



平原煤粮主产复合区煤矿开采和耕地保护协同发展研究现状及对策

郭广礼 李怀展 查剑锋 刘文锴 胡青峰 王方田 陈超 张沛沛 张会娟 张秋霞

引用本文:

郭广礼, 李怀展, 查剑锋, 等. 平原煤粮主产复合区煤矿开采和耕地保护协同发展研究现状及对策[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 416–426.

GUO Guangli, LI Huaizhan, ZHA Jianfeng. Research status and countermeasures of coordinated development of coal mining and cultivated land protection in the plain coal-cropland overlapped areas[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 416–426.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0985>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于时序遥感的黄土矿区耕地变化动态监测——以大佛寺矿区为例

Dynamic monitoring of cultivated land changes in loess mining areas based on time series remote sensing: a case of Dafosi Mining Area

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 215–223 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6a235888-34e7-4428-8445-d31e0bac040c>

我国采煤沉陷区治理实践与对策分析

Control practices and countermeasure analysis on coal mining subsidence area in China

煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ef4be7d1-f97e-4102-b2cc-7569c699d5d5>

采煤沉陷区损害防治对策与技术发展方向

Counter measures and technical development direction of damage prevention in coal mining subsidence area

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/14505047-d6d1-407e-bee8-c7146e4d7395>

时间序列下煤矸石充填复垦耕地和林地的土壤碳动态特征

Soil carbon dynamic characteristics of coal gangue-filled reclaimed cropland and forest land under time series

煤炭科学技术. 2023, 51(5): 260–268 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.ST21-024>

高潜水位平原矿区采煤塌陷地复垦方向划定及规划分区

Reclamation direction delimitation and planning division of coal mining subsidence areas with high water level plain mining area

煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ffd41a1f-0d93-41eb-b0ae-942696ddb314>

北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术

Ecological protection and restoration technology of large-scale open-pit coal mining area in the northern sand-proof belt

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 323–333 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1902>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

郭广礼, 李怀展, 查剑锋, 等. 平原煤粮主产复合区煤矿开采和耕地保护协同发展研究现状及对策[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 416–426.

GUO Guangli, LI Huaizhan, ZHA Jianfeng, *et al.* Research status and countermeasures of coordinated development of coal mining and cultivated land protection in the plain coal-cropland overlapped areas[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 416–426.

平原煤粮主产复合区煤矿开采和耕地保护协同发展研究现状及对策

郭广礼¹, 李怀展¹, 查剑锋¹, 刘文锴², 胡青峰², 王方田¹, 陈超³, 张沛沛⁴, 张会娟², 张秋霞²

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 河南 郑州 450046; 3. 河南工程学院 土木工程学院, 河南 郑州 451191; 4. 河南财经政法大学 工程管理与房地产学院, 河南 郑州 450000)

摘要: 耕地是粮食安全的基础, 煤炭是能源安全的保障。我国煤炭和耕地资源分布重合的煤粮复合区面积约占耕地总面积的 42.7%, 煤炭开采与耕地保护之间的矛盾十分突出。如何实现煤矿开采与耕地保护协同发展是我国煤粮复合区亟待解决的瓶颈难题。从平原煤粮复合区采动耕地损毁机理、采动耕地破坏程度评价、开采沉陷控制技术等方面分析了煤矿开采和耕地保护协同发展的研究现状与存在问题。在此基础上结合耕地保护面积大、变形耐受度高等特点, 提出了一种面向煤矿开采和耕地保护协同发展的源头控制与修复治理有机结合的绿色开采区域性岩层及地表变形控制技术途径, 建立了相应的地表变形预测及控制设计方法, 并指出了平原煤粮复合区煤矿开采和耕地保护协同发展的重点研究方向: 平原煤粮复合区耕地采动驱动机制、采煤沉陷耕地防护阈值体系、面向耕地保护的煤矿绿色开采区域沉陷协调控制理论与方法, 以期推动煤粮主产复合区煤矿绿色开采与耕地保护协同发展。

关键词: 煤炭开采; 煤粮复合区; 区域性沉陷控制; 耕地保护; 协同防治

中图分类号: TD327; S157

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)01-0416-11

Research status and countermeasures of coordinated development of coal mining and cultivated land protection in the plain coal-cropland overlapped areas

GUO Guangli¹, LI Huaizhan¹, ZHA Jianfeng¹, LIU Wenkai², HU Qingfeng², WANG Fangtian¹, CHEN Chao³, ZHANG Peipei⁴, ZHANG Huijuan², ZHANG Qiuxia²

(1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. College of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. College of Civil Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 4. School of Engineering Management and Real Estate, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Cultivated land is the foundation of food security, while coal guarantees the security of the energy. The coal-cropland overlapped area accounts for approximate 42.7% of the total cultivated land area in China, making it become a prominent contradiction between the extensive mining and cultivated land protection. How to realize the coordinated development of the coal mining and the cultivated land protection is an urgent problem in coal-cropland overlapped areas. This paper analyzes the research status and existing issues of the coordinated development between mining and cultivated land protection from the following three aspects: the damage mechanism of subsidence land in plain coal-cropland overlapped areas, the damage degree evaluation of subsidence land induced by mining, the control technology for the mining subsidence. Then, considering the characteristics of the cultivated land, such as the extensive protection-needed area and the high deformation tolerance, a new technical approach of controlling regional rock strata and surface deformation in green mining is proposed by combining source control and restoration. The corresponding prediction and control design methods of surface deformation are established. Additionally, the key research directions for the coordination of coal mining and cultivated land protection in the plain

收稿日期: 2022-06-26

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0985

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点资助项目(U21A20109)

作者简介: 郭广礼(1965—), 男, 河北栾城人, 教授, 博士生导师。E-mail: guangliguo@cumt.edu.cn

通讯作者: 李怀展(1990—), 男, 河南济源人, 副教授。E-mail: lihuaizhan@cumt.edu.cn

coal-cropland overlapped areas are pointed out, including the driving mechanism of cultivated land damage induced by mining in the plain area, protection thresholds for the quality of the cultivated land in subsidence areas, theories and methods of the subsidence coordinated control of the green mining facing the cultivated land protection. The main objective of this paper is to promote the coordinated development of the green mining and the cultivated land protection in the plain coal-cropland overlapped areas.

Key words: coal mining; coal-cropland overlapped areas; regional subsidence control; cultivated land protection; collaborative control

0 引言

粮食安全关系国计民生,是国家安全的重要基础,粮食生产的根本在耕地。习近平总书记始终把粮食安全作为治国理政的头等大事,指出“耕地是我国最为宝贵的资源,我国人多地少的基本国情,决定了我们必须要把关系十几亿人吃饭大事的耕地保护好,决不能有任何闪失”。另一方面,煤炭在我国一次能源消费中占比55%以上,是我国能源战略安全的根本保证。煤炭开发推动了我国经济的快速发展,但大规模开采造成的地形地貌改变、区域水环境扰动、固体废弃物排放、耕地损毁等问题对矿区生态安全、国土开发与耕地保护造成了严重威胁。尤其是我国煤炭与耕地资源复合面积占耕地总面积的42.7%^[1],采煤塌陷耕地损毁与保护矛盾十分突出。

我国煤粮复合区煤炭开发主要采用长壁开采全部垮落法管理顶板,覆岩破坏和地表沉陷剧烈,对平原地区耕地破坏尤为严重;采煤沉陷地治理一直走的是“先破坏后复垦”的传统之路。由于我国中东部矿区石炭二叠系多煤层开采、多构造赋存和分采区垮落法开采等地质采矿特点,地面耕地采动损毁具有长周期、多频次的特点,加之地下采煤规划与地面耕地保护缺乏相互协调;致使采煤损毁耕地复垦严重滞后或出现反复损毁重复治理、严重影响粮食生产等问题。因此,必须变被动为主动,充分发挥我国近十余年来在充填开采、土地复垦领域的科学与技术成果,从源头上减沉控损与地面耕地适当修复相结合,进而实现煤粮复合区煤炭开采和耕地保护协同发展。

笔者在分析煤粮复合区煤矿开采和耕地协同保护研究现状及存在问题基础上,结合耕地保护面积大、变形耐受度高等特点,提出一种面向煤炭开采和耕地保护协同发展的绿色开采区域性岩层移动控制方法,并指出煤粮复合区煤矿开采和耕地保护协同发展重点研究方向。

1 煤粮复合区采动耕地损毁机理及破坏程度评价

1.1 采动耕地损毁形式及机理

煤炭地下开采打破上覆岩体平衡,造成覆岩破

坏和地表沉陷,进而导致耕地出现土壤退化(加速侵蚀、次生盐渍化、潜育化、沼泽化)、耕地质量下降、耕作条件恶化、水体破坏等损坏形式。对于煤层多、累计厚度大的平原煤粮复合区而言,采煤沉陷易形成大面积积水区(图1),会造成比较严重的耕地破坏以及减产、绝产地。从耕地保护和煤矿开采协同发展视角,必须要防止耕地出现大面积的积水。

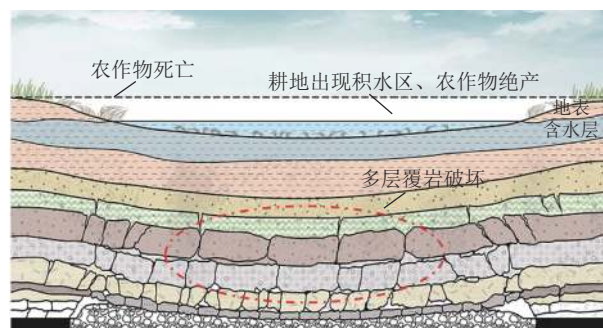


图1 高潜水位矿区地下开采导致耕地损毁

Fig.1 Farmland damage caused by underground mining in mine with high groundwater level

同时地表倾斜、曲率、水平移动及水平变形等开采引起的地表移动与变形,也会对耕地造成损坏。地表倾斜会导致土壤有机质和土壤养分流失、降低土壤生产力以及影响耕地灌溉效果;曲率变形会导致土壤的密实度、孔隙率发生变化,使耕地凹凸不平,造成土壤水/盐分流失;水平变形会影响耕地密实度与孔隙率,一定程度上改变地表径流方向和汇水条件,进而影响农作物生长。

相关学者围绕开采沉陷造成耕地损毁方面进行了研究,分析了长壁垮落开采工作面采煤沉陷对耕地质量的影响,普遍认为采煤沉陷会降低耕地质量^[2-3]。如下正富利用土地环境条件、土壤养分因子来反映矿区土地质量,分析不同空间位置单一因子采前与采后的变化特征,采用熵流指数模型揭示了排灌条件差、地下水位埋深不理想等因素是导致开采沉陷区土地生产力下降的主要原因^[4]。白中科等^[5]认为耕地质量分析需注意研究尺度以及土壤酶活性、微生物的作用。肖武、赵艳玲等^[6-8]研究了地表沉陷对农作物长势的影响,基本明确了地表沉陷对土壤理化性质及农作物长势的影响,对于采煤沉

陷耕地质量评价及修复具有重要意义。陈朝、魏婷婷等^[9-10]通过现场实测及理论分析研究了采煤沉陷对局部土壤含水率、土壤养分、土壤微生物与植物群落^[11-12]、土壤的水肥特性^[13]和土壤酶活性^[14]等土壤理化特性的影响,明确了采煤引起的地表沉陷会显著降低土壤的理化特性,进而影响耕地质量。张沛沛^[15]以焦作煤田九里山矿煤粮复合区为研究对象,现场实测了塌陷地不同位置土壤质量的差异,明确了采煤沉陷对耕地质量的影响。

开采引起的覆岩破坏、地表裂缝等会影响地下及地面土壤水循环,进而影响耕地质量。目前国内外学者针对煤矿开采单一或多个工作面开采覆岩破坏机理^[16-20]及其对耕地的影响^[21-26]进行了大量的研究工作,普遍认为常规井工开采会破坏上覆岩层的含、隔水层结构,导致地下水大量流失;当地表潜水与地下水水力联系密切时,还可能造成地表潜水大量流失,从而导致植物生长缺少必要的水分,进而显著影响耕地质量。

但开采沉陷对耕地的影响不都是负面。彭苏萍院士针对黄河流域中下游生态修复战略思考时指出,开采对上覆岩层产生类似“松土”的作用^[27],可能会

减缓干旱半干旱地区极易形成的次生盐碱化现象。

1.2 采煤沉陷耕地破坏程度评价

采煤沉陷耕地破坏程度评价及保护阈值是确定煤矿开采和耕地协同保护平衡点的重要约束条件。部分学者围绕耕地损毁程度评价开展了研究工作,为耕地损毁范围圈定、损毁补偿及土地复垦方式选择提供了重要参考。如张宏贞提出了以耕地灌溉的允许坡度、地下水位、积水、非连续变形作为开采沉陷对耕地损害的评价指标^[28]。王刚、郭广礼^[29]结合土体自身的属性,多角度分析了煤炭开采对土地的破坏机理,提出了矿区土地的破坏等级划分(表1)。李树志^[30]以裂缝宽度、台阶高度、附加坡度、潜水位埋深和水利设施5个指标作为耕地损毁的评价参数(表2)。张欣欣等^[31]则选取下沉深度、损毁土地、附加坡度、稳定性、裂缝密度等指标来确定耕地损毁度。同时河南省于2020年12月11日实施了省地方标准《耕地破坏鉴定技术规范》,将耕地塌陷损毁分为一般破坏和严重破坏,并以塌陷深度、塌陷后田面坡度、塌陷后浅层地下水埋深、积水情况以及生产力降低情况等作为评价指标(表3),为中原煤粮主产复合区采动耕地损毁程度评价提供了科学依据。

表1 开采沉陷土地损坏等级评价标准^[29]
Table 1 Evaluation criteria of cropland damage grade of mining subsidence^[29]

破坏等级	损坏分类	损坏程度(土壤生产力降低率)/%	破坏现象	评价参数			
				地表下沉/mm	水平变形/(mm·m ⁻¹)	倾斜变形/(mm·m ⁻¹)	水利设施状态
I	轻度破坏	25	地面有轻微变形,但不影响农田耕种、林地、植被生长,水土流失基本上没有增加	≤500	≤2.0	≤3.0	基本完好
II	中度破坏	50	地面有轻微变形,轻微影响农田耕种、林地、植被、生长,水土流失略有增加	≤2 000	≤6.0	≤20.0	部分损坏
III	严重破坏	75	地面塌陷破坏较严重,出现方向明显的拉裂缝,影响农田耕种,导致减产,影响林地与植被生长,水土流失有所加剧	>2 000	≤10.0	≤40.0	完全损坏
IV	完全破坏	100	地面严重塌陷破坏,出现塌方和小滑坡,农田、林地与植被破坏严重,水土流失严重,生态环境恶化	—	>10.0	>40.0	—

表2 采煤沉陷耕地损毁等级^[30]
Table 2 Damage grade of cultivated land in coal mining subsidence^[30]

破坏等级	损毁程度/%	裂缝宽度/cm	台阶高度/cm	坡度/%	潜水位埋深/m	水利设施状态
I	25	<20	<10	<2	1.0~1.5	基本完好
II	50	20~50	10~30	2~5	0.5~1.0	部分损毁
III	75	50~100	30~80	5~10	0~0.5	完全损毁
IV	100	>100	>80	>10	<0	—

注:损毁程度用土壤生产力降低率表征。

表3 耕地破坏程度评价因子分级
Table 3 Classification of evaluation factors of farmland damage degree

评价因子	破坏程度鉴定评价因子值	
	一般破坏	严重破坏
塌陷深度/m	<2	≥2
塌陷后田面坡度/(°)	<15	≥15
塌陷后浅层地下水埋深/m	>0.8	≤0.8
积水情况	能自流排水	无法自流排水
生产力降低情况/%	<40	≥40

2 煤矿开采地表沉陷控制技术研究现状

目前煤粮复合区煤矿开采与耕地保护是相互独立的,通常是先破坏后复垦,也取得了不少优秀成果;但从实践情况来看,也存在不少问题。就中东原煤粮复合区而言,其主要开采石炭二叠系煤层,煤层多、厚度大,东部潜水位高;开采后地表沉陷大,易积水,耕地减产、甚至绝产;同时多煤层开采引起的沉陷对耕地反复破坏,整个采煤沉陷影响时间长,有的甚至达到几十年。因此,先破坏后复垦的被动治理模式不适应煤矿开采和耕地保护协同发展的要求。减轻采煤沉陷、直接从源头上降低对耕地的采动损坏是保护耕地的根本途径。

经过长期研究和工程实践,我国已经形成了较完善的开采沉陷控制理论与技术体系,主要包括协调开采控制地表变形分布^[32]、条带或房式等部分开采减轻沉降及变形值^[33]、充填开采以减轻沉降及变形值^[34]、离层带注浆控制沉降及变形^[35]等4类。协调开采技术在薄及单一中厚煤层开采沉陷控制有较好的适用性,在中厚及厚煤层矿区应用最普遍的是沉陷控制方法是条带开采和充填开采技术。

许多学者围绕条带开采、充填开采覆岩运移及地表沉陷规律进行了研究,并建立了满足工程实践需求的采动覆岩裂隙发育高度及地表沉陷预测方法^[36-42],解决了大量建(构)筑物及水体下采煤问题。但条带开采由于其资源采出率低及其未来采空区场地建设利用安全隐患问题等因素(图2),难以满足区域可持续发展要求;许多地方政府(如山东省)国土资源管理部门已不提倡和严控条带开采的应用。离层带注浆减沉技术是通过在覆岩中的离层以及冒落带进行注浆充填以实现控制覆岩移动的目的。该技术具有低成本,工艺简单,对采煤生产干扰小的优势^[43]。我国也先后在多个矿区开展了离层注浆减沉的工业性试验,取得了很大成功。许家林^[44]提出了覆岩隔离注浆充填不迁村采煤技术,成功开采了村庄下的煤炭资源。但是,该技术也存在一些问题,例如减沉效果定量评价较为困难以及注浆后地表移动预计等都有待进一步完善。

充填开采作为绿色开采的关键核心技术,是控制覆岩破裂及地表沉陷最有效的方法。近十多年来,我国在综采矸石充填、膏体充填及超高水充填采煤方面取得了重要进展,基本解决了机械化充填开采的技术装备和工艺问题^[45-47],并已在平顶山、济宁、淮北、邯郸、淄博等十多个矿区进行了工程应用。笔者、张吉雄、查剑锋、王磊等^[48-51]采用现场实测、理

论分析、相似材料和数值模拟等研究手段,研究揭示了充填开采上覆岩层变形较为平缓、没有明显的垮落带发育,覆岩结构主要呈现为整体层状结构弯曲变形(图3),地表变形分布具有平缓、渐变特点,明确了充填体及覆岩协同变形机理及变形向地表的传递过程,并构建了充填开采岩层变形结构组合模型。

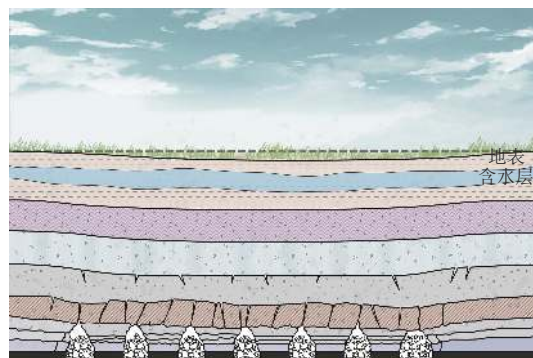


图2 条带开采覆岩移动与变形特征

Fig.2 Overlaying rock movement and deformation characteristics of strip mining

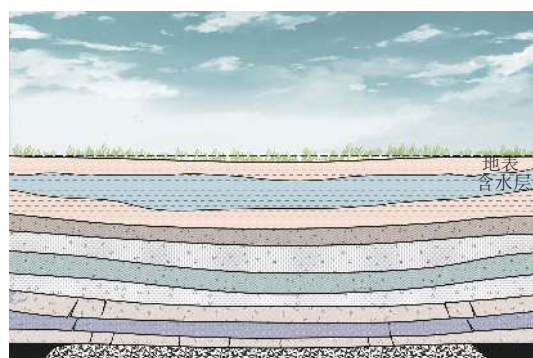


图3 充填开采覆岩移动与变形特征

Fig.3 Overlaying rock movement and deformation characteristics of backfilling mining

同时针对充填开采地表沉陷预测难题,郭广礼、查剑锋等^[52]依据充填开采地表变形机理及演化特征,提出了充填开采工作面“等效采高”的概念和计算模式如图4、图5所示,图4中, M_d 为等价采高, m ; M 为煤层厚度, m ; δ 为充填前顶板下沉量, m ; Δ 为充填欠接顶距, m 。图5中, $t_1 \sim t_n$ 为时刻, $\Delta S_1 \sim \Delta S_n$ 为不同

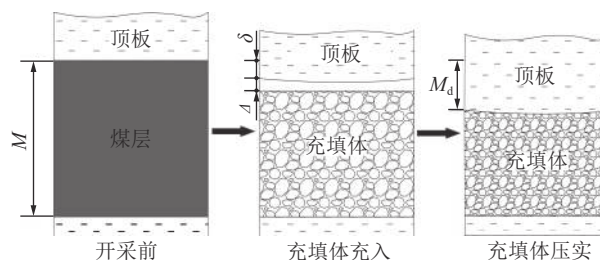


图4 等效采高计算示意

Fig.4 Diagram of equivalent mining height calculation

时间间隔内充填材料的压缩变形量,例如:在 $t_{n-1} \sim t_n$ 时刻,充填材料的压缩变形量为 ΔS_n 。建立了基于“等效采高”的充填开采岩层及地表变形、静态预测实用模型,并给出了岩层及地表变形预测参数选取策略,提出了面向不同目标的充填开采地表变形控制设计方法如图 6 所示,图 6 中, M_{\max} 为确保地面受护物不受采动损坏所要求的顶板最大下沉值, m ; H_{\max}

为确保有效隔水层稳定所要求的顶板最大下沉值, m ; M_e 为等价采高, m 。针对建(构)筑物下充填采煤设计难题,郭广礼、朱晓峻等^[53-54]提出了基于充实率控制和多工作面带状充填区域岩层协同控制的建(构)筑物下充填开采地表变形控制设计方法,保证了地表变形在建(构)筑物允许变形范围情况下充填开采经济社会效益达到最优化。

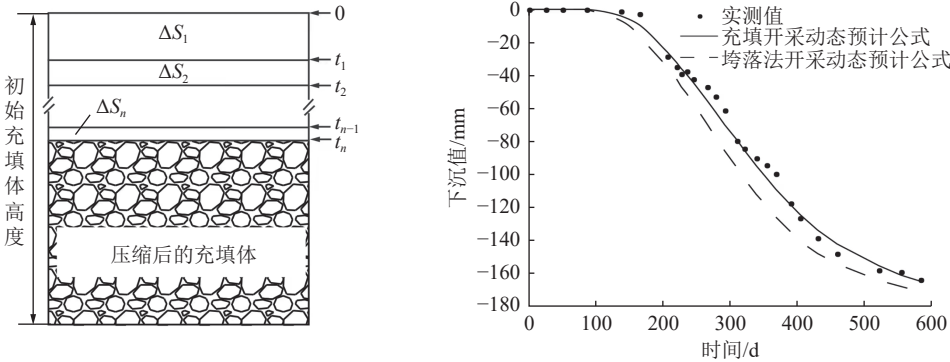


图 5 地表沉陷动态预测模型及效果

Fig.5 Dynamic prediction model of surface subsidence

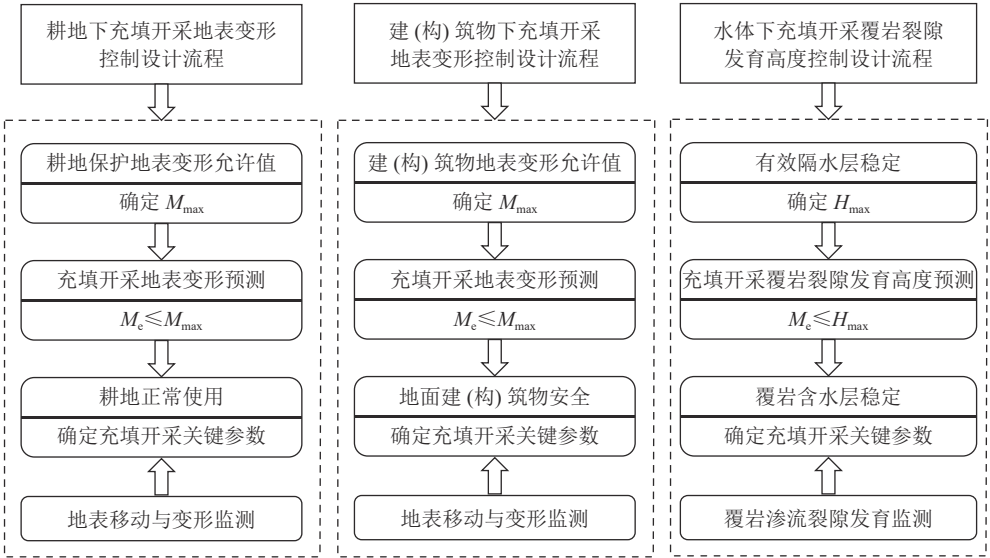


图 6 面向不同目标的充填开采地表变形控制设计流程

Fig.6 Surface deformation control design process of backfilling mining for different goals

从保护耕地的视角出发,条带开采、充填开采是控制地表沉陷变形、保护耕地最直接有效的方法。但条带开采资源损失率高(资源采出率一般为 30%~40%),目前主要是应用于保护地面重要保护对象(如小范围建筑物)的安全;但是耕地相对于建(构)筑物而言,具有保护面积大、变形耐忍度高和易于通过地面工程实施消除变形影响等特点。若采用全部充填开采技术用来保护耕地,则会因严重影响煤矿产量和经济效益而难以推广。所以,这 2 种方法都不能

满足耕地这种大范围的地表沉陷控制要求。

3 面向耕地保护的区域性岩层及地表变形控制新途径

3.1 区域沉陷控制方法

结合耕地保护特点,吸收充填开采和条带开采岩层移动控制优点,提出了采用少量带状充填工作面、结合开采区域地质损失(如断层煤柱)与设计损失(如永久煤柱)等构成地下多元介质支撑与非临界

垮落开采工作面相结合的区域性岩层控制的新技术途径,如图 7 所示。这种方法核心思想是依靠充填体、断层煤柱等形成的支撑体,将多工作面采空区分隔成多个相对独立小面积非充分采动区,并充分利用上覆岩层自身对沉陷的控制作用,大幅度减小岩层和地表移动程度,耕地仅经简易平整即可快速恢复生产力,同时降低了充填成本和提高了资源采出率。利用该方法进行地表沉陷控制时,充填范围越大,地表移动与变形值越小,耕地采动损毁程度越轻,则总采煤成本提高、生产效率降低;反之,充填范围小,则采煤效率提高,但地表移动与变形值增加,耕地损毁程度增大。故采用这种区域性沉陷控制方法进行采煤设计需要在采煤效益和耕地保护之间达到一个平衡点,这个平衡点取决于不同类型耕地对地表变形的容忍度和耕地恢复生产力的治理措施。

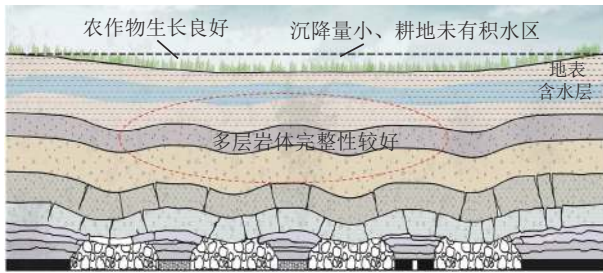


图 7 面向耕地保护的煤矿开采区域沉陷协同控制方法示意
Fig.7 Schematic diagram of collaborative control method of regional subsidence in mining area for farmland protection

这种区域性岩层控制方法非常适用于大范围耕地保护,通过合理设计多元介质支撑体及开采范围可实现地表沉陷量可控,避免耕地出现积水区,辅以简单的土地平整、修复农田水利设施等基本措施,采动影响耕地即可迅速恢复生产力,耕地恢复率有望达 100%,可为煤粮复合区煤炭开采与耕地保护协同发展提供技术支撑。这种区域性岩层控制方法成功实施的关键是如何设计多元介质支撑体宽度。

3.2 多元介质支撑体宽度的设计原则

1) 区域性岩层及地表变形控制模式中利用带状充填体代替条带煤柱,作为主要承载体,带状充填工作面留设的宽度应能长期稳定的支撑上覆岩层。

2) 源头控制与修复治理有机结合的区域性岩层及地表变形控制模式中要求避免耕地出现大面积积水,故地表沉陷量应小于潜水位高度;同时开采引起的地表移动与变形应小于耕地的安全设防指标,耕地仅需要通过简单平整即可快速恢复生产力。

3.3 多元介质支撑体宽度的设计方法

工程实践表明,充填工作面宽度一般为 70~

150 m,结合现有充填材料力学性质,可以满足带状充填工作面可以长期稳定支撑上覆岩层的要求。因此,源头控制与耕地修复治理有机结合的区域性地表变形设计时主要考虑地表沉陷量小于潜水位高度,关键在于如何预测区域性地表移动与变形,进而完成工作面参数的优化,实现资源开采和耕地保护协同发展。

3.3.1 开采区域横向叠加计算区域性地表变形

依据设计原则,开采后地表移动与变形极值要小于耕地的安全设防指标。以图 8 为例,通过叠加计算源头控制与耕地修复治理有机结合的区域性地表移动变形极值,从而确定合理的开采尺寸。

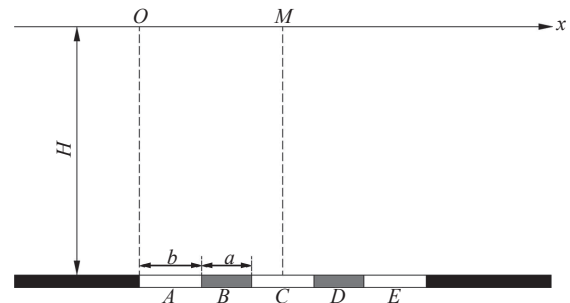


图 8 地表移动变形叠加计算示意
Fig.8 Schematic diagram of superposition calculation of surface movement and deformation

图 8 中 A、C、E 为垮落法开采区域;采宽为 b, B、D 为充填开采区域,采宽为 a;以左边界为原点建立坐标系。

x 方向上最大下沉点 M 出现在 C 开采区域中央的正上方, M 点的下沉是由开采区域 A、B、C、D、E 共同影响造成的,可通过叠加来进行计算。

根据概率积分法已知有限开采时 x 方向任一点下沉为:

$$W' = \frac{W_0}{2} \left\{ \left[\operatorname{erf} \left(\sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) + 1 \right] - \left[\operatorname{erf} \left(\sqrt{\pi} \frac{x-l}{r} \right) + 1 \right] \right\} = W(x) - W(x-l) \quad (1)$$

式中: $W(x) = \frac{W_0}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) + 1 \right]$ 为以开采区域左边界为计算原点的半无限开采时的下沉; $W(x-l) = \frac{W_0}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\sqrt{\pi} \frac{x-l}{r} \right) + 1 \right]$ 为以开采区域右边界为计算原点的半无限开采时的下沉; 令 $A \left(\frac{x}{r} \right) = \frac{W(x)}{W_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) + 1 \right]$, $A \left(\frac{x}{r} \right)$ 可通过查表得到^[55]; l 为工作面计算宽度, r 为主要影响半径, 计算公式为

$$r = \frac{H}{\tan \beta} \quad (2)$$

式中, β 为主要影响角。

由此,可以得到开采区域 A 引起的 M 点下沉值为

$$W_A = W_0 \left[A \left(\frac{1.5b+a}{r} \right) - A \left(\frac{0.5b+a}{r} \right) \right] \quad (3)$$

式中, W_0 为该区域充分采动条件下全部垮落法开采地表最大下沉值, $W_0 = mq \cos \alpha$, m 为煤层采高; q 为下沉系数, 可根据地质采矿条件及实测数据反演综合确定; α 为煤层倾角。

开采区域 B 引起的 M 点下沉值为

$$W_B = W_0' \left[A \left(\frac{0.5b+a}{r} \right) - A \left(\frac{0.5b}{r} \right) \right] \quad (4)$$

式中, W_0' 为该区域充分采动条件下充填开采地表最大下沉值, $W_0' = m_e q_e \cos \alpha$, m_e 为煤层等效采高, 计算公式为 $m_e = (1-\rho)m$, ρ 为工作面设计充实率; q_e 为充填开采下沉系数。

开采区域 C 引起的 M 点下沉值为

$$W_C = W_0 \left[A \left(\frac{0.5b}{r} \right) - A \left(\frac{-0.5b}{r} \right) \right] \quad (5)$$

根据下沉曲线的对称性, 可得开采区域 A 、 E 在 M 点引起的下沉值相等, 开采区域 B 、 D 在 M 点引起的下沉值相等, 即 $W_A = W_E$, $W_B = W_D$, 最终可以得到 5 个开采区域引起的 M 点下沉值为:

$$W_M = W_A + W_B + W_C + W_D + W_E \quad (6)$$

同理, 可以得到有限开采时 x 方向上任一点的倾斜、水平变形和曲率:

$$\begin{cases} i' = i(x) - i(x-l) \\ \varepsilon' = \varepsilon(x) - \varepsilon(x-l) \\ K' = K(x) - K(x-l) \end{cases} \quad (7)$$

最终, 通过叠加计算可以得到源头控制与耕地修复治理有机结合的区域性地表移动及变形极值 W_0 、 i_0 、 ε_0 、 K_0 。

3.3.2 开采区域纵向叠加计算区域性地表变形

以图 9 为例, 假设充填体压实后的高度为 m_2 , 等效采高为 m_1 , 则地表沉陷可以看作由 m_1 所在的薄煤层采用全部垮落法开采和 m_2 所在的厚煤层采用条带开采共同影响的, 可以通过对两者进行叠加计算。

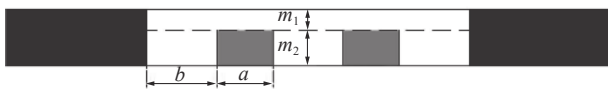


图 9 地表沉陷预计参数计算示意

Fig.9 Schematic diagram of calculation of surface subsidence prediction parameters

$$\begin{cases} m_1 = (1-\rho)m \\ m_2 = \rho m \end{cases} \quad (8)$$

式中, m 为煤层采厚; ρ 为工作面设计充实率。

上部分薄煤层全部垮落法开采引起的地表下

沉 W_1 和下部分厚煤层条带开采引起的地表下沉 W_2 为:

$$\begin{cases} W_1 = m_1 q_q \cos \alpha = (1-\rho) m q_q \cos \alpha \\ W_2 = \rho m q_t \cos \alpha = \frac{\rho m (H-30) q_q \cos \alpha}{5000a/b-2000} \end{cases} \quad (9)$$

式中, q_t 、 q_q 分别为条带和垮落法开采地表下沉系数。

根据式 (10), 可以得到该区域带状充填开采下沉系数为

$$q' = \frac{W_1 + W_2}{m \cos \alpha} = \left[\rho \left(\frac{H-30}{5000a/b-2000} \right) + 1 - \rho \right] q_q \quad (10)$$

其他地表沉陷预计参数可近似按照条带开采预计参数选取, 即:

$$\tan \beta_t = (1.076 - 0.0014H) \tan \beta_q \quad (11)$$

$$b_t = \frac{10000b_q}{10750 + 7.6H} \quad (12)$$

式中: $\tan \beta_t$ 、 $\tan \beta_q$ 分别为条带和垮落法开采主要影响角正切; b_t 、 b_q 分别为条带和垮落法开采水平移动系数。

根据上述参数, 可以求取充分采动条件下区域性地表移动及变形极值:

$$W_0 = m q' \cos \alpha \quad (13)$$

$$i_0 = \frac{W_0}{r} = \frac{m q' \tan \beta_t \cos \alpha}{H} \quad (14)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1.52 m b_t q' \tan \beta_t \cos \alpha}{H} \quad (15)$$

$$K_0 = \frac{1.52 m b_t q' \tan^2 \beta_t \cos \alpha}{H^2} \quad (16)$$

根据设计原则, 要求开采后地表移动变形极值小于安全设防指标。假设耕地的潜水位埋藏深度为 h , 耕地的倾斜、水平变形和曲率的保护指标分别为 i_m 、 ε_m 、 K_m , 当同时满足下式时, 在充填工作面宽度一定情况下, 即可求出垮落工作面的临界采宽 b 。

$$\begin{cases} W_0 \leq h \\ i_0 \leq i_m \\ \varepsilon_0 \leq \varepsilon_m \\ K_0 \leq K_m \end{cases} \quad (17)$$

4 平原煤粮复合区煤矿开采和耕地保护协同发展存在问题及研究展望

4.1 存在问题

结合前述煤粮复合区耕地保护和煤炭开采协同发展相关研究现状, 目前国内外学者已围绕采动耕地损毁机理、耕地破坏程度评价、开采沉陷控制技术等方面开展了相关研究, 但针对平原耕地采损驱动

机制、采煤塌陷地耕地主动适应性防护阈值以及面向耕地保护的地表沉陷控制技术方面的研究仍存在以下几方面不完善：

1) 煤矿开采地表移动盆地不同位置耕地损坏特征等已有了较全面研究成果, 并明确了常规垮落法开采影响下耕地损毁类型, 且典型矿区长壁工作面开采沉陷特征参数、耕地损坏性质及特征参数等也有一定基础数据。但现有围绕采动耕地质量、土壤

理化特性的研究主要是针对 0~60 cm 土层或耕作层, 而对于采动影响下耕作层所处的包气带土壤环境演变缺乏深入研究。包气带是地下及地表物质和能量交换的枢纽, 直接关系到采动耕地质量及理化特性; 且包气带土壤在地下开采影响下也会产生变形, 进而驱动耕作层变形及水/盐运移。故需要从采动影响下包气带土壤性质演化入手, 研究煤粮复合区采动耕地损毁驱动机制(图 10)。

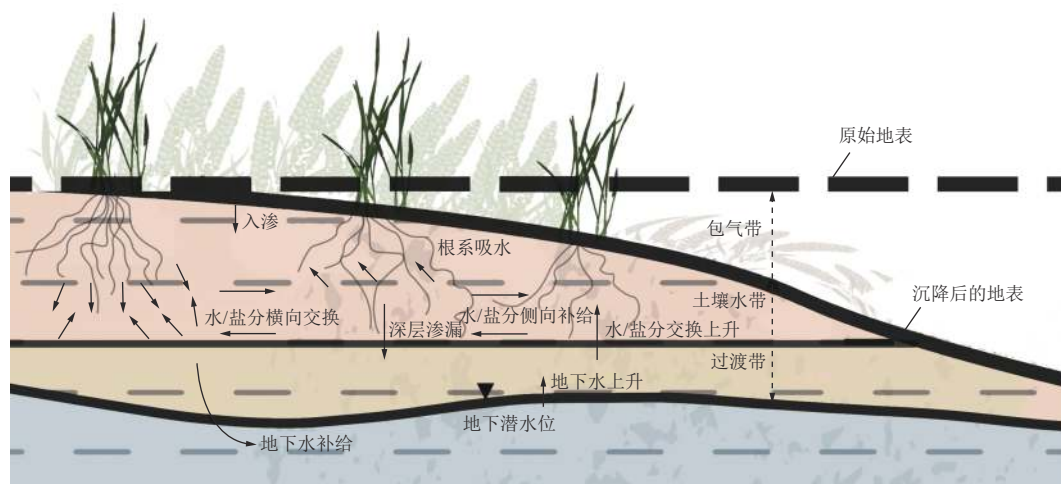


图 10 采动影响下包气带与耕作层水/盐/变形协同作用

Fig.10 Synergistic effect of water / salt / deformation of unsaturated zone and tillage layer under mining influence

2) 目前不少学者围绕采动影响耕地质量或损毁状态评价指标等方面开展了研究工作, 河南、山东等煤炭大省也颁布了采煤沉陷耕地损毁评价地方标准, 为采煤沉陷耕地损毁评估以及塌陷地复垦提供了依据。需要指出的是, 目前相关研究主要集中于采动耕地损毁的后评价, 研究成果不能满足“源头控制、主动减沉控损、井上下协同修复”耕地保护理念的设计需求。

3) 综采矸石充填、膏体充填和高水/超高水材料充填采煤技术已经成为我国现阶段煤矿绿色化开采、大幅度减轻采动损害的主要技术手段, 工程实践表明可取得较好的地表变形控制效果。但充填开采成本高、效率低、充填材料来源不足等问题仍然是困扰充填开采沉陷控制技术面积推广应用的主要障碍。因此, 如何利用充填采煤的优点、结合耕地保护特点, 构建面向煤炭开采和耕地保护协同发展的绿色开采区域性岩层移动控制体系成为迫切解决的瓶颈难题。

4.2 研究展望

为了实现煤粮复合区煤炭开采与耕地保护协同发展的目标, 重点在于突破耕地要保护到什么程度,

以及区域性岩层移动如何控制才能达到预期保护效果这 2 个难题, 结合现有研究存在的问题, 可以从耕地损毁驱动机制、保护阈值、区域性岩层移动控制方法等 3 个方面入手:

1) 煤粮主产复合区耕地采损驱动机制: 通过研究采动影响下包气带土壤的变形规律与破坏特征, 分析采动胁迫作用下包气带土壤水/盐运移规律与演化过程, 进而揭示中原煤粮复合区耕地损毁的驱动机制。

2) 采煤沉陷耕地质量影响评价指标体系及防护阈值: 基于遥感影像和田间实测数据, 分析煤矿开采地表变形与耕地质量时空演变的关联关系, 建立耕地采损与地表沉陷之间的关联模型, 进而构建耕地采损预评价指标及防护阈值体系。

3) 面向耕地保护的煤矿绿色开采区域沉陷协调控制理论与方法: 结合耕地保护的特点, 充分吸收充填开采和条带开采沉陷控制的优点, 研究面向耕地保护的区域性沉陷控制的方式, 分析这种区域性控制方式的覆岩运动及地表沉陷规律, 进而形成面向煤炭开采和耕地保护协同发展的绿色开采区域性岩层移动控制体系。

参考文献(References):

- [1] 胡振琪, 李 晶, 赵艳玲. 矿产与粮食复合主产区环境质量和粮食安全的问题、成因与对策[J]. 科技导报, 2006(3): 21-24.
HU Zhenqi, LI Jing, ZHAO Yanling. Problems, causes and countermeasures of environmental quality and food security in the main composite producing areas of minerals and grain[J]. Science & Technology Review, 2006(3): 21-24.
- [2] 徐占军, 赵思萌, 王培周, 等. 煤炭开采对“矿-农”复合区农田质量影响评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 273-282.
XU Zhanjun, ZHAO Simeng, WANG Peizhou, *et al.* Impact of coal mining on farmland quality in "mine agriculture" complex area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 273-282.
- [3] 蔡 宇, 张永兴. 采矿塌陷区耕地破损评价指标体系分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(5): 1075-1080.
CAI Yu, ZHANG Yongxing. Analysis of cultivated land damage evaluation index system in mining subsidence area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(5): 1075-1080.
- [4] 卞正富. 矿区开采沉陷农用地质量空间变化研究[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 89-94.
BIAN Zhengfu. Study on spatial change of agricultural land quality in mining subsidence[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2004, 33(2): 89-94.
- [5] 白中科, 师学义, 周 伟, 等. 人工如何支持引导生态系统自然修复[J]. 中国土地科学, 2020, 34(9): 1-9.
BAI Zhongke, SHI Xueyi, ZHOU Wei, *et al.* How to support and guide the natural restoration of ecosystem[J]. China Land Science, 2020, 34(9): 1-9.
- [6] 肖 武, 陈佳乐, 笪宏志, 等. 基于无人机影像的采煤沉陷区玉米生物量反演与分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 169-180.
XIAO Wu, CHEN Jiale, DA Hongzhi, *et al.* Inversion and analysis of corn biomass in coal mining subsidence area based on UAV image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 169-180.
- [7] 肖 武, 陈佳乐, 赵艳玲, 等. 利用无人机遥感反演高潜水位矿区沉陷地玉米叶绿素含量[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 295-306.
XIAO Wu, CHEN Jiale, ZHAO Yanling, *et al.* Inversion of chlorophyll content of Maize in subsidence land of mining area with high groundwater level by UAV Remote Sensing[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 295-306.
- [8] ZHAO Y L, ZHENG W X, WU X, *et al.* Rapid monitoring of reclaimed farmland effects in coal mining subsidence area using a multi-spectral UAV platform[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(7): 1-19.
- [9] 陈 朝, 李妍均, 邓南荣, 等. 西南山区采煤塌陷对水田土壤物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 276-285.
CHEN Chao, LI Yanjun, DENG Nanrong, *et al.* Effect of coal mining subsidence on physical properties of paddy soil in southwest mountainous area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18): 276-285.
- [10] 魏婷婷, 胡振琪, 曹远博, 等. 风沙区煤炭开采对土壤物理性质和结皮的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 106-110.
WEI Tingting, HU Zhenqi, CAO Yuanbo, *et al.* Effects of coal mining on soil physical properties and crust in windy sand area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 106-110.
- [11] 王 锐, 马守臣, 张合兵, 等. 干旱区高强度开采地表裂缝对土壤微生物学特性和植物群落的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(9): 1249-1255.
WANG Rui, MA Shouchen, ZHANG Hebing, *et al.* Effects of high-intensity mining of surface cracks on soil microbiological characteristics and plant communities in arid areas[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(9): 1249-1255.
- [12] 贾 鑫, 何瑞敏, 姚 海. 神东矿区采动地表裂缝对地表水的影响规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(S2): 17-22.
JIA Xin, HE Ruimin, YAO Hai. Study on the influence law of mining surface cracks on surface water in Shendong mining area[J]. Coal Science And Technology, 2017, 45(S2): 17-22.
- [13] 张发旺, 赵红梅, 宋亚新, 等. 神府东胜矿区采煤塌陷对水环境影响效应研究[J]. 地球学报, 2007(6): 521-527.
ZHANG Fawang, ZHAO Hongmei, SONG Yaxin, *et al.* Effect of coal mining subsidence on water environment in Shenfu Dongsheng mining area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007(6): 521-527.
- [14] 许传阳, 马守臣, 张合兵, 等. 煤矿沉陷区沉陷裂缝对土壤特性和作物生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 597-604.
XU Chuanyang, MA Shouchen, ZHANG Hebing, *et al.* Influence of subsidence cracks in coal mine subsidence area on soil characteristics and crop growth[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 597-604.
- [15] 张沛沛. 煤粮复合区采煤沉陷对土壤质量的影响研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
ZHANG Peipei. Study on the influence of coal mining subsidence on soil quality in coal grain composite area[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2016.
- [16] 宋振骥, 蒋宇静. 采场顶板控制设计中几个问题的分析探讨[J]. 矿山压力, 1986(1): 1-9.
SONG Zhenqi, JIANG Yujing. Analysis and discussion on several problems in stope roof control design[J]. Mine Pressure, 1986(1): 1-9.
- [17] 高延法, 黄万朋, 刘国磊. 覆岩导水裂缝与岩层拉伸变形量的关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 301-306.
GAO Yanfa, HUANG Wanpeng, LIU Guolei. Study on the relationship between water conducting cracks in overburden and tensile deformation of rock stratum[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(3): 301-306.
- [18] 黄庆享, 韩金博. 浅埋近距离煤层开采裂隙演化机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(4): 706-711.
HUANG Qingxiang, HAN Jinbo. Study on fracture evolution mechanism of shallow and close seam mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(4): 706-711.
- [19] PENG Syd S. Surface subsidence engineering: theory and practice[M]. Boca Raton: CRC Press, 2020.

- [20] 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. Full mining of overburden failure in high-strength longwall mining and its criterion[J]. Journal of Chinese Coal Society, 2020, 45(11): 3657-3666.
- [21] TRIPATHI N, SINGH RS, SINGH JS. Impact of post-mining subsidence on nitrogen transformation in southern tropical dry deciduous forest, India[J]. *Environmental Research*, 2009, 109: 258-266.
- [22] BARTSCH David, RUNKLE James, HICKS Ray, et al. Impacts of longwall mining on hydrology, soil moisture, and tree health in Belmont country, Ohio. [C]//24th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown: 2005.
- [23] 毕银丽, 伍越, 张健, 等. 采用 HYDRUS 模拟采煤沉陷地裂缝区土壤水盐运移规律[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 360-367.
BI Yinli, WU Yue, ZHANG Jian, et al. Hydrous is used to simulate the law of soil water and salt transport in the ground fissure area of coal mining subsidence[J]. Journal of Chinese Coal Society, 2020, 45(1): 360-367.
- [24] 陈秋计. 开采沉陷附加坡度对耕地资源的影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(1): 73-75.
CHEN Qiuji. Study on the influence of mining subsidence additional slope on cultivated land resources[J]. Mining Research and Development, 2014, 34(1): 73-75.
- [25] 郑南山, 胡振琪, 顾和和. 煤矿开采沉陷对耕地永续利用的影响分析[J]. 煤矿环境保护, 1998(1): 18-21.
ZHENG Nanshan, HU Zhenqi, GU Hehe. Analysis on the impact of coal mining subsidence on the sustainable utilization of cultivated land[J]. Coal Mine Environmental Protection, 1998(1): 18-21.
- [26] 顾和和, 胡振琪, 刘德辉, 等. 开采沉陷对耕地生产力影响的定量评价[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(4): 84-87.
GU Hehe, HU Zhenqi, LIU Dehui, HU Feng. Quantitative evaluation of the impact of mining subsidence on cultivated land productivity[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1998, 27(4): 84-87.
- [27] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211-1221.
PENG Suping, BI Yinli. Key technologies and strategic thinking of ecological environment restoration in coal mining areas of the Yellow River Basin[J]. Journal of Chinese Coal Society, 2020, 45(4): 1211-1221.
- [28] 张宏贞, 查剑峰, 殷铁成. 开采沉陷对耕地的损害指标理论分析[J]. 金属矿山, 2007(10): 116-118.
ZHANG Hongzhen, ZHA Jianfeng, YING Tiecheng. Theoretical analysis of damage index of mining subsidence to cultivated land[J]. Metal Mine, 2007(10): 116-118.
- [29] 王刚, 郭广礼, 李伶. 矿区土地的破坏机理与治理措施研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(11): 6765-6767.
WANG Gang, GUO Guangli, LI Ling. Study on damage mechanism and treatment measures of land in mining area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(11): 6765-6767.
- [30] 李树志. 我国采煤沉陷土地损毁及其复垦技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 93-97.
LI Shuzhi. Current situation and Prospect of coal mining subsidence land damage and its reclamation technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 93-97.
- [31] 张欣欣, 田惠文, 毕如田. 矿区耕地整治潜力评价与整治分区[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 249-258.
ZHANG Xinxin, TIAN Huiwen, BI Rutian. Farmland consolidation potential evaluation and consolidation zoning in mining areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(16): 249-258.
- [32] 戴华阳, 郭俊廷, 阎跃观, 等. “采-充-留”协调开采技术原理与应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1602-1610.
DAI Huayang, GUO Juntong, YAN Yueguan, et al. Principle and application of subsidence control technology of mining coordinately mixed with backfilling and keeping[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1602-1610.
- [33] 郭惟嘉, 王海龙, 刘增平. 深井宽条带开采煤柱稳定性及地表移动特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(3): 369-375.
GUO Weijia, WANG Hailong, LIU Zengping. Coal pillar stability and surface movement characteristics of deep wide strip pillar mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(3): 369-375.
- [34] 查剑峰, 郭广礼, 刘元旭, 等. 矽石变形非线性及其对岩层移动的影响[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1071-1075.
ZHA Jianfeng, GUO Guangli, LIU Yuanxu, et al. The nonlinear features of waste deformation and its impact on strata movement[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1071-1075.
- [35] 王志强, 郭晓菲, 高运, 等. 华丰煤矿覆岩离层注浆减沉技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 34(8): 1071-1075.
WANG Zhiqiang, GUO Xiaofei, GAO Yun, et al. Study of grounding technology of overburden-separation to reduce ground subsidence in Huafeng coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 34(8): 1071-1075.
- [36] LI H Z, GUO G L. Surface subsidence control mechanism and effect evaluation of gangue-backfilling mining: a case study in China[J]. Geofluids, 2018: 2785739.
- [37] ZHU X J, GUO G L, ZHA J F, et al. Surface dynamic subsidence prediction model of solid backfill mining[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(12): 1-9.
- [38] GUO Q B, GUO G L, LV X, et al. Strata movement and surface subsidence prediction model of dense solid backfilling mining[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(21): 1-11.
- [39] 郭文兵. 深部大采宽条带开采地表移动的预计[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 368-372.
GUO Wenbing. Surface movement predicting problem of deep strip pillar mining[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 368-372.
- [40] 刘义新, 戴华阳, 郭文兵. 巨厚松散层下深部宽条带开采地表移动规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(3): 336-340.
LIU Yixin, DAI Huayang, GUO Wenbing. Surface movement laws of deep wide strip-pillar mining under thick alluvium[J].

- Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(3): 336-340.
- [41] 郭增长, 谢和平, 王金庄. 条带开采保留煤柱宽度和采出宽度与地表变形的关系[J]. 湘潭矿业学院学报, 2003, 18(2): 13-17.
GUO Zengzhang, XIE Heping, WANG Jinzhuang. The relationship of the coal pillar width and the with the surface deformation caused by strip extraction[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2003, 18(2): 13-17.
- [42] 郭文兵, 邓喀中, 邹友峰. 条带开采地表移动参数研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2): 182-186.
GUO Wenbing, DENG Kazhong, ZOU Youfeng. Research on surface movement parameters of strip-partial mining[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2): 182-186.
- [43] 滕浩. 覆岩隔离注浆充填压实区形成机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
TENG Hao. Formation mechanism of compacting area in the gob with grouting into overburden of isolated panels during longwall mining [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2017.
- [44] 许家林, 倪建明, 轩大洋, 等. 覆岩隔离注浆充填不迁村采煤技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 8-11.
XU Jialin, NI Jianming, XUAN Dayang, *et al.* Coal mining technology without village relocation by isolated grout injection into overburden[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 8-11.
- [45] 张吉雄, 缪协兴, 郭广礼. 矸石(固体废物)直接充填采煤技术发展现状[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 395-401.
ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, GUO Guangli. Development status of backfilling technology using raw waste in coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 395-401.
- [46] 冯光明, 王成真, 李凤凯, 等. 超高水材料袋式充填开采研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 602-607.
FENG Guangming, WANG Chengzhen, LI Fengkai, *et al.* Research on bag-type filling mining with super-high-water material[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(4): 602-607.
- [47] 周华强, 侯朝炯, 孙希奎, 等. 固体废物膏体充填不迁村采煤[J]. 中国矿业大学学报, 2004(2): 30-34.
ZHOU Huaqiang, HOU Chaojiong, SUN Xikui, *et al.* Solid waste paste filling for none-village-relocation coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004(2): 30-34.
- [48] 郭广礼, 缪协兴, 查剑锋, 等. 长壁工作面矸石充填开采沉陷控制效果的初步分析[J]. 中国科技论文在线, 2008(11): 805-809.
GUO Guangli, MIU Xiexing, ZHA Jianfeng, *et al.* Preliminary analysis of the effect of controlling mining subsidence with waste stow for long wall workface[J]. China Sciencepaper, 2008(11): 805-809.
- [49] 张吉雄, 李剑, 安泰龙, 黄艳利. 矸石充填综采覆岩关键层变形特征研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 357-362.
ZHANG Jixiong, LI Jian, AN Tailong, HUANG Yanli. Deformation characteristic of key stratum overburden by raw waste backfilling with fully-mechanized coal mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 357-362.
- [50] 查剑锋. 矸石充填开采沉陷控制基础问题研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
ZHA Jianfeng. Study on the foundational problems of mining subsidence controlled in waste stow[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2008.
- [51] 王磊. 固体密实充填开采岩层移动机理及变形预测研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
WANG Lei. Study on strata movement mechanism and deformation prediction of coal mining with solid waste compacted filling[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2012.
- [52] GUO G L, ZHU X J, ZHA J F, *et al.* Subsidence prediction method based on equivalent mining height theory for solid backfilling mining[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(10): 3302-3308.
- [53] 郭广礼, 郭凯凯, 张国建, 等. 深部带状充填开采复合承载体变形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 101-109.
GUO Guangli, GUO Kaikai, ZHANG Guojian, *et al.* Research on deformation characteristics of coupled coal-backfills bearing in deep backfilling mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 101-109.
- [54] 朱晓峻. 带状充填开采岩层移动机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
ZHU Xiaojun. Study on strata movement mechanism in backfill-strip mining[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2016.
- [55] 邓喀中, 谭志祥, 姜岩, 等. 变形监测及沉陷工程学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2014.
DENG Kazhong, TAN Zhixiang, JIANG Yan, *et al.* Deformation monitoring and subsidence engineering[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2014.