

环境地质

## 高潜水位平原区采煤沉陷防治技术研究进展

薄怀志<sup>1,2</sup>

(1.山东省地质矿产勘查开发局第三水文地质工程地质大队,山东 济宁 272000;2.山东省地矿局采煤塌陷地综合治理工程技术研究中心,山东 济宁 272000)

**摘要:**在高潜水位煤粮复合区,煤炭开采沉陷造成大面积耕地破坏,生态环境恶化,因此,总结采煤沉陷防治技术很有必要。该文介绍了常用的沉陷盆地修复技术和修复模式的研究进展,系统总结了消灾修复技术、工程修复技术、生态修复技术、生物修复技术研究现状和成果。用“矿地一体化”理念统筹资源开发和采煤塌陷地综合治理,“地、环、景、城”四位一体的采煤塌陷地综合治理模式,运用3S、大数据、云平台实现采煤塌陷地动态监测监管,是将来采煤塌陷防治的发展趋势。

**关键词:**采煤沉陷;治理修复;研究现状;高潜水位平原区

**中图分类号:**P588.14

**文献标识码:**B

**引文格式:**薄怀志.高潜水位平原区采煤沉陷防治技术研究进展[J].山东国土资源,2018,34(11):59-66. BO Huaizhi. Research Progress on Prevention and Control Technology of Coal - mining Induced Subsidence in Plain Area with Higher Underground Water[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(11): 59-66.

## 0 引言

煤矿开采会造成严重的地质环境问题,主要包括开采沉陷、矿山“三废”、矿区含水层结构破坏扰动诱发的排、供、生态环保矛盾等<sup>[1]</sup>。鲁西煤炭基地是全国14大煤炭基地之一,担负着华东经济发达地区能源供应的重任。兖州矿区、枣滕矿区、济宁矿区、巨野矿区等是典型的高潜水位煤粮复合平原区,开采沉陷造成积水严重。截至2015年,山东省采煤塌陷地面积6.74万hm<sup>2</sup>(101.09万亩),其中济宁市3.59万hm<sup>2</sup>(53.89万亩)、枣庄市0.53万hm<sup>2</sup>(8万亩)、菏泽市0.21万hm<sup>2</sup>(3.16万亩),三地采煤塌陷地占全省总面积的64.35%,且随着兖州矿区、济宁矿区、枣滕矿区的持续开发及巨野矿区开发利用强度的增大,采煤塌陷地面积将进一步增加。开采沉陷导致大面积的高质量耕地损毁、土壤特性变化、排灌系统及农田防护体系破坏等,造成农作物减产绝产、环境恶化、大范围积水<sup>[2-4]</sup>,严重影响生态环境、威胁粮食安全<sup>[5]</sup>。

发展绿色矿业,建设绿色矿山,保护生态环境,是践行“绿水青山就是金山银山”理念,促进生态文明建设,落实新发展理念的重要举措。为切实加强采煤塌陷地综合治理工作,国务院办公厅印发了《关于加快推进采煤沉陷区综合治理的意见》(国办发[2016]102号)文件,山东省人民政府办公厅印发了《山东省采煤塌陷地综合治理工作方案》(鲁政办字[2015]180号)文件,明确了“防治并重、边采边治、先治后采、治理与利用相结合”的采煤塌陷地综合治理机制。在高潜水位平原区,以保护生态环境为重点,以科技创新为支撑,构建长效发展机制,将采煤沉陷防治贯穿于矿业开发利用与保护全过程,对于推动形成矿地和谐、人与自然和谐发展的矿业新格局具有重要意义。

## 1 采煤沉陷防治技术及分类

武强<sup>[6-7]</sup>系统总结了开采沉陷导致的矿山地质环境问题和修复治理技术,并将修复治理技术划分为消灾修复技术、工程修复技术、生态修复技术、生

收稿日期:2018-02-27;修订日期:2018-03-01;编辑:曹丽丽

基金项目:山东省重点研发计划(2016ZDJS11A02):采煤沉陷地绿色综合治理与生态修复关键技术

作者简介:薄怀志(1983—),男,山东日照人,工程师,注册测绘师,主要从事测绘地理信息及矿山生态地质工作;E-mail:bohuaizhi@163.com

物修复技术四类,根据修复后土地利用目标,将不同类型修复技术组合,构成修复治理模式。沉陷盆地

治理修复技术及其划分、常用治理模式组合见表 1。

表 1 沉陷盆地修复治理模式

治理对象	土地利用目标	常用修复治理模式	沉陷盆地修复治理技术			
			消灾修复技术	工程修复技术	生态修复技术	生物修复技术
沉陷盆地	草地 林地	$A_2 + F_2 + E_1/E_3 + Be_1/Be_3$	A <sub>1</sub> 沉陷区回填			
			A <sub>2</sub> 局部塌陷坑、地裂缝回填			
	农业用地	$A_1/A_2 + F_2 + Be_2/Be_4$	A <sub>3</sub> 夯实碾压回填	F <sub>1</sub> 坡形修整	E <sub>1</sub> 人工生态林	Be <sub>1</sub> 投菌技术
	工业用地	$A_3 + C_1/C_2 + F_2/F_4 + Be_4$	B <sub>1</sub> 采空区充填	F <sub>2</sub> 平整覆土	E <sub>2</sub> 人工湿地	Be <sub>2</sub> 农耕技术
	建设用地	$B_2 + F_2 + Be_2/Be_3$	B <sub>2</sub> 充填开采	F <sub>3</sub> 挖深垫浅	E <sub>3</sub> 灌木林修复	Be <sub>3</sub> 植物修复
	水域	$A_2 + B_1 + D_1 + F_1/F_3 + F_2 + E_2/E_4 + Be_1/Be_3$	C <sub>1</sub> 覆岩离层注浆	F <sub>4</sub> 土体压实	E <sub>4</sub> 基塘构建	Be <sub>4</sub> 土壤改良
C <sub>2</sub> 冒落矸石空隙注浆充填						
D <sub>1</sub> 含(隔)水层修复						

在修复治理模式中,需要根据土地利用目标、区域周边环境和修复治理要求,选择生态修复技术或生物修复技术。武强等<sup>[6]</sup>以大雁二矿沉陷盆地治理工程(A<sub>2</sub>+F<sub>2</sub>+E<sub>3</sub>)和邢东煤矿沉陷盆地预控工程(B<sub>1</sub>+Be<sub>2</sub>)为例,对修复治理技术的选择和模式组合进行了研究,为工程主管单位、设计单位“沉陷修复治理该用哪几种技术、如何组合”提供了工程示范。

## 2 采煤沉陷防治技术研究进展

### 2.1 消灾修复技术

#### 2.1.1 回填技术

高潜水位平原区采煤沉陷形成常年积水区和季节性积水区,鲁西南部分矿区积水深度可达 8~10m,传统的挖深垫浅技术、土地平整技术恢复耕地较少,充填复垦是提高耕地恢复率的最直接、最有效的方法。目前常用的充填复垦方法有矸石充填、引黄河泥沙充填、引湖(河)淤泥充填、粉煤灰充填等,在进行表土剥离存放后<sup>[8]</sup>,使用上述材质充填到设计标高,然后上覆剥离表土后复垦为耕地。

矸石充填复垦技术已经在兖州矿区、淮南矿区、徐州矿区等地得到了广泛应用<sup>[9-10]</sup>,利用矸石充填复垦耕地的同时解决了矿区固废堆放的环境影响问题。通过对充填煤矸石颗粒大小<sup>[11]</sup>、压实程度<sup>[12]</sup>、充填深度<sup>[13]</sup>、充填覆土厚度及农作物产量<sup>[14]</sup>、重金属影响<sup>[15]</sup>等进行研究,构建经济、适宜、安全、环保的土壤剖面,取得了良好的经济效益、社会效益和生态效益。

《济宁市采煤塌陷地治理总体规划》(2010—2020 年)首次提出引黄河泥沙充填、引湖(河)淤泥

充填复垦耕地的理念,将济宁市采煤塌陷地治理区域划分为北部引黄充填治理区、中东部生态治理区和南部沿湖湖泥充填治理区。胡振琪团队综合分析了引黄河泥沙充填复垦耕地的可行性<sup>[17]</sup>和适宜性<sup>[18]</sup>,进行了排水量预测和效益分析<sup>[19]</sup>;在济宁市梁山县、德州市齐河县进行了实验研究,提出了排走沉陷区积水并剥离治理区表土(0~20 cm)和部分心土(20~50 cm)堆积形成坝体,利用绞吸式挖沙船抽取水沙通过高压管道输送至治理区,沉淀排水后上覆剥离的心土和表土,平整后复垦为耕地的技术路线(图 1)<sup>[20]</sup>,并进一步优化为间隔条带式充填<sup>[21]</sup>;综合分析了充填治理后地形地貌景观、土壤剖面重构、土壤理化性状以及耕地地力,邱集煤矿间隔条带式充填复垦后耕地与对照耕地在同等管理情况下,产量十分接近对照耕地,覆土层达到一定厚度后,复垦耕地可以满足农作物生长,复垦当年基本达到了原耕地产量<sup>[21]</sup>。

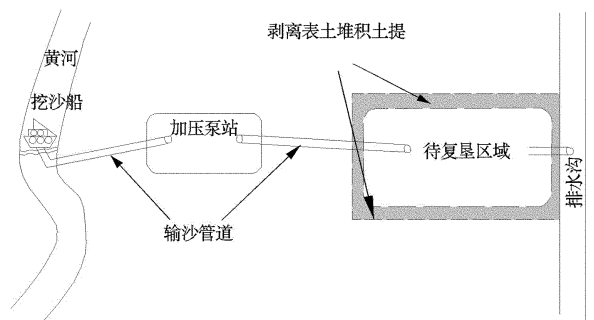


图 1 引黄河泥沙充填复垦工艺流程图  
(据胡振琪等<sup>[16]</sup>)

对于南四湖周边的采煤塌陷地,将航(河)道清淤淤泥经管道输送至沉陷区,经排水固结后,覆土平

整,并建设配套田间道路和农田水利设施,复垦为耕地,已经在大屯煤电姚桥煤矿得到了应用<sup>[22]</sup>。但是该方法也存在一定的问题,如湖(河)淤泥排水固结时间较长,多达数月甚至更长时间,且极易形成沼泽;可能会对湖(河)生态环境造成扰动,影响水生动、植物等<sup>[23]</sup>。

### 2.1.2 条带开采

条带开采是指将煤层区域划分为条带形状,采一条、留一条,留下的煤柱支撑上覆岩层的载荷,从而控制地表沉陷,保护地面建筑物和生态环境<sup>[24]</sup>。目前条带开采技术主要应用于村庄、建筑物下采煤,是村庄密集区深矿井开采的主要方式(如星村煤矿、唐口煤矿、安居煤矿等),也是老矿挖潜及延长矿井服务年限的重要手段<sup>[25]</sup>。早期条带开采研究主要集中在岩层与地表移动机理和规律、地表移动变形规律、条带煤柱稳定性、条带开采参数设计等方面<sup>[26]</sup>。近年来,条带开采煤柱长期稳定性评价<sup>[27]</sup>、多煤层条带开采参数设计及沉陷规律<sup>[28-29]</sup>等研究更加深入。条带开采回采率较低,资源损失率较大,随着充填开采技术的成熟,充填开采、充填条带开采有取代传统条带开采的趋势<sup>[30-33]</sup>。

### 2.1.3 充填技术

#### (1) 充填开采

粗放型的煤炭开采引发了资源浪费和环境破坏等一系列问题,钱鸣高等<sup>[34]</sup>提出绿色开采的理念,建立了煤矿绿色开采基础理论和技术框架。目前充填开采技术在控制地表沉降方面作用明显,并得到了广泛的应用,按照充填材料可分为矸石充填<sup>[35]</sup>、膏体充填<sup>[36]</sup>、高水材料充填<sup>[37]</sup>等。目前充填开采研究多集中于长臂工作面采充一体化、综合机械化充填采煤、充填开采岩层移动与地表沉陷测量等领域,并对充填材料进行了一系列的研究<sup>[38]</sup>。近年来超高水材料是充填开采研究的热点,冯光明等<sup>[39]</sup>研发出水体积高达97%的超高水材料,主要成分为石灰、石膏、高铝水泥、悬浮剂、速凝剂、解凝剂等,由A、B两种主料与少量复合速凝剂(AA料)和复合缓凝剂(BB料)组成,通过外加剂添配方控制初凝时间(8~90 min)和固结体抗压强度。超高水充填在临沂矿业集团田庄煤矿、邯郸矿业集团陶一煤矿的应用过程中,不断优化,研发了充填开采系统(图2),系统总结了开放式、袋式、混合式和分段阻隔式充填方式,并分析了每种充填方法的技术要点、优缺点

点和适用条件<sup>[40-43]</sup>;通过地面沉陷观测<sup>[44]</sup>、物探<sup>[45]</sup>、钻探<sup>[46]</sup>、相似材料模拟实验<sup>[47]</sup>、FLAC<sup>3D</sup>模拟<sup>[48]</sup>等方法验证了超高水材料充填效果和稳定性。

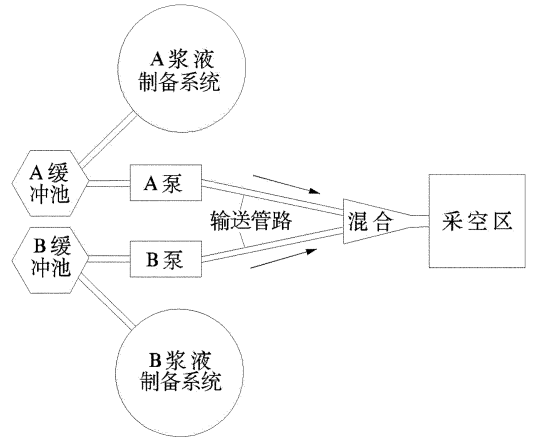


图2 超高水材料充填开采系统

(据冯光明等<sup>[39]</sup>)

#### (2) 采空区充填

采空区充填是指开采后一段时间或在已经废弃的采空区内,回填采矿废渣等物料,从而控制采空区诱发地表变形的技术<sup>[6]</sup>。与充填开采不同,采空区充填时间滞后于开采时间,且受到充填环境的限制,一般使用矸石等废渣充填。

### 2.1.4 注浆技术

#### (1) 覆岩离层注浆

覆岩离层注浆技术是指通过地面钻孔,向煤层开采后上覆岩层移动过程中形成的离层空间内注浆液,加固生产矿山煤层顶板,从而控制覆岩下沉的技术(图3)。常用的覆岩离层注浆材料有粉煤灰浆液<sup>[49]</sup>、超高水材料<sup>[50]</sup>等。主关键层理论<sup>[51]</sup>认为,主关键层是产生离层和离层充填注浆的主要控制因素,只有覆岩中存在典型主关键层,且软、硬岩相间分布,才可能形成离层空间,进而注浆减缓沉陷;同时,确定主关键层后,才能准确判断计算离层位置和空间,为注浆钻孔布设及钻探施工提供依据。覆岩离层注浆充填后,可以支撑覆岩并压实岩层,膨胀挤压围层并胶结裂隙,从而减缓地面沉陷。覆岩离层注浆充填技术已经在抚顺矿区老虎台矿、开滦矿区唐山矿、新汶矿区华丰矿、大屯矿区徐庄矿、兖州矿区东滩矿、济宁矿区济宁二号煤矿等得到了应用,并成功在高压线下、铁路下开采煤炭资源,有效减缓地面沉陷<sup>[52-54]</sup>。朱卫兵等<sup>[55]</sup>提出了覆岩离层分区隔

离注浆充填技术,离层充填后形成“离层区充填体+关键层+分区隔离煤柱”的共同承载体,地面减沉效果良好,满足绿色开采要求。

## (2) 冒落矸石空隙注浆充填

该项技术主要是通过注浆固结采空区冒落带矸石空隙,从而控制生产矿山地表变形。采空区冒落矸石具有碎胀性,体积大于原岩体积,由于空隙较大连通性好,便于注浆充填材料通过<sup>[56]</sup>。目前相关研究主要针对充填材料、充填体固结后强度、充填系统、充填后地表移动变形规律<sup>[57]</sup>。冯光明等<sup>[43]</sup>开展了超高水材料冒落矸石空隙充填研究,由于超高水材料在混合前,具有良好的流动性,便于对已经垮落的采空区充填,采空空间被充实和加固,垮矸空隙不再被压实并稳定,从而控制上覆岩层活动。

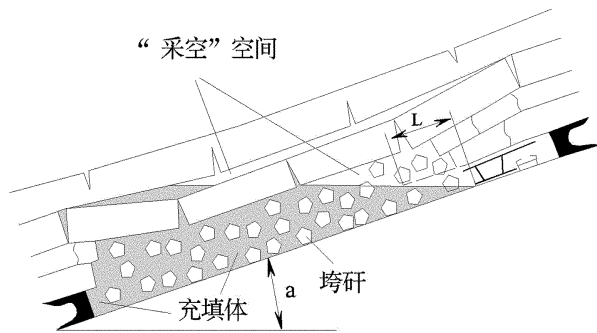


图3 超高水材料采空区充填作用机理  
(据冯光明等<sup>[43]</sup>)

### 2.1.4 含(隔)水层修复技术

煤炭开采过程中,可能导致含(隔)水层破坏,引发一系列环境负面效应,主要表现在矿井水害、地下水位下降影响供水和破坏矿区生态环境3个方面<sup>[58-59]</sup>,具体为:①矿山开采过程中人为疏干和采动裂隙对含水层的自然疏干增加矿井涌水量,产生大量排水费用,灾害性突水造成人员伤亡和财产损失;②大量疏排水导致地下水位下降,造成矿区及周围人畜饮用水和灌溉用水短缺;③采煤引起的地下水位及流场改变、地表水径流变化、水体污染等问题,生态环境遭到严重破坏。针对矿井水害问题,《煤矿防治水规定》<sup>[60]</sup>提出了矿井防治水“预测预报、有疑必探、先探后掘、先治后采”十六字原则和“防、堵、疏、排、截”五字综合防治措施。目前主要通过自修复<sup>[61]</sup>、隔水层再造<sup>[62]</sup>、水文地质条件人为干预(隔水层注浆加固改造、富水区注浆)<sup>[59]</sup>等方法进行隔水层修复。武强<sup>[63]</sup>系统分析了矿井水防治

领域的基础理论,水文地质(补充)勘探、井下水害超前探测(放)及其监测预测预警,矿井水害防治技术等最新科研进展;提出了“煤—水”双资源型矿井开发理念,消除地下水“灾害属性”,挖掘其“资源属性”,尽量避免破坏扰动与煤系同沉积的含水层结构,达到煤炭和水的“双资源”共同开发的目的,从而实现矿区生态环境保护的协调、可持续发展;区分矿区水文地质条件,系统分析了“矿井水排、供、生态环保”、“矿井地下水控制、利用、生态环保”、“矿井水控制、处理、利用、回灌与生态环保”等多位一体的优化组合模式,通过水文地质条件人为干预,减轻矿区含(隔)水层引发的地质环境问题<sup>[59]</sup>。

## 2.2 工程修复技术

沉陷盆地工程修复技术主要包括坡形修整、平整覆土、挖深垫浅、土地压实等,与土地整治技术基本类似。严金明<sup>[64]</sup>介绍了土地整治战略顶层设计、理论基础和研究现状,系统研究了土地整治资源环境效应诊断与预警、功能定位判别、选址判别、节地节水型土地整治项目规划设计、生态化土地整治设计等关键技术,并进行了具体的实证与示范;曹振环等<sup>[65]</sup>从采煤塌陷区农田整治田块的平面规划、田坎稳定性、灌排工程等角度,系统梳理了采煤塌陷区农田整治规划设计研究进展;王自威等<sup>[66]</sup>针对采煤沉陷带来的农田水利问题,提出了问题导向式的采煤塌陷地治理规划理念和规划设计方法,并从土地平整工程、农田水利工程、田间道路工程等角度对工程修复技术进行了研究,提出人与自然和谐的采煤塌陷地治理规划设计方法;李新举<sup>[67-69]</sup>建立模拟实验区,分析了煤矸石、粉煤灰、建筑垃圾充填覆土模式下不同施工机械(自卸汽车、履带式推土机等)不同碾压次数情况下的土壤颗粒组成变化,并分析了其对土壤质量的影响。

## 2.3 生态修复技术

沉陷盆地治理修复侧重于生态功能时,更多使用生态修复技术。生态修复技术主要包括人工生态林、人工湿地、灌木林修复、基塘构建等。开采沉陷积水导致原防护林遭到严重破坏,治理时统筹考虑田、水、路、林,生态效益与经济效益统一<sup>[66]</sup>。近年来,采煤塌陷地综合治理强调生态农业、生态旅游发展模式,利用严重积水采煤塌陷地建设湿地成为研究的热点之一<sup>[70-71]</sup>。湿地具有自然观光、旅游、娱

乐等美学功能,蕴含着丰富秀丽的自然风景和巨大的景观价值,同时具有污水净化、生态修复等功能。近年来,我国成功实施了一批采煤塌陷型湿地建设项目,主要有唐山南湖城市中央湿地公园<sup>[72]</sup>、济宁太平国家湿地公园<sup>[72]</sup>、徐州潘安湖国家湿地公园<sup>[73]</sup>、平顶山白鹭洲国家城市湿地公园<sup>[75]</sup>、阜阳颍上迪沟国家湿地公园<sup>[76]</sup>、淮北南湖国家城市湿地公园<sup>[77]</sup>、淮南十涧湖国家城市湿地公园等,取得了良好的经济效益、社会效益和生态效益。目前对于采煤塌陷型湿地的研究多集中于水域构建与水平衡<sup>[72]</sup>、水环境净化治理<sup>[78]</sup>、湿地植被及土壤恢复<sup>[79]</sup>、景观规划设计<sup>[80-81]</sup>等领域。通过水系连通和基底改造,打造湿地水环境,维持水平衡;将沉水植物(苦草、金鱼藻、黑藻等)、漂浮植物(大藻、水禾、浮萍等)、浮叶植物(睡莲、中华萍蓬草、芡实、粉绿狐尾藻等)、挺水植物(荷花、菖蒲、花叶芦竹、红莲子草等)、湿生植物(玉带草、芦苇、水松、垂柳等)合理搭配,配合仿自然型堤坝工程、人工浮岛工程、景观小品建设工程等,构建姿态多样、色彩丰富、错落有致、层次分明、环境优美、生态环保的园林景观<sup>[82]</sup>,同时兼具水质净化、生物多样性保护等功能<sup>[83]</sup>,实现居民增收、矿地和谐,让矿区群众“望得见田,看得见水,记得住乡愁”。

## 2.4 生物修复技术

沉陷盆地治理修复目标为农业用地时,更多使用生物修复技术,主要包括投菌技术、农耕技术、植物修复、土壤改良等。目前投菌技术多应用于污染土壤修复,微生物具有极强的分解能力,理论上可以分解自然界中存在的所有化合物,为生物修复提供了广阔的发展空间<sup>[84]</sup>,由于微生物具有易繁殖、代谢快、适应性强等特性,是污染修复的极佳材料,目前已经在无机污染物修复<sup>[85]</sup>、有机污染物修复<sup>[86]</sup>中得到了广泛的应用,并取得了良好的效果。采用浅翻深松、增施有机肥、食用菌废料改良<sup>[87]</sup>等措施,改善土壤物理性状和养分状况,优化土壤水、肥、气、热之间的相互关系<sup>[64]</sup>;种植有根瘤和茎瘤的一年生豆科植物可以起到良好的固氮作用<sup>[88-89]</sup>,秸秆还田有利于改善土壤肥力。

## 3 高潜水位平原区采煤沉陷防治技术展望

用“矿地一体化”理念统筹资源开发和采煤塌

陷地综合治理。统筹考虑地下煤炭资源开采和地上城市建设等因素,采用协调开采、充填开采等技术手段,控制地面沉陷;采用“矿井地下水控制、利用、生态环保”三位一体模式,减轻对地下含水层的扰动和破坏,做到矿井水综合利用和生态环保;深入研究煤炭地下气化开采、热解开采、生物溶解开采等化学开采技术,改变传统采煤工艺,实现地下无人、地面无煤、产品流态,达到开采零死亡、供能零排放、环境零损害的绿色、安全、清洁利用境界<sup>[90-91]</sup>;充分利用关停矿井地下空间,进行地下生态城市建设<sup>[92]</sup>、深地高落差型抽水蓄能<sup>[93]</sup>、地下农业种植、地下医疗疗养<sup>[94]</sup>等,实现关停矿井的资源化利用、立体式开发和全面转型升级。

采煤塌陷地复垦、生态环境修复、湿地景观开发、城市和工业园区建设(地、环、景、城)四位一体的采煤塌陷地综合治理模式。借助国家振兴老工业基地、资源型城市转型升级和新旧动能转换的良好机遇,推进“地、环、景、城”四位一体的采煤塌陷地综合治理,通过生态环境修复、湿地景观开发、土地复垦和生态农业,打造环境优美、生态宜居的绿色空间,将采煤塌陷地棕地变公园<sup>[95-96]</sup>,对周边地价带来溢出效应<sup>[97-98]</sup>,实现“地、环、景、城”四位一体整治<sup>[99]</sup>,典范有唐山南湖、河南永城、徐州潘安湖、淮北南湖等,实现了经济效益、社会效益、生态效益的最大化。

运用3S、大数据、云平台技术实现采煤塌陷地动态监测监管。与土地利用现状变更不同,地面沉陷是在垂向空间发生变化,综合运用InSAR,GNSS测量等先进技术进行沉陷监测,适时更新数据;将矿山企业、煤炭管理部门、国土资源管理部门等海量多元异构数据整合,运用3S、大数据、云平台技术,建立集地图管理、业务管理、动态监测、预测分析、决策支持等功能于一体的采煤塌陷地动态监测监管系统,促进采煤塌陷地治理管理系统化、网络化、科学化<sup>[100]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 武强,刘伏昌,李锋.矿山环境理论与实践[M].北京:地质出版社,2005:1-100.
- [2] 赵博,李爱军,刘术明.昭阳煤矿矿山地质环境影响评估及监测建议[J].山东国土资源,2017,33(5):35-41.
- [3] 隋建红.山东省黄河北煤炭矿区地表沉陷预测与综合治理研究

- [J].山东国土资源,2017,33(3):59-63.
- [4] 孔凡柱.滕县煤矿区矿山地质环境综合评价研究[J].山东国土资源,2017,33(1):59-64.
- [5] 柴华彬,邹友峰.煤炭开采对粮食安全的影响及其对策[J].中国安全科学学报,2006,16(11):129-133.
- [6] 武强,刘宏磊,陈奇,等.矿山环境修复治理模式理论与实践[J].煤炭学报,2017,42(5):1085-1092.
- [7] 武强,陈奇.矿山环境治理模式及其适用性分析[J].水文地质工程地质,2010,37(6):91-96.
- [8] 肖武,王培俊,王新静,等.基于GIS的高潜水位煤矿区边采边复表土剥离策略[J].中国矿业,2014,23(4):97-100.
- [9] 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.
- [10] 高晓云,陈萍.淮南塌陷区煤矸石充填复垦的碳减排效益[J].中国煤炭,2012,38(9):121-124.
- [11] 徐良骥,黄臻,李青青,等.煤矸石粒径结构对充填复垦重构土壤理化性质及农作物生理生态性质的影响[J].生态环境学报,2016,25(1):141-148.
- [12] 鲁叶江.压实处理对矸石充填复垦土壤水分的影响[J].煤炭科学技术,2010,38(11):125-128.
- [13] 李正军.煤矸石深埋充填采煤塌陷区复垦造地技术研究[J].煤炭科技,2017(2):42-46.
- [14] 郭友红,李树志,鲁叶江.塌陷区矸石充填复垦耕地覆土厚度的研究[J].矿山测量,2008(2):59-61.
- [15] 董霁红,卞正富,于敏,等.矿区充填复垦土壤重金属分布特征研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(3):335-341.
- [16] 胡振琪,王培俊,邵芳.引黄河泥沙充填复垦采煤沉陷地技术的试验研究[J].农业工程学报,2015,31(3):288-295.
- [17] 王培俊,胡振琪,邵芳,等.黄河泥沙作为采煤沉陷地充填复垦材料的可行性分析[J].煤炭学报,2014,39(6):1133-1139.
- [18] 许涛,赵艳玲,肖武,等.引黄河泥沙充填复垦采煤沉陷地区域适用性评价—以济宁市为例[J].中国农业大学学报,2017,22(2):106-114.
- [19] 朱琦,胡振琪,王培俊,等.济宁市采煤沉陷地引黄充填泥沙排水量预测及利用效益分析[J].金属矿山,2016(11):63-68.
- [20] 胡振琪,王培俊,邵芳.引黄河泥沙充填复垦采煤沉陷地技术的试验研究[J].农业工程学报,2015,31(3):288-295.
- [21] 胡振琪,邵芳,多玲花,等.黄河泥沙间隔条带式充填采煤沉陷地复垦技术及实践[J].煤炭学报,2017,42(3):557-566.
- [22] 邹朝阳,时洪超,孙国庆.湖泥充填技术在采煤塌陷区复垦中的应用[J].中国煤炭,2009,35(12):105-106.
- [23] 张欣,付尚伟,蔡德水,等.济宁市采煤塌陷地引湖充填复垦模式初探[J].山东国土资源,2012,28(8):41-43.
- [24] 陈军涛,曹廷峰,尹英文.唐口煤矿条带开采及煤柱稳定性规律研究[J].矿业研究与开发,2012,32(4):15-17.
- [25] 郭俊廷,管力,杨国柱,等.煤矿开采减损技术评述[J].中国矿业,2017,26(S1):333-337.
- [26] 郭文兵,邓喀中,邹友峰.我国条带开采的研究现状与主要问题[J].煤炭科学技术,2004(8):7-11.
- [27] 于洋,邓喀中,范洪冬.条带开采煤柱长期稳定性评价及煤柱设计方法[J].煤炭学报,2017,42(12):3089-3095.
- [28] 王冰,郭广礼,朱峻晓,等.多煤层开采条带错动程度对岩层控制的影响[J].金属矿山,2015(11):153-157.
- [29] 方新秋,邹永沼,程远伟,等.建筑物下深部煤层二次条带开采研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(2):223-230.
- [30] 陈绍杰,范洪冬,谭志祥,等.多煤层条带开采地表移动预测参数分析[J].煤炭工程,2010(12):64-67.
- [31] 张兆江,张涛,张安兵,等.超高水材料充填条带开采地表沉陷规律研究[J].煤炭工程,2016,48(7):97-99+103.
- [32] 张琪,刘辉,翟树纯,等.建筑物下充填条带开采方案设计及其效果评价[J].金属矿山,2017(10):105-109.
- [33] 孙奎奎,王苇.高水材料充填置换开采承压水上条带煤柱的理论研究[J].煤炭学报,2011,36(6):909-913.
- [34] 钱鸣高,缪协兴,许家林.资源与环境协调(绿色)开采[J].煤炭学报,2007,32(1):1-7.
- [35] 张吉雄.矸石直接充填综采岩层移动控制及其应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2008:35-50.
- [36] 赵才智.煤矿新型膏体充填材料性能及其应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2008:26-50.
- [37] 冯光明.超高水充填材料及其充填开采技术研究与应用[D].徐州:中国矿业大学,2009:38-66.
- [38] 缪协兴,巨峰,黄艳利,等.充填采煤理论与技术的新进展及展望[J].中国矿业大学学报,2015,44(3):391-399.
- [39] 冯光明,孙春东,王成真,等.超高水材料采空区充填方法研究[J].煤炭学报,2010,35(12):1963-1968.
- [40] 冯光明,贾凯军,李凤凯,等.超高水材料开放式充填开采覆岩控制研究[J].中国矿业大学学报,2011,40(6):841-845.
- [41] 郭楠楠,冯光明,孙红卫,等.超高水材料分段开放式充填开采研究[J].金属矿山,2012(3):19-22.
- [42] 冯光明,王成真,李凤凯,等.超高水材料开放式充填开采研究[J].采矿与安全工程学报,2010,27(4):453-457.
- [43] 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.
- [44] 娄高中,郭文兵.薄煤层超高水充填开采与地表沉陷研究[J].中国安全科学学报,2015,25(4):110-115.
- [45] 张永超,贾新果,陈凯.瞬变电磁法探测超高水材料注浆治理采空区效果[J].煤炭科学技术,2017,45(3):174-178.
- [46] 彭永良,胡卸文,宋大各,等.大型复杂采空区注浆效果检测方法研究[J].工程地质学报,2013,21(4):664-671.
- [47] 贾凯军,冯光明,李华健,等.薄煤层超高水材料充填开采相似模拟试验研究[J].煤炭学报,2013,38(S2):267-271.
- [48] 连小林,冯光明,韩晓东,等.超高水材料开放式充填 FLAC3D 数值模拟应用研究[J].煤矿开采,2011,16(1):4-6.
- [49] 苏仲杰.粉煤灰充填高层空间物理力学机理实验研究[J].煤炭学报,2001(1):22-25.
- [50] 王成真,冯光明.超高水材料覆岩离层及冒落裂隙带注浆充填技术[J].煤炭科学技术,2011,39(3):32-35.
- [51] 陈超,胡振琪.关键层理论在开采沉陷中的应用现状与进展[J].矿业科学学报,2017,2(3):209-218.
- [52] 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

- 究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S1):3249-3255.
- [53] 黄旭.唐山矿铁路煤柱覆岩离层注浆减沉开采方案分析[J].煤炭科学技术,2009,37(2):25-28.
- [54] 刘文生.覆岩离层注浆充填保护地面高压线路试验研究[J].煤炭学报,2001(3):236-239.
- [55] 朱卫兵,许家林,赖文奇,等.覆岩离层分区隔离注浆充填减沉技术的理论研究[J].煤炭学报,2007(5):458-462.
- [56] 王建党,刘天泉.冒落矸石空隙注浆胶结充填减沉技术的可行性研究[J].煤矿开采,2001(1):44-45.
- [57] 李兴尚,许家林.条带间垮落区注浆充填覆岩移动规律研究[J].采矿与安全工程学报,2009,26(3):284-287.
- [58] 孙文洁.煤矿开发对水环境破坏机理和评价及修复治理模式[D].北京:中国矿业大学(北京),2012:27-40.
- [59] 武强,申建军,王洋.“煤-水”双资源型矿井开采技术方法与工程应用[J].煤炭学报,2017,42(1):8-16.
- [60] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿防治水规定[S].北京:煤炭工业出版社,2009.
- [61] 陈正华,姚光华,唐清敏.岩溶山区倾斜煤层开采条件含水层再造方法研究[J].中国矿业,2016,25(4):98-102.
- [62] 李文平,王启庆,李小琴.隔水层再造-西北保水采煤关键隔水层N2红土工程地质研究[J].煤炭学报,2017,42(1):88-97.
- [63] 武强.我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J].煤炭学报,2014,39(5):795-805.
- [64] 严金明.土地整治规划设计研究[M].北京:科学出版社,2016.
- [65] 曹振环,王金满,刘鹏,等.采煤塌陷区农田整治规划设计技术的研究进展[J].江西农业大学学报,2016,38(4):782-791.
- [66] 王自威,吴克宁,赵华甫,等.高潜水位采煤塌陷区农田整理设计方法和实证研究[J].安徽农业科学,2012,40(11):6912-6915+6936.
- [67] 刘宁,李新举,郭斌,等.机械压实过程中复垦土壤紧实度影响因素的模拟分析[J].农业工程学报,2014,30(1):183-190.
- [68] 张雯雯,闵祥宇,孙晓明,等.不同施工机械碾压下矿区复垦土壤物理性质的变化[J].山东国土资源,2017,33(3):64-72.
- [69] 孙纪杰,李新举,李海燕,等.煤矿塌陷区不同复垦材料土壤压实机理的研究[J].煤炭学报,2013,38(12):2215-2220.
- [70] 常江,于硕,冯姗姗.中国采煤塌陷型湿地研究进展[J].煤炭工程,2017,49(4):125-128.
- [71] 付艳华,胡振琪,肖武,等.高潜水位煤矿区采煤沉陷湿地及其生态治理[J].湿地科学,2016,14(5):671-676.
- [72] 鲁叶江,李树志.近郊采煤沉陷积水区人工湿地构建技术——以唐山南湖湿地建设为例[J].金属矿山,2015(4):56-60.
- [73] 王萍,王慧,孙小银,等.采煤塌陷地动态演变及对土地利用的影响——以太平国家湿地公园为例[J].国土与自然资源研究,2017(5):39-43.
- [74] 王克.江苏徐州贾汪区拾田增绿,因水成湖,再造生态环境看煤矿塌陷区如何变成城市后花园[J].中国经济周刊,2015(47):60-61.
- [75] 刘小平.平顶山市采煤塌陷区治理建设的思考[J].河南林业科技,2014,34(1):53-54.
- [76] 王云飞,李东和,于祥远,等.旅游业促进煤矿塌陷区治理的模式研究——以安徽省颍上县迪沟镇为例[J].资源开发与市场,2009,25(10):928-931.
- [77] 王立龙.淮北煤矿塌陷区湿地生态环境营建及旅游产品开发[J].湿地科学与管理,2015,11(2):20-22.
- [78] 李勇,潘立勇,杨靖.浅谈潘安湖湿地公园水质保护对策研究[J].环境科学与管理,2013,38(8):98-100.
- [79] 邢豪,唐树平,张翠英,等.采煤塌陷区人工湿地水生植物作用分析——以徐州市九里湖人工湿地为例[J].湿地科学与管理,2013,9(1):57-59.
- [80] 邱汉周,金晓玲,胡希军.淮南市十涧湖国家城市湿地公园规划建设与利用[J].安徽农业科学,2009,37(12):5764-5766.
- [81] 渠俊峰,李钢,张绍良.基于平原高潜水位采煤塌陷土地复垦的人工湿地规划——以徐州市九里人工湿地规划为例[J].节水灌溉,2008(3):27-30.
- [82] 吴玲.湿地植物与景观[M].北京:中国林业出版社,2010.
- [83] 张乔勇,袁兴中,刁元彬,等.山东济宁采煤塌陷区新生湿地鸟类群落及多样性研究[J].野生动物学报,2017,38(3):447-454.
- [84] 刘志培,刘双江.我国污染土壤生物修复技术的发展及现状[J].生物工程学报,2015,31(6):901-916.
- [85] 罗辉,宋易春,冯秀娟.重金属污染土壤的生物修复技术研究进展[J].安徽农业科学,2015,43(5):224-227.
- [86] 周际海,袁颖红,朱志保,等.土壤有机污染物生物修复技术研究进展[J].生态环境学报,2015,24(2):343-351.
- [87] 刘宝勇.食用菌废料在矿区复垦土壤改良中的应用试验研究[J].露天采矿技术,2007(1):64-66.
- [88] 魏远,顾红波,薛亮,等.矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展[J].中国水土保持科学,2012,10(2):107-114.
- [89] 杨勤学,赵冰清,郭东罡.中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展[J].生态学杂志,2015,34(4):1152-1157.
- [90] 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.
- [91] 葛世荣.深部煤炭化学开采技术[J].中国矿业大学学报,2017,46(4):679-691.
- [92] 谢和平.矿区地下建设宜居城市是煤矿高端转型的办法[J].中国战略新兴产业,2017(13):95.
- [93] 谢和平,侯正猛,高峰,等.煤矿井下抽水蓄能发电新技术:原理、现状及展望[J].煤炭学报,2015,40(05):965-972.
- [94] 谢和平,高明忠,高峰,等.关停矿井转型升级战略构想与关键技术[J].煤炭学报,2017,42(6):1355-1365.
- [95] 戴红军,白林,孙涛,等.资源城市棕地生态治理综合效益评价——以淮南市大通采煤塌陷区为例[J].资源开发与市场,2014,30(12):1489-1493.
- [96] 沈瑾,赵铁政.棕地与绿色空间网络——唐山南湖采煤塌陷区空间再利用[J].建筑学报,2006(8):28-30.
- [97] 王曦,付梅臣,储佩佩,等.唐山市南湖采煤塌陷区地价空间规律研究[J].中国矿业,2017,26(1):135-140.
- [98] 王来健,张绍良,尹鹏程,等.采煤沉陷湖人工湿地对周边土地价格的溢出效应研究——以徐州市九里湖湿地为例[J].地理科学,2017,37(8):1234-1242.

[99] 张伟,张文新,蔡安宁,等.煤炭城市采煤塌陷地整治与城市发展的关系——以唐山市为例[J].中国土地科学,2013,27(12):73-79.

[100] 曹永锋.协同开发环境中采煤塌陷地动态监测监管系统设计与实现[J].山东国土资源,2018,34(2):70-74.

## Research Progress on Prevention and Control Technology of Coal – mining Induced Subsidence in Plain Area with Higher Underground Water

BO Huaizhi<sup>1,2</sup>

(1.No.3 Hydrogeology and Engineering Geology Brigade of Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources, Shandong Yanzhou 272100, China; 2. Comprehensive Treatment Research Center in Subsidence Region Induced by Coal Mining of Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources, Shandong Yanzhou 272100, China)

**Abstract:** In the grain – coal superimposed area with higher underground water, coal – mining – induced subsidence has caused destruction of large area of farmland and deterioration of ecological environment. Thus, summarizing the prevention and control technology of coal – mining – induced subsidence is necessary. In this paper, research progress on the most frequently used reparation techniques and patterns for coal – mining – induced subsidence has been introduced; and present condition and achievements of reparation technology of disaster elimination, engineering, ecology, and creatures have been comprehensively summarized. The future development trends of prevention and control for coal – mining – induced subsidence will be overall planned for resource exploitation and comprehensive treatment for coal – mining – induced subsidence on the basis of “mining – farming integration”, comprehensive treatment patterns containing “land reclamation, environmental restoration, landscape development, and city construction” for coal – mining – induced subsidence, monitoring and supervision coal – mining – induced subsidence dynamically by using the technology of 3S, big data, and cloud platforms.

**Key words:** Coal – mining induced subsidence; control and reparation; present condition of research; progress