

晋陕蒙接壤区大型煤炭基地 地下水保护利用与生态修复

顾大钊 等 著



科学出版社

国家科技支撑计划资助项目：2012BAC10B03

晋陕蒙接壤区大型煤炭基地 地下水保护利用与生态修复

顾大钊 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书面向我国西部生态脆弱区煤炭资源可持续开发,在总结以往研究与实践成果基础上,以大型煤炭基地的地下水和地表生态为系统,采用先进的综合探测技术与试验方法,研究了煤炭现代开采地下水和地表生态系统响应及保护关键技术,揭示了煤炭开采“三类地下水”(地表土壤水、第四系孔隙水、基岩裂隙水)的运移规律,分析了地表水、地下水和矿井水的转化关系,建立了水资源优化利用调控模型,提出了地表生态损伤控制、裂缝分类治理、植物筛选配置、菌根修复、土壤改良与保水等关键技术,并通过典型生态立地条件下煤炭现代开采地下水保护利用和地表生态修复关键技术试验,形成了大型煤炭基地地下水保护利用与地表生态修复模式和关键技术。

本书可作为矿业学科、水利学科、环境学科的科研人员,高校教师和相关专业的高年级本科生和研究生,以及从事能源规划管理、水利工程、环境工程和煤炭开采水资源保护利用工程技术人员的参考书籍,尤其对西部煤炭现代开采地下水保护利用和地表生态修复具有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

晋陕蒙接壤区大型煤炭基地地下水保护利用与生态修复 / 顾大钊等著.
—北京:科学出版社,2015.3

ISBN 978-7-03-043732-7

I. ①晋… II. ①顾… III. ①煤炭基地-地下水保护-研究-中国②煤炭基地-地下水利用-研究-中国 IV. ①P641.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 049831 号

责任编辑:王 运 / 责任校对:韩 杨

责任印制:肖 兴 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京威通印刷股份有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 3 月第一次印刷 印张:26 1/2

字数:630 000

定价:238.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书作者名单

顾大钊 张建民 杨俊哲 卞正富

靳德武 邹冠贵 贺 晓 包玉英

王创业 贺安民 雷少刚 毕银丽

赵春虎 李全生 张 凯 曹志国

前 言

煤炭是我国的主体能源，我国从“十二五”开始，逐步形成山西、西南、鄂尔多斯盆地、蒙东、新疆五大国家综合能源基地。以鄂尔多斯盆地为基础的晋陕蒙接壤区，神东和陕北等大型煤炭基地建设稳步推进，在我国未来能源保障中具有举足轻重的地位。然而，煤炭大规模开采对地下水的破坏和地表的生态损伤，加剧了西部生态脆弱区水资源短缺和地表生态脆弱性。随着大型煤炭基地持续开发和相关煤基产业的发展，加强煤炭开采地下水资源和地表生态保护，建立良好的地下水循环和地表生态系统，是煤炭绿色开采的核心内容，是煤炭开采科技创新的重要任务，是西部生态脆弱区大型煤炭基地可持续开发的基础。

西部生态脆弱区地下水保护利用和生态修复是煤炭现代开采（煤炭规模化、高效和高回收率开采，称为“煤炭现代开采”）中需要解决的重大理论和实践问题。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》将西部典型生态脆弱区矿产开发的地下水和地表生态的系统监测、退化生态系统恢复与重建等，列为“生态脆弱区域生态系统功能恢复重建”优先主题，重点解决生态脆弱煤矿区地下水保护与利用、生态修复等关键技术。为此，我国众多专家学者开展了大量的研究与实践，钱鸣高院士首先提出的绿色开采技术体系体现了在煤炭安全高效、资源节约、绿色和谐开发方面的主要思想和研究成果。然而，大型煤炭基地地下水和地表生态保护是一个系统工程，涉及煤炭现代开采全过程（采前、采中、采后）和多要素（地质、开采、含水层、土壤、植物、生物等），特别是在西部大型煤炭基地，煤炭现代开采面临的水资源短缺和生态脆弱问题尤为突出。开采减损、土壤改良、植物修复、根际微生物改良等成为地表生态修复的关键，而不同生态立地条件与开采相适应的地表生态修复模式是提升生态修复效率的重要途径。

本书以晋陕蒙接壤区为研究对象，依托典型大型煤炭基地——神东矿区，针对煤炭资源大规模开采产生的地下水破坏和地表生态损伤问题，系统研究了煤炭现代开采对地下水和地表生态的影响规律，从煤炭开采全过程探索地下水资源保护利用、地表生态减损和修复方法，开发了煤炭现代开采沉降区的生态修复模式和关键技术，形成了适用于西部生态脆弱区典型立地条件（黄土沟壑区和风积沙区）煤炭现代开采生态修复技术体系与模式，对于提高大型煤炭基地的水资源保护利用能力与地表生态修复水平具有参考和借鉴意义。

本书系统论述了大型煤炭基地地下水保护利用和地表生态修复的研究成果。本书的创新体现在：一是突破传统的生态修复思路，基于水是生命之源和生态之基的理念，提出了以“三类地下水”（地表土壤水、第四系孔隙水和基岩裂隙水）为核心，以采动覆岩及含水性、地表土壤及含水性、植被及根际环境为研究路径；二是从大型煤炭基地、井田、开采工作面、开采裂缝等多尺度，以开采对植被影响为重点，揭示了煤炭开采对地表的影响规律；三是针对现代开采全过程，开展了煤层开采、采动覆岩、沉陷地表层、土壤与植物

及根际环境的多层次同步探测研究, 获得了煤炭现代开采对地下水和地表生态影响的系统认识, 建立了黄土沟壑区和风积沙区煤炭现代开采与地表生态响应的基本关系; 四是借鉴前人第四系含水层的大量研究成果, 重点研究基岩裂隙水和地表土壤水, 探索开采对地表土壤保水和地下水的“聚集”作用, 开发了煤矿地下水库保护利用矿井水技术; 五是建立了适应于西部生态脆弱区黄土沟壑和风积沙地貌的煤炭现代开采生态修复技术体系与模式; 六是基于风积沙区植被根际环境特点, 将内外生菌修复方法相结合, 提出了植物根系修复促进技术。本书研究成果进一步完善了西部生态脆弱区大型煤炭基地地下水保护利用和沉陷区生态修复技术, 对大型煤炭基地提高地下水和地表生态保护效果和推进大型煤炭基地的绿色开发具有重要指导作用。

本书是神华集团有限责任公司组织中国矿业大学、中国矿业大学(北京)、中煤科工集团西安研究院、神华神东煤炭集团有限责任公司、内蒙古大学、内蒙古农业大学、内蒙古科技大学等单位共同完成的国家科技支撑计划项目“晋陕蒙接壤区煤炭基地生态建设关键技术与示范”(2012BAC10B03)成果的系统总结, 是集体智慧的结晶, 项目主要完成人还包括刘辉、孟庆俊、牟守国、熊集兵、邓喀中、张延旭、朱国维、聂俊丽、胡振琪、杜文凤、杨峰、姬亚东、曹海东、刘峰、何渊、杨建、赵宝峰、贺安民、李能考、王义、陈苏社、何瑞敏、郭洋楠、卓卉、南清安、于瑞雪、张勇、徐道龙、牛天心、李秀芳、刘哲荣、包丽颖、贺一鸣、王瑞国等。课题实施过程中也参考和借鉴了众多学者的研究和实践成果, 还得到了科技部社会发展科技司、中国 21 世纪议程管理中心、国土资源卫星应用中心、神华地质勘查有限责任公司等单位的大力支持, 在此一并表示衷心的感谢。

作 者

2014 年 12 月

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外相关研究与实践现状	4
1.3 大型煤炭基地地下水与地表生态保护	11
第2章 晋陕蒙接壤区煤炭基地生态环境条件	14
2.1 晋陕蒙接壤区煤炭基地生产条件	14
2.2 神东矿区生态环境条件	25
2.3 神东矿区煤炭现代开采对地下水和地表生态的主要影响	28
2.4 矿区生态环境建设现状	29
第3章 晋陕蒙接壤区煤矿区生态环境(植被)演变	31
3.1 晋陕蒙接壤区所处流域植被覆盖时空演变规律	31
3.2 神东矿区植被监测及其演变规律	37
3.3 矿井开采区与非开采区植被对比分析	43
3.4 开采工作面地表生态扰动分析	51
第4章 神东矿区地下水资源及承载力	59
4.1 神东矿区核心区“三水”主要参数及水化学研究	59
4.2 神东矿区水资源及煤炭现代开采影响分析	68
4.3 神东矿区煤炭开发的水资源承载力研究	73
4.4 煤炭现代开采区域地下水影响模拟研究	83
第5章 大型煤炭基地水资源优化利用与调控方法	93
5.1 矿井水及资源化方法研究	93
5.2 矿井水资源化利用途径优化分析	96
5.3 水资源优化配置多目标规划利用与调控研究	108
第6章 煤炭现代开采对地下水和地表生态的影响	126
6.1 煤炭现代开采覆岩和地表层结构及含水性变化	126
6.2 黄土沟壑区煤炭现代开采沉陷区裂隙发育规律研究	139
6.3 风积沙区煤炭现代开采对土壤环境的影响研究	161
第7章 煤炭现代开采对植被及植物的影响	169
7.1 研究与测定方法	169
7.2 开采对地表天然植物群落组成及盖度的影响	174
7.3 开采对植物群落结构及多样性的影响	178

7.4	开采对植物有性繁殖特性的影响	191
第8章	煤炭现代开采沉陷损伤控制技术	207
8.1	煤炭现代开采沉陷规律模拟研究方法	207
8.2	典型生态立地和煤层赋存条件下的开采沉陷规律	221
8.3	煤炭现代开采沉陷减损工艺优化	245
第9章	黄土沟壑区煤炭现代开采沉陷区生态修复关键技术	261
9.1	开采地裂缝差异化治理技术	261
9.2	煤炭现代开采沉陷区土壤保水与改良技术	272
9.3	煤炭现代开采沉陷区适生植物筛选与种植技术	290
9.4	开采沉陷区农田耕作技术	301
第10章	风积沙区煤炭现代开采沉陷区植物生长促进技术	308
10.1	研究与分析方法	308
10.2	开采对土壤性质及微生物多样性的影响规律	312
10.3	接种丛枝菌根对典型植物生长及环境的影响	330
10.4	接种外生菌根剂对典型植物生长的促进作用	343
10.5	基于微生物的植物生长促进和修复方法	347
第11章	黄土沟壑区煤炭现代开采与生态和谐共生技术示范	351
11.1	生态重建示范区概况	351
11.2	生态修复工程总体布局与设计	356
11.3	生态修复示范工程实施	373
11.4	示范区生态修复效果评价	378
第12章	风积沙区煤炭现代开采环境引导型生态修复技术示范	386
12.1	示范区基本情况	386
12.2	生态修复工程方案设计	390
12.3	生态修复工程实施	397
12.4	生态修复效果评价	398
	主要参考文献	406

第1章 绪 论

煤炭现代开采地下水资源保护利用和地表生态修复是我国煤炭科学开发面临的重大难题,该问题在我国西部生态脆弱区域尤为突出。大型煤炭基地是我国煤炭开发的主战场,晋陕蒙接壤区是我国大型煤炭基地的集中区,生态脆弱是该区域煤炭科学开发的主要制约因素。如何立足晋陕蒙接壤区大型煤炭基地的煤炭赋存和生态条件,将煤炭安全高效开采与地下水保护利用及地表生态保护相结合,突破传统的技术思路,开展黄土沟壑区和风积沙区生态立地条件下的地下水保护利用和地表生态修复关键技术与示范,对推进我国大型煤炭基地的科学开发具有重要意义。

1.1 研究背景及意义

晋陕蒙接壤区是我国西部生态脆弱区大型煤炭基地的集中区,地下水保护利用和地表生态修复是大型煤炭基地可持续发展的基本要求。典型生态立地条件下地下水保护利用和地表生态修复技术研发与工程示范,将为西部生态脆弱区大型煤炭基地科学开发提供技术支撑。

1.1.1 研究背景

晋陕蒙接壤区是我国现代化煤矿的集聚区,煤炭现代开采与生态脆弱的矛盾是制约该区域煤炭科学开发的关键问题。

1. 煤炭科学开发是我国经济社会协调发展的必然要求

煤炭是我国的主体能源,在国民经济发展中一直具有重要的战略地位。根据我国《能源发展战略行动计划(2014—2020)》,2020年煤炭在我国一次能源中仍将占62%。

煤炭开采的生态负效应对地下水和地表生态造成影响是煤炭开发面临的突出问题。我国每采1t煤平均产生约2t矿井水,目前年产生矿井水约80亿t,矿井水利用率仅为25%左右,使得每年损失的矿井水量达60亿t(谢克昌,2014;谢和平、王金华,2014)。同时,煤炭开采对地表生态的影响亟待解决。据统计,我国因采煤导致土地破坏和退化的面积超过300万 hm^2 ,土地复垦率不足30%。

国家十分重视大型能源基地建设的生态环境保护问题,相继颁布了一系列的规划和政策,包括:《国务院关于促进煤炭工业健康发展的若干意见》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》、《煤炭行业十二五规划》、《矿山生态环境保护与污染防治技术政策》等。

2. 大型煤炭基地地下水和地表生态保护是煤炭科学开发的重要基础

大型能源基地是我国煤炭开发的主战场,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》提出:从“十二五”开始,我国将逐步形成山西、鄂尔多斯盆地、西南和蒙东、新疆五大国家综合能源基地,建设安全高效煤矿,推进煤炭资源整合和煤矿企业兼并重组,发展大型煤炭企业集团。《规划》还明确要加快陕北、黄陇、神东、蒙东、宁东等大型煤炭基地建设,稳步推进晋北、晋东、云贵大型煤炭基地建设,启动新疆煤炭基地建设。

晋陕蒙宁甘地区是我国大型煤炭基地的聚集地,该地区 2013 年煤炭产量占全国的 71%,表明西部已成为我国煤炭的主产区。但该地区水资源短缺和地表生态脆弱的客观条件已严重制约煤炭的可持续开发。

3. 晋陕蒙接壤区煤炭现代开采地下水保护利用和地表生态修复问题尤为突出

晋陕蒙接壤区域是典型的生态脆弱区,该区域煤炭资源储量大、煤层埋藏较浅、地质条件和水文条件相对简单,开发条件好。作为我国煤炭资源开发的重点区域,已建成我国生产规模大、安全高效矿井集中、机械化水平高的煤炭生产集中区域。其中,神东矿区已成为拥有 14 个千万吨矿井的世界唯一的 2 亿吨级矿区。由于晋陕蒙接壤区地处干旱半干旱地区和沙漠边缘,地貌破碎、植被稀疏、水资源匮乏,煤炭资源大规模开采产生的地表生态退化和地下水系统破坏,加剧了地下水资源短缺和地表生态脆弱。

4. 晋陕蒙接壤区亟待建立煤炭现代开采的地下水保护利用和地表生态修复新模式

晋陕蒙接壤区是山西省、陕西省和内蒙古自治区接壤地带,位于鄂尔多斯高原东南部及陕北黄土高原北缘和毛乌素沙漠的东南边缘。黄土高原区内沟壑纵横,形成梁峁、沟壑和土塬三种地貌,侵蚀活跃,水土流失严重。毛乌素沙漠的东南边缘区内散布着大小不等的沙滩地,不少为继续流动沙及半固定沙所覆盖,一般沙层厚为几米到十几米,有的地方厚达几十米。而在黄土高原区—毛乌素沙漠过渡区,地形相对平缓开阔,区内土地贫瘠,水土流失严重,土地沙化尚未完全控制,黄土沟壑与风积沙两种生态立地特征显著。

由于该区煤炭资源丰富,开采条件简单,特别适宜于煤炭规模化开采。近年来,以安全、高效、高回收率为特点的煤炭现代开采大幅度提升了煤炭产量,但也加剧了大规模高效率开采与地下水保护利用及地表生态修复的矛盾。因此,针对西部生态脆弱区的黄土沟壑与风积沙地貌两种典型生态立地条件,探索煤炭现代开采过程中地下水保护利用与生态修复模式,对西部生态脆弱区煤炭科学开发具有重要意义。

1.1.2 研究意义

晋陕蒙接壤区煤炭现代开采地下水保护利用及生态修复技术与示范是在我国西部生态脆弱区,将煤炭开采、地下水保护利用和生态修复相结合,通过系统研究,建立适应于西部生态脆弱区典型立地条件的地下水保护利用与生态修复模式,支撑我国西部生态脆

弱区大型煤炭基地的科学开发。

1. 提高地下水资源保护利用水平是缓解大型煤炭基地水资源短缺矛盾的重要途径

地下水资源是煤炭现代开采中影响最直接的生态环境要素,也是修复地表生态系统的重要资源。煤炭现代开采形成大范围的导水裂隙带,导通第四系含水层和基岩裂隙含水层,形成了大量矿井水。长期以来,为保障生产安全,矿井水通常外排地表,由于西部生态脆弱区地表蒸发量大,矿井水外排后很快蒸发损失,这是西部生态脆弱区煤炭开采地下水损失的主要原因。

因此,针对西部生态脆弱区大型煤炭基地的地下水资源特点,研究煤炭开采三类地下水(地表土壤水、第四系孔隙水、基岩裂隙水)的运移规律,建立有效的煤炭现代开采地下水保护利用模式,提高大型煤炭基地的地下水资源保护利用水平,对缓解西部大型煤炭基地水资源短缺矛盾具有重大意义。

2. 建立煤炭现代开采生态修复模式是大型煤炭基地生态系统恢复重建的关键

煤炭现代开采以安全高效高回收率为特征,是我国未来大型煤炭基地煤炭开发的主要方式。与传统的煤炭开采方式相比,现代开采对地表生态影响范围大,但地表沉陷稳定时间短。因此,采用传统的土地复垦方式难以实现现代开采条件下地表生态的快速修复。根据西部大型煤炭基地地表生态的特点,研究不同立地条件下现代开采对采动覆岩、地下水系统、地表生态的影响规律,建立有效的现代开采生态修复模式,对实现大型煤炭基地可持续开发具有重要意义。

3. 煤炭现代开采生态减损是煤炭科学开采的重要内容

煤炭现代开采是应用现代化管理系统,进行规模化高强度连续生产的过程。如神东矿区普遍采用的超大工作面(顾大钊,2013b)开采工艺,工作面长度达到300m以上,推进距离超过4000m,推进速度达到15m/d。

煤炭现代开采对地下水和地表生态的影响程度(或损伤程度)与煤炭开采条件及开采工艺方法密切相关。煤炭现代开采对地下水和地表生态的影响,可分为采前、采中、采后状态。针对大型煤炭基地的煤炭资源赋存特点,研究不同开采工艺参数下的开采影响程度,优化开采工艺与方法,最大限度地减少煤炭现代开采对地下水系统和地表生态的损伤程度,对西部大型煤炭基地可持续开发具有重大意义。

4. 生态修复技术是提高西部大型煤炭基地生态修复效率的重要支撑

我国每年煤炭开采沉陷区的治理面积不足开采影响面积的30%。与东部地区相比,西部生态脆弱区的地表生态自我维持及持续恢复能力差,煤炭开采作用下的生态承载能力低。

根据煤炭现代开采对地表生态影响的特点,针对西部大型煤炭基地的煤炭赋存和地表生态约束特点,进一步研究煤炭现代开采对地表生态的影响途径和方式、生态脆弱性及生态承载力的关系、生态修复技术的作用程度和采后自然作用力等问题,突破生态修复关键

技术,寻求自然作用与人类作用的最佳结合,积极探索现代开采条件下低成本、高效率和高效益的地表生态保护和修复途径,对提高地表生态修复效率具有重要意义。

1.2 国内外相关研究与实践现状

煤炭开采对地下水和地表生态影响是人们长期关注的问题,特别是进入 21 世纪,生态环境问题对社会发展的影响日趋严重,使得人们对煤炭资源大规模开发带来的生态环境问题更加关注,推动了该领域的研究与实践。

1.2.1 煤炭开采地表沉陷规律与控制

煤炭开采形成采动覆岩导水裂隙和地表沉陷,改变了地下水赋存环境和地表层结构,也改变了地下水循环和地表植物生长条件。

在开采沉陷规律研究方面,国外较早的有比利时的“垂线理论”、Gonot 的“法线理论”、Jicinsky 的“二等分线理论”、哥尔哈的“自然斜面理论”、Fayol 的“圆拱理论”、Hausse 的“分带理论”等。进入 20 世纪以后,Halbaum 提出了悬臂梁模型,即将采空区上方岩层看作悬臂梁,由此推导出地表应变与曲率半径成反比;Korten 由实测数据总结出水平移动与变形的分布规律;Fckardt 视岩层移动过程为各岩层的逐层弯曲;Lehmann 认为地表沉陷类似一个褶皱过程。Schmitz、Keinhorst、Bals 等人提出和发展了开采沉陷影响分布的几何理论;原苏联学者阿维尔申、柯洛特科夫、柯尔宾科夫以及卡查柯夫斯基等先后采用弹性力学、塑性力学及地表移动观测等方法建立了岩层移动的“三带理论”。

英国、德国、土耳其、原苏联等国家的学者,在山区地表移动和采动坡体的稳定性研究中,初步掌握了边坡破坏的基本规律及治理技术(Peng, 1989; Bahuguna, 1991),采用数值模拟(Watson, 2004)、神经网络元(Singh et al., 2008)等方法研究了采动引起的山体滑坡机理及规律。如 Donnelly 等通过对 Pennines 滑坡与 South Wales 滑坡的分析对比,得出软弱夹层降低了边坡的稳定性,并提出了山体滑坡具有蠕变特性(Donnelly et al., 2002); Ghose (2004)、Greco (1996)、Homoud (1999) 等利用断裂力学和塑性力学理论研究了采动滑坡力学机理;Chamine 和 Bravo (2003)、Luo 和 Peng (1999) 等应用计算机模拟技术研究了采动斜坡体的动态变形计算模型。此外,英国曾进行过山区地表移动的相似材料模拟实验研究,美国设置了山区地表移动观测站,但少有山区地表移动理论方面的研究(Bauer, 1966; Nova, 2006)。

我国在地表沉陷规律方面研究较早,具有代表性的研究成果包括:钱鸣高的“砌体梁理论”和“关键层理论”(钱鸣高等, 1996, 2000, 2003);何国清的地表下沉盆地剖面的偏态表达式“威布尔分布”(何国清等, 1982);李增琪的基于“层梁板的弯曲理论”岩层与地表移动模式(李增琪, 1982);杨伦的岩层二次压缩模型(杨伦、于光明, 1987);张玉卓的岩层移动位错模型(张玉卓等, 1987);宋振琪的传递岩梁假说(宋振琪, 1988);邓喀中的岩体开采沉陷结构效应(邓喀中, 1998);吴立新、王金庄的条带开采覆岩破坏的托板模型(吴立新、王金庄, 1994);黄庆享的浅埋煤层“砌体梁模型”和

“台阶岩梁模型”(黄庆享, 2000); 吴侃等的采空区上覆岩层移动破坏动态力学模型(吴侃等, 2000)等。

我国在开采裂缝研究方面也取得了一系列的研究成果(何万龙等, 1991; 汤伏全、梁明, 1995; 余学义等, 2003; 惠东旭等, 2003; Tang, 2009), 特别是加强了西部矿区采动岩层破断及地裂缝灾害的研究(任伟中等, 2005; 黄森林等, 2006)。其中, 在西部生态脆弱区研究发现了地表高角度裂缝和台阶下沉等现象(孙洪星, 2008; 康建荣, 2008)。基于现场观测数据, 分析了采动裂缝发育的四个阶段及形成机制, 模拟研究了厚砂土层条件下的地表裂缝发育规律, 建立了厚砂土层“拱梁”和“弧形岩柱”结构模型(黄庆享等, 2009); 采用托板理论研究了厚松散层厚坚硬岩层条件下开采地裂缝形成机理影响主要因素, 提出了基岩松散层厚度比、基岩采高比、开采方法与采空区处理方法(刘智等, 2011); 朱国宏等提出了采动裂缝时间拥挤效应和采动延迟效应表征指标及采动空间拥挤效应表征指标(朱国宏、连达军, 2012)。在采动地裂缝的发育规律方面, 王来贵等模拟研究了不同覆岩强度、不同开采范围、不同深度条件下的地表沉陷及地裂缝, 得到了地裂缝方向大致与工作面推进方向垂直、覆岩强度越小越容易形成裂缝、开采范围越大地裂缝越多、开采深度越小越容易形成裂缝的结论(王来贵等, 2001); 刘栋林等通过 UDEC 数值模拟, 分析了工作面上坡和下坡开采时山体裂缝的差异, 得到了下坡开采时裂缝发育较大, 易形成推动型逆裂缝的结论(刘栋林等, 2012)。

为提高沉陷规律分析准确性, 目前已经形成的地表移动变形预测方法包括四种类型(Knothe, 1952, 1994; Kulakov, 1995; Rafeal and Javier, 2000; 宋世杰, 2013): ①经验公式法, 如负指数函数法、英国煤田法、Kowalczyk 的积分格网法; ②剖面函数法, 如 Donez 剖面函数、原苏联柯尔宾柯夫剖面函数、负指数函数法、双曲线函数法、典型曲线法等; ③影响函数法, 如 Knothe 时间函数; ④理论模型法, 如 King 和 Whetton 提出的岩体移动弹性分析法、Berry 提出的各向同性岩层的二维分析法、Berry 和 Sales 提出的横观各向同性岩层弹性分析法、Marshall 和 Astin 提出的粘-弹性分析法、Cherry 提出的岩层移动塑性分析法等。谢和平等应用 FLAC 模拟了煤矿开采现场地质条件下沉陷规律, 证明了数值分析方法的可靠性(谢和平等, 1999)。

开采沉陷预测技术方面, 将传统的地表位移观测与近年来应用的 GPS、InSAR 等技术相结合, 提高了监测效率和周期, 基本掌握了平原、丘陵矿区正常地质采矿条件下的开采沉陷规律, 形成了以影响函数法、剖面函数法为代表的开采沉陷预测方法和预测参数, 基本能满足平原、丘陵矿区开采沉陷预测的工程要求。

开采沉陷研究方面, 国内外研究认为开采地质条件和开采工艺是影响和控制沉陷的基本因素。如关键层学说认为煤系上覆岩层中的厚硬岩层(关键层)对开采沉陷具有极其重要的控制作用, 其破坏、断裂以及断裂后形成的结构形式会对采场覆岩的岩层活动产生重大影响。研究发现, 采深越小, 地表移动与变形值较大, 且随着采深增大, 地表移动和变形逐渐减小, 但地表影响范围却增大, 下沉系数减小; 断层会造成地表移动范围扩大, 断层露头处出现非连续破坏形态; 开采工艺是影响沉陷规律的控制因素, 包括开采方法、顶板管理方法、工作面几何尺寸等是影响沉陷状态的主要参数。研究表明, 垮落带和断裂带高度随开采高度成一定比例增大, 地表移动变形也随之增大; 实践证明, 开采方法和顶板

管理方法是影响围岩应力变化、岩层移动及覆岩破坏的主要因素,开采方法决定了覆岩及地表移动形式和方向,顶板管理方法决定了覆岩及地表破坏程度、移动量,对下沉系数及其他岩移参数的影响差别很大;工作面几何尺寸与形态影响着覆岩及地表沉陷形式和破坏程度。

近年来,采用数值模拟方法(FLAC, ANSYS, UDEC)进一步研究开采沉陷与各种地质和工艺因素的关系。研究了厚煤层长壁开采的岩层移动变形过程和地表形态特征(王安等, 1999);工作面回采和矸石充填过程(王家臣等, 2000);大倾角煤层开采的岩层移动和压力分布及地表沉陷基本规律(尹光志等, 2001);综放开采情况下顶煤与顶板的变形和破坏过程与采场三维应力分布和顶煤破裂规律(陈忠辉等, 2002);不同开采方案岩体移动的基本特征和地表沉陷的相关参数(高明中、余忠林, 2003);倾斜煤层开采时岩体移动的基本特征及地表沉陷的相关参数(张荣亮等, 2006);急倾斜特厚煤层开采围岩破坏及地表变形规律和破坏特征(郭春颖等, 2010);不同开采条件下采深、采宽和采深采高比等对采动覆岩和地表的影响(王鹏, 2010);开采沉陷引起的黄土层附加应力与变形的基本特征(汤伏全等, 2011)等。

煤炭现代开采具有开采工作面大和推进速度快特征。现代开采不仅减少了开采沉陷时间和二次采动沉陷影响,且采动沉陷均匀面积显著增加。研究表明,均匀沉降面积越大,采动时间越短,则开采导水裂隙带高度相对越小和沉陷对地表生态的损伤越小(顾大钊, 2013b)。因此,深入研究现代开采对采动覆岩和地表层结构的影响规律具有重要的意义。

1.2.2 煤炭开采对地下水的影响

煤炭开采形成的采动覆岩裂隙带导通地表水和地下水,改变了地下水自然结构状态和系统循环状态,破坏了含水层。为了减小对含水层的影响和破坏,相关研究主要集中在开采对地下水力场的影响规律和如何控制导水裂隙带高度等方面。如美国的 Bontad 研究露天煤矿在开采前、开采中及复垦后的地表水文影响,Booth 和 Cartwright 等研究了美国伊利诺依州煤炭井工开采和露天开采造成的地下水流场的影响。在水体下采煤起步较早,提出的采动导水裂隙的预测方法主要有统计学方法、突变论方法和开采诱发水文地质条件变化的耦合模型等;尔哈西的“自然斜面理论”,Fayol 的“圆拱理论”,豪斯的“分带理论”,Halbaum 的悬臂梁结构;Eckardt 把岩层移动过程视为各岩层逐渐弯曲;西德学者克拉茨总结概括了煤矿开采沉陷的预测方法。

针对海下采煤,英国、德国、加拿大、日本、原苏联、智利、美国 and 澳大利亚等国家,为确保安全开采,都制定了严格的探放水和防水害防治措施,制定了相关的安全规程,研究提出了开采可行性的判定依据、开采方法、安全采深等。如德国采用全面开采法对大部分采空区进行了充填,成功地在莱茵河下进行了煤层群(开采四层煤)的开采;澳大利亚在 20 世纪初实现了悉尼港下 884m 深煤层的开采,还进行了房柱式湖下开采和水库下开采实践;原苏联在水体下采煤也积累了丰富的经验,1981 年颁布了有关水体下开采的规程,根据覆岩中黏土层厚度、煤厚、重复采动等条件的变化来确定安全采深,但这些规定与规程大多是依据统计经验而得,现场试验成果较少。

国内早已注意到煤炭开发对含水层及水资源的破坏,部分学者通过抽放水试验、同位素示踪等方法,对陕北煤矿区、太行山东麓煤矿区、太原煤矿区、华东煤矿区的地下水动态进行了研究,分析了煤炭开采与地下水位下降、泉水断流、区域水循环改变的关系。近年来,我国从水资源保护利用的角度加强了煤炭开采对地下水系统影响研究,特别是针对西部地区侏罗纪煤田开采导致萨拉乌苏组松散含水层地下水严重渗流问题,研究提出了生态水位、保水采煤等研究成果。李文平等(2000)根据开采地质条件提出了砂基型、砂土基型、土基型、基岩型及烧变岩型五类水资源保护性开采的工程地质条件。钱鸣高等提出了“绿色开采”(钱鸣高等,2007)和“科学采矿”(钱鸣高,2010);缪协兴等(2009)以岩层控制的“关键层理论”为基础,提出了“保水开采隔水关键层的概念”;黄庆享、师本强、刘洋、侯忠杰等研究了浅埋煤层开采矿山压力显现规律、条带开采技术参数、保水采煤方法、固液耦合和导水裂隙发育(张杰、侯忠杰,2006;师本强、侯忠杰,2006;刘洋等,2006;黄庆享,2010)等。此外,王双明等(2010)研究认为合理生态地下水位埋深为1.5~5.0m。

在地下水资源保护利用方面,顾大钊等以神东矿区现代开采为例,研究了超大工作面开采对水资源循环系统的影响。研究表明,开采改变了地表水与地下水的转化关系,加速了大气降水和地表水的入渗速度,并减少了蒸发量,矿井排水使水循环复杂化(顾大钊、张建民,2012)。同时,开采形成的导水裂隙带导致地下水流场径流、排泄条件发生变化,使含水层原始相对静态循环转变到以渗流—渗漏形式沿水平和垂直方向运移,改变了流场的方向和流量,导致原始地下水位下降,大量排放地下水也破坏了矿区原始的水环境。为保护矿井水资源,开发了煤矿地下水库技术,包括水库规划与选址、建设、运行、水质控制和安全保障等,实质是对开采形成的采空区加以改造形成地下储水空间(地下水库),将同一水平、不同水平,甚至矿区的多个煤矿地下水库通过人工通道连通,根据采煤生产接续计划,对矿井水进行分时分区储存,实现矿井水的保护利用,形成煤矿分布式多层地下水库群,实现矿井水不外排及长期安全储存利用的目标(顾大钊,2013a)。万伟锋等提出在适宜的水文工程地质条件下建设地下截渗工程形成地下水库,在陕北流水壕实现地下水资源调储(万伟锋等,2008)。

在矿区地下水资源化利用方面,国外研究起步早于我国,国外煤矿企业将水资源作为煤炭的伴生资源进行开发,美国煤矿地质条件相对简单,矿井排水供水结合思路较为单一。欧洲作为现代采矿业的发源地,排水设备设计制造走在世界前列,但目前其采矿业已经衰落,大量已经废弃和关闭矿井的水位恢复和排泄,对区域地下水环境带来许多负面影响,虽然强调水资源环境功能保护,但其研究主要集中在矿井水处理和废弃矿井水排泄对环境影响及治理上。澳大利亚、印度、南非等煤矿地质和水文地质条件相对简单,更多地集中在矿井水的利用和露天采坑积水湖的治理和利用。德国和法国等采用大流量深井潜水泵预先疏降含水层水位的办法代替矿井被动排水。俄罗斯将矿井水处理后用于生活、电厂、防尘、消防、水力充填和水力采煤等方面。我国矿区水资源化大致经历了矿井排水、水资源利用和生态保护阶段。在西部生态脆弱区,矿井水资源利用尤为重要。神东矿区大柳塔煤矿、补连塔煤矿等采用煤矿地下水库技术,将矿井水资源综合循环利用,大幅度提高了矿井水资源利用率,实现了矿井水资源化利用。近年来,为解决大型煤炭基地地下水

资源短缺问题,构建了水资源优化配置模型,形成了系统分析与模拟、多目标、多层次规划、群决策等方法。

我国大型煤炭基地地下水资源保护及资源化利用研究非常活跃,但成果分散,尤其针对西部特大型煤炭基地的水资源保护还需要进行系统研究,亟待探索一条大规模、高效率 and 低成本的技术途径。目前,为加强干旱缺水矿区大型煤炭基地的地下水资源保护利用,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》把“矿产资源高效开发利用”方向列为优先发展主题,要求提高水资源和矿产资源综合利用率。《国家能源发展十二五规划》要求积极推广水资源保护利用技术,并将“我国西部生态脆弱区煤炭科学规模开发与水资源保护”列为科技重点支持方向。我国西部煤炭资源开发正在由安全高效开采向安全高效绿色开采转变,表明我国已将煤炭开采地下水资源保护利用提升到战略高度。

1.2.3 煤炭开采对地表生态的影响

自20世纪90年代以来,国内外学者针对煤炭开发引发的生态环境问题展开多方面、多层次的研究和系统实践,主要集中在开采影响规律、土壤修复技术、植物优化配置和生物修复等方面,在我国神东矿区、淮南矿区、开滦矿区等大型煤炭基地建设中开展了系统的生态环境保护与恢复实践,积累了大量的成果和经验。

在开采沉陷对地表生态的影响方面,白中科和赵景奎(2000)研究发现,采煤过程对生态环境的影响主要体现在对矿区土地资源和植被资源破坏等方面;亓培珍等(2005)对采煤区的生态环境等问题进行研究,并在解决问题的方法和效果评价两个方面取得了较为丰富的成果;张新等(2000)利用信息科学技术手段对矿区的环境进行调查;张发旺等(2003)研究发现,因采煤造成土体下沉和增加土壤密实程度,造成农作物的减产;何金军等(2007)研究表明,采煤沉陷减小了土壤总孔隙度,导致土壤表面积减小和养分从土壤表层渗漏、流失到深层,降低抗蚀强度和保水保肥能力,不利于植物生长和恢复;匡文龙和邓义芳(2007)研究发现,采煤沉陷改变了土壤结构、含水量及孔隙性,还改变了原土壤剖面各土壤层组合和土壤水分的运移;白中科等(2006)用GIS、RS技术对采煤沉陷区土地研究发现,采煤使土壤年侵蚀量逐渐增加,导致土壤侵蚀强度提高,裂缝、滑坡或塌方破坏了土壤原始结构层次,降低了土地利用效率;臧荫桐等(2010)研究发现,采煤造成的土体松动会降低土壤容重,减小土壤剖面耕作层厚,影响了原有土壤质量,同时还能造成土壤透气透水能力和土壤抗侵蚀强度的降低;张丽娟等(2007)对采煤沉陷区土壤研究表明,沉陷会造成土壤养分的缺失,土壤氮、磷等养分损失较为严重;黄铭洪和路永明(2003)发现土壤养分如有机质、氮和磷等严重缺失,影响农作物生长发育;吕喻忠(2006)研究发现,沉陷区土壤中的水解性有机氮可转化为易流失的无机态氮,硝态氮能从土壤表层流向深层;Turner和Hayarth(2000)研究发现,沉陷区土壤中磷元素可通过淋溶作用进入,由表层土壤流向深层土壤,造成土壤磷元素损失。

关于开采沉陷对地表植被影响研究,程冬兵等(2006)研究认为,植被作为生态系统中重要的物质循环和能量流动中枢,其组成、分布和演替等方面的特征能够直接反映生态环境状况;赵国平等(2010)研究表明,干旱半干旱风沙区采煤沉陷区,植被长势和沉陷

强度之间呈负相关,沉陷强度越小,植被长势越好,反之长势不良;植被死亡率和沉陷强度成正相关,沉陷强度减小,死亡率下降,反之死亡率上升。

沉陷区生态恢复和治理研究与实践方面,国外起步较早,不同国家依据本国国情和科技水平,对生态恢复研究各有侧重。20世纪30年代,美国就开始了矿业生态的治理研究,并在1977年颁布《露天采矿管理与恢复(复垦)法》。近几年来,美国高度重视采矿区生态环境和生物复垦研究,为提高土地复垦技术水平和效果,建立了国家矿山土地复垦研究治理中心。澳大利亚和新西兰等侧重草原管理、恢复及治理,主要通过改良土壤和提高植被盖度,促使生物群落恢复。德国则侧重露天煤矿生态恢复和环境污染防治等问题的研究,颁布法令确保采后露天矿的生态恢复。原苏联及其解体后的不同国家也都制定并颁布了相应法律法规,以确保露天煤矿区的生态恢复治理。

我国从20世纪50年代起,开始对采煤沉陷区生态环境恢复治理的研究,初期主要针对土地退化问题。20世纪80年代开始从小规模、分散状态逐渐向大规模的恢复治理转变。我国在1988年、1989年分别颁布《土地复垦规定》和《中华人民共和国环境保护法》,标志着我国采煤沉陷区治理工作走上法制化的道路。20世纪90年代以来,相关研究渐渐增多。宋书巧等认为,采煤沉陷区生态环境恢复治理措施重点是对耕作区土壤基质进行改良和提高植被覆盖度(宋书巧、周永章,2001);束文圣、李永庚等认为煤炭开采区生态恢复应加强生态治理技术和土壤基质改良研究(束文圣等,2002;李永庚、蒋高明,2004)。

沉陷区造林技术和土壤改良技术方面,早在20世纪20年代,德国就开始对煤矿区土壤改良进行调查研究。德国的土壤改良调查和研究有以下四个阶段:第一阶段是从1920年到1945年,这一阶段主要进行试验性植树和造林的研究;第二阶段始于1946年,随着社会经济发展,煤炭和土地需求量增加,政府颁布了法律法规来保护生态环境;第三阶段始于20世纪60年代初,矿区的恢复治理开始由林业复垦向农林综合复垦转变;第四阶段开始于东西德合并,随着生态保护意识增强,重构生态系统的要求再次被提上日程。原苏联的土壤改良主要包括恢复被破坏的土地肥力和绿化造林,尽量利用自然条件来建造人工林区。20世纪70年代,日本学者宫胁昭根据植被演替论,在适当改造土壤的基础上,采用当地树种来进行营养钵育苗实验,在短期内建立起能适应当地气候条件的顶极群落类型,并且收到比较好的生态效益,因此这项研究被人称为“宫胁法”。Hilty 和 Merenlender (2000)在研究煤矿沉陷区废弃地时发现,土壤组成物质易遭受侵蚀和分散,而改善该沉陷区土壤化学性质常采用化学改良剂的方法。Gaynor (1990)在研究退化草地生态系统恢复的时候发现,因地制宜地采取松土和耕翻等措施能改善土壤结构;此外,合理放牧也能有效促进植被恢复。Li (2000)研究发现,采煤矿区土壤的有机质、氮、磷和钾的含量较低,甚至还会有极端的酸碱性,可依据土壤性质的差异并结合矿区条件,给土壤添加有机物和无机物,或对土壤接种菌根、施用有机肥等也能改良土壤结构性。Grant 等(2002)研究了澳大利亚的新南威尔士土地地区废弃矿山中的13个植物物种的恢复适宜性。

我国在沉陷区造林树种选择和土壤改良方面开展了许多研究。依据生态学原理,物种多样性是使生态系统稳定的基础,使用像乔灌木相结合的模式进行沉陷区植被恢复,能够建立持续性和稳定性均比单一物种效果好的植物群落。张树礼等(2011)以对土壤养分和