

doi: 10.12029/gc20240506001

王双明, 孙强, 耿济世, 袁士豪, 贾海梁, 王生全, 张卫强, 胡建军, 李得路. 2025. 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, 52(1): 1–21.

Wang Shuangming, Sun Qiang, Geng Jishi, Yuan Shihao, Jia Hailiang, Wang Shengquan, Zhang Weiqiang, Hu Jianjun, Li Delu. 2025. Geological support for response and damage reduction in the Earth's critical zone under coal mining[J]. Geology in China, 52(1): 1–21(in Chinese with English abstract).

煤炭开采地球关键带响应及减损开采技术体系

王双明^{1,2,3}, 孙强^{1,2,3}, 耿济世^{1,2}, 袁士豪², 贾海梁⁴, 王生全^{1,2}, 张卫强⁵,
胡建军⁶, 李得路^{1,2,3}

(1. 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. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 5. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 6. 深圳大学深地科学与绿色能源研究院, 广东省深地科学与地热能开发利用重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要:【研究目的】破解能源安全兜底保障和生态环境保护的矛盾是当前生态脆弱区煤炭资源开发面临重大难题。煤炭资源大规模、高强度的开采在引起地质条件快速变化的同时,也影响着矿区地球关键带结构和功能。地球关键带是指从地下水底部或者土壤-岩石交界面一直向上延伸至植被冠层顶部的连续体域。【研究方法】围绕如何理解地球关键带运行与煤炭开发地质条件演化的关系,基于煤炭采动地质条件解析与关键带响应阐明了煤炭开采影响区地球关键带的响应模式、监控技术、预测方法和保障策略及减损工程。立足“煤炭资源开采地质条件演化与地球关键带保护”,从关键带对煤炭开发响应的科学内涵、科学问题、研究思路和保障方案四个方面,系统剖析了煤炭开发地球关键带减损保障的理论与技术。【研究结果】关键带对煤炭开采响应研究思路主线是“煤炭采前地质条件和关键带结构及要素→地质条件变化和关键带响应模式及演化状态判识→全时空主被动多源信息响应及动态监控→关键带结构-功能动态演化模型及智能预测评价→关键带减损地质保障策略及修复-重构一体化技术方法”。研究内容包括:(1)查明煤炭赋存的地质结构、水文地质、岩层组合、地应力等开采地质条件因素综合特征,揭示地球关键带和下部煤层、岩层及地下水的空间关系特征,进行对关键带多要素、多模态、多场景的精细表征,形成包括环境承载力指标体系、评价模型和承载力分区在内的快速查询、智能分析数字化平台;(2)解析开采影响下岩(土)层裂隙场与关键带水文循环的连通关系,揭示地质条件和关键带的协同演化机制,提出地球关键带对煤炭开发响应模式的判识方法;(3)研究开采因素下岩层结构、裂隙网络、渗流通道、应力-能量集中特征、物质循环、能量交换与多源信息场的时空演化关系,构建煤炭开发全生命周期下的地球关键带全时空信息响应映射模型;(4)构建煤炭开采全生命周期条件下地球关键带空-天-地-钻(孔)-井(下)的全空间、多方位的多源信息量融合监测体系,形成煤炭开采影响下地球关键带界面结构和运行过程要素监控分析系统,预测分析煤炭开发区地球关键带的结构变化、响应模式、运行过程和生态环境效应;(5)提出煤及煤系资源协同开发、矿井水综合利用、煤炭开发地下空间规模化利用等技术,建立基于多源信息的地质条件和关键带结构监控技术,实现“地质结构条件透明化、损害关键要素数字化、演化过程监控信息化、模型预测智能化、关键带保障技术精准化”。【结论】地球关键带地质保障涵盖地质条件、开采模式、监控系统、预测方法和减损技术等方面,追求煤炭安全开采与地质环境保护协调发展,破解资

收稿日期: 2024-05-06; 改回日期: 2024-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42330808), 陕西省“两链”融合重点专项(2023-LL-QY-05), 陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBQN-0289)以及陕西省博士后科研项目(2023BSHEDZZ304)联合资助。

作者简介: 王双明, 1955 年生, 男, 中国工程院院士, 从事煤田地质勘探及矿区环境保护等方面研究; E-mail: sxmtwsm@163.com。

通信作者: 孙强, 1981 年生, 男, 教授, 博士生导师, 从事煤矿工程地质、岩土体稳定性与地质灾害防治方面研究工作;
E-mail: sunqiang04@cumt.edu.cn。

源开发与地质环境制约之间矛盾,完善生态脆弱区煤及煤系资源综合开发和地球关键带功能减损保护及修复重构的理论与技术,为建设资源节约型和环境友好型社会提供地质、力学、物理基础的科学依据,推动煤炭工程实践与安全理论深入发展。

关键词: 煤炭; 地球关键带; 开采地质条件; 响应模式; 多场信息; 综合开发利用; 矿产勘查工程

创新点: (1)阐述了地球关键带对煤炭开发响应的科学内涵、科学问题、研究思路和保障方案,揭示地质条件和地球关键带的协同演化机制,提出了煤炭减损开采技术体系;(2)构建了煤炭开发地球关键带减损保障的理论与技术,为破解国家能源需求与环境保护之间矛盾提供战略思考。

中图分类号: TD82 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)01-0001-21

Geological support for response and damage reduction in the Earth's critical zone under coal mining

WANG Shuangming^{1,2,3}, SUN Qiang^{1,2,3}, GENG Jishi^{1,2}, YUAN Shihao², JIA Hailiang⁴,
WANG Shengquan^{1,2}, ZHANG Weiqiang⁵, HU Jianjun⁶, LI Delu^{1,2,3}

(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. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Jiangsu 221116, Xuzhou, China; 6. Guangdong Provincial Key Laboratory of Deep Earth Sciences and Geothermal Energy Exploitation and Utilization, Institute of Deep Earth Sciences and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Cracking the contradiction between energy security and ecological environment protection is a major challenge for the development of coal resources in ecologically fragile areas. The large-scale and intensive extraction of coal resources not only triggers rapid changes in geological conditions but also impacts the structure and function of the Earth's critical zone in mining areas. The Earth's critical zone refers to a continuous domain that extends upwards from the bottom of groundwater or soil rock interface to the top of vegetation canopy. **[Methods]** Focusing on how to understand the relationship between the operation of the Earth's critical zone and the evolution of geological conditions for coal development, based on the analysis of coal mining geological conditions and the response of the Earth's critical zone, this paper elucidates the response mode, monitoring technology, prediction methods, guarantee strategies, and loss reduction work of the Earth's critical zone in coal mining affected areas. Based on the evolution of geological conditions for coal resource extraction and the protection of the Earth's critical zone, this paper systematically analyzes the theory and technology of reducing losses and ensuring coal development in the Earth's critical zone from four aspects: Scientific connotation, scientific problems, research ideas, and guarantee plans. **[Results]** The overall approach of the research on the response of the Earth's critical zone to coal mining is structured as "Pre-mining geological conditions and key zone structures and elements → Geological condition changes and the Earth's critical zone response modes and evolution status identification → Full time and space active and passive multi-source information response and dynamic monitoring → The Earth's critical zone structure functional dynamic evolution model and intelligent prediction evaluation → The Earth's critical zone loss reduction geological guarantee strategy and restoration reconstruction integrated technical method". The research content includes: (1) Identify the comprehensive characteristics of mining geological conditions such as geological structure, hydrogeology, rock layer combination, and crustal stress with coal occurrence, reveal the spatial relationship characteristics of the Earth's critical and lower coal seams, rock layers, and groundwater, and finely characterize the critical zone with multiple elements, modes, and scenarios, forming a fast query and intelligent analysis digital platform including environmental bearing capacity indicator system, evaluation model, and bearing capacity zoning. (2) Analyze the connection between fracture fields of rock (soil) layers under the impact of mining and the

hydrological cycle of critical zones, revealing the synergistic evolution mechanism of geological conditions and critical zones and proposes methods for identifying the response patterns of the Earth's critical zone to coal development. (3) Investigate the temporal and spatial evolution of rock layer structures, fracture networks, seepage channels, stress-energy concentration characteristics, material cycles, energy exchanges, and the multi-source information field under mining factors and construct the spatial-temporal information response model of the Earth's critical zone under the whole life cycle of coal development. (4) Construct a spatial and multi-directional multi-source information fusion monitoring system for the space-sky-earth-drill-well under the conditions of the whole life cycle of coal mining, form a monitoring and analysis system for the interfacial structure and operation process elements of the Earth's critical zone under the influence of coal mining and predict the structural changes, response patterns, operational processes and ecological and environmental effects of the Earth's critical zone in the coal development zone. (5) Propose technologies such as collaborative development of coal and coal measures resources, comprehensive utilization of mine water, and large-scale utilization of underground space in coal development, functional reconstruction. Establish a geological condition and critical zone structure monitoring technology based on multi-source information, achieving "transparency of geological structural conditions, digitization of key damage elements, informatization of evolution process monitoring, intelligent model prediction, and precision of critical zones protection technology". **[Conclusions]** The geological guarantee of the Earth's critical zone covers geological conditions, mining modes, monitoring systems, prediction methods, and loss reduction technologies. It pursues the coordinated development of coal safety mining and geological environment protection, solves the contradiction between resource development and geological environment constraints, improves the theory and technology of comprehensive development of coal and coal bearing resources in ecologically fragile areas, and the protection, restoration, and reconstruction of the Earth's critical zone functions. It provides a scientific basis for geological, mechanical, and physical foundations to build a resource-saving and environmentally friendly society, and promotes the in-depth development of coal engineering practice and safety theory.

Key words: coal; Earth's critical zone; mining geological conditions; response modes; multiple field information; comprehensive development and utilization; mineral exploration engineering

Highlights: (1) The paper expounded the scientific connotation, scientific problems, research ideas and guarantee schemes of the response of the Earth's critical zone to coal development, reveal the co-evolution mechanism of geological conditions and the Earth's critical zone, and propose the technical system of coal loss reduction mining; (2) The paper constructed a theory and technology for reducing losses in coal development in the Earth's critical zone, providing strategic thinking for solving the contradiction between national energy demand and environmental protection

About the first author: WANG Shuangming, born in 1955, male, Academician of Chinese Academy of Engineering, engaged in coal geological exploration and environmental protection in mining areas; E-mail: sxmtwsm@163.com.

About the corresponding author: SUN Qiang, born in 1981, male, professor, doctoral supervisor, engaged in research on coal mine engineering geology, rock and soil stability, and geological disaster prevention and control; E-mail: sunqiang04@cumt.edu.cn.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42330808), "Two-chain" fusion key program of Shaanxi Province (No.2023-LL-QY-05), Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (No.2024JC-YBQN-0289), Postdoctoral Research Project of Shaanxi Province, China (No.2023BSHEDZZ304).

1 引 言

保障能源战略安全和维系生态环境平衡是筑牢强国和可持续发展的基石,也是当前的重大议题之一(王佟等, 2017; 武强和涂坤等, 2019; 赵平等, 2021; 王国法等, 2021; 卞正富和雷少刚, 2020; 谢克昌, 2022)。我国煤炭的主体能源地位短期内难以改变,煤炭是我国能源发展的兜底保障(中国工程院, 2011; 李勇等, 2022)。由于东部煤炭资源趋于

枯竭,西部矿区(晋陕蒙宁甘新)已成为保障我国能源安全的核心区域。然而,西部煤矿区脆弱的生态环境制约着煤炭资源高效绿色开发(范立民等, 2016; 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, 2017; 王双明等, 2020, 2021; 黄艳利等, 2022; 焦华喆等, 2024),同时煤炭开采引起的地质条件响应也改变了矿区生态环境要素(顾大钊等, 2016; 张东升等, 2017; 刘海平和王义, 2023; 李全生, 2023; 王

双明等, 2024)。因此, 如何理解复杂多变的采动地质条件和环境影响, 是破解西部生态脆弱区大规模、高强度安全绿色开发和生态环境减损保护的关键, 推动新时代煤炭工业高质量发展的重大需求(孙强等, 2023; 王双明等, 2023, 2024)。

2001 年美国国家研究理事会(NRC)出版的《地球科学基础研究的机遇》(Basci Research Opportunities in Earth Science)提出了以地球系统科学理论为指导的地球关键带(Earth's critical zone)理念(杨建锋和张翠光, 2014; 李小雁和马育军, 2016; 安培浚等, 2016; 刘金涛等, 2019; 骆占斌等, 2022; 陈喜和张志才, 2022)。地球关键带是指从地下水底部或者土壤-岩石交界面一直向上延伸至植被冠层顶部的连续体域。地球关键带研究关注大气、土壤、水、生物和岩石五个圈层交汇带的多圈层相互作用及其环境敏感性(Riebe et al., 2017; 马腾等, 2020; 杨建锋等, 2023; 张甘霖等, 2023; 张君等, 2024), 强调时空结构及要素组成、物理-化学-生物演化过程及驱动机制, 生态环境服务功能及评价保护, 并建立了驱动力-压力-状态-影响-响应体系(Driver-Pressure-State-Impact-Response)的跨学科研究思路和范式(朱永官等, 2015; 吕玉香等, 2019)。随着“双碳”目标的提出和“生态文明”、“可持续发展”、“宜居地球”等理念的深入, 煤炭绿色开发地质保障探索和地球关键带研究具有高度相通性(杨建锋和张翠光, 2014)。煤炭开发在近地表的高强度、长时间开发, 造成煤矿区生态环境脆弱, 诱发诸如地下水体和地表景观破坏、地表裂隙、自然植被破坏、地表裸露和土壤侵蚀等生态环境问题。此外, 煤炭开采局部上扰动了地球关键带界面结构(包气带-饱水带界面、弱透水-含水层界面、含水层-基岩界面等)和“深-浅-表”三维层次上的关键带要素(水-气-岩-土-植被等)空间组合特征, 改变原关键带的运行过程、物质循环、能量交换、信息传递和功能服务, 这也为探索岩-水-土-气-生多圈层相互作用的地学研究提供了“实践窗口”, 可深度揭示地球浅表层系统的相互作用及演化规律。因此, 从地球关键带角度探索煤炭开发地质条件影响和减损地质保障, 是科学前沿和工程实践的重要结合, 其含义体现在: (1)建立维持地表生态环境系统的地球

关键带要素基础上的煤炭开发策略和方法; (2)形成维系与重构地表生态环境平衡的理论体系和工程技术。

本文以煤炭开采地质条件变化对地球关键带影响为出发点, 围绕煤炭安全绿色开发与生态环境保护为目标, 阐述关键带对煤炭开发响应的科学内涵、科学问题、研究思路和保障方案, 解析煤矿区深部地质结构和上部覆岩及地表生态系统在物理结构、化学体系、生态架构上的有机联系, 揭示地质条件和关键带的协同演化机制, 构建煤炭开发地球关键带减损保障的理论与技术, 为破解国家能源需求与环境保护之间矛盾提供战略思考。

2 地球关键带和煤炭开发的关系

2.1 地球关键带的研究内涵

2001 年 NRC 正式提出地球关键带概念以来, 在 20 多年的实践中, 体现了地球系统科学的特色和理念, 推动了多学科融合发展, 形成了特有的科学内涵(张甘霖等, 2021; 蒲俊兵, 2022; 周长松等, 2022; 杨顺华等, 2023; 王俊伟等, 2023)(图 1)。

(1)地球关键带研究是数字驱动(大数据、云数据)时代下的系统地球科学, 具有科学研究、社会服务、决策支持的综合性背景, 与宜居地球、绿色低碳、可持续发展等研究具有高度一致性。

(2)地球关键带是与人类活动密切相关的地球表层区域, 是岩石圈、水圈、土壤圈、大气圈、生物圈交汇的地带, 研究目的可服务于资源保障、能源稳定、生态平衡、食品安全、灾害可控、气候适宜、环境友好、人地和谐等目标。

(3)地球关键带研究是物理、化学、地质、生态等多学科的交叉融合, 包含多要素、多维度、多尺度、多场景、多模态、多相态、多物理过程、多化学体系、多生物群落、多界面效应的多目标综合研究体系。

(4)地球关键带研究注重多圈层结构、过程、功能的相互影响, 强调岩石-水-土壤-大气-生物的多圈层相互作用研究的整体性、系统性和有机关联性, 突出“深度(Deep depth)”、“深时(Deep time)”、“深耦合(Deep coupling)”。

(5)地球关键带是包含三维空间和时间过程的四维时空动态系统, 在空间平面上具有显著的分异

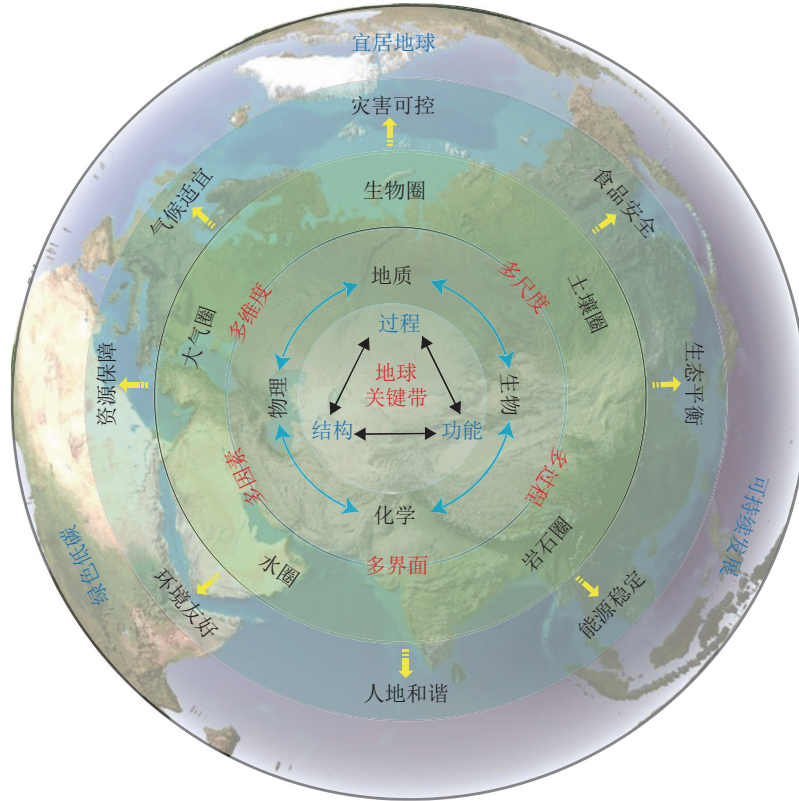


图 1 地球关键带研究逻辑层次

Fig.1 Structured logic of the Earth's critical zone studies

性,在垂向上具有明显的多界面层次性,在时间具有继承性和动态演化特征。

(6)关注关键带结构特征、形成演化、运行机制和社会服务功能,突出物质循环、能量交换、信息传递研究,强调多圈层相互制约与影响下的协同演变过程及生态环境响应。

2.2 地球关键带对煤炭开发响应的科学内涵

煤炭是地质历史中形成上地壳地质体的重要组成部分,在地质结构上承受着上覆岩体自重应力,维系着近地表岩土层的稳定。煤层顶、底板呈现为隔水岩层(泥岩、砂质泥岩或黏性土层)和含水层(砂岩、灰岩等)以及导水裂隙构成的水文地质结构特征,是水圈中地下水重要的储存空间和循环通道。同时,煤层和上覆岩层也是地表土壤圈和生物圈的支撑体。因此,从沉积地质、水文地质、工程地质、生态地质和煤炭开发的综合视角看,煤层和煤层上下岩(土)层和水体构成的空间组合条件,既是煤炭资源的赋存环境,也是地质体应力的支撑体以及地下水赋存体,同时也是土壤圈、生物圈的维系

体(图 2)。

煤炭开发与地球关键带系统之间存在显著的相互制约。一方面,煤炭开采打破了原有地层中的应力平衡,引起地质结构和生态地质条件的变化;另一方面,作为地球关键带中重要组成部分的煤层围岩及应力状态、含水层、生态环境等地质条件要素影响着煤炭的安全绿色开采,如煤矿涌突水、冲击地压、地面塌陷(开裂)、潜水下降、植被干枯等的发生均与地质结构和环境条件密切相关。煤炭开发与地球关键带要素响应的关系(表 1,图 3,图 4)可体现在以下方面:(1)随着地下煤炭开发,周边岩层发生移动变形破裂,在近地表地质体中形成大范围的地下空间,改变了岩(土)层的应力状态、结构状态和接触关系;(2)岩层新生的裂隙改变了地下水的赋存环境与循环路径,引起水-岩作用速率和水的矿物组分的变化,进而影响水圈的局部格局和三水转化;(3)地面变形、沉陷、开裂等会扰动地表的土壤结构和元素组分,改变土壤的孔隙度、热导率、渗透系数等,进而影响土壤圈的生态服务功

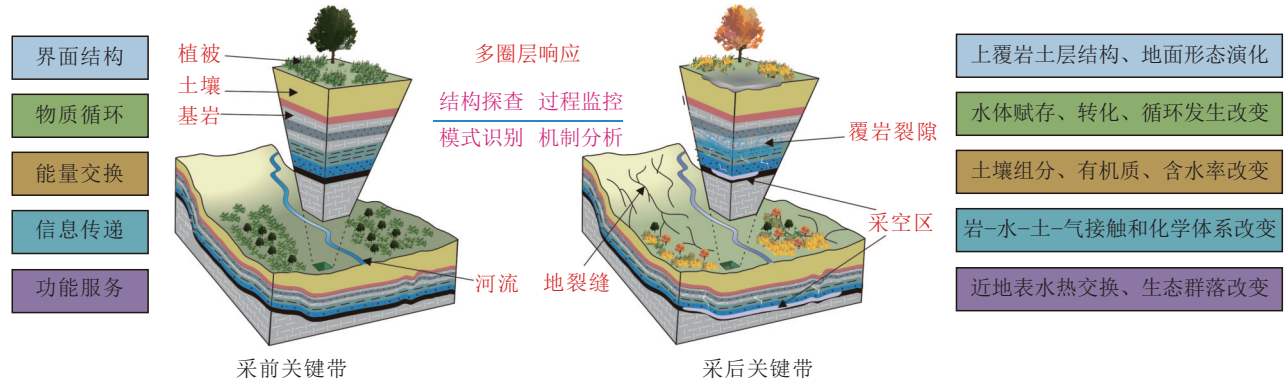


图 2 地球关键带岩-土-水的关联性
Fig.2 Correlation between rock-soil-water in the Earth's critical zone

表 1 不同地球圈层对煤炭开发的响应 (据张甘霖等, 2023 修改)

Table 1 Responses of different earth sphere to coal development (modified from Zhang Ganlin et al., 2023)	
圈层名称	煤炭开发影响
岩石圈	岩层结构/接触关系、埋深/高程、裂隙(孔隙)度、渗透系数等
水圈	存储、循环、蒸发量、水量、水质、水温、pH、TDS等
土壤圈	土壤结构/接触关系、坡度、容重、矿物、含水率、热导率、渗透系数等
大气圈	温度、湿度、降雨、气压、能见度、CO ₂ /CH ₄ /SO ₂ /H ₂ S/N ₂ O等
生物圈	生物量、微生物量、多样性指数、光合作用、蒸腾量等

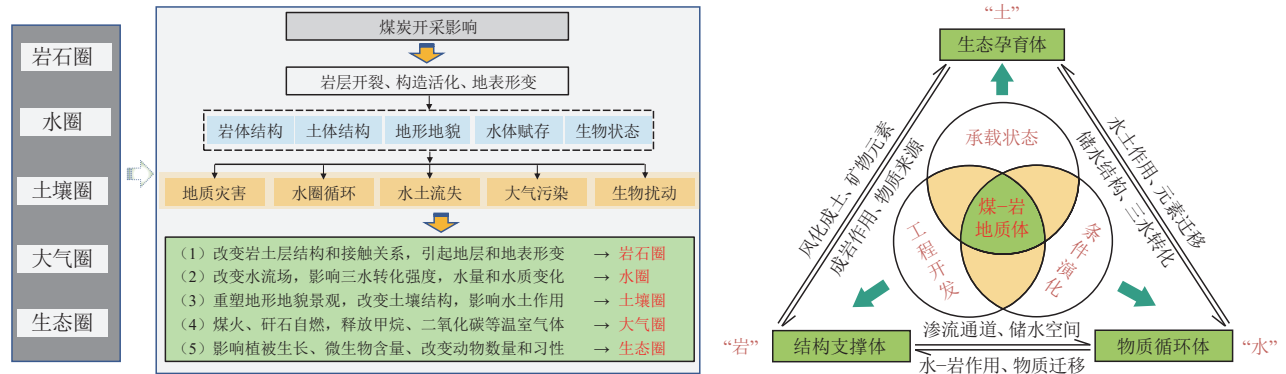


图 3 煤炭开发与多圈层响应示意图
Fig.3 Diagram of coal development and multi-layer response

能;(4)岩层和土壤结构的变化,会改变地表大气和土层以及深部岩层的接触关系,引起一系列物理、化学、生物过程,引起 CO₂、CH₄、SO₂、H₂S、N₂O 等排放量的变化,间接影响局部大气圈成分;(5)水圈、土壤圈和大气圈的变化,直接决定着生物圈的生物量、微生物量以及多样性指数等,进而影响生态圈质量和功能,随着蒸发量和光合作用的改变,又反作用于大气圈、土壤圈、水圈以及岩石圈;(6)借助煤炭开发形成的特殊空间和环境,开展碳封存、储能、调节水循环工程;同时进行关键带功能的

修复和重构,可实现生态和谐和环境宜居。

因此,深刻理解煤炭资源开发下地球关键演变过程,揭示关键带结构的全时空演化规律,阐明开发过程中应力场、变形场、渗流场等多场耦合作用下关键带的响应特征和响应模式,阐释煤炭开发地质条件变化和关键带演化过程多信息响应机制,建立地质条件演化动态评价与关键带响应一体化的监控方法,形成基于地质、工程、物理、化学、生态等多学科融合的关键带修复和重构技术体系,是当前煤炭开发区地球关键带研究亟待破解的科学难

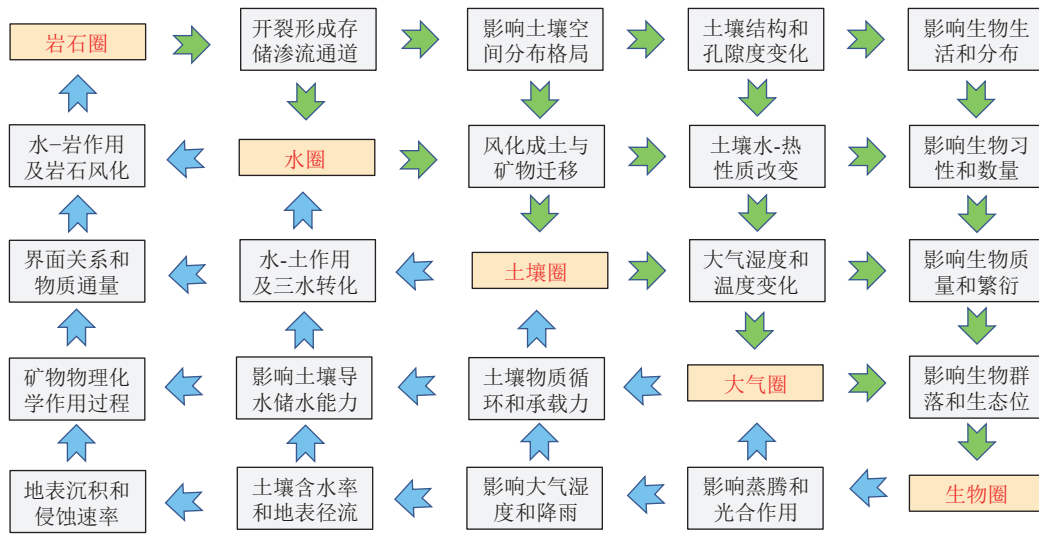


图 4 煤炭开发及多圈层影响关系图

Fig.4 Relationship diagram of coal development and multi-layer influence

题(图 5)。

3 煤炭开发对地球关键带响应研究的科学难题

煤矿区开采过程中覆岩结构及裂隙特征、地下水赋存空间及运移通道、地面形态及地表景观、水文地球化学场与动力场条件等会发生显著变化(特别是在中国当前煤炭主产区的西北生态脆弱区),

进而造成煤炭开采区原有地球关键带系统在物质循环、能量交换和信息传输等在特征和模式上的改变,引起关键带时空结构、运行过程、演化机制和生态服务上产生一系列响应。煤炭是我国能源的兜底保障,如何在保证国家能源战略安全重大需求的同时实现生态文明建设和地球关键带系统的维系与保护,已经成为煤炭工业高质量发展亟待破解的瓶颈,也是煤炭开采区地球关键带研究解决的

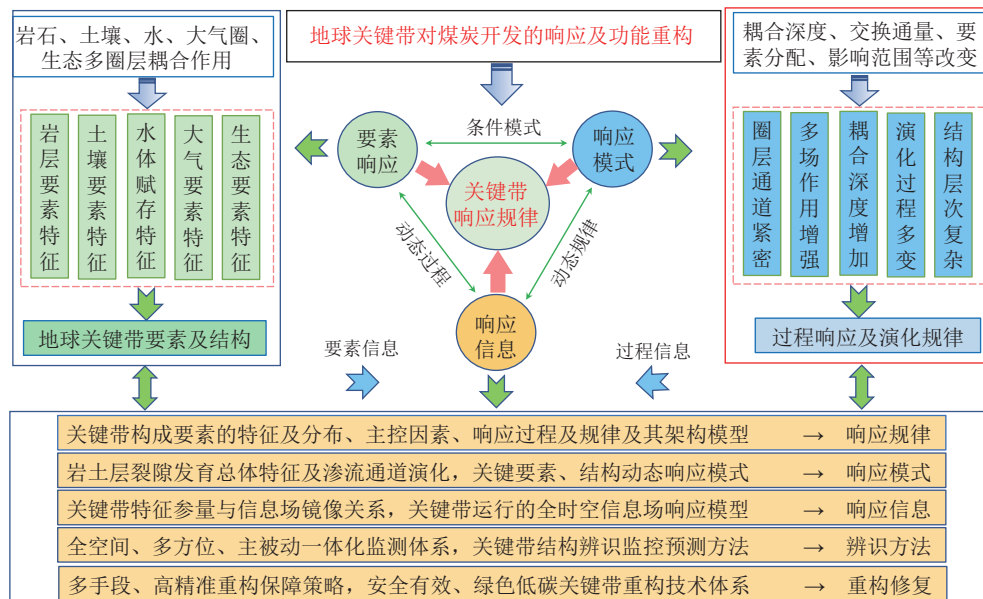


图 5 煤炭开发地质条件变化与关键带响应研究的科学内涵

Fig.5 Scientific connotation of the study on the geological condition change of coal development and the response of critical zone

难题。

目前,关于地球关键带结构与特点已经形成了共识,但关于煤矿开采影响下关键带响应仍未有清晰的理解,特别是地质结构大规模、高强度变化下的物质能量转化规程与规律、监控方法与评价模型、保护修复及重构方法等方面缺乏系统认识与有效手段。因此,围绕着煤炭开发全生命周期安全绿色开采和地球关键带功能保护与重构,迫切需要开展如下科学难题研究(图6)。

3.1 煤炭开发地质条件与地球关键带结构调查及表征

充分厘清煤炭赋存的地质结构、水文地质、岩层组合、地应力等地质条件因素综合特征,系统认识关键带的结构、联系和功能,是理解研究区地球关键带和地质条件的内在联系,剖析地质条件变化和关键带响应及演化过程的基础。

(1)查明煤层、岩层、地下水赋存及循环规律和地质构造的发育及组合特征,剖析水文、构造、地应力、岩层物理力学性质和采动影响的映射关系,阐明煤炭开采下地质条件变化的主控因素和时空关系,建立高精度的三维地质力学模型,揭示煤炭开

采地质条件的总体结构特征。

(2)获取岩-土-水-生物空间结构及界面特征、浅表层土壤理化性质、包气带结构、水文-生态环境、水质/水量/水污染、水-土-微生物多样性等关键数据,揭示地球关键带和下部煤层、岩层及地下水的空间关系特征,建立包含关键带结构和煤层开采地质条件的三维可视化模型,进行地球关键带结构和煤炭开采地质条件要素及其时空关系的精细表征。

3.2 煤炭开采地质条件变化和关键带响应机制

煤炭开采会引起岩(土)层移动变形开裂,同时岩土体的应力场、渗流场、温度场、化学场等发生改变,并影响原有的地球关键带结构和功能,进而影响关键带物质循环、能量交换、信息传递和生态服务能力(图7)。因此,厘清煤炭开采效应下地质条件整体变化规律和关键带响应模式及演化机制是煤矿区地球关键带研究的重要内容。

(1)获得煤-岩(土)矿物组分、密度、宏-微观结构、孔裂隙特征、渗透率、含水率、热导率、强度等参数全地层结构的物理力学参数,建立考虑煤炭开采模式(开采方式、空间布局、采动速率、回填程度

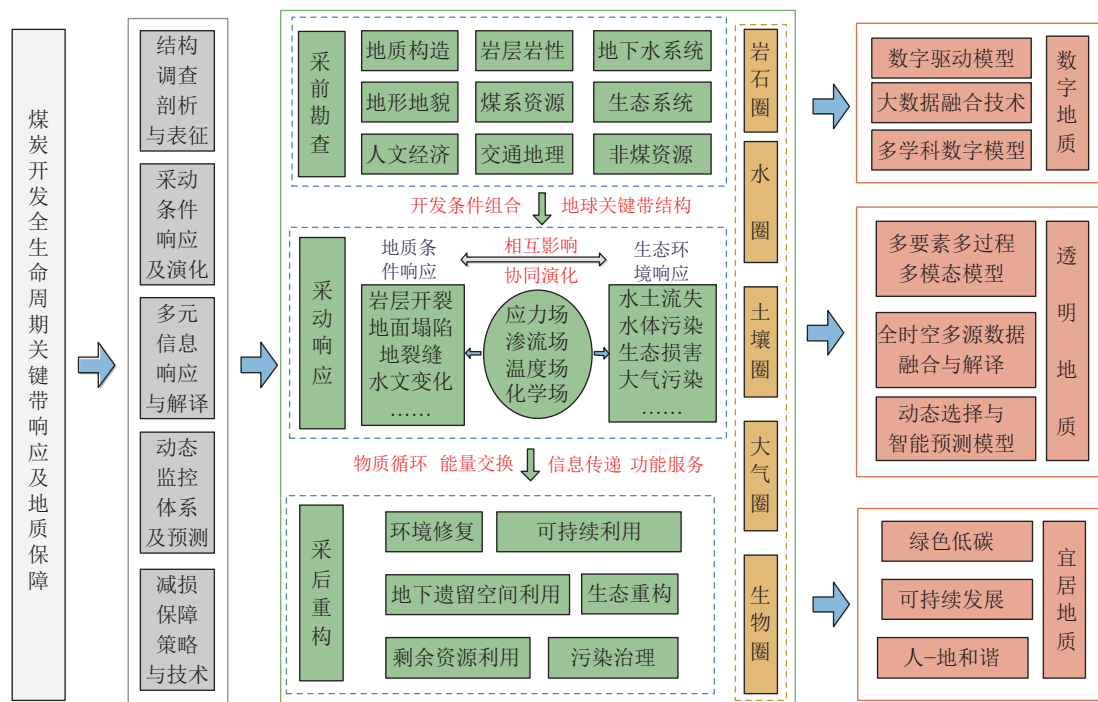


图6 煤炭开发地质条件变化与关键带响应研究的关键科学问题

Fig.6 Key scientific issues in the study of the geological condition change of coal development and the response of critical zone

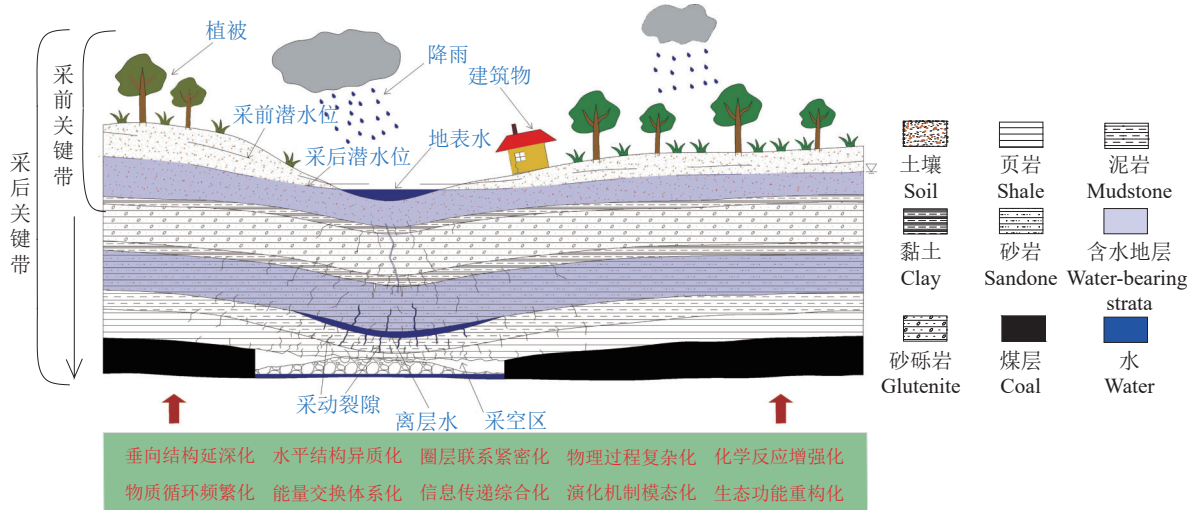


图 7 煤炭开采与地球关键带结构变化

Fig.7 Coal mining and structural changes of the Earth's critical zone

等)的工程地质力学模型,研究煤-岩(土)层应力场分布以及采动裂隙场发育总体特征及贯通区分布形态,揭示开采影响下应力场、变形场、渗流场、温度场等多场影响下地质条件结构变化及时空演化规律。

(2)研究煤炭开采下地质条件变化对地球关键带的影响,解析岩(土)层裂隙场与关键带水文循环的连通关系,厘清关键带水动力场(渗流场)、温度场、化学场对地质条件变化的响应,剖析地下水补给、存储、径流和排泄的变化规律,分析水质、水量、pH/TDS、土壤结构及有机质、土壤热导率与含水率等的变化特征,建立煤炭开采条件下地球关键带响应要素特征参量响应规律的数据库,揭示地质条件和关键带的协同演化机制,提出地球关键带对煤炭开发响应模式的判识方法。

3.3 地质条件变化与地球关键带响应的全时空信息模型

准确感知煤炭开采地质条件演化过程和地球关键带响应规律是预测评价和修复重构的基础。地质结构变化岩(土)层能量释放密切相关,物质循环及能量交换和介电常数、电阻率、电动势/反应能等参数有很好相关性。因此,通过分析岩(土)层变形破裂和地下水(气)运移循环过程中应变能、温度场、地电场、波速场、电磁场、化学场等多源信息变化,构建煤炭开采地质条件变化背景下的全时空多源信息响应模型是进行地球关键带研究的关键

保障。

(1)综合分析多源信息(超声波、地电参数、电磁信号、氧化还原电位、温度、变形等)对岩(土)层孔裂隙发育及连通性、含水率、渗透率等的响应,明确岩(土)层组合关系和地质结构控制下的多源信息的关键参量,提出主控参量映射下的地质条件变化规律和地质结构关系的分析模型。

(2)研究关键带对地质条件变化响应的信息量特征,获取关键带演化的结构信息和驱动力信息,剖析水循环要素在垂向和水平向的异质性变化,分析土壤水-热性质、矿物组分及元素迁移、生态植被要素等与多源信息的镜像关系,构建定量分析多要素、多场景、多模态下关键带物质循环、能量交换与多源信息场的关系数据库,揭示基于物质场、能量场和信息场耦合响应的地球关键带全时空信息映射模型。

3.4 地球关键带多要素监控方法与动态预测模型

基于全空间、多方位、主被动一体化多源信息感知,构建高可靠度的关键带响应动态选择模型,形成考虑关键带结构和演化模式的智能模拟分析方法和预测评价模型是煤炭开发地质条件变化影响下关键带研究亟需破解的重大难题。

(1)获取研究区气象、水文、地质(煤炭开发影响范围)、生态环境等数据资料,剖析煤炭开采影响下岩(土)层结构和接触关系及含水性、渗透系数、地下水动态(水量、水质、水位)等信息,确定地下水

系统的边界类型及变化规律,构建采动影响下动态水文地质模型,建立考虑岩(土)层结构变化的三维非稳定的地表水-包气带水-地下水耦合模型,分析水-岩(土)作用及水文地球化学变化,刻画地表水-地下水相互作用时空演化过程,发展考虑土壤结构和理化性质与地球表层生态环境要素(水文、植被、生态、环境、气候等)的多源信息融合与数字化的土壤功能分析模型。

(2)构建“空-天-地-钻(孔)-井(下)”一体化的全空间、多方位、精细化的多源(地电场、电磁场、波速场、渗流场、温度场、化学场等信息)监测体系,建立考虑不同要素、场景、模态、物理过程、化学体系、界面效应的信息响应数据库,厘清多源信息参量的敏感性影响因素,明确煤炭开采地质条件变化与地球关键带响应特征参量的关系,形成监控信息的快速采集、动态解析及智能分析方法,提出考虑结构、过程和功能演化的关键带预测和评价模型。

3.5 地球关键带减损、修复、重构策略及工程技术方法

针对大规模、高强度煤炭开采对地球关键带的影响,在充分理解关键带结构和生态服务功能的基础上,研究考虑生态平衡、灾害可控、气候适宜、环境友好、人地和谐等目标的关键带减损、修复和重构策略,形成水土保持、隔水层再造、生态修复等工程技术方法体系,是实现煤炭绿色开采及地表生态环境保护与重构的核心内容。

(1)根据采动效应下岩(土)层移动变形破裂特征及水文地质影响(岩层受力特征、裂隙发育高度及连通情况、围岩变形程度、地下水动态变化等),形成基于开采强度(模式、规模、次序)、岩层控制(充填、支护等)、应急工程(阻水-控渗、加固-增强、抽放-疏导等)和监控评价一体化的关键带减损策略。

(2)监测、观测和模拟煤炭开采对地形地貌、地下水文、植被群落时空格局的影响,揭示关键带功能自然恢复规律和主控因素;充分利用煤炭开发提供的大量地质、水文、生态、环境等信息,融合数字分析技术,推动透明地质和数字地质发展,提出采空区地下空间、水、气及遗留资源的开发利用途径,形成基于污染防治、生态修复、功能重构一体化的

工程技术方法。

4 地球关键带对煤炭开发响应研究的总体思路

煤炭开采区地球关键带研究以服务于能源安全重大需求和生态文明建设战略为出发点,充分利用系统科学的理念,融合地质学、采矿学、水文学、生态学、工程学等学科理论与实践,以“煤炭资源开采地质条件变化与地球关键带协同响应及科学保障方法”为研究主线,通过现场调查统计、地质理论分析、岩石力学计算、水文地球模拟、土壤功能监控、生态系统抽样、室内试验测试、物理和数值分析、多参量立体监测、典型范例剖析相结合的研究方法和技术手段,重点探索西部生态脆弱区大规模、高强度、长时间煤炭开发背景下地球关键带的响应规律和地质保障方法。围绕着“煤炭采前地质条件和关键带结构及要素→地质条件变化和关键带响应模式及演化状态判识→全时空主被动多源信息响应及动态监控→关键带结构-功能动态演化模型及智能预测评价→关键带减损地质保障策略及修复-重构一体化技术方法”这一主线(图8),基于“结构控制论→过程演化论→监控信息论→预测方法论→保障技术论”的研究思路,构建煤炭开采条件变化与关键带响应映射模型,阐明地质结构变化与关键带结构-功能演化的内在联系,建立多参量场监控下多源信息响应映射模型,提出多要素多尺度多模态的动态评价预测方法,形成地球关键带采动响应减损保障工程技术体系,为煤炭安全绿色开发和生态环境保护提供基于地质、力学、物理、生态等基础的科学决策依据,推动煤炭开发工程实践和生态文明建设高质量发展(图9)。

5 地球关键带对煤炭开发响应研究的实施路线

根据新时代生态文明建设的总体要求,矿区环境保护应贯彻“预防保护优先、自然恢复为主”的原则。因此,以减小地球关键带影响为前提,以煤炭安全绿色开采和关键带生态环境保护为目标,构建涵盖采前、采中、采后煤炭绿色开采全生命周期的关键带保障策略和技术体系(图10)。

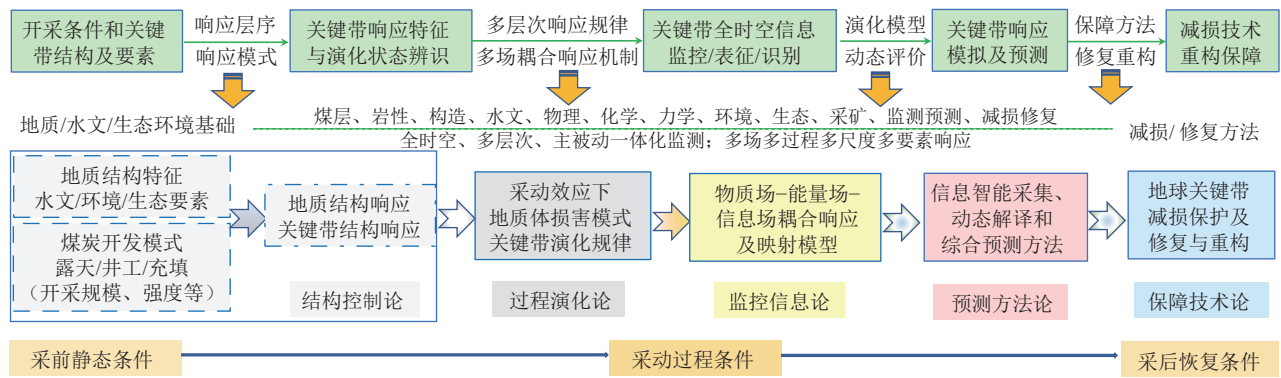


图 8 煤炭开发与关键带响应研究的逻辑主线

Fig.8 Logical main line of coal development and critical zone response research

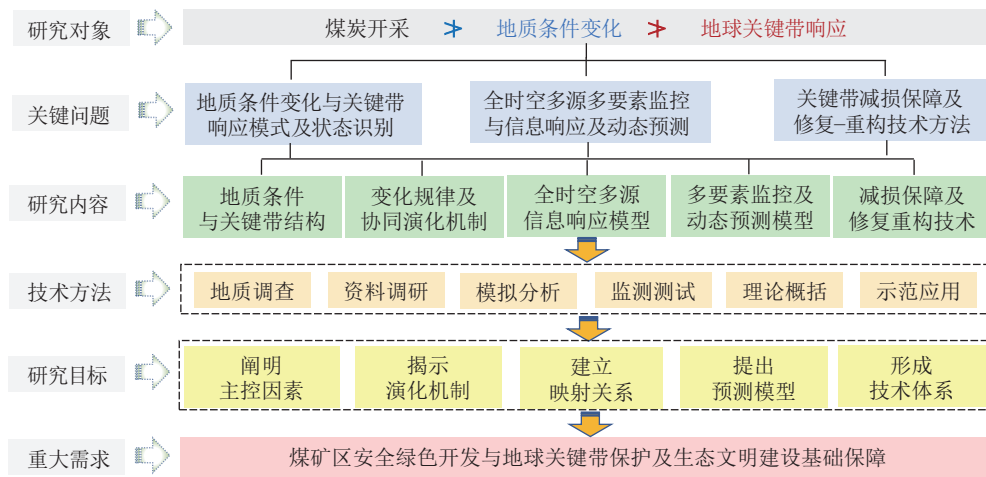


图 9 总体研究路线图

Fig.9 Overall research route

5.1 地质条件与地球关键带调查及表征

主要包括煤炭开采影响范围内“深部-浅层-地表”(深-浅-表)立体化三维地质结构和关键带结构的“空-天-地-钻”一体化勘查;基于自动化、智能化、功能化的综合测试上关键带物质循环、能量交换和信息传递的科学分析;基于神经网络、遗传算法、机器学习等手段的地质结构、能源赋存及地表生态环境系统的多场景、多模态、可视化表征(图 11)。

5.1.1 地质结构、资源赋存和关键带要素调查分析

利用卫星遥感、航空地球物理勘探、地面地球物理勘探、定向钻探、地球物理测井等“空-天-地-钻(孔)”一体化勘查技术,融合自动化、智能化的随包、随钻等高效精细测试手段,实现从矿区-井田-工作面尺度上对煤炭资源及煤层气、页岩气、铝

土、高岭土、稀土、砂岩铀矿、煤系关键金属矿等资源赋存规律的高精度高分辨率勘查,同时在垂向上厘清大气-植被界面、植被-土壤界面、包气带-饱水带界面、弱透水-含水层界面、含水层-基岩界面、覆岩-煤层界面等界面特征和煤-水-气-岩-土-植被等的空间组合特征,在水平向上明确构造边界、地下水边界、流域边界、地貌边界等。

在剖析煤田、煤矿、工作面尺度的沉积相、煤相、岩层、地质构造、水文地质、地应力等发育特征的基础上,掌握不同级别构造的空间展布规律及相关性,确定构造影响范围,获得煤层和岩层地质结构以及地应力变化的总体特征,明确煤层顶板到地表之间地层、含水层的赋存情况,确定含水层、隔水层的分布及厚度变化;剖析地表及矿井地质灾害类型,根据“三水转化”关系从水循环的角度查明岩

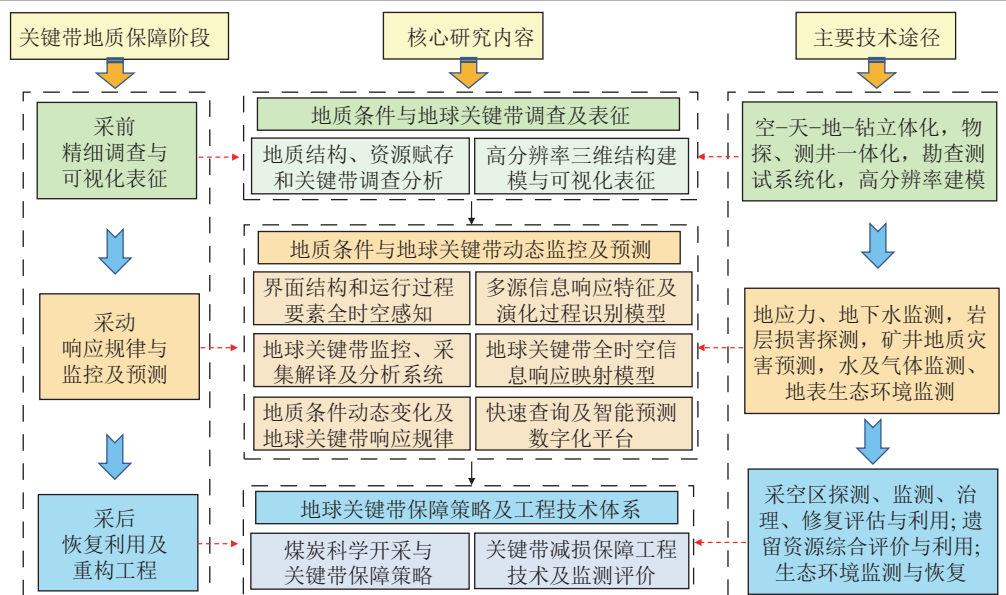


图 10 煤炭绿色开采与地球关键带保护的地质保障总体思路

Fig.10 General idea of geological guarantee for green coal mining and protection of the Earth's critical zone

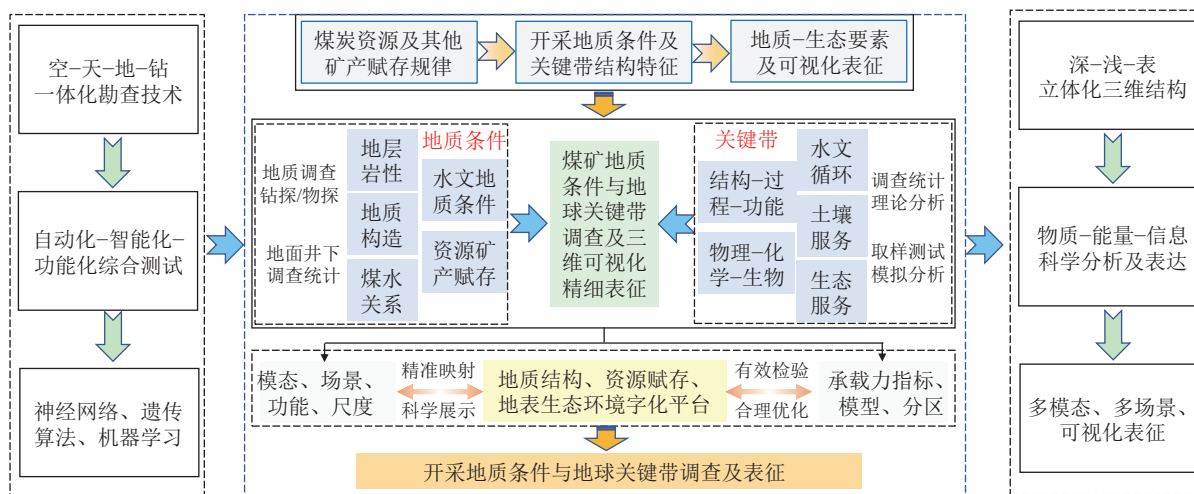


图 11 地质条件与地球关键带调查及表征研究路线

Fig.11 Research route of investigation and characterization of geological conditions and the Earth's critical zone

层、土层含水率、水量、水压、水力联系、补径流—排泄特征,明确土壤(类型及结构、分布等)与水循环、环境生态、气候等关系;厘清维系地表生态系统的关键地质/非地质因素和关键带系统的结构特征和服务功能。

5.1.2 多功能、高分辨率三维结构建模与可视化表征

基于系统、全面的资源赋存、地质结构和关键带结构信息(岩层、地层、水文、构造、矿产资源、土壤、植被生态等),通过数据融合技术进行解译和分类,构建煤矿区深-浅-表一体化的三维结构模

型,实现地质信息、地球物理信息、水文信息、土壤信息和生态信息等的高分辨率、多模态、多场景、多功能、可视化表征,深度理解煤矿区深部地质结构和上部覆岩及地表生态系统在物理结构、化学体系、生态架构上的有机联系和内在逻辑。

构建地质结构、资源赋存、地表生态环境参量的样本数据库,通过协同论、耗散结构论、突变论、系统论、控制论和信息论等方法,利用人工神经网络、遗传算法等机器学习算法深度挖掘训练集中特征参量的内在联系,剖析特征参量与主控要素(地质

条件、岩/土赋存形式和空间展布,水文、构造、地应力、岩层物理力学参量、植被容量等)的映射关系,进行不同区块、深度和尺度上的类型划分,形成包括环境承载力指标体系、评价模型和承载力分区在内的快速查询、智能分析数字化平台。

5.2 煤炭开发地质条件变化和关键带响应规律

主要包括采动效应下煤矿区岩(土)层应力场、渗流场、变形场、温度场等多场耦合模型;煤炭开采地质条件参量变化和地质结构演化参数的映射关系及定量判识;地球关键带空间界面特征及运行功能的时空演化规律(图 12)。

5.2.1 煤炭开采地质条件动态变化规律

采集测试和统计钻孔和井下岩(土)层、煤层、结构面等的渗透性、强度参数、超声波速、电阻率、结构面性质(规模、产状、张开度、充填状况、变形模量)等物理力学参量,系统解析全地层范围内岩(土)含水率、孔隙率、微观结构、矿物组分、胶结物特征;根据煤矿工程地质岩组质量综合评价结果,建立考虑开采方式、空间布局、采动速率、充填效应等因素采动条件煤矿地质力学模型。基于现场监测、物理模型和数值分析相结合的方法,利用变形、应力、声发射、电阻率、超声波速、光纤等多种监测手段分析关键物理参量获得煤矿地表和岩(土)层结构变化、应力场分布以及变形开裂的总体特征。

提取不同采动模式和采动强度下岩层宏观裂隙形态、地下水导流能力,分析不同层位/层段岩(土)差异变形特征,建立考虑应力场、裂隙场、地下水渗流场的分析模型,揭示地质条件变化下裂隙网络与渗透特性演化规律,阐明岩层结构对地下水循环的控制性影响,构建应力场分布、裂隙状态与地下水流场的耦合模型,揭示煤炭开采地质条件参量

变化和地质结构演化参数的映射关系,提出考虑地层关键结构变形破坏模式及破坏程度的地质条件变化定量判识方法。

5.2.2 地球关键带对煤炭开采的响应规律

煤炭开采对地球关键带的影响在垂向上存在显著的分层性。首先影响的是煤炭赋存的岩石圈,随着煤炭采出,煤层周围的岩层应力场发生改变,萌生新的节理裂隙并不断丛集扩展进而形成裂隙网络;新生裂隙网络又影响和控制着地下水的赋存和循环流动,水-岩作用改变了原有的水质(TDS、pH 和 Eh 等);岩层移动变形会改变地形地貌,引起地表形态、地表水体特征(径流、汇水、侵蚀等)、土壤性质(结构、有机质、矿物组分、含水率、热导率等)的变化;地表裂隙和岩层缝网改变了水-岩-空气的接触关系,可能会增加 CO_2 / CH_4 / SO_2 / H_2S / N_2O 等气体在大气中排放;随着近地表岩-水-土-气的变化,特别是水,煤矿区的生物群落也会出现一定的改变。因此,地球关键带对煤炭开采的响应研究集中体现在揭示采动效应下覆岩-煤层界面、含水层-基岩界面、弱透水-含水层界面、包气带-饱水带界面、植被-土壤界面、大气-植被界面以及煤-水-气-岩-土-植被等的空间组合特征变化及关键带运行功能的时空演化规律。

围绕着“煤炭开采模式→地质条件采动变化→关键带空间界面特征变化→关键带空间结构和运行功能响应”的研究思路,构建包含地质结构特征和采动效应的煤矿区地质条件变化规律及模式图谱,揭示地质构造赋存形式及分布、水文条件、地应力、瓦斯压力、采煤活动等要素对地质条件灾变的影响;提取关键地质结构特征并嵌入数值计算模型中,在三维模型中定量表征煤炭开采对岩石变

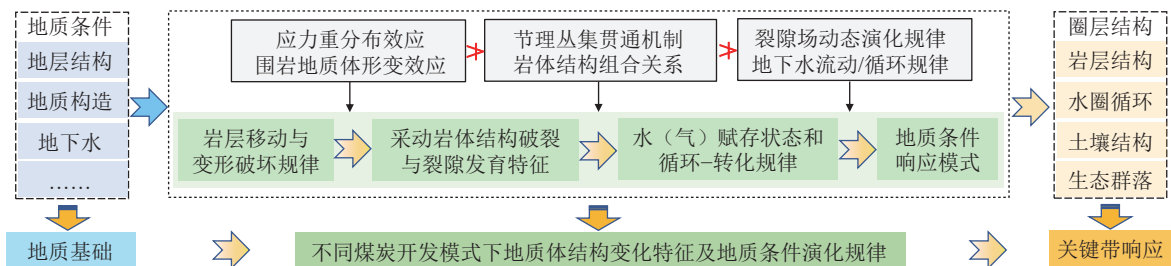


图 12 煤炭开发地质条件变化和关键带响应机制研究技术路线

Fig.12 Technical route of study on geological condition change and response mechanism of the Earth's critical zone during coal development

形、地下水渗流、地表变形等影响。在此基础上,构建采动条件下煤矿区深-浅-表一体化的三维结构动态演化模型,进行地质信息、地球物理信息、水文信息、土壤信息和生态信息等的动态演化过程的表达,进而解析关键带的物理结构、化学体系、组分分配、生态架构对煤炭开采的响应规律。

5.3 煤炭开采下地球关键带响应的全时空信息模型

主要包括:煤炭开采影响下地质体条件变化和关键带演化的多源信息表征;多源信息场的动态响应特征与时空演化规律;煤炭开发全生命周期关键带全时空多源信息场信息镜像关系与映射模型(图13)。

5.3.1 多源信息响应特征与时空演化规律

通过室内物理力学试验,解析岩(土)性质(矿物组分、密度、含水率、孔裂隙特等)参数的地球物理测试(如超声波、电阻率、介电常数等)响应规律,解构岩石变形破坏过程中的应力状态及裂隙场和超声波速、电阻率、声发射、电磁信号等参量的定量关系,厘清岩(土)性和岩体结构关键参数与地球物理信息场的关系,明确关键带水圈循环(如水量、水质、流场等)和地球物理场、化学场等关系。

研究开采因素下岩层结构、裂隙网络、渗流通道、应力-能量集中特征、物质循环、能量交换与多源信息场(物理场和化学场)的时空演化关系,建立采动效应下覆岩-煤层界面、含水层-基岩界面、弱透水-含水层界面、包气带-饱水带界面、植被-土

壤界面、大气-植被界面以及煤-水-气-岩-土-植被等的空间组合特征变化多源信息场响应规律;分析岩(土)层变形破裂和地下水(气)运移循环过程中应变能、温度场、地电场、波速场、电磁场、化学场等多源信息变化及映射模型,实现煤炭开采地质条件变化背景下的全时空多源信息的精细表征。

5.3.2 地球关键带响应的信息识别模型

解析开采方式、空间布局、充填效应等与岩体宏细观裂隙发育和地面变形的关系,剖析采动作用下裂隙场扩展-水(气)循环变化过程中微震、电阻率、温度、流体地球化学等信息的动态响应关系;综合分析多源信息(超声波、地电参数、电磁信号、氧化还原电位、温度、变形等)对岩(土)层孔裂隙发育及连通性、含水率、渗透率等的响应,明确关键带结构(岩-水-土-气-生的结构组合)及运行过程中的多源信息变化关键参量;获取煤炭开采地质条件变化下地球关键带演化的结构信息和驱动力信息,明确水循环要素在垂向和水平向的异质性变化,获得土壤水-热性质、矿物组分及元素迁移、生态植被要素等与多源信息的镜像关系。

通过协同论、耗散结构论、突变论、系统论、控制论和信息论等研究方法,构建不同尺度(如 km, m, mm 等)包含地质结构、水气循环及转化、土壤分布及性质演化、动植物变迁等内容地球关键带结构特征、运行过程及主控参量、功能服务的多源信息场演化图谱集和样本数据库,并划分为训练集和

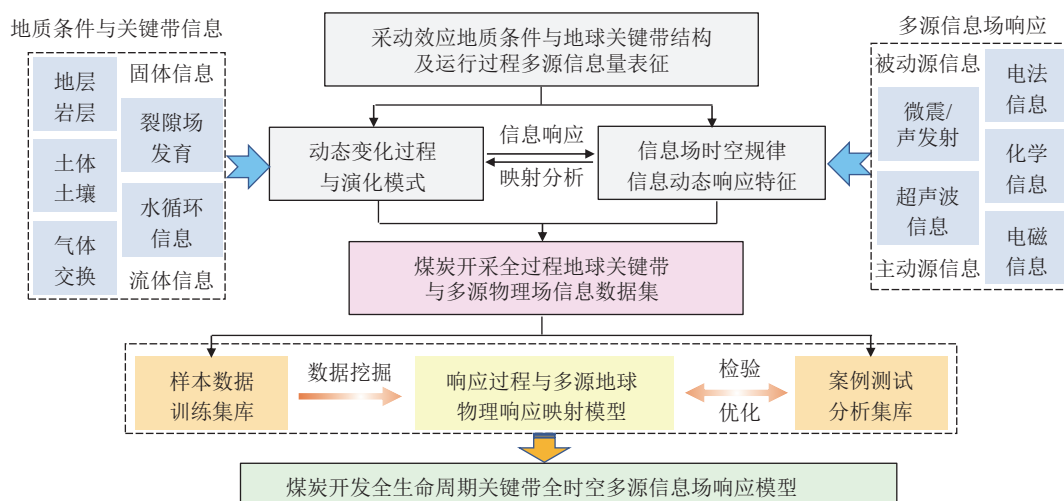


图13 煤炭开采下地球关键带响应的全时空信息模型

Fig.13 Global spatiotemporal information model of the response of the Earth's critical zone under coal mining

测试集, 基于循环神经网络智能分析模型和决策层融合和深度学习算法实现对多要素、多过程、多场景和多模态的融合学习及智能反演, 重构采动作用下裂隙场、渗流场、温度场、能量场动态耦合的地球关键带信息响应层次和响应模式, 明确结构和功能控制论下多源信息响应的关键参量, 建立基于地质条件物质场、能量场和信息场耦合响应的全时空信息映射关系, 形成关键带物质循环、能量交换与多源信息场的关系数据库, 提出煤炭开发全生命周期下的地球关键带全时空信息响应映射模型。

5.4 煤炭开发下地球关键带监控与动态预测

主要包括: 煤层/岩层形变、地表沉降及地下水、气赋存条件及渗流特征监控; 煤炭开采影响下地球关键带界面结构和运行过程要素监控; 关键带多要素、多过程和多模态的动态模拟及预测(图 14)。

5.4.1 多源动态监测与分析

构建煤炭开采全生命周期条件下空-天-地-钻孔-井下的全空间、多方位的多源信息量融合监测体系(表 2), 实现采动条件下地质条件变化和关键带结构(特别是界面特征和物质循环等监测)和运行过程的精准感知, 如采用卫星遥感、无人机遥感、InSAR、三维激光、地面物探和光纤技术等探测和监测矿区地面开裂和三维沉陷强度、规模、范围, 应用微震、瞬变电磁、槽波、高密度电法、核磁共振等

探测和监测煤层、围岩裂隙发育特征及地下水、瓦斯的运移, 采用定向流速仪及流量计、在线水质分析仪、并行网络分析仪等监测分析三水转化和水圈循环信息, 利用 GEO-PROBE 钻机、激光粒度仪、XRF、XFD、NMR 等技术监测分析土壤结构、温度、矿物组成和理化性质, 应用高通量测序及化学提取、无人机调查及现场抽样挂测等分析研究区地表植被和微生物变化, 利用土壤气体分析仪、蒸发/降雨计量器、风速/气温/湿度/传感器等观测监控大气和气象信息。

实时提取煤-岩层地质结构和表征裂隙网络扩展的特征参数, 追踪裂隙扩展空间位置和扩展属性, 识别裂隙方位、尺度能级等参数的空间特征; 开发基于裂隙岩体结构特征的超声场、地电场和电磁场高分辨率演化算法, 实现对裂隙场、变形场、渗流场的快速成像分析, 构建煤炭开发区三维地质信息采集、地质结构识别和可视化技术, 研发地质条件监测的可视化分析系统; 基于超声波速、微震、电阻率、变形、温度、压力、地球化学等多源监测手段获取物质场、能量场和化学场信息, 采取数据驱动分析和结构模式相结合的方法, 形成煤炭开采影响下地球关键带界面结构和运行过程要素监控分析系统。

5.4.2 地球关键带演化的动态预测

解析不同煤炭开采模式条件下, 地质条件演变

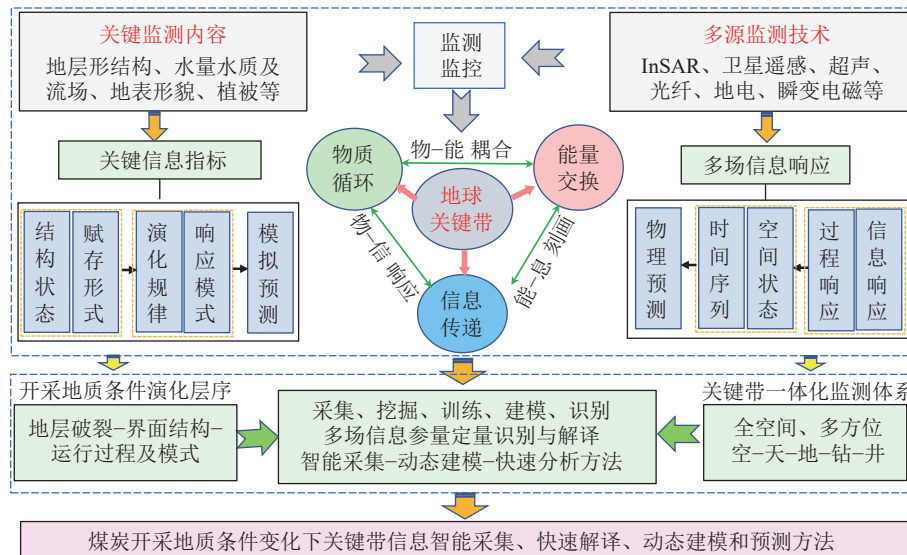


图 14 煤炭开采下地球关键带监控与动态预测技术路线

Fig.14 Technical route of monitoring and dynamic prediction of the Earth's critical zone under coal mining

表 2 地球关键带监测技术 (据朱永官等, 2015; 吕玉香等, 2019 修改)

Table 2 Monitoring technology of Earth's critical zone (modified from Zhu Yongguan et al., 2015; Lü Yuxiang et al., 2019)		
监测对象	监测指标	监测技术
气象参数	风速、风向	通量塔、传感器
	气温、气压、辐射强度	传感器
	湿度、污染情况、干燥度	通量塔、传感器
	降雨量、蒸发量	通量塔、传感器
地表及 浅层地下结构	地形地貌	卫星遥感、无人机、CCD相机
	地表覆盖物信息	卫星遥感、无人机、实地调查
	地层结构、水文地质结构	三维激电仪、GEO-PROBE 钻机
	河床结构、湖泊底部结构	多普勒河道扫描
深部地质	岩层组合	钻探、瞬变电磁、地质雷达、三维地震
	水循环	核磁、电法勘探、水压水量水质传感器
	地应力	光纤传感器、地应力测试、矿压计
	其他	地温、放射性、气体 (H ₂ S, CH ₄ 等)
水	大气水	雨水水化学
	地表水	水温、流量、流速、径流深度等
		地表水水化学、放射性、悬浮物
	土壤水	土壤水负压
		土壤含水率
		土壤水水化学、放射性
	浅层地下水	地下水水位、水压
	地下水	地下水流速、流向
土		地下水水温、水化学组分
	土壤	土壤剖面结构
		土壤温度、湿度
		物理特性 (孔隙、粒径、热导率等)
	沉积物	矿物组成、有机质及放射性
		河流沉积物
气	大气	物理特性 (孔隙度、渗透系数等)
	土壤气	元素组成与有机质含量
		地表-大气界面气体通量
		土壤剖面气体含量、组分、放射性
生	地表植被	植被类型、丰度、结构
		根系、蒸腾量
	微生物	土壤酶含量
		微生物类型(水、土)

和地球关键带界面特征及功能运行的关键物理量变化规律及阶跃特性,并剖析特征变化量的敏感性;采动地层变形、裂隙演化及渗流场、温度场、化学场动态响应,解析深部地质结构模式和界面特征控制下的关键带信息量的协同突变现象,建立地球关键带结构和物质循环规律的信息响应数据库,建立基于时空数据驱动下三维态选择模型,实现对深、浅、表地层结构联动响应下的精细刻画,形成煤炭开采应下的地层结构、水文循环、生态群落深度耦合的岩-水-土-气-生多圈层物理化学过程和动态系统解析模式,提出可以描述地质特征、采动影响和关键带结构变化的分析模型(包括单过程分析模型、多过程耦合分析模型、多过程多模态分析模型等),模拟分析煤炭开发区地球关键带的结构变

化、响应模式、运行过程和生态环境效应。

以时空数据提取→数据结构构建→模型动态选择→分析预测方法为主线(图 15),基于地质条件和关键带结构大数据平台和全时空多源信息智能解译系统,煤炭开发区地球关键带功能演化的时空结构数据库集,利用深度机器学习、神经网络、遗传算法等开发集地质条件采动变化和关键带功能动态演化分析评价和预测于一体的数字模型,结合智能算法从节点信息和拓扑结构中学习采动地质结构、关键带参量和功能映射信息表达,形成基于“空间-时间-偏好-关系”因素的地球关键带信息参量学习方法,挖掘信息量的低阶和高阶移动模式,提取动态选择模型的可靠度,提出考虑煤炭开发模式、地质条件特征、关键带要素和功能预测模型。

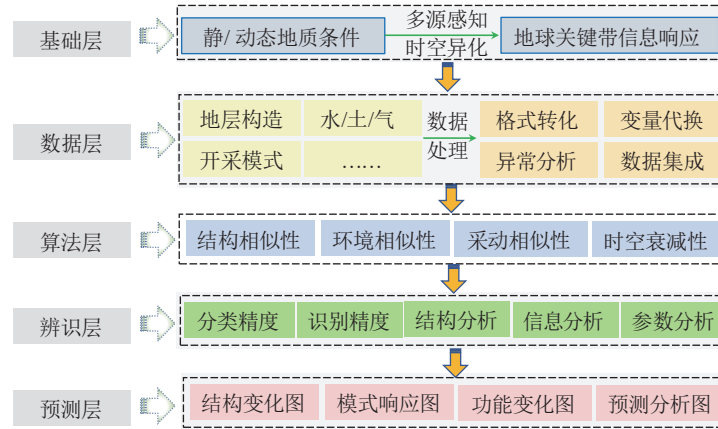


图 15 煤炭开发地球关键带预测研究思路

Fig.15 Research ideas for the prediction of the Earth's critical zone under coal development

5.5 关键带保障策略及工程技术体系

主要包括: 科学开采与关键带减损策略; 关键带减损修复工程技术; 关键带保障工程监测检测及评价(图 16)。

5.5.1 科学开采与关键带保障策略

针对煤系多种资源赋存的情况, 形成煤岩、煤质及煤炭最佳开发利用评价技术, 煤、煤层气、煤系页岩气、煤系致密砂岩气、煤系重要金属元素综合利用评价技术(图 17); 针对煤炭开发过程的残余煤炭、共伴生矿产资源及地热综合评价技术; 针对矿井水及高矿化盐分, 形成过滤、除垢、脱盐等措施上活用水和生态用水利用技术; 针对开采形成的规

模化地下空间, 提出地下城市、地下水库、地下油库、地下储氢储气库、储能电站等分类利用技术。

综合考虑地质条件、开采因素、生态环境、人文经济等的影响, 归纳煤炭赋存环境和开采模式引起的地质条件和地球关键带响应模式和主控因素, 研究煤炭采动过程中地质条件演化过程及临界条件和关键带生态服务功能的有机联系, 评估预测煤炭开发的生态环境效应, 最终形成煤及煤系资源科学综合开发基础上的安全开采、综合利用和关键带有机保护开发策略。

5.5.2 保障工程技术及监测评价

在明确地质条件、开采模式和关键带响应要素

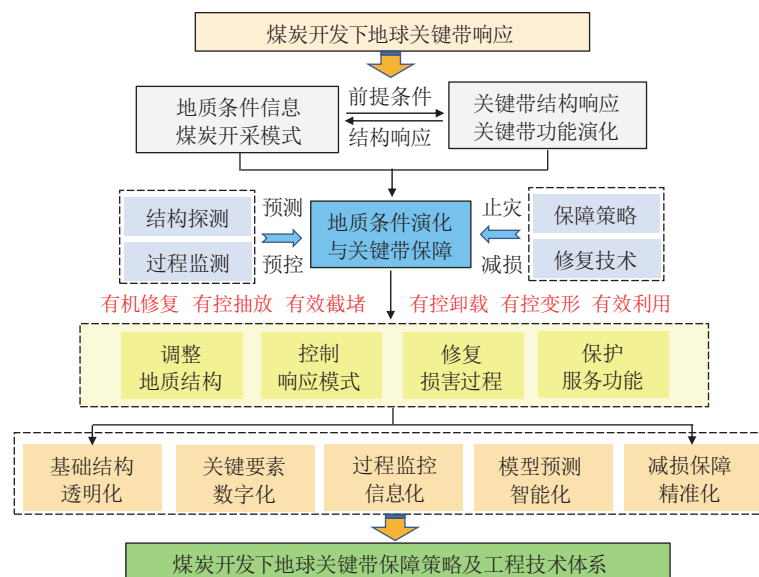


图 16 地球关键带保障策略及工程技术体系研究技术路线

Fig.16 Technical route of the Earth's critical zone support strategy and engineering technology system research

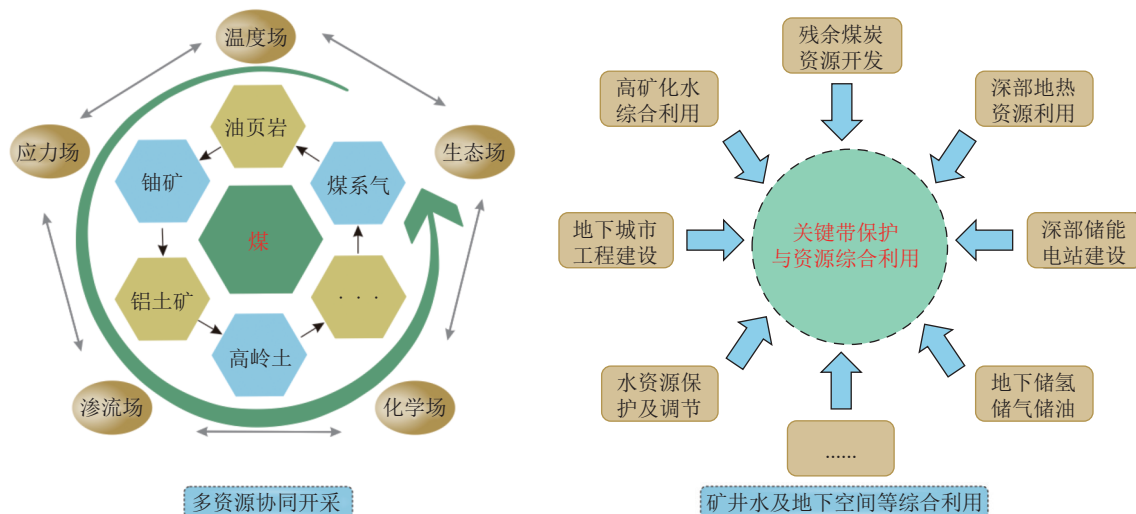


图 17 煤系资源协同开发与矿井水及地下空间等综合利用

Fig.17 Cooperative development of coal resources and comprehensive utilization of mine water and underground space

的基础上,围绕“地质结构调整、响应模式控制、损害过程修复和服务工程保护”的地球关键带保障思路,以“有控抽放、有效截堵、有控卸载、有控变形、有效利用、有机修复”为主导思想进行保障技术研究,采取注浆加固-阻渗(针对裂隙网络和水气循环通道等)、卸压-控压(针对应力释放和地层变形等)、抽放-疏导(针对煤层气/煤系气、涌突水等)、开发-利用(针对地下空间、残余资源、地热及矿井水等)、修复-重构(针对土壤损害、生态损害等)等途径和手段,形成以资源能源安全高效开发、地质条件控制、关键带保护为主线的工程技术体系。

通过抽采利用,降低瓦斯突出风险,提高煤系资源利用;通过冒落体碎胀性提升、局部充填、顶板裂隙发育控制、关键隔水层修复等措施,控制地层变形及沉降、减少含水层损害,发展采煤顶板有效管理模式,保护矿区地质生态环境和地球关键带功能;利用遥感卫星、InSAR、地面物探、钻探、分布式光纤等探测、监测采空区覆岩、地表岩体的变形,地下水、雨量、土壤、大气等监测形成矿山关键带结构探测、监测、预测综合分析评价技术;根据地质结构稳定性和生态环境特征,提出开发后矿区场地的建设用地、农业用地、景观用地等最佳利用途径和分类治理措施;在地下水位、水质、土壤养分、生物群落等维系地表生态环境的核心指标监测的基础上,采用微生物、凝胶材料等土壤再造技术促进矿区生态环境自然恢复。形成基于电磁场、地电

场、波速场、温度场、化学场等多源信息的地质条件、关键带结构、多圈层物理化学组分及循环过程等监控技术,实现“地质结构条件透明化、损害关键要素数字化、演化过程监控信息化、模型预测智能化、关键带保障技术精准化”。

6 结 论

(1)地球关键带是当前地球系统科学研究的热点之一,而作为能源兜底保障的煤炭资源开发引起的地质条件变化会影响地球关键带的界面结构。以保障煤炭安全绿色开采和生态脆弱区地球关键带保护为出发点,从界面结构、物质赋存、圈层联系等角度探讨关键带对阐明煤炭开发地质条件演化的逻辑关系,阐明关键带物质循环、能量交换、信息传递、功能服务等变化特征,架构煤炭开发全生命周期下地球关键带减损保障策略。

(2)煤炭开采下的地球关键带是包含“深-浅-表”协同响应的岩石-水-土壤-大气-生物的多圈层综合研究体系,突出地质条件动态变化下的关键带界面结构、运行过程、服务功能的响应规律,强调多场景、多模态、多物理过程、多化学体系的四维时空动态演化模式。提出“开采地质条件、地质结构演化、多场信息响应、动态模拟及智能预测、减损保障工程技术”为主线逻辑的地球关键带减损保障理论和技术探索路径,构建包含地质结构特征和采动效应的关键带响应模式图谱集库,为煤炭安

全开发下地球关键带保护提供相应的地质保障。

(3) 地球关键带的减损保障需要综合考虑地质条件、开采因素、生态环境、人文经济等的影响,厘清煤炭采动过程中地质条件演化过程及临界条件和关键带生态服务功能的有机联系。围绕“地质结构调整、响应模式控制、损害过程修复和服务工程保护”的地球关键带保障思路,构建煤炭开采区关键带全空间、多方位、主被动的一体化多源信息感知的监控体系,搭建包括环境承载力指标体系、评价模型和承载力分区在内快速查询、智能分析预测数字化平台,形成“有控抽放、有效截堵、有控卸载、有控变形、有效利用、有机修复”技术体系,实现地球关键带研究的“地质结构条件透明化、损害关键要素数字化、演化过程监控信息化、模型预测智能化、保障技术精准化”。

随着煤炭能源开发保障和生态文明建设要求的提高,完善生态脆弱区煤及煤系资源综合开发和地球关键带功能减损保护及修复重构的理论与技术,改善矿山生态环境,建设资源节约型和环境友好型社会,必将全面推动中国煤炭工业高质量可持续发展。

致谢: 感谢西安科技大学侯恩科教授和师庆民副教授对本文给予的大力支持和帮助,感谢董志浩、辛远和胡鑫对本文图表的编辑工作。

References

- An P J, Zhang Z Q, Wang L W. 2016. Review of Earth critical zone research[J]. *Advances in Earth Science*, 31(12): 1228–1234.
- Bian Zhengfu, Lei Shaogang. 2020. Green exploitation of coal resources and its environmental effects and protecting strategy in Xinjiang[J]. *Coal Sciences and Technology*, 48(4): 43–51 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xi, Zhang Zhicai. 2022. An overview on the development of science and ecological hydrology of the earth critical zones in karst area[J]. *Carsologica sinica*, 41(3): 356–364 (in Chinese with English abstract).
- Chinese Academy of Engineering. 2011. Research on Medium – Long Term (2030, 2050) Development Strategy of China's Energy: Energy Saving, Coal Roll [M]. Beijing: Science Press.
- Fan Limin, Xiang Maoxi, Peng Jie, Li Cheng, Li Yonghong, Wu Boyun, Bian Huiying, Gao Shuai, Qiao Xiaoying. 2016. Groundwater response to intensive mining in ecologically fragile area[J]. *Journal of China Coal Society*, 41(11): 2672–2678 (in Chinese with English abstract).
- Gu Dazhao, Zhang Yong, Cao Zhiguo. 2016. Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China[J]. *Coal Science and Technology*, 44(1): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yanli, Guo Yachao, Qi Wenyue, Li Junmeng, Wang Jiaqi, Ouyang Shenyang, Wu Laiwei. 2022. Evolution and degradation mechanism of surface vegetation coverage in typical ecologically fragile mining areas in western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 47(12): 4217–4227 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Huazhe, Chen Xi, Zhang Tiegang, Yang Liuhua, Chen Xinming, Honaker Rick, Ma Junwei, Yu Yang. 2024. Cause analysis of groundwater pollution in coal development zone of Yellow River Basin and prevention suggestions[J]. *Geology in China*, 51(1): 143–156 (in Chinese with English abstract).
- Li Quansheng. 2023. 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 and Safety Engineering*, 40(5): 905–915 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoyan, Ma Yujun. 2016. Advances in Earth's Critical Zone science and hydrogeology[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 52(6): 731–737 (in Chinese with English abstract).
- Li Yong, Pan Songqi, Ning Shuzheng, Shao Longyi, Jing Zhenhua, Wang Zhuangsen. 2022. Coal measure metallogeny: Metallogenic system and implication for resource and environment[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 65(7): 1211–1228 (in Chinese with English abstract).
- Liu Haiping, Wang Yi. 2023. Research and practices of countermeasures for resource and environment management in Shandong mining area[J]. *China Coal*, 49(S1): 6–14 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jintao, Han Xiaole, Liu Jianli, Liang Zhongmin, He Ruimin. 2019. Understanding of critical zone structures and hydrological connectivity: A review[J]. *Advances in Water Science*, 30(1): 112–122 (in Chinese with English abstract).
- Luo Zhanbin, Fan Jun, Shao Mingan. 2022. Progresses of weathered bedrock ecohydrology in the Earth's critical zone[J]. *Chinese Science Bulletin*, 67(27): 3311–3323 (in Chinese with English abstract).
- Lü Yuxiang, Hu Wei, Yang Yan. 2019. Research progress of hydrological cycle in karst critical zone[J]. *Advances in Water Science*, 30(1): 123–138 (in Chinese with English abstract).
- Ma Teng, Shen Shuai, Deng Yamin, Du Yao, Liang Xing, Wang Zhiqiang, Yu Haotian. 2020. Theoretical approaches of survey on Earth's Critical Zone in basin: An example from Jiangnan Plain, Central Yangtze River[J]. *Earth Science*, 45(12): 4498–4511 (in Chinese with English abstract).
- Pu Junbing. 2022. Earth's critical zone and karst-critical zone: Structure, characteristic and bottom boundary[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(5): 230–241 (in Chinese with English abstract).
- 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). 2017. Theory and method research of geological disaster prevention on high-intensity coal exploitation in the west areas[J]. Journal of China Coal Society, 42(2): 267–275 (in Chinese with English abstract).
- Riebe C S, Hahm W J, Brantley S L. 2017. Controls on deep critical zone architecture: A historical review and four testable hypotheses[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42: 128–156.
- Sun Qiang, Zhang Weiqiang, Geng Jishi, Hu Jianjun, Zhang Yuliang, Lyu Chao, Ge Zhenlong, Li Pengfei, Jia Hailiang, Liu Yabin, Li Yuxiang. 2023. Technological path and geological guarantee for energy storage in underground space formed by coal mining[J]. Coal Geology and Exploration, 51(2): 229–242 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guofa, Ren Shihua, Pang Yihui, Qu Sijian, Zheng Dezhi. 2021. Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year plan period and implementation path of "dual carbon" target[J]. Coal Science and Technology, 2(4): 2–9 (in Chinese with English abstract).
- Wang Junwei, Ming Shengping, Xu Min, La Qiong. 2023. Diversity pattern and phylogenetic structure of plant communities in Alpine Ecological Key Zone[J]. Acta Agrestia Sinica, 31(9): 2777–2786 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuangming, Geng Jishi, Li Pengfei, Sun Qiang, Fan Zhangqun, Li Dan. 2023. Construction of geological guarantee system for green coal mining[J]. Coal Geology and Exploration, 51(1): 33–43 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuangming, Hou Enke, Xie Xiaoshen, Yang Fan, Liu Ying, Xiao Xucai, Shi Zengwu, Huang Yongan, Yang Zheng, Xie Yongli. 2021. Study on influence of surface ecological environment caused by middle deep coal mining and the ways of restoration[J]. Coal Sciences and Technology, 49(1): 19–31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuangming, Shen Yanjun, Sun Qiang, Hou Enke. 2020. Scientific issues of coal detracton mining geological assurance and their technology expectations in ecologically fragile mining areas of Western China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2(4): 5–19 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuangming, Sun Qiang, Gu Chao, Li Pengfei, Geng Jishi. 2024. The development of geoscientific research promoted by coal exploitation[J]. China Coal, 50(1): 2–8 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuangming, Sun Qiang, Hu Xin, Geng Jishi, Xue Shengze. 2024. Geological guarantee for in-situ development of coal[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 44(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tong, Shao Longyi, Xia Yucheng, Fu Xuehai, Sun Yuzhuang, Sun Yajun, Ju Yiwen, Bi Yinli, Yu Jingchun, Xie Zhiqing, Ma Guodong, Wang Qinwei, Zhou Jin, Jiang Tao. 2017. Major achievements and future research directions of the coal geology in China[J]. Geology in China, 44(2): 242–262 (in Chinese with English abstract).
- Wu Qiang, Tu Kun, Zeng Yifan, Liu Shouqiang. 2019. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy (coal) industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 44(6): 1625–1636 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianfeng, Zhang Cuiguang. 2014. Earth's critical zone: A holistic framework for geo-environmental researches[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 41(3): 98–104, 110 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianfeng, Zuo Liyan, Zhang Cuiguang, Yao Xiaofeng. 2023. Progress on groundwater's role in the earth system and groundwater modeling for earth system models[J]. Mineral Exploration, 14(8): 1473–1483 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shunhua, Song Xiaodong, Wu Huayong, Wu Kening, Zhang Ganlin. 2023. A review and discussion on the Earth's Critical Zone research: Status Quo and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 6(2): 308–318 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dongsheng, Li Wenping, Lai Xingping, Fan Gangwei, Liu Weiqun. 2017. Development on basic theory of water protection during coal mining in Northwest of China[J]. Journal of China Coal Society, 42(1): 36–43 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ganlin, Shi Zhou, Wang Qiubing, Zhao Yongcun, Liu Feng, Yang Lin, Song Xiaodong, Yang Fei, Jiang Zhuodong, Zeng Rong, Chen Songchao, Yang Shunhua. 2023. Development of soil geography in the new era and its future[J]. Acta Pedologica Sinica, 60(5): 1264–1276 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ganlin, Song Xiaodong, Wu Kening. 2012. A classification scheme for Earth's Critical Zones and its application in China[J]. Science China (Earth Sciences), 64(10): 1709–1720 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jun, Chen Hongsong, Nie Yunpeng, Fu Zhiyong, Lian Jinjiao, Wang Fa, Luo Zidong, Wang Kelin. 2024. Research progress on structure and hydrological processes in the karst critical zone, southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 35(4): 985–996 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ping, Tan Kelong, Han Xiaozong, Lin Zhongyue, Sun Hongjun, Xie Zhiqing, Huang Yong, Liu Yaran, Sun Jie. 2021. Research for energy and ecological security in China under new situation[J]. Coal Gology of China, 33(1): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Changsong, Zou Shengzhang, Feng Qiyang, Zhu Danni, Li Jun, Wang Jia, Xie Hao, Deng Rixin. 2022. Progress in hydrogeochemical study of Karst Critical Zone: A critical review[J]. Earth Science Frontiers, 29(3): 37–50 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongguan, Li Gang, Zhang Ganlin, Fu Bojie. 2015. Soil security: From Earth's critical zone to ecosystem services[J]. Acta Geographica Sinica, 70(12): 1859–1869 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

安培浚, 张志强, 王立伟. 2016. 地球关键带的研究进展[J]. 地球科学

- 进展, 31(12): 1228-1234.
- 卞正富, 雷少刚. 2020. 新疆煤炭资源开发的环境效应与保护策略研究[J]. 煤炭科学技术, 48(4): 43-51.
- 陈喜, 张志才. 2022. 喀斯特地区地球关键带科学与生态水文学发展综述[J]. 中国岩溶, 41(3): 356-364.
- 范立民, 向茂西, 彭捷, 李成, 李永红, 仵拨云, 卞惠瑛, 高帅, 乔晓英. 2016. 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, 41(11): 2672-2678.
- 顾大钊, 张勇, 曹志国. 2016. 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, 44(1): 1-7.
- 黄艳利, 郭亚超, 齐文跃, 李俊孟, 王佳奇, 欧阳神央, 吴来伟. 2022. 西部典型生态脆弱矿区采掘地表植被盖度演化规律与退化机制[J]. 煤炭学报, 47(12): 4217-4227.
- 焦华喆, 陈曦, 张铁岗, 杨柳华, 陈新明, Honaker Rick, 马俊伟, 余洋. 2024. 黄河流域煤炭开发区地下水污染成因分析及防治建议[J]. 中国地质, 51(1): 143-156.
- 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. 2017. 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, 42(2): 267-275.
- 李全生. 2023. 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, 40(5): 905-915.
- 李小雁, 马育军. 2016. 地球关键带科学与水文土壤学研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 52(6): 731-737.
- 李勇, 潘松圻, 宁树正, 邵龙义, 荆振华, 王壮森. 2022. 煤系成矿学内涵与发展——兼论煤系成矿系统及其资源环境效应[J]. 中国科学: 地球科学, 52(10): 1948-1965.
- 刘海平, 王义. 2023. 神东矿区资源环境治理对策研究及其具体实践[J]. 中国煤炭, 49(S1): 6-14.
- 刘金涛, 韩小乐, 刘建立, 梁忠民, 贺瑞敏. 2019. 山坡表层关键带结构与水文连通性研究进展[J]. 水科学进展, 30(1): 112-122.
- 骆占斌, 樊军, 邵明安. 2022. 地球关键带基岩风化层生态水文研究进展[J]. 科学通报, 67(27): 3311-3323.
- 吕玉香, 胡伟, 杨琰. 2019. 岩溶关键带水循环过程研究进展[J]. 水科学进展, 30(1): 123-138.
- 马腾, 沈帅, 邓亚敏, 杜尧, 梁杏, 王志强, 於昊天. 2020. 流域地球关键带调查理论方法: 以长江中游江汉平原为例[J]. 地球科学, 45(12): 4498-4511.
- 蒲俊兵. 2022. 地球关键带与岩溶关键带: 结构、特征、底界[J]. 地质科技通报, 41(5): 230-241.
- 孙强, 张卫强, 耿济世, 胡建军, 张玉良, 吕超, 葛振龙, 李鹏飞, 贾海梁, 刘亚斌, 李宇翔. 2023. 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, 51(2): 229-242.
- 王国法, 任世华, 庞义辉, 曲思建, 郑德志. 2021. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭科学技术, 49(9): 1-8.
- 王俊伟, 明升平, 许敏, 拉琼. 2023. 高山生态关键带植物群落多样性格局与系统发育结构[J]. 草地学报, 31(9): 2777-2786.
- 王双明, 耿济世, 李鹏飞, 孙强, 范章群, 李丹. 2023. 煤炭绿色开发地质保障体系的构建[J]. 煤田地质与勘探, 51(1): 33-43.
- 王双明, 侯恩科, 谢晓深, 杨帆, 刘英, 肖绪才, 石增武, 黄永安, 杨征, 谢永利. 2021. 中深部煤层开采对地表生态环境的影响及修复提升途径研究[J]. 煤炭科学技术, 49(1): 19-31.
- 王双明, 申艳军, 孙强, 侯恩科. 2020. 西部生态脆弱区煤炭减损开采地质保障科学问题及技术展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2(4): 5-19.
- 王双明, 孙强, 谷超, 李鹏飞, 耿济世. 2024. 煤炭开发推动地学研究发展[J]. 中国煤炭, 50(1): 2-8.
- 王双明, 孙强, 胡鑫, 耿济世, 薛圣泽. 2024. 煤炭原位开发地质保障[J]. 西安科技大学学报, 44(1): 1-11.
- 王佟, 邵龙义, 夏玉成, 傅雪海, 孙玉壮, 孙亚军, 琚宜文, 毕银丽, 于景邨, 谢志清, 马国东, 王庆伟, 周兢, 江涛. 2017. 中国煤炭地质研究取得的重大进展与今后的主要研究方向[J]. 中国地质, 44(2): 242-262.
- 武强, 涂坤, 曾一凡, 刘守强. 2019. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J]. 煤炭学报, 44(6): 1625-1636.
- 谢克昌. 2022. 面向 2035 年我国能源发展的思考与建议[J]. 中国工程科学, 24(6): 1-7.
- 杨建峰, 张翠光. 2014. 地球关键带: 地质环境研究的新框架[J]. 水文地质工程地质, 41(3): 98-104, 110.
- 杨建峰, 左力艳, 张翠光, 姚晓峰. 2023. 全球尺度地下水作用与地球系统模式地下水过程建模进展[J]. 矿产勘查, 14(8): 1473-1483.
- 杨顺华, 宋效东, 吴华勇, 吴克宁, 张甘霖. 2023. 地球关键带研究评述: 现状与展望[J]. 土壤学报, 6(2): 308-318.
- 张东升, 李文平, 来兴平, 范钢伟, 刘卫群. 2017. 我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究进展[J]. 煤炭学报, 42(1): 36-43.
- 张甘霖, 史舟, 王秋兵, 赵永存, 刘峰, 杨琳, 宋效东, 杨飞, 蒋卓东, 曾荣, 陈颂超, 杨顺华. 2023. 新时代土壤地理学的发展现状与趋势[J]. 土壤学报, 60(5): 1264-1276.
- 张甘霖, 宋效东, 吴克宁. 2021. 地球关键带分类方法与中国案例研究[J]. 中国科学: 地球科学, 51(10): 1681-1692.
- 张君, 陈洪松, 聂云鹏, 付智勇, 连晋姣, 王发, 罗紫东, 王克林. 2024. 西南喀斯特关键带结构及其水文过程研究进展[J]. 应用生态学报, 35(4): 985-996.
- 赵平, 谭克龙, 韩效忠, 林中月, 孙红军, 谢志清, 黄勇, 刘亚然, 孙杰. 2021. 新形势下我国能源与生态安全保障研究[J]. 中国煤炭地质, 33(1): 1-7.
- 中国工程院. 2011. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究: 节能, 煤炭卷[M]. 北京: 科学出版社.
- 周长松, 邹胜章, 冯启言, 朱丹尼, 李军, 王佳, 谢浩, 邓日欣. 2022. 岩溶关键带水文地球化学研究进展[J]. 地学前缘, 29(3): 37-50.
- 朱永官, 李刚, 张甘霖, 傅伯杰. 2015. 土壤安全: 从地球关键带到生态服务系统[J]. 地理学报, 70(12): 1859-1869.