西部干旱半干旱煤矿区生态环境损伤特征及修复机制

彭苏萍[1,2]，毕银丽[1,2]

(1. 中国矿业大学 (北京) 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京　100083; 2. 中国矿业大学 (北京) 矿山生态修复研究院, 北京　100083)

摘　要: 我国煤炭开发重点已战略西移，实现煤炭资源绿色开采与生态协调发展，成为保障国家能源安全的重要举措之一。西部煤层大多数埋藏浅、上覆基岩薄、煤层厚，有利于一次采全高大规模井工开采或露天开采。但该地区气候干旱少雨、生态条件脆弱，大规模高强度对矿区及周边生态环境造成的损伤大。由于对开采过程中生态损伤演变机制及采后修复机理尚不清楚，没有成熟的修复理论和方法作指导，成为制约该地区煤炭高质量发展的重大难题。针对上述难题开展系统研究，认为精准勘测煤炭开采全周期工作面地质−水文地质条件和矿区生态演化特征，有助于阐明开采诱致上覆土岩破损机理、水资源散失富集与循环调运规律、生态损伤演变机理和承载力，并揭示采后矿区土岩层、水资源循环、生态自适应机理。采用植物−微生物组合修复方法，初步构建井工和露天矿山人工与自然协同的水−土−生立体耦合修复理论，提出了生态修复机制的新思考，在浅埋深矿区开采形成的裂缝发育犹如农田松土一般，成为生态修复新的契机，促进水−土−生再分配，并利用微生物修复技术，可促进矿区生态环境的正向协同发展，实现西部煤矿脆弱生态区开发“金山银山”，再造“绿水青山”的思维转变。

关键词: 干旱半干旱; 煤矿区; 精准勘探; 生态自修复; 涵水−提质−增容协同修复

中图分类号: TD88　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253−9993(2024)01−0057−08

Properties of ecological environment damage and their mechanism of restoration in arid and semi-arid coal mining area of western China

PENG Suping[1,2], BI Yinli[1,2]

(1. *State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources*, *China University of Mining and Technology-Beijing*, *Beijing* 100083, *China*; 2. *Institute of Mining Ecological Restoration*, *China University of Mining and Technology-Beijing*, *Beijing*　100083, *China*)

Abstract: The focus of coal development in China has been strategically shifted westward. That realize green mining of coal resources and coordinated ecological development becomes one of the important measures to ensure national energy security. Most of the coal seams in the western region are buried shallowly, with thin overlying bedrock and thick coal seams, which is beneficial for large-scale underground mining or open-pit mining. However, the climate in the region is arid with little rainfall and fragile ecological conditions, which caused significant damage to the mining area and surrounding ecological environment on a large scale and with high intensity. Due to the unclear understanding of the evolution mechanism of ecological damage during the mining process and the post mining restoration mechanism, there is no mature restoration theory and method to guide it, which has become a major challenge restricting the high-quality development of coal in the region. We are focuse on the above-mentioned difficulties, which consider accurately surveying the

收稿日期: 2024−01−04　　**修回日期:** 2024−02−29　　**责任编辑:** 韩晋平　　**DOI:** 10.13225/j.cnki.jccs.YH24.0156

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目 (52394190); 国家重点研发计划资助项目 (2022YFF1303300)

作者简介: 彭苏萍 (1959—), 男, 江西萍乡人, 中国工程院院士。E-mail: psp@cumtb.edu.cn

引用格式: 彭苏萍, 毕银丽. 西部干旱半干旱煤矿区生态环境损伤特征及修复机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 57−64.
PENG Suping, BI Yinli. Properties of ecological environment damage and their mechanism of restoration in arid and semi-arid coal mining area of western China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 57−64.

移动阅读

geological and hydrogeological conditions and the ecological evolution characteristics of the entire coal mining cycle working face, that be helpful for elucidating the mechanism of overlying soil and rock damage caused by mining, the law of water resource loss and accumulation and cyclic transportation, the mechanism of ecological damage evolution and bearing capacity, and revealing the soil and rock layers, water resource circulation, and mechanism of ecological self-adaption in the post-mining area. By using the plant-microbial combination restoration method, a water-soil ecological three-dimensional coupling remediation theory was constructed for the synergy between artificial and natural restoration in underground and open-pit mines, and a new thinking on the mechanism of ecological restoration was proposed. That development of fissures is like loosening soil in farmland becomes a new opportunity for ecological restoration in shallow buried deep mining area, which promote the redistribution of water-soil-life. Meanwhile, utilizing microbial remediation technology to promote the coordinated forward direction development of water retention-quality improvement-capacity enhancement, practicing the thinking of developing “golden mountains and silver hills” and recreating “green mountains and clear waters” in the western fragile ecological area.

Key words: arid and semi-arid; coal mining area; fine exploration; ecological self-restoration; collaborative restoration of contained water-improved quality-increased capacity

西部地区气候干旱半干旱，生态条件脆弱。西部(陕甘宁蒙青新)6 省原煤产量 24.88 亿 t(2022 年)，占全国原煤产量 55.30%。大多数矿区的煤层埋藏浅，上覆基岩及表土层厚度小，有利于一次采全高大规模井工开采或露天开采。在大规模的开采过程中，极易产生大规模 (通天) 裂隙和地表沉陷，造成地表水散失和地下水水位下降，使得原本就干旱少雨、蒸发量大的矿区更加干旱，加剧矿区植被枯萎，生态进一步恶化，土地沙漠化增强等不良生态反应[1]，严重制约了此类矿区煤炭开采与生态环境协调的可持续发展。因此，面向西部能源开发和生态环境保护高质量发展的国家重大战略需求，亟需开展西部干旱半干旱区煤炭开采上覆土岩破损机理及生态环境演化规律研究，为西部煤炭资源开发与生态环境保护协调发展奠定理论基础。

西部干旱半干旱煤矿区生态环境脆弱，水源涵养功能差，井工开采造成覆岩移动损伤，破坏含 (隔) 水层；露天开采表土剥离、堆叠，含 (隔) 水层需重新构建，影响了矿区的水源涵养功能。因此，西部煤矿区的生态修复需要以水为主线，在生态修复中最大程度地保护水资源。针对我国西部浅埋煤层高强度开采活动，笔者阐明井工和露天开采诱导上覆土岩破损机理、矿区水的循环变化规律；基于区域生态系统自然演化的背景、分区，研究和揭示煤炭开采导致的生态环境损伤机制；系统探究不同生态分区井工和露天煤炭开采水−土−生立体生态修复机理，构建人工与自然协同生态修复理论，为我国西部干旱矿山的生态修复提供基础理论和技术方法，开发“金山银山”，再造“绿水青山”，为践行两山理论贡献科技力量。

1 国内外研究进展

1.1 煤炭开采诱致土岩结构及裂隙动态发育特征和规律

煤炭开采导致地表土壤损伤、上覆岩层破坏以及地质构造扰动，引起地表生态环境和地下地质条件改变[2-3]。高强度煤炭开采容易导致水土流失、土地损毁、植被退化，从而引发生态连锁反应，加剧区域生态环境问题。针对煤矿开采前矿井上覆土岩层、含 (隔) 水层与地质构造等探查和识别难题，目前主要采用探地雷达、三维地震和高密度电法等勘探方法，并取得良好的应用效果[4-5]。时移三维探地雷达技术可获得土层三维空间动态变化的细节特征和整体规律，但目前尚处于探索阶段。时移地震探测技术主要集中在煤矿采空区动态监测[6]，针对上覆土岩层结构与裂隙变化情况的研究仍处于初始阶段。采动裂隙监测主要分为现场实测、模拟分析和理论分析 3 个方面。张华兴等[7]利用 EH4 电导率成像系统与钻孔电视相结合，明晰了岩层裂隙具体分布特征。路军等[8]通过物理模拟与数值模拟刻画复杂地质条件下采动覆岩破坏时空演化特征，认为煤层顶板覆岩运动及采动裂隙发育是破坏关键隔水层性能和生态环境的直接原因。许家林等[9]提出煤层开采后上覆岩层中存在 2 类裂隙，即横向的离层裂隙和纵向的竖向裂隙。来兴平等[10]运用多元分析方法，分析了厚松散层下三软煤层开采覆岩运移规律、裂隙发育演化特征。上述研究主要聚焦开采阶段岩层损伤特征，而采前岩层原生损伤规律、采后破碎土岩层修复过程力学行为等方面研究还较少。

采动地裂缝是“覆岩−地表”耦合运移的产物，主

要是发生在土层中的裂隙或地表的裂缝。近年来, 相关学者对表土层裂隙发育状态和演化规律进行了大量的研究工作[11]。地表裂缝存在拉伸、压缩、台阶和塌陷 4 种类型, 浅埋高强度开采地表裂缝呈“O”型展布[12], 裂隙具有“开裂—闭合”自修复特征。此外, 山区及沟壑区更易形成滑动型采动裂隙和裂缝。风积沙地区地面塌陷程度小于黄土沟壑区, 地表裂缝具有较强的自修复能力。而在土层–地表–生态与高强度采动的关联性、不同开采阶段土层裂隙发育状态与土层介质特性和受控机制等方面缺乏系统性研究。针对采空区上覆土岩结构损伤与自修复过程, 国内外学者开展了对高强度开采浅埋煤层上覆土岩结构损伤传递规律、工作面覆岩运移对地表裂隙的控制作用、浅埋煤层各层位覆岩损伤恢复效果、物理化学作用、采矿工程地质因素对岩层损伤恢复影响[13]等方面的研究, 但在上覆土–岩层结构损伤动态演化受控机制与主控因素, 不同生态分区土岩损伤模型等方面研究仍不够系统, 存在损伤受控机制不够明确、模型不够清晰的问题, 需要进一步深入研究。

1.2　煤炭开采对水资源运移循环演化影响

煤炭资源与水资源的逆向分布使得我国西部煤炭开采水资源保护利用成为煤炭绿色开发的重大技术难题。如前所述, 我国西部已成为煤炭的主产区, 但该地区气候干旱半干旱, 水资源蒸发量大, 煤炭开采中矿井水外排量大, 矿区水资源损失严重, 水资源保护成为矿区生态修复的重大难题[14]。长期以来, 针对煤炭开采对地下水的影响问题, 国内外进行了大量的技术研究和工程实践,包括煤炭开采岩层移动“三带”和地下水运移规律等[15], 形成了 2 类技术途径: 一是以“堵截法”为特征的保水开采技术; 二是以“疏导法”为特征的矿井水储存利用技术。此外, 也有研究通过引入以利润为目标函数的最优控制理论, 以煤炭价格和煤炭储量为边界条件, 以 WRCC 为约束条件, 基于 H–J–B 方程算法, 得到了市场需求和 WRCC 约束下的采矿规模决策方程, 通过对比 2 种约束条件下的开采规模, 制定了“水基开采规模”模式, 以实现煤炭开采与生态环境发展的平衡[16]。

西部优质煤炭资源埋藏浅、厚度大, 在大规模、高强度煤炭开采过程中, 较少顾及生态环境容量, 特别是水资源承载力, 存在水资源破坏、地表植被死亡等严重的生态环境损害问题, 这一现状引起了国家高度重视。煤炭资源科学规模开发与生态环境特别是水资源保护相协调, 已成为国家可持续发展战略要求以及《国家中长期科技发展纲要》重点领域的优先主题。为此, 在 2015 年国家“973”计划项目指南中将“我国西部生态脆弱区煤炭科学规模开发与水资源保护”列入“能源科学领域”资助研究方向之一。我国地质条件复杂, 水资源分布不均, 精确探测和掌握煤炭开采前煤层和覆岩赋存状况以及含 (隔) 水层分布、地质储水空间和地质构造发育特征, 精细描述含 (隔) 水层空间组合与地下水流场分布特征, 通过水岩时移监测[17], 研究煤炭开采全周期地下水、上覆岩层和含 (隔) 水层变化规律, 模拟研究开采条件下地下水流场变化、导水裂隙带发育高度和隔水层裂隙分布状况, 结合应力场–裂隙场–渗流场多场耦合、结构动态演化、覆岩移动破坏规律, 剖析采动覆岩移动破坏、隔水层结构与采动变异特征, 能够揭示煤炭开采对地下水的影响和作用机理[18]。而针对大规模机械化开采方式下的生态环境损害问题, 要以生态环境容量特别是水资源承载力为约束条件, 重点研究煤炭开采中的水资源运移特征与循环规律, 为实现从“被动恢复”向“主动保护”、从“重开采”向“重协调”的重大转变提供理论基础。

1.3　煤炭开采对生态环境损伤作用

煤炭开采导致生态环境变化的根源在于开采沉陷和岩土损伤。近年的研究已经认识到井工开采环境影响的传递过程是“基本顶破断—关键层断裂—地表主裂缝”, 继而导致水土流失和植被群落变化; 而露天煤矿环境影响更为直接, 主要是地表剥离引起植被移除和景观破坏, 露天矿开采还可能通过地下水变化、粉尘运移形成一定的扩散区域[19]。井工高强度开采以非连续、大变形损伤为主要特征, 对地表及附属物的影响较连续变形更为严重。开采导致的覆岩裂隙和地表裂缝改变了地下水资源系统的补、径、排关系, 造成地下水渗漏和水位下降, 并致使地表土壤持水保墒能力降低、植物根系拉伤等地表生态要素的损伤[20]。特别是在典型生态脆弱区进行浅埋煤层的大规模、高强度开采使得这一矛盾更加尖锐。因此要根据国家生态文明矿区建设的要求, 克服已有研究存在尺度单一、各生态子系统间互馈关系不清、采矿对生态的扰动机理不明、生态修复标准与评价体系不完善等的不足, 从多尺度 (特别是不同生态分区) 定量研究西部矿区煤炭开采生态损伤形成机理, 揭示煤炭开采影响生态系统结构和功能动态演化规律。

土壤环境是构成矿区生态系统的基本环境要素, 采煤塌陷对土壤环境的扰动主要体现在: 采煤导致采空区上方垂直入渗能力增强, 改变潜水补给条件和土壤表面蒸发能力, 最终影响土壤含水率[21]。而采煤塌陷后引起土体结构改变, 进而对土壤理化性质产生影响, 因此要进一步研究土壤水和土壤理化性质的变化

特征。作为西部生态脆弱环境的重要组成部分，植被生长与覆盖状况直接影响整个矿区的生态环境质量，植被恢复是区域生态恢复的重要前提和核心内容。中国矿业大学 (北京) 的研究人员长期观测了采煤塌陷抑制植物根系生长，破坏植物根际的生物活性特征，发现导致植物的死亡率增大，植被生长状况与地表破损率呈负相关关系，而干旱缺水和开采导致的伤根是制约植被修复的关键[22]。研究还发现，采煤扰动对植被会产生双重生态效应，即造成植物个体损伤、死亡和景观破碎，但同时又增加了植物的多样性。地裂缝的发育过程会使土壤产生开裂，周围生长的植物根系难以承受地裂缝引起的应力变化而产生破损，出现拉断、拉伤、扭曲、皮裂、抽离土壤等多种伤根方式，植物根系损伤会对植物生长和发育造成不利影响，降低植株生物量，扰乱植物根系内源激素水平，阻碍植物根系发育，降低植物营养吸收量。研究还发现，裂缝宽度、错位差、距裂缝远近是影响根系损伤程度的主要因素[23]。

1.4 井工和露天土地复垦及微生物修复机制

西部煤矿区气候干旱、土壤贫瘠、生物种群单一，煤炭开采致使矿区生态环境更加脆弱。因此，煤矿区生态修复或生态重建要从修复生态系统的功能和结构角度出发，综合考虑土壤生态系统的稳定性和可持续性，并需从本质上解决土壤生产力的恢复和生态群落的重建问题。笔者[24]研发了露天矿土壤重构、植被恢复和景观再塑关键技术，形成了能促进植物根系生长发育、抗拉伤作用、改土提质的微生物修复技术，较完善建立了集约化开采源头减损与地表生态修复一体化技术。但要从根本上研究其对沉陷区与排土场受损土地功能的修复作用与机理，还要利用微生物本身的活性来挖掘和激发土壤潜在肥力，协调干旱半干旱区土壤水肥供应，改善根系功能，刺激生物种群发育，突破原有土地复垦方法，为矿区沉陷地生态修复创造适宜的环境，保证生态系统的持续性和稳定性[25]。

随着研究的深入，越来越多的学者逐渐认识到自然修复和人工修复并不矛盾，2 种修复模式各有所长，适用范围不同。生态自我修复与人工治理都是促进人与自然和谐相处的重要手段[26]。在考虑煤矿区生态承载力较低的现实情况下，煤矿区生态可通过人工促进自然生态修复的方法，即以煤矿区生态自然修复中的植被分布、演替规律以及自然恢复能力评估等研究为基础，分区分类实施低人工扰动为特征的人工促进生态自然修复工程。研究发现：采动覆岩导水裂隙在其产生后的长期演变过程中，会发生导水渗流能力逐步降低的自修复现象，因此要依据西部典型煤矿区的具体煤炭赋存特点与地质开采条件，研究制定适合含水层快速恢复其生态功能的理论与方法[27]。

微生物是自然界较为活跃的一类有机体，与植物共生关系紧密的微生物有根瘤菌与丛枝菌根真菌，自然界中 80% 以上的有花植物都能被丛枝菌根真菌 (AMF) 侵染，应用丛枝菌根真菌等微生物技术能加快生土熟化，加速植被恢复，已成为培肥矿区土壤和修复矿区生态的一个重要技术途径[28]。AMF 通过根外菌丝在土壤中形成广泛的菌丝网络，能增加根系长度，改变根系形态，调节根系水力导度、影响根系水分吸收。丛枝菌根真菌的菌丝能够分泌产生一类糖蛋白即球囊霉素，菌丝壁和孢子的降解能够将球囊霉素释放到土壤中，从而球囊霉素被认为是丛枝菌根真菌与土壤环境相互作用的重要媒介物质[29]。采煤沉陷区土壤结构被扰动，丛枝菌根真菌如何改善土壤结构，协调水肥供应，是生态修复需要深入探讨的问题之一。毕银丽等[3]研究表明，丛枝菌根真菌的侵染也会使寄主植物的根系生物量、根长等发生变化，丛枝菌根形成共生体过程中根系分生组织活性受到抑制，增加了不定根和侧根的数量，改变植物根系形态，因而丛枝菌根真菌具修复伤根和水分利用调控等潜力。此外，深色有隔内生真菌 (DSE) 具有广泛的宿主适应性，可作为土壤微生物的重要组成部分，其发挥的生态学功能也引起了学者们广泛兴趣。DSE 刺激植物生长的内源激素水平、提高植物养分吸收能力，DSE 还具有纯培养优势，菌剂可以规模化生产，可为煤矿区大面积退化土地的快速修复提供充足微生物菌剂来源[30]。同时，土壤生物结皮作为一种生态修复新材料，位于土壤与大气之间致密的界面层，是保护干旱、半干旱地区生态环境的最后一道防线，能显著影响土壤和大气的碳交换和碳平衡，对土壤碳循环有着重要影响[31]。研究表明，由于土壤生物结皮如蓝藻、地衣、苔藓等均含有大量的叶绿素，一方面通过光合作用固定大气中的 CO_2，进而增加土壤碳储量；另一方面，土壤生物结皮在生长演替过程中伴随着分解分化、次生代谢物的产生 (如蛋白质、多糖等) 以及结皮自身的死亡腐解等，成为土壤有机碳的主要贡献者[32]。在煤矿区损伤地表应用土壤生物结皮进行生态修复，将成为煤炭企业实现碳达峰、碳中和目标的重要技术措施之一。

2 西部煤矿区生态环境损伤特征与修复机制新研究方向

通过上述对我国西部浅埋煤层高强度开采引起

的覆岩、裂隙、水资源、生态环境损伤特征及生态修复的国内外研究进展系统分析，发现煤炭开采全周期演变过程中，上覆土岩层、裂隙发育、水资源均呈现出自修复的特征和规律，裂缝发育过程正好作为生态修复楔入的最佳时机，加以人工适当修复干预，裂缝可以作为一种“松土”作用产生积极的正向效应，实现开采扰动过程与生态修复的有机耦合。

近年来生态修复技术和工程应用进展快，而机理研究相对滞后，急需从理论上探索煤炭开采过程地下岩层、上覆土层、水资源及生态环境的损伤演变机理及可持续生态自修复机制，以水承载力为约束，构建出生态脆弱煤矿区全周期覆岩–裂隙–水资源耦合损伤演变机制与成套生态修复理论，为西部煤炭资源开发与生态环境保护协调发展提供理论支撑。

2.1　研究思路

将西部煤矿区生态环境损伤特征与修复机制进行了逻辑梳理，在揭示覆岩损伤特征和裂隙发育规律的基础上，研究水资源与生态损伤的主控因素及生态演变的阈值，揭示出生态修复机制，从井工开采生态修复保水和露天开采生态重建涵水 2 方面揭示水–土–生耦合的修复机制，实现与自然协同的生态修复机制，技术路线如图 1 所示。

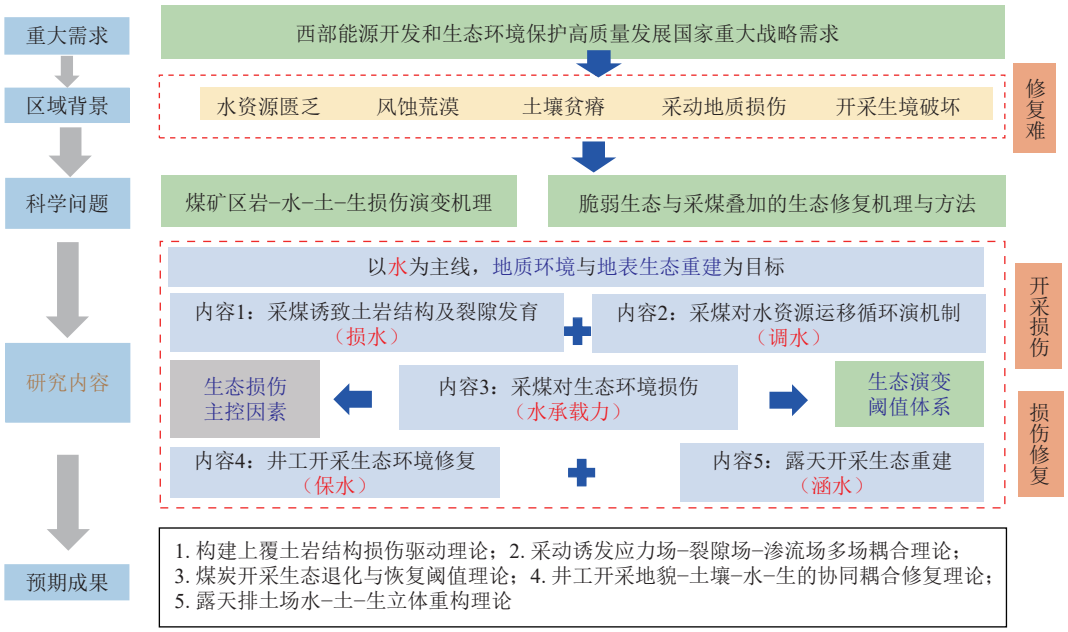

图 1　技术路线

Fig.1　Technology roadmap

2.2　重点研究内容

2.2.1　煤炭开采诱致土岩结构及裂隙动态发育规律

采用现场地质观测、探地雷达、三维地震与高密度电法等手段，揭示开采全周期受损土岩层结构的修复特征；通过土岩层裂隙的多源监测与模拟分析，揭示高强度开采过程中不同生态分区地表与土层裂隙“开张—扩展”动态发育和采后“收缩—闭合”自修复规律，探究不同生态分区土层介质采动响应特性和裂隙演化的主控因素与受控机制；分析采中和采后上覆土–岩层耦合非线性损伤动态演化主控因素，阐明上覆土岩层采动损伤受控机制，揭示上覆土岩结构受损自愈合机理，构建采后土岩层结构自修复力学模型。

2.2.2　煤炭开采对水资源运移循环演化影响机制

阐明开采后地下水补、径、排再平衡条件；研究煤炭开采全周期岩层裂隙场发育导致的渗流场变化规律，探索开采全周期覆岩裂隙贯通及裂隙场–渗流场耦合动态演化行为及定量关系模型，揭示不同采动应力路径作用下地下水“采前渗流、采中平流、采后湍流和稳定期平–渗流”的 4 个阶段全周期演变规律，研究采动条件下含水层水体散失和富集机理；分析开采全周期内地表水—地下水—矿井水循环的动态变化，建立不同储水空间水资源联合调度模型和煤炭生产全流程水资源产排循环预测模型，形成水资源多途径调用方法。

2.2.3　煤炭开采对生态环境损伤演变机理

解析煤炭开采条件–水文–植被耦合关系，分析煤炭开采与未开采、人工修复与自然恢复区的土壤水肥、植被生长发育、生态承载力演变规律；研究井工煤矿地表拉伸、压缩、均匀沉降区土壤水肥及植被空间分异特征，识别井工煤炭开采过程中生态损伤和采后生态演变 2 个阶段的主控因素，揭示沉陷区生态系统正向/逆向演变机理；分析露天煤矿剥采排复生产工艺及

其起尘滞尘对矿坑周边土壤和植被的影响程度与范围,揭示露天开采影响矿区生态系统正向/逆向演变机理;构建生态阈值体系,结合煤矿生态条件与开采参数,提出基于生态减损目标的煤炭开采优化方法。

2.2.4 煤炭井工开采生态环境修复机理与方法

针对不同生态分区井工开采的表土损伤与发育特征,研究煤炭开采过程中沉陷裂缝对不同类型 (草灌乔) 植物根系、土壤性状、生物种群分布格局的影响特征,探究微地形形态和规格发育对水−热−生分配的影响作用,明晰井工开采微地形的土地环境变异特征,揭示开采全周期受损生态自适应机制;研究不同植物−微生物组合缓解裂缝拉伤植物根系的调控修复机制,厘清微生物及其代谢物对土壤团聚结构、保水增容、养分动力学的作用过程,揭示沉陷裂缝区微生物伤根修复、改土提质、水分涵蓄的耦合作用机理,构建人工与自然和谐的井工煤矿生态修复理论与方法。

2.2.5 煤炭露天开采土层重构与生态重建机理与方法

针对不同生态分区露天开采的水资源与生态环境的损伤特征,研究露天开采全周期矿坑周边地质结构与包气带含水层的空间分布、地表水运移、生态因子的演变特征;研究海绵土层结构与微地形重构参数对水热盐动态运移的影响规律;分析微生物修复对植物根系提水、根区土壤孔隙及土壤团聚胶结结构的影响,阐明微生物及其代谢物的提质增容机理;厘清土层重构与植物−微生物重建生态的高效涵水与促生机理,系统研究排土场涵水控盐−表土提质增容−微生物植物立体配置的耦合作用,揭示微生物−植物生态重建的保水固沙改土促生机制,形成露天矿区土层重构与生态重建的理论与方法。

3 西部煤炭开发与生态修复相协调的新技术体系构建

(1) 构建起降水−凝结水−土壤水−地下水“四水”耦合的水资源循环与保护技术,尤其是保护浅层地下水。裂缝发育期是生态修复补水的最佳时机,能提高生态修复植被成活率。研究采煤驱动下降水−凝结水−土壤水−地下水“四水”的演变机制及其对生态系统的反馈作用,发现凝结水对构建干旱区采损生态系统自维持具有积极作用。建立起识别生态演变阈值方法,实现对生态水文从被动损伤—主动自适应恢复—自维持主导演替的有效干预。

(2) 创建出干旱煤矿区微生物−藻−草−灌−代谢物协调的立体修复技术体系,以微生物为楔点,研发出高效伤根修复方法,促进了人工与自然生态相协调的综合修复。通过研究矿 区受损土地功能的修复方法,寻找出利用微生物深色有隔内生真菌 (DSE) 菌剂与代谢物高效联合促进生根−抗拉伸−保水的协同修复技术。研制出系列代谢物土壤生物改良剂、便携式 DSE 菌剂及菌−藻组合修复剂,形成了优势灌−草−藻+微生物组配的生物修复技术。实施后增强了植物抗旱、寒、热逆境能力及土壤孔隙的连通性,使表土层增容涵水功能加强。

(3) 发明了西部露天排土场 3 层海绵结构固沙−改土−保水生态重建技术,通过微生物促根系发育吸水与提质耦合,促进了矿区从荒漠向绿洲的正向转变与持续生长。在 3 层结构中,采用表土层接菌方法刺激植物根系伸长发育到下层 1 m 涵水层吸收更多水分,提高了植物成活率,改善土壤团聚体结构,增大根土复合体黏聚力和根系纤维素总量,提高了土体抗剪切力,增强排土场边坡稳定性,实现了固沙−改土−保水的生态重建内在机理。

4 结 语

干旱半干旱区生态环境脆弱,煤炭开采造成的生态损伤极难恢复,国内外没有成功修复的范例。因此在我国煤炭产能向西转移初期便受到严重质疑,担心大规模煤炭开采对该地区生态造成雪上加霜的效应,本文提出了开采生态损伤与生态自修复协调的新契机,将开采过程产生的裂缝发育抽象为农田松土作用,通过采矿导致水−土−生再分配时机,利用微生物修复技术,促进生态因子协同发展,践行了西部脆弱生态区再造“绿水青山”的思维新转变。

参考文献(References):

[1] 彭苏萍. 黄河流域高质量发展亟须重视煤矿区生态修复[N]. 中国科学报, 2020−09−07.
PENG Suping. High quality development in the Yellow River Basin urgently requires attention to ecological restoration in coal mining areas [N]. China Science Daily, 2020−09−07.

[2] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术及战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211−1221.
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211−1221.

[3] 毕银丽, 彭苏萍, 王淑惠. 西部煤矿区深色有隔内生真菌修复机理与生态应用模式[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 460−469.
BI Yinli, PENG Suping, WANG Shuhui. Restoration mechanism and ecological application model of dark septate endophytic fungi in western mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1):

460−469.

[4] XU Xianlei, PENG Suping, YANG Feng. Development of a ground penetrating radar system for large-depth disaster detection in coal mine[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 158: 41−47.

[5] XIANG Yang, PENG Suping, DU Wenfeng. Trends and frontiers in coal mine groundwater research: Insights from bibliometric analysis [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, 10: 1100068.

[6] XIANG Yang, PENG Suping. Changes in well water level and rock damage zones in a shallow aquifer before and after local earthquakes[J]. Hydrogeology Journal, 2023, 31(7): 1937−1951.

[7] 张华兴, 张刚艳, 许延春. 覆岩破坏裂缝探测技术的新进展[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(9): 60−62, 56.
ZHANG Huaxing, ZHANG Gangyan, XU Yanchun. New development on probing and measuring technology for failed cracking of overburden rock[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(9): 60−62,56.

[8] 路军, 许家林, 王露, 等. 断层采动活化对导水裂隙带高度影响的模拟实验研究[J]. 中国煤炭, 2012, 38(1): 36−40.
LU Jun, XU Jialin, WANG Lu, et al. Physical simulation of height of water-flowing fractured zone influenced by fault activation after coal extraction[J]. China Coal, 2012, 38(1): 36−40.

[9] 许家林, 王晓振, 刘文涛, 等. 覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 380−385.
XU Jialin, WANG Xiaozhen, LIU Wentao, et al. Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 380−385.

[10] 来兴平, 张旭东, 单鹏飞, 等. 厚松散层下三软煤层开采覆岩导水裂隙发育规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1739−1750.
LAI Xingping, ZHANG Xudong, SHAN Pengfei, et al. Study on development law of water-conducting fractures in overlying strata of three soft coal seam mining under thick loose layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1739−1750.

[11] 王朋飞, 牛一帆, 陈可夯, 等. 浅埋薄表土层特厚煤层强制放顶条件下主要地裂缝演化规律实测研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(10): 3674−3687.
WANG Pengfei, NIU Yifan, CHEN Kehang, et al. Field survey on the evolution of main ground cracks under condition of forced hard roof caving in mining ultra-thick coal seams under shallow overburden[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(10): 3674−3687.

[12] 侯恩科, 谢晓深, 冯栋, 等. 浅埋煤层开采地面塌陷裂缝规律及防治方法[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 30−40.
HOU Enke, XIE Xiaoshen, FENG Dong, et al. Laws and prevention methods of ground cracks in shallow coal seam mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(12): 30−40.

[13] 钱鸣高, 许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 973−984.
QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 973−984.

[14] 顾大钊, 张勇, 曹志国. 我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 1−7.
GU Dazhao, ZHANG Yong, CAO Zhiguo. Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 1−7.

[15] LIU Shiliang, LI Wenping. Zoning and management of phreatic water resource conservation impacted by underground coal mining: A case study in arid and semiarid areas[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 224: 677−685.

[16] CHI Mingbo, ZHANG Dongsheng, ZHAO Qiang, et al. Determining the scale of coal mining in an ecologically fragile mining area under the constraint of water resources carrying capacity[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 279: 111621.

[17] DU Wenfeng, CHEN Lei, HE Yunlan, et al. Spatial and temporal distribution of groundwater in open-pit coal mining: A case study from Baorixile Coal Mine, Hailaer Basin, China[J]. Geofluids, 2022: 8753217.

[18] PENG Suping, FENG Feisheng, DU Wenfeng, et al. Analysis of water chemical characteristics and application around large opencast coal mines in grassland: A case study of the North Power Shengli coal mine[J]. Desalination and Water Treatment, 2019, 141: 149−162.

[19] WU Zhenhua, LEI Shaogang, YAN Qingwu, et al. Landscape ecological network construction controlling surface coal mining effect on landscape ecology: A case study of a mining city in semi-arid steppe[J]. Ecological Indicators, 2021, 133: 108403.

[20] 王常建, 徐祝贺, 赵伟, 等. 浅埋高强度开采矿区生态损伤特征与减损实践[J]. 煤炭工程, 2022, 54(4): 176−181.
WANG Changjian, XU Zhuhe, ZHAO Wei, et al. Ecological damage characteristics and alleviation in shallow-buried high-intensity mining area[J]. Coal Engineering, 2022, 54(4): 176−181.

[21] 毕银丽, 刘京, 尚建选, 等. 陕北采煤沉陷区土壤水分入渗和蒸发特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(5): 839−849, 862.
BI Yinli, LIU Jing, SHANG Jianxuan, et al. Study on the characteristics of soil moisture infiltration and evaporation in the coal mining subsidence area of coal mines in northern Shaanxi[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(5): 839−849,862.

[22] 于瑞雪, 李少朋, 毕银丽, 等. 煤炭开采对沙蒿根系生长的影响及其自修复能力[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(2): 110−113.
YU Ruixue, LI Shaopeng, BI Yinli, et al. Effect of coal mining on root growth of artemisia sphaerocephala and its self-repairing ability[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(2): 110−113.

[23] 毕银丽, 孙江涛, 王建文, 等. AM 真菌对采煤沉陷区黄花菜生长及根际土壤养分的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5315−5321.
BI Yinli, SUN Jiangtao, WANG Jianwen, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on daylily growth and soil fertility in a coal mining subsidence area of northern Shaanxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5315−5321.

[24] 毕银丽, 彭苏萍. 一种露天矿排土场生态再造模型与应用: CN112982449B[P]. 2022−06−07.

[25] 毕银丽. 西部干旱半干旱煤矿区微生物修复机理与应用研究[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(1): 2.
BI Yinli. Mechanism of mrior-rediation and its aplcaion in arid and semi-arid coal mining aras of Western China[J]. Journal of Xi'an

University of Science and Technology, 2021, 41(1): 2.

[26] 刘震. 以人与自然和谐相处的理念为指导正确把握人工治理与生态自我修复的关系[J]. 中国水土保持, 2004, 8(1): 1−3.
LIU Zhen. Guided by the concept of harmonious coexistence between humans and nature, correctly grasping the relationship between artificial governance and ecological self-restoration[J]. Soil and Water Conservation in China, 2004, 8(1): 1−3.

[27] 刘伟, 尹勤瑞, 刘祥宏. 煤矿区生态自然修复及其人工促进模式探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(4): 110−124.
LIU Wei, YIN Qinrui, LIU Xianghong. Ecological natural restoration and its artificial promotion mode in coal mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(4): 110−124.

[28] BI Yinli, WANG Kun, WANG Jin. Effect of different inoculation treatments on AM fungal communities and the sustainability of soil remediation in Daliuta coal mining subsidence area in northwest China[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 132: 107−113.

[29] LAW S M, MAHERALI H. Variation in glomalin-related soil protein and plant growth response to arbuscular mycorrhizal fungi along a nutrient gradient in temperate grasslands[J]. Plant and Soil, 2023, 487(1−2): 623−637.

[30] BI Yinli , WANG Shuhui, SONG Yaning, et al. Effects of a dark septate endophyte and extracellular metabolites on alfalfa root exudates: A non-targeted metabolomics analysis[J]. Physiologia Plantarum, 2024: e14165.

[31] RAJEEV L, DA Rocha UN, KLITGORD N, et al. Dynamic cyanobacterial response to hydration and dehydration in a desert biological soil crust[J]. The ISME Journal, 2013, 7(11): 2178−2191.

[32] 毕银丽, 郭芸, 刘峰, 等. 西部煤矿区生物土壤结皮的生态修复作用及其碳中和贡献[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2883−2895.
BI Yinli, GUO Yun, LIU Feng, et al. Ecological restoration effect and carbon neutrality contribution of biological soil crusts in western mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2883−2895.