

王双明, 孙 强, 袁士豪, 等. 论极端气候下的煤炭减损开采地质保障[J]. 地球科学与环境学报, 2026, 48(3): 317-329.

WANG Shuang-ming, SUN Qiang, YUAN Shi-hao, et al. Geological Support Strategies for Loss-reduction Coal Mining Under Extreme Climate Conditions[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2026, 48(3): 317-329.

DOI: 10.19814/j.jese.2026.01018

· 黄河流域生态保护和高质量发展专刊 ·

论极端气候下的煤炭减损开采地质保障

王双明^{1,2,3*}, 孙 强^{1,2,3†}, 袁士豪², 肖乐乐², 耿济世^{1,2}, 李识博²,
谷 超⁴, 胡 鑫², 马鹏达², 牛 超²

(1. 西安科技大学 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学
地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 3. 西安科技大学 煤炭绿色开采地质研究院,
陕西 西安 710054; 4. 山西大同大学 煤炭工程学院, 山西 大同 037003)

摘要:在全球气候变化加剧的背景下, 极端气候事件通过“大气-水-岩石-土壤-生物”多圈层系统的连锁传导与放大效应, 改变多圈层之间原有的物质循环与能量交换格局, 对煤矿区的安全生产、高效运营与生态可持续性构成系统性挑战。极端气候(尤其是强降雨)显著改变矿区水文地质条件, 导致岩土体物理力学性质劣化、孔隙水压力剧增, 打破原有地质力学平衡, 进而诱发边坡失稳、岩层开裂、矿井突水及采空区塌陷等地质灾害, 严重制约开采连续性与经济性。同时, 极端气候进一步放大采矿活动对生态环境的扰动: 极端干旱与温度效应削弱矿区生态修复能力与碳汇功能, 影响区域生态系统结构与服务功能, 强降雨则加剧水土流失与污染物迁移扩散, 加大地表-地下环境系统的综合风险, 持续威胁区域生态安全。系统阐述极端气候对煤矿区开采地质条件的影响机制与减损保障科学内涵, 从多圈层耦合响应视角深化对气候-采动复合扰动过程的认识, 提出构建面向极端气候扰动的煤矿区韧性地质保障体系。该体系涵盖 5 个关键层面: ①在机理认知层面, 揭示多圈层耦合响应规律, 阐明以水文路径与岩土性质演化为核心的动态机制; ②在信息感知层面, 构建多圈层界面结构与状态演变的动态监测体系, 提升对关键界面演化与风险征兆的识别能力, 建立融合地质、开采、水文及生态信息的综合演化模型; ③在模型预测层面, 发展多圈层物质-能量传递动态分析模型, 增强对极端气候扰动下灾害演化过程的预测精度, 阐明“地质条件变化-采动灾害-生态损害”链式传导机制; ④在调控防控层面, 研发与地质条件相匹配的开采调控技术与减损保障工程技术, 实现对气候扰动影响的主动干预与风险削减, 控制气候扰动对煤矿区地质环境的损害程度与范围; ⑤在韧性防御层面, 建立涵盖地质安全、生产效率和生态健康的多目标决策体系, 推动地质保障由被动防控向韧性适应转变, 发展基于动态风险评估的智能平台, 实现开采全周期的气候适应性韧性管理。极端气候下煤矿区减损开采地质保障是一项涉及多圈层耦合响应、动态过程调控与系统韧性提升的复杂系统工程。极端气候通过改变多圈层间物质与能量交换的强度与路径, 持续扰动煤矿区地质结构稳定性与水文循环过程, 形成“气候-水文-地质-工程”多重损害响应模式。系统构建并实施“机理认知-信息感知-模型预测-主动调控-韧性防御”应对策略, 有助于全面提升煤矿区对气候变化的适应性与恢复力, 最终实现能源安全开采、生产高效运行与生态环境可持续保护的复合目标。

关键词:煤炭开采; 极端气候; 减损地质保障; 水循环调控; 岩层变形控制

中图分类号: TD82

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2026)03-0317-13

收稿日期: 2026-01-14; 修回日期: 2026-01-20 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家科技重大专项项目(2024ZD1700101); 国家自然科学基金项目(42330808)

* 通信作者: 王双明(1955-), 男, 陕西岐山人, 教授, 博士研究生导师, 中国工程院院士, E-mail: sxmtwsm@163.com。

† 通信作者: 孙 强(1981-), 男, 河北衡水人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: sunqiang04@cumt.edu.cn。

Geological Support Strategies for Loss-reduction Coal Mining Under Extreme Climate Conditions

WANG Shuang-ming^{1,2,3*}, SUN Qiang^{1,2,3†}, YUAN Shi-hao², XIAO Le-le², GENG Ji-shi^{1,2},
LI Shi-bo², GU Chao⁴, HU Xin², MA Peng-da², NIU Chao²

(1. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. School of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, Shanxi, China)

Abstract: Against the backdrop of intensifying global climate change, extreme climate events pose systemic challenges to safe production, efficient operation, and ecological sustainability in coal mining areas through cascading and compounding effects across the coupled “atmosphere-water-rock-soil-biosphere” system. Extreme events-particularly intense rainfall-substantially alter hydrogeological boundary conditions, accelerating water-driven deterioration of rock-soil mechanical properties and inducing abnormal increases in pore-water pressure, thereby altering seepage-stress coupling responses and disrupting the geomechanical equilibrium. These perturbations can trigger a spectrum of geohazards, including slope instability, fracture propagation in surrounding rock, mine water inrush (or outburst), and goaf collapse, which collectively disrupt mining continuity and economic viability. Meanwhile, extreme climate conditions further amplify the environmental impacts of mining activities: severe drought and heat stress weaken ecological restoration capacity and reduce regional carbon sink potential, whereas heavy rainfall intensifies runoff-driven erosion and promotes the transport and dispersion of contaminants, posing persistent threats to regional ecological security and environmental risk control. The mechanisms by which extreme climate events reshape the geological conditions of coal mining were systematically elucidated, the underlying scientific principles of risk-mitigation and preventive measures were established, and a resilience-oriented geological hazard management framework for coal mining areas under extreme climate disturbances was proposed. This framework comprises five key components. ① Mechanistic understanding: this component aims to reveal coupled multi-sphere response patterns and establish a dynamic mechanism centered on hydrological pathways and the evolution of rock-soil properties. ② Information sensing: this involves constructing a dynamic monitoring system for multi-sphere interfaces, structural characteristics, and state evolution, and developing an integrated evolutionary model that fuses geological, mining, hydrogeological, and ecological information. ③ Model-based prediction: dynamic analytical models of multi-sphere mass and energy transfer are developed to elucidate the cascading chain from geological condition changes to mining-induced hazards, and finally to ecological degradation. ④ Regulation and risk control: this pillar focuses on developing adaptive mining control technologies and loss-mitigation engineering measures matched to geological conditions to mitigate the intensity and spatial extent of climate-driven damage to the coal mining geo-environment. ⑤ Resilience enhancement: the goal is to establish a multi-objective decision framework encompassing geotechnical safety, production efficiency, and ecological health, and to develop an intelligent platform based on dynamic risk assessment to enable climate-adaptive, resilience-based management across the whole life cycle of the mine. Managing geological risks to reduce losses in coal mining areas under extreme climate conditions constitutes a complex systems

engineering challenge involving coupled multiple-layer responses, dynamic process regulation, and system-level resilience enhancement. Extreme climate events modify the intensity and pathways of mass and energy exchanges across multiple layers, constantly disrupting the stability of geological structures and hydrological cycling in mining districts, thereby forming a compound “meteorological-hydrological-geological-ecological” damage-response pattern. The systematic implementation of this integrated strategy can thus significantly strengthen the resilience of coal mining areas, ensuring mining operations that are secure, efficient, and environmentally sustainable.

Key words: coal mining; extreme climate; geological guarantee reduction; water cycle regulation; rock strata deformation control

0 引言

当前,全球气候变化下的极端气候事件频发,且强度呈现加大趋势,深刻影响着人类生存和发展所依赖的生产、生活和生态(即“三生”)活动^[1-4]。煤矿区地质体作为煤炭资源的赋存体和自然环境的载体,在极端气候与煤炭开采的双重扰动下正在深刻重塑矿区的“三生”格局。一方面,煤炭资源的高强度、大规模开采活动打破了矿区原地应力平衡,破坏了地质体的完整性与连续性,进而引发岩石圈(岩体结构、渗透性、力学强度等)、水圈(地下水、地表水、生态水文等)、土壤圈(土层结构、矿物组分等)、生物圈(生态系统、植被覆盖等)及大气圈之间的多圈层连锁响应与耦合关系变化,深刻影响着矿区的生态地质环境与局地微气候特征^[5-11];另一方面,在采矿扰动与极端气候事件叠加形成的放大效应下,矿区地质条件变化会直接威胁煤炭安全绿色开采过程^[12-15]。例如,极端降雨条件下,沟道汇流强化裂隙导水能力,易引发工作面涌突水与岩层沉降,加剧地表侵蚀并削弱边坡稳定性,同时增加尾矿库溃坝与水体污染等次生灾害风险,进而影响区域社会经济系统的稳定运行^[16-21]。因此,系统揭示极端气候背景下煤矿区地质条件的动态演变规律,支撑煤炭安全绿色开采的科技决策,已成为统筹能源安全保障与生态安全屏障建设的重要课题。

2006年,台风“碧利斯”引发强降雨,导致湖南省郴州市、衡阳市、永州市多处矿井被淹;2007年,持续暴雨致使河南省支建煤矿及山东省华源、名公等煤矿发生淹井事故;2020年,暴雨造成重庆市芦塘煤矿出现涌水险情;2025年,陕西省、山西省、内蒙古自治区等主要煤炭产区相继遭遇极端强降雨袭击,对矿区安全生产构成严重威胁。当前,由极端气候事件引发的局部水圈剧烈变化,不仅直接冲击煤

矿安全生产,还会进一步诱发岩体、土壤及生态系统等多圈层结构连锁损害。因此,深入揭示极端气候与采矿扰动共同作用下煤矿区多圈层的耦合响应规律,系统厘清其损害机理,并发展主动调控与减损技术体系,已成为亟待推进的关键课题。近年来,国内外学者围绕地球关键带多圈层与气候系统的交互作用已从多视角展开研究,为该领域的深化探索奠定了重要基础^[22-27]。例如,刘丛强等研究认为地球关键带通过其内部的生物地球化学过程,显著调控CO₂、CH₄等温室气体含量,从而影响全球气候变化;同时,物理、化学与生物的跨圈层过程也深刻决定着地表环境质量^[28-31]。这些研究为理解气候扰动下的多圈层耦合效应奠定了重要基础^[32-37]。高强度煤炭开采活动破坏了近地表关键带的结构与功能,导致出现地下水破坏、地表裂隙、植被退化与土壤侵蚀等生态环境问题,从根本上改变了关键带原有的物质循环、能量流动与生态服务功能^[38-41]。因此,煤炭开采区可视为一个天然实验室,为探索“极端气候-高强度开采”耦合驱动下“大气-水-岩石-土壤-生物”多圈层的相互作用与响应机制提供了独特窗口,有助于深度揭示地球浅表层系统在外生扰动与内生营力共同作用下的相互作用及演化规律。然而,现有研究对于“极端气候-高强度开采”这一特殊耦合驱动模式下,矿区岩石圈、水圈、土壤圈及生物圈等多圈层之间非稳态、非线性响应的具体路径、临界阈值与反馈机制,仍缺乏系统认知与定量刻画。深入剖析这一复合扰动窗口内的关键过程,其核心科学意义在于揭示多圈层链式响应机理,从而为构建适应气候突变与采动损伤的矿区韧性地质保障体系提供理论依据与技术支持。

极端气候下的煤炭减损开采是一项涉及系统地球科学、工程技术与系统管理的复杂系统难题。本文以极端气候下煤矿区岩石圈、水圈、土壤圈、生物

圈等多圈层耦合损害机制和传导效应为出发点,从服务煤炭“安全、高效、绿色”开采地质保障目标的角度,探讨了兼顾地质安全、生产效率和生态健康的减损保障体系框架,阐述了极端气候下煤矿区地质条件响应与减损保障内涵、科学问题和实施路径,以期增强煤矿区地质保障体系的气候韧性、实现能源安全开采与地质环境保护协同推进提供理论参考与实践指引。

1 极端气候下煤矿区地质条件响应与减损保障内涵

当前极端气候事件频发,“大气-水-岩石-土壤-生物”多圈层连锁传导与效应放大,深刻影响着煤矿区的生产、生活和生态活动,进而对煤矿区的安全、高效和绿色开采构成了新的系统性挑战。从安全生产角度来看,极端气候改变了煤矿区原有的水文地质条件,特别是极端降雨下,岩石圈-水圈-土壤圈的界面水流通量会显著变化;随着大量降水的入渗,岩石的物理力学参数发生变化,在软化、泥化和孔隙水压力作用下,原有的地质结构力学平衡被打破,容易出现矿区边坡失稳、岩层沉降开裂、矿井涌突水、采空区塌陷等地质灾害^[42-43]。从高效生产角度来看,极端气候会显著扰动矿区多圈层间的物质迁移与能量交换过程。一方面,气温异常波动易导致开采、运输等关键设备性能下降或损坏,直接影响作业连续性、延缓生产进度,并抬升系统维护成本;另一方面,在极端强降雨下,工作面涌突水、地表沉降加剧、巷道围岩变形、矿区道路损毁等灾害风险明显上升,进一步制约生产系统的稳定运行与整体效率。从绿色生产角度来看,极端气候进一步放大了煤炭开采对生态环境系统的扰动效应。极端干旱与异常高温会削弱矿区生态修复能力、降低植被固碳功能;而极端降雨则加剧水土流失,并促进污染物迁移与扩散。因此,有必要通过系统协调地质条件演变、资源开采效率、水文过程调控与生态环境安全之间的关系,增强地质保障体系的适应韧性,从而构建一套基于多圈层响应机制、面向极端气候影响的煤矿区减损保障体系^[44-46]。

极端气候对煤矿区开采地质条件的影响,深刻体现了人类工程活动与地质-水文-生态-气候系统之间复杂的相互作用与反馈机制。极端气候通过改变岩石圈、水圈、土壤圈及生物圈等多圈层间的物质循环与能量交换过程及其作用强度,影响矿区地质结构平衡状态与水文循环路径,进而制约煤炭开采在

采前、采中与采后全生命周期中的地质条件演化(图1、2)。以极端降雨为例,其通过地表裂隙与导水裂隙等通道,经由大气降水、地表径流与入渗过程,改变矿区及其周边地下水补给-径流-排泄关系,加剧岩土体渗流-应力耦合效应,影响边坡稳定性与地表侵蚀速率,并显著增加矿井涌突水与采空区沉降风险,从而形成“气候-水文-地质-工程”链式响应与损害模式。这一过程不仅加剧了地质灾害的不确定性与突发性,也使得传统静态预测模型与经验阈值在分析矿区地质结构演化与灾变风险时面临局限。因此,在极端气候背景下,推进减损开采地质保障工作,需构建融合多圈层耦合关系分析与动态阈值识别的综合研判框架,并形成与之相适应的灾害防控体系,以系统性提升煤矿地质保障在气候扰动下的适应性与韧性。

极端气候下煤炭减损开采地质保障研究的科学内涵体现在5个方面(图3):①深刻理解煤矿区“大气-水-岩石-土壤-生物”多圈层在极端气候影响下的耦合关系和演化规律,揭示以水文循环路径和岩土性质演化为核心的多圈层耦合响应机理;②建立极端气候背景下多圈层间的物质运移和能量传递动态分析模型,阐明地质条件变化-采动地质灾害-生态环境损害的传导机制;③构建以识别和监控多圈层界面结构和演化状态为核心的动态地质感知体系,建立包括煤矿区地层结构、开采信息、地下水动态、岩土体变形和地表生态等动态地质演化模型;④发展极端气候背景下与地质条件相匹配的适应性开采调控技术与减损开采地质保障工程技术,降低极端气候扰动对煤矿区地质体和地质环境的损害程度和损伤范围;⑤建立包含地质安全、生产效率和生态健康等多目标的减损保障体系,发展基于动态风险评估的智能决策平台,实现煤炭开采全周期的极端气候适应性韧性防御。综上所述,极端气候背景下煤炭减损开采地质保障是围绕“机理认知-信息感知-模型预测-主动调控-韧性防御”主线,通过系统地球科学知识及减损保障工程技术的融合,提升煤矿区地质保障工作对气候变化的适应性和恢复韧性,实现能源开采安全保障和地质环境的保护。

2 极端气候下煤矿区减损地质保障研究的科学难题

在极端气候下煤炭减损开采地质保障研究目前主要面临五大核心科学难题:一是极端气候作用下煤矿区多圈层耦合响应机理尚未厘清;二是气候扰

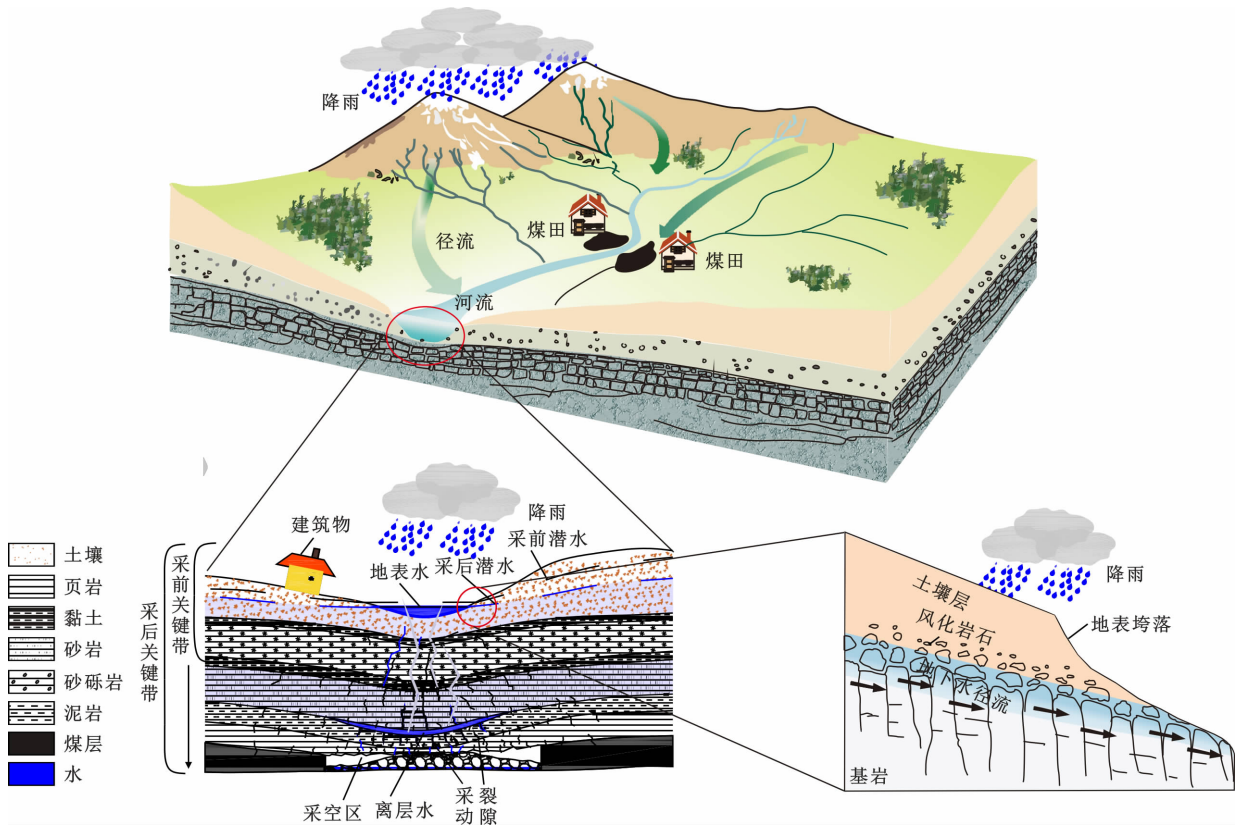


图 1 极端气候作用过程

Fig. 1 Impact Processes of Extreme Climate

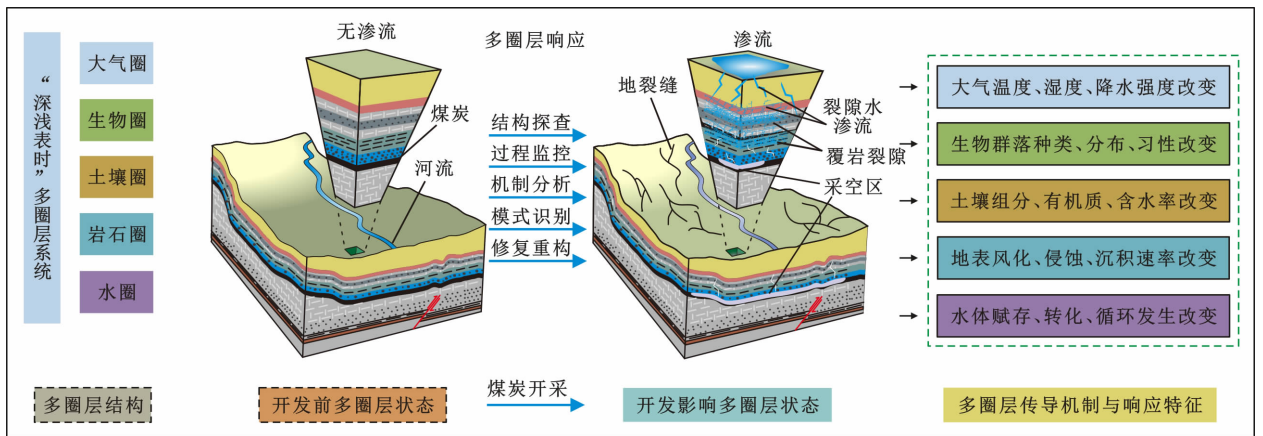


图 2 多圈层损害响应特征

Fig. 2 Multi-layer Damage Response Characteristics

动下采动损害传导机制与放大效应尚不明确；三是气候扰动下地质结构和界面信息感知仍不完善；四是岩层变形调控与多圈层损害韧性防控尚未建立；五是极端气候下减损开采地质保障决策仍待构建。

2.1 极端气候下煤矿区多圈层耦合响应机理

在极端降雨背景下,煤矿区地质条件多圈层结构在采动影响下的耦合响应研究核心在于揭示煤矿区“大气-水-岩石-土壤-生物”多圈层在煤炭开采工程扰动下的结构变化和圈层间物质、能量与信息

动态交换规律,阐明降雨驱动下水圈中地表径流、包气带水与地下水之间的转化通量变化,剖析极端降雨入渗与采动重分布应力下煤矿覆岩中渗流-应力场演化和结构形变及失稳特征,构建多圈层的耦合响应模型,为极端气候下煤矿区地质损害的预测预警与韧性调控提供理论基础。

2.2 气候扰动下采动损害传导机制与放大效应

煤炭地下开采活动通过扰动岩层应力场与结构稳定性,引发覆岩移动、变形与裂隙扩展,进而改变

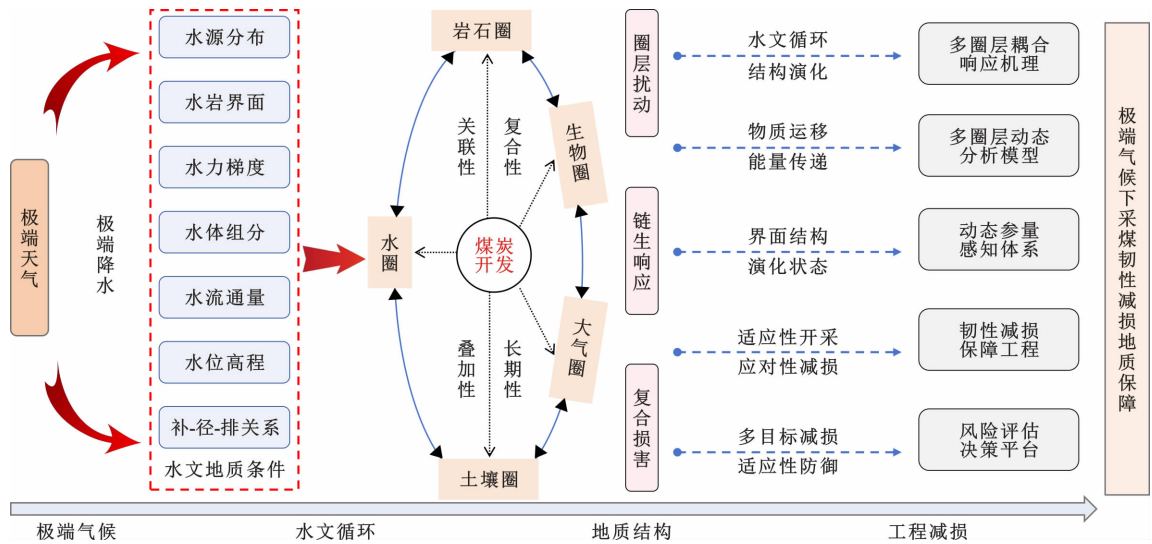


图3 极端气候下减损地质保障内涵

Fig. 3 Connotation of Geological Security Under Extreme Climate Conditions

地下水渗流路径与赋存状态,呈现出自下而上的地质条件损害过程^[16,47-48]。与之相对,极端降雨则通过增强地表径流、加大入渗补给、抬升地下水位及弱化岩土体力学参数,诱发岩层变形沉陷与地表灾害,形成自上而下的地质条件损害过程。两类损害叠加耦合,在“大气-水-岩石-土壤-生物”多圈层系统中引发非线性复合效应,尤其在隔水层、软弱结构面等关键界面处产生应力集中与渗流突变等非线性放大现象,最终导致边坡失稳、突水溃沙、地面塌陷及生态退化等一系列灾害。因此,系统揭示极端降雨与煤炭开采共同驱动下矿区多圈层损害的耦合机制、传导路径与放大效应,具有重要的理论与现实意义。

2.3 气候扰动下地质结构和界面信息感知

在极端气候扰动下,准确获取煤矿区多圈层界面结构、状态及其演变信息,是揭示采动地质条件损害机制的关键。其核心在于对“大气-水-岩石-土壤-生物”多圈层间物质迁移与能量交换过程实施动态监测。通过构建“空-天-地-井”一体化立体监测网络,结合原位感知技术,系统获取多圈层关键界面(如地表-包气带界面、含水层-隔水层界面、岩体-裂隙网络界面、土壤-植被界面等)在极端降雨与采动耦合作用下的结构演变与状态响应数据,涵盖降雨入渗通量、地下水流场动态、岩体应力-渗流耦合状态、地表变形与裂缝发育、生态环境参数变化等多维度信息,从而为极端气候下煤矿区多圈层耦合响应机理研究与韧性调控体系构建提供关键数据支撑。

2.4 岩层变形调控与多圈层损害韧性防控

极端降雨背景下,煤矿区采动损害减损地质保障的关键在于实现对岩层移动变形的主动调控与多

圈层损害的系统韧性防控,其核心是构建一套能够有效抑制岩层沉降与裂隙扩展的主动调控体系。为此,需基于极端降雨入渗与开采扰动耦合作用下的覆岩运动规律、导水裂隙带演化机制及地表沉降动态响应特征,研发适配于极端气候扰动条件的岩层变形控制技术,如裂隙靶向注浆封堵、柔性承压充填、关键煤柱优化留设等方法;进而建立融合区域水文调控与岩层控制功能的“阻(截)-疏-固”协同防控模式,形成贯穿“监测预警-动态调控-效果评估”全过程的韧性防控技术体系。

2.5 极端气候下减损开采地质保障决策

在极端气候扰动下,构建煤矿区减损开采地质保障智能决策体系的关键在于推动地质条件、水文动态、工程调控与系统管理之间的深度融合与协同优化。具体而言,首先建立融合多源地质水文信息、开采工程参数及气候预警数据的“空-天-地-井”一体化动态数据库;在此基础上,研发集成地质结构建模、水文过程模拟、岩层力学响应及生态环境评估的综合分析平台,进而构建面向开采方案设计、岩层控制、水文调控与应急预案的多目标优化算法与智能决策模型;最终形成贯穿“监测-模拟-评估-决策”全流程的减损开采智能支持系统,推动煤矿地质保障工作向数据与模型驱动范式转型,从而系统提升极端气候扰动下煤矿安全、高效、绿色、可持续开采的地质韧性。

3 极端气候下煤矿区减损地质保障实施路径

极端气候下的煤炭减损开采是涉及系统地球科

学、工程技术与管理科学的综合性复杂问题,需依托多学科交叉融合与全链条协同创新予以应对。其实施路径在于构建涵盖“监测预警-过程调控-生态修复-系统管理”的闭环地质保障体系。通过工程控制技术与系统管理机制的持续创新,实现对矿区地质损害的主动干预与动态调控,从而在极端气候扰动下保障煤炭安全、高效与绿色开采,最终系统性提升煤矿区地质保障体系的适应性与韧性。

3.1 极端气候下多圈层动态响应监测预警平台

通过研发并集成“空-天-地-井”立体化协同监测技术,构建多圈层动态监测感知体系(图 4)。该体系融合高分辨率卫星与无人机多光谱遥感,实现矿区地表变形、生态参数及土壤特性的大范围动态监测;借助地面分布式传感网络,实时获取浅层土壤含水率、岩体变形与孔隙水压力数据;通过深部钻孔监测,同步采集多层含水层水文信息、岩层应力及井下微震信号,联合反演采动裂隙发育与岩体破裂过程。基于边缘计算与多源数据融合技术,构建多圈层动态数据库与数字孪生模型,实现对多圈层界面结构与状态演化的透明化表征。

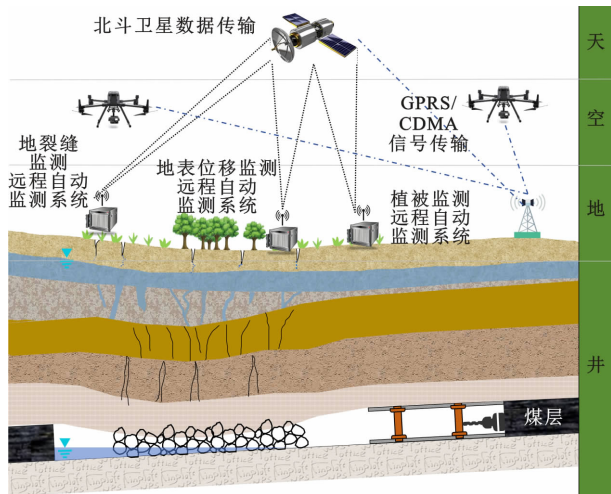


图 4 多圈层动态监测感知体系

Fig. 4 Multi-layer Dynamic Monitoring and Perception System

在风险预警方面,研发耦合多物理过程的数字孪生分析平台。通过建立极端降雨入渗-地下水流-岩体变形-生态响应耦合数值模型,模拟多圈层损害传导与非线性放大效应;在此基础上,挖掘多参数时序演变中的灾变前兆模式,发展融合机理模型与数据驱动的预警方法;最终集成开发具备多圈层风险评估、情景推演与分级预警功能的智能决策系统,形成“监测-模拟-预警-反馈”一体化的煤矿区多圈层损害预警平台。

3.2 以矿区水循环调控为核心的水文地质管理

构建基于多源数据融合的矿区水循环动态预测调控体系,是实现以水循环调控为核心的水文地质精细化管理的关键(图 5)。该体系通过集成高精度降雨预报、遥感反演地表水文参数、分布式地下水监测及矿井排水数据,建立涵盖“大气降水-地表径流-包气带入渗-地下水运移-矿井涌水”全过程的水文耦合模型;在此基础上,发展适应极端降雨不确定性的动态模拟技术,提升水量预测的时空精度;通过挖掘历史水文数据与开采扰动参数之间的非线性关联,构建矿区水量快速响应预测模型,从而为水循环工程调控提供科学决策支持。

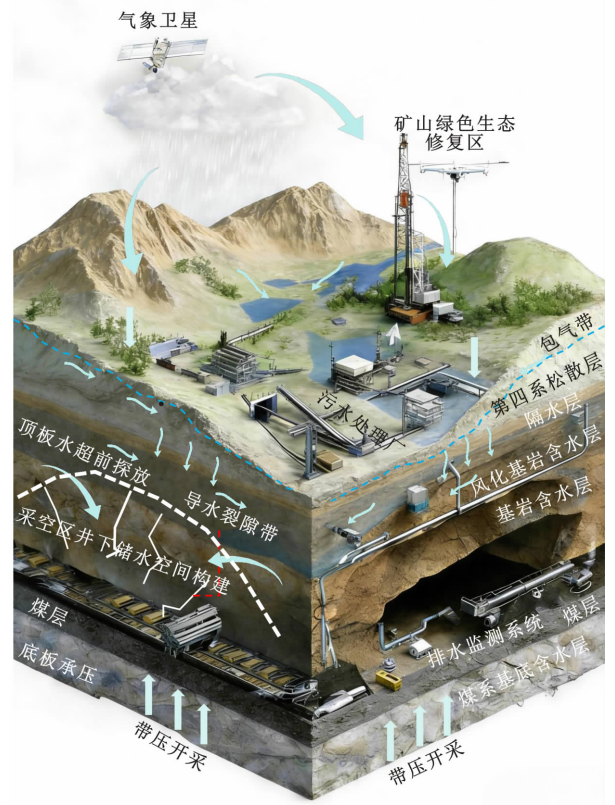


图 5 水循环动态预测调控体系

Fig. 5 Water Cycle Dynamic Prediction and Regulation System

以矿区水循环特征为基础,研发“蓄-排-疏-净-用”协同的智能调控工程技术体系,是实现水资源与地质安全协同管控的核心目标。具体内容包括:研发井下储水空间构建与人工调蓄技术,充分利用采空区实现水资源动态储存与调配;优化超前探放水钻孔布局与智能排水系统,建立基于水量预测的地表-地下联动调控机制;创新井下预处理与地面深度处理相结合的模块化水处理工艺,推动矿井水分质分级资源化利用;最终构建集雨洪调蓄、精准截渗、

可控疏降、水质净化与循环利用于一体的智能管控平台,形成极端气候扰动下兼顾矿区水资源安全与地质安全的韧性保障体系。

3.3 以岩层变形控制为核心的减损保障工程技术

基于极端气候扰动下煤矿区采动岩层稳定性的影响机理,需研发以多场耦合分析为基础的岩层移动协同控制技术体系。通过构建融合地质力学、采矿岩体力学及地下水动力学的数值模型,揭示极端降雨作用下采空区岩体力学参数演变规律与覆岩应力分布动态响应特征;在此基础上,研发考虑时变效应的采空区覆岩充填控制方法,开发具备自适应抗渗与变形调节功能的新型充填材料,并建立基于岩层移动实时监测反馈的充填参数动态优化系统,从而形成集“强度补偿-应力调控-空间支撑”于一体的岩层移动控制技术体系。

针对极端气候扰动下覆岩裂隙扩展与采空区活化沉陷问题,需构建覆岩裂隙精准调控工程系统(图6)。该系统基于微震监测、钻孔雷达与分布式光纤传感技术,实现采动裂隙三维形态的动态识别与定量表征;研发裂隙分层分阶段控制工艺及具有渗透自调节功能的智能注浆材料,通过优化开采工艺参数抑制裂隙发育,并采用定向注浆技术对关键层位裂隙实施靶向封堵;最终构建涵盖“地质建模-裂隙预测-工程调控-效果评估”全流程的岩层变形控制智能决策平台,实现覆岩裂隙发育的精准预测与分级主动控制。

3.4 以生态保护为核心的韧性修复减损技术

针对极端气候扰动下煤矿区表土流失与生态系统退化问题,构建融合生态过程调控与工程干预的地表侵蚀协同治理体系(图7)。通过创新地貌重塑导向的径流调控技术,建立截排沟渠与生态植被协同系统,提升表层土壤抗侵蚀能力;研发环境友好型土壤固化与改良材料,形成“地形重塑-土壤结构改良-植被群落重建”一体化的生态修复模式,发展适应区域气候与地质特征的矿区地表土层结构调控与生态功能恢复技术体系。

针对极端气候扰动下煤矿区污染物迁移扩散与修复难题,构建贯穿“源头阻控-过程拦截-生态净化”的全流程污染防控体系。研发基于功能材料(如改性生物炭、矿物复合材料)的污染物原位稳定与降解技术;发展人工湿地与生态渗滤相结合的深度净化工艺;创新基于水文连通性调控的生态修复设计方法,有效控制污染物迁移路径。最终形成“源头削减-过程阻断-末端净化”协同的矿区污染韧性防控

技术体系。

3.5 以多圈层损害风险管控为核心决策平台

研发集成地质-采矿-水文-生态多过程耦合模拟的多圈层管理支持系统,构建涵盖大气降水入渗、地下水流动态响应、岩体裂隙扩展、岩层移动变形及地表生态演化的综合数值模型,实现对极端气候与采动影响下多圈层损害过程的协同分析。在此基础上,建立多源异构数据的多圈层动态三维可视化平台,形成可动态更新的矿区数字孪生系统,为多尺度风险识别与系统管理提供支撑。

研究融合物理机理与数据驱动的极端气候扰动下煤矿区多圈层风险评估与预警方法,构建包含岩层稳定性指数、水文扰动强度与生态响应参数的动态风险评估模型,识别极端气候扰动下多圈层损害传导路径与系统临界阈值;最终形成以“监测-模拟-评估-预警-调控”为核心的多圈层损害风险智能决策平台(图8),实现极端气候扰动下矿区多圈层损害风险的超前预警与系统韧性防控。

4 结语

(1)极端气候扰动下煤矿区地质条件的演化是“大气-水-岩石-土壤-生物”多圈层耦合作用下的损害过程,主要表现为“气候-水文-地质-工程”链式响应。其核心机制在于,极端降水事件改变矿区水循环条件并弱化岩土体力学参数,从而打破原有地质结构的力学平衡,诱发边坡失稳、岩层沉降开裂、矿井涌突水及采空区塌陷等一系列地质灾害。

(2)极端气候下的煤炭减损开采地质保障,关键在于系统揭示煤矿区“大气-水-岩石-土壤-生物”多圈层在极端气候扰动下的耦合关系与动态演化规律。需构建适应极端气候的“空-天-地-井”一体化智能监测体系,动态获取多圈层结构与界面信息,实现地质结构、水文过程与岩体变形的透明化表征,进而实现对地质损害的精准识别与超前预警。

(3)岩层移动变形控制与矿区水文调控是极端气候下煤矿区减损开采保障的核心工程内容。应推动从被动防治向主动适应性调控转变,增强岩层变形调控的韧性,并建立“蓄-排-疏-净-用”协同的水文地质综合管理体系,以降低极端降雨向开采地质风险及地表灾害转化的概率。

(4)减损开采保障需基于多圈层相互作用视角,建立覆盖勘查、开采、监测与修复全过程的风险管控体系,构建面向极端气候地质灾害的风险评估与智能决策平台,完善应急响应机制,提升煤矿区对极端

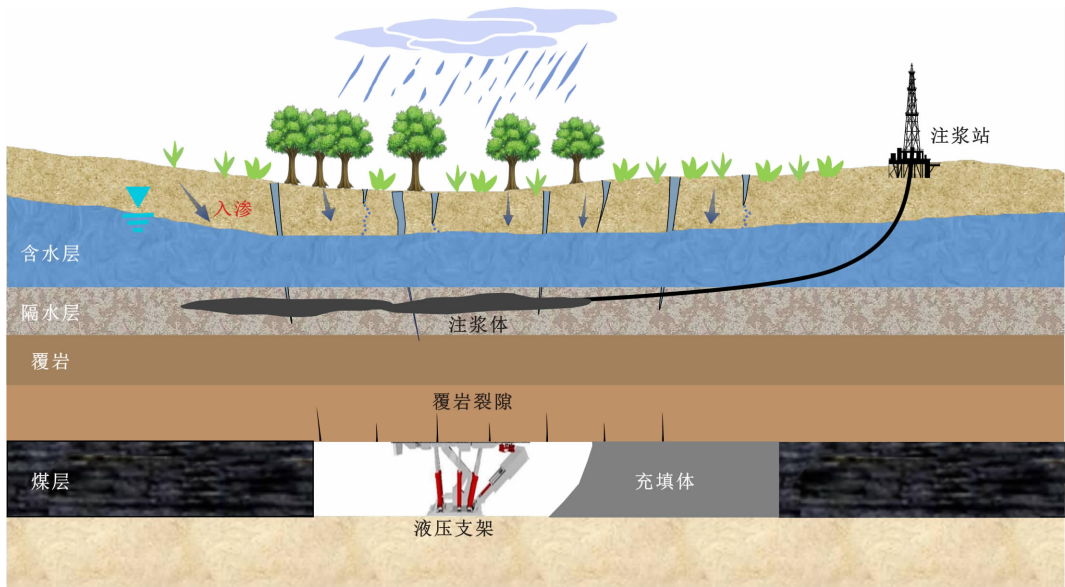


图 6 极端气候下覆岩变形调控

Fig. 6 Deformation Control of Overlying Rock Under Extreme Climate Conditions

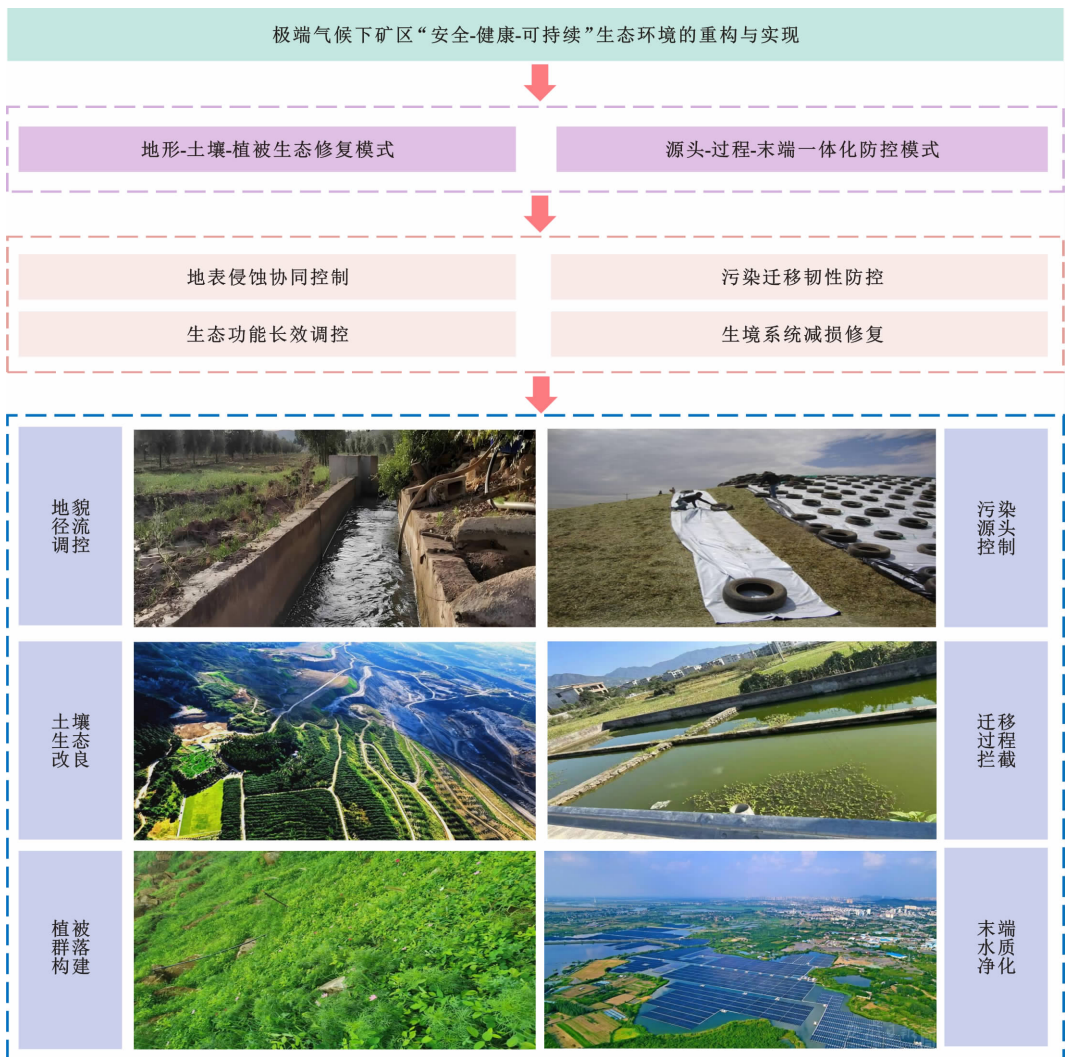


图 7 极端气候下煤矿区生态环境修复技术体系

Fig. 7 Technological System for Environmental Restoration in Coal Mining Areas Under Extreme Climate Conditions

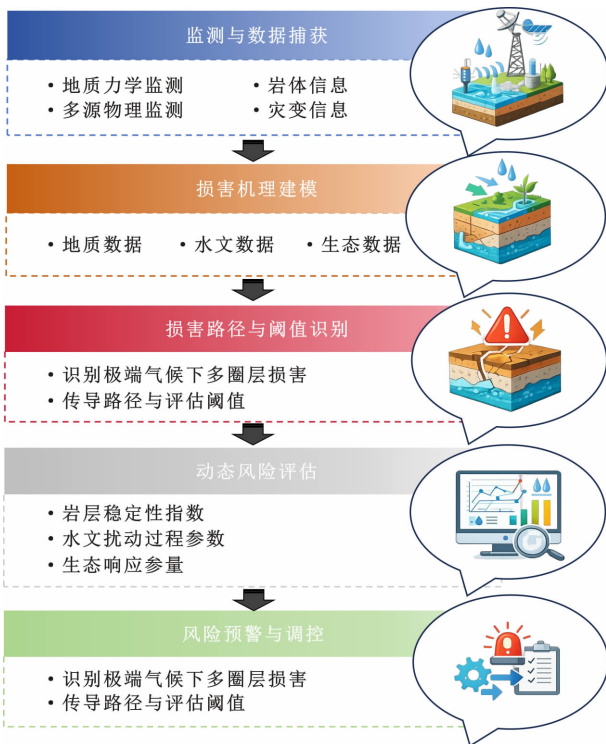


图 8 多圈层损害风险管控核心决策平台

Fig. 8 Core Decision-making Platform for Multi-layer Damage Risk Management

气候的防御与适应能力,保障煤炭资源在气候风险下的安全、高效与绿色开发。

参考文献:

References:

- [1] 顾煜,马超,吕立群. 2005~2021年大河坝流域极端气候及其对滑坡的影响[J]. 水土保持学报, 2025, DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.003.
GU Yu, MA Chao, LYU Li-qun. Extreme Climate Events and Their Impacts on Landslides in the Daheba Watershed from 2005 to 2021[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.003.
- [2] 赵连春,樊庆曦,杨柳. 极端气候对黄河流域上游地区社会脆弱性的冲击效应[J]. 灾害学, 2025, 40(2): 52-60.
ZHAO Lian-chun, FAN Qing-xi, YANG Liu. Impact of Extreme Climate on Social Vulnerability in the Upper Reaches of the Yellow River Basin[J]. Journal of Catastrophology, 2025, 40(2): 52-60.
- [3] 王明玮,温跃修,严登华,等. 黄河流域未来极端气候事件变化趋势评估[J]. 人民黄河, 2023, 45(2): 33-37.
WANG Ming-wei, WEN Yue-xiu, YAN Deng-hua, et al. Assessment of Future Trends of Extreme Climate

Events in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2023, 45(2): 33-37.

- [4] 曹云,孙应龙,陈紫璇,等. 2000~2020年黄河流域植被生态质量变化及其对极端气候的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4524-4535.
CAO Yun, SUN Ying-long, CHEN Zi-xuan, et al. Dynamic Changes of Vegetation Ecological Quality in the Yellow River Basin and Its Response to Extreme Climate During 2000-2020[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4524-4535.
- [5] 王双明,耿济世,李鹏飞,等. 煤炭绿色开发地质保障体系的构建[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 33-43.
WANG Shuang-ming, GENG Ji-shi, LI Peng-fei, et al. Construction of Geological Guarantee System for Green Coal Mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 33-43.
- [6] 王双明,李识博,孙强,等. 论“碳、水、环”约束下的煤炭减损开采地质保障[J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(1): 1-11.
WANG Shuang-ming, LI Shi-bo, SUN Qiang, et al. Geological Guarantee for Coal Damage Reduction Mining Under the Restriction of “Carbon-water-environment” [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2025, 45(1): 1-11.
- [7] 王双明,孙强,袁士豪,等. 论煤-水-土多资源协调开发[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 1-10.
WANG Shuang-ming, SUN Qiang, YUAN Shi-hao, et al. On the Coordinated Development of Coal-water-soil Multiple Resources[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 1-10.
- [8] 赵平,谭克龙,韩效忠,等. 新形势下我国能源与生态安全保障研究[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(1): 1-7.
ZHAO Ping, TAN Ke-long, HAN Xiao-zhong, et al. Research for Energy and Ecological Security in China Under New Situation[J]. Coal Geology of China, 2021, 33(1): 1-7.
- [9] 王双明,孙强,耿济世,等. 西部矿区采动损害及减损开采的地质保障技术框架体系[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(9): 1-13.
WANG Shuang-ming, SUN Qiang, GENG Ji-shi, et al. Geological Support Technology Framework System for Mining Induced Hazards and Damage Reduction Mining of Geological Conditions in Western Mining Area[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(9): 1-13.
- [10] 王双明,孙强,李识博,等. 论煤炭开采多圈层响应与减损保障[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(10): 1-

11.
WANG Shuang-ming, SUN Qiang, LI Shi-bo, et al. Discussion on Multi-sphere Responses and Damage Reduction-oriented Geological Guarantees in Coal Mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(10):1-11.
- [11] 杜华栋,刘海燕,毕银丽,等.半干旱煤矿区采动地裂缝发育对植物群落结构及物种分布格局的影响[J].*地球科学与环境学报*,2025,47(4):750-764.
DU Hua-dong, LIU Hai-yan, BI Yin-li, et al. Effects of Mining-induced Ground Fissure Development on Plant Community Structure and Species Distribution Pattern in Semi-arid Coal Mining Area, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2025, 47(4):750-764.
- [12] 王双明,耿济世,孙强,等.黄河流域中上游地区碳基资源协调开发减损地质保障[J].*中国矿业大学学报*,2025,54(6):1181-1193.
WANG Shuang-ming, GENG Ji-shi, SUN Qiang, et al. Geological Support for Coordinated Exploitation and Damage Reduction of Carbon-based Resources in the Middle and Upper Reaches of the Yellow River Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2025, 54(6):1181-1193.
- [13] 段纪元,耿济世,王双明,等.富油煤热解煤及覆岩温度场时空演化特征[J].*煤炭科学技术*,2025,53(10):60-73.
DUAN Ji-yuan, GENG Ji-shi, WANG Shuang-ming, et al. Spatio-temporal Evolution of Temperature Fields in Tar-rich Coal and Overlying Strata During Pyrolysis[J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(10):60-73.
- [14] 魏江波,王双明,刘浪,等.基于多场信息融合的采动覆岩宏-细观损伤演化及“两带”发育位置判识[J].*煤田地质与勘探*,2025,53(4):128-140.
WEI Jiang-bo, WANG Shuang-ming, LIU Lang, et al. Multi-field Information Fusion-based Analysis of the Macroscopic and Mesoscopic Damage Evolution and Location Identification of Caving and Water-conducting Fracture Zones for Mining Overburden[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(4):128-140.
- [15] 张东,曹莹,赵志琦,等.煤矿开采活动对黄河中游窟野河流域溶解性硫酸盐的影响[J].*地球科学与环境学报*,2023,45(2):414-426.
ZHANG Dong, CAO Ying, ZHAO Zhi-qi, et al. Impacts of Coal Mining Activities on Dissolved Sulfate in the Kuye River Basin, the Midstream of Yellow River, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023, 45(2):414-426.
- [16] 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 Li-min, XIANG Mao-xi, PENG Jie, et al. Groundwater Response to Intensive Mining in Ecologically Fragile Area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(11):2672-2678.
- [17] 王双明,孙强,谷超,等.煤炭开发推动地学研究发展[J].*中国煤炭*,2024,50(1):2-8.
WANG Shuang-ming, SUN Qiang, GU Chao, et al. The Development of Geoscientific Research Promoted by Coal Exploitation[J]. *China Coal*, 2024, 50(1):2-8.
- [18] 刘晓攀,王峰,李晓斌,等.极端暴雨天气对矿井水文地质条件的影响分析:以梁北矿防治水工作为例[J].*能源与环保*,2024,46(6):93-98.
LIU Xiao-pan, WANG Feng, LI Xiao-bin, et al. Analysis of Influence of Extreme Rainstorm Weather on Mine Hydrogeological Conditions: Taking Water Prevention and Control Work of Liangbei Mine as an Example[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2024, 46(6):93-98.
- [19] 邵彦斌,陈尚波,王清和,等.暴雨洪水诱发地下铀矿灾害链式演化及风险分析[J].*有色金属科学与工程*, 2024, 15(5):750-757.
SHAO Yan-bin, CHEN Shang-bo, WANG Qing-he, et al. Chain Evolution and Risk Analysis of Underground Tungsten Mine Disasters Induced by Rainstorm and Flood[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2024, 15(5):750-757.
- [20] 崔慧慧,李荣,郜彦娜,等.“7·20”郑州极端特大暴雨降水细节特征和成灾过程研究[J].*灾害学*,2023,38(2):114-120,149.
CUI Hui-hui, LI Rong, GAO Yan-na, et al. Study on the Precipitation Details and Disaster Formation Process of “7·20” Extreme Rainstorm in Zhengzhou [J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, 38(2):114-120,149.
- [21] 张颂扬,张巍,杨鹏辉,等.模拟降雨条件下重构阻水层对坡面风化煤矸石产流产沙的影响[J].*水土保持通报*,2024,44(2):101-109.
ZHANG Song-yang, ZHANG Wei, YANG Peng-hui, et al. Effect of Reconstructed Water-blocking Layers on Sediment Production from Weathered Coal Gangue on Slopes Under Simulated Rainfall Conditions [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(2):101-109.
- [22] 郝增超,陈阳.地球系统视角下的多圈层复合极端

- 事件研究进展与展望[J]. 中国科学:地球科学, 2024, 54(2):360-393.
- HAO Zeng-chao, CHEN Yang. Research Progresses and Prospects of Multi-sphere Compound Extremes from the Earth System Perspective[J]. Science China: Earth Sciences, 2024, 54(2):360-393.
- [23] GUAN Y S, GU X H, DAI A G, et al. Anthropogenic Enhancement of Subsurface Soil Moisture Droughts [J]. Nature Climate Change, 2025, 15:1355-1362.
- [24] GU X H, JIANG Z M, GUAN Y S, et al. Frequent Land-ocean Transboundary Migration of Tropical Heatwaves Under Climate Change[J]. Nature Communications, 2025, 16:3400.
- [25] TAYLOR L L, QUIRK J, THORLEY R M S, et al. Enhanced Weathering Strategies for Stabilizing Climate and Averting Ocean Acidification[J]. Nature Climate Change, 2015, 6:402-406.
- [26] LE P V V, KUMAR P. Interaction Between Ecohydrologic Dynamics and Microtopographic Variability Under Climate Change[J]. Water Resources Research, 2017, 53(10):8383-8403.
- [27] 杨顺华, 宋效东, 吴华勇, 等. 地球关键带研究评述: 现状与展望[J]. 土壤学报, 2024, 61(2):308-318.
- YANG Shun-hua, SONG Xiao-dong, WU Hua-yong, et al. A Review and Discussion on the Earth's Critical Zone Research: Status Quo and Prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2):308-318.
- [28] 刘丛强, 陈春梅, 晏智锋, 等. 地球关键带科学与全球变化研究[J]. 科学通报, 2025, 70(32):5483-5497.
- LIU Cong-qiang, CHEN Chun-mei, YAN Zhi-feng, et al. Earth Critical Zone Science and Global Change Research[J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(32):5483-5497.
- [29] 刘丛强, 宋照亮, 宋长春, 等. 滨海地球关键带科学: 一个新兴的研究领域[J]. 科学通报, 2025, 70(32):5498-5514.
- LIU Cong-qiang, SONG Zhao-liang, SONG Chang-chun, et al. The Coastal Critical Zone Sciences: An Emerging Research Area[J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(32):5498-5514.
- [30] 王双明, 孙强, 耿济世, 等. 煤炭开采地球关键带响应及减损开采技术体系[J]. 中国地质, 2025, 52(1):1-21.
- WANG Shuang-ming, SUN Qiang, GENG Ji-shi, et al. Geological Support for Response and Damage Reduction in the Earth's Critical Zone Under Coal Mining [J]. Geology in China, 2025, 52(1):1-21.
- [31] 杨建锋, 张翠光. 地球关键带: 地质环境研究的新框架 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3):98-104, 110.
- YANG Jian-feng, ZHANG Cui-guang. Earth's Critical Zone: A Holistic Framework for Geo-environmental Researches[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3):98-104, 110.
- [32] 韩熠哲, 廖捷, 赵煜飞, 等. 青藏高原多圈层观测网络与气候暖湿化研究的现状与展望[J]. 高原气象, 2025, DOI:10.7522/j.issn.1000-0534.2025.00096.
- HAN Yi-zhe, LIAO Jie, ZHAO Yu-fei, et al. Multi-sphere Observation Network and Climate Warming and Humidification Research on the Qinghai-Xizang Plateau: Advances and Future Directions[J]. Plateau Meteorology, 2025, DOI:10.7522/j.issn.1000-0534.2025.00096.
- [33] 张甘霖, 朱永官, 邵明安. 地球关键带过程与水土资源可持续利用的机理[J]. 中国科学:地球科学, 2019, 49(12):1945-1947.
- ZHANG Gan-lin, ZHU Yong-guan, SHAO Ming-an. Understanding Sustainability of Soil and Water Resources in a Critical Zone Perspective [J]. Science China: Earth Sciences, 2019, 49(12):1945-1947.
- [34] FRIEDLINGSTEIN P, O'SULLIVAN M, JONES M W, et al. Global Carbon Budget 2024 [J]. Earth System Science Data, 2025, 17(3):965-1039.
- [35] 李思亮, 王浩阳, 晏智锋, 等. 地球关键带过程和生态环境效应研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2025, 44(4):695-709.
- LI Si-liang, WANG Hao-yang, YAN Zhi-feng, et al. Research Progresses in Processes and Eco-environmental Effects of Earth's Critical Zone[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2025, 44(4):695-709.
- [36] 陈琪, 王晓丹, 夏炎, 等. 地球关键带生态系统服务评价方法研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2022, 58(6):1070-1086.
- CHEN Qi, WANG Xiao-dan, XIA Yan, et al. Research on the Evaluation Method of the Ecosystem Services of Earth's Critical Zone[J]. Journal of Nanjing University(Natural Science), 2022, 58(6):1070-1086.
- [37] 温学发, 张心昱, 魏杰, 等. 地球关键带视角理解生态系统碳生物地球化学过程与机制[J]. 地球科学进展, 2019, 34(5):471-479.
- WEN Xue-fa, ZHANG Xin-yu, WEI Jie, et al. Understanding the Biogeochemical Process and Mechanism of Ecosystem Carbon Cycle from the Perspective of the Earth's Critical Zone[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(5):471-479.
- [38] 钱鸣高, 许家林, 王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. 煤

- 炭学报,2018,43(1):1-13.
- QIAN Ming-gao, XU Jia-lin, WANG Jia-chen. Further on the Sustainable Mining of Coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1):1-13.
- [39] 袁士豪,孙 强,耿济世,等.鄂尔多斯盆地东北缘烧变岩工程地质效应[J]. 西北地质,2025,58(5):192-203.
- YUAN Shi-hao, SUN Qiang, GENG Ji-shi, et al. Engineering Geological Effects of Burnt Rocks in the Northeastern Margin of Ordos Basin[J]. Northwest-ern Geology, 2025, 58(5):192-203.
- [40] 孙 强,张卫强,耿济世,等.利用煤炭开发地下空间储能的技术路径与地质保障[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2):229-242.
- SUN Qiang, ZHANG Wei-qiang, GENG Ji-shi, et al. Technological Path and Geological Guarantee for Energy Storage in Underground Space Formed by Coal Mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2):229-242.
- [41] 孙 强,谷 超,耿济世,等.煤矿地下空间生物质储能及地质保障[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(4):70-79.
- SUN Qiang, GU Chao, GENG Ji-shi, et al. Biomass Energy Storage and Geological Safeguards in Underground Coal Mine Spaces[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4):70-79.
- [42] 唐 夺,高成林,朱筱宇.矿山地质灾害和工程地质水文地质环境问题的预防策略探析[J]. 中国矿业, 2024, 33(增1):120-123.
- TANG Duo, GAO Cheng-lin, ZHU Xiao-yu. Analysis of Prevention Strategies for Mining Geological Disasters and Engineering Geological Hydrogeological Environmental Issues[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S1):120-123.
- [43] 孙亚军,李 鑫,冯 琳,等.鄂尔多斯盆地煤-水协调开采下矿区水资源异位回灌-存储技术思路[J]. 煤炭学报,2022,47(10):3547-3560.
- SUN Ya-jun, LI Xin, FENG Lin, et al. Technical Thinking on Ectopic Injection and Storage of Mine Area Water Resources Under the Coordinated Exploitation of Coal and Water Background in Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10):3547-3560.
- [44] 王双明,孙 强,胡 鑫,等.煤炭原位开发地质保障[J]. 西安科技大学学报,2024,44(1):1-11.
- WANG Shuang-ming, SUN Qiang, HU Xin, et al. Geological Guarantee for *In-situ* Development of Coal [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(1):1-11.
- [45] 王双明,孙 强,郭 晨,等.新质生产力赋能煤炭地质工作发展[J]. 中国煤炭,2025,51(10):1-16.
- WANG Shuang-ming, SUN Qiang, GUO Chen, et al. The Development of Coal Geology Work Empowered by New Quality Productive Forces[J]. China Coal, 2025, 51(10):1-16.
- [46] 王双明,孙 强,胡 鑫,等.煤炭开采地质体复合损害与减损保障[J]. 煤田地质与勘探,2025,53(1):1-11.
- WANG Shuang-ming, SUN Qiang, HU Xin, et al. Coal Mining-induced Composite Damage to Geological Bodies and Geological Guarantee Against Damage Reduction[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(1):1-11.
- [47] 973计划(2013CB227900)“西部煤炭高强度开采下地质灾害防治与环境保护基础研究”项目组.西部煤炭高强度开采下地质灾害防治理论与方法研究进展[J]. 煤炭学报,2017,42(2):267-275.
- Research Group of National Key Basic Research Program of China(2013CB227900) (Basic Study on Geological Hazard Prevention and Environmental Protection in High Intensity Mining of Western Coal Area). Theory and Method Research of Geological Disaster Prevention on High-intensity Coal Exploitation in the West Areas[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2):267-275.
- [48] 谢和平,张 茹,邓建辉,等.基于“深地-地表”联动的深地科学与地灾防控技术体系初探[J]. 工程科学与技术,2021,53(4):1-12.
- XIE He-ping, ZHANG Ru, DENG Jian-hui, et al. A Preliminary Study on the Technical System of Deep Earth Science and Geo Disaster Prevention-control Based on the “Deep Earth-surface” Linkage Strategy [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4):1-12.