

矿山环境保护

# 煤炭生态型露天开采理论与技术体系及其应用

李全生<sup>1,2</sup>

(1. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 102209; 2. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100011)

**摘要:**煤炭大规模露天开采会引起土地挖损与压占、地下水疏干、水土流失、植被破坏、大气污染、区域景观破损等生态问题。针对现有露天煤矿生态修复技术较为单一, 缺乏从开采源头减损和生态全要素系统性修复技术的难题, 提出了“减损开采与生态系统修复”的理念, 阐述了露天煤矿生态型开采的内涵与特征, 提出了露天煤矿生态型开采关键科学问题和基础理论框架, 研发了“采前生态化设计-采中减损开采-生态系统修复”的全生命周期生态减损开采和生态全要素(水、土、大气、植被、景观)系统修复技术, 创建了露天煤矿生态型开采理论与技术体系, 形成了可推广可复制的露天矿生态型开采模式。研究成果应用表明, 半干旱区胜利露天矿生态型开采示范区减少土地挖损和压占面积 60 003 m<sup>2</sup>/a, 排土场生态修复期提前 1 a 以上, 植被覆盖率较本底值提高 41.78%, 地面水库(蓄水量 40 万 m<sup>3</sup>)实现了矿井水的分季节、分级分质利用; 酷寒区宝日希勒露天矿生态型开采示范区减少土地挖损和压占面积 106 672 m<sup>2</sup>/a, 新生物种从 14 种增加到 21 种, 土壤含水率提升 10%, 土壤年侵蚀率降低 59.6%, 植被覆盖率较本底值提高 37.96%, 露天煤矿地下水库(储水容量 122 万 m<sup>3</sup>)实现了矿坑水“冬储夏用”, 取得了显著的生态修复效果。

**关键词:**露天煤矿; 生态型开采; 减损开采; 系统修复; 全周期

中图分类号: TD88 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)05-2426-19

## Theory and technical system of coal ecological open-pit mining and its application

LI Quansheng<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102209, China; 2. CHN Energy Investment Group, Beijing 100011, China)

**Abstract:** Large-scale open-pit coal mining will cause ecological problems such as land excavation and occupation, groundwater drainage, soil erosion, vegetation destruction, air pollution, and regional landscape damage. The selection of existing open-pit coal mine ecological restoration technologies is relatively limited, and there is a lack of systematic research on ecological total factors. In this paper, the concept of “damage reduction mining and systematic restoration” was proposed, and the connotation and technical approach of ecological mining of open-pit coal mine were expounded. The key scientific issues and basic theoretical framework of ecological mining of open-pit coal were proposed. Then the whole life cycle ecological impairment mining technology and the coordination system restoration technology of ecological elements (water, soil, vegetation, landscape) of “pre-harvest ecological design-mining during mining loss-postharvest ecological restoration” were developed. At last, the theory and technical system of open-pit coal mine ecological mining was established, and a generalizable and replicable open-pit mine ecological mining mode was formed. The results show that in

收稿日期: 2023-01-05 修回日期: 2023-04-14 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jces.2023.0021

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFF1306000)

作者简介: 李全生(1965—), 男, 河南洛阳人, 教授级高工, 博士生导师。E-mail: 10000424@ceic.com

引用格式: 李全生. 煤炭生态型露天开采理论与技术体系及其应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2426–2444.

LI Quansheng. Theory and technical system of coal ecological open-pit mining and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2426–2444.



移动阅读

the semi-arid area, the ecological restoration technology has significant effects. The area of land excavation and occupation loss is reduced by 60 003 m<sup>2</sup> every year, the ecological restoration period of the dump site is advanced by more than one year, and the vegetation coverage rate increases by 41.78% compared with the background value in the semi-arid area of the Shengli open-pit mine demonstration area. A surface reservoir with a water storage capacity of 400 000 cubic meters has been built, and the seasonal and graded utilization of mine water has been realized. In the extremely cold area of Baorixiler, the area occupied by land excavation is reduced by 106 672 m<sup>2</sup> per year, the number of new species has increased from 14 to 21, the soil moisture content has increased by 10%, the annual soil erosion rate has decreased by 59.6%, and the vegetation coverage rate has increased by 37.96% compared with the background value in the demonstration area of the Baorixiler open-pit mine. An open-pit coal mine underground reservoir with a water storage capacity of 1.22 million square meters has been built, realizing the “winter storage and summer use” of mine water.

**Key words:** open-pit coal mine; ecological mining; damage reduction mining; systematic restoration; full life cycle

煤炭是我国的主体能源,探明储量约占化石能源储量的96%,在一次能源消费结构中占比长期超过一半(2021年为56.0%),据中国工程院预计,2050年煤炭仍将占我国一次能源消费的40%左右<sup>[1-5]</sup>。在未来相当长时期内,煤炭作为主体能源的地位不会改变,仍将是我国能源安全的“压舱石”,是双碳目标实现的兜底能源。露天开采具有安全高效、生产规模大、资源采出率高和生态环境可治理性好等特点,国内外均将其作为优先开采方式<sup>[6-8]</sup>。国外主要煤炭生产国家,如澳大利亚、美国、德国、印度、印尼、俄罗斯、波兰等,均以露天开采为主,产量比重达80%;21世纪以来我国煤炭露天开采产量稳步增长,产量占比已从不到10%提升到23.3%,随着新疆维吾尔自治区煤炭大规模开发和中东部地区部分产煤省区资源的枯竭,占比还将进一步增大<sup>[9]</sup>。煤炭露天开采已成为国家能源安全的重要保障之一。

露天开采是一种先将上覆岩土层剥离后再采出煤炭资源的开采方法。大规模的煤炭露天开采会引起土地挖损与压占、地下水疏干、水土流失、植被破坏、大气污染、区域景观破损等生态环境问题<sup>[10-12]</sup>,与井工开采相比,露天开采过程中生态环境影响更大<sup>[13]</sup>、视觉更直观、修复治理任务更紧迫。

国外露天矿山开采生态化理念发展主要分为3个阶段。第1阶段起源于19世纪美国、德国等发达国家,主要体现在矿产资源开发过程中对矿坑周边局部环境的保护。第2阶段是第二次世界大战后,西方国家提出在露天矿山开采过程中兼顾环境保护与资源高效安全开采。第3阶段是进入21世纪以来,露天开发与污染治理、节能减排等环境保护融合,在粉尘治理、节能减排、低碳开采以及生态修复等方面开展综合研究,取得了一系列成果,形成了相关技术规范和法规。目前其研究主要集中在低碳开采与矿区全生命周期生态修复等方面。国内学者对露天开采

生态影响与修复技术也进行了大量研究。宋子岭等<sup>[14-17]</sup>研究了露天开采对土地、水体、大气和生态产生的不利影响,建立了露天开采与生态环境保护一体化的协调关系;徐嘉兴等<sup>[18-20]</sup>分析了露天煤矿开采对景观格局的影响,认为煤炭开采与景观变化具有较强的相关性;范立民等<sup>[21-25]</sup>分析了不同生态类型下露天开采对地下水水位和水质的影响,认为高强度开采是研究区地下水位下降的主要驱动因素;王超等<sup>[26]</sup>认为草原露天矿区最适宜植被生长的地下水埋深为1m,1~30m为维持草原区植被正常生长阈值的地下水位埋深;刘晓波等<sup>[27-28]</sup>认为露天煤矿开采对周边地区土壤理化特征和土壤可蚀性因子等有一定的影响;胡振琪等<sup>[29]</sup>研究了煤矸石对土地占用的影响,并提出了“边采边复”的理念、原理和恢复类型;才庆祥等<sup>[30-32]</sup>提出了露天煤矿温室气体排放计算方法,建立了露天煤矿生产与生态重建一体化系统模型;HUERTAS JOSÉ I等<sup>[33]</sup>分析了不同露天煤矿开采造成的PM10变化情况,得出了对一定区域环境空气质量造成影响的结论;李文超等<sup>[34]</sup>总结水土保持工程措施和修复区植被养护措施,提出了伊敏露天矿生态修复技术模式;陈宗全等<sup>[35]</sup>提出了河流-高原湖泊水系自然连通+边坡与渣山整治+滑坡体动态监测+覆土恢复植被的生态修复治理模式;夏嘉南等<sup>[36]</sup>研发了水文融合的草原露天矿内排土场地貌重塑优化技术;薛东明等<sup>[37]</sup>研究了干旱矿区排土场不同边坡生态修复模式下的减流减沙效益,认为沙柳网格模式减沙效益最好;李聪聪等<sup>[38]</sup>研究提出了生态修复一体化的青海高原高寒露天煤矿区生态修复治理路径。笔者<sup>[39]</sup>研发并创建了基于源头减损的采排复一体化、植被修复、景观再造等露天矿排土场生态修复关键技术体系。目前,国内外学者对露天煤矿生态修复进行了较为系统深入的研究,尤其是在植被和土壤修复方面,然而已有露天矿生态修复技术

较为单一,缺乏生态全要素的系统性研究,难以形成稳定的植被生态系统,也未从露天开采全周期(采前—采中—采后)进行统筹规划和源头减损以最大限度的减少生态影响范围、程度和时间。

“十四五”时期是国家推进绿色低碳循环发展、全面提升经济发展质量的关键时期,露天煤矿生态修复将面临更严格的要求,亟需源头预防、过程控制和末端治理的系统性、生态环境保护与修复治理技术。笔者阐述了“煤炭生态型露天开采”的理念与内涵,研发并提出了露天开采生态减损与系统修复的理论与技术体系,并进行工程示范,创建了煤炭生态型露天开采模式,最大限度的控制了露天煤炭开采生态损伤影响空间范围和持续时间,为我国露天煤矿开发与生态保护及修复相协调提供科技支撑。

## 1 煤炭露天开采生态影响特征和存在的问题

### 1.1 露天煤矿区自然生态环境特征

我国煤炭资源主要分布在北方,与非煤露天矿相比,露天煤矿开采特点为:采剥总量巨大,单矿每年可达上亿立方米;采场面积大,单矿可超过 $20\text{ km}^2$ ;边坡控制难度大,软岩较多,且受冻融影响明显;生态影响范围大,地下水影响范围 $5\sim 10\text{ km}$ ;土层瘠薄,生态修复土源匮乏、生态本底脆弱<sup>[40-41]</sup>。我国露天煤矿超过80%产量出自北纬 $38^\circ$ 以北的高寒及生态脆弱地区,最低温度低于 $-40^\circ\text{C}$ ,年均降雨量小于 $400\text{ mm}$ 且季节性明显。露天煤矿开采的强扰动必然诱发矿区脆弱生态环境退化,资源开发与生态环境保护的矛盾尤为突出<sup>[42-45]</sup>。

### 1.2 煤炭露天开采生态环境影响特征

露天矿开发推动了地区经济与社会的发展,但同时也引发了区域生态环境问题。露天矿大规模、高强度、持续性的开发对生态系统产生了跨尺度、多等级、累积性的严重影响,主要包含以下方面:

(1) 露天开采造成土地挖损,土壤结构、地表高改变,排土场、煤矸石堆放等造成土地占压,改变了用地类型和土壤理化性质,带来了土壤养分含量降低、水土流失、土地荒漠化等问题,进而影响到植被生长,破坏区域景观格局。

(2) 露天开采改变了原始地层层序及含水层联通性,使矿区一定范围内的原含水层水位标高降低,矿区水质可能发生污染,进而导致植被生物量减少、生长量下降等问题。

(3) 露天开采过程中产生大量的粉尘,粉尘扩散降落至矿区周边植被上,也会造成植物光合作用降低,从而引起植被枯亡;同时粉尘的扩散降落还会改变土

壤、地表水体的性质,给植被生长造成长远影响。

随着露天矿的不断开发,矿区及周边景观组成与配置发生了大的改变,导致生态景观逐渐破碎化,原始生态面积不断减小。同时大规模高强度的开发严重干扰土壤-植被系统的正常物质流、能量流的转化及循环,造成土壤结构、理化性质和生产力下降,进而影响地表植物光合作用及生理调节机能,使植被发生退化甚至逆向演替,最终导致露天矿周边生态系统结构、过程和功能退化,而高寒矿区的生态本底更为脆弱,露天矿生态修复难度大。

### 1.3 煤炭露天开采生态环境影响研究存在的问题

综合分析国内外研究现状,露天煤矿开采理论与技术的研究存在以下亟待解决的难题:

(1) 露天矿生态型开采理论研究不充分。当前露天矿山开采理论研究侧重生态环境与气候约束下开采参数的调整和单一生态型开采技术的应用,尚未从理论上阐明露天矿生态型开采理论核心关键问题:露天开采扰动和脆弱生态环境之间的时空冲突机制。针对生态脆弱区气候环境特点,综合考虑露天矿全生命周期发展规律、开采扰动机制、环境承载力和生态成本的主动生态型开采理论研究极不充分。

(2) 露天矿减损开采与系统生态修复技术体系不够完善。生态脆弱区环境承载力低,高强度露天开采与生态环境保护矛盾突出,缺乏露天开采扰动与生态环境容量相协调的开发模式。目前露天矿减损开采技术研究以矿岩穿爆、采装、运输或排土等单一生产环节为主,缺乏“设计-开采-修复”全生命周期以及“水土气生”全要素的减损开采技术体系。

针对我国生态脆弱区露天煤矿生态型开采的重大科学问题,亟须开展相关基础研究、关键技术研发与示范,以保障我国能源供应安全与生态文明建设双重目标的实现。

## 2 露天煤矿生态型开采内涵与特征

露天开采对土地的占用是生态环境影响的根源。一方面,煤层开采需要剥离上覆的岩土,因此必然造成土地的挖损;另一方面,露天煤矿在开采过程中剥离的大量岩土(通常是采煤量的数倍甚至十数倍)外排不仅会占用大量的土地,而且会增加地质灾害和环境污染隐患。

### 2.1 露天煤矿生态型开采的定义

以降低煤炭露天开采全生命周期的生态影响为目标,定义露天煤矿生态型开采为:一种综合考虑资源开发效率和生态环境影响的露天开采模式,在资源赋存条件一定的情况下使开发造成的生态环境影响

最小化,矿区生态保护与修复效果最大化,实现资源开发经济效益与生态环境效益的协调优化。

## 2.2 露天煤矿生态型开采的内涵

针对煤炭露天开采造成的生态环境影响,露天煤矿生态型开采的内涵为:

(1) 节地减损开采。一方面,资源开发使露天开采境界范围内的土地用途发生了改变,将原来的森林、草原、耕地、荒漠、村庄等用途的土地变成矿产资源开发用地,主要表现为土地的挖损。提高采出率可以减少相同资源开发量(从单位时间看表现为生产能力)的土地占用,实现从资源开发源头降低生态损伤。露天开采过程中,可通过提高最终帮坡角(包括非工作帮、端帮、最终帮)、减少采区间煤柱、薄煤层选采、劣质煤开发等技术实现。另一方面,在矿山建设和生产过程中不可避免地出现物料排弃和地面生产系统建设,改变了矿区的地形地貌和土地用途(至少在一段时间内),主要表现为土地的压占。优化露天矿的开采程序、生产系统和开拓运输系统布置,在符合经济性约束的条件下最大化利用开采占用的空间,避免非开采挖损造成的新增占地,是实现节地减损开采的另一重要途径。在露天矿生产中,充分利用采空区建设内排土场可以减少外排造成的土地压占,还可以将破碎站、运输道路、带式输送机等系统布置在采场或内排土场实现新增占地控制。

(2) 短损伤期开采。露天矿对土地的占用始于工作帮的开采,工作帮坡角是决定土地占用超前资源开采时间的关键;露天矿生态修复的基本条件是排土场到界,内排土场工作帮坡角是决定资源开采后进行生态修复时间的关键。因此,可以通过工作帮开采程序和排土场作业参数的优化调整,压缩开采对土地的占用时间。

(3) 生态型地层重构。剥离物内排有利于修复地形地貌,但传统的排弃方式不注重地层功能的修复,一方面使得煤层原具有的储水或隔水功能丧失,影响地下水储量和水力联系;另一方面剥采排作业后上覆岩层被松碎,自然混排难以形成有效隔水层,导致排土场成为长期的降水漏斗。以矿区地层生态功能修复为目标,形成含水层-近地表储水层-近自然地貌的排弃地层剖面原态重构模式,为矿区长期、大范围的生态修复提供基础保障。

(4) 生态全要素(水-土-气-植-景观)系统修复。露天开采过程不仅造成了原生植被彻底移除,而且在一定程度上破坏了植物所赖以生长的水、土环境,改变了矿区景观。第1,通过排土场工程、生物修复措施实现保水控蚀和生态集水,为修复生态系统长期稳定发展提供必要的水源支撑;第2,通过土壤分层重构

和瘠薄表土改良,为植物正常生长创造良好的土壤条件;第3,通过控尘、抑尘、阻尘、滞尘等技术,减少粉尘对周边生态环境的影响;第4,通过生态修复物种的优选和合理配置,创建适应矿区地形地貌和自然气候条件的人工重建生态系统;第5,通过地形地貌和生态环境的修复,实现矿区景观系统重建。

## 2.3 露天煤矿生态型开采技术特征

与传统的露天开采相比,生态型开采更加突出煤炭资源的充分开发利用和生态环境影响的有效控制,实现矿区经济社会发展与生态服务功能提升协调统一,因此生态型开采具有如下技术特征:

(1) 资源采出率高。煤炭资源是不可再生的,开发过程中最大限度的回收开采境界内的资源,可以在满足国民经济发展对煤炭需求的基础上,降低对新占土地的要求,从而达到从根源上控制资源开发造成的生态环境影响的目的。

(2) 土地占用强度低。通过开采境界、开采程序、开采参数、生产系统布置的综合优化,避免不必要的土地占用,并通过采场帮坡角和工作帮推进强度的协同优化缩短土地占用-修复周期,达到土地占用面积、时间双向控制的目的。

(3) 生产过程节能低碳。露天开采过程中的能源消耗和扬尘运移是造成矿区生态环境影响的重要途径。通过开采工艺、运输系统优化和物料流调配,缩小采剥物料运移所需的能源消耗,减少由此造成的粉尘、大气污染物和碳排放,使露天矿生产的能耗和碳排放强度低于行业控制目标。

(4) 采后生态修复效果好。通过矿区生态修复所需水、土资源的优化调配和物种的优化匹配,形成长期稳定、可自维持的人工重建生态系统,实现矿区生态景观与周边自然环境的协调,达到矿区生态服务功能的修复与提升。

## 3 露天煤矿生态型开采理论与技术体系

露天煤矿生态型开采技术涉及采矿工程、工程地质、水文地质、水利工程、生态工程和环境工程等多个学科,是复杂的系统工程。围绕煤炭露天开采生态影响特征和损伤控制技术难题,研究时效边坡理论、生态累积效应理论和矿区生态文明理论,研发“采前生态化设计-采中生态损伤控制-采后系统性生态修复”的全生命周期协同技术,并建设典型示范工程,创建露天煤矿生态型开采理论与技术体系(图1),形成可推广可复制的露天煤矿生态型开采模式。

### 3.1 露天煤矿生态型开采关键科学问题

针对生态脆弱区露天煤矿生态型开采理论与技

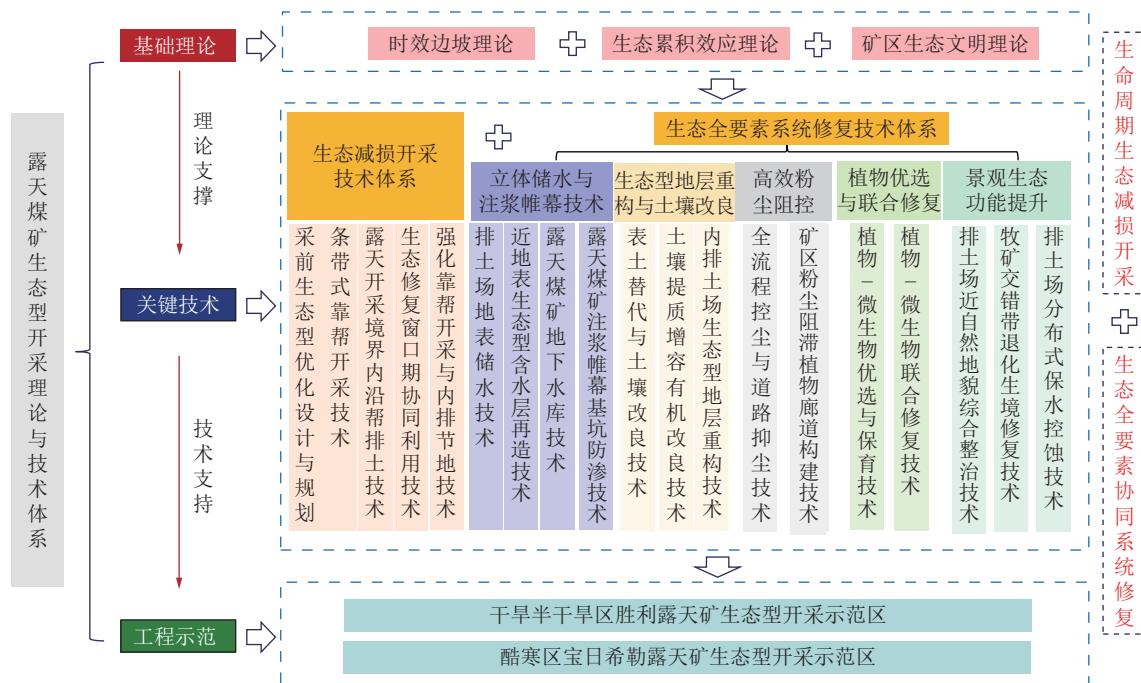


图1 露天煤矿生态型开采理论与技术体系

Fig.1 Theory and technical system of ecological mining of open-pit coal mine

术的重大需求,提出了露天煤矿高强度开采与生态环境容量矛盾的核心共性科学问题与研究方法。

(1) 生态脆弱区露天煤矿开采诱发的关键环境要素损伤及生态系统响应机制。运用矿山生态学、无人机遥感、野外调查等理论与方法,在开采扰动区开展“点-线-网-面”协同监测并识别露天矿区关键生态要素、生态系统结构和功能参数;利用空间分析与生态系统建模方法,多尺度分析生态的年际、季节变化规律及其时空异质性特征,采用地理加权和极限分析方法建立关键生态参数间的相互关系及其阈值,揭示露天开采扰动下水-土-气-植-景观等生态要素间的响应机制。

(2) 生态脆弱区露天煤矿生态优化设计主控因素与生态型开采机制。采用全生命周期设计理念,结合矿山生态学、露天采矿学和系统工程理论,应用结构方程模型和多维归因方法识别生产能力、开采境界、开采程序、工艺与设备等生态优化设计主控因素及其关键参数;建立低碳开采控制条件与主控因素之间的相互关系,以露天矿全生命周期的生产成本和生态成本为基本约束,构建生态型优化设计与低碳开采一体化的系统动力学模型,多情景模拟分析生态化设计主控因素与低碳开采因素之间的关系。

### 3.2 露天煤矿生态型开采基础理论

露天煤矿生态型开采涉及面广,专业性、系统性和综合性强,相关理论包括露天采矿学、地质学、岩土力学、植物学、生态学等方面,具有鲜明特色的相关理

论包括时效边坡、生态累积效应、矿区生态文明等。

(1) 时效边坡理论。在矿山推进过程中,边坡一直处于动态发展状态,大部分采场边坡都具有从形成到掩埋的服务周期<sup>[46]</sup>。软岩边坡是我国露天煤矿广泛分布的一种岩质边坡。由于软岩具有明显的蠕变特性,在整个服务期限内岩性参数处于连续发展变化过程,因此应该充分结合露天矿边坡服务功能及软岩力学性质的时效性,对该类边坡进行准确的稳定性分析和结构优化设计,在保证其服务期限内安全稳定的前提下尽可能提高边坡角,达到提升矿山经济效益、降低生态环境影响的目标。

(2) 生态累积效应理论。生态累积效应存在一个量的积累到质的变化过程,量的积累和范围的延伸是受损生态环境演变得根本驱动力<sup>[47]</sup>。为了更有效地管理生态环境,防治不可逆转的生态后果,需要分析累积过程中的转折点,即生态系统在保持其基本结构和功能、维持良性状态能够接受污染物的最大量或承受取走的最大量,即环境容量和资源、生态承载力问题。累积效应包括2个层面:一是人类活动对环境因子的改变程度及其效应程度是不断积累的(侧重于环境污染);二是环境因子的改变范围和效应也是不断积累的(侧重于生态破坏)。

(3) 矿区生态文明理论。生态文明是人类社会进步和延伸到新阶段的必然产物,也是在产业经济发展之后必然出现的文明形态。煤炭资源开发在国民经济和社会发展中起着极其重要、不可或缺的作用,煤

炭的生产和消费过程伴随着对不可再生资源的利用和对周围环境的破坏,人文环境、生态环境和资源能源协调发展是矿区可持续发展的基础。打造节约能源资源和保护生态环境的产业结构、增长方式和消费模式,响应社会发展对生态环境的需求,露天煤矿区生态文明建设至少应包含节约资源、节能环保、矿区生态环境高效保护与修复、人与自然和谐共生等生产和发展观念<sup>[48]</sup>。

### 3.3 露天煤矿生态减损开采技术体系

以降低资源开发的生态损伤和提高开发后生态修复质量为目标,从开采工艺选择、设备选型、边坡角度、开采参数、开采程序、开拓运输系统、总平面布置等方面开展协同研究,创建生态减损型露天开采技术体系,实现剥采排复协同作业。

#### 3.3.1 露天煤矿生态型优化设计与规划

现有的露天矿设计理论和方法主要是在考虑技术与经济条件下进行方案和参数的确定,缺乏对露天矿全要素、全生命周期的生态成本考虑<sup>[49-50]</sup>。生态型

开采是从资源开发规划和开采设计源头上考虑生态、经济双重目标,将生态因素和生态成本贯穿于露天开采全生命周期,并作为设计的一个重要约束和条件,揭示露天矿巨量矿岩穿爆、采装、运输、排土等生产环节强扰动对生态系统的扰动机制及其影响范围和程度,创建生态型开采设计模式。

#### 3.3.2 露天煤矿强化靠帮开采技术

露天煤矿常因设计帮坡角偏小,造成边坡压煤量过多,时效边坡理论提出后,端帮靠帮开采技术逐渐完善和推广应用<sup>[51-52]</sup>。靠帮开采是在保证边坡稳定的前提下转变端帮压覆资源的开采方式,确定合理的开采参数、匹配的工艺和设备、优化的运输系统,在不新增土地占用的条件下可以减少上覆岩层剥离。综合运用露天采矿学、岩石力学、试验测试、数值模拟等理论与方法,研究寒区露天矿岩石冻结强化及冻融循环损伤机制,界定露天矿季节性强化靠帮开采窗口期,提出季节性靠帮开采和高段排土方法(图2),研发基于地聚合物的地层置换材料和弱层主动加固技术。

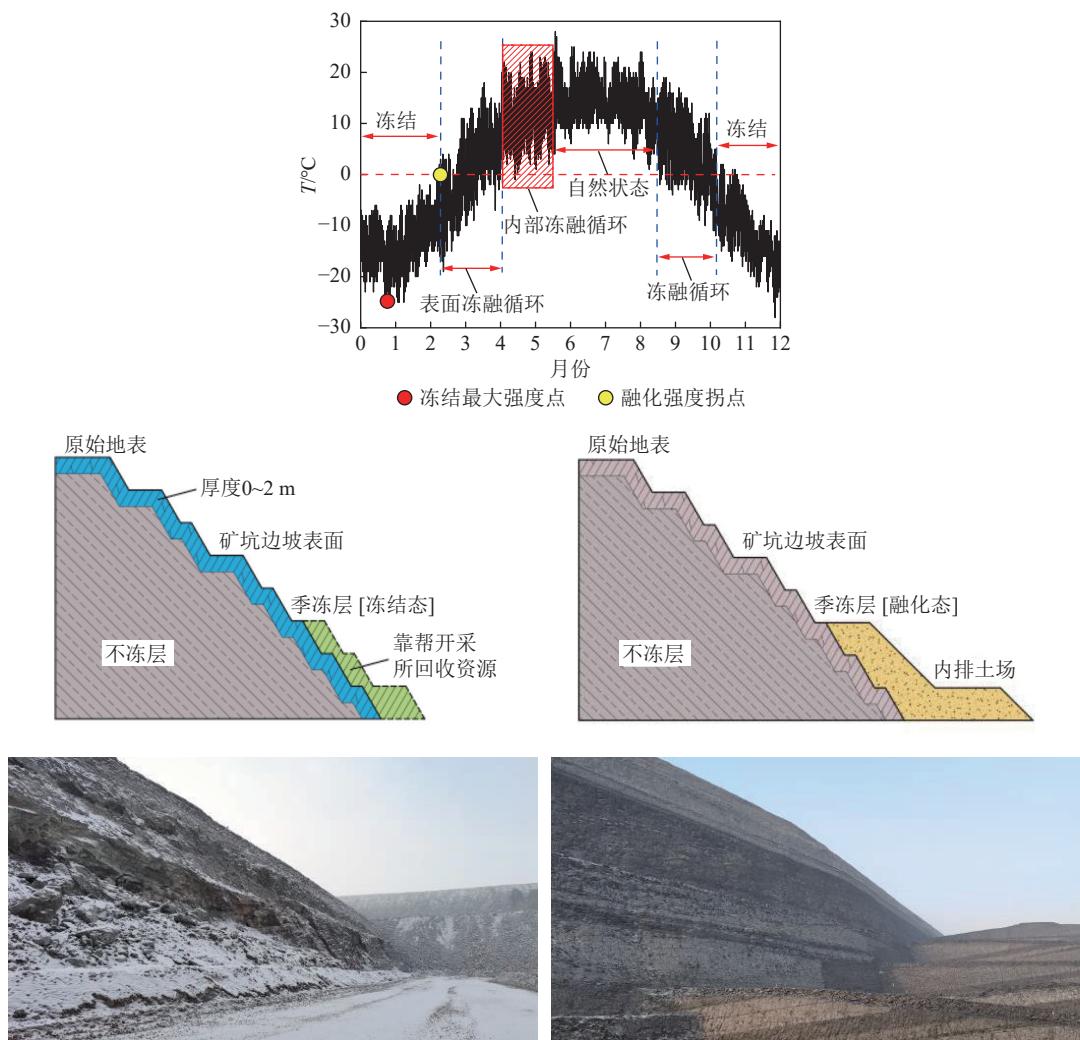


图2 季节性强化靠帮开采示意

Fig.2 Schematic diagram of seasonal intensification of marginal mining

根据露天矿边坡下煤炭资源回收与正常生产的关系,提出以下2种条带式靠帮开采方式:一是垂直于边坡方向划分条带,如图3(a)所示;二是平行于边

坡方向划分条带,如图3(b)所示。条带式靠帮开采的关键是确定经济合理的条带宽度,需要综合考虑边坡稳定条件和采运设备作业效率。

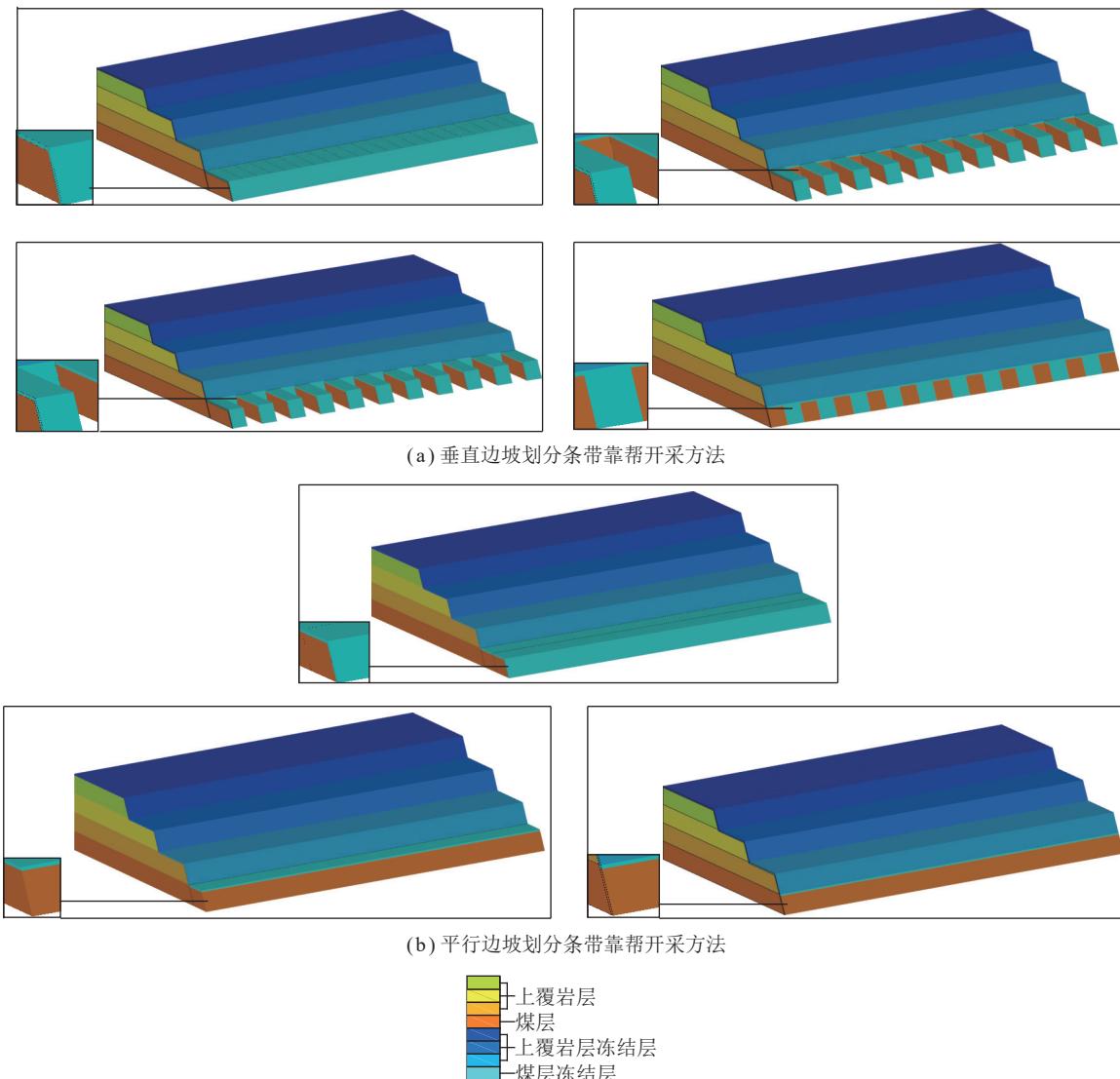


图3 条带式靠帮开采方法示意

Fig.3 Schematic diagram of strip leaning gang mining method

### 3.3.3 露天开采境界内沿帮排土与强化内排技术

对于露天开采境界较大、分区开采的露天矿,将露天矿建设期间的剥离物排弃于后续开采区域,并在具备条件后倒堆排弃于内排土场,可将露天矿的采排用地局限于开采境界范围内,从根源上避免外排土场占地。以锡林郭勒胜利露天煤矿为例(图4),其沿帮排土场布置于远期开采境界内,相对于南排土场和北排土场避免了外排新增占地,减少露天矿全生命周期土地占用7000余亩(大约4.67 km<sup>2</sup>)。

由采场开挖和沿帮排土场堆载共同形成的复合边坡,是露天开采境界内沿帮排土的主要技术制约因素。外排土场堆载过程中,会在周围形成一个明显的

“扰动位移圈”,且堆载体(排土场)重力引起的竖向压力及侧向挤压随堆载高度成倍增长,当传递至采场附近时与采场边坡应力释放叠加,形成显著异于平整地表堆载的应力-应变规律<sup>[53]</sup>。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,  $\sigma_3$  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;  $\gamma$  为上覆岩体的容重, kN/m<sup>3</sup>;  $H$  为岩体深度, m。

在深度  $z$  处的主应力为

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{array} \right\} = \frac{\gamma H_i}{\pi} (\psi \pm \sin \psi) + \gamma z \quad (2)$$



图4 胜利露天矿占地情况

Fig.4 Shengli surface mine land occupation

根据土体应力极限平衡原理,存在如下关系:

$$\sin \varphi = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)}{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + p_i} = \frac{\frac{\gamma H_i}{\pi} \sin \psi}{\frac{\gamma H_i}{\pi} \psi + \gamma z + C \cot \varphi} \quad (3)$$

换算之后得到

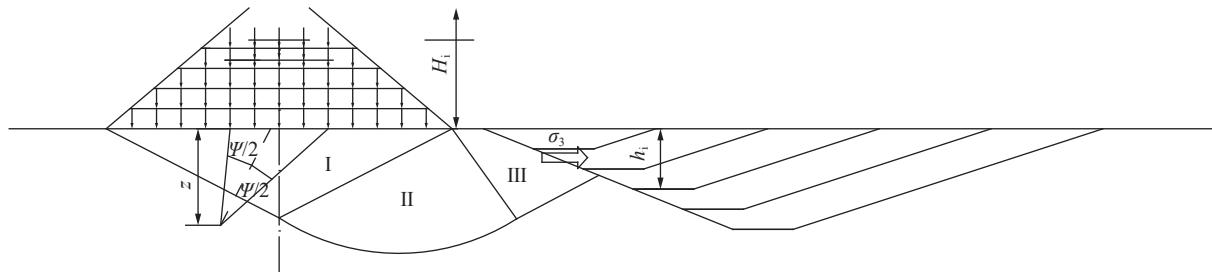


图5 沿帮排土场形成的应力结构示意

Fig.5 Schematic diagram of stress structure formed by dump along the slope

由此可知,随着开挖深度  $h_i$  加大, III区对II区的阻力呈线性降低,岩体挤压变形的速度加大。剥离物陆续排弃至外排土场,堆载体高度不断增大,由此造成了I区传递到II区作用力  $\sigma_a$  呈线性增大。

### 3.3.4 露天矿“生态修复窗口期”协同利用技术

我国大部分露天煤矿位于北方,一年内不同季节的气温、降水差异显著,使得露天矿的生产和生态修复作业具有显著的季节性特征。例如,受限于冻结等因素,表土剥离只能在气温较高的季节进行(图6),严重制约了生态修复所需土壤层采集、铺设、整平等工程措施作业时间。对北方地区生态修复时间选择构成严重制约的另一主要因素是植物生长期。随着秋季气温和地温降低,原生植被逐渐枯黄、死亡,为保证复垦植被的成活率和生态重建效果,植被栽种作业应选择在合理时间,即露天生态修复的场地(包括地形地貌)和土壤条件准备要与植被选择协同优化<sup>[54]</sup>。

$$z = \frac{H_i}{\pi} \left( \frac{\sin \psi}{\sin \varphi} - \psi \right) - \frac{C}{\gamma \tan \varphi} \quad (4)$$

令  $dz/d\psi = 0$ , 对式(4)求导,可以得到,当  $\psi = \frac{\pi}{2} - \varphi$  时,塑性区深度达到最大值,有

$$z_{\max} = \frac{H_i}{\pi} \left( \cot \varphi - \frac{\pi}{2} + \varphi \right) - \frac{C}{\gamma \tan \varphi} \quad (5)$$

式中,  $\sigma_1$  为最大主应力, kPa;  $H_i$  为外排土场的高度, m;  $p_i$  为第  $i$  水平的附加荷载, kPa;  $\psi$  为测试点的视角, ( $^{\circ}$ );  $C$  为岩体的黏聚力, kPa;  $\varphi$  为内摩擦角, ( $^{\circ}$ )。

将排弃物视为均质混合岩体(图5),外排堆载过程中高度  $H_i$  不断增大,造成了塑性区深度呈线性增加,同时对于侧向土体的挤压和剪切作用也更加明显,堆载岩体通过I区传递到II区的作用力  $\sigma_a$  为

$$\sigma_a = \gamma H_i (1 - \sin \varphi) - C \cos \varphi \quad (6)$$

III区对II区的作用力  $\sigma_b$  为

$$\sigma_b = \gamma h_i (1 + \sin \varphi) + C \cos \varphi \quad (7)$$

式中,  $h_i$  为开挖岩体的深度, m。

如图6所示,冬季大部分剥离和采煤作业正常进行,随剥采排工程推进形成到界排土场;但表土剥离与覆土作业要待春季气温回收、冻土融化后方能进行,因此从生态修复的角度考虑冬季作业主要是场地准备;夏季是植物的生长季,需进行表土的采集、运输、堆存、铺设等工程作业和植被栽种、生长管理等生态修复作业。以气候条件为刚性约束,草原区典型植被及其生长规律为基础,结合露天矿剥采排工程特点和表土使用规律,分析锡林郭勒草原区胜利露天矿的生态修复窗口期如图7所示。

在自然条件无法改变和生态修复植物已经确定(近自然修复)的情况下,场地和土壤条件的准备是主要的可控要素。因此,基于自然气候和原生植物条件,优化露天矿的剥采排作业和表土的采运储用,可以最大限度的利用有限的生态修复时间,缩短开采造成的土地裸露时间。

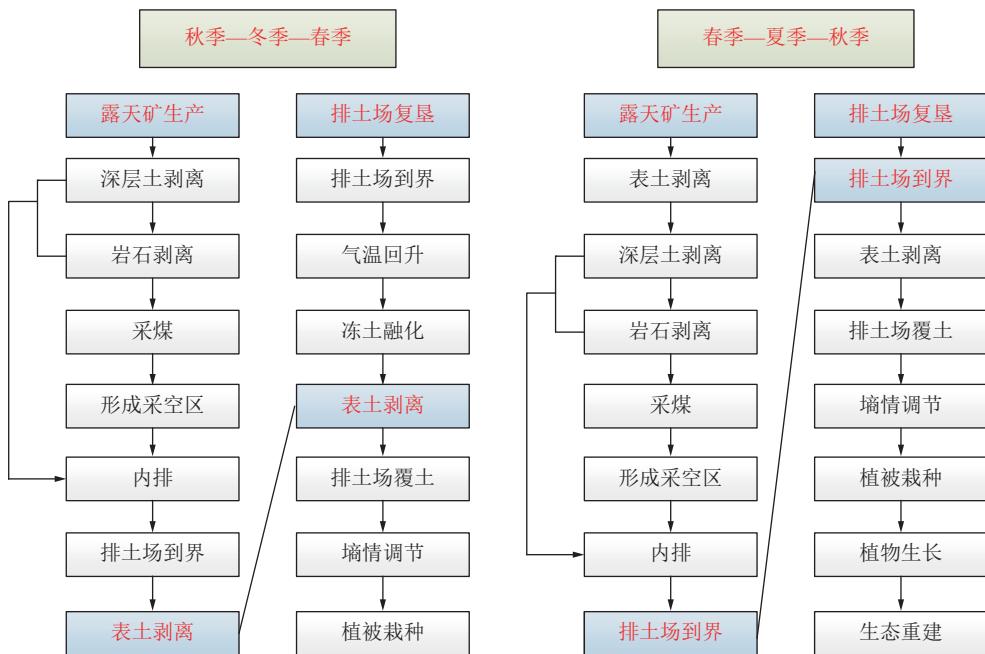


图 6 全年剥离条件下排土场生态重建流程

Fig.6 Ecological reconstruction process of dump under year-round stripping conditions

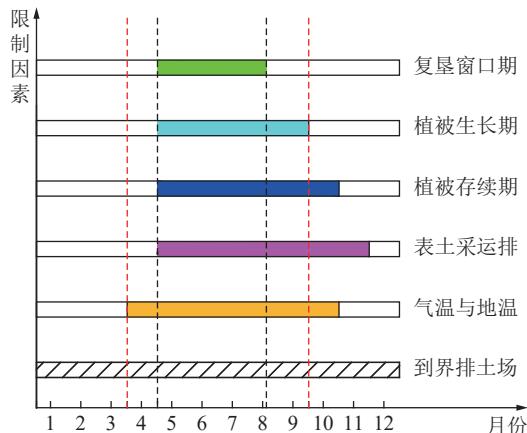


图 7 全年剥离条件下胜利露天矿生态修复窗口期

Fig.7 Ecological restoration window period of Shengli surface

mine under the condition of annual stripping

### 3.4 露天煤矿开采生态全要素系统修复技术体系

针对露天煤矿开采生态影响剧烈及修复技术单一、缺乏协同的问题,研发并创建了排土场地表径流保水控蚀、近地表含水层-地面水库-地下水库立体储水、土壤结构改良、贫瘠土壤提质增容、耐寒旱植物优选保育与微生物促生等一体化的生态修复技术体系,实现露天煤矿生态全要素(水-土-气-植-景观)的立体式、系统协同修复,有效提升生态系统修复和综合整治效果。

#### 3.4.1 露天煤矿“地面水库-近地表含水层-地下水库”立体储水技术

提出了基于矿区分季节、分方向用水特点的矿区

分布式储水方法,研发了露天煤矿“地面水库-近地表含水层-地下水库”立体储水及联合调用技术(图8),实现了露天矿地表水-地下水-采场涌水的互联补给、存储与利用。

(1) 基于采矿废迹地和排土场的地表储水技术。研发了露天矿排土场防渗和坝体安全保障技术,提出了地面水库坝体护坡厚度计算公式(式(8)),在胜利露天煤矿区利用工业废迹地和排土场建成2个地面水库<sup>[55]</sup>,库容40万m<sup>3</sup>,两库可以互联补给,不仅实现了露天矿坑水的“冬储夏用”,而且避免了建库新增占地347亩(231 344.9 m<sup>2</sup>)。

$$W \geq K_1 / \gamma_y + [(K_1 / \gamma_y)^2 + (K_1 W_b + \gamma h^2) / \gamma_y]^{1/2} \quad (8)$$

式中,  $W$  为排土工作面到坝体的安全距离, m;  $K_1$  为排弃岩土的侧向力,  $K_1 = \frac{e\gamma_y}{(1-e)\tan\beta}$ , kN/m<sup>3</sup>;  $h$  为水位高度, m;  $\mu$  为排弃物料在基底的摩擦因数;  $\gamma_y$  为排弃岩土的容重, kN/m<sup>3</sup>;  $W_b$  为坝体底宽, m;  $\gamma_s$  为储存水的容重, kN/m<sup>3</sup>;  $\beta$  为内排帮坡角,(°)。

(2) 近地表生态型含水层再造技术(图9)。提出了采用泥岩剥离物制备隔水层的方法,渗透率小于10~15 m<sup>2</sup>量级,并在宝日希勒露天矿排土场构建了近地表含水层-隔水层结构<sup>[56]</sup>。其中,隔水层以破碎的泥岩、黏土等剥离物为骨料,采用“水平隔水层为主,防渗墙为辅”的方式分段构筑,避免已恢复浅层水的横向流失;含水层采用卡车场地排土方式排卸砂砾岩类物料构建,并在上部依次铺设黄土隔离层和表土层,

保证储水层对地表生态修复的支撑,同时避免降水淋滤表土层。研究表明,近地表生态型含水层使排土场

土壤含水率提高了52%,植物株高较对照区提高20%以上。

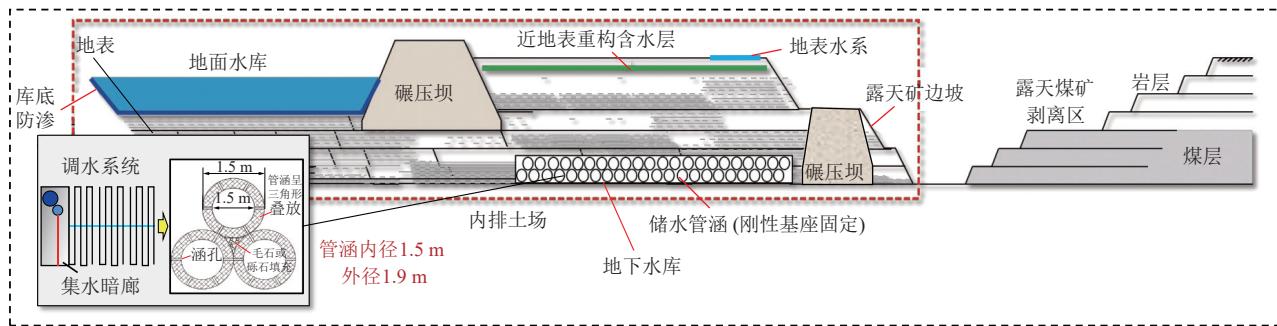


图8 露天煤矿“地面水库-近地表含水层-地下水库”立体储水技术

Fig.8 Open-pit coal mine “surface reservoir-near-surface aquifer-underground reservoir” three-dimensional water storage technology

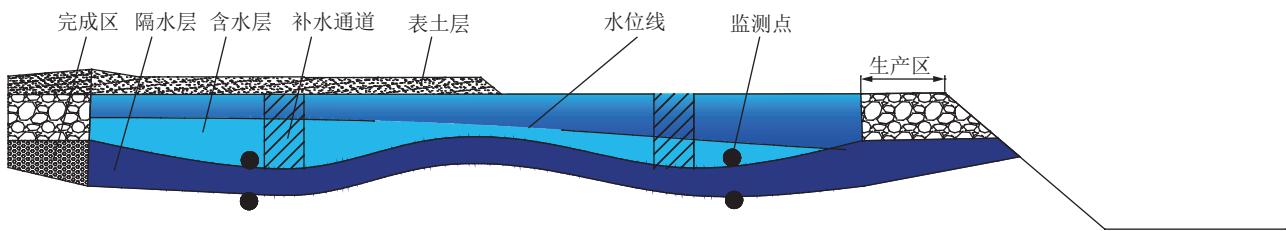


图9 近地表生态型含水层再造技术

Fig.9 Near-surface ecological aquifer reclamation technology

(3) 露天煤矿地下水库“采-排-筑-复”一体化技术。研究提出了露天煤矿区地下水库建设关键技术体系,涵盖了基底处理、管涵铺设、坝体构筑、连通管线、集水暗廊、调水系统等关键技术及环节<sup>[57-58]</sup>。提出了露天煤矿地下水库库体选址、坝体构建、水质处理、边坡安全距离、储水高度、钻孔注抽等工艺方法,优化了内排土场心墙堆石挡水坝的结构型式与设计参数,构建了涵盖坝体稳定性、库底隔水性、水质变化等参数的露天煤矿地下水库安全监测系统,在宝日希勒露天煤矿建成了储水容量122万m<sup>3</sup>的地下水库(图10)。

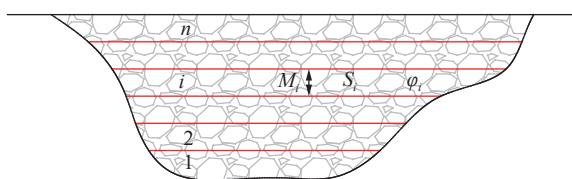


图10 地下水库纵剖面分层总和法计算储水量示意

Fig.10 Schematic diagram of the calculation of water storage by the longitudinal profile layered sum method of underground reservoir

$$Q = \sum_{i=1}^n \varphi_i M_i S_i \quad (9)$$

式中,  $Q$ 为地下水库储水容量, m<sup>3</sup>;  $\varphi_i$ 为地下水库储水介质第  $i$  分层的孔隙率;  $M_i$ 为地下水库储水介质第  $i$

分层的分层厚度, m;  $S_i$ 为地下水库第  $i$  分层的储水面积, m<sup>2</sup>;  $n$ 为分层数目。

### 3.4.2 露天煤矿采场注浆帷幕防渗技术

针对露天开采疏干排水引发的地下水位下降、水资源枯竭、地面沉降、地表水污染、地下水恶化等生态环境问题,研发露天煤矿采场注浆帷幕防渗技术。探明矿山水文地质、工程地质条件,厘清矿坑水的补给源和补给通道,确定适宜的帷幕截水方法、路线、顶底位置,确保帷幕底部进入稳定隔水层、顶部高于历史水位,如图11所示。研究地面定向钻孔注浆、抽注水、桩排、地连墙等方法构筑连续的帷幕墙体拦截矿山外围含水层侧向补给方法,使帷幕墙外地下水位恢复至生态水位,并从源头上降低露天开采带来的水害威胁,可最大程度减小露天开采对地下水和周边生态环境造成的损伤,有效解决矿山面临的水资源和生态保护难题。

### 3.4.3 草原区露天煤矿土壤改良与提质增容技术

针对草原区原生表土瘠薄对矿区生态修复的制约,充分利用采矿伴生黏土和矿渣等废弃物,改善土壤物理结构、增强土壤通透性,促进土壤养分保持和释放,达到提升土壤植被承载力的目标。

(1) 土壤稀缺区表土替代与改良技术(图12)。研制了基于剥离物的表土替代材料(表土、黄土、亚黏土质量比为2:2:1),其中土壤改良剂(蛭石:秸秆:

硝基腐殖酸质量比为 100 : 100 : 1) 的添加比例为 1%; 提出了基于固体废弃物资源化利用的土壤改良方法(表土、煤矸石、粉煤灰质量比为 3 : 4 : 3), 研究结果表明, 植物生物量提高 15.23%, 土壤有机质含量提高 117.72%, 有效磷含量提高 77.08%<sup>[59]</sup>。研发和应用适

合草原区自然生态特征的低成本表土替代材料, 为解决露天开采剥离表土与生态修复需求表土的品质、数量矛盾提供途径。

(2) 土壤提质增容有机改良技术(图 13)。采用养分动力学方法, 综合考虑采矿伴生黏土的综合利用成

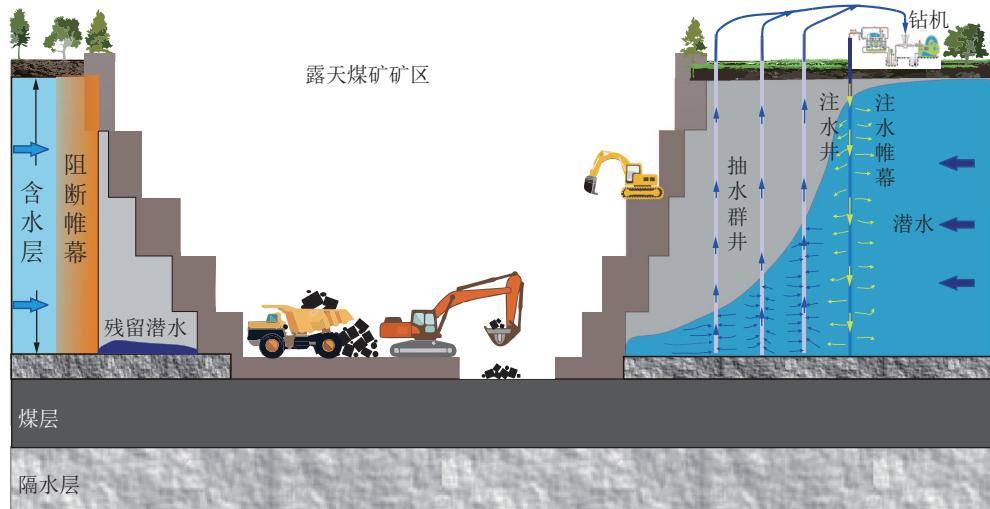


图 11 露天矿注/隔水帷幕示意

Fig.11 Schematic diagram of open pit injection/water barrier curtain

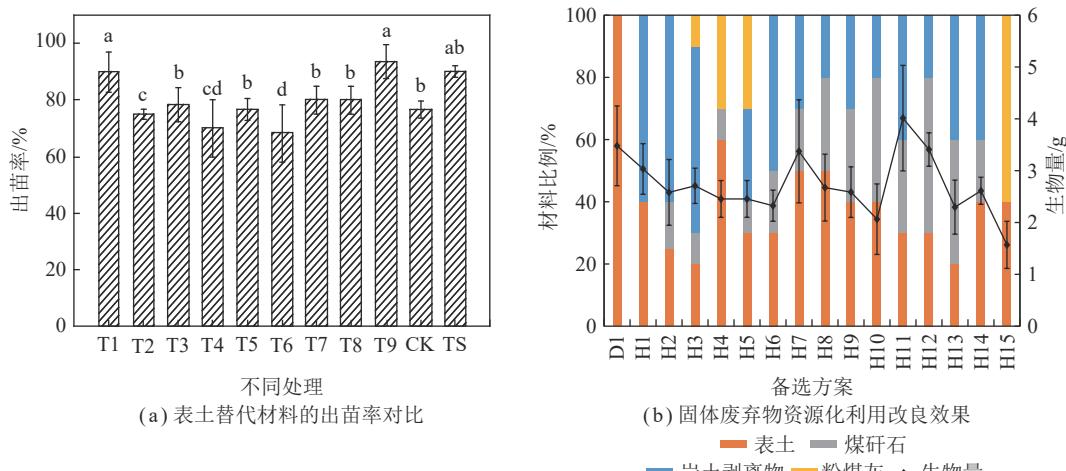


图 12 土壤稀缺区表土替代与改良技术

Fig.12 Topsoil substitution and soil improvement technology in topsoil scarcity areas

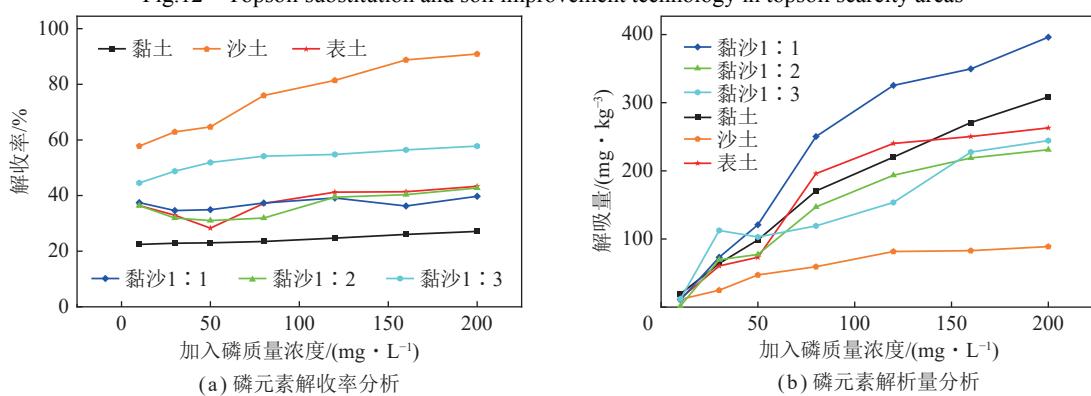


图 13 不同土壤提质增容方案下磷元素的解收率与解析量

Fig.13 Yield and resolution of phosphorus under different soil quality and capacity enhancement schemes

本,以微生物活化养分为切入点,提出了黏土:沙土质量比1:1+丛枝菌根真菌的土壤提质增容方案,土壤有效磷最大释放能力为表土的1.5倍,植物生物量提高1.35倍<sup>[60]</sup>。

#### 3.4.4 内排土场生态型地层立体重构技术

针对露天开采后剥离物排弃形成地层层序与自然层序的巨大变化,提出了含水层-近地表储水层-近

自然坡面-近自然地貌的排弃地层剖面近自然重构模式(图14),研发了基于含水层功能重建和矿区含/隔水层有效联通的近自然地层重构方法,实现了采后含水层水位快速恢复。分析胜利露天矿区排土场地下水观测井连续13 a监测数据发现(图15),采中平均水位降深2.05~4.28 m,采后水位抬升2.60~6.00 m,水位恢复期2~4 a<sup>[61]</sup>。

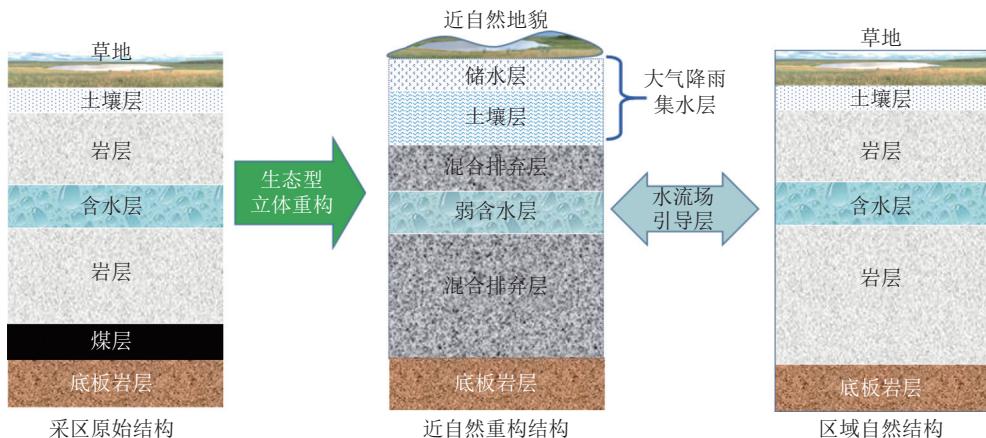


图14 露天开采后近自然地层重构示意

Fig.14 Schematic diagram of near-natural stratum reconstruction after open-pit mining



图15 胜利露天矿地下水位变化规律

Fig.15 Law of groundwater level change in Shengli open-pit mine

#### 3.4.5 露天煤矿高效粉尘阻控技术

为了防止露天矿生产扬尘扩散影响土壤结构和植物光合作用,从生产起尘抑制、运移通道控制、边界生态阻滞等方面开展系统研究,达到控制粉尘生态影响范围、程度的目标。

(1)露天煤矿开采全流程控尘技术及装备。运用空气动力学、现场监测、室内试验等理论与方法,研究露天矿不同环节粉尘起尘机理和运移规律,构建露天矿粉尘“天-空-地”一体化监测系统(图16),研究露天矿爆破环节多相封孔降尘、超声雾化降尘、爆堆注

水降尘、排土工作面抑尘等技术,研发工作面道路抑尘材料、非工作面道路筑路材料与冷再生抑尘装备与工艺,实现露天矿粉尘生态影响的生产源头控制和运移过程调控。

(2)露天矿区粉尘阻滞植物廊道构建技术。针对粉尘运移对周边生态环境的影响,提出了“连点补缺,点面结合”的立体景观隔离带建设方式,构建了生态网络优化-植物筛选-林分改造相结合的植物廊道滞尘控制模式。在胜利露天矿区构建了长3.6 km的植被景观隔离带(疏透度控制在0.20~0.35),现场监测

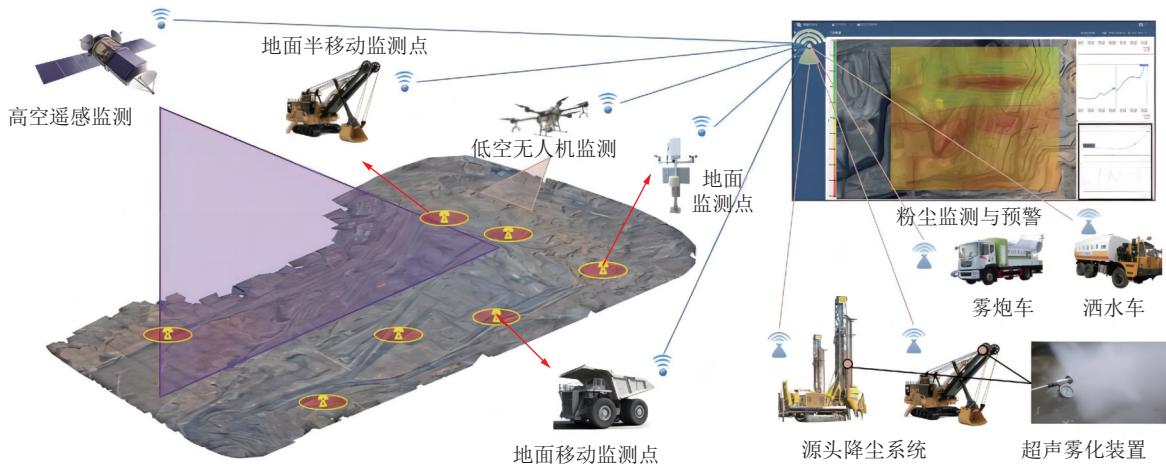


图 16 “天-空-地”一体化监测系统示意

Fig.16 Schematic diagram of the "sky-air-ground" integrated monitoring system

表明,防护林(距采坑150 m)外侧叶片表面重金属含量比内侧降低约50%,显著降低了粉尘对周边草原环境的影响<sup>[62]</sup>。

#### 3.4.6 露天煤矿植物优选保育与联合修复技术

通过优选当地适生植物及植物组合,在迅速增加排土场生物量和物种多样性的同时,使排土场植被群落符合外围草原特征;采用微生物促生技术,筛选适生微生物及不同微生物-植物组合促进土壤改良、植物生长和排土场物种多样性。

(1) 植物-微生物优选与保育技术。采用经典的微生物筛选和抗逆性培养方法,获得矿区耐寒旱解磷细菌5株、解钾细菌2株、丛枝菌根真菌5株。采用抗逆性保育方法,优选出具有耐旱耐寒、防风固沙灌木7种、草本14种。发明了丛枝菌根真菌(AMF)保育基质材料(沙土:蛭石:珍珠岩:风化煤2:1:1:1)。

(2) 植物-微生物联合修复技术(图17)。采用正交组合方法,优选出植物微生物组合:柠条+AMF、豆科:禾本科1:2+AMF。现场验证组合模式:土壤有效养分释放量增加5%,土壤微生物活性增加17%,试验区新生物种由15种增加到22种。

#### 3.4.7 露天煤矿景观生态功能提升技术

(1) 露天矿排土场近自然地貌综合整治技术(图18)。针对排土场自然堆积物料坡面角大、表层松散带来的水土流失严重、生态修复难问题,提出了基于空间约束、施工成本、边坡稳定性、周边地貌融合的排土场波浪式整形方法,复垦区表层土壤黏粒的流失量降低了70%,植物生物量较对照区增加3倍。研发了内排土场全生命周期近自然地貌重塑技术,以优化的景观格局控制矿业斑块的边缘影响效应,促进了内排土场与周边草原景观相协调和生境恢复,实现了

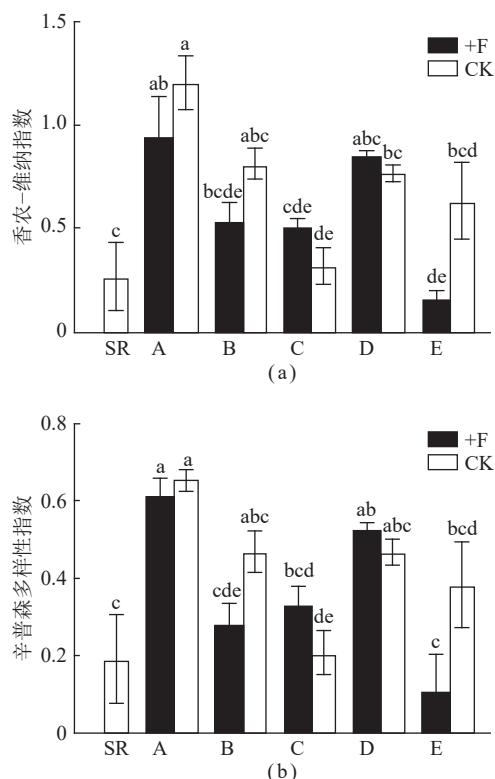


图 17 植被多样性变化规律

Fig.17 Law of changes in vegetation diversity

排土场景观与自然景观相融合。

(2) 牧矿交错带退化草原生境修复关键技术。针对生态累积效应明显、自我修复能力丧失的牧矿交错带生境退化区,提出了基于模拟根系分泌物的土壤激发剂-腐殖层再造的滞尘退化草原生境修复方法(图19)。研究结果表明,牧矿交错带滞尘修复区土壤质量显著改善,植物生物量和植物多样性较对照区提高80%以上。

(3) 排土场分布式保水控蚀技术(图20)。构建了分布式地表水力联系模型,揭示了景观破碎导致流域

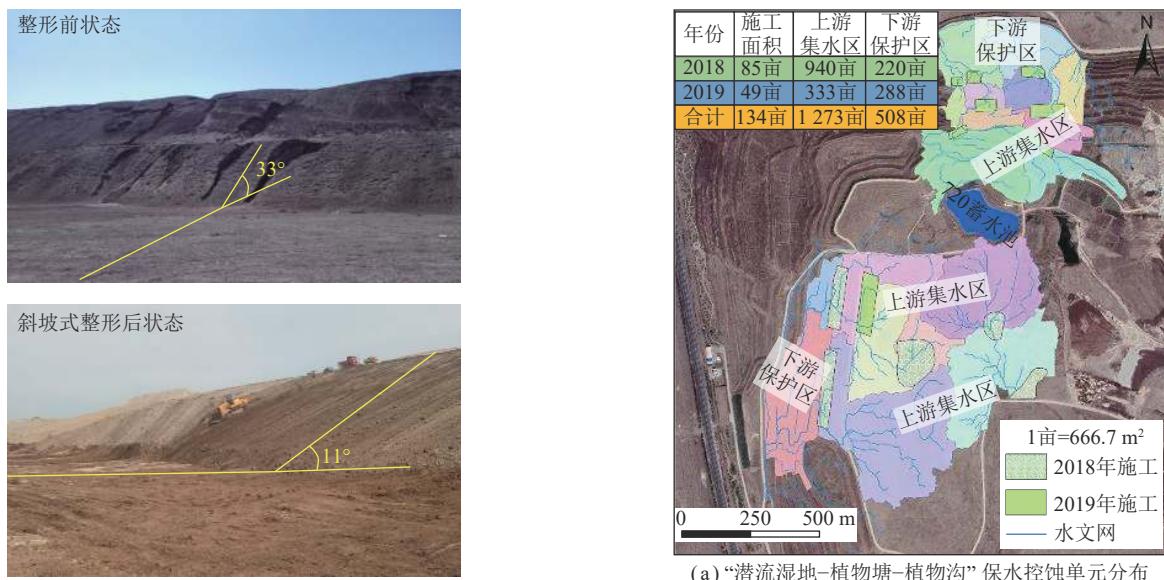


图 18 排土场近自然地貌综合整治效果

Fig.18 Comprehensive improvement effect of near-natural landform in the dumping site

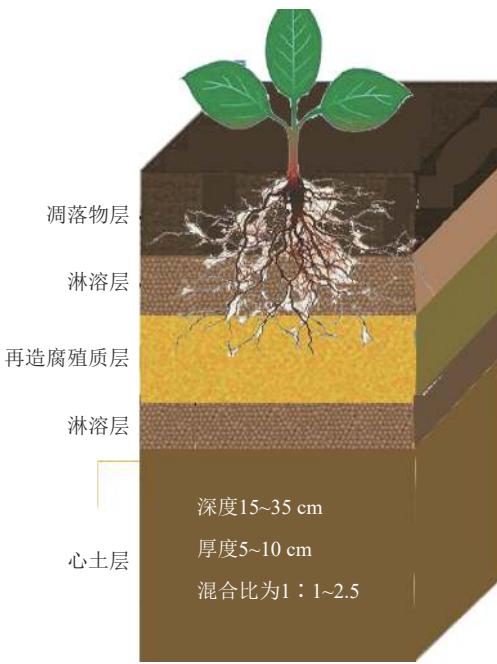


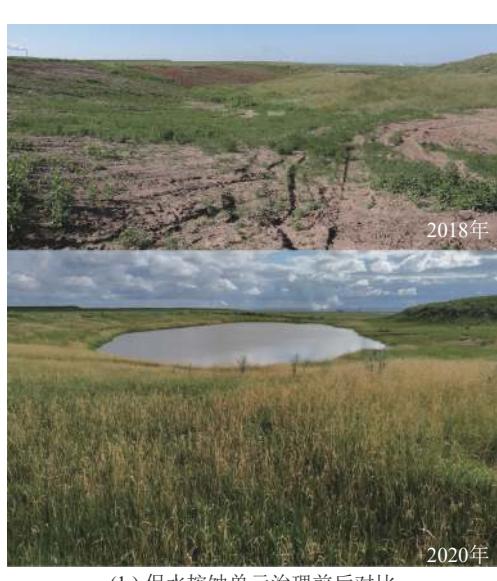
图 19 腐殖质层再造示意

Fig.19 Schematic diagram of humus layer reconstruction

有效地表水力联系变小、降低斑块土壤水补给能力的规律;研发构建了“潜流湿地-植物塘-植物沟”分布式保水控蚀单元的地表水系控制技术,形成了导水、集水、用水为一体的排土场治理新模式。研究结果表明,宝日希勒露天矿示范区降雨生态利用率达75%以上,使土壤含水率提升约10%、土壤年侵蚀率降低59.6%、边坡位移速率降低60%。

#### 4 煤炭生态型露天开采技术应用效果

针对蒙东草原区煤炭资源高效开发与生态环境



(b) 保水控蚀单元治理前后对比

Fig.20 Distributed water retention and corrosion control technology in dumping yards

保护的突出矛盾,依托呼伦贝尔和锡林郭勒两大煤炭基地开展露天煤矿生态型开采理论研究、关键技术研发及集成应用示范,成功解决了生态脆弱特征下高强度煤炭开采引起的地下水位下降、土地破坏、土壤沙化、植被退化、景观破损等生态问题,为我国大型露天煤矿的科学开发与区域生态安全保障提供科技支撑。

#### 4.1 半干旱草原区露天煤矿生态型开采技术示范

##### 4.1.1 示范区概况

胜利煤田位于内蒙古锡林郭勒地区,是我国蒙东(东北)煤炭基地最重要的产能支撑之一。矿区属半干旱草原气候,年平均降水量295 mm、蒸发量1 795 mm,腐殖土层厚度0~30 cm,土壤平均含水率一般为

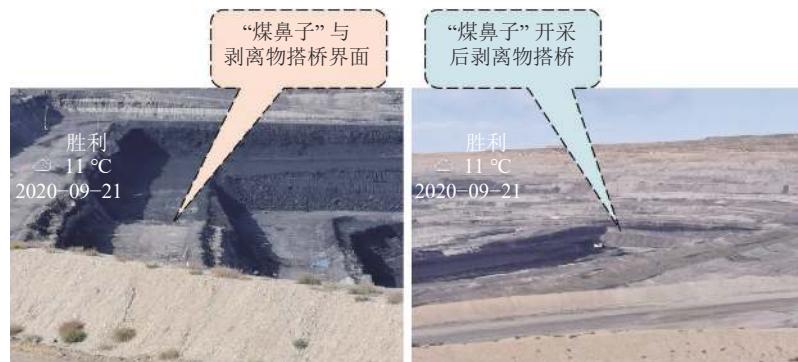
3%~10%，具有典型的草原气候、生态特征。

#### 4.1.2 技术集成模式与应用效果

针对锡林郭勒草原区土壤贫瘠、水资源不足和干旱气候等生态脆弱特征，建成了半干旱区露天煤矿生态型开采技术示范工程 12 146 亩 ( $8\ 097\ 738.2\ m^2$ )，在露天矿保供产能稳步提升的同时实现了生态损伤控制与高效修复（图 21）。

(1) 综合应用靠帮开采-快速回填、季节性作业协

调、生态型地层重构、露天开采境界内沿帮排土、采场中部搭桥剥离物多通道强化内排、排土场“生态修复窗口期”协同利用等技术，形成了适用于草原区露天矿的生态减损型采-排-复一体化模式，示范的胜利露天煤矿实现了保供产能翻倍，同时减少土地挖损 60 亩/ $a$  ( $60\ 003\ m^2/a$ )，缩小采场占地面积 1 128 亩 ( $752\ 037.6\ m^2$ )，排土场生态修复时间提前 1 a 以上。



(a) 端帮边坡靠帮开采-快速回填效果



(b) 排土场生态修复效果

图 21 胜利露天煤矿生态型开采效果

Fig.21 Ecological mining renderings of Shengli surface coal mine

(2) 按照水-土-气-植-景观协同修复思路，集成采矿迹地地面水库储水、水资源分质净化与高效利用、贫瘠土壤改良与重构、植物优选及微生物促进、内排土场仿自然地貌整形、乔-灌-草结合垂直格局的立体景观隔离带构建、基于干草的植物恢复型边坡生态稳定性提升等技术，形成了适用于半干旱草原自然气候特征的露天矿排土场生态多要素协同修复模式，示范露天矿实现了矿坑水零排放，植被覆盖率较本底值提高 41.78%，排土场植物多样性提高 50%，废迹地治理率达到 100%。

#### 4.2 酷寒草原区露天煤矿生态型开采技术示范

##### 4.2.1 示范区概况

宝日希勒煤田位于内蒙古呼伦贝尔地区，是我国纬度最高的大型煤矿区和黑龙江省最主要的保供煤炭来源。矿区年平均降水量 315 mm、蒸发量 1 345 mm，

草原土壤层厚度 20~50 cm，土壤含水率一般为 8%~16%，酷寒漫长的冬季给露天矿生产组织和生态修复作业造成了显著约束（图 22）。

#### 4.2.2 技术集成模式与应用效果

针对呼伦贝尔煤炭基地酷寒、半干旱、土壤瘠薄等生态修复条件，建成了酷寒草原区露天煤矿生态型开采技术示范工程 10 394 亩 ( $6\ 929\ 679.8\ m^2$ )，实现了露天矿开采源头生态损伤控制与采后系统性修复协同提升。

(1) 综合应用冻结期条带式靠帮开采、季节性作业协调、露天矿采场搭组合桥运输、内排露天矿原煤破碎站采场内移设、基于剥离物精细化采运排的生态型地层重构、排土场“生态修复窗口期”协同利用、表土层采运储用优化调配等技术，形成了适应酷寒气候特征的生态减损型开采模式，示范露天矿多回收边



(a) 排土场生态修复效果



(b) 排土场蓄水工程

图22 宝日希勒露天煤矿生态型开采效果

Fig.22 Ecological mining renderings of Baorixile surface coal mine

坡压煤约60万t/a,使采场占地面积缩小500亩( $333\ 350\ m^2$ ),剥离物内排的端帮运距缩短近200m,优化调配生态修复用土壤层重构物料约46万 $m^3$ 。

(2) 针对酷寒气候对矿坑水产生、运移、存储、利用的影响,集成露天矿排土场表面自然防渗、带土石芯墙的隔水坝体安全保障、基于露天矿剥离物的近地表隔水层构建、松散物料储水能力提升和露天煤矿地下水库选址、库底防渗、坝体构筑、安全监控等技术,形成了露天矿地面水库-近地表生态型含水层-排土场地下水水库的协同立体储水与分质高效利用模式,示范露天矿总储水能力超300万 $m^3$ ,实现了矿坑水跨季节调配,避免了冬季富余矿坑水外排和新建储水、净化设施占地。

(3) 集成边坡仿自然地貌土地整形、近地表土壤层序精细化重构、贫瘠土壤提质增容、植物优选及微生物促进、排土场“潜流湿地-植物塘-植物沟”分布式保水控蚀等技术,形成了适应酷寒区冻融循环侵蚀的排土场综合整治与生态修复模式,露天矿示范区降雨利用率达75%以上,使土壤含水率提升约10%、年侵蚀率降低约60%,植被覆盖率较本底值提高37.96%。

## 5 结 论

(1) 分析了我国煤炭露天开采的生态环境影响特征和研究现状,提出了“生态型露天开采”的定义、内

涵和技术特征,建立了基础理论框架。

(2) 从土地利用类型变化的源头出发,构建了控制土地挖损压占的源头减损开采技术体系和水-土-植-景观协同的高效修复技术体系,为生态损伤的时空控制提供技术支撑。

(3) 针对半干旱草原区煤炭露天开采土地占用量大、生态修复缺水少土等问题,提出了露天煤矿生态化设计-强化靠帮开采与内排-排土场立体储水-表土替代与提质增容-植被优选保育-高效粉尘阻滞-景观生态功能提升相结合的生态型开发模式。

(4) 针对酷寒草原区露天开采作业季节性显著、生态修复期短等问题,提出了露天煤矿生态化设计-季节性强化靠帮开采-生态修复窗口期协同利用-采场帷幕防渗保水-生态型地层立体重构-土壤改良与提质增容-植被与微生物联合修复-景观生态功能提升相结合的生态型开发模式。

## 参考文献(References):

- [1] 李全生. 东部草原区煤电基地开发生态修复技术研究[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7049-7053.  
LI Quansheng. Research on ecological restoration technology of coal-power base in eastern steppe of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7049-7053.
- [2] 李全生, 张凯. 我国能源绿色开发利用路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 101-111.  
LI Quansheng, ZHANG Kai. The path for green development and utilization of energy in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 101-111.
- [3] 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.
- [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] 邵亚琴, 汪云甲, 李永峰, 等. 草原区煤电基地开发生态环境时空响应及综合评价[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3874-3886.  
SHAO Yaqin, WANG Yunjia, LI Yongfeng, et al. Spatial-temporal response and comprehensive evaluation of ecological environment of prairie coal-electricity base development[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3874-3886.
- [6] 田会, 才庆祥,甄选. 中国露天采煤事业的发展展望[J]. 煤炭工程, 2014, 46(10): 11-14.  
TIAN Hui, CAI Qingxiang, ZHEN Xuan. Development prospects of

- surface coal mining industry in China[J]. *Coal Engineering*, 2014, 46(10): 11–14.
- [7] 宋晓波. 中国适宜露天开采的煤炭资源分布及其评价研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(12): 124–126, 129.  
SONG Xiaobo. Distribution and evaluation of coal resources suitable for open-pit mining in China[J]. *Coal Engineering*, 2015, 47(12): 124–126, 129.
- [8] 李浩荡, 余长超, 周永利, 等. 我国露天煤矿开采技术综述及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 24–35.  
LI Haodong, SHE Changchao, ZHOU Yongli, et al. Summary and prospect of open-pit coal mining technology in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(10): 24–35.
- [9] 毕银丽, 彭苏萍, 杜善周. 西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1355–1364.  
BI Yinli, PENG Suping, DU Shanzhou. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of Western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1355–1364.
- [10] 胡晶晶, 毕银丽, 龚云丽, 等. 接种 AM 真菌对采煤沉陷区文冠果生长及土壤特性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 341–345, 351.  
HU Jingjing, BI Yinli, GONG Yunli, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth of xanthocerasorbifolia and soil properties in coal mining subsidence area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 341–345, 351.
- [11] 曹志国, 王瑞国, 何瑞敏. 基于 WEB-GIS 的矿区生态监测与管理信息系统[J]. 煤炭工程, 2018, 50(3): 161–163, 168.  
CAO Zhiguo, WANG Ruiguo, HE Ruimin. Ecological environment monitoring and management information system of coal mining area based on WEB-GIS[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(3): 161–163, 168.
- [12] 邓娟娟, 李晶, 殷守强, 等. 陈巴尔虎旗土地生态状况评价及影响因素分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(11): 162–172.  
DENG Xiaojuan, LI Jing, YIN Shouqiang, et al. Evaluation of land ecological conditions and analysis of influencing factors in Chen Barag Banner[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(11): 162–172.
- [13] 刘磊, 郭二民, 李忠华, 等. 加强“十四五”露天煤矿开采环境管理的建议[J]. 中国煤炭, 2021, 47(10): 61–66.  
LIU Lei, GUO Ermin, LI Zhonghua, et al. Suggestions on strengthening the environmental management in open-pit coal mines during the 14th Five-Year Plan[J]. *China Coal*, 2021, 47(10): 61–66.
- [14] 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 Laogui, et al. Impact analysis on mining status and ecological environment in open-pit coal mine[J]. *Open-cast Mining Technology*, 2016, 31(9): 1–4, 9.
- [15] 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.
- [16] 同晓明, 徐国俊, 韩鹏. 露天煤矿开采对生态的影响及生态修复[J]. 内蒙古煤炭经济, 2019(21): 6–9.  
YAN Xiaoming, XU Guojun, HAN Peng. Influence of open-pit coal mining on ecology and ecological restoration[J]. *Inner Mongolia Coal Economy*, 2019(21): 6–9.
- [17] 王振, 周伟, JISKANIL I M, 等. 年度粉尘污染特征及其防治与控制研究[J]. 全球环境变化, 2022, 825: 153949.
- [18] 范小杉, 熊向艳, 马建军, 等. 北方草原露天煤矿区生态景观变化研究: 以呼伦贝尔市伊敏露天煤矿为例[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(6): 732–740.  
FAN Xiaoshan, XIONG Xiangyan, MA Jianjun, et al. Change of ecological landscape in open-pit coal mining area of northern grassland: Taking Yimin open coal mine in Hulun Buir City as an example[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(6): 732–740.
- [19] 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.
- [20] 宝海风, 康萨如拉, 贺晓, 等. 西鄂尔多斯露天煤矿集中分布区景观格局动态[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2020, 51(5): 516–524.  
BAO Haifeng, KANG Sarula, HE Xiao, et al. Landscape dynamics analysis of open-pit coal mine-concentrated area in western Ordos[J]. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2020, 51(5): 516–524.
- [21] 冯海波. 内蒙古呼伦贝尔草原露天煤矿区地下水系统演化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.  
FENG Haibo. Groundwater system evolution of the opencast coalmine area in Hulun Buir Prairie Inner Mongolia, North China[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2017.
- [22] 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.
- [23] 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 influence of open-pit coal mining on groundwater system and curtain wall protection in grassland area of Northeastern China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3685–3692.
- [24] 高杰. 安利煤矿露天开采对地下水水量和水质的影响预测分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
GAO Jie. Prediction and analysis of the influence of Anli open pit coal mining on groundwater quantity and quality[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [25] 刘海先. 谢尔塔拉露天煤矿地下水控制研究[J]. 露天采矿技术, 2020, 35(4): 5–8.  
LIU Haixian. Research on groundwater control of Xie'ertala Open-

- pit Coal Mine[J]. Opencast Mining Technology, 2020, 35(4): 5–8.
- [26] 王超,董少刚,贾志斌,等.草原露天煤矿区植被对地下水位埋深变化的响应[J].生态学报,2020,40(19): 6925–6937.
- WANG Chao, DONG Shaogang, JIA Zhibin, et al. Responses of vegetation to depth to the groundwater table in the grassland openpit coal mine area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6925–6937.
- [27] 毛旭芮,王明力,杨建军,等.采煤对露天煤矿土壤理化性质及可蚀性影响[J].西南农业学报,2020,33(11): 2537–2544.
- MAO Xurui, WANG Mingli, YANG Jianjun, et al. Effect of coal mining activities on soil properties and erodibility[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(11): 2537–2544.
- [28] 刘晓波.露天煤矿区地下水与土壤环境响应研究:以呼伦贝尔草原伊敏煤矿为例[D].呼和浩特:内蒙古大学,2018.
- LIU Xiaobo. Study on groundwater and soil environmental response in opencast coal mine area—Hulun Buir Grassland Yimin coal mine as a case study[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2018.
- [29] 胡振琪,肖武,赵艳玲.再论煤矿区生态环境“边采边复”[J].煤炭学报,2020,45(1): 351–359.
- HU Zhenqi, XIAO Wu, ZHAO Yanling. Re-discussion on coal mine eco-environment concurrent mining and reclamation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 351–359.
- [30] 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.
- [31] 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. Optional study of integrating operation of mining and land reclamation in surface mines[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3): 276–280.
- [32] 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.
- [33] HUERTAS J I, HUERTAS M E, IZQUIERDO S, 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.
- [34] 李文超,张波,李伟.伊敏露天矿生态修复技术[J].露天采矿技术,2022,37(5): 82–85.
- LI Wenchao, ZHANG Bo, LI Wei. Ecological restoration technology in Yimin Open-pit Mine[J]. Opencast Mining Technology, 2022, 37(5): 82–85.
- [35] 陈宗全,夏伦娣,姜艳,等.高原高寒生态脆弱区露天煤矿采区生态修复技术讨论[J].能源技术与管理,2022,47(5): 169–172,189.
- CHEM Zongquan, XIA Lundi, JIANG Yan, et al. Discussion on ecological restoration technology of open-pit coal mining area in plateau alpine ecological fragile area[J]. Energy Technology and Management, 2022, 47(5): 169–172,189.
- [36] 夏嘉南,李根生,李园园,等.水文融合的草原露天矿内排土场地貌重塑优化[J].煤炭学报,2023,48(4): 1673–1686.
- XIA Jianan, LI Gensheng, LI Yuanyuan, et al. Landform reshaping optimization of inner dump based on hydrological fusion in grassland open-pit coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1673–1686.
- [37] 薛东明,郭小平,张晓霞.干旱矿区排土场不同边坡生态修复模式下减流减沙效益[J].水土保持学报,2021,35(6): 15–21,30.
- XUE Dongming, GUO Xiaoping, ZHANG Xiaoxia. Runoff and sediment reduction under different slope ecological restoration modes of waste dump in arid mining area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 15–21,30.
- [38] 李聪聪,王佟,杜斌,梁振新,王伟超,熊涛.青海高原高寒露天煤矿区生态修复治理路径探索与实践[C]//第三届国际土地复垦与生态修复学术研讨会论文摘要集.徐州:中国矿业大学出版社,2021.
- [39] 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 open-cast coal mine[J]. Environmental Ecology, 2021, 3(6): 47–53.
- [40] 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.
- [41] 舒艳,蒋莉.露天煤矿开发生态环境影响评价研究[C]//Proceedings of the 2007 中国环境科学学会学术年会.北京,2007.
- [42] 李宏伟.黑岱沟露天煤矿生态恢复生态环境影响综合评价[J].露天采矿技术,2008,23(3): 61–63, 75.
- LI Hongwei. Integration assessment of ecological restoration and ecological environment impact in Heidaigou opencast coal mine[J]. Opencast Mining Technology, 2008, 23(3): 61–63, 75.
- [43] 张自学,肖剑民,孙静萍.黑岱沟露天煤矿开发对生态环境的影响及矿区人工生态系统建设方案[J].干旱区资源与环境,1990,4(4): 102–108.
- ZHANG Zixue, XIAO Jianmin, SUN Jingping. Impact of the exploitation of open coal mine at the Heidai gully on the ecological environment and establishment of artificial ecosystem in the minlng area[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 1990, 4(4): 102–108.
- [44] 孟峰,张周爱,陈树召.宝日希勒矿区煤炭资源开发的生态环境影响评价[J].中国煤炭,2021,47(9): 16–25.
- MENG Feng, ZHANG Zhouai, CHEN Shuzhao. Ecological environment impact assessment of coal resources development in Baorixile mining area[J]. China Coal, 2021, 47(9): 16–25.
- [45] YUAN M, OUYANG J, ZHENG S, et al. Research on ecological effect assessment method of ecological restoration of open-pit coal mines in alpine regions[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(13): 7682.
- [46] 才庆祥,周伟,舒继森,等.大型近水平露天煤矿端帮边坡时效性分析及应用[J].中国矿业大学学报,2008,37(6): 740–744.
- CAI Qingxiang, ZHOU Wei, SHU Jisen, et al. Analysis and appli-

- caiton on end-slope timeliness of internal dumping under flat dipping ore body in large surface coal mine[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(6): 740–744.
- [47] 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.
- [48] 宁芳. 露天煤矿生态文明评价体系构建与污染源治理策略研究 [M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2021.
- [49] 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 in green, safe and efficient mining of large-scale open-pit mines in Xinjiang[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(1): 1–12.
- [50] 柯丽华. 基于最低寿命周期成本的露天矿开采量动态规划模型 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.  
KE Lihua. Dynamic planning model of extraction based on lowest life cycle cost in open pit[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020.
- [51] 才庆祥, 周伟, 车兆学, 等. 近水平露天煤矿端帮靠帮开采方式与剥采比研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2007, 36(6): 743–747.  
CAI Qingxiang, ZHOU Wei, CHE Zhaoxue, et al. Research on the mining method and stripping ratio of steep end-slope mining in surface coal mines with flat coal deposit[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 36(6): 743–747.
- [52] 李瑞. 典型露天矿区全程协同节地技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.  
LI Rui. Research on land-saving in typical open-pit coal mining areas based on full cooperation[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [53] 张天文. 露天煤矿排土场土石混合体力学实验及其强度重构机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.  
ZHANG Tianwen. Mechanical experimental research and strength reconstruction mechanism of soil-rock mixture mass in surface coal mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [54] 李全生. 蒙东草原区大型露天煤矿减损开采与生态修复关键技术 [J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 905–915.
- LI Quansheng. Key technologies for damage reduction mining and ecological restoration of large-scale open pit coal mines in grassland area of eastern Inner Mongolia[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(5): 905–915.
- [55] 陈树召, 韩流, 潘朝港, 等. 一种内排露天矿排土场内部坝体构筑方法: CN113106988B [P]. 2022-01-25.
- [56] 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 reconstruction mechanism and application of aquiclude in open-pit mine based on mudstone-geopolymer[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019.
- [57] 陈树召, 李全生, 曹志国, 等. 一种露天矿排土场地下水库抽注水井建设方法: CN113565172B [P]. 2022-04-15.
- [58] 孙江, 李雁飞, 杨建, 等. 宝日希勒矿区水文地质条件及地下储水可行性研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(11): 38–43.  
SUN Jiang, LI Yanfei, YANG Jian, et al. Hydrogeological conditions and feasibility study of underground water storage in Baorixile Mining Area[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(11): 38–43.
- [59] 杨猛. 基于粉煤灰改良试验的露天矿排土场土壤提质增肥研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.  
YANG Meng. Study on soil quality improvement and fertilization of open-pit mine dumping based on fly ash improvement test[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019.
- [60] 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.
- [61] 杨日. 第四系含水层渗透能力变化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.  
YANG Ri. Study on the change law of permeability of quaternary aquifer[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2021.
- [62] 闫石, 赵义博, 雷少刚, 等. 基于无人机高光谱遥感的草原植物冠层滞尘量估算[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 84–92.  
YAN Shi, ZHAO Yibo, LEI Shaogang, et al. Estimation of dust retention in grassland plant canopy based on UAV hyperspectral remote sensing[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2022, 41(6): 84–92.