

煤炭绿色开发地质保障体系的构建

王双明 耿济世 李鹏飞 孙强 范章群 李丹

引用本文:

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 Shuangming, GENG Jishi, LI Pengfei, et al. Construction of geological guarantee system for green coal mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 33–43.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.01.0030>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤炭智能开采地质保障技术及展望

Technologies and prospect of geological guarantee for intelligent coal mining

煤田地质与勘探. 2021, 49(1): 21–31 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.003>

绿色煤炭基础地质工作框架刍议

The framework of basic geological works for green coal

煤田地质与勘探. 2018, 46(3): 1–5 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.03.001>

基于资源和地质环境特征的河东煤田煤炭绿色开采战略研究

Research on green coal mining strategy in Hedong Coalfield based on resource and geological environment characteristic

煤田地质与勘探. 2021, 49(3): 8–17 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.03.002>

煤炭地质综合勘查模式的构建与应用

Construction and application of coal geology comprehensive exploration mode

煤田地质与勘探. 2018, 46(3): 41–46 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.03.008>

我国煤矿区矿井水污染问题及防控技术体系构建

Mine water drainage pollution in China's coal mining areas and the construction of prevention and control technical system

煤田地质与勘探. 2021, 49(5): 1–16 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.001>

煤矿采区高密度三维地震勘探模式与效果

Pattern and effect of the high density 3D seismic exploration in coal mining districts

煤田地质与勘探. 2020, 48(6): 1–7, 14 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.06.001>



移动阅读

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. doi: [10.12363/issn.1001-1986.23.01.0030](https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.01.0030)
WANG Shuangming, GENG Jishi, LI Pengfei, et al. Construction of geological guarantee system for green coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 33–43. doi: [10.12363/issn.1001-1986.23.01.0030](https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.01.0030)

煤炭绿色开发地质保障体系的构建

王双明^{1,2,3}, 耿济世^{1,2,3}, 李鹏飞^{1,2,3}, 孙 强^{1,2,3}, 范章群⁴, 李 丹⁴

- (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. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 煤炭资源的大规模、高强度开采诱发了煤矿区地质条件和生态环境的损害, 开展煤炭开采引起的地质结构-地下水环境-生态环境动态演化的耦合机制研究, 发展煤炭绿色开发地质保障理论和技术, 对于推动我国煤炭工业高质量发展有重要意义。结合当前煤炭开采技术, 分析了煤炭绿色开发地质保障的研究现状, 提出了“煤炭绿色开发地质保障体系”的科学内涵。主要包括: (1) 开采前煤炭赋存综合地质条件勘查、评价, 开采区生态环境类型划分: 通过三维地质结构、水文地质条件、岩土工程性质和生态环境等系统调查分析, 阐明煤炭开采区损害类型及其主控因素。(2) 煤炭采动作用下地质条件变化与地质结构功能系统演化: 阐明煤炭开采条件下覆岩变形特征及地质条件响应模式和损害机理, 揭示开采过程中应力场、变形场、渗流场等多场耦合作用下生态环境的时空演化特征和损害规律。(3) 采后煤炭绿色地质保障技术与生态环境功能重建: 研究采后覆岩结构、地质结构功能、生态环境的相互作用, 提出采空区与遗留资源的利用途径, 恢复煤炭开采区生态环境功能。基于精准勘查与监测, 创建含地层结构、水文地质结构和岩体力学性质等信息的数据库, 建立煤炭开采地质结构演化动态模型, 构建生态脆弱区煤炭资源开采与地质环境保护的综合研究平台, 为煤炭全生命周期的绿色安全开发和生态环境保护提供支持, 进而寻求破解煤炭开采与生态文明建设矛盾的最优途径。煤炭绿色开采地质科学系统应从科学分析、科学对待、科学归纳 3 个方面出发, 发展基础地质学、采矿学、生态学、人文经济学等多学科交叉的煤炭绿色开发地质保障理论与技术, 构建以煤炭开采、地质工程、生态环境与人文经济四位一体的绿色安全开发知识体系, 服务煤炭绿色安全开采。

关键词: 煤炭开采; 地质保障; 生态修复; 学科交叉; 理论体系

中图分类号: TD82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2023)01-0033-11

Construction of geological guarantee system for green coal mining

WANG Shuangming^{1,2,3}, GENG Jishi^{1,2,3}, LI Pengfei^{1,2,3}, SUN Qiang^{1,2,3}, FAN Zhangqun⁴, LI Dan⁴

- (1. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
3. Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
4. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Large-scale and high-intensity mining of coal resources has induced damage to geological conditions and ecological environment in coal mining areas. It is of great significance to study the coupling mechanism of geological structure-groundwater environment-ecological environment dynamic evolution caused by coal mining. Development of the theory and technology of geological guarantee for green coal development is also critical for ensuring the high-quality development of coal industry in China. In addition to the current coal mining technology, research status of geolo-

收稿日期: 2022-11-20; 修回日期: 2022-12-30

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JL-01)

第一作者: 王双明, 1955 年生, 男, 陕西岐山人, 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

gical guarantee for green development of coal is analyzed in this paper. Scientific connotation of “system of geological guarantee for green development of coal” is proposed. Specifically, the following aspects are mainly included in the present study. (1) Comprehensive geological conditions for coal occurrence before mining, and the classification of ecological environment type of the mining area are evaluated and investigated. The damage type of the coal mining area and its main control factors are elaborated through the systematic investigation and analysis of 3D geological structure, hydrogeological conditions, geotechnical engineering properties and ecological environment. (2) Changes in geological conditions and functional system evolution of geological structures under the action of coal mining are studied. Deformation characteristics of overburden rocks and the response mode and damage law of geological conditions under coal mining conditions are clarified. The spatiotemporal evolution characteristics and damage mechanism of ecological environment under the coupling effects of stress field, deformation field, seepage field and other fields during mining are revealed. (3) Green geological guarantee technology and ecological environment functions after coal mining are reconstructed. The interaction among overburden rock structure, geological structure function and ecological environment after mining are studied. Utilization ways of gob and remaining resources are proposed, and functions of ecological environment in the coal mining area are recovered. A database containing the information on stratum structure, hydrogeological structure and mechanical properties of rock mass is created based on the accurate exploration and monitoring. A dynamic model of geological structure evolution during coal mining is established, and a comprehensive research platform for coal resource mining and geological environment protection in the ecologically-fragile areas is constructed, to provide support for green and safe development and ecological environment protection in the whole coal life cycle and further to seek the optimal way for solving the contradiction between coal mining and ecological civilization construction. In addition, the geological guarantee theory and technology for green coal mining with the multidisciplinary intersection of basic geology, mining science, ecology and humanist economics need to be developed in the geoscientific system of green coal mining from three scientific aspects, i.e., analysis, treatment and generalization. On this basis, the knowledge system of green and safe development integrating coal mining, geological engineering technology, ecological environment and humanistic economy need to be established to serve the green and safe coal mining.

Keywords: coal mining; geological guarantee; ecological restoration; interdisciplinary; theory system

煤炭作为我国主体能源,在我国能源安全中发挥着压舱石的作用^[1-4]。随着煤炭不断开采,我国东部浅部煤炭资源趋于枯竭,西部地区俨然已成为我国煤炭资源的主产区^[5-6]。然而,西北地区为生态脆弱区,在煤炭开采深度、强度不断提高的同时,给当地带来了严重的生态环境问题^[7-10]。为实现习近平总书记提出的“绿水青山就是金山银山”的生态文明发展理念,绿色安全开发成为我国煤炭工业高质量发展的必由之路^[11-14]。

在煤炭开采过程中,诱发了众多生态和地质环境问题,如地表沉陷、植被损害、水资源污染等^[15-19],这与我国绿色发展理念严重相悖。众多学者也在煤炭及其共伴生资源开采利用与环境保护等方面开展了大量研究,提出了煤炭绿色开发地质保障的内涵、科学问题以及研究框架,为破解国家能源需求与环境保护之间矛盾提供战略思路^[17]。钱鸣高院士提出了煤炭资源绿色开采的理念、基础理论和技术框架,为煤炭开采和自然之间建立起复合的生态平衡机制^[20-23]。袁亮院士^[24]提出了煤炭精准开采的科学理念,为实现互联网+科学开采的未来少人(无人)采矿提出了技术路径。在煤炭绿色安全高效生产面临严峻挑战背景下,我国研究人员提出了深地煤炭资源流态化开采理论与技术和“地上无煤、井下无人”的开发途径^[25-26],为实现深

地煤炭资源开采的颠覆性变革奠定了基础。此外保水开采^[27-28]、煤与瓦斯共采^[29-30]、煤与热共采^[31]、煤矿生态修复^[32-33]等科学构想也为煤炭工业绿色发展提供了相应的理论保障。

绿色开发地质保障是煤炭资源合理开发与利用的前提。笔者通过文献调研和理论分析,阐明了煤炭绿色开发地质保障的科学内涵,构建了煤炭开采、地质工程、生态环境与人文经济四位一体的绿色安全开发知识体系,提出了全生命周期煤炭绿色开发地质保障理论和实施技术。

1 煤炭绿色研究背景及当前研究现状

在新时代中国特色社会主义背景下,中国共产党第二十次全国代表大会明确提出,必须牢固树立和践行“绿水青山就是金山银山”的理念,站在人与自然和谐共生的高度谋划发展^[34-35],这对我国煤炭开发提出了更高的要求。因此,亟需开展煤炭绿色开发地质保障理论与技术研究^[16,36-38]。笔者在中国知网(CNKI)分别以主题“煤炭+地质+环境”“煤炭+绿色”和“煤炭+地质+保障”为检索词,搜集并整理了自 2008—2021 年间的相关文献,如图 1 所示。根据数据变化情况可知,自 2017 年开始,关于煤炭绿色开发的相关研究显然成为当下关注的热点。

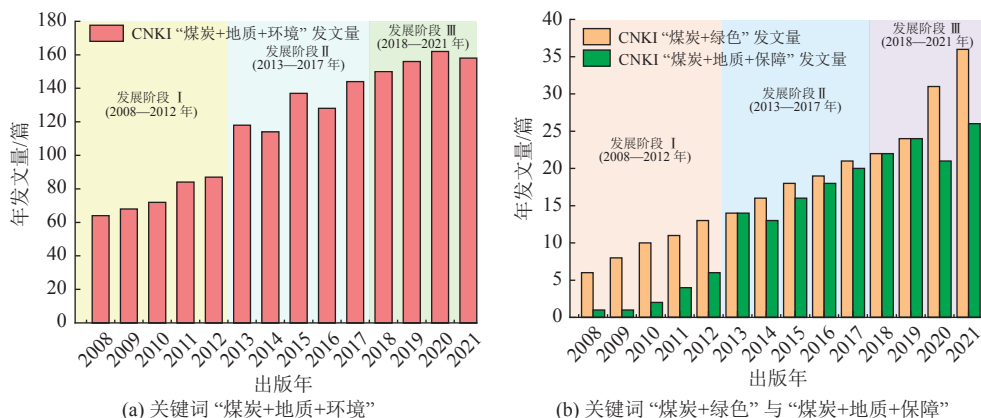


图 1 2008—2021 年不同关键词文献年发文量

Fig.1 Annual volume of articles published by different keywords in 2008–2021

我国能源结构的现状是“缺油、少气、相对富煤”，是以煤炭作为主要燃料的少数国家。尽管近些年来国家已经大力发展风能、太阳能、核能、生物质能等清洁能源，能源结构得到明显优化，但短期内煤炭的主体能源地位难以改变。因此，从煤炭的资源属性角度来看，如何高效开发利用煤炭资源依然是煤炭行业的重要课题，包括煤系稀土元素、煤系金属矿产资源以及煤系非常规油气资源。据国家统计局 2022 年统计数据显示(图 2)，近十年来，我国煤炭生产总量占比从 2012 年的 72.6% 降低到 2021 年的 67.0%，非化石能源从 11.2% 提升到 20.3%。同时，煤炭消费总量从 2012 年的 68.5% 降低到 2021 年的 56.0%，非化石能

源从 9.7% 提升到 16.6%。尽管我国煤炭生产总量和消费总量占比逐年下降，但其生产总量和消费总量仍超过能源总量的 65% 和 55%。这些研究成果在我国能源结构调整、生态环境保护和经济可持续发展方面发挥了巨大的作用。然而，目前的煤炭绿色开发理念主要关注于“水资源保护、土地和建筑物保护、减少矿井灾害(煤矿塌陷、瓦斯爆炸、地下煤气化等)、降低大气污染”等方面。事实上，煤炭绿色开发与其赋存地质条件和生态环境密切相关。实现全生命周期煤炭绿色开发，防止地质环境损害，协调煤炭开发和生态环境保护尤为必要。

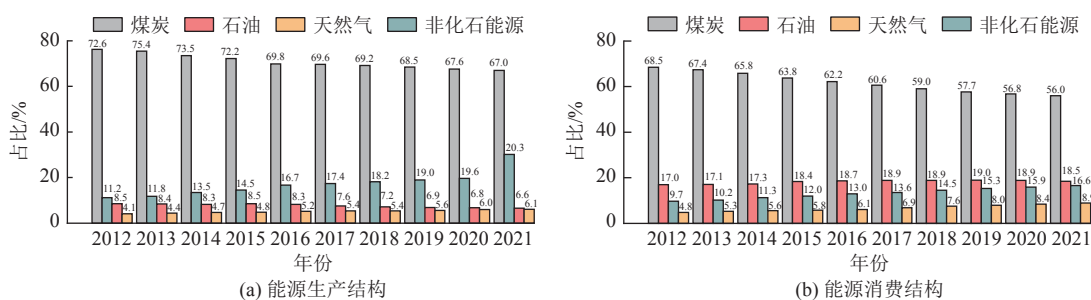


图 2 2012—2021 年我国能源生产与消费结构

Fig.2 Energy production and consumption structure of China in 2012–2021

2 煤炭绿色开发地质保障的科学内涵

随着煤炭开采向深部转移，地下岩土层结构发生变化，导致地表系统的水、土壤、大气和生物等资源的分布状态和演化过程都发生了显著变化^[39–40]。在生态脆弱区，煤炭资源开采已经造成了地面塌陷、地表开裂、水土流失、水位下降与植被枯死等诸多生态环境问题。

煤炭开发地质保障体系的科学研究主要表现为 5 个方面：(1) 突出深部资源采动条件下的地质条件变化；(2) 强调地下采动与地表生态环境的整体研究；(3) 理

解采动引起时空效应范畴的物理–化学–生物之间的耦合机制；(4) 揭示采动效应下岩石圈–大气圈–水圈–土壤圈–生物圈的相互作用和物质循环机理；(5) 总结基于可持续生态承载力的人类活动与生态环境的协同演化特征，找出破解资源开发与地质环境脆弱之间矛盾的钥匙。

目前，煤炭绿色开发地质保障研究将从以下 3 个方面开展工作。

2.1 煤炭采前精准探查

煤炭开采过程中，地质条件的变化必然对地质环

境造成严重的影响,诱发地质灾害和生态环境损害^[41-43]。因此,采前掌握煤炭开采范围内地质结构和生态环境地质条件尤为重要(图 3),这是煤炭绿色开发地质保障的重要内容^[44-45]。研究主要分为以下 3 个方面。

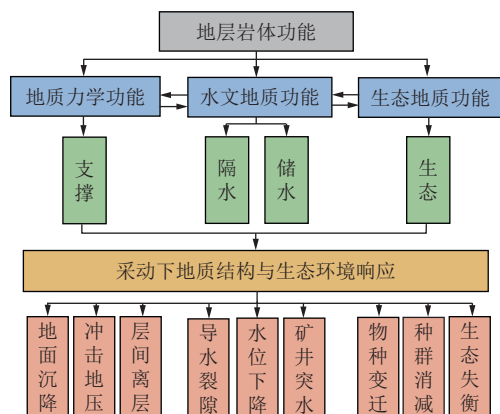


图 3 地质条件与地质功能

Fig.3 Geological conditions and functions

(1) 煤炭采前地质结构勘查。利用地球物理探测等技术手段对影响煤炭开采的地质因素,如地形地貌、岩土体工程性质和环境地质等进行系统勘测。采用三维一体化勘查技术和高度自动化、智能化的快速高效分析技术,构建高精度“绿色开采”三维地质模型。

(2) 煤炭采前环境地质体构建。根据煤炭开采区地质条件和相关参数,构建煤炭开采环境地质体温度(T)、渗流(H)、应力(M)、化学(C)耦合条件下的地质体多尺度性能演化模型,实现采前煤炭综合勘查与评价。

(3) 煤炭采前生态环境类型划分。通过对煤炭采前生态环境监测,建立矿山生态环境地质模型,制定煤炭开发生态地质保护对策。利用遥感探测等技术手段调查分析勘查区自然地理、地质条件与生态环境特征,对勘查区生态地质环境进行分区分类,并制定相应的煤炭资源开发模式,尽量减少对地表生态环境的扰动与破坏,实现煤炭资源开发与生态地质环境保护协调发展。

2.2 煤炭采中地质结构与生态环境演化

煤炭资源的大规模、高强度开采对生态脆弱矿区地下水环境造成严重损害,导致开采区应力场发生变化,引发煤层及围岩形变,煤层所处区域的地质条件和生态环境发生恶劣变化^[4,46-48](图 4)。研究主要分为以下 3 个方面。

(1) 煤炭采中地质条件变化与环境损害研究。精准探测与评估开采过程中地质条件变化,揭示开采过程中应力场、变形场、渗流场等多场耦合作用下生态环境的时空演化特征和损害机制,阐明煤炭开采多物理场演化过程对生态环境的动态扰动、损害机理,查明生态环境损害类型及特点,分析诱发生态环境损害的主控因素。

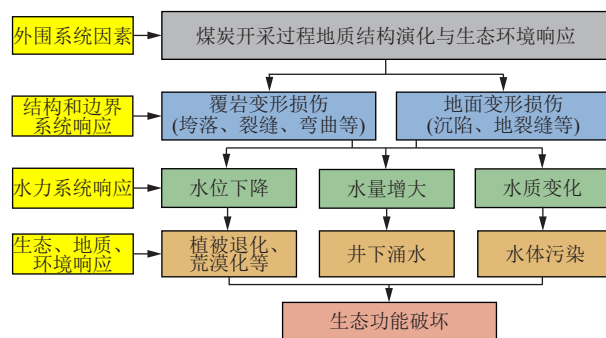


图 4 煤炭采动前地质结构响应

Fig.4 Response of geological structure before coal mining

(2) 煤炭采中矿井灾害防控。基于地质条件实时监测与分析,实现煤炭开采区域覆岩变形及沉降的控制,评价水文地质条件和工程地质条件变化,对煤矿突水、冲击地压和煤与瓦斯突出等灾害风险进行监测预警。

(3) 煤炭采中地质结构-生态环境响应分析。煤炭采动过程中应对开采扰动后的地质结构、地下水环境和生态环境特征实时监测,评估地质结构-地下水环境-生态环境的多尺度损害程度,提出地质结构-生态环境的损害修复技术。

2.3 煤炭采后地质保障

煤炭开采后岩体结构和应力状态随时间发生变化,采空区覆岩结构逐步压实、垮落带逐渐整合、地表沉降趋于稳定^[49-50]。因此,煤炭采后地质保障功能的重新建立尤为重要。研究主要分为以下 3 个方面。

(1) 煤炭采后地表生态与地质条件分析。考虑到煤炭开采条件下覆岩结构岩与地质环境的相互作用,提出生态脆弱矿区损害防控与修复技术。分析充填技术、充填模式和充填时间对煤层覆岩变形、损害的控制效果。

(2) 煤炭采后地表环境监测与修复。利用无人机、卫星、地面物探等手段,对煤炭开采影响范围的覆岩变形情况详细探测。根据采空区稳定性和生态环境特征,提出土地最佳利用途径和分类治理方案。提出地表生态环境和地质灾害监测技术和地表生态环境自然恢复及修复技术。

(3) 煤炭采后地下资源开发利用。采用物探、化探、钻探等手段查明煤炭开采后地下遗留资源,分析地下空间资源的利用前景,建立地下遗留资源评价指标体系。提出遗留矿产资源探测和评价技术、地下空间探测技术和地下空间资源综合评价方法与利用技术。

3 煤炭绿色开采地质保障理论体系

“煤炭绿色开发地质保障理论体系”以地质科学为基础,结合采矿学相关理论,同时考虑生态环境和人文经济等因素的影响,破解煤炭绿色开发中的难题,构

建以煤炭开采、地质工程技术、生态环境与人文经济四位一体的绿色安全开采体系(图5), 为煤炭工业高质量发展提供相应的理论^[51-53]。

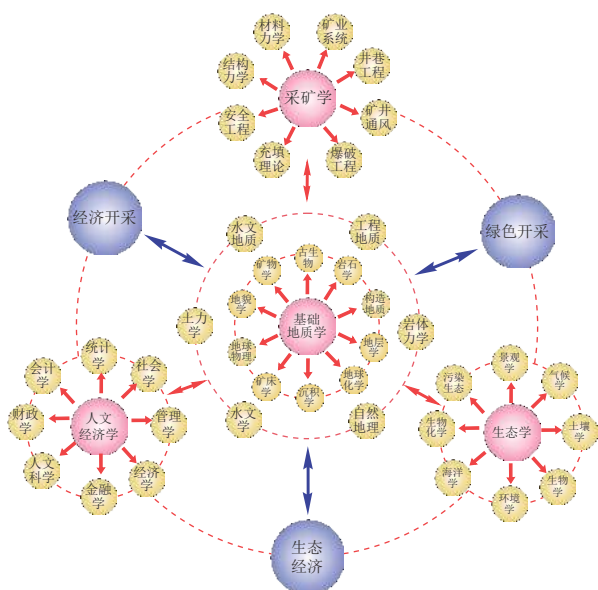


图5 煤炭绿色开采地质理论体系

Fig.5 Geological theory system of green coal mining

3.1 基础地质学

煤炭的储存和开采取决于多种地质因素^[54-55]。随着生产发展的需要, 近代地质学的各个部分已形成独立的学科体系, 并衍生出很多相关分支学科, 如: 矿物学、岩石学、矿床学、古生物学、构造地质学、大地构造学、地球物理学、地球化学、地层学、地史学、地貌学、水文地质学、工程地质学、第四纪地质学等基础理论^[56-57]。此外, 随着煤炭开采规模和深度越来越大, 从地质到采矿以及相关的环境要求都面临着新的挑战。

基础地质科学对影响煤炭开采的地质因素如地形地貌、岩土工程性质和环境地质等进行系统归纳, 筛选出开采场地的主要影响指标与控制因素。同时, 通过地质雷达和地球物理勘探等技术手段, 对煤层覆岩地质结构、垮落带裂隙发育情况和煤层顶板的封闭性等做出具体评价。

3.2 采矿学

煤炭资源的安全高效绿色开采是煤炭行业亟待解决的突出问题。如今, 煤炭资源开采逐渐向自动化、智能化、环保化的方向发展^[58-59]。近年来采矿工程与自动控制、系统论、计算机等高新技术密切相关, 与矿业系统、爆破工程、井巷工程、通风工程、安全工程、材料力学、结构力学、充填理论等学科紧密结合, 较大地促进了煤炭工程基础理论研究的进展, 同时也在煤炭开采过程中极大地促进了煤炭工程向安全、高效、绿色、智能化方向迈进^[60-61]。

采矿学理论对煤炭开发地质保障体系的建立具有重要意义。结合采矿工程理论深入分析煤炭开采过程中覆岩结构与地质环境之间的相互作用, 揭示煤炭开采过程中覆岩变形和损害的扰动机理, 进而提出生态修复关键技术。

3.3 生态学

煤炭开发地质保障是生态环境可持续发展的地质技术与地质工程^[62]。煤炭开采过程中岩石圈、水圈、生物圈和大气圈之间的相互作用对生态环境影响巨大。引发地质灾害、农田受损、水土流失加剧、河水流量减少, 甚至引发断流、地下水位下降、浅层地下水疏干、大气污染和温室效应等一系列生态环境问题^[63-65]。

为减少因煤炭开采而导致的生态环境问题, 需结合土壤学、环境学、生物学、气候学、生物化学、污染生态学等相关生态学科理论, 制定绿色、安全、可持续发展的煤炭开采计划。结合相关生态学理论, 揭示煤炭开采后生态环境自然恢复规律和主控因素, 为地表生态环境修复提供理论支撑。

3.4 人文经济学

煤炭作为我国能源结构的主体, 对我国人文经济(会计学、统计学、社会学、管理学、经济学、金融学、人文科学、财政学)的发展起到重要作用^[66]。煤炭企业亟需加强人员素质培养、能力培训、人文关怀。因此, 结合国家能源经济发展战略, 立足市场需求, 制定完善的煤炭开采计划, 方能最大程度推动经济的可持续发展^[67]。

人文经济学理论对解决煤炭资源环境问题具有良好的针对性和适用性, 想要实现煤炭资源开发与生态环境、社会经济和谐可持续发展, 需运用人文经济学原理分析经济发展形势及生态环境问题与煤炭开采的关系, 建立健全煤炭开采过程中生态环境评价指标体系, 提出解决相应问题的对策与建议。

4 煤炭绿色开采总体研究思路

从研究层次和煤炭开采结构的角度分析, 煤炭绿色开采研究主要包括基础地质条件、煤炭采动损害机制、损害演化过程、生态环境影响和减损与修复技术5个方面(图6)。

4.1 基础地质条件

煤炭赋存地质环境的精准识别是探查煤炭赋存和开采范围内的三维地质体结构、水文地质单元和生态环境的重要基础^[68-69]。借助地球物理探测、钻探和现场试验等手段, 查明煤炭开采区域的主要地质条件。煤炭赋存的地质条件包括煤层厚度、埋深、储量、水文地质条件、构造、煤层与围岩接触关系、岩土体基

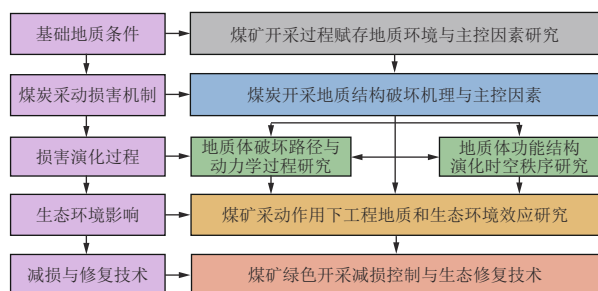


图 6 煤炭绿色开采地质研究内容之间相互关系

Fig.6 Relationship between geological researches for green coal mining

本物理力学指标等重要信息。根据地层结构特点、岩土层物理力学参数和植被信息等进行不同区块和深度上的工程岩组划分,确定煤炭开采影响范围内地层结构关系,提出基于地层岩土力学特性和地层结构变化的反演分析方法,构建三维可视化地质结构模型,提出煤炭绿色开采的科学方案(图 7)。准确获取地质力学和水文地质特性参数,为后续研究提供重要依据。

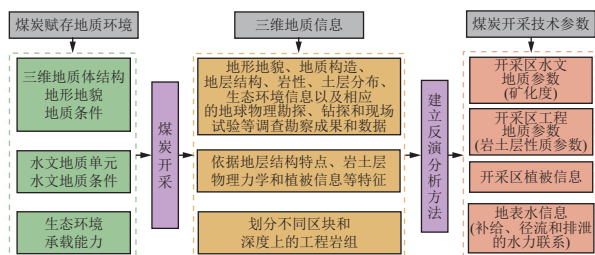


图 7 煤炭绿色开采科学方案

Fig.7 Scientific program of green coal mining

4.2 煤炭采动损害机制

煤炭资源开采的主要特点是在近地表形成地下空间,导致开采区应力场发生变化,引发煤层和周围岩体的形变,导致煤层所处的地质条件和地质环境发生持续变化^[70-71]。根据地层几何特征、地层类型、岩土体结构、水文地质结构等变化规律,研究煤炭采动后地层结构变形的损害模式及其主控因素。构建煤炭绿色开采三维地质结构演化的精细化分析模型和可快速查询地质参数数据库,为评估开采过程中地质条件的变化规律提供相应技术保障(图 8)。

煤炭开采过程中,根据地层结构动力学演化过程和时空结构秩序,主要解决地层地质功能结构变迁演化的阶段性特征问题和时空有序结构形成与转化问题^[72-73]。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,总结地层地质功能结构变化的影响因素、宏观变形损害的空间结构和功能结构的动态演变过程。构建煤炭安全开采条件下覆岩变形的演化模型,揭示采动条件下地质系统损害的时空演化机理(图 9)。

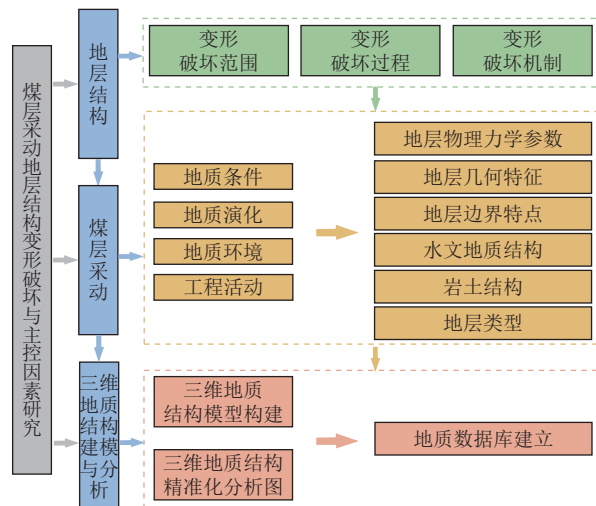


图 8 煤炭采动过程中地层结构损害机制与主控因素

Fig.8 Mechanism and main controlling factors of formation structure damage during coal mining

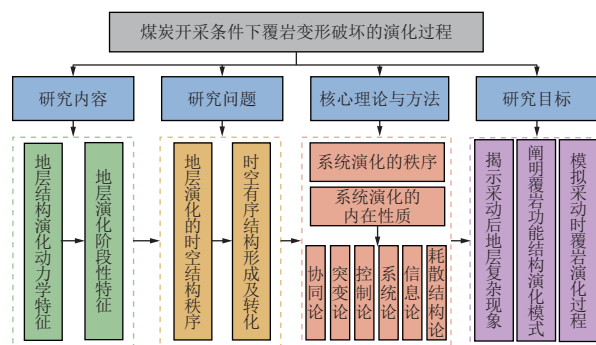


图 9 煤炭采动过程覆岩变形损害的演化过程

Fig.9 Evolution of overburden deformation and damage during coal mining

4.3 煤炭采动过程生态环境效应

煤炭开采过程中地质条件的变化必然会影响地质环境,从而引发地面塌陷、地裂缝、水位下降等地质灾害和生态环境损害问题^[74]。通过研究煤炭采动过程中覆岩变形破坏演化过程和损害临界条件,归纳煤炭赋存环境和采动损害的主控因素,如地质结构与地质条件、采矿工艺与规模、充填支护形式和覆岩微-宏观性质等,进而对不同演化阶段的工程影响和环境效应进行相应的评估,并对可能面临的工程地质和生态环境问题提出针对性的解决措施(图 10)。

4.4 煤炭采动后减损控制与修复技术

煤炭采动后减损控制与生态环境修复的研究主要针对生态环境损害前和损害后的变化特点开展防治工作^[75-76]。煤炭采动后,实施充填技术,对隔水顶板导水裂隙通道实施注浆修复等技术手段,对已发生损害的煤矿区采用煤矸石回填和生态系统再造等,实现生态修复治理。分析预测修复后生态环境前景,构建煤炭采动后生态环境修复治理综合评价技术体系(图 11)。

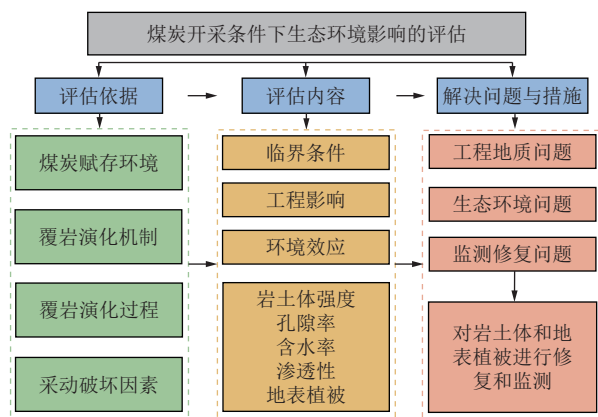


图 10 煤炭采动过程覆岩变形损害演化过程

Fig.10 Evolution of overburden deformation and damage during coal mining

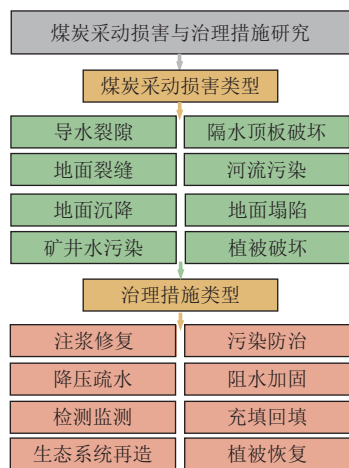


图 11 煤炭采动后减损控制与生态环境修复

Fig.11 Loss reduction control and restoration of geological ecological environment after coal mining

4.5 煤炭采动地质研究总体要求

煤炭绿色开采过程中,在“精细勘查”“有效减损”和“生态修复”理念的指导下,通过地质手段在煤炭绿色开采过程中构建三维地质结构演化的精细化模型,建立系统完备的煤炭绿色开采地质科学体系(图 12),实现煤炭资源绿色开采和清洁高效利用,为我国煤炭能源绿色可持续发展提供保障。煤炭绿色开采地质科学系统研究包括 3 个重要阶段(图 13)。

(1) 煤炭开采全过程(采前、采中和采后)地质结构系统功能演化的科学分析。通过监测采集煤炭开采前后的地质结构实时变化信息,准确阐述煤炭开采中的地质结构演化过程及覆岩变形损害规律,进而采取科学技术手段保障煤炭绿色安全开采。

(2) 针对开采过程中存在的地质损害问题采取相应的解决措施。通过绿色地质勘查技术精准探测地形地貌,掌握相关地质开采条件等重要信息。开发完善的科学监测系统,实时监测煤炭采动引起的围岩变形、岩爆、冒顶片帮和高压突水等矿井灾害问题,并对可

能面临的工程实际问题提出针对性解决措施。

(3) 煤炭绿色开采地质科学研究成果科学归纳,开放共享。对煤炭绿色开采地质体系进行系统总结(采前精准地质勘查,采中智能化、信息化、绿色安全科学开采,采后生态环境恢复及效益评估)。及时更新数据库,将最新参数和信息添加到数据库中,完善模型。

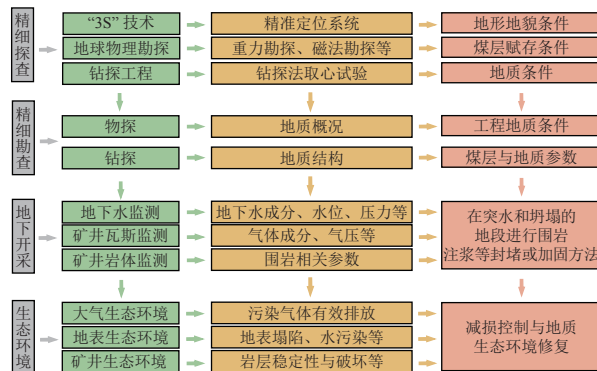


图 12 煤炭绿色开采地质系统措施

Fig.12 Measures of geological system for green coal mining

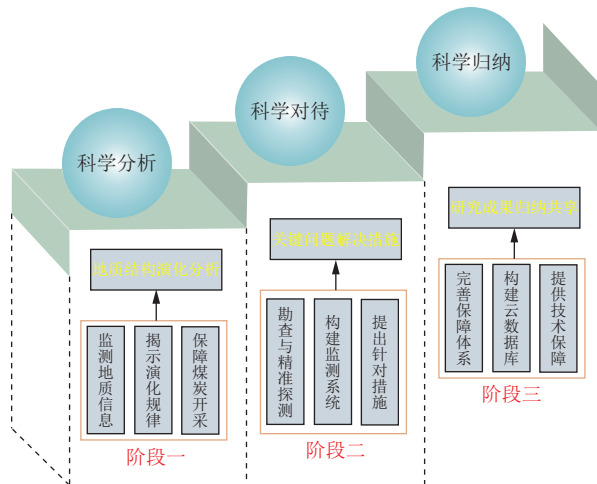


图 13 煤炭开采地质研究阶段划分与总体要求

Fig.13 Overall requirements and stage division of geology research for coal mining

5 结论

a. 煤炭绿色开发地质保障以煤炭绿色安全开采和生态环境保护为核心目标,以煤炭采前、采中和采后的地质条件和生态环境响应特征为重要研究对象,重建煤炭绿色开发地质保障技术与生态环境功能。结合煤炭开采条件下覆岩结构与地质环境相互作用机理,提出生态脆弱矿区损害防控与修复技术。构建生态脆弱区煤炭资源开采与生态环境保护的分析研究平台,寻求系统解决资源开采与生态文明建设矛盾的新途径。

b. 随着煤炭开采进程逐渐加快,国家对煤炭开发地质保障工作的要求越来越高。明确煤炭绿色开发地

质保障的研究目标,为煤炭全生命周期的绿色安全开发和生态环境保护提供支持,实现煤炭资源绿色开采和能源清洁高效利用,保护矿山生态环境。

c. 根据我国能源优化趋势和煤炭开采现状,提出了“煤炭绿色开发地质保障科学系统”理念,并指出该系统应从科学分析、科学对待、科学归纳 3 个方面出发,发展基础地质学、采矿学、生态学、人文经济学多学科交叉的煤炭绿色开发地质保障理论与技术,发挥地质科学在煤炭绿色安全开采中的重要作用。

致谢:感谢西安科技大学侯恩科教授和《煤田地质与勘探》编辑部晋香兰执行主编的大力支持和帮助,感谢董志浩、赵飞、胡建军博士对本文图表编辑的帮助。

参考文献(References)

- [1] 王国法.《煤矿智能化建设指南(2021年版)》解读:从编写组视角进行解读[J].智能矿山,2021,2(4):2-9.
WANG Guofa. Interpretation of the guide to intelligent construction of coal mines (2021): From the perspective of the writing group[J]. Journal of Intelligent Mine, 2021, 2(4): 2-9.
- [2] 王国法,任世华,庞义辉,等.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,2021,49(9):1-8.
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. 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, 2021, 49(9): 1-8.
- [3] 武强,涂坤,曾一凡,等.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,2019,44(6):1625-1636.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan, et al. 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, 2019, 44(6): 1625-1636.
- [4] 王双明,申艳军,孙强,等.“双碳”目标下煤炭开采扰动空间CO₂地下封存途径与技术难题探索[J].煤炭学报,2022,47(1):45-60.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al. Underground CO₂ storage and technical problems in coal mining area under the “dual carbon” target[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 45-60.
- [5] 李霞,崔涛.我国煤炭资源可持续发展的保障分析[J].中国煤炭,2019,45(1):33-37.
LI Xia, CUI Tao. Supportability analysis of sustainable development for coal resources in China[J]. China Coal, 2019, 45(1): 33-37.
- [6] 徐智敏,孙亚军,高尚,等.干旱矿区采动顶板导水裂隙的演化规律及保水采煤意义[J].煤炭学报,2019,44(3):767-776.
XU Zhimin, SUN Yajun, GAO Shang, et al. Law of mining induced water conduction fissure in arid mining area and its significance in water-preserved coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 767-776.
- [7] 刘辉,朱晓峻,程桦,等.高潜水位采煤沉陷区人居环境与生态重构关键技术:以安徽淮北绿金湖为例[J].煤炭学报,2021,46(12):4021-4032.
LIU Hui, ZHU Xiaojun, CHENG Hua, et al. Key technology of human environment and ecological reconstruction in high submersible level coal mining subsidence area: A case study from Lyujin Lake, Huaibei[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 4021-4032.
- [8] 邱立新,杜铭华,周田君.西北煤炭开发对水环境影响评价模型与方法[J].干旱区资源与环境,2008,22(2):20-25.
QIU Lixin, DU Minghua, ZHOU Tianjun. A model and a method for assessment of environmental impact of northwest Chinese coal development on water resources[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(2): 20-25.
- [9] 陈燕.生态马克思主义的中国化发展研究[J].环境工程,2021,39(12):286.
CHEN Yan. Study on the development of ecological Marxism in China[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(12): 286.
- [10] 曹健,黄庆享.浅埋近距煤层开采覆岩与地表裂缝发育规律及控制[J].煤田地质与勘探,2021,49(4):213-220.
CAO Jian, HUANG Qingxiang. Regularity and control of overburden and surface fractures in shallow-contiguous seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 213-220.
- [11] 刘峰,郭林峰,赵路正.双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J].煤炭学报,2022,47(1):1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15.
- [12] 王双明,师庆民,王生全,等.富油煤的油气资源属性与绿色低碳开发[J].煤炭学报,2021,46(5):1365-1377.
WANG Shuangming, SHI Qingmin, WANG Shengquan, et al. Resource property and exploitation concepts with green and low-carbon of tar-rich coal as coal-based oil and gas[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1365-1377.
- [13] 孙元春,尚彦军.煤矿绿色开采与沙漠综合治理的互补性[J].煤炭学报,2009,34(12):1643-1648.
SUN Yuanchun, SHANG Yanjun. Complementarities between green coal mining and sandy desertification control[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1643-1648.
- [14] 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 Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 1-13.
- [15] 申艳军,杨博涵,王双明,等.黄河几字弯区煤炭基地地质灾害与生态环境典型特征[J].煤田地质与勘探,2022,50(6):104-117.
SHEN Yanjun, YANG Bohan, WANG Shuangming, et al. Typical characteristics of geological hazards and ecological environment of coal base in the bends area of the Yellow River[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(6): 104-117.
- [16] 刘汉斌,程芳琴.基于资源和地质环境特征的河东煤田煤炭绿色开采战略研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(3):8-17.
LIU Hanbin, CHENG Fangqin. Research on green coal mining strategy in Hedong Coalfield based on resource and geological environment characteristic[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 8-17.
- [17] 王双明,孙强,乔军伟,等.论煤炭绿色开采的地质保障[J].煤炭学报,2020,45(1):8-15.

- WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 8–15.
- [18] 王佟, 孙杰, 江涛, 等. 煤炭生态地质勘查基本构架与科学问题[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 276–284.
- WANG Tong, SUN Jie, JIANG Tao, et al. Basic configuration and scientific problems of coal eco-geological survey[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 276–284.
- [19] 武强, 涂坤. 我国发展面临能源与环境的双重约束分析及对策思考[J]. 科学通报, 2019, 64(15): 1535–1544.
- WU Qiang, TU Kun. Analysis on the dual constraints of energy and environment to the development of China and countermeasures[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(15): 1535–1544.
- [20] 许家林. 岩层控制与煤炭科学开采: 记钱鸣高院士的学术思想和科研成就[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1): 1–6.
- XU Jialin. Strata control and scientific coal mining: A celebration of the academic thoughts and achievements of Academician Qian Minggao[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(1): 1–6.
- [21] 康淑云, 柳妮. 加强科技和经济研究 实现科学采矿 提高煤炭工业科学发展水平: 中国工程院院士、中国矿业大学教授钱鸣高专访[J]. 煤炭经济研究, 2012, 32(4): 15–18.
- KANG Shuyun, LIU Ni. Strengthening scientific and economic research, realizing scientific mining and improving the scientific development level of coal industry: An interview with Qian Minggao, Academician of Chinese Academy of Engineering and Professor of China University of Mining and Technology[J]. Coal Economic Research, 2012, 32(4): 15–18.
- [22] 许家林, 钱鸣高. 绿色开采的理念与技术框架[J]. 科技导报, 2007, 25(7): 61–65.
- XU Jialin, QIAN Minggao. Concept of green mining and its technical framework[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(7): 61–65.
- [23] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 343–348.
- QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green technique in coal mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2003, 32(4): 343–348.
- [24] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1–7.
- YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1–7.
- [25] 缪协兴, 陈荣华, 白海波. 保水开采隔水关键层的基本概念及力学分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(6): 561–564.
- MIAO Xiexing, CHEN Ronghua, BAI Haibo. Fundamental concepts and mechanical analysis of water-resisting key strata in water-preserved mining[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(6): 561–564.
- [26] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 7–14.
- WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Limin, et al. Study on overburden aquiclude and water protection mining regionization in the ecological fragile mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 7–14.
- [27] 袁亮. 瓦斯治理理念和煤与瓦斯共采技术[J]. 中国煤炭, 2010, 36(6): 5–12.
- YUAN Liang. Concept of gas control and simultaneous extraction of coal and gas[J]. China Coal, 2010, 36(6): 5–12.
- [28] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 我国煤与瓦斯共采: 理论、技术与工程[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1391–1397.
- XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Theory, technology and engineering of simultaneous exploitation of coal and gas in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1391–1397.
- [29] 万志军, 毕世科, 张源, 等. 煤—热共采的理论与技术框架[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2099–2106.
- WAN Zhijun, BI Shike, ZHANG Yuan, et al. Framework of the theory and technology for simultaneous extraction of coal and geothermal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2099–2106.
- [30] 谢和平, 鞠杨, 高明忠, 等. 煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1210–1219.
- XIE Heping, JU Yang, GAO Mingzhong, et al. Theories and technologies for in-situ fluidized mining of deep underground coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1210–1219.
- [31] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 547–556.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 547–556.
- [32] 胡振琪, 龙精华, 王新静. 论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1751–1757.
- HU Zhenqi, LONG Jinghua, WANG Xinjing. Self-healing, natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1751–1757.
- [33] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术 with 战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211–1221.
- PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River Basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211–1221.
- [34] 卢奇秀. 能源行业掀起学习贯彻落实二十大精神热潮[N]. 中国能源报, 2022-11-14(001).
- [35] 于洋. 二十大的能源发展逻辑[J]. 中国石油石化, 2022(21): 48–51.
- YU Yang. The energy development logic of the 20th CPC National Congress[J]. China Petrochem, 2022(21): 48–51.
- [36] 吴群英, 彭捷, 迟宝锁, 等. 神南矿区煤炭绿色开采的水资源监测研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 304–311.
- WU Qunying, PENG Jie, CHI Baosuo, et al. Research on water resources monitoring of green coal mining in Shennan Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 304–311.
- [37] 吴群英, 陈国梁, 冯涛. 煤炭资源开发与利用的立体式生态模式: 以陕北矿区“1+4”绿色可持续生态建设为例[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4163–4169.
- WU Qunying, CHEN Guoliang, FENG Tao. Three-dimensional ecological model of coal exploitation and utilization: Constructing “1+4” green and sustainable development ecology in Northern Shaanxi Mining Area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 4163–4169.
- [38] 韩利廷. 煤炭开采对地质结构及地质安全的影响及应对举

- 措[J]. *中国煤炭工业*, 2022(7): 66–67.
- HAN Liting. Impact of coal mining on geological structure and geological safety and countermeasures[J]. *China Coal Industry*, 2022(7): 66–67.
- [39] 尚彦军, 金维浚, 伊学涛, 等. 新源县加朗普特大型滑坡地质结构探测及老滑坡影响综合研究[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(3): 760–771.
- SHANG Yanjun, JIN Weijun, YI Xuetao, et al. Geophysical exploration on unique geostructure of super large zeketal landslide in Xinyuan County and back analysis on influence of old landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(3): 760–771.
- [40] 彭建兵, 兰恒星. 略论生态地质学与生态地质环境系统[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(6): 877–893.
- PENG Jianbing, LAN Hengxing. Ecological geology and eco-geological environment system[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(6): 877–893.
- [41] 陈超, 梁宇生, 杨坤, 等. 风沙区煤炭开采对生态环境的损害及防治策略[J]. *煤炭技术*, 2016, 35(5): 10–12.
- CHEN Chao, LIANG Yusheng, YANG Kun, et al. Impact on ecological environment due to coal mining and control strategy in aeoliansand area[J]. *Coal Technology*, 2016, 35(5): 10–12.
- [42] 王霖琳. 资源枯竭矿区生态环境损害评价指标体系研究[J]. *煤炭科学技术*, 2009, 37(9): 125–128.
- WANG Linlin. Study on ecological environment damaged assessment index system of resource-exhausted mining areas[J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(9): 125–128.
- [43] 王世斌, 侯恩科, 王双明, 等. 煤炭安全智能开采地质保障系统软件开发与应用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(7): 13–24.
- WANG Shibin, HOU Enke, WANG Shuangming, et al. Development and application of geological guarantee system software for safe and intelligent coal mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 13–24.
- [44] 董书宁, 刘再斌, 程建远, 等. 煤炭智能开采地质保障技术及展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(1): 21–31.
- DONG Shuning, LIU Zaibin, CHENG Jianyuan, et al. Technologies and prospect of geological guarantee for intelligent coal mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 21–31.
- [45] 崔艳, 宋颖霞, 李娜. 煤炭开采项目生态及地下水环境影响后评价重点分析[J]. *煤炭工程*, 2019, 51(10): 7–10.
- CUI Yan, SONG Yingxia, LI Na. Key points of environmental impact post-assessment of ecology and underground water for coal mining projects[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(10): 7–10.
- [46] 张会军. 黄河流域煤炭富集区生态开采模式初探[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(12): 233–242.
- ZHANG Huijun. Preliminary study on ecological mining mode in coal-rich area of the Yellow River Basin[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(12): 233–242.
- [47] 袁亮, 董书宁. “煤炭安全高效绿色智能开采地质保障”专辑特邀主编致读者[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2329–2330.
- YUAN Liang, DONG Shuning. Special editor of the album “safe, efficient, green and intelligent mining of coal” to readers[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2329–2330.
- [48] 李建伟, 王文才, 吴祥业, 等. 煤矿开采新理论与新技术研究生优质课程建设与实践[J]. *中国现代教育装备*, 2022(15): 130–132.
- LI Jianwei, WANG Wencai, WU Xiangye, et al. Construction and practice of quality courses for postgraduates of new theory and new technology of coal mining[J]. *China Modern Educational Equipment*, 2022(15): 130–132.
- [49] 程爱国. 煤炭绿色勘查开发理论与关键技术[J]. *中国煤炭地质*, 2020, 32(9): 33–37.
- CHENG Aiguo. Coal and coal measures mineral resources green exploration and exploitation theory and key technologies[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(9): 33–37.
- [50] 安英莉, 卞正富, 戴文婷, 等. 煤炭开采形成的碳源/碳汇分析: 以徐州贾汪矿区为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(2): 415–422.
- AN Yingli, BIAN Zhengfu, DAI Wenting, et al. Analysis on the gas carbon source and carbon sink in coal mining: A case study of Jiawang, Xuzhou[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2017, 46(2): 415–422.
- [51] 陈红梅, 杨美美. 秦皇岛港煤炭供应链牛鞭效应形成因素分析[J]. *北京交通大学学报(社会科学版)*, 2017, 16(1): 102–109.
- CHEN Hongmei, YANG Meimei. A study on the causes of bull-whip effect in the coal supply chain of Qinhuangdao Port[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition)*, 2017, 16(1): 102–109.
- [52] 戚昊天. 我国煤炭供需结构体系分析及节能问题研究[J]. *中国集体经济*, 2022(13): 138–140.
- QI Haotian. Analysis of China’s coal supply and demand structure system and research on energy conservation[J]. *China Collective Economy*, 2022(13): 138–140.
- [53] 郑厚发, 姬刘亭, 杨扬, 等. 煤炭企业标准体系建设分析与对策建议[J]. *中国煤炭*, 2022, 48(6): 5–13.
- ZHENG Houfa, JI Liuting, YANG Yang, et al. Analysis and suggestions on the construction of coal enterprise standard system[J]. *China Coal*, 2022, 48(6): 5–13.
- [54] 马彦敏, 李恩平. 政府监管下煤炭企业绿色开采策略的演化博弈[J]. *中国矿业*, 2022, 31(4): 15–22.
- MA Yanmin, LI Enping. Evolutionary game of coal enterprises’ green mining strategies under government supervision[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(4): 15–22.
- [55] 刘晓康. “双碳”目标下, 煤炭企业绿色低碳转型的实践与思考[J]. *中国煤炭工业*, 2022(6): 23–25.
- LIU Xiaokang. Practice and thinking of green and low-carbon transformation of coal enterprises under the “double carbon” goal[J]. *China Coal Industry*, 2022(6): 23–25.
- [56] 吴晓华, 郑厚发, 李岩彬. 煤炭企业绿色矿山建设标准体系研究[J]. *中国煤炭*, 2022, 48(6): 50–55.
- WU Xiaohua, ZHENG Houfa, LI Yanbin. Study on the standard system of green mine construction in coal enterprises[J]. *China Coal*, 2022, 48(6): 50–55.
- [57] 张欣乐, 张毅, 石晓敏. “双碳”目标下煤炭绿色物流政企行为策略演化博弈研究: 基于系统动力学视角[J]. *煤炭经济研究*, 2022, 42(1): 30–38.
- ZHANG Xinle, ZHANG Yi, SHI Xiaomin. Evolutionary game study on government and enterprise behavior strategy of coal green logistics under “double-carbon” goal: A study based on the system dynamics perspective[J]. *Coal Economic Research*, 2022, 42(1): 30–38.
- [58] 黄嗣琪, 徐晓明. 矿区煤炭资源的开采强度对地质灾害的影响[J]. *能源研究与管理*, 2020(4): 102–104.

- HUANG Siqi, XU Xiaoming. Influence of mining intensity of coal resources in mining area on geological disasters[J]. *Energy Research and Management*, 2020(4): 102–104.
- [59] 范立民. 榆神府区煤炭开采强度与地质灾害研究[J]. *中国煤炭*, 2014, 40(5): 52–55.
- FAN Limin. On coal mining intensity and geo-hazard in Yulin-Shenmu-Fugu Mine Area[J]. *China Coal*, 2014, 40(5): 52–55.
- [60] 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.
- [61] 晨一新. 基于煤炭经济发展战略规划的途径分析[J]. *现代工业经济和信息化*, 2022, 12(6): 217–218.
- CHEN Yixin. Analysis of ways based on strategic planning of coal economy development[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2022, 12(6): 217–218.
- [62] 贾县民, 李栋, 王喜莲. 煤炭经济高质量发展政产融研协同驱动机制研究[J]. *煤炭经济研究*, 2022, 42(2): 4–10.
- JIA Xianmin, LI Dong, WANG Xilian. Research on the collaborative driving mechanism of government, industry, finance and research for high-quality development of coal economy[J]. *Coal Economic Research*, 2022, 42(2): 4–10.
- [63] 马洁琼. 煤炭经济中资源发展的分析研究[J]. *现代工业经济和信息化*, 2022, 12(2): 218–219.
- MA Jieqiong. Analysis and research on the development of resource integration in coal economic development[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2022, 12(2): 218–219.
- [64] 王小娟. 煤炭经济形势分析及应对策略[J]. *现代工业经济和信息化*, 2022, 12(2): 184–185.
- WANG Xiaojuan. Analysis of the economic situation of coal and coping strategies[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2022, 12(2): 184–185.
- [65] 曹代勇, 魏迎春, 宁树正. 绿色煤炭基础地质工作框架共识[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(3): 1–5.
- CAO Daiyong, WEI Yingchun, NING Shuzheng. The framework of basic geological works for green coal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(3): 1–5.
- [66] 程爱国. 中国煤炭资源保障程度和绿色勘查开发途径[J]. *中国煤炭地质*, 2020, 32(1): 5–10.
- CHENG Aiguo. Coal resource security level and green exploration, exploitation approaches in China[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(1): 5–10.
- [67] 李全生, 李晓斌, 许家林, 等. 岩层采动裂隙演化规律与生态治理技术研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 28–47.
- LI Quansheng, LI Xiaobin, XU Jialin, et al. Research advances in mining fractures evolution law of rock strata and ecological treatment technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 28–47.
- [68] 张玉军, 张志巍. 煤层采动覆岩破坏规律与控制技术研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(11): 85–97.
- ZHANG Yujun, ZHANG Zhiwei. Research progress of mining overlying strata failure law and control technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(11): 85–97.
- [69] 许家林. 煤矿绿色开采20年研究及进展[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(9): 1–15.
- XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 1–15.
- [70] 郭文兵, 赵高博, 白二虎. 煤矿高强度长壁开采覆岩破坏充分采动及其判据[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(11): 3657–3666.
- GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, BAI Erhu. Critical failure of overlying rock strata and its criteria induced by high-intensity longwall mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(11): 3657–3666.
- [71] 黄炳香, 张农, 靖洪文, 等. 深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 911–926.
- HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JING Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 911–926.
- [72] 张平松, 许时昂, 郭立全, 等. 采场围岩变形与破坏监测技术研究进展及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(3): 14–48.
- ZHANG Pingsong, XU Shi'ang, GUO Liquan, et al. Prospect and progress of deformation and failure monitoring technology of surrounding rock in stope[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(3): 14–48.
- [73] 卞正富, 雷少刚. 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*, 2020, 48(4): 43–51.
- BIAN Zhengfu, LEI Shaoqiang. Green exploitation of coal resources and its environmental effects and protecting strategy in Xinjiang[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(4): 43–51.
- [74] 谭新平, 徐张建, 王小秋, 等. 厚黄土与煤炭采空区地质灾害易发性评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(5): 112–120.
- TAN Xinping, XU Zhangjian, WANG Xiaoqi, et al. Geological hazard susceptibility assessment in thick loess and gob[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(5): 112–120.
- [75] 王佟, 杜斌, 李聪聪, 等. 高原高寒煤矿区生态环境修复治理模式与关键技术[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 230–244.
- WANG Tong, DU Bin, LI Congcong, et al. Ecological environment rehabilitation management model and key technologies in plateau alpine coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 230–244.
- [76] 王双明, 侯恩科, 谢晓深, 等. 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*, 2021, 49(1): 19–31.
- WANG Shuangming, HOU Enke, XIE Xiaoshen, et al. Study on influence of surface ecological environment caused by middle deep coal mining and the ways of restoration[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 19–31.

(责任编辑 晋香兰; 英文校对 张磊)