

DOI: 10.12401/j.nwg.2023079

鄂尔多斯盆地煤炭采动的生态系统响应机制 研究现状与展望

杜臻¹, 张茂省^{1,*}, 冯立¹, 刘颢¹, 张勖¹, 郭迟辉², 王耀^{1,3}, 李华华¹

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 712000; 2. 陕西金土地乡村振兴集团有限公司, 陕西 西安 710075; 3. 榆林市自然资源和规划局, 陕西 榆林 719000)

摘要: 煤炭开采在为国家能源安全做出重大贡献的同时也产生了严重的矿山环境问题, 煤炭作为中国主体能源的局面短期内难以扭转, 煤炭采动的生态系统响应机制与生态修复技术已经成为人与自然和谐共生的现代化建设中迫切需要解决的关键科技问题。笔者以国家大型能源基地鄂尔多斯盆地北部侏罗系煤田为研究区, 在检索和分析大量文献资料的基础上, 将煤炭开采的生态系统响应机制与生态修复关键技术按照地质环境、水环境、植被生态环境 3 个方面归纳总结研究进展, 分析凝练目前仍存在的关键科技问题, 并从多因素耦合作用下的生态系统响应机制与演化规律、生态问题快速智能识别与风险防控关键技术、人与自然和谐共生的现代化实现模式与路径等 3 个方面提出了进一步研究建议。

关键词: 煤炭采动; 生态环境效应; 侏罗系煤田; 生态修复

中图分类号: P69; F205

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0078-11

Research Status and Prospect of Ecosystem Response Mechanism to Coal Mining in Ordos Basin

DU Zhen¹, ZHANG Maosheng^{1,*}, FENG Li¹, LIU Hao¹, ZHANG Xu¹, GUO Chihui², WANG Yao^{1,3}, LI Huahua¹

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 712000, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Golden Land Rural Revitalization Group Co., Ltd, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. Yulin Bureau of Natural Resources and Planning, Xi'an 719000, Shaanxi, China)

Abstract: While coal mining has made significant contributions to national energy security, it has also caused serious mining environmental problems. The situation of coal as the main energy source in China is difficult to reverse in the short term. The ecological response mechanism and technologies for ecological restoration caused by coal mining have become key technological issues that urgently need to be solved in the path of harmonious coexistence between humans and nature. This article takes the Jurassic coalfield in the northern part of the Ordos basin, a national large-scale energy base, as the research area. Based on the search and analysis of a large amount of literature, the ecological response mechanism and key ecological restoration technologies of coal mining are summarized in three aspects: geological environment, water environment, and vegetation ecological environment. The key scientific and technological issues that still exist are analyzed and condensed. Further re-

收稿日期: 2023-01-10; 修回日期: 2023-04-18; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1504700), 国家自然科学基金重点项目(41641011)联合资助。

作者简介: 杜臻(1998-), 男, 硕士, 主要从事地质工程与矿山生态修复方面研究。E-mail: duzhen@stu.xjtu.edu.cn。

* 通讯作者: 张茂省(1962-), 男, 研究员, 博导, 长期从事地质调查、灾害防治与生态修复研究工作。E-mail: xjtzms@xjtu.edu.cn。

search suggestions were proposed from three aspects: the response mechanism and evolution law of the ecosystem under the coupling of multiple factors, key technologies for rapid and intelligent identification of ecological problems and risk prevention and control, and the implementation pattern and path of harmonious coexistence between humans and nature.

Keywords: coal mining; ecological environmental effects; Jurassic coal field; ecological restoration

鄂尔多斯盆地内蕴藏着丰富的煤炭、天然气、石油、盐岩等能源和矿产资源,是中国重要的能源基地,在保障国家能源资源安全方面具有重要的战略地位。鄂尔多斯盆地是一个大型的聚煤盆地,进入晚石炭世,盆地沉积了一套本溪组($C_3\beta$)、羊虎沟组($C_3\psi$)和太原组($C_3\tau$)的海陆交互相含煤碎屑岩建造。石炭系岩性主要为深灰色-黑色泥岩、页岩夹灰白色砂岩及薄层白云岩、灰质白云岩和煤层、煤线,厚度为200~700 m。从二叠纪开始海水逐渐退出,沉积了一套从近海平原湖泊相→河流三角洲→湖沼相为主的碎屑岩夹煤系建造,包括山西组($P_1\sigma$)、石盒子组($P_2\sigma\eta$)和孙家沟组($P_3\sigma$)。岩性为中细砂岩、泥岩互层夹煤层,局部夹砂质灰岩、泥灰岩透镜体,厚度为300~500 m。三叠系为一套内陆河流、湖泊、沼泽相碎屑岩沉积建造,自下而上分为刘家沟组($T_1\sigma$)、二马营组($T_2\varepsilon$)、延长组($T_3\psi$)和瓦窑堡组($T_3\omega$)。其中延长组和瓦窑堡组是盆地主要的石油产层及重要的含煤层位。侏罗系为一套河湖相碎屑岩夹煤层沉积,厚度超过2000 m。由下至上分为富县组($J_1\varphi$)、延安组($J_2\psi$)、直罗组($J_2\xi$)、安定组($J_2\alpha$)和芬芳河组($J_3\varphi$)。早期沉积了一套泥岩夹砂岩及少量泥灰岩和砂岩、砾岩及泥岩、油页岩夹薄煤层的河流-河沼相沉积;中期为砂岩、含砾砂岩及砂岩、页岩与泥岩不等厚互层,夹煤层或煤线。

侏罗系是鄂尔多斯盆地煤炭最重要的产层,其中在盆地北部形成的侏罗系煤田被誉为世界七大煤田之一,在局部煤层浅埋或裸露区。自20世纪80年代末,鄂尔多斯盆地北部侏罗系煤田大规模开发以来,煤炭企业规模和产量快速增长,年产量逾10亿t,约占全国总产量的29%。煤炭作为鄂尔多斯能源基地主体能源,在为国家能源安全做出重大贡献的同时也产生了严重的矿山环境问题,由于鄂尔多斯盆地北部侏罗系煤田地处毛乌素沙漠与黄土高原接壤地带,生态环境脆弱,加之煤层埋藏较浅等原因,煤炭资源开发引起的生态环境问题更为严重,鄂尔多斯盆地北部侏罗系煤田开采的生态系统响应机制与国土空间生

态保护修复关键技术已成为人与自然和谐共生的现代化建设中迫切需要解决的关键科技问题,也成为科技工作者关注和研究的热点。

笔者以国家大型能源基地鄂尔多斯盆地北部侏罗系煤田为研究区,在检索和分析大量文献资料的基础上,将煤炭开采的生态系统响应机制与风险防控关键技术按照地质环境、水环境、植被生态环境3个方面归纳总结研究进展,分析凝练目前仍存在的关键科技问题,并从多因素耦合作用下的生态系统响应机制与演化规律、生态问题快速智能识别与风险防控关键技术、人与自然和谐共生的实现模式与路径等3个方面提出了进一步研究的展望和建议,以期促进鄂尔多斯盆地国家大型能源基地绿色转型发展。

1 煤炭采动的地质环境响应研究

1.1 研究现状

鄂尔多斯盆地北部侏罗系煤田现代综采模式下的高强度采煤引起的地质环境问题主要包括采空区地面塌陷、地裂缝、崩塌、滑坡等,煤炭采动的地质环境响应过程首先是采空区冒落,进而引起地面塌陷、地裂缝,在斜坡地带引发崩塌、滑坡等不良地质现象。针对煤炭采动的地质环境响应机制前人开展了大量的研究,并在地面塌陷的形成机制、地质灾害的监测与模拟等多个方面取得了较大的进步与成果。

1.1.1 地面塌陷形成机制

塌陷理论的发展始于前苏联学者普罗托奇耶柯诺夫1907年提出的压力拱理论,此理论被广泛应用,但仅契合于小规模地下采动,与鄂尔多斯盆地侏罗系煤田如今机械化大规模开采形成采空区的实际情况已不尽相符。由于采掘技术的发展,冒落理论不断更新,若将采掘工作面直接顶板的一端看作始终固定在采掘方向的煤层中,另一端则为无支撑悬臂状态或支撑于先前垮落的岩块上,形成一个复杂的悬臂梁结构,此为德国学者舒里兹1867年提出的悬臂梁假说。该

假说相比冒落拱理论更接近鄂尔多斯盆地侏罗系煤田机械化大规模开采的垮落形式。与之相补充结合的冒落岩块碎胀充填理论也解释了悬臂梁假说中悬臂端顶板的支撑体来源。在此基础上原苏联学者库兹涅佐夫又将采煤工作面上覆岩层的破坏分为互相联系较合的上部规则移动带和下部不规则垮落带,提出了冒落岩块铰结理论。钱鸣高等人在1982年通过对前人冒落理论的研究,提出了砌体梁平衡假说,认为在工作面附近的断裂带岩层会形成外形似梁的拱平衡结构,对上覆岩层产生较大的破坏影响,自此煤矿采场矿山压力研究实现从定性假说到定量理论的跨越式发展(王家臣等, 2023)。

鄂尔多斯北部侏罗系煤田涉及地域较广,上覆岩层为砂页岩互层及沙黄土盖层,整体完整性较差,物理力学指标较低,同时因为侏罗系煤田煤层较厚,区内大多采用长壁式全部垮落式开采,往往会产生大范围的采空区(席莎, 2012)。但全区因为沉积建造、岩相特征不同而导致煤层的厚度、埋深、上覆岩层的厚度及物理力学指标等各不相同,并且煤层厚度具有由北向南、自西向东减薄的趋势,故不同的区域地面塌陷成因机制不同,适合于不同的冒落假说理论。在其西北部煤层厚度较大而埋深较小的区域,开采工作面上部的直接顶板会因为采空区的形成而产生内部拉应力,在拉应力逐渐增大直至达到直接顶板的极限抗拉强度时,直接顶板会被拉裂并发生破断。上覆岩体结构疏松,覆岩块会发生垮落并且不足以填充体积庞大的采空区,因而不断产生新的冒落,最后塌陷会延伸到地表(冯军发等, 2018)。越往东南,随着煤层厚度与覆岩厚度相对值减小,裂采比也发生了变化,采空区会被垮落的上覆岩块所填充,后续塌陷的上覆岩层会因为受到先前塌陷的岩块支撑而停止下降。砌体梁平衡假说可以解释该种类型的垮塌,而起到支撑作用的垮落岩块即为该假说所提出的上覆断裂带岩层中的重新支撑区(杨达明, 2019)。在该煤田区域内局部直接顶板抗拉强度较好的区域,采空区的产生并不能使直接顶板马上破断垮塌,而是产生较大弯曲变形后才达到抗拉极限强度。悬臂梁(板)冒落理论的提出,很好的阐述了此种形式的地面塌陷成因机制(王家臣等, 2023)。

在前人提出众多假说和理论的基础上,又有学者对地面塌陷和地裂缝的形成等相关机理进行了研究推进。浅埋煤层作为鄂尔多斯盆地陕北侏罗纪煤田

已开采地区的主流煤层,其塌陷机理受到了科学工作者们的广泛关注。从表观角度来讲,浅埋煤层地面塌陷存在明显的形态特征和时间特征。张茂省(2014)等根据地面塌陷的形态特征,将区内的地面塌陷划分为塌陷坑、塌陷槽、裂缝、塌陷盆地、黄土崩滑和黄土崩塌6种类型,根据地面塌陷的时间特征将地面塌陷划分为采空后短时间间隔塌陷和长时间间隔塌陷,并通过总结地面塌陷特征结合陕北能源化工基地地面塌陷野外调查研究,对不同地质结构类型综采条件下以及房柱式开采条件下的地面塌陷机理及裂采比予以总结概括。侯恩科等(2022)通过对鄂尔多斯盆地典型煤矿区地面塌陷情况实地探测和实验模拟对照研究,发现了浅埋煤层开采地表裂缝展布形态,以及裂缝静态发育特征与采高、采深、地形地貌的相关关系。从内部塌陷机理角度来讲,地面塌陷是继采空区出现以后顶板和上覆岩层发生弯曲破断的一系列破坏现象。尤其是浅埋煤层的裂隙发育和塌陷形态与通常情况还有所区别。王金安等(2007)通过对浅埋坚硬覆岩下开采地表塌陷机理进行数值模拟,发现覆岩稳定性主要受“复合应力拱”控制和拉应力区的影响,并根据从开采到地表塌陷整个过程中“复合应力拱”演化特点,将其分为“复合应力拱”的形成、扩展与失效阶段。王金安等(2008)通过研究顶板不同阶段的破断模式与突变失稳的力学过程,发现采空区坚硬顶板的塌陷是由煤柱失效、顶板破断和失稳等共同控制的交互过程。杨治林等(2007)应用相关理论和模型研究浅埋煤层长壁式开采,探索顶板岩层失稳机理及其屈曲后的不稳定性,得出了采场老顶初次来压时顶板断裂下沉的计算公式,建立了顶板破断后台阶下沉的判据,给出了台阶下沉量。通过不断的研究,浅埋煤层的开采塌陷的受控因素、塌陷过程、塌陷形态等逐渐明晰。

1.1.2 地表移动监测与模拟

地表移动监测方法是研究矿山开采引起地表沉降和破坏规律的基本手段。随着科学技术的发展,地表移动观测技术已经逐渐实现了“空-天-地”一体化。其中地面观测是监测技术发展的开端,全站仪等监测仪器的产生大大提高了地表观测的效率,以此为基础构建的地表移动等全方位生态环境监控网是“空-天-地”一体化的重要环节。以遥感和地理信息系统为主要标志的现代空间信息技术的发展,也为煤矿区地表移动监测的研究提供了技术基础。陈旭

(2004)利用遥感信息,解译分析出了典型煤矿矿山开采对生态环境的影响,并划定了影响范围。乔玉良等(2008)将不同分辨率的遥感影像进行融合处理,实现了矿区开发动态和矿区土地损毁的监测。王珊珊等(2012)针对合成孔径雷达干涉测量(InSAR)与地理信息系统(GIS)集成在理论和实践上的不足,提出了基于InSAR监测数据和GIS技术开展矿区地面沉降动态分析的技术流程,并开发建立了矿区地面沉降时空分析软件平台。空、天、地3个方向的分别发展提高了地表监测的效率和准确度,促进了生态问题识别与环境建设。通过总结前人在空、天、地3个方面对地表监测技术的发展,许强等(2019)提出了基于“天-空-地”一体化的重大地质灾害隐患早期识别概念。自此,“天-空-地”一体化监测手段被广泛应用于地表监测领域。张凯等(2020)在分析传统空、天、地监测技术的优势与不足的基础上提出了集数据采集、处理和应用分析的“空-天-地”一体化监测体系,将所提技术应用于鄂尔多斯盆地典型煤矿,并与实地监测数据对比,证明了“空-天-地”一体化协同监测技术的可行性。李全生等(2023)针对西部特殊开采地质条件和开采沉陷监测技术的缺陷,构建了针对西部矿区的“空-天-地”一体化监测技术体系。“空-天-地”一体化技术和概念逐渐被广泛应用于矿区地表移动等生态系统监测领域,拓宽了生态系统监测的道路,提高了生态修复的效率。

地表移动监测手段的发展与地表变形规律的研究促进了地面变形模拟领域的进步,随着数值模拟等科学手段的发展,地质灾害的研究从规律现象逐渐上升到了机理研究。近年来,国内学者通过模拟手段在煤炭采动引起的各类地质灾害形成机理上取得了成果。吴侃等(1997a, 1997b, 2010)自行设计并制造了塌陷土地裂缝发育的室内模拟试验系统,提出了地表裂缝分布规律的动态计算模型和建立了地表裂缝发育的极限深度与宽度的预计模型,定性、半定量地解决了塌陷地地裂缝的预计问题。蔡怀恩(2008)采用了数值模拟、相似材料模拟及野外调查分析等多种方法,以彬长矿区为例阐明了覆岩破坏模式及地面塌陷形成机理。刘瑞瑞等(2022)通过数值模拟和相似材料模拟双重办法结合钻孔压水和冲洗液漏矢量观测等方法对侏罗系煤田的典型煤矿覆岩破坏规律进行了研究,最终给出该煤矿确切的导水裂隙带高度和裂采比的数值范围。

1.2 存在问题

研究人员对采动的地质环境响应做了大量的研究工作并取得了丰硕的科研成果,指导了煤炭资源开发工作。但该领域仍然存在1项理论问题和2项关键技术问题,有待进一步深入研究。

1.2.1 长壁式综采条件下较软弱地质结构的响应机制及沉陷规律

目前就单个煤矿的点上研究较多,针对煤田的区域性研究偏少。亟待构建煤田地质结构实景三维模型,揭示长壁式综采条件下的鄂尔多斯盆地软弱和较软弱地质结构响应过程、力学机制及不同煤田地质结构类型下的采煤沉陷规律。

1.2.2 采煤沉陷区快速识别与稳定性分析技术

利用DEM进行采煤沉陷区形变分析技术方法已经成熟,如何融合不同时期、不同数据源的DEM进行采煤沉陷区范围与沉陷量的定量分析,既实现对历史沉陷数据的恢复,又及时掌握最新的沉陷动态是当前面临的关键问题,其中还存在不同坐标系、比例尺、精度相互融合配准等众多技术难题。由于波长的原因,利用InSAR技术计算的采煤沉陷量比实际沉陷量往往少了2个数量级,但可以用InSAR技术计算采煤沉陷进入后期的沉降过程及沉降速率,对采煤沉陷区的稳定性进行分析和判断,并基于稳定性分析结果,提出国土空间规划优化与生态修复意见。

1.2.3 采煤沉陷防治技术

针对长壁式综合机械化开采,结合回填开采、条带开采、覆岩离层带充填、限厚开采等塌陷防治措施,综合提出以预防为主的经济可行的采煤沉陷防治技术,从采动源头遏制地面沉陷发生。地面沉陷破坏的的专家治理恢复与土地复垦技术还有待完善,亟需提出切实可行的沉陷修复技术和土地复垦技术。

2 煤炭采动的地下水系统响应研究

2.1 研究现状

鄂尔多斯盆地能源基地在采煤过程中,顶、底板岩层破坏带的形成、断层活化和导水钻孔等影响,使矿区含水层间的水力通道发生重大变化。为保证安全开采而实施了大量的矿井长期排水、含水层人工疏降、含水层注浆改造和帷幕节截流等工程。两种情况都对矿区的地下水流场产生重大影响,进一步影响矿井水质的形成与演化。

2.1.1 水文地质调查研究

早在20世纪80年代,原地矿部组织陕西、甘肃、宁夏、内蒙古4省(区)地矿局联合开展了“陕甘宁内蒙白垩系自流水盆地地下水资源评价”工作。21世纪初,中国地质调查局组织17家单位联合开展了鄂尔多斯盆地地下水勘查(1:25万),历时8年,首次阐明了鄂尔多斯盆地地下水赋存条件和循环规律,建立了鄂尔多斯盆地地下水数据库与空间信息系统(侯光才等,2008)。2004年之后,相继开展的陕北能源化工基地、鄂尔多斯能源基地、宁东能源基地、陇东能源基地地下水勘查(1:1万~1:2.5万),进一步查明了地下水赋存条件和地下水可采资源量。在陕北能源化工基地从采煤引起的冒落带、裂隙带和整体移动带的角度探索了“三带”高度问题(图1),并基于此提出了面向水资源保护和合理开发利用的煤炭资源开发方案(张茂省等,2014),为煤炭采动的水环境响应机制研究提供了基础数据。

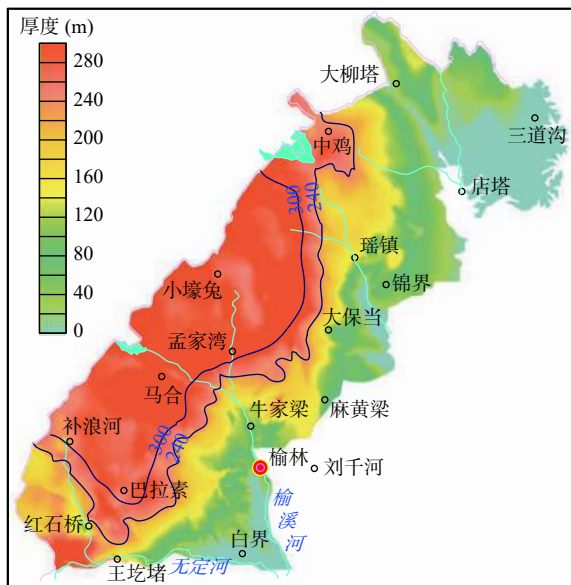


图1 榆林市矿区覆岩厚度分布以及冒裂区和弯曲变形区界线图(据张茂省等,2014)

Fig. 1 Thickness distribution of overburden rock and boundary map of caving area and bending deformation area in Yulin mining area

2.1.2 采煤对地下水的影响

鄂尔多斯盆地侏罗系煤田开采不同程度地产生了采空区地面变形和塌陷、地下水位下降、含水层疏干、泉流量减小或干涸、水资源污染等环境问题。地下水作为煤炭采动的主要影响对象之一,其动态变化规律是研究其对煤炭采动响应机制的前提,杜荣军

(2012)以陕北侏罗系煤田中大保当矿区的煤田地质勘探和地下水勘查资料为依据,阐明了地下水流场对煤炭采动的响应规律,并提出了针对研究区的保水采煤技术方案。侯恩科等(2021)以鄂尔多斯盆地榆神矿区中某典型煤矿首采工作面为研究区,采用钻探、地下水位观测、野外实地探查和综合分析等方法,通过研究地下水动态变化规律分析地下水动态变化的形成机制,同时得出了水位变化与地表下沉的耦合关系。

鄂尔多斯盆地侏罗系煤田是水资源匮乏地区,其地下水含水系统的架构与通常情况有所区别。焦养泉等(2020)通过对鄂尔多斯盆地侏罗系含煤岩系地下水系统的研究,阐明了该含水系统的关键要素与格架模型,并对未来该领域的发展提出了建设性意见。孙亚军等(2022)通过对地下水动力场的研究,将煤炭开采扰动对区域地下水动力场的影响归纳为导水通道的改变、边界条件的改变以及含水介质的改变3个方面。张茂省等(2010)系统分析了陕北能源化工基地采煤影响环境的现状、煤田水文地质结构和工程地质性质,提出了保障生态、水资源和采煤安全的“三带”安全高度,将榆林市采煤影响地下水的区域划分成无水渗透区、贫水渗透区、富水渗透区和受影响非渗透区,并划分了鼓励采煤区、限制开采区和水资源与生态保护区(图2)。

2.1.3 “保水采煤”研究

“保水采煤”理念提出于20世纪90年代,通过不断的完善与发展,为矿区水资源保护和煤矿安全建设做出了重要贡献。从资源与环境协调(绿色)开采理念中,保水采煤作为地下水流失与突水事故的主要解决办法而被提出时,便奠定了保水采煤的地位(钱鸣高等,2004)。为了完善保水采煤的理念与方法,研究人员对开采区域按照不同标准进行了分区研究。王双明等(2010)针对保水采煤做了大量的科学总结与实践工作,通过调查采煤引起的表生生态反应,提出了以保护地下水水位为核心的科学开采技术思路,并划分了基于生态水位保护的开采条件分区。范立民等(2019)厘定了保水采煤的概念和科学内涵,以陕北侏罗系煤田为主,在论述煤田地质环境条件的基础上,划分了保水采煤地质条件分区,并结合实践详述了保水采煤的各分支技术。师本强(2012)利用保水开采的工程地质模型探索保水开采的主要影响因素,并提出了鄂尔多斯盆地侏罗系煤田矿区保水开采的

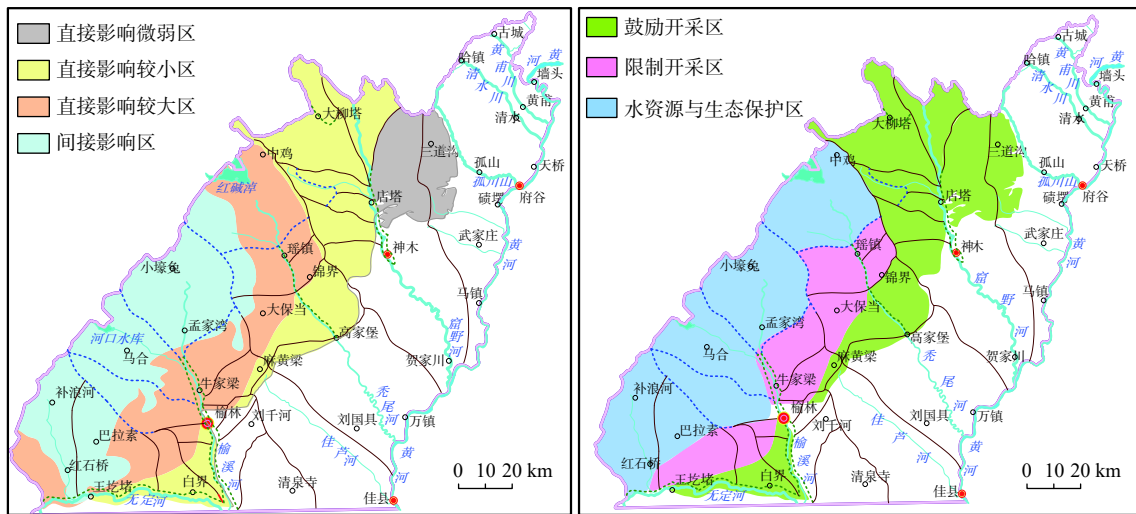


图2 榆林市采煤对地下水影响区划图与近期煤炭资源开发规划图(据张茂省等, 2014)

Fig. 2 Zoning map of the impact of coal mining on groundwater in Yulin city and recent coal resource development planning map

区域划分体系。浅埋煤层保水开采的塌陷机理和保水划分体系有所不同, 黄庆享(2018)以鄂尔多斯盆地的东胜煤田为背景, 揭示了覆岩裂隙的发育规律, 建立了隔水层稳定性判据, 提出了保水开采的分类和方法, 建立了浅埋煤层保水开采岩层控制基本理论。

2.2 存在问题

从地下水系统或水文地质学科的角度看, 煤炭采动的水环境响应研究应该关注采煤引起的含水层系统、水流系统以及水质的变化(张茂省等, 2010), 应该聚焦含水层厚度及其渗透系数、地下水位、水质以及由于采动引起的边界变化等本质问题。

(1)以往煤炭采动引起的冒落带、裂隙带、整体移动带的“三带”高度属于经验性的总结和归纳, 偏离了含水层系统的响应机制研究, 未能聚焦煤炭采动引起的含水层厚度变化及其相应的渗透系数变化。

(2)以往关注地下水位下降、含水层疏干、泉流量减小或干涸、水资源污染、水资源破坏现象研究偏多, 而鲜有关关注煤炭采动引起的排泄基准面的下降和导致的地下水流系统响应机制, 以及流域之间分水岭迁移而引起的水文地质边界变化。

(3)煤矿区地表水-地下水-矿坑水循环机制与含水层再造。煤炭采动引起地质结构变化, 进而导致地下水系统变化, 除改变含水层厚度和渗透系数、地下水位和水流边界, 还引起水循环与水化学的变化。因此, 揭示矿区地表水、地下水的失衡过程和地表水-地下水-矿坑水再平衡机制, 阐明三者之间的相互转化

关系, 总结矿区水系统再平衡模式, 防治水污染, 构建新的地下水系统(含水层系统和水流系统)是当前亟需解决的关键问题。

3 煤炭采动的植被生态环境响应研究

3.1 研究现状

鄂尔多斯盆地能源基地煤炭采动对植被生态影响主要包括3种情形: 露天开采引起的植被与土地破坏(剥挖、压占)、采煤沉陷区植被与土地损毁、采煤引起地下水位下降进而引起的植被演替或退化。

3.1.1 煤炭采动的植被生态环境响应规律研究

采煤对植被生态的影响研究最早开始于定性研究, Legg等在1990年便利用遥感技术对地表采矿引起的环境问题和矿区土地复垦做了定性评价。Venkataraman(1997)等综合遥感数据和有限的基础数据, 定性分析了矿区植被、土地利用、地表水、地下水和土质受矿产开发的影响程度。雷利卿(2002)利用遥感技术实现了矿区受污染植被和水体的信息的定性提取。随着空天地监测技术的不断发展, 矿区植被生态的演化研究也从定性分析发展到了定量分析。王小燕(2022)利用土地利用分类和植被覆盖度计算以及土壤侵蚀模数计算分析了神东矿区植被覆盖和土壤侵蚀时空动态变化, 发现了该矿区植被覆盖度和土壤侵蚀转化趋势。毕银丽等(2022)利用一元线性回归法分析准格尔矿区的归一化植被指数与植被覆

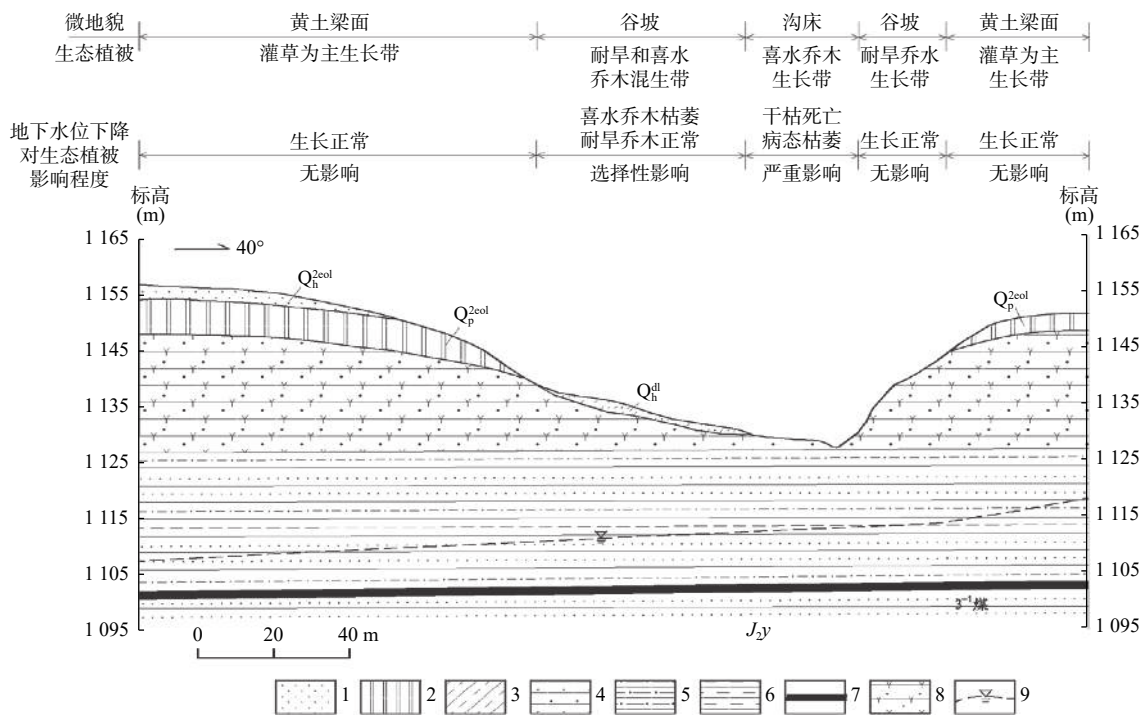
盖度的时序变化,揭示了煤矿区植被在多种因素影响下的协同演变规律。

在获取矿区植被生态的响应规律的基础上,不少研究人员使用各种监测技术和模拟及实验方法对矿区植被生态响应的因素和机理进行研究,并取得了一定的成果。黄艳利等(2022)基于小基线集差分干涉测量技术,结合DEM数据得到了鄂尔多斯盆地典型矿区地表沉陷特征,并以此研究矿区植被NDVI时序变化,从NDVI与土壤理化性质的关系、NDVI与地下水水位埋深的关系、植被NDVI与气候因子的关系3个角度阐明了矿区采掘地表植被退化机制。李晓婷等(2021)从植被指数入手,以鄂尔多斯盆地泊江海子矿为工程示范,开展了一个生长周期的采掘胁迫实验研究,对比了沉陷区与非沉陷区的植被生长情况,为沉陷区植被损伤诊断、植被自然恢复和人工修复效果评估提供了生态学指标。吴秦豫等

(2022)对鄂尔多斯盆地煤矿区植被覆盖改善和退化效应的时空强度进行了分析,并对比了不同煤炭开采方式对植被退化的影响,分析了矿区植被退化和改善的影响因子。

3.1.2 煤炭采动的植被协同损害机制与修复技术研究

研究人员基于矿区水环境、植被、土壤的相互关系,对植被生态在受到煤炭采动影响下的协同损害机制进行研究并取得了丰硕的成果。王双明等(2017)以陕北能源化工基地的神木北部矿区为研究区,从理、化、生3个角度概括矿区土壤变化情况,并与植物群落特征变化做对比,得到了矿区植物群落与土壤因子关系及演化特征,并讨论了矿区土壤与植被的损害机理过程和协调损害特征。张茂省等(2008, 2013, 2014)通过对陕北能源化工基地煤矿区植被生态演化趋势按照地下水水位埋深分区进行研究,得到矿区植被在地下水和土壤协同作用下的影响规律与机制(图3)。



1.风积粉细砂;2.中更新统风积黄土;3.粉质黏土;4.砂岩;5.粉砂质泥岩;6.泥岩;7.煤层;8.烧变岩;9.水位线

图3 林海煤矿突水后地下水水位下降对植被生态影响水文地质剖面图(据张茂省等, 2014)

Fig. 3 Hydrogeological profile of the impact of groundwater level decline on vegetation ecology after water inrush in Linhai coal mine

在明确矿区地下水、土壤和植被三者之间的相互关系以及作用机制的前提下,矿区生态环境保护的理念和技术被不断更新。刘伟等(2023)通过对矿区沉陷、挖损和压占研究现状的总结,提出了生态修复人

工促进理念和模。郭洋楠等(2017)以神东矿区为例,探讨了晋陕蒙地区的矿区植被生态修复模式,系统性得提出了矿区土地生态系统建设方案以及采煤沉陷地治理和植被恢复技术。刘英等(2023)通过对干旱

矿区植被引导型修复的研究,阐明了干旱阈值的生态机制。毕银丽等(2021)通过对干旱-半干旱煤矿区生态重构研究现状进行总结,分析比较了露天煤矿与井工煤矿生态环境治理的差异,并提出了煤矿区生态重构的关键技术难点和未来发展方向,为西部干旱-半干旱露天煤矿区生态重构探索出一条高效可行的新途径。

3.2 存在问题

(1)采煤塌陷导致土壤环境变化的过程与机制不明。目前针对煤炭采动的土壤环境响应的研究局限于土壤质量、疏松程度、土壤含水量以及微生物定性和半定量描述,缺乏对煤炭采动到沉陷稳定全生命周期土壤内部环境总体变化过程与机制的研究。

(2)降水量控制着鄂尔多斯能源基地植被生态的格局,仅在地下水位埋深较浅的地区地下水位下降才对植被生态构成胁迫,引起植被类型演替和生长情况变化。但在不同地下水位埋深区,采煤引起地下水位下降,进而导致植被类型演替规律和生长情况的变化研究还有待加强。

(3)在矿区土地复垦、生态保护和植被损毁的修复方面,提出切实可行的土壤修复技术、植被生态修复技术、景观修复技术以及再野生化技术是目前面临的关键问题(付战勇等,2019)。

4 展望与建议

鄂尔多斯盆地北部侏罗纪煤田地处毛乌素沙地与黄土高原过度地带,降水稀少,蒸发强烈,水土流失严重,生态环境脆弱,煤层埋藏较浅,在全球气候变化、煤炭资源大规模高强度开采现状目前难以扭转、碳达峰与碳中和、人与自然和谐共生的现代化建设的大背景下,对采煤沉陷区国土空间生态保护和修复理论与技术提出了更新更高的要求。在分析前人研究进展和存在问题的基础上,对未来研究方向和研究思路提出初步想法。

(1)多因素耦合作用下的生态系统响应机制与演化规律研究。以地球系统科学和关键带理论为指导,聚焦全球变化、煤炭资源开采、土地开发利用、重大水利工程、城镇建设等多种因素耦合作用下的生态系统响应机制与演化过程,重点研究鄂尔多斯盆地北部侏罗纪煤田采动的地质环境、水土环境、植被生态环境响应机制和互馈作用以及其灾害效应。重点揭示不同煤田地质结构的采动沉陷响应规律、采动的含水

层系统与水流系统演化及含水层再造模式、基于地下水水文过程的植被生态演替规律,以及生态脆弱区山、水、林、田、湖、草、沙采动的灾害效应。

(2)生态问题快速智能识别与风险防控关键技术研究。①构建“天-空-地-内”一体化监测与感知系统,研发数据自动化获取与智能处理技术,快速获取自然地理与生态环境要素动态信息,建立鄂尔多斯盆地北部侏罗纪煤田生态系统大数据库。②基于大数据,利用传统机器学习、表达学习及深度学习等技术,研发生态问题快速智能识别技术,包括图像识别、形变识别、位移识别、内因识别、诱因识别、综合识别等。③依据生态问题现状与发展趋势、成因机制、形成的控制因素、影响因素、诱发因素变化以及威胁对象及其易损性等综合信息,建立生态风险智能算法,实现生态问题快速智能评价和区划。④开展生态风险防控关键技术研发,如面向地面塌陷的经济可行的回填开采技术、多源固废利用与矿山生态修复协同机制及关键技术、采煤沉陷区含水层再造与水资源调控技术、生态-地质结构实景三维模型及生态分险防控信息化平台研发等。

(3)人与自然和谐共生的现代化实现模式与路径研究。在系统梳理鄂尔多斯盆地北部侏罗纪煤田优势资源、比较优势资源和主要生态问题的基础上,依据其在国土空间规划中的生态定位、生态格局、生态问题空间展布与时间演变规律,提出鄂尔多斯盆地北部侏罗纪煤田实现人与自然和谐共生的现代化模式与路径,即矿区生态保护修复+全域土地综合整治+人与自然和谐共生的现代化融合型模式。破解政策制约、做好顶层设计、建立示范基地的实施路径。通过矿区地质环境治理恢复与土地复垦工程项目实施,完成矿区影响范围(矿山地上影响范围,地下水降落漏斗范围)地质环境治理恢复与土地复垦基本任务,同时为项目实施提供资金。通过全域土地综合整治试点项目实施,拆除整治废弃的宅基地,优化建设用地,提升居住环境品质,按照进出平衡和不小于5%的要求整理碎片化耕地,进一步优化三生空间,并为项目实施提供资金补贴。编制矿区《乡村振兴规划》《实用性村庄规划》《矿区开发式治理实施方案》,通过矿区生态农业、生态文旅、生态公园、生态服务等生态类经济产能提升,促进鄂尔多斯盆地北部侏罗纪煤田地区率先实现人与自然和谐共生的现代化。

参考文献(References):

- 毕银丽, 刘涛. 露天矿区植被协同演变多源数据时序分析——以准格尔矿区为例[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(01): 293–302.
- BI Yinli, LIU Tao. Time series analysis of multi-source data on vegetation co evolution in open pit mining areas: A case study of Jungar mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(01): 293–302.
- 毕银丽, 彭苏萍, 杜善周. 西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(05): 1355–1364.
- BI Yinli, PENG Suping, DU Shanzhou. Technical difficulties and development direction of ecological reconstruction in arid and semi-arid open pit coal mines in western China[J]. *Journal of Coal Industry*, 2021, 46(05): 1355–1364.
- 蔡怀恩. 彬长矿区地面塌陷特征及形成机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.
- CAI Huaen. Study on the characteristics and formation mechanism of ground subsidence in Binchang mining area [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.
- 陈旭. 遥感解译分析矿山开发对生态环境的影响[J]. 资源调查与环境, 2004, (01): 13–17.
- CHEN Xu. Remote Sensing Interpretation and Analysis of the Impact of Mine Development on the Ecological Environment[J]. *Resource Survey and Environment*, 2004, (01): 13–17.
- 杜荣军. 大保当煤矿区潜水流场对采煤扰动的响应研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- DU Rongjun. Study on the Response of Groundwater Flow Field to Coal Mining Disturbance in Dabaodang Coal Mine Area [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- 范立民, 马雄德. 保水采煤的理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- 冯军发, 周英, 张开智, 等. 浅埋近距离多煤层采空区下厚关键层破断特征及支架工作阻力确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(02): 332–338.
- FENG Junfa, ZHOU Ying, ZHANG Kaizhi, et al. Fracture characteristics of thick key layers and determination of support working resistance in shallow and close distance multi seam goafs[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2018, 35(02): 332–338.
- 付战勇, 马一丁, 罗明, 等. 生态保护与修复理论和技术国外研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 9008–9021.
- FU Zhanyong, MA Yiding, LUO Ming, et al. Research progress in ecological protection and restoration theory and technology abroad *Journal of Ecology*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 9008–9021.
- 郭洋楠, 包玉英. 晋陕蒙生态脆弱区采煤沉陷地生态治理技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(S2): 4–7.
- GUO Yangnan, BAO Yuying. Research on ecological governance technology for coal mining subsidence in ecologically fragile areas in Shanxi, Shaanxi, and Inner Mongolia[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(S2): 4–7.
- 侯恩科, 谢晓深, 冯栋, 等. 浅埋煤层开采地面塌陷裂缝规律及防治方法[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 30–40.
- HOU Enke, XIE Xiaoshen, FENG Dong, et al. Regularity and prevention methods of ground subsidence cracks in shallow coal seam mining[J]. *Coal Field Geology and Exploration*, 2022, 50(12): 30–40.
- 侯恩科, 谢晓深, 王双明, 等. 中深埋厚煤层开采地下水位动态变化规律及形成机制[J]. 煤炭学报, 2021, 46(05): 1404–1416.
- HOU Enke, XIE Xiaoshen, WANG Shuangming, et al. Dynamic variation and formation mechanism of underground water level during mining of moderately deep thick coal seams[J]. *Journal of Coal Science*, 2021, 46(05): 1404–1416.
- 侯光才, 张茂省, 刘方. 鄂尔多斯盆地地下水勘查研究[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- 黄庆享. 浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- 黄艳利, 郭亚超, 齐文跃, 等. 西部典型生态脆弱矿区采损地表植被盖度演化规律与退化机制[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4217–4227.
- HUANG Yanli, GUO Yachao, QI Wenyue, et al. Evolution and Degradation Mechanism of Surface Vegetation Coverage in Typical Ecological Vulnerable Mining Areas in the West[J]. *Journal of Coal Industry*, 2022, 47(12): 4217–4227.
- 焦养泉, 王双明, 范立民, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪含煤岩系地下水系统关键要素与格架模型[J]. 煤炭学报, 2020, 45(07): 2411–2422.
- JIAO Yangquan, WANG Shuangming, FAN Limin, et al. Key Elements and Framework Model of Groundwater System in Jurassic Coal-bearing Rocks in the Ordos Basin[J]. *Journal of Coal Science*, 2020, 45(07): 2411–2422.
- 雷利卿, 岳燕珍, 孙九林, 等. 遥感技术在矿区环境污染监测中的应用研究[J]. 环境保护, 2002, (02): 33–36.
- LEI Liqing, YUE Yanzhen, SUN Jiulin, et al. Application of remote sensing technology in environmental pollution monitoring in mining areas[J]. *Environmental Protection*, 2002, (02): 33–36.
- 李全生, 李晓斌, 张凯, 等. 基于“空天地”一体化技术的岩层采动损伤监测与应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(01): 402–413.
- LI Quansheng, LI Xiaobin, ZHANG Kai, et al. Monitoring and application of mining damage in rock strata based on the "sky sky" integrated technology[J]. *Journal of Coal Industry*, 2023, 48(01): 402–413.

- 李晓婷, 杨丽帆, 邹友峰, 等. 采煤胁迫下干旱区植被生长周期红边指数动态变化[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(05): 1508–1520.
- LI Xiaoting, YANG Lifan, ZOU Youfeng, et al. Dynamic change of red edge index of vegetation growth cycle in arid areas under coal mining stress[J]. *Journal of Coal Science*, 2021, 46(05): 1508–1520.
- 刘瑞瑞, 刘洋, 方刚, 等. 袁大滩煤矿覆岩破坏规律及顶板水害防治对策[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(07): 82–91.
- LIU Ruirui, LIU Yang, FANG Gang, et al. Law of overburden damage and countermeasures for roof water damage in Yuandatan Coal Mine[J]. *Coal Mine Safety*, 2022, 53(07): 82–91.
- 刘伟, 尹勤瑞, 刘祥宏. 煤矿区生态自然修复及其人工促进模式探讨[J/OL]. *煤田地质与勘探*, 2023: 1–14.
- LIU Wei, YIN Qinrui, LIU Xianghong. Discussion on the ecological and natural restoration and artificial promotion model in coal mining areas [J/OL]. *Coal Field Geology and Exploration*, 2023: 1–14.
- 刘英, 雷少刚, 李心慧, 等. 干旱矿区植被引导型修复中干旱阈值的生态机制[J/OL]. *煤炭学报*, 2023: 1–19.
- LIU Ying, LEI Shaogang, LI Xinhui, et al. Ecological mechanism of drought threshold in vegetation guided restoration in arid mining areas [J/OL]. *Journal of Coal Industry*, 2023: 1–19.
- 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 煤矿绿色开采技术的研究与实践[J]. *能源技术与管理*, 2004, (04): 1–4.
- QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Study and application of the green mining technology[J]. *Energy Technology and Management*, 2004, (04): 1–4.
- 乔玉良, 连胤卓, 郭明权. 基于遥感与GIS数据融合的煤矿资源开发动态分析[J]. *煤炭学报*, 2008, 33, (9): 1020–1024.
- QIAO Yuliang, LIAN Yinzhao, WU Mingquan. Dynamic analysis of coal resource development based on remote sensing and GIS data fusion[J]. *Journal of Coal Industry*, 2008, 33, (9): 1020–1024.
- 师本强. 陕北浅埋煤层矿区保水开采影响因素研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- SHI Benqiang. Research on the influencing factors of water conservation mining in shallow coal seam mining areas in northern Shaanxi [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- 孙亚军, 张莉, 徐智敏, 等. 煤矿区矿井水水质形成与演化的多场作用机制及研究进展[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(01): 423–437.
- SUN Yajun, ZHANG Li, XU Zhimin, et al. Multifield interaction mechanism and research progress on the formation and evolution of mine water quality in coal mining areas[J]. *Journal of Coal Industry*, 2022, 47(01): 423–437.
- 王家臣, 许家林, 杨胜利, 等. 煤矿采场岩层运动与控制研究进展——纪念钱鸣高院士“砌体梁”理论40年[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(01): 80–94.
- WANG Jiachen, XU Jialin, YANG Shengli, et al. Progress in research on strata movement and control in coal mining stopes - Commemoration of Academician Qian Minggao's 40 years of "masonry beam" theory[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(01): 80–94.
- 王金安, 尚新春, 刘红, 等. 采空区坚硬顶板破断机理与灾变塌陷研究[J]. *煤炭学报*, 2008, (08): 850–855.
- WANG Jin'an, SHANG Xinchun, LIU Hong, et al. Study on the fracture mechanism and catastrophic collapse of hard roof in goaf[J]. *Journal of Coal Industry*, 2008, (08): 850–855.
- 王金安, 赵志宏, 侯志鹰. 浅埋坚硬覆岩下开采地表塌陷机理研究[J]. *煤炭学报*, 2007, (10): 1051–1056.
- WANG Jin'an, ZHAO Zhihong, HOU Zhiying. Study on the mechanism of surface subsidence during mining under shallow hard overburden[J]. *Journal of Coal Industry*, 2007, (10): 1051–1056.
- 王珊珊, 季民, 胡瑞林, 等. 基于InSAR-GIS的矿区地面沉降动态分析平台的实现与应用[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(S2): 307–312.
- WANG Shanshan, JI Min, HU Ruilin, et al. Implementation and application of InSAR GIS based dynamic analysis platform for land subsidence in mining areas[J]. *Journal of Coal Industry*, 2012, 37(S2): 307–312.
- 王双明, 杜华栋, 王生全. 神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(01): 17–26.
- WANG Shuangming, DU Huadong, WANG Shengquan. Analysis of soil and vegetation damage process and mechanism in coal mining subsidence area in northern Shenmu[J]. *Journal of Coal Industry*, 2017, 42(01): 17–26.
- 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱区煤炭开发与生态水位保护[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- 王小燕, 王丽云, 马宁. 神东矿区植被覆盖和土壤侵蚀时空动态分析[J]. *人民黄河*, 2022, 44(05): 124–127.
- WANG Xiaoyan, WANG Liyun, MA Ning. Spatial and temporal dynamic analysis of vegetation cover and soil erosion in Shandong mining area[J]. *People's Yellow River*, 2022, 44(05): 124–127.
- 吴侃, 胡振琪, 常江, 等. 开采引起的地表裂缝分布规律[J]. *中国矿业大学学报*, 1997a, (02): 56–59.
- WU Kan, HU Zhenqi, CHANG Jiang, et al. Distribution of surface fractures caused by mining[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 1997a, (02): 56–59.
- 吴侃, 李亮, 敖建锋, 等. 开采沉降引起地表土体裂缝极限深度探讨[J]. *煤炭科学技术*, 2010, 38(06): 108–111+103.
- WU Kan, LI Liang, AO Jianfeng, et al. Discussion on the limit depth of surface soil cracks caused by mining subsidence[J]. *Coal*

- Science and Technology*, 2010, 38(06): 108-111+103.
- 吴侃, 周鸣, 胡振琪. 开采引起的地表裂缝深度和宽度预计[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1997b, (06): 649-652.
- WU Kan, ZHOU Ming, HU Zhenqi. Prediction of the depth and width of surface fractures caused by mining[J]. *Journal of Fuxin Mining Institute (Natural Science Edition)*, 1997b, (06): 649-652.
- 吴秦豫, 姚喜军, 梁洁, 等. 鄂尔多斯市煤矿区植被覆盖改善和退化效应的时空强度[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(08): 101-109.
- WU Qinyu, YAO Xijun, LIANG Jie, et al. The spatiotemporal intensity of vegetation cover improvement and degradation effects in coal mining areas of Ordos City[J]. *Resources and Environment in Arid Areas*, 2022, 36(08): 101-109.
- 席莎. 内蒙古自治区煤炭矿区地面塌陷严重程度分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- XI Sha. Analysis on the severity of ground subsidence in coal mining areas in Inner Mongolia Autonomous Region [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(07): 957-966.
- XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Early identification, monitoring and early warning of major geological hazards based on the integration of sky, air, and earth[J]. *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*, 2019, 44(07): 957-966.
- 杨达明. 厚煤层高强度开采覆岩“两带”特征及形成机制研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2019.
- YANG Daming. Study on the characteristics and formation mechanism of "two zones" of overlying rock during high-strength mining in thick coal seams [D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2019.
- 杨治林, 余学义. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层的后屈曲性态[J]. *煤炭学报*, 2007, (04): 337-340.
- YANG Zhilin, YU Xueyi. Postbuckling behavior of roof strata in shallow seam longwall mining[J]. *Journal of Coal Industry*, 2007, (04): 337-340.
- 张凯, 李全生, 戴华阳, 等. 矿区地表移动“空天地”一体化监测技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(02): 207-213.
- ZHANG Kai, LI Quansheng, DAI Huayang, et al. Research on the "sky sky sky" integrated monitoring technology for surface movement in mining areas[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(02): 207-213.
- 张茂省, 党学亚, 等. 干旱半干旱地区水资源及其环境问题——陕北榆林能源化工基地例析[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- 张茂省, 董英, 杜荣军, 等. 陕北能源化工基地采煤对地下水资源的影响及对策[J]. *地学前缘*, 2010, 17(06): 235-246.
- ZHANG Maosheng, DONG Ying, DU Rongjun, et al. The impact of coal mining in the energy and chemical industry base in northern Shaanxi on groundwater resources and countermeasures[J]. *Geoscience Frontier*, 2010, 17(06): 235-246.
- 张茂省, 卢娜. 植被生态对气候变化和人类活动的响应——以陕西省榆林能源化工基地为例[J]. *地质论评*, 2013, 59(05): 909-918.
- ZHANG Maosheng, LU Na. Response of vegetation ecology to climate change and human activities: A case study of Yulin Energy and Chemical Industry Base in Shaanxi Province[J]. *Geological Review*, 2013, 59(05): 909-918.
- 张茂省, 卢娜, 陈劲松. 陕北能源化工基地地下水开发的植被生态效应及对策[J]. *地质通报*, 2008, 27(08): 1299-1312.
- ZHANG Maosheng, LU Na, CHEN Jinsong. Ecological Effects of Vegetation and Countermeasures for Groundwater Development in Energy and Chemical Industry Base in Northern Shaanxi[J]. *Geological Bulletin*, 2008, 27(08): 1299-1312.
- Venkataraman G, Kumar P S, Ratha S D, et al. Open cast mine monitoring and environmental impact studies through remote sensing - a case study from Goa, India[J]. *Geocarto International*, 1997, 12(2): 39-53.