



李学良,杜亚敏,郭鑫,等.采煤沉陷区动态预复垦理论分析及工程实践[J].矿业安全与环保,2023,50(1):86-91.
LI Xueliang, DU Yamin, GUO Xin, et al. Theoretical analysis and engineering practice of dynamic pre-reclamation in coal mining subsidence area[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(1):86-91.
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2023.01.015

扫码阅读下载

采煤沉陷区动态预复垦理论分析及工程实践

李学良^{1,2}, 杜亚敏^{3,4}, 郭鑫⁵, 余洋^{6,7}

- (1. 中煤科工生态环境科技有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院, 北京 100013;
3. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035; 4. 自然资源部土地工程技术创新中心, 北京 100035;
5. 郓城城乡规画服务中心, 山东 菏泽 274700; 6. 中国地质环境监测院, 北京 100081;
7. 自然资源部矿山生态效应与系统修复重点实验室, 北京 100081)

摘要:在我国东部高潜水位矿区,由于单一厚煤层和多煤层的长时间无序开采,形成了大面积的非稳沉区及积水区,致使耕地面积急剧减少,若不及时治理则会导致治理成本增加、复垦效率降低等一系列问题。本着从“末端治理”向“源头控制”、“过程管理”与“防治结合”的理念,在现有研究成果的基础上,对动态预复垦从原理、优势、关键技术等多个方面进行综合分析,并结合工程实例对动态预复垦的整体技术体系与实施方法进行深入剖析。结果表明:动态预复垦能够将采矿与复垦有效结合,通过合理分区、科学确定标高、表土有效剥覆等手段,可有效保护和利用浅部耕作土层的土地资源,缩短土地恢复治理时间,效益显著。

关键词:高潜水位矿区;开采沉陷;动态预复垦;关键技术;生态修复

中图分类号:TD713.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1008-4495(2023)01-0086-06

Theoretical analysis and engineering practice of dynamic pre-reclamation in coal mining subsidence area

LI Xueliang^{1,2}, DU Yamin^{3,4}, GUO Xin⁵, YU Yang^{6,7}

- (1. China Coal Science and Engineering Ecological Environment Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;
2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
3. Land Consolidation and Rehabilitation Center, MNR, Beijing 100035, China;
4. Technology Innovation Center for Land Engineering, MNR, Beijing 100035, China;
5. Yuncheng County Urban and Rural Planning Service Center, Heze 274700, China;
6. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China;
7. Key Laboratory of Mine Ecological Effects and System Restoration, MNR, Beijing 100081, China)

Abstract: In the mining areas with high phreatic water levels in Eastern China, due to the long time and disordered mining

of single thick coal seam and multiple coal seams, a large area of unstable settlement and waterlogging areas have been formed, resulting in a sharp decrease in the area of arable land. If not managed in time, it will lead to a series of problems, such as the increase of management cost and the reduction of reclamation efficiency. Based on the concept of “end management” to “source control”, “process management” and “combination of prevention and control”, and on the basis of the existing research results, the dynamic pre-reclamation was comprehensively analyzed from the principle, advantages, key technologies and other aspects. Combined with engineering examples, the overall

收稿日期:2021-11-06;2021-12-03 修订

基金项目:北京市科技计划课题(Z181100005118012);中国煤炭科工集团有限公司重点资助项目(2018-2-ZD007, 2019-ZD004);中国地质调查局地质调查项目(DD20221781, DD20221726)

作者简介:李学良(1985—),男,河北唐山人,博士研究生,副研究员,主要从事“三下”采煤与矿山生态修复方面的研究工作。E-mail:lixueliang_1985@163.com。

通信作者:杜亚敏(1985—),女,山西长治人,硕士,高级工程师,主要从事国土空间生态修复技术及标准研究工作。E-mail:duyamin@lcr.org.cn。

technical system and implementation methods of dynamic pre-reclamation were deeply analyzed. The results show that dynamic pre-reclamation can effectively combine mining and reclamation. By means of reasonable zoning, scientific determination of elevation, and effective topsoil peeling, it can effectively protect and utilize the land resources of shallow cultivated soil layers and shorten the time for land restoration and management, and the benefits are significant.

Keywords: mining area with high phreatic water level; mining subsidence; dynamic pre-reclamation; key technology; ecological restoration

近年来,随着国家支持力度的不断加大,矿区土地复垦领域的研究工作得到了长足的发展^[1-7]。广大科研工作者依托各类国家级、省部级及企业自立的各项专项计划及基金项目,以我国东西部采煤沉陷区土地复垦面临的实际问题为出发点,围绕法律法规、关键技术、配套措施等做了大量的理论研究及工程实践,取得了一系列的研究成果。针对稳沉区的复垦方法及理论已相对较为成熟,为了使矿区内被破坏的土地得到修复,保证土地复垦的时效性与科学性,未稳沉区的土地复垦研究已逐渐成为研究热点。其中,“边采边复”^[8]、“动态预复垦”^[9]等技术研究虽已取得一定进展,但还未达到现场实际应用的水平。笔者基于现有理论成果与工程经验,结合工程实例开展分析,以期对动态预复垦的基础理论、设计、施工提供新的思路。

1 动态预复垦技术

1.1 技术简介

动态预复垦技术,主要是针对我国东部高潜水位矿区多煤层或单一厚煤层开采未稳沉区或待开采区提出的基于预回填复垦的技术。一般是指在采煤沉陷未稳定、地表形成积水前进行的沉陷区表土预先剥离、取土、回填或固废充填,进而达到降低后期煤炭开采沉陷损害影响的目的。

目前,动态预复垦技术在淮南、淮北、唐山、济宁、菏泽等地得到了广泛应用,并得到了现场实践的检验。该技术规避了传统的稳沉后开始治理的保守思路,最大程度地实现了社会、生态、环境效益的有机统一。

1.2 技术方法及特点

在东部高潜水位矿区,当地表达到稳沉时,地表土地往往早已被积水淹没^[9-11]。积水致使现场测量困难;原表土资源的剥离需在水下进行,施工困难;相比无积水区取土,水下取土的费用大幅提高;原地表道路、电力、沟渠等设施会受到破坏,利用及修复条件差;采煤损毁土地不能得到及时复垦,地表积水、淤泥使复垦施工周期变长,效率低、效益差。

采煤沉陷区动态预复垦与传统复垦方法的本质区别是前者在时间上具有先行性,即地表土地复垦与地下采矿同步进行,在地表达到最终沉降、表土被积水淹没前将采煤塌陷地进行预先治理,最大程度地保护土地资源。

在现场实施动态预复垦技术过程中,主要根据开采计划和沉陷区地质条件划分开采单元,采用开采沉陷理论预计算其各开采时段的动态下沉等值线,合理确定项目区范围、复垦规模及主要目标;模拟不同修复时机下耕地恢复率、投资、水土布局等;综合考虑上述条件确定最优修复时机,开展预回填复垦物料(无污染矸石或就地取土)选择、工程布局、回填方法、工程安排、施工参数等总体工程设计。

目前,常见的就地取土回填与矸石回填动态预复垦示意图如图 1 所示。

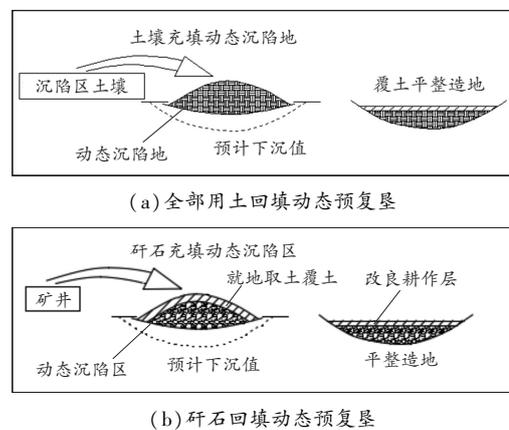


图 1 全部用土回填、矸石回填动态预复垦示意图

2 动态预复垦关键技术分析

2.1 治理分区

动态预复垦就是对正在沉降变化的土地提前进行形态构建,对某个区域或一定范围的待治理区进行合理分区^[12-13],尤其是地下开采条件或地表现状差异较大的区域,应考虑复垦尺度和地形地貌特征、利用方向和利用要求、后期采动影响次数(煤层和工作面影响次数)、未来还要发生的最大下沉量(稳沉程度)等多个因素,合理地进行综合治理分区。

在实际工作中,一般是根据预计下沉等值线将项目区按照确定的下沉量划分标准划分为不同的施工田块,如图 2 所示。

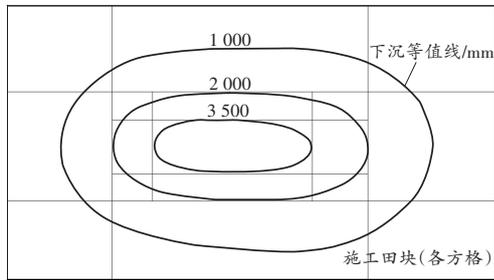


图 2 动态预复垦田块划分示意图

对于下沉量较小的田块(即走向主断面的外围,井下对应于开切眼与终采线一侧),一般定为覆土平整区(图 2 中等值线 1 000~2 000 mm 区域),通过从下沉盆地中部取土进行垫高,实现正常耕作;对于下沉量较大的田块(图 2 中等值线 3 500 mm 以内的区域),也就是走向主断面的中部,该处开采沉陷后一般为常年积水区,定为取土区或挖深垫浅区,可采取分条带挖深垫浅工艺进行治理。

2.2 分期预垫标高的确定

复垦标高作为动态预复垦现场实施中的一个关键因素,直接关系到整个工程的成败^[14-16]。当开采单一煤层时,其复垦标高相对较为容易确定;在多煤层开采条件下,地面会受到多个煤层不同开采时期的重复扰动,过程较为复杂,沉陷情况与单一煤层有所不同,需要分开进行分析。

在动态预复垦实施过程中,治理工程是一个复杂的、动态的过程,尤其是在多煤层开采或周边存在多工作面开采时,需要根据开采时序分多个阶段进行复垦,此时就涉及到分期预垫标高的确定,需要结合预计成果单独分析。

预垫高治理技术主要应用于基本稳沉区的零星开采区和未来开采区。该区域地表尚未稳沉,由于沉陷区土地资源稀缺,为了保护珍贵的原生土壤资源,在地表下沉积水前,将土壤预先剥离后回填下沉浅部区域到设计标高,确保回填区域最终下沉后不积水且能治理成可利用的耕地。具体步骤如下:

1) 未来下沉量 W_y 的计算:

$$W_y = W(x) = mq \cos \alpha \int_0^{\infty} \frac{1}{r} e^{-\frac{\pi(x-s)^2}{r^2}} ds \quad (1)$$

式中: x 为地面任意点横坐标; m 为采厚; q 为下沉系数; α 为煤层倾角; s 为开采单元横坐标; r 为主要影响半径。

2) 各施工区段的划分

将最终下沉量分为几个阶段,然后根据下沉等值线进行施工区段划分。例如,可将预计下沉量小于 2 m、预计下沉量为 2~4 m、预计下沉量大于 4 m 的区域分为不同的施工田块。

3) 平均回填厚度的确定

将上述划分的施工区段再划分为边长为 10~20 m 的矩形或方形施工参数计算区域,每一施工参数计算区域的平均回填厚度 B_z 按式(2)计算:

$$B_z = H - H_0 + W_y \quad (2)$$

式中: H 为稳沉后回填设计标高; H_0 为下沉前地面标高; W_y 为该施工参数计算区域预计下沉量的算术平均值。

2.3 表土剥覆技术

对于井工煤矿来说,复垦的关键在于解决“何时修复”“何地修复”“如何修复”3 个问题,而这 3 个问题中最重要也是最难解决的是“何时修复”^[17-19]。修复时间需要根据地质采矿条件、沉陷特点、未来采动干扰程度综合确定。

表土剥离不仅最大限度地存续了优质的土壤资源,也拉开了区域土壤资源调配利用的序幕,该环节在动态预复垦的整个过程中意义重大^[20]。动态剥覆工艺如图 3 所示。

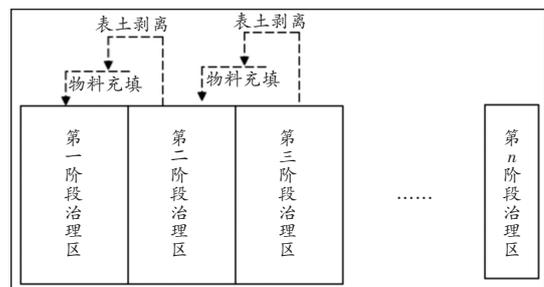


图 3 项目区土壤剥覆工程动态剥覆工艺

开始动工时,第一步需先把施工田块与取土田块的表土按照设计剥离一定厚度移至堆放区域;然后将选定的充填物或从取土田块取土回填到施工地段,充填至设计标高;再将堆放的表土回填。其他田块的施工方法以此类推,最后将所有田块按设计进行整平。

3 动态预复垦实例

3.1 项目概况

项目区位于山东省邹城市,为采煤塌陷搬迁村庄旧址,是南北宽 585 m、东西长 800 m 的不规则单一片区,原始标高为 43~45 m,第四系平均厚度约为 107.54 m。

项目区及其周边受到地下开采的影响。以往及后续的开采中均采用长壁开采,顶板管理方法为全部垮落法。主要开采 3_上、3_下 煤层,其中 3_上 煤层倾角约为 3°,开采深度为 265~315 m,开采厚度为 4.3~5.4 m;3_下 煤层倾角约为 3°,开采深度为 280~335 m,开采厚度为 3.1 m。根据矿方提供的开采规划资料,该区域的采矿活动还将维持约 10 a,主要涉及 33_上 04、33_上 06、33_上 08、33_下 02 等 9 个工作面。矿井上下对照图如图 4 所示。

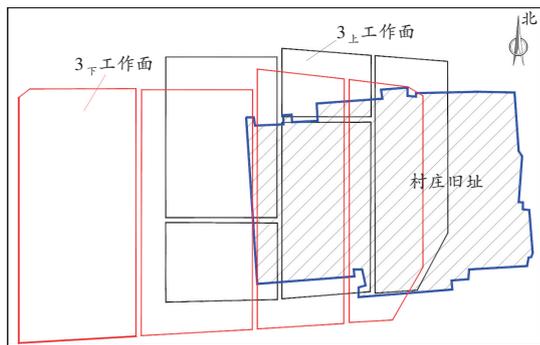


图 4 项目区矿井上下对照图

为了使搬迁旧址所压占土地尽快得到利用,同时避免优良的表土资源受到未来积水的影响,须及时对该区域进行预复垦治理。

3.2 动态预复垦阶段划分

鉴于 33_下 02~33_下 06 工作面与项目区距离较远且煤层较薄,可以直接通过预垫高的方式减轻其对项目区西部的影响;33_上 10 工作面开采时间靠后且靠近项目区南边,其对全局影响较小,故暂时不予优先治理。通过综合考虑,按照减少扰动、避免积水、增加耕地的原则,将动态预复垦时段划分为以下 5 个阶段:

第一阶段:33_上 04 工作面开采完毕至 33_上 06 工作面开采之前,进行场地建筑垃圾的填埋与覆土、台阶与东部平整区纵坡设置,以及场地平整工作。

第二阶段:33_上 06 工作面开采完毕至 33_上 08 工作面开采之前,进行取土区工作面的部分取土与东西部整理区的平整。

第三阶段:33_上 08 工作面开采完毕至 33_下 04 工作面开采之前,在取土区取土进行东西部预垫高。

第四阶段:33_下 08 工作面开采完毕至 33_上 10 工作面开采之前,湖面的形成与湖边衬砌,湖边路的修建,南边部分预垫高。

第五阶段:33_下 工作面开采完毕整体稳沉之后,进行全场地的平整与复垦区景观生态建设。

3.3 预测结果分析

根据矿方提供的工作面接续计划,结合项目区所在区域地质采矿条件,分别计算了 5 个阶段开采后项目区地表的移动和变形值,见表 1。搬迁村庄旧址原始地面标高为 43.0~45.0 m,受地下开采的影响,工作面开采结束后,项目区范围内最大塌陷深度为 6 545 mm。

表 1 项目区各阶段地表移动变形值统计

时段	沉降面积(10 mm 最大下沉范围)/hm ²	最大下沉值/mm	最大倾斜值/(mm·m ⁻¹)	最大水平拉伸变形值/(mm·m ⁻¹)
阶段一	11.98	3 926	28.08	12.66
阶段二	25.67	4 051	28.54	12.69
阶段三	36.63	4 089	28.56	12.77
阶段四	37.20	6 545	45.65	20.42
阶段五	38.57	6 545	52.09	23.25

本区域多年浅层孔隙地下水水位标高基本稳定在 39 m 左右,开采活动结束后的最低点的标高约为 36.6 m,由于存在枯水期与丰水期,则上下浮动 0.5 m,为 38.5~39.5 m。积水程度划分见表 2。

表 2 项目区积水程度分类

积水程度	常年积水区 (<38.5 m)	季节性积水区 (38.5~39.5 m)	未积水区 (>39.5 m)
面积/hm ²	22.22	2.62	13.74
占比/%	57.59	6.79	35.62

综上所述,后续未积水区和季节性积水区有复垦改造为耕地的可能性,而加上地区搬迁建筑垃圾众多,可以在常年积水区中,即项目区西部进行回填复垦出一些耕地加以利用。

3.4 总体布局

本着因地制宜、节省投资、多出耕地、出好耕地的原则,利用村庄拆迁的建筑垃圾(将其适当破碎加工)作为回填材料,对项目区西部已出现的沉陷区进行充填。通过场内土方平衡,推平整形的方式保证项目区东部和西部的保有量。考虑今后的开采下沉及地下水位的标高,现阶段复垦标高确定为 43.5~44.0 m,不同区块略有差异。

在场地规划方面,将整个场地分为三大块:西部复垦区,面积 9.42 hm²;中部取土区,面积 13.68 hm²;东部复垦区,面积 15.47 hm²。复垦规划如图 5

所示。

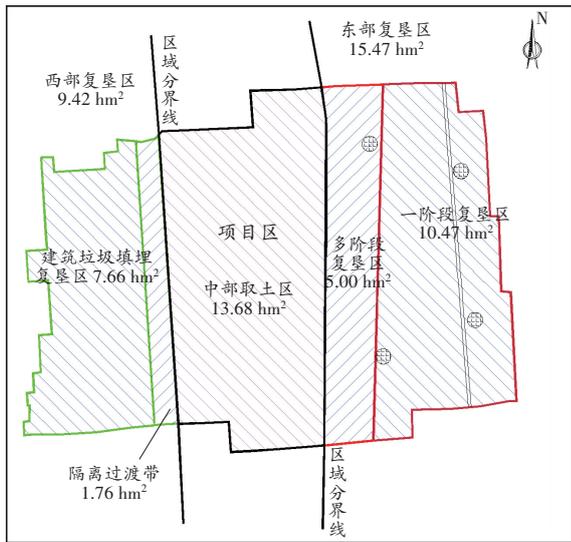


图5 搬迁旧址耕地复垦规划图

西部复垦区仅包含建筑垃圾填埋复垦区,由于该处已发生较大的沉陷,故将其作为建筑垃圾回填的场地,面积约为 7.66 hm^2 。隔离过渡带面积 1.76 hm^2 ,其作为垃圾填埋区的过渡地带,防止填埋垃圾对项目区中部未来沉陷设计形成的湖区造成污染。填埋方式如图6所示。

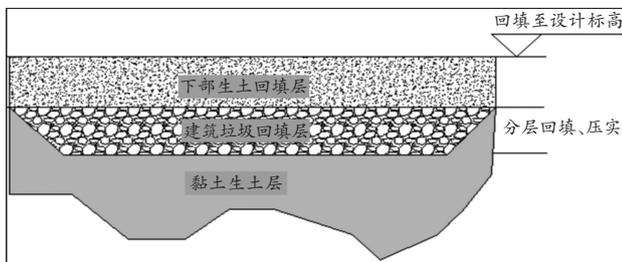


图6 建筑垃圾填埋区填埋方式示意图

中部取土区因为涉及多个工作面的重复开采扰动,将来会成为整个地区沉降最大的区域,故将其作为后续阶段的取土区,为以后形成水面做准备,同时也可实现土方的场内平衡,减少复垦费用。

东部复垦区含多阶段复垦区和一阶段复垦区两部分。其中多阶段复垦区面积约为 5.00 hm^2 ,位于该复垦区的西部;一阶段复垦区面积约为 10.47 hm^2 ,位于该复垦区的东部。

3.5 复垦工艺

该项目治理是一个动态复垦工艺过程。按照上述的阶段划分,以第一阶段为例,主要通过地表清理、建筑垃圾填埋、上覆表土、纵坡设置、场地平整,以及种植绿肥等一些列措施,最终完成该阶段施工任务。主要工艺过程如下:

1) 建筑垃圾聚堆,工作面开拓。由于场地堆满厚度高低不平的建筑垃圾,需先将垃圾聚堆,形成2块工作场地。结合现场实际情况,最终确定在垃圾填埋区和中部取土区分别腾出一块 $25 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的场地作为取土换填的工作面。

2) 建筑垃圾底层生土取土堆放。根据确定的标高、覆土厚度、垃圾清理量及填埋区尺寸,确定建筑垃圾填方区域为 7.66 hm^2 ,下挖标高为 38.0 m 。按照坡度 $1:1$ 放坡,将位于建筑垃圾填埋区工作面的底层生土取出堆放在中部取土换填工作面,再将垃圾填埋区下部分层碾压、压实,利用下部 $35 \sim 38 \text{ m}$ 的黏土设置隔离防渗层,防止垃圾污染。

3) 建筑垃圾回填夯实,场地底土回覆。将场地内建筑垃圾进行机械破碎,破碎度达到 20% 后,使用自卸汽车将其运往挖好的建筑垃圾填埋区,进行分层回填、碾压,压实度达到 80% 后,上部用复合排水网、长丝土工布、HDPE土工膜、黏土设置隔离层,处置完标高为 42.5 m 。然后将取出的种植土回填,考虑到后期的虚土压实,回填底土 1.8 m 。全地面整平标高为 44.0 m 。

4) 田块、场地平整,种植绿肥。在进行表土回填后,按自然坡度进行调整,并进行场地平整,在东部土地复垦区和西部土地复垦区进行田块平整,中部取土区进行简单的场地平整。在平整后的地面上种植绿肥、培肥地力。

3.6 效果分析

目前,一阶段工程已结束,以原南北中央大道为界,西边设计标高为 44.0 m ,东边设计标高为 43.5 m ,该阶段项目充分利用现场建筑垃圾,遵循场内土方平衡,以土方工程为主,总量为 66.03 万 m^3 ,平整面积 35.65 hm^2 ,土地培肥 24.76 hm^2 。

在充分利用现场建筑垃圾的基础上,以场内土方平衡为主,最终可实现将塌陷地 23.86 hm^2 的场地全部复垦为耕地,使项目区新增耕地率达到 61.86% 。同时,利用拆迁建筑垃圾充填复垦,不仅复垦了荒废的塌陷地,而且还处置利用了建筑垃圾,避免了堆放占地和对环境的污染,保障了沉陷破坏土地的及时复垦,达到预期治理目标。

4 结语

1) 动态预复垦技术能够实现地表治理与地下采矿相结合,及时对受采煤沉陷影响的土地进行治理与修复,其能够降低复垦资金投入,缩短复垦治理周

期,提高复垦整体效益,有效避免了二次复垦的发生,最大限度地保护了土壤资源。

2) 采煤沉陷区动态预复垦的核心问题包括分析各开采单元不同开采时段的动态下沉情况,确定各时段修复范围;模拟不同修复时机下耕地恢复率、费用、水土布局等,确定最优的修复时机与水土布局;设计修复标高与动态施工工艺。

3) 目前,将采煤沉陷破坏土地最大限度地恢复为耕地已不再是修复的唯一目标,通过动态预复垦,保证区域内基础设施及植被、湿地等生态要素的协调与可持续性,实现生态系统价值最大化与生态保护的多重性已成为一个重要的发展方向。

参考文献 (References):

[1] 孙光,李树志,董庆欢,等. 济宁市任城区采煤沉陷区综合治理实践与思考[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(6): 113-117.

[2] 朱磊. 西部生态脆弱区固废多态充填技术应用与实践[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(4): 81-86.

[3] 祝琨. 矿山土地复垦不同压实密度土壤中菌根作用机理及生态效应研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(4): 28-32.

[4] 张海珍,王琳,聂清莉. 基于干扰理论的重庆市关闭煤矿废弃地生态修复策略与方法研究[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(4): 122-126.

[5] 胡海军,余洋,韩笑,等. “两案”合并背景下的土地复垦研究回顾与展望[J]. 金属矿山, 2017(12): 147-152.

[6] 于辉胜,翟世斌,王力,等. 废弃露天矿山生态保护修复实践研究:以卡顶山矿区生态修复工程为例[J]. 国土资源情报, 2021(8): 50-56.

[7] 张沛沛,叶青青,余洋. 煤矿区生态环境治理绩效评价及障碍因子诊断——基于河南煤矿区居民满意度的视

角[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(6): 2432-2439.

[8] 胡振琪,肖武,王培俊,等. 试论井工煤矿边开采边复垦技术[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 301-307.

[9] 李树志,李学良,门雷雷,等. 高潜水位平原矿区采煤塌陷地复垦方向划定及规划分区[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 60-69.

[10] 陈晓谢,张文涛,朱晓峻,等. 高潜水位采煤沉陷区积水范围动态演化规律[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(2): 126-133.

[11] 余洋. 一种矿山地质环境综合评价方法及系统: CN108710984B[P]. 2021-06-08.

[12] 迟臣鑫,陈伟强,朱鹏程,等. 采煤塌陷积水区面积无人机采集方法[J]. 金属矿山, 2020(8): 136-141.

[13] 陈利生,李学良. 采煤塌陷区煤矸石回填复垦技术[J]. 金属矿山, 2014(9): 137-141.

[14] 张瑞娅,肖武,胡振琪. 边开采边复垦地区动态施工标高模型构建与实例分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 2125-2133.

[15] 王娜,田磊,文可戈,等. 基于遥感技术的矿山生态修复调查研究——以冀东铁矿为例[J]. 金属矿山, 2021(10): 192-198.

[16] 王世虎. 生态文明建设背景下历史遗留矿山环境问题与对策[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(6): 88-91.

[17] 徐艳,王璐,樊嘉琦,等. 采煤塌陷区生态修复技术进展[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(7): 80-90.

[18] 余洋,张进德,潘莉. 土地整治综合研究进展评述[J]. 国土资源科技管理, 2018, 35(5): 34-48.

[19] 叶珊珊,张进德,潘莉,等. 基于“绿色矿山”的矿区生态环境成本核算——以华北平原某矿区为例[J]. 金属矿山, 2019(4): 168-174.

[20] 王雁林,陈沛,赵永华,等. 渭河平原废弃露天矿区区域生态修复路径探讨[J]. 国土资源情报, 2020(2): 20-26.

(责任编辑:陈玉涛)

(上接第 85 页)

[12] 刘发义,张玉东. 基于离散元的断层防水煤柱留设规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(3): 71-73.

[13] 许峰,靳德武,杨俊哲,等. 保德煤矿峰峰组隔水性多尺度定量评价研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2379-2386.

[14] 刘明军,王钢,崔岩波. 准格尔矿区井下水害区域超前探查防治技术[J]. 煤炭工程, 2021, 53(8): 70-74.

[15] 李宏杰,马君,姜鹏,等. 准格尔煤田岩溶水文地质特征及水害防治技术[J]. 煤矿安全, 2018, 49(9): 246-251.

[16] 马雄德,杜飞虎,齐蓬勃,等. 底板承压水保水采煤技术与工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 61-66.

[17] 李涛,高颖,陈伟. 深部奥灰水特性及其浓缩后在奥灰水害防治中的应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(增刊 1): 262-268.

[18] 景国勋,秦瑞琪. 2011—2020 年我国煤矿水害事故相关因素特征分析[J]. 安全与环境学报, 2022(4): 2297-2304.

[19] 孙文洁,韩权,杨恒,等. 2000—2015 年我国煤矿水害事故特征分析[J]. 煤炭工程, 2017, 49(5): 95-98.

[20] 武强,赵苏启,董书宁,等. 煤矿防治水手册[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2013.

(责任编辑:林桂玲)