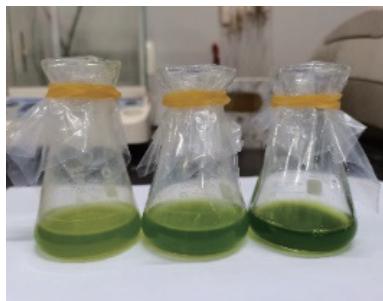


图 12 藻(藓)生物结皮层构建

Fig.12 Algae (moss) biocortex layer construction



图 13 地貌重塑与微地形改造

Fig.13 Geomorphic remodeling and microtopographic modifications

4.5 生态退化机理与保护修复集成监管关键技术

针对北方防沙带露天矿区及周边生态系统面临隐蔽不可逆式退化风险及矿区生态退化机理不清和动态生态修复监管缺失等问题。

1)支持多种相机的潜望式土壤剖面成像装置(图14)。针对野外取样室内测试方法的时效性差、

连续性难等问题,研究基于钻孔微创-地面潜望的土壤剖面原位高光谱信息和RGB图像成像方法,研制可支持高光谱相机、常规相机等多种相机的潜望式土壤剖面成像装置。

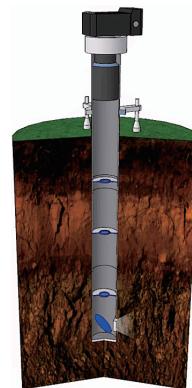


图 14 土壤潜望成像

Fig.14 Soil periscope imaging

2)露天矿区生态退化分区与修复方案智能决策。研究基于露天矿区生态地质多维数据集及参照生态系统的生态退化智能分区方法;建立露天矿区生态修复决策支持策略库,构建生态退化分区修复方案智能匹配决策机制。

3)露天矿区剥采排复全过程生态监管业务架构(图15)。研究面向矿区海量生态地质数据的分布式存储与资源最优化调度策略;创立“星空地联合监测—生态地质数据自更新—矿区退化诊断分区—修复方案智能决策”的矿区生态退化与动态修复监管业务架构。



图 15 大型露天矿区生态保护修复集成监管

Fig.15 Integrated regulation of ecological protection and restoration in large-scale open pit mining areas

4)露天矿区生态退化与动态修复监管平台设计。基于露天矿区全周期生态化开采设计,构建集成监管数据流、业务流,搭建数据-业务-应用-显示多层系统方案;采用B/S模式设计集数据更新、分析诊断、评价预警、智能决策等功能的“互联网+监管”一体化平台。

5)大型露天矿区生态保护修复集成监管模式。

面向准能、平庄露天矿区，开展典型露天矿区生态保护修复集成监管应用示范，及时反馈监测结果与保护修复成效，形成北方防沙带大型露天矿区生态保护修复集成监管模式。

6) 大型露天矿区生态保护修复示范工程。依托内蒙古鄂尔多斯的准能矿区和锡林郭勒的平庄露天矿区进行工程选址，统筹开展大型露天矿区减损开采、抑尘控蚀、保水增湿、地貌-土壤-植被联合修复技术适宜性分析与集成，示范工程设计与建设管控。

5 结 论

1) 分析了北方防沙带露天煤矿区特征与存在问题，聚焦北方防沙带大型露天矿区生态保护与修复，提出露天矿岩土损伤-生态退化传导机理、生态减损开采机制、重建生态自维持机制三大科学问题。

2) 研究生态损伤传导机理与减损开采、水资源立体保护与生态利用、人工造土与排土场活土层精细重构、地貌-土壤-植被系统修复与自维持理、露天矿区生态退化机理，为开展大型露天煤矿区生态保护修复技术研发与应用提供理论基础。

3) 研发生态保护型减损开采、水资源保护与综合利用、抗侵蚀地貌重塑、排土场活土层精细重构、土壤改良与提质增容、菌-藻-草联合修复、生态系统退化监管等关键技术，同时开展示范工程，为北方防沙带典型生态退化区综合治理提供技术支撑，实现煤炭开发能源保供与生态保护相协调。

参考文献(References):

- [1] 苏凯. 北方国家生态屏障区生态系统格局、质量、服务及其辐射效应评估研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
SU Kai. Research on the assessment of ecosystem pattern, quality, services and their radiation effects in the northern national ecological barrier area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [2] 刘智杰, 王宏利. 为生态修复开出地质良方[N]. 中国自然资源报, 2022-03-03(7).
- [3] 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.
- [4] 卞正富. 国内外煤矿区土地复垦研究综述[J]. 中国土地科学, 2000, 14(1): 6–11.
BIAN Zhengfu. Review of land reclamation in coal mine areas at home and abroad[J]. China Land Science, 2000, 14(1): 6–11.
- [5] 杨天鸿, 孙东东, 胥孝川, 等. 新疆大型露天矿绿色安全高效开采存在问题及对策[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 1–12.
YANG Tianhong, SUN Dongdong, XU Xiaochuan, et al. Problems and countermeasures of green, safe and efficient mining in large-scale open pit mines in Xinjiang[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(1): 1–12.
- [6] 徐嘉兴, 李钢, 余嘉琦, 等. 煤炭开采对矿区土地利用景观格局变化的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 252–258.
XU Jiaxing, LI Gang, YU Jiaqi, et al. Effects of coal exploitation on land use and landscape pattern change in coal mining area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(23): 252–258.
- [7] 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.
- [8] 赵春虎, 王强民, 王皓, 等. 东部草原区露天煤矿开采对地下水系统影响与帷幕保护分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3685–3692.
ZHAO Chunhu, WANG Qiangmin, WANG Hao, et al. Analysis of the impact of surface coal mining on groundwater system and curtain protection in the eastern grassland area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3685–3692.
- [9] 宋子恒, 毕银丽, 张健, 等. 东部草原露天矿黏土对磷的养分动力学特性[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3807–3814.
SONG Ziheng, BI Yinli, ZHANG Jian, et al. Phosphorus dynamics of clay in Eastern grassland open pit mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3807–3814.
- [10] 舒艳, 蒋莉. 露天煤矿开发生态环境影响评价研究[C]//中国环境科学学会. 2007中国环境科学学会学术年会优秀论文集(下卷). 中国环境科学出版社, 2007: 6.
SHU Yan, JIANG Li. Research on ecological and environmental impact assessment of surface coal mine development[C]//Chinese Society of Environmental Science. 2007 Excellent Papers of Chinese Society of Environmental Science Academic Annual Conference (Next Volume). China Environmental Science Press, 2007: 6.
- [11] 王党朝, 申莹莹, 杨震. 胜利一号露天煤矿开发建设对生态环境的影响评价[J]. 中国煤炭, 2020, 46(1): 58–66.
WANG Dangchao, SHEN Yingying, YANG Zhen. Evaluation of the impact of development and construction of Shengli No. 1 open-pit coal mine[J]. China Coal, 2020, 46(1): 58–66.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 李全生, 韩兴, 赵英, 等. 露天煤矿植被修复关键技术集成与应用研究: 以胜利露天矿外排土场为例[J]. 环境生态学, 2021, 3(6): 47–53.
LI Quansheng, HAN Xing, ZHAO Ying, et al. Research on integration and application of key technologies of vegetation restoration in open-pit coal mine: a case study of external dump of Shengli opencast coal mine[J]. Environmental Ecology, 2021, 3(6): 47–53.

- [15] 李全生, 李 淳. 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 Ling. Technology and application of impairment mining and ecosystem restoration in surface coal mines in the eastern grassland area [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 484–492.
- [16] 李树志, 郭孝理, 李学良, 等. 我国东部草原区露天矿排土场仿自然地貌土地整形方法 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3636–3643.
LI Shuzhi, GUO Xiaoli, LI Xueliang, et al. Land reshaping method of imitating natural geomorphology for open-pit mine dump in eastern grassland area of China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3636–3643.
- [17] 宋子岭, 范军富, 王来贵, 等. 露天煤矿开采现状及生态环境影响分析 [J]. 露天采矿技术, 2016, 31(9): 1–4, 9.
SONG Ziling, FAN Junfu, WANG Laigui, et al. Impact analysis on mining status and ecological environment in open-pit coal mine [J]. *Opencast Mining Technology*, 2016, 31(9): 1–4, 9.
- [18] 才庆祥, 刘福明, 陈树召. 露天煤矿温室气体排放计算方法 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 103–106.
CAI Qingxiang, LIU Fuming, CHEN Shuzhao. Calculation method of greenhouse gas emission in open pit coal mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(1): 103–106.
- [19] 才庆祥, 高更君, 尚 涛. 露天矿剥离与土地复垦一体化作业优化研究 [J]. 煤炭学报, 2002, 27(3): 276–280.
CAI Qingxiang, GAO Gengjun, SHANG Tao. Integrative model of open pit mine production and ecological reconstruction [J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(3): 276–280.
- [20] 才庆祥, 马从安, 韩可琦, 等. 露天煤矿生产与生态重建一体化系统模型 [J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 162–165.
CAI Qingxiang, MA Congan, HAN Keqi, et al. Integrative model of open pit mine production and ecological reconstruction [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2002, 31(2): 162–165.
- [21] 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 Baorixilee Yinmin and Shengli No. 1 Open Pit Coal Mine as examples [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(5): 271–280.
- [22] 朱晓昱, 徐大伟, 辛晓平, 等. 1992—2015年呼伦贝尔草原区不同草地类型分布时空变化遥感分析 [J]. 中国农业科学, 2020, 53(13): 2715–2727.
ZHU Xiaoyu, XU Dawei, XIN Xiaoping, et al. Spatial-temporal variation of distribution of different grassland types in Hulunbuir grassland area from 1992 to 2015 [J]. *Chinese Agricultural Sciences*, 2020, 53(13): 2715–2727.
- [23] 马秀梅. 内蒙古推进北方防沙带生态保护和修复任重道远 [J]. 内蒙古林业, 2022(6): 25–26.
MA Xiumei. The ecological protection and restoration of the northern sand belt in Inner Mongolia is a long way to go [J]. *Inner Mongolia Forestry*, 2022(6): 25–26.
- [24] 刘 江, 谢遵博, 王千慧, 等. 北方防沙带东部区生态安全格局构建及优化 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3412–3423.
LIU Jiang, XIE Zunbo, WANG Qianhui, et al. Construction and optimization of ecological security pattern in the eastern part of the northern sand belt [J]. *Journal of Ecology*, 2021, 40(11): 3412–3423.
- [25] 张燕婷. 北方防沙带土地利用格局演变特征及防风固沙功能变化评估研究 [D]. 南昌: 江西财经大学, 2014.
ZHANG Yanting. Study on the evolution characteristics of land use patterns and assessment of changes in the function of wind-break and sand fixation in the northern sand control belt [D]. Nan-chang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2014.
- [26] 刘新新. 宝利露天煤矿节地减损开采可行性分析及技术方案研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
LIU Xinxin. Study on feasibility analysis and technical program of land-saving and loss-reducing mining in Baoli open-pit coal mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [27] 时旭阳. 基于泥岩-地聚合物的露天矿隔水层重构机理及应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
SHI Xuyang. Research on reconfiguration mechanism and application of open pit mine water barrier based on mudstone-geopolymer [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [28] 李三川, 白润才, 刘光伟. 水对元宝山露天矿边坡稳定性影响的研究 [J]. 化工矿物与加工, 2014, 43(9): 27–28, 37.
LI Sanchuan, BAI Runcai, LIU Guangwei. Research on the effect of water on slope stability of Yuanbaoshan open pit mine [J]. *Chemical Minerals and Processing*, 2014, 43(9): 27–28, 37.
- [29] 孙维然. 露天矿生态修复与景观营造策略研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
SUN Weiran. Research on ecological restoration and landscape creation strategy of open pit mine [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [30] 邵亚琴. 基于多源动态监测数据的草原区煤电基地生态扰动与修复评价研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
SHAO Yaqin. Research on evaluation of ecological disturbance and restoration of coal power base in grassland area based on multi-source dynamic monitoring data [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [31] 耿天煜. 抚顺西露天矿不同植被类型下土壤修复效应研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020.
GENG Tianyu. Study on the effect of soil restoration under different vegetation types in Fushun West Open Pit Mine [D]. Xuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2020.
- [32] 刘 硕, 李小光, 宋建伟, 等. 长山沟露天矿集中区土地利用时空变化的遥感监测与分析 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 121–127, 2.
LIU Shuo, LI Xiaoguang, SONG Jianwei, et al. Remote sensing monitoring and analysis of spatial and temporal land use changes in Changshanggou open-pit mine concentration area [J]. *Soil and Water Conservation Bulletin*, 2021, 41(4): 121–127, 2.
- [33] 马从安, 才庆祥. 露天矿生态恢复监测的研究进展 [J]. 煤炭工程, 2009(10): 95–97.
MA Congan, CAI Qingxiang. Research progress of ecological restoration monitoring in open pit mines [J]. *Coal Engineering*, 2009(10): 95–97.
- [34] 宁凤娟. 浅谈大井法在矿山涌水量计算中的使用 [J]. 世界有色金属, 2020(23): 151–152.
NING Fengjuan. The use of large well method in the calculation of mine water influx [J]. *World Nonferrous Metals*, 2020(23): 151–152.