“双碳”目标导向下露天煤矿地质灾害防治与生态修复研究进展及转型路径*

李学良[1,2]，李凤明[2,3]，王峰[1]，徐荣强[4]，任慧君[3,5]，桑盛[3,5]

（1.北京天玛智控科技股份有限公司， 北京 101399；
2.煤炭科学研究总院， 北京 100013；
3.中煤科工生态环境科技有限公司， 北京 100028；
4.自然资源部信息中心， 北京 100020；
5.露天煤矿灾害防治与生态保护全国重点实验室， 北京 100028）

摘要：“双碳”目标对露天煤矿可持续发展提出了低碳转型与生态保护的双重要求，地质灾害防治与矿区生态修复作为其核心议题需适应新的发展需求。针对“双碳”目标下露天煤矿面临的能源保障与低碳发展的矛盾，系统探讨了地质灾害防治与生态修复的研究进展。地质灾害防治领域，分析了低碳导向下传统灾害特征演变与新型灾害涌现规律，梳理了节能型监测技术、碳足迹导向预警模型及绿色支护技术的应用成果；生态修复方面，总结了植被-土壤系统碳汇功能研究、低碳化生态修复技术及碳汇评价方法的发展现状。在此基础上，进一步剖析了当前存在的技术瓶颈（传统技术与低碳目标的冲突、碳汇效能与工程稳定性协同困难、技术集成不足等）、管理机制缺失（跨部门政策壁垒、主体权责模糊、区域协同空白等）及政策支撑不足（政策体系分散、标准衔接存在断层、激励约束机制欠缺等）等问题。最后，展望了技术（构建低碳协同技术体系）、管理（建立碳导向协同机制）与政策（完善低碳支撑保障体系）三大转型路径，为露天煤矿实现“防灾害-促修复-增碳汇”协同发展提供理论参考。

关键词：“双碳”目标；露天煤矿；地质灾害防治；生态修复；低碳转型；碳汇；协同机制

中图分类号：TD167 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)08-0225-12

Research Progress and Transformation Path of Geological Disaster Prevention and Ecological Restoration in Open-Pit Coal Mine Under the Guidance of “Double Carbon” Goal

Li Xueliang[1,2], *Li Fengming*[2,3], *Wang Feng*[1], *Xu Rongqiang*[4], *Ren Huijun*[3,5], *Sang Sheng*[3,5]

(1.Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China;
2.China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
3.CCTEG Ecological Environment Technology Co., Ltd., Beijing 100028, China;
4.Information Center of Ministry of Natural Resources, Beijing 100020, China;
5.State Key Laboratory of Disaster Prevention and Ecology Protection in Open-Pit Coal Mines, Beijing 100028, China)

Abstract: The “double carbon” goal puts forward the dual requirements of low-carbon transformation and ecological protection for the sustainable development of open-pit coal mines. Geological disaster prevention and mining area ecological restoration as its core issues need to adapt to new development needs. In view of the contradiction between energy security and low-carbon development faced by open-pit coal mines under the goal of “double carbon”, the research progress of geological disaster prevention and ecological restoration was systematically discussed. In the field of geological disaster prevention, the evolution of traditional disaster characteristics and the emergence of new disasters under low-carbon orientation were analyzed, and the application results of energy-saving monitoring technology, carbon footprint-oriented early warning model and green support technology were sorted out. In terms of ecological restoration, the development status of carbon sink function research, low-

* **收稿日期**：2025-09-10

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFF1306004）；天玛智控自立项目（2024-TM-014-J1）；中国煤炭科工集团有限公司重点项目（2019-2-ZD004）

作者简介：李学良（1985—），男，河北乐亭人，博士（后），副研究员，主要从事开采沉陷与边坡工程等方面的研究工作。E-mail：371986152@163.com

carbon ecological restoration technology and carbon sink evaluation method of vegetation-soil system were summarized. On this basis, the existing problems such as technical bottlenecks (conflict between traditional technology and low-carbon goals, difficulty in collaborative carbon sink efficiency and engineering stability, insufficient technology integration, etc.), lack of management mechanism (cross departmental policy barriers, ambiguous rights and responsibilities of stakeholders, lack of regional collaborative, etc.) and insufficient policy support (fragmented policy system, disconnection in standard coordination, imperfect incentive and restraint mechanisms, etc.) were further analyzed. Finally, the three transformation paths of technology (building a low-carbon collaborative technology system), management (establishing a carbon-oriented collaborative mechanism) and policy (improving the low-carbon support and guarantee system) were prospected, which provides a theoretical reference for the collaborative development of "disaster prevention-promoting restoration-carbon sink" in open-pit coal mines.

Key words: "Double Carbon" goal, Open-pit coal mine, Geological disaster prevention, Ecological restoration, Low-carbon transformation, Carbon sink, Collaborative mechanism

0 引言

"碳达峰、碳中和"目标于2020年9月提出,该目标的提出体现了我国基于推动构建人类命运共同体的责任担当,也是全面实现可持续发展的必备条件,在我国能源结构调整、产业升级和生态环境保护等方面具有全局性、战略性意义[1-2]。露天煤矿作为我国煤炭生产的重要组成部分,在能源转型期承担着保障能源安全的过渡性角色。据统计,我国露天煤矿产量占煤炭总产量的比例长期维持在15%~20%,在部分能源基地这一比例甚至达到30%以上。有关数据显示,2023年我国露天煤矿原煤产量达11.8亿t,约占当年煤炭总产量的25%,主要集中在新疆、内蒙古、山西等地。然而,露天开采作为矿产资源开发的重要方式,涉及大规模土方开挖、物料运输等作业环节,碳排放问题较为突出。在"双碳"目标下,露天煤矿正面临着能源低碳化转型与生态环境保护的双重压力,其传统高耗能、高排放的发展模式已难以适应新的发展要求[3-4]。露天开采的低碳措施需结合矿山的资源条件、技术水平和区域能源结构综合实施,其核心逻辑是"源头减量-过程优化-末端抵消"。

地质灾害防治与矿区生态修复是露天煤矿可持续发展的两大核心议题,在"双碳"目标下被赋予了新的内涵与使命。地质灾害防治是保障露天煤矿安全生产、稳定能源供应的基础,只有有效防范边坡滑坡、地面塌陷等灾害,消除危及生命财产安全的隐患,才能确保煤炭资源的有序开采,为结构转型提供稳定的能源支撑[5]。而矿区生态修复不仅是改善矿区生态环境的关键举措,更是实现固碳增汇、优化区域生态碳循环的重要途径[6]。有研究表明,矿区生态修复后植被覆盖率每提升10%,区域碳汇能力可增加5%~8%,对推动所在区域的碳中和具有积极意义。当前,在露天煤矿地质灾害防治与矿区生态修复的评价、治理、监测等方面已取得了诸多研究成果,一定程度上可为露天煤矿山"双碳"目标的顺利实现提供技术支撑。

本研究旨在系统梳理"双碳"目标下露天煤矿地质灾害防治与矿区生态修复的研究进展,深入剖析当前研究中存在的热点问题与技术瓶颈,探索适配低碳发展要求的转型路径;通过对现有成果的总结与反思,为露天煤矿地质灾害防治与矿区生态修复技术创新、管理优化和政策制定提供理论参考,助力露天煤矿实现绿色低碳转型,为我国"双碳"目标的顺利达成贡献力量。

1 "双碳"目标下露天煤矿地质灾害防治研究进展

1.1 低碳导向的地质灾害类型演变与特征

在"双碳"目标推动能源结构调整的大背景下,露天煤矿开采工艺已逐步向绿色化、低碳化转型,由此导致传统地质灾害也呈现出新的特征,同时一些相对较为典型的新型潜在灾害也逐渐显现。

(1) 传统灾害的低碳防控需求发生显著变化。

非爆破开采技术作为低碳开采体系的核心技术之一,通过机械破碎、静态膨胀等方式替代传统炸药爆破,不仅从源头上削减了爆破作业产生的碳排放量,还降低了对周边生态环境的振动与噪声污染。然而,这种"温和"的岩体扰动方式与爆破开采形成了显著差异:爆破开采通过瞬间冲击使岩体产生脆性破坏,应力释放集中且剧烈,边坡岩体在短时间内

完成主要变形;而非爆破开采则以持续、缓慢的机械力作用于岩体,导致边坡内部应力传递路径更复杂,岩体裂隙的发育呈现渐进式扩展特征,进而使边坡岩体的应力分布呈现多区域不均衡状态,变形规律也从"爆发式突变"转向"累积式缓变"[7-9]。采用非爆破开采后,边坡的变形呈现出"低速率、长周期"的特征。这对边坡长期稳定性构成了新的挑战:一方面,传统的以短期变形速率为核心的稳定性评估模型不再适用,需要建立涵盖岩体蠕变特性、应力松弛效应的长期监测体系;另一方面,缓慢变形过程中,边坡表面可能出现隐蔽性裂隙,这些裂隙在雨水渗透等外部因素的影响下,可能导致边坡突发滑动,增加了灾害预警的难度。因此,非爆破开采下的滑坡防控,需在低碳效益与安全保障之间建立新的平衡,通过引入三维激光扫描、微震监测等智能化技术,实现对边坡变形的全周期动态追踪,才能有效应对这种新型灾害演化特征带来的风险。

地面塌陷的防控也因低碳要求而面临新的需求,为响应"双碳"目标、降低开采全过程的能源消耗与碳排放,部分露天煤矿通过优化开采布局(如缩短物料运输距离、减少无效剥离作业、统筹伴生资源协同开采等)来提升能效,这一过程使得开采区的空间分布更趋分散、形态更复杂[10]。例如部分矿山为适配新能源设备作业半径、平衡剥离与回采的能耗配比,可能采用非连续式开采或动态调整采场边界,导致开采区与未采区域的衔接更不规则,不同区域的应力分布也更难预判。这种复杂性直接增大了地面塌陷预测的难度:传统基于规整采空区模型的沉降规律推算不再适用,需结合实时监测数据动态修正预测参数;同时,低碳措施中引入的智能化设备(如无人驾驶运输系统)对地表稳定性的要求更高,也倒逼塌陷预测精度需进一步提升,以避免因塌陷风险误判导致的设备停运或安全事故,最终实现低碳效益与安全防控的协同推进。

露天煤矿开采工艺成套装备及系统谱系的演化情况[11]如图 1 所示。

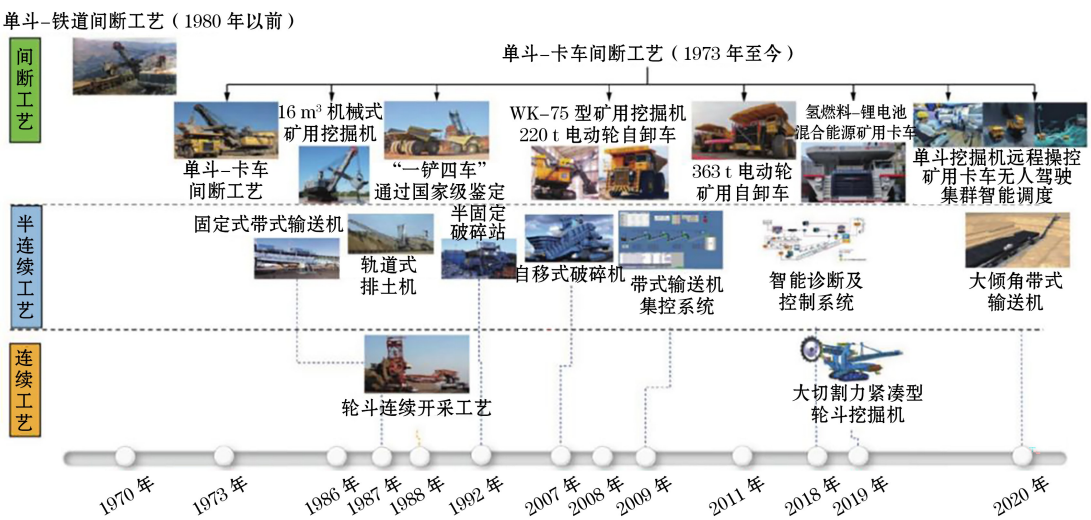


图 1 露天煤矿开采工艺成套装备及系统谱系演化

Fig.1 Evolution of complete equipment and system pedigree for open-pit coal mining technology

(2) 典型潜在灾害与碳排放的关联日益紧密。

煤层自燃既是露天煤矿长期面临的顽固性隐患,更是矿区碳排放不可忽视的隐形源头。煤层因剥离作业暴露于空气后,其含有的硫化物等与氧气发生氧化反应,在散热条件不佳时极易引发自燃,这一过程在吞噬大量资源的同时,产生了惊人的碳排放。研究数据显示,典型自燃煤层每吨燃烧约释放 2.2~2.6 t 的 CO_2,同时伴随 CO、CH_4 等温室气体排放,相当于直接将煤炭资源转化为"碳污染源"[12-13]。自燃的危害存在双重性:一方面,自燃形成的高温火区会破坏边坡稳定性,可能诱发滑坡、坍塌等次生灾害,威胁开采人员与设备安全;另一方面,长期持续的自燃会导致煤炭资源大量损耗,据统计,部分高硫露天煤矿因自燃造成的资源损失率可达 5%~10%,相当于每年有数百万吨的煤炭在"无为消耗"中加剧气候变暖。此外,露天矿的大面积煤层露头与采空区残留煤体,为自燃提供了广阔的"温床",尤其是在干旱少雨、通风不畅的矿区,自燃火区可能潜伏数月甚至数年,形成"点多面广、反复复燃"的现象,而且治理难题,使其成为矿区实现"碳减排"

目标的顽固障碍。

此外,露天煤矿排土场长期堆积引发的滑坡、泥石流等灾害与碳排放存在相互作用机制[14-15]。排土场中的煤矸石等废弃物在堆积过程中发生氧化反应,释放 CO_2,同时废弃物堆积改变了边坡的力学性质,增加了滑坡、泥石流的发生风险。而当滑坡或泥石流发生时,原本深埋的未氧化废弃物被翻涌至地表,与空气充分接触后加速氧化,形成"灾害发生-碳排放激增"的次生效应,进一步加剧温室效应。

1.2 低碳化监测与预警技术发展

节能型监测技术在露天煤矿地质灾害监测中的应用取得显著进展[16-18],主要体现在以下 3 个方面。

太阳能供电系统。该系统凭借节能、环保的优势,在露天煤矿边坡 GNSS 监测中得到广泛应用。采用太阳能电池板供能,摆脱了传统监测系统对电网的依赖,降低了能耗。据了解,应用太阳能供电后,监测设备的能耗较传统电网供电系统降低了 60%以上,且监测数据的连续性和稳定性得到有效保障。

低功耗物联网传感器。近年来,其研发与应用取得重大突破,这类传感器具有体积小、功耗低、成本低等特点,通过在排土场、采场边坡等区域布设气体、位移、能耗等多种传感器,实时捕捉 CO_2 等温室气体浓度、边坡变形、设备能耗等数据,不仅降低了监测成本与能耗,更实现了生产安全、环境保护与碳减排的协同管控,为矿山的可持续发展注入了技术动能。

碳足迹导向预警模型。该技术的研究尚处于初步探索阶段。融合碳排放因子的地质灾害风险评价模型将灾害防治工程的碳排放量纳入预警决策体系,以实现灾害风险与碳排放的协同考量。如在边坡稳定性评价模型中,将边坡支护工程的碳排放因子作为重要评价指标,通过对比不同支护方案的安全系数和碳排放量,优选出低碳高效的支护方案,可使边坡支护工程在减少碳排放的同时,保证边坡的稳定性。

此外,基于碳排放监测的地质灾害预警方法仍处于研究阶段,通过监测矿区碳排放浓度的变化,可实现提前预警煤层自燃、排土场滑坡等灾害的目的。

1.3 低碳防治工程技术创新

露天煤矿地质灾害治理过程中的低碳措施,核心在于通过技术创新与生态协同实现"降碳"与"防控"的双重目标,主要涵盖以下几个方面。

以新型材料替代传统高碳材料。绿色支护材料在边坡加固中的研究与实践取得积极成果[19-20],环保型锚杆采用可降解材料或回收的材料制造,降低了材料生产过程中的碳排放,环保型锚杆生产过程中的碳排放较传统钢锚杆降低近 40%,且其力学性能满足边坡支护要求。低碳混凝土通过掺加工业废渣、优化配合比等方式,减少了水泥用量,降低了碳排放,采用低碳混凝土浇筑的挡墙,其碳排放较传统混凝土挡墙降低近 25%,且结构强度和耐久性未受影响。

兼具灾害防治与碳汇功能的生态化防治技术。植被固坡技术通过种植具有深根系的植物,增强了边坡的抗剪强度,同时植物生长过程中吸收 CO_2,实现了固碳增汇[21]。生物帷幕技术利用微生物的代谢作用来改善岩体性质,提高了边坡稳定性,同时微生物在代谢过程中固定部分碳元素,应用生物帷幕技术的边坡,碳排放较传统支护方式降低约 10%,边坡稳定性显著提高。

2 "双碳"目标下露天煤矿生态修复研究进展

2.1 生态修复的碳汇功能研究

生态修复是通过植被恢复、土壤改良等措施增加生态系统碳储量、提升固碳能力的过程,是增强碳汇的重要途径。自 2023 年起,国家相关部委、行业学会等陆续颁布了《矿山生态环境修复工程技术规范》(T/CSOTE 0003—2023)、《矿山生态修复工程验收规范》(TD/T 1092—2024)、《矿山生态修复工程实施方案编制导则》(TD/T 1093—2024)等关键标准及配套政策,为各地开展生态修复工作提供依据,推动了矿区生态修复从"经验化"向"科学化、标准化"转型。

露天煤矿生态修复的碳汇功能,主要是通过系统性重塑地表生态系统,在植被恢复、土壤有机碳提升等过程中,借助光合作用、土壤碳封存与生态系统碳循环,实现碳的高效捕获与长期储存。研究表明,选择光合效率高、生长周期长的植被类型可提高碳汇功能。此外,植被恢复的固碳效应因植被重建模式不同而存在差异[22]。当前,研究者们正在不断探索更优的植被重建模式,旨在使露天煤矿植被恢复的固碳效应最大化,为矿区生态修复与碳汇提升提供科学依据。

矿山生态系统碳循环过程[23]如图 2 所示。

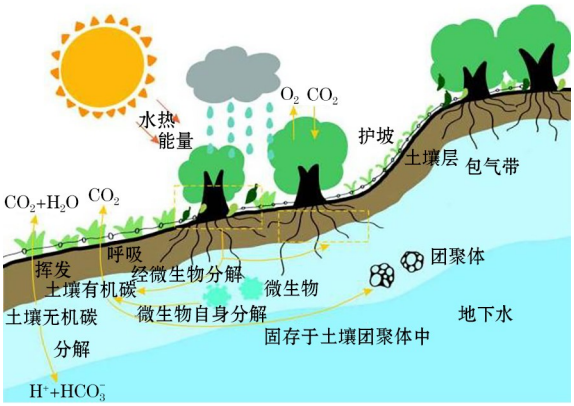


图 2 矿山生态系统碳循环过程

Fig.2 Carbon cycle process of mining ecosystem

在露天煤矿生态修复碳汇研究中,土壤碳库修复技术对提升土壤有机碳含量效果显著,其技术路径贴合矿区土壤贫瘠、压实等特点。有机肥施用可补充碳源,促进团粒结构形成,如内蒙古准格尔旗露天矿连续 3 a 亩施 2 t 腐熟秸秆,0～20 cm 土壤有机碳从 1.2%升至 1.8%,还能激活微生物,形成正向循环。微生物改良技术通过接种功能菌群优化碳循环,如山西平朔露天矿接种复合菌群 6 个月后,易分解有机碳提升 30%,稳定有机碳占比提升 5%,还能降解煤矸石有机碎屑。土壤碳库恢复有"双向调节"作用,每公顷土壤有机碳提升 1%可固存 15 t 的 CO_2,且能减少 40%以上碳流失,与植被碳汇协同可提升矿区整体碳汇能力 20%～30%。当前,广大学者正聚焦"植被-微生物-土壤"协同模式的探索,以构建更稳定的碳汇系统。

在露天煤矿生态修复的碳汇体系中,除植被光合固碳与土壤有机碳封存外,借助地质或化学作用实现的矿区碳封存技术,因能长期稳定储存碳元素、进一步提升碳汇总量,已成为"双碳"目标下广大学者关注的新方向。当前国内外学者已对此展开深入探索并取得多项成果[24-28],如:Sandra S 等[24]研究发现,借助矿山中玄武岩的碳酸化反应可有效实现 CO_2 的固化与封存,且室内试验表明该途径具有更优的成本效益;Safaei-Farouji M 等[25]以智利废弃煤矿为研究对象开展吸附试验,结果显示,低品位煤层中的 CO_2 原位封存,是实现 CO_2 地质封存的潜在选项;Pan S Y 等[26]则指出,碱性固体废弃物能够有效加速 CO_2 的碳酸化进程,从而助力 CO_2 的有效固化与封存。

2.2 低碳化生态修复技术体系

在露天煤矿低碳化生态修复技术体系中,节能型修复工艺与循环经济模式下的修复路径,为土壤碳库修复提供了更高效、可持续的实现方式,进一步强化了碳汇效果与生态效益的协同[29-30]。

节能型修复工艺通过优化施工环节与能源消耗,在提升土壤碳库修复效率的同时降低碳排放,可实现"降碳"与"增汇"的同步推进。传统方式的土壤改良常依赖重型机械翻耕,能耗高且易加剧土壤压实,而节能型工艺采用"低扰动"技术路径,如采用无人机精准播撒有机肥与微生物制剂,较人工撒施可减少约 30%的运输能耗,且播撒均匀度提升至 90%以上,避免了肥料浪费;在土壤疏松环节,推广液压式浅耕设备,其单位面积能耗较传统推土机降低约 50%,同时减少对土壤团粒结构的破坏,保护新生的有机碳封存环境。

循环经济模式下的修复路径是通过资源循环利用,构建"废弃物-碳源-土壤养分"的闭环系统。露天矿产生的煤矸石、剥离土等,经处理后可作为土壤修复的核心材料,如煤矸石经破碎筛分后,与生物质炭按一定比例混合,既可作为土壤骨架改善土体透气性,其所含有机质还可缓慢释放碳源。山西平朔露天矿应用数据显示,这种混合基质使土壤有机碳年增速提升 15%;剥离表土中富含的本土微生物群落,经富集培养后制成菌剂回用于土壤,较外购商业菌剂减少 60%的运输成本与生产碳排放,且更适应矿区土壤环境,微生物存活率提升 25%。此外,矿区植被修复产生的枯枝落叶经粉碎、腐熟处理后,可制成有机肥还田,每年可减少外部有机肥投入量 30%,形成"植被固碳-凋落物还田-土壤储碳"的内部碳循环,碳利用效率提升 20%。

上述两种方法融合应用,既放大了土壤碳库修复的低碳价值,又推动露天煤矿生态修复从"外部输入依赖型"转向"内部循环增效型"。目前,该领域正在探索将太阳能智能灌溉系统与循环基质技术相结合,为极端气候区露天煤矿低碳修复提供新方案。

2.3 典型露天煤矿低碳转型案例实践

为进一步验证"双碳"目标下露天煤矿低碳化生态修复技术的应用效果,选取 2 个具有代表性的矿区案例,剖析其在"地灾防治-生态修复-碳汇提升"协同推进中的具体路径与成效,为同类矿区提供经验。

(1) 内蒙古准格尔旗黑岱沟露天煤矿。

作为我国西北干旱半干旱区露天煤矿生态修复标杆,黑岱沟露天煤矿针对排土场土壤贫瘠、碳汇基础薄弱问题,采用了“循环基质改良+功能型植被配置”的低碳修复路径。具体包括:将煤矸石破碎筛分后与生物质炭按 3∶1 的比例混合,作为土壤改良基质,既消纳固废,又为土壤补充碳源,使土壤有机碳含量显著提升;采用“苜蓿(草本)+沙棘(灌木)”的固碳型植被组合,苜蓿固氮能力强,可改善土壤肥力,沙棘依靠深根系增强边坡稳定性,两者搭配实现年均每公顷固碳 13.2 t,碳汇量较单一乔木种植提升 40%。此外,该矿将修复区植被枯枝落叶粉碎腐熟后还田,形成“植被固碳-凋落物还田-土壤储碳”的内部碳循环,每年减少外部有机肥输入量 35%,降低修复过程碳排放。

(2) 山西平朔安太堡露天煤矿。

平朔安太堡露天煤矿聚焦“地灾防治与碳汇协同”,构建了“边坡安全-碳汇动态”双监测体系。在技术应用上,部署太阳能供电的物联网传感器网络,实时监测边坡位移与土壤碳通量,数据通过 5G 网络传输至数字孪生平台,实现“滑坡风险预警-碳汇损失预判”联动;在碳汇修复上,采用“剥离表土微生物富集+无人机精准播撒”技术,将矿区本土微生物培养后制备成菌剂,通过无人机播撒至修复区,土壤易分解有机碳含量 6 个月内增长 32%,微生物存活率较外购菌剂提升 28%,运输环节碳排放同步减少 60%。截至 2024 年,该矿修复区累计碳汇量达 12 万 t,且未发生边坡地质灾害,形成了“监测-修复-评价”闭环模式。

2.4 修复效果的碳汇评价方法

在“双碳”目标驱动下,露天煤矿生态修复效果的碳汇评价方法研究持续深入,已形成多维度发展态势,旨在量化修复成效,为优化低碳修复策略提供依据。

早期评价依赖静态单一指标,仅通过植被生物量估算碳储量,目前已转向整合多源数据的动态体系[31]。遥感技术是重要手段,依据 Landsat 系列卫星数据,并结合归一化植被指数(NDVI),可快速估算大面积植被碳汇量,精度较传统地面抽样提升 20%~30%;无人机搭载多光谱相机,能精细化测绘矿区局部植被,获取详细参数,使小区域碳汇评估精度超 90%。

生物量和碳储量修复效果评估流程如图 3 所示。

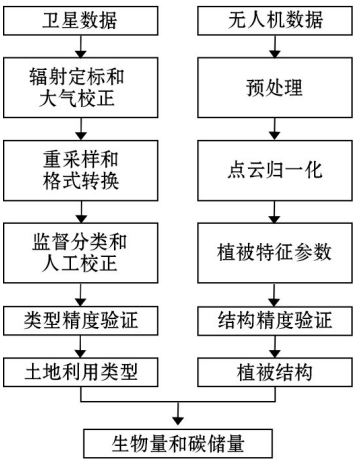


图 3 修复效果评估技术流程

Fig.3 Technical process for repair effect evaluation

土壤碳库评价方法不断完善。传统的土壤采样仅反映局部瞬时碳含量,现结合土壤呼吸监测系统,可实时捕捉有机碳矿化及碳排放动态。如山西平朔露天矿通过埋设长期碳通量监测仪,发现夏季土壤碳释放速率为冬季的 5~8 倍,为把握碳汇关键期提供依据。此外,稳定性同位素技术可追踪碳来源与周转过程,揭示不同修复措施下有机碳的转化路径与固存时长,推动碳汇评估由单一“存量”考量转向“流量+存量”综合评估。

生态系统层面评价方法不断创新。如白音华露天煤矿排土场碳汇造林项目构建了“植被-土壤-微生物”耦合碳循环模型,该模型引入多类过程参数模拟碳收支,预测 30 a 计入期内减排 2.2 万 t 的 CO_2 当量,与实际监测结果误差≤10%,验证了模型可靠性。生态足迹分析方法在露天煤矿生态修复碳汇评价方面的应用也日益深化,其可以考量修复活动的碳排放,全面衡量生态效益,为方案可持续性提供量化依据。

当前评价方法面临矿区本底差异大、普适标准不完善、部分新技术稳定性不足等挑战,未来将聚焦多尺度多要素标准化体系建设,结合人工智能优化算法,提升评价效能,挖掘碳汇潜力[32-33]。

3 “双碳”目标下的现存问题与矛盾分析

3.1 技术层面的低碳转型瓶颈

“双碳”目标下,露天煤矿地质灾害防治与生态

修复的技术体系存在多重瓶颈,一定程度上严重阻碍低碳化修复的顺利推进。

地质灾害防治领域,传统技术与低碳目标矛盾突出。边坡稳定性治理依赖高能耗工程措施,像大规模爆破削坡、混凝土挡墙浇筑等,碳排放强度高,每立方米混凝土生产约排放 0.8 t 的 CO_2,还会破坏植被,削弱碳汇潜力。灾害监测技术低碳化转型滞后,高精度设备虽能实时预警,但运行和数据传输依赖化石能源,偏远矿区难以引入清洁能源,存在"碳泄漏"。针对极端天气引发的复合型灾害,现有预警模型缺乏"灾害链-碳汇损失"耦合分析,无法量化灾害对土壤碳库、植被固碳的长期影响,难以支撑低碳修复决策。

生态修复技术瓶颈在于碳汇效能与工程稳定性难以协同。土壤改良中,大量使用化学改良剂虽短期提升植被成活率,却破坏土壤微生物群落,降低有机碳转化效率。植被重建阶段,固碳能力强的乡土树种生长慢、难以适应贫瘠土壤,速生外来树种虽固碳快,却可能引发生物入侵问题。此外,生态修复与地质灾害防治技术衔接断层,如网格固坡会压缩植被空间,使单位面积碳汇量减少 15%～25%,而单纯追求植被覆盖度可能加剧边坡失稳,形成"防灾害-增碳汇"两难。

我国不同区位碳汇的优势树种情况见表 1。

表 1 不同区位碳汇优势树种

Table 1 Dominant tree species for carbon sequestration in different regions

区位	气候特点	研究区	气候条件	优势树种
华北	夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。	山西	年均温度 10 ℃,年均降水量 530 mm。	桦木、落叶松、栎林等。
华南	夏季高温多雨,冬季温和少雨。	广东	年均温度 20 ℃,年均降水量 1 600 mm。	灰木莲、厚荚相思、马尾松等。
东北	四季分明,雨热同期。	辽宁	年均温度 7 ℃,年均降水量 750 mm。	银中杨、油松、水曲柳等。
西北	气候空间分异显著,年较差或日较差大。	陕西	年均温度 12 ℃,年均降水量 670 mm。	华山松、铁杉、冷杉、桦木等。
西南	气候空间分异显著,年较差小,日较差大。	云南	年均温度 17 ℃,年均降水量 1 000 mm。	乔松、黄杉、枫杨等。

现阶段实践中存在技术集成与量化评估体系不健全的问题。现有技术聚焦单一环节,缺乏"灾害预警-低碳治理-碳汇提升"全链条协同设计;碳汇计量未纳入地质灾害导致的碳损失核算,如滑坡引发的土壤侵蚀每公顷每年致 1～2 t 碳流失,使修复工程实际碳效益被高估,难以平衡地质安全与生态碳汇目标[34]。

此外,当前露天煤矿低碳技术推广面临"短期高成本与长期碳汇收益失衡"问题,以绿色支护技术为例,相对于传统技术其成本较高,仅靠碳汇收益,很难在矿山常规开采周期(20～30 a)内收回成本,制约了企业的应用意愿。运用全生命周期评价(LCA)方法对比传统钢锚杆与低碳可降解锚杆全周期效益:传统钢锚杆全周期碳排放约 50 kg/m,含矿石开采、冶炼等高耗能环节,废弃后回收利用率仅 30%,环境负担集中于生产与废弃阶段;可降解锚杆全周期碳排放约 22 kg/m,生物质原材料种植环节可固碳 3.5 kg/m,废弃后自然降解无残留,运维阶段可协同植被固碳年均 2.3 kg/m。然而,LCA 方法显示,可降解锚杆的全周期成本比传统钢锚杆的全周期成本高约 42%,生物质材料预处理与工艺研发投入大,当前评估体系未能充分量化其生态效益,导致全周期优势未被重视。

3.2 管理层面的协同机制缺失

"双碳"目标下,露天煤矿地质灾害防治与生态修复在管理层面的协同机制缺失问题突出,多维度协同断裂。

政策制定层面存在跨部门"壁垒"。地质灾害防治、生态修复与碳减排分属自然资源、生态环境、碳管理等部门,各部门政策侧重自身核心指标,缺乏统一目标衔接。如自然资源部门边坡治理标准强调工程强度,可能推荐高碳排放的刚性支护方案,而碳管理部门的碳汇考核要求降低修复碳排放,政策导向时常存在冲突。

主体权责协同存在"模糊带"。矿山企业、科研机构与政府部门角色定位不清,呈"各自为战"状态。企业关注短期工程验收,对后期碳汇维护与灾害监测投入不足;科研机构掌握低碳技术,因缺乏与企业常态化对接,难转化应用;政府监管分散,验收侧重工程质量,忽视对碳汇与灾害风险的联动评估。

区域协同机制存在"空白区"。跨行政区域露天煤矿(如流域沿线矿区)的灾害防治效果与碳汇能力会产生跨区影响,但现有体系缺乏联动机制。上游为降低成本简化防治措施,可能因滑坡导致泥沙淤积影响下游水质,破坏的土壤碳库削弱流域碳汇潜力;下游未参与上游决策,难以主张权益,形成"治理

成本本地承担、生态损失跨区蔓延”的失衡局面。

此外,碳汇效益与灾害风险的协同评估机制尚未建立。碳汇计量仅统计固碳量,未纳入灾害导致的碳损失;灾害风险评估未考虑生态修复对碳库的保护作用,两者数据割裂,无法提供“防灾害-保碳汇”综合依据,加剧协同管理难度。

3.3 政策层面的支撑力度不足

“双碳”目标下,露天煤矿地质灾害防治与生态修复在政策层面支撑力度不足,主要体现在以下4个方面。

(1) 政策体系缺乏系统性设计。相关政策分散于地质灾害防治、生态修复、碳减排等单一领域,未形成“防灾害-促修复-增碳汇”一体化框架。地质灾害防治政策侧重工程安全,鲜少提及低碳化要求;生态修复政策强调植被恢复,未将碳汇效能与灾害防控纳入强制条款;碳减排政策聚焦能源管控,对矿山修复碳汇核算指导不明。“各管一段”的治理格局使企业难以探寻兼顾多重目标的路径,甚至出现为满足一项目标舍弃其他目标的情况。

(2) 标准体系衔接存在断层。不同领域技术标准与考核指标缺乏协同,形成执行矛盾。自然资源部门的边坡标准允许高碳排放支护,未纳入碳足迹指标;生态环境部门修复验收侧重植被覆盖率,对植被固碳与抗灾性能缺乏规范;碳管理部门碳汇计量未对接灾害风险评估,灾害引发的碳损失无法核算。

(3) 激励与约束机制不足。对企业采用低碳技术的激励有限,碳汇效益与经济收益缺乏挂钩机制,矿山修复碳信用难以进入交易市场,企业低碳投入回收难,更倾向低成本高排放方案。同时,对忽视碳汇保护的行为约束不足,部分企业简化修复造成碳库破坏、灾害风险上升,却因无明确处罚条款难以形成有效震慑。

(4) 政策更新滞后于技术发展。低碳修复新技术不断涌现,但现有政策未及时完善对应的应用规范并出台配套支持措施,如植被固坡技术缺少配套补贴与技术指南,企业出于风险顾虑不敢尝试,进而阻碍了技术的转化。

4 “双碳”目标下的转型路径探索

4.1 技术转型:构建低碳协同技术体系

为破解“双碳”目标下露天煤矿地质灾害防治与生态修复的技术瓶颈,需构建“防灾害-促修复-增碳汇”一体化低碳协同技术体系,如图4所示。

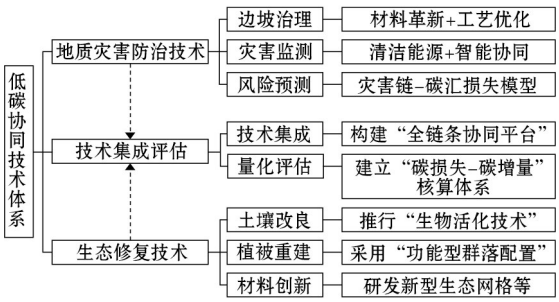


图4 低碳协同技术体系

Fig.4 Low-carbon collaborative technology system

地质灾害防治技术低碳化转型是关键。边坡治理以“材料革新+工艺优化”替代高碳措施,推广植被混凝土喷播技术,用秸秆纤维、生物胶等低碳基材混合本土草灌种子,形成复合防护层,较传统混凝土挡墙碳排放显著降低,植被成熟后具备持续固碳能力[35]。灾害监测转向“清洁能源+智能协同”,偏远矿区部署太阳能光伏供电的物联网网络,结合无人机与地面传感器,实现数据零碳传输。构建“灾害链-碳汇损失”耦合模型,整合多类参数,精准预测极端天气灾害对碳汇的长期影响,为防护提供依据。

实现生态修复技术协同增效转型,破解现存的矛盾。土壤改良推行“生物活化技术”,用秸秆生物质炭替代化学改良剂,提升有机碳转化效率,接种复合菌群,增强乡土树种适应性。植被重建采用“功能型群落配置”,按“深根灌木+浅根草本”搭配,增强边坡稳定性,单位面积碳汇较单一植被提升40%以上。研发可降解生态网格,3~5 a自然降解,将碳汇损失控制在5%以内。

推进技术集成与量化评估智能化转型,为精准评估提供支撑。构建“全链条协同平台”,通过数字孪生模拟方案分析碳足迹与灾害风险,利用AI算法实时优化策略[36]。碳汇计量建立“碳损失-碳增量”核算体系,引入同位素标记与涡度相关系统,大幅降低评估误差。

通过技术转型实现低碳协同与模式跨越,同时依托成本-收益曲线优化,以规模化降本和缩短回收期,从而破解经济瓶颈,推动绿色支护技术从“理论低碳”迈向“经济可行”。上述路径协同实施,可为露天煤矿矿区可持续发展提供可行的技术范式。

4.2 管理转型:建立碳导向协同机制

为解决“双碳”目标下露天煤矿地质灾害防治与生态修复管理协同机制缺失问题,以碳为导向重构管理体系,推动管理模式从“分散治理”向“系统协同”转型。

政策层面打破部门壁垒,构建碳目标统领框架。建立省级跨部门联席机制,将多部门政策目标纳入统一评价体系,以碳汇效益衔接各领域标准,将碳减排目标嵌入灾害防治验收标准,并明确各部门权责边界。

主体层面厘清权责,建立"政产学研用"协同网络。推行"碳汇修复终身责任制",企业责任延伸至修复后5~10 a碳汇维护,并预留管护资金;搭建企业与科研机构对接平台,通过"技术入股+碳收益分成"转化技术。政府整合监管职能,成立专职科室,将碳汇稳定性与灾害风险评估纳入日常巡查。

区域层面填补协同空白,建立跨区域碳汇补偿机制。明确跨区矿区上游碳汇保护责任,下游按受益比例支付补偿;建立跨区碳汇账户,将上游碳流失纳入下游核算;允许上游在下游购买碳汇指标平衡成本与责任。

评估层面建立碳汇与灾害风险联动机制,构建"碳汇-灾害"双维度模型,将灾害碳损失纳入计量,增设"生态修复碳库保护系数";建立省级数据库,借助区块链实现跨域数据共享。

通过管理转型,将碳汇目标贯穿全过程,形成闭环管理体系,破解协同难题。

4.3 政策转型:完善低碳支撑保障体系

针对"双碳"目标下露天煤矿地质灾害防治与生态修复政策支撑不足问题,需构建全链条低碳支撑保障体系。

构建系统性政策框架,打破"各管一段"的治理格局。推动政策向"防灾害-促修复-增碳汇"一体化转型,出台相关规定,整合地质灾害防治低碳要求、生态修复碳汇效能指标及碳减排核算规则。

推动标准体系协同衔接,消除执行矛盾。建立跨领域协调机制,实现技术标准与考核指标融合。自然资源部门修订边坡标准,纳入碳足迹指标;生态环境部门完善验收规范,要求植被兼顾固碳与抗灾性能;碳管理部门推动碳汇计量与灾害评估对接,将灾害碳损失纳入核算,形成"安全-碳汇"双维度标准。

健全激励与约束机制,激发低碳动力。建立矿山修复碳信用交易机制,将碳汇量纳入区域碳市场,助力企业回收低碳修复投资成本。强化约束,在《中华人民共和国矿产资源法实施条例》中增设"碳汇保护责任条款",对违规企业处以罚款并纳入黑名单,形成"激励+约束"组合。

动态更新政策内容,跟上技术发展。建立政策与技术联动机制,将植被固坡等新技术纳入支持范围,出台补贴、指南及标准。如制定植被固坡规范,明确植被配置方案,并适当给予补贴,加速技术转化。

通过政策转型,形成全流程、多维度低碳支撑体系,为露天煤矿低碳化推进提供政策支撑。

5 国外政策差异及启示

澳大利亚与德国基于各自资源禀赋和发展需求,构建了独具特色的矿区治理政策体系,为全球矿区生态修复与碳汇融合发展提供了宝贵经验。下面简要剖析两国在该方面的核心思路与实施路径,揭示其在强制约束、市场激励、技术创新等方面的差异化探索。

澳大利亚以"全生命周期责任绑定+碳汇市场化驱动"构建政策体系,核心差异体现在强制约束与市场激励的深度融合。其《矿山环境修复法》要求企业在矿山开采前缴纳与修复成本挂钩的保证金,且验收需满足《国家矿山生态修复标准》中土壤碳库恢复率、植被固碳量等量化指标,未达标则保证金用于第三方修复,倒逼企业统筹"地灾防治-生态修复-碳汇";同时将矿区修复碳汇纳入澳大利亚碳信用单位(ACCU)体系,如昆士兰州某矿通过植被固坡碳汇收益覆盖30%修复成本,形成良性循环。此外,针对干旱矿区的《排土场碳汇型修复指南》,兼顾边坡稳定性与固碳,推荐适合的植被模式,对我国西北矿区具有参考价值。

德国以"技术创新赋能+跨区域协同治理"为核心,政策聚焦破解技术瓶颈与区域矛盾。通过《国家煤炭转型计划》设立专项基金,支持碳足迹导向预警技术、可降解生物基锚杆研发,出台《地灾防治技术碳排放标准》,强制核算工程全生命周期碳足迹;针对鲁尔区跨州矿区,建立"州际协同委员会",上游强化防治的成本由下游补贴50%,且上游碳汇损失纳入下游核算,避免成本与损失失衡。同时,推动退役矿坑转型为"碳汇湿地"或"光伏+生态修复"项目,如多特蒙德某矿年减排3万t,这为我国"后开采时代"转型提供了思路。

按"技术转型、管理转型、政策转型"的维度梳理,明确各维度国外实践与本土路径衔接点,形成"国际案例→经验提炼→本土适配"的分层结构,见表2。

表 2 国外经验对我国露天煤矿“双碳”转型路径的启示

Table 2 The enlightenment of foreign experience on the “dual carbon” transformation path of open pit coal mines in China

路径	国外实践	经验提炼	衔接点
技术转型	澳大利亚:现行标准规范强制纳入修复率、固碳量等指标;德国:设立专项基金,支持碳汇相关领域的关键技术研发。	标准强制引导+资金定向扶持	支撑“4.1 构建低碳协同技术体系”:建议在相关规范中增设“碳汇-灾害耦合监测指标”,并参照德国设立“露天煤矿低碳技术专项基金”,重点扶持“灾害-碳汇耦合模型”等核心技术研发。
管理转型	澳大利亚:企业缴纳保证金,未达标则用于相关碳汇修复;德国鲁尔区:建立专门的管理组织,上下游防治成本共担。	跨区补偿+责任绑定	支撑“4.2 建立碳导向协同机制”:建议在跨区矿区复制“州际协同委员会”模式,明确上游碳汇保护责任与下游补偿比例;参照澳大利亚“修复保证金”制度,将我国“碳汇修复终身责任制”与资金监管挂钩。
政策转型	澳大利亚:矿区修复碳汇纳入相应的 ACCU 碳信用体系;德国:出台专门的标准规范,强制核算全生命周期碳足迹。	市场激励+标准约束	支撑“4.3 完善低碳支撑保障体系”:建议推动我国矿山修复碳汇进入全国碳市场,参照 ACCU 设计“碳信用核算规则”;在相关条例中增设“地灾防治碳排放标准”,强制要求支护、监测工程核算碳足迹。

6 结论与展望

(1)“双碳”目标下,露天煤矿地质灾害防治研究呈现新的发展态势。传统地质灾害因开采工艺向低碳化转型而表现出新的特征,同时与碳排放关联紧密的潜在灾害受到学界与业界的更多关注。低碳化监测与预警技术以及新型防治工程技术取得一定进展,但在灾害与碳汇损失的耦合分析及协同防控方面仍存在不足,需要进一步深化研究,以适应低碳发展的需求。

(2)露天煤矿生态修复研究围绕碳汇功能展开,在植被重建、土壤碳库修复等方面形成了一系列技术路径。低碳化生态修复技术体系不断完善,节能型工艺与循环经济模式得到应用,但生态修复的碳汇效能与工程稳定性之间的协同难题尚未完全解决,如何实现两者的平衡仍是未来研究的重要方向。

(3)“双碳”目标下露天煤矿转型面临多层面的矛盾与挑战。技术层面存在低碳转型瓶颈,各环节技术缺乏有效集成;管理层面协同机制缺失,跨部门、跨主体及跨区域的协同存在障碍;政策层面支撑力度不足,政策体系、标准衔接及激励约束机制等有待完善,这些因素共同制约了露天煤矿的绿色低碳转型进程。

(4)推动露天煤矿地质灾害防治与生态修复协同发展,需构建技术、管理、政策三维转型路径,技术上构建低碳协同体系,管理上形成碳导向机制,政策上完善低碳保障,三者为“防灾害-促修复-增碳汇”提供支撑。

未来将建议按“三年试点、五年推广、十年完善”推进,2025—2027 年在新疆、内蒙古等地的矿区试点制定标准,2028—2032 年推广预警模型与碳补偿机制并建示范矿区,2033—2035 年完善相关政策并将其纳入碳市场,实现协同落地以助力“双碳”目标。

参考文献(References):

[1] 李杨,张帆,姜大霖,等.“双碳”目标下我国煤基能源产业挑战及优化发展策略研究[J].中国煤炭, 2024, 50 (12):33-39.
Li Yang, Zhang Fan, Jiang Dalin, et al. Research on the challenges and optimized development strategies of China's coal-based energy industry under the goals of carbon peak and carbon neutrality[J].China Coal,2024,50(12):33-39.

[2] 周曙东,雷会妨,葛继红,等.“双碳”背景下中国能源结构转型的碳减排潜力及宏观经济影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34 (12):55-63.
Zhou Shudong, Lei Huifang, Ge Jihong, et al. Carbon emission reduction potential and macroeconomic impact analysis of China's energy structure transition in the context of “dual carbon” goals[J]. China population, resources and environment,2024,34(12):55-63.

[3] 裴明松,刘林,代光俊,等.“双碳”目标下考虑碳绩效的采矿方案优选[J].矿业研究与开发,2025,45(5):42-48.
Pei Mingsong, Liu Lin, Dai Guangjun, et al.Mining scheme optimization considering carbon performance under the “dual carbon” goals[J].Mining Research and Development,2025,45(5):42-48.

[4] 付恩三,白润才,刘光伟,等.“双碳”视角下我国露天煤矿的绿色可持续发展[J].科技导报,2022,40(19):25-35.
Fu Ensan, Bai Runcai, Liu Guangwei, et al. Counter measures and thinking of green and sustainable development of open-pit coal mines in the future from the perspective of “double carbon”[J].Science & Technology Review,2022,40(19):25-35.

[5] 夏冬,邵国梁,李富平,等.新世纪我国露天矿边坡地灾监测预警与生态修复互馈研究进展与展望[J].金属矿山,2025(4):241-255.
Xia Dong, Shao Guoliang, Li Fuping, et al. Research progress and prospect of mutual feedback of open-pit mine slope disaster monitoring and early warning and ecological restoration in China in the new century[J].Metal Mine,2025(4):241-255.

[6] 李树志，李学良，尹大伟.碳中和背景下煤炭矿山生态修复的几个基本问题[J].煤炭科学技术，2022，50(1)：286-292.
Li Shuzhi，Li Xueliang，Yin Dawei. Several basic issues of ecological restoration of coal mines under background of carbon neutrality[J].Coal Science and Technology，2022，50(1)：286-292.

[7] 许晨，马龙，马宁，等.红沙泉露天煤矿西端帮陡帮开采方案研究[J].煤炭工程，2025，57(5)：17-24.
Xu Chen，Ma Long，Ma Ning，et al. Mining plan for the western steep slope of Hongshaquan open-pit coal mine[J]. Coal Engineering，2025，57(5)：17-24.

[8] 孙世国，于磊，于云鹤.露天矿延深开采诱发边坡地表变形研究[J].矿业安全与环保，2025，52(1)：122-128.
Sun Shiguo，Yu Lei，Yu Yunhe. Study on surface deformation of slope induced by extended deep mining in surface mine [J]. Mining Safety & Environmental Protection，2025，52(1)：122-128.

[9] 陈阳，吕辉，毕莹，等.国内外典型露天矿山坍塌事故案例分析与启示[J].中国煤炭，2024，50(4)：63-67.
Chen Yang，Lyu Hui，Bi Ying，ct al. Analysis and enlightenment of typical collapse accidents in open-pit mines at home and abroad[J].China Coal，2024，50(4)：63-67.

[10] 郑友毅，王青，顾晓薇.露天煤矿开采计划的整体动态优化[J].煤炭学报，2009，34(8)：1052-1056.
Zheng Youyi，Wang Qing，Gu Xiaowei. Over all dynamic optimization of production schedule in open pit coal mines [J].Journal of China Coal Society，2009，34(8)：1052-1056.

[11] 王忠鑫，田会，王东，等.露天采矿科学目标的演变与未来发展趋势[J].煤炭学报，2024，49(增刊 1)：129-153.
Wang Zhongxin，Tian Hui，Wang Dong，et al. Evolution and future prospect of scientific objectives of open-pitmining [J]. Journal of China Coal Society，2024，49(Suppl. 1)：129-153.

[12] 桑树勋，王冉，周效志，等.论煤地质学与碳中和[J].煤田地质与勘探，2021，49(1)：1-11.
Sang Shuxun，Wang Ran，Zhou Xiaozhi，et al. Review on carbon neutralization associated with coal geology[J]. Coal Geology & Exploration，2021，49(1)：1-11.

[13] 詹平，雷昌奎，程仁辉.煤自燃氧化过程气体温度非线性特征及预测研究[J].煤矿安全，2025，56(8)：59-68.
Zhan Ping，Lei Changkui，Cheng Renhui. Nonlinear characteristics and prediction of gas and temperature in coal spontaneous combustion oxidation process[J]. Safety in Coal Mines，2025，56(8)：59-68.

[14] 马增，费汉强，孙春辉，等.长历时降雨后排土场边坡稳定性动态变化研究[J].矿业研究与开发，2025，45(7)：169-176.
Ma Zeng，Fei Hanqiang，Sun Chunhui，et al. Study on dynamic variation of dump slope stability after long duration rainfal[J].Mining Research and Development，2025，45(7)：169-176.

[15] 王青，胥孝川，顾晓薇，等.考虑生态成本的露天煤矿生产计划优化[J].金属矿山，2015(3)：23-27.
Wang Qing，Xu Xiaochuan，Gu Xiaowei，et al. Production scheduling optimization of open pit coal mines considering the ecological costs[J].Metal Mine，2015(3)：23-27.

[16] 王树海，梁凌，闫力维，等.露天矿安全监测预警系统研究[J].煤炭工程，2024，56(增刊 1)：132-137.
Wang Shuhai，Liang Ling，Yan Liwei，et al. Research on safety monitoring system for open-pit mine [J]. Coal Engineering，2024，56(Suppl.1)：132-137.

[17] 郝宪杰，宋思桐，唐宽旭，等.我国关闭/废弃矿山土地资源的新能源再开发现状及展望[J].金属矿山，2024(5)：68-75.
Hao Xianjie，Song Sitong，Tang Kuanxu，et al. Current situation and prospect of new energy redevelopment of closed/abandoned mine land resources in China[J]. Metal Mine，2024(5)：68-75.

[18] 顾清华，李学现，卢才武，等.“双碳”背景下露天矿智能化建设新模式的技术路径[J].金属矿山，2023(5)：1-13.
Gu Qinghua，Li Xuexian，Lu Caiwu，et al. Technical path of new intelligent mode of open-pit mine under the background of “dual carbon”[J].Metal Mine，2023(5)：1-13.

[19] 白润才，付恩三，马力，等.露天煤矿安全-绿色-高效-低碳协同开采技术体系[J].煤炭学报，2024，49(1)：298-308.
Bai Runcai，Fu Ensan，Ma Li，et al. Collaborative mining technological system of safety-green-high efficiency-low carbon for open pit coal mine[J]. Journal of China Coal Society，2024，49(1)：298-308.

[20] 孙涛，刘强，杨俊杰，等.柔性面层边坡支护技术及其应用研究[J].施工技术，2017，46(17)：121-125.
Sun Tao，Liu Qiang，Yang Junjie，et al. Application research on slope supporting technique with flexible facing [J].Construction Technology，2017，46(17)：121-125.

[21] 周军平，桂勇，罗嗣海，等.植被对边坡稳定性影响的研究进展[J].中外公路，2013，33(6)：9-15.
Zhou Junping，Gui Yong，Luo Sihai，et al. Research progress on the influence of vegetation on slope stability[J]. Journal of China and Foreign Highway，2013，33(6)：9-15.

[22] 周伟，官炎俊.重建植被视角下露天煤矿区土地复垦演替过程及管控模式研究[J].煤田地质与勘探，2022，50(12)：65-74.
Zhou Wei，Guan Yanjun. Succession process and management mode of land reclamation in open-pit coal mine areas based on vegetation rehabilitation[J]. Coal Geology & Exploration，2022，50(12)：65-74.

[23] 陈珲，崔一涵，汪海明，等.矿山生态修复及其固碳潜力研究进展[J].地球科学，2024，49(12)：4594-4607.
Chen Hui，Cui Yihan，Wang Haiming，et al. Advances in mines ecological restoration and carbon sequestration potential[J].Earth Science，2024，49(12)：4594-4607.

[24] Sandra S, Bergur S, Marieni C, et al. Author Correction: Carbon dioxide storage through mineral carbonation[J]. Nature Reviews Earth & Environment,2020,1(12):695.

[25] Safaei-Farouji M, Misch D, Sachsenhofer R F, et al. From abandoned mines to carbon sinks: assessing the CO_2 storage capacity of Austrian low-rank coal deposits[J]. International Journal of Coal Geology,2024,286:1-13.

[26] Pan S Y, Chen Y H, Fan L S, et al. CO_2 mineralization and utilization by alkaline solid wastes for potential carbon reduction[J]. Nature Sustainability,2020(3):399-405.

[27] Azadi M, Northey S A, Ali S H, et al. Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation[J].Nature Geoscience,2020(13):100-104.

[28] Wang K C, Zhou J T, Yang R J, et al. Deploying photovoltaic systems in global open-pit mines for a clean energy transition[J]. Nature Sustainability,2025(7):1-11.

[29] 吕天宇,曾晨,岳文泽."双碳"目标背景下全域土地综合整治减排增汇的机理与路径研究[J].中国土地科学,2022,36(11):13-23.
Lyu Tianyu, Zeng Chen, Yue Wenze. Study on the mechanism and path of reducing carbon emission and enhancing carbon sink of comprehensive land consolidation in the context of national carbon peaking and carbon neutrality goals[J].China Land Science,2022,36(11):13-23.

[30] 桑树勋,袁亮,刘世奇,等.碳中和地质技术及其煤炭低碳化应用前瞻[J].煤炭学报,2022,47(4):1430-1451.
Sang Shuxun, Yuan Liang, Liu Shiqi, et al. Geological technology for carbon neutrality and its application prospect for low carbon coal exploitation and utilization[J].Joumal of China Coal Society,2022,47(4):1430-1451.

[31] 陈泳翰,李怡."双碳"目标视域下中国生态补偿政策的森林碳汇效应[J].林业经济问题,2025,45(4):337-349.
Chen Yonghan, Li Yi. The forest carbon sinks effects of China's ecological compensation policies from the perspective of "dual carbon" goals[J]. Issues of Forestry Economics,2025,45(4):337-349.

[32] 潘浩之,施睿,杨天人.人工智能在城市碳达峰、碳中和规划与治理中的应用[J].国际城市规划,2022,37(6):26-34.
Pan Haozhi, Shi Rui, Yang Tianren. Applications of artificial intelligence in urban planning and governance for carbon peak and carbon neutrality[J]. Urban Planning International,2022,37(6):26-34.

[33] 肖阳,佘济云,陆禹,等.GIS在天然林碳汇价值评价中的应用[J].中南林业科技大学学报,2013,33(12):32-36.
Xiao Yang, She Jiyun, Lu Yu, et al. Application of GIS on evaluation of forest carbon-sink in natural forest[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2013,33(12):32-36.

[34] 张宇昂,李亚桐,杜忠毓,等.矿区受损生态系统修复与碳汇潜力的文献计量研究[J].林业科学研究,2024,37(2):144-155.
Zhang Yu'ang, Li Yatong, Du Zhongyu, et al. A bibliometric study on the restoration and carbon sink potential of damaged ecosystem in mining area[J]. Forest Research,2024,37(2):144-155.

[35] 刘黎明,宋岩松,钟斌,等.植被混凝土生态修复技术研究进展[J].环境工程技术学报,2022,12(3):916-927.
Liu Liming, Song Yansong, Zhong Bin, et al. Research progress on ecological restoration technology of vegetation concretel[J]. Joumal of Environmental Engineering Technology,2022,12(3):916-927.

[36] 付伟,罗明灿,陈建成.碳足迹及其影响因素研究进展与展望[J].林业经济,2021,43(8):39-49.
Fu Wei, Luo Mingcan, Chen Jiancheng. Research progress and prospects of carbon footprint and its influencing factors[J].Forestry Economics,2021,43(8):39-49.