



辽宁科协资助

LIAONING KEXIE ZIZHU

辽宁省优秀自然科学著作

● 吕刚 范俊岗 代军 主编

矿山废弃地土壤侵蚀 与植被恢复研究

Study on Soil Erosion and
Vegetation Restoration of Abandoned Mines



 辽宁科学技术出版社
LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

辽宁省优秀自然科学著作

矿山废弃地土壤侵蚀与 植被恢复研究

吕 刚 范俊岗 代 军 主编

辽宁科学技术出版社

沈 阳

主 编 吕 刚 范俊岗 代 军
副 主 编 王 凯 魏忠平 淑 敏 李海燕
参编人员 (以姓名首字笔画为序)

于世河 王 晶 王玉涛 王东升 王道涵
刘 平 刘 峰 刘红民 孙继军 吴 杨
吴 昊 周志权 高 军 高英旭

图书在版编目(CIP)数据

矿山废弃地土壤侵蚀与植被恢复研究 / 吕刚, 范俊岗, 代军主编. —沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2015.2
(辽宁省优秀自然科学著作)
ISBN 978-7-5381-8999-5

I. ①矿… II. ①吕… ②范… ③代… III. ①矿山—土壤侵蚀—研究 ②矿山—植被—恢复—研究
IV. ①S157 ②S731.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第006053号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路29号 邮编: 110003)

印 刷 者: 沈阳旭日印刷有限公司

经 销 者: 各地新华书店

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 12.25

字 数: 260千字

印 数: 1~1000

出版时间: 2015年2月第1版

印刷时间: 2015年2月第1次印刷

责任编辑: 李伟民

特邀编辑: 王奉安

封面设计: 嵘 嵘

责任校对: 徐 跃

书 号: ISBN 978-7-5381-8999-5

定 价: 36.00元

联系电话: 024-23284526

邮购热线: 024-23284502

<http://www.lnkj.com.cn>

前 言

矿山废弃地是指矿山开采过程中,露天采矿场、排土场、尾矿厂、塌陷区以及受重金属污染而失去经济利用价值的土地。其存在不仅破坏了周边景观,也污染了环境。因其剧烈扰动地表土壤和地下岩层,改变了原有水文、地质、地貌条件,极大地影响了水文循环条件,污染了水环境,破坏了当地的水循环系统,与原地貌条件下的水土流失在侵蚀程度和方式上存在着明显的区别,形成一种典型的人为加速侵蚀。

土壤侵蚀是一个世界性的生态问题,是目前全球瞩目的环境问题之一,人为加速侵蚀是土壤侵蚀研究中的关键内容,排土场和矸石山则是工矿建设区人为加速侵蚀最为严重的区域。煤矸石中有害物质如Cu, Zn, Pb, Cd等元素均高于地壳丰度值。不同微量元素由于其对水作用的性能不同,对土壤的影响也不同。另外,排土场土壤是由不同地层、不同年代的岩石经风化而成,并且有些地方还没有风化或者是半风化状态,也含有大量的对植物有害的重金属离子,并且缺少植物所需的氮、磷、钾等元素和有机质,给排土场的生态恢复带来了极大的困难。而且,一经下雨,排土场和矸石山淋溶水会进入地下水系统,可能造成地下水重金属污染,危害人体健康。因此,摸清矿山废弃地的土壤侵蚀机制与植被恢复对土壤的改良效应,是关系地方经济发展、社会稳定和居民健康的重大任务。本书正是在这样一种环境及社会背景下写就的,并以辽宁省阜新市为例,对矿山废弃地土壤侵蚀与植被恢复进行研究。

随着工矿区水土保持、土地复垦、恢复生态学和地理信息系统技术的发展,近年来,针对我国大型露天矿开展了一系列的土地复垦与生态重建方面的研究。本书是在国家自然科学基金“干旱胁迫下科尔沁沙地主要防护林树种CNP化学计量特征及其影响机制(31400613)”、辽宁省农业攻关计划“辽西北困难立地优良适生树种筛选及造林关键技术与示范(2011207004)”、中国煤炭工业协会计划指导项目“露天煤矿排土场边坡土壤抗冲性空间变异性研究(MTKJ2011-317)”、“排土场土体大孔隙特征及其对坡面产流的影响(MTKJ2010-310)”的资助下,作者系统总结以上研究成果的基础上完成的。

全书共分11章,主要内容及编写人员如下:第1章《绪论》,由吕刚、范俊岗、代军、淑敏执笔;第2章《矿山废弃地岩石风化与土壤特征研究》,由王东升、刘红民、孙继军执笔;第3章《矿山废弃地土壤侵蚀特征研究》,由吕刚、代军、魏忠平、李海燕执笔;第4章《矿山废弃地土壤抗冲性研究》,由吕刚、李海燕、吴杨执笔;第5章

《矿山废弃地土壤大孔隙特征研究》，由吕刚、魏忠平、于世河执笔；第6章《矿山废弃地土壤优先流研究》，由吕刚、王晶、王道涵、刘峰执笔；第7章《排土场边坡植被恢复规律及其环境解释》，由王凯、代军、刘平、高军执笔；第8章《排土场边坡植物多样性与生产力特征及关系》，由王凯、代军、吴昊、周志权执笔；第9章《排土场边坡土壤团聚体组成和稳定性特征》，由王凯、王玉涛、淑敏、周志权执笔；第10章《排土场边坡土壤质量评价》，由王凯、刘红民、高英旭执笔；第11章《矿物肥料在矿山废弃地复垦中应用对比研究》，由吕刚、范俊岗、代军执笔；全书由吕刚、范俊岗、代军统稿审定。黄龙、李建明、李叶鑫在研究资料的收集过程中做了大量工作，辽宁省林业科学研究院顾宇书教授和辽宁工程技术大学刘向峰教授对本书提出了指导性意见。在此一并感谢！

由于时间较短，作者水平所限，书中难免出现不妥之处，恳请广大读者批评指正。

吕 刚

2014年5月

目 录

1 绪论	001
1.1 研究背景	001
1.2 研究目的和意义	002
1.3 国内外研究进展	003
1.4 研究区概况	021
1.5 试验区概况	024
2 矿山废弃地岩石风化与土壤特征研究	025
2.1 研究内容与研究方法	025
2.2 海州露天矿排土场基质组成与特征研究	025
2.3 新邱露天矿排土场岩石风化特征研究	030
2.4 孙家湾矸石山土壤性质分析	034
3 矿山废弃地土壤侵蚀特征研究	045
3.1 研究内容与研究方法	045
3.2 孙家湾矸石山与海州露天矿排土场侵蚀特征对比分析	046
3.3 自然山体沟蚀演变概述	049
3.4 孙家湾矸石山沟蚀演变分析	049
4 矿山废弃地土壤抗冲性研究	053
4.1 研究内容与研究方法	053
4.2 孙家湾矸石山土壤抗冲性分析	055
4.3 矸石山与排土场、自然山体土壤抗冲性比较分析	059
4.4 海州露天矿排土场边坡土壤抗冲性空间变异性研究	060

5	矿山废弃地土壤大孔隙特征研究	080
5.1	研究内容与研究方法	080
5.2	排土场土壤物理性质分析	082
5.3	排土场土壤水分穿透曲线特征	085
5.4	排土场土壤大孔隙特征分析	095
6	矿山废弃地土壤优先流研究	098
6.1	研究内容与研究方法	098
6.2	土壤优先流特征分析	099
6.3	排土场土壤优先流形成机理	108
7	排土场边坡植被恢复规律及其环境解释	117
7.1	研究内容与研究方法	117
7.2	排土场植物群落组成	118
7.3	双向指示种法分类及植被恢复规律	122
7.4	去趋势典范对应分析排序及其环境解释	124
8	排土场边坡植物多样性与生产力特征及关系	127
8.1	研究内容与研究方法	127
8.2	排土场边坡植物多样性特征	129
8.3	排土场边坡植物生产力特征	132
8.4	排土场边坡植物种类组成数量	133
8.5	排土场边坡植物群落多样性与生产力的关系	134
9	排土场边坡土壤团聚体组成和稳定性特征	136
9.1	研究内容与研究方法	136
9.2	排土场边坡土壤机械稳定性团聚体组成	138
9.3	排土场边坡土壤水稳性团聚体组成	139
9.4	排土场边坡土壤稳定性特征	140
9.5	排土场边坡土壤团聚体分形维数与稳定性的关系	142
10	排土场边坡土壤质量评价	144
10.1	研究内容与研究方法	144
10.2	排土场边坡土壤物理性状	146
10.3	排土场边坡土壤化学性状	149

10.4	排土场边坡土壤生物学性状	152
10.5	排土场边坡土壤质量综合指数	154
11	矿物肥料在矿山废弃地复垦中应用对比研究	156
11.1	研究内容与研究方法	156
11.2	矿物肥料分析	157
11.3	矿物肥料对矿山废弃地土壤理化性质的改良效应	165
11.4	不同矿物肥料对矿山废弃地土壤入渗的影响	170
11.5	矿物肥料对矿山废弃地玉米生产及产量的影响	174
	参考文献	179

1 绪论

1.1 研究背景

国际能源署 (IEA) 2010 年 11 月发布的《世界能源展望 2010》报告中指出, 1980—2008 年间, 世界 GDP 平均增长 1%, 对主要能源的需求增长 0.59%, 表现出经济发展是能源需求的主要驱动力, 而且所占比重相对较大。煤炭作为主要能源, 到 2035 年需求量将达到 75 亿 t, 增长近 60%, 而全球煤炭可采储量达 48 400 亿 t 标准煤, 完全可以满足世界经济发展日益增长对煤炭需求不断增加的需要。我国矿产资源总值占世界矿产资源总值的 12%, 我国现有国营矿山企业 8 000 多个, 个体矿山达到 23 万多个。

在矿产资源的开发利用过程中, 矿产开采过程中的剥离表土、开采的岩石碎块和低品位矿石堆积而成的废石堆积地, 地下开采的地面塌陷以及煤矸石的地表堆放和土地占压, 矿体采完后留下的采空区和塌陷区, 开采出的矿石经选出精矿后产生的尾矿堆积形成的尾矿废弃地, 采矿作业面、机械设施、矿山辅助建筑物和道路交通等先占用后废弃的土地总称为矿山废弃地 (如矸石山、排土场), 废弃地是一种极端裸地, 极易产生剧烈的水土流失。

土壤侵蚀是一个世界性的生态问题, 是目前全球瞩目的环境问题之一, 人为加速侵蚀是土壤侵蚀研究中的关键内容。矿山水土流失是一种典型的人为加速侵蚀, 存在着明显不同于原地貌的侵蚀特征; 井工开采会引起地表塌陷, 使地表变形, 坡度加大, 侵蚀加重, 对地下水水质也造成污染。露天开采排出的大量松散堆积物, 破坏了地表的植被资源, 同时地表塌陷或排土场堆置, 占用大量土地, 改变了原有的地形地貌, 地表严重压实和非均匀沉降, 促使径流大量汇集, 为水土流失人为地创造了条件, 引起崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害, 同时增加了入河泥沙量, 造成河道淤积, 行洪困难。矿山水土流失的产生, 人为因素占主要作用, 也有自然因素作用, 是区域自然条件和不合理的社会经济活动相互作用的结果。能否发生和加剧水土流失, 取决于降雨、地形、土壤、植被等区域概况。另外, 由于矿山的开发、新迁入人口增加环境容量承载力, 加剧了水土流失的发生。据统计, 我国矿山破坏土地累计面积达 288 万 hm^2 , 并且每年以大约 4.67 万 hm^2 的速度增长。其中煤矿采矿最为严重, 仅大、中型煤矿就占用土地达 162 万 hm^2 。在铁矿方面, 我国目前铁矿产量已达上亿吨, 其中露天采矿量占 90%, 年剥离岩土量达 2 亿吨以上。有色金属工业每年排放固体废物达 6 000 万 t, 累计堆存量已达 10 亿 t, 占用土地 7 万 hm^2 。目前, 我国人均耕地面积仅有 0.084 hm^2 , 而国际规定耕地减少的危险

点是人均 0.053 hm^2 ，如按目前“人增地减”的趋势发展下去，后果不堪设想。根据安太堡露天矿的研究结果，在排土场新造地貌上，击溅、面蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀、沉陷侵蚀、沙砾化面蚀、土沙泻流和坡面泥石流等土壤侵蚀形式出现频率和发生程度都明显强于原地貌。白中科等在安太堡排土场的试验估测，无任何复垦措施的排土场，其平台和斜坡土壤侵蚀模数分别为 $4\,500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1})$ 和 $3\,250 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1})$ ，黄土区露天矿开采造成的土壤侵蚀量是开采前的 $1.4 \sim 2.8$ 倍。目前，矿山废弃地的定位观测和动态监测数据十分缺乏，国内矿山建设的水土保持方面还存在矿山人为剧烈扰动地貌土壤侵蚀规律研究不足、矿山水土保持措施体系研究不够、矿山灾害预防和生态恢复长效性研究不足、矿山废弃地的复垦模式研究不够和矿山废弃地土地适宜性评价体系研究不够等五大问题。

煤炭是我国最主要的一次性能源，在过去的几十年里，我国煤炭生产为国民经济的恢复和发展做出了巨大的贡献。但是，煤炭资源的开发和利用引发了一系列的生态环境问题，煤矿山已成为典型的严重受损生态系统，其生态环境问题成为制约煤矿山可持续发展乃至区域生态安全的重大隐患。矿场的建设、废弃土石堆放、修路、地面塌陷与露天采矿剥离等都会引起植被破坏。土壤作为供给植物生长发育所必需的水、肥、气、热的主要源泉，也是营养元素不断循环、不断更新的场所。矿山的建设和生产改变了土地养分的初始条件，从而使植被生长量下降。植物作为生态系统的生产者，它的破坏使得矿山土地及其临近地区的生物生存条件破坏，生物量减少，生态系统结构受损、功能及稳定性下降，直接或间接影响了土壤水—植物水—地下水—大气水“四水”相互转化的平衡关系。而作为连接地表径流与地下径流的纽带，土壤水分运动特性和壤中流发生机理等研究对揭示径流形成机制、水源涵养及“四水”转化至关重要，对矿山水资源保护、生态环境恢复等具有积极意义。

1.2 研究目的和意义

据2003年辽宁省6 881个矿点调查分析，矿山水土流失面积占全省强度以上级侵蚀面积的17.73%。辽宁省矿山绝大部分为强度以上侵蚀，平均侵蚀模数 $13\,161.38 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1})$ ，是全省平均侵蚀模数的4~6倍。水土流失主要发生在采挖迹地、弃渣排放场地、尾矿库和道路等部位。

阜新海州露天矿开采煤炭过亿吨，煤炭资源开采过程中大量的煤矸石露天堆放，形成一座占地 12 km^2 、高出地面300多米的矸石山；上亿吨的剥离物形成大面积无土壤结构、无地表植被的排土场。2004年海州矿排土场正式开始投资总额达5 639万元、复垦面积为 998 hm^2 的复垦工程。这些人为的庞大堆积体对阜新的自然环境造成了很大的压力，如何实现矿山建设与环境保护相结合，在建设中保护水土资源，防治土壤侵蚀，减少大的深的侵蚀沟形成，实现矿山环境资源的可持续发展是目前的研究重点之一。

本研究从我国矿山水土保持现状问题与植被恢复现状出发，以海州露天矿排土场、

新邱露天矿排土场和孙家湾矸石山等矿山废弃地为例,针对其水土流失特点,主要开展了矸石山和排土场土壤侵蚀发生发展规律、岩土混合介质优先流特征、植被恢复的生物多样性和矿物肥料对废弃地土壤改良效应等方面的研究。通过对矸石山和排土场土壤侵蚀影响因子、侵蚀沟调查的分析研究,深化对废弃地水土流失特征的认识,对沟蚀发育过程的认识;由于排土场的土壤并不是一个结构性土体,而是通过人为形成的松散土体,造成该地区发生土壤优先流的原因可能是在煤矸石排弃过程中形成裂缝使得水流沿着裂隙发生快速移动,也可能是在复垦后进行植被种植产生的枯枝落叶层腐烂后形成土壤有机质改变了土壤的结构,进而利于土壤优先流的发生,通过探讨排土场土壤优先流的特征及形成机理,可为有效防治排土场的水土流失、滑坡等灾害,进行有效的植被恢复提供理论依据与技术支持;对排土场边坡自然恢复植被进行数量分类和排序,分析影响植物分布的主要环境因子,分析坡向和坡位对群落植物多样性和生产力的影响,并探讨植物多样性与生产力的关系,研究坡位、坡向和恢复年限对土壤物理、化学及生物学性状的影响,探讨边坡植被恢复过程中的土壤质量演变规律,以寻求恢复和改善土壤质量的对策,为排土场边坡植被恢复与生态重建提供理论依据;分析不同矿物肥料对土壤的改良效果和对作物产量的影响,筛选出适用于矿山废弃地复垦最佳类型的矿物肥料,以期后续的研究提供理论依据。本研究通过科学预测矿山可能产生水土流失的部位、形式、强度、危害,制订切实可行的废弃地植被恢复措施,合理利用矿山废弃地水土资源,使即将进行的矿采活动对生态环境的破坏减小,加强矿山恢复治理技术研究,为矿山废弃地生态环境建设提供理论基础和技术支持,对推动水土保持科技创新和水土保持学科发展,具有极其深远的意义。

1.3 国内外研究进展

1.3.1 矿山废弃地土壤侵蚀与水土保持研究进展

1.3.1.1 国外矿山废弃地土壤侵蚀与水土保持研究进展

国外矿山水土保持起源于土地复垦,伴随着土地复垦而不断发展,其重点是矿山水土保持。这是因为国外的矿山开采历史长、发展快,矿山废弃地恢复利用问题最为严重的缘故。而矿山水土保持与矿山土地复垦有着密切的关系,它是矿山土地复垦的保障性措施,它们之间存在很大的统一性,实际上,矿山土地复垦科学研究、技术推广应用的发展过程,很大程度上也是矿山水土保持研究和技术推广应用的发展过程。

土地复垦与水土保持最早见于德国和美国。近年来在俄罗斯、德国、英国和澳大利亚等国家有高度的发展,组织管理严密,科学研究与技术开发都获得了极大成功。在欧美,矿山水土保持实际上包含了土地复垦的大部分内容,矿山土地复垦技术与水土保持措施是基本一致的。建立稳定地表和控制堆场的侵蚀,是澳大利亚矿山复垦中的首要研究领域。不少矿山研究者注重堆场适宜坡度的研究,同时还研究了坡形、坡度变化与控

制侵蚀的关系。对煤矿剥离物堆筑研究表明,坡剖面宜为S形,凸面在上部增加至长度的20%~30%,凹面在下部低至长度的70%~80%。控制侵蚀研究工作,多集中在控制侵蚀覆盖材料种类的选择和控制方法的选择等方面。目前国外在这方面不仅技术先进,而且已实现控制产品的产业化,主要有以下几种:①侵蚀被。主要作用是将其铺设在地表,阻止土壤流失,加速种子萌发,迅速建立植被以及长期防止侵蚀。侵蚀被在复垦土地中推广应用现还处于开始阶段。②沉积控制技术与产品。主要是利用各种侵蚀控制产品,达到控制沉积物、限制侵蚀与污染面积的目的。它常用于建筑场地、筑路场地、采矿场地的沉积控制。③侵蚀控制构筑物。其主要特点是用各种材料制成不同形状的构筑物,铺设在地表达到控制侵蚀的目的。它们多用于复垦土地沟渠的边坡防护、坡地的防护、梯田埂等的防护。④水力播种与覆盖。这一技术与产品广泛应用于复垦土地的重新植被,具有速度快、成活率高、复垦率高等特点。常用于废弃物顶部、陡坡、废物堆、沙地等的植被建设与侵蚀控制。⑤人造表土。新近推出的有“生物土”和“无毒土”。二者都是有机产品,可以改善土壤结构,促进植被生长,减少侵蚀。⑥土壤水。它是一种有机聚合产品,可使水贮存起来,缓慢释放,减弱水土流失。这些侵蚀控制措施虽然很有效,但由于成本太高,目前我国尚未广泛应用。在苏联,整个土地复垦过程分为两个基本阶段:工程技术复垦阶段和生物技术复垦阶段,并且不同的复垦方法坡度要求不同。

国外矿山土壤侵蚀与水土保持,组织管理严密,科学研究与技术开发都获得了极大成功。复垦地的方式和利用向多样化发展,主要有:林业复垦,农业复垦,自然保护复垦,水域复垦,建筑复垦。国外土地复垦规划是在区域规划的指导下,应用先进的遥感和计算机信息管理系统如土地资源信息管理系统,根据矿山实际情况,因地制宜,合理安排。国外矿山水土保持实际上包含了土地复垦的大部分内容,矿山土地复垦一般分为两个阶段:一是技术复垦,也叫工程复垦;二是生物复垦,包括了复垦种植、植物品种筛选、土壤改良、人工群落建造与养护等,其研究重点集中在采矿业废弃地的水土保持问题上。国外许多国家都设有水土保持专门机构,并形成了环境、水土保持、林业、农业、采矿业等多学科联合协作的研究队伍,如苏联的国立土地复垦研究所,美国内务部矿山局的国家土地复垦研究中心及农业部水土保持局等。他们能够有效组织多方面技术力量联合攻关,并将研究成果很快应用于复垦和水土保持实践中。各国研究的主要内容有:发展、改进采矿机械设备和专用复垦设备,适合与复垦的最佳设计,矿山覆盖物的剥离与处理,复垦的表土储存与铺覆技术,采矿山稳定性及环境影响,复垦地土壤侵蚀控制技术。另外,遥感技术和地理信息系统也已广泛应用于这个领域。

近年来,随着城市建设、高速铁路和公路发展,大型建设项目上马,国外在工程建设方面的水土保持问题也受到了重视,矿山水土保持已向水利工程、建筑场地、筑路、娱乐场所、城市垃圾等领域拓宽,新的水土保持技术如石筐、栅格、水力播种、水土保持、植被、覆盖、生物土、侵蚀控制构筑物等不断涌现,出现了向产业化方向发展的趋势。今后矿山水土保持研究和发展的领域包括:①矿山水土保持政策、法规、技术标准

和规范研究。②矿山废弃地特别是干旱半干旱地区的废弃地植被恢复技术的研究。③土壤污染、水污染控制技术的研究。④建筑场地的水土保持技术研究。⑤矿山水土保持的新技术和新产品研究。总之,当今世界,矿山土地复垦与水土保持已经成为一门综合地质学、采矿和建筑、道路和桥梁、农学、林学、水土保持、渔业、化学、微生物等多学科的应用技术。

1.3.1.2 我国矿山废弃地土壤侵蚀与水土保持研究进展

我国煤炭埋藏较深,是少数以井工开采方式为主的国家之一,井工煤炭开采方式引起开采沉陷,在采区上方形成了远大于采煤工作面的沉陷区,重塑了地表形态。沉陷对矿山土壤的主要影响有地裂缝和地表坡度变化、土壤理化性质改变、土壤水分养分转移、有机质含量下降等。矿山土壤侵蚀与水土保持的研究在新中国建立前尚属空白。20世纪50年代末,辽宁省桓仁铅锌矿等一些矿山就开始自发地开展了一些土地复垦工作,由于新中国成立以来高速发展的采矿、冶铁等行业造成了严重的土壤侵蚀,引起党和政府的高度重视,国家先后颁布了《中华人民共和国水土保持暂行纲要》和《关于开荒、挖矿、修筑水利和交通应注意水土保持的通知》,对矿山水土保持提出了具体要求,但限于当时的形势和条件,这些规定并未引起大多数矿山企业的重视,矿山土壤侵蚀问题仍然普遍存在。80年代后,随着改革开放,矿山企业加快发展,规模大、数量多,水土流失愈演愈烈。1982年国务院颁布《水土保持工作条例》,再次强调矿山水土保持,但没有具体实施方法,作用不大。此后,由于晋陕蒙接壤区煤田开采导致了严重的土壤侵蚀,土地荒漠化等一系列环境问题引起了有关部门的高度重视,1986年4月成立晋陕蒙接壤区水土保持协调领导小组(后改为晋陕蒙接壤地区资源开发与环境保护领导小组),由国家计委直接领导,1989年5月黄河上中游治理局成立监督处,一些省(市、自治区)、地、县相继成立监督机构,开展了矿山土壤侵蚀重大案件的调查查处,这对探索我国矿山水土保持监督管理的道路具有划时代的意义。

1991年6月29日,颁布了《中华人民共和国水土保持法》,1993年8月1日又出台了《中华人民共和国水土保持法实施办法》。国家从中央到地方颁布了更加严格、完善的水土保持法律、法规和政府规章,健全了水土保持监督机构,加上水土保持科研与实践水平的提高,矿山水土保持才真正走上了新的轨道。工矿企业开始向水行政主管部门申报水土保持方案,同时一些科研与工程项目也取得了可喜成绩,相继有50余个科研单位、高校、工矿企业承担了不同类型的课题40余项。其中国家自然科学基金、国家重点攻关课题10余项目,如大型露天矿高台排土场稳定性研究,准格尔煤田开发对生态环境影响及治理对策的研究,晋陕蒙能源开发区人为活动对滑坡泥石流灾害影响的研究,神府一东胜矿山一、二期工程环境效益考察,安太堡露天煤矿废弃地复垦系统工程的研究及其开发示范,矿山资源开发中生态经济社会协调发展模式研究,矿山资源开发对环境影响的时空模拟,我国煤矿开发后生态环境综合整治可行性总体方案与试验示范前期研究和矿业废弃地植被恢复中的基质改良等。50余种国内期刊,发表了数百篇有关矿山土地复垦、水土保持和环境保护的研究论文。一批矿山水土保持和生态重建的精

品工程出现在祖国大地,例如抚顺和开滦煤矿、安太堡煤矿等。

目前我国矿山土壤侵蚀与水土保持方向主要研究的内容包括:从理论上初步分析了废弃地中试用的新技术,包括黄土母质直接铺盖工艺,污染岩层包埋压埋工艺,堆状地面排土工艺,暂时性、过渡性、永久性水土保持措施,硬化与非硬化排水渠系,草灌乔木合理配置模式。讨论了矿山水土流失的表现形式,提出了控制矿山,尤其是复垦区水土流失的设计方法与措施,结合案例介绍了生物多样性指数在矿山水土保持区适种植物品种及种植方案优选时的应用。提出我国在煤矿山实施的防治土壤侵蚀的措施主要是土地复垦和造林绿化,造林绿化的关键是选择适宜的植物种、科学的种植技术和合理的抚育管理方式。利用 Landsat TM, ASTER, Quick Bird 等遥感影像和 DEM 数据测算矿山土壤侵蚀量。将 GIS 类比法和专家咨询法相结合,通过叠加原地貌土壤侵蚀图和土地沉降状况预测图,预测煤层开采后土壤侵蚀强度的变化。提出了矿山土壤侵蚀量的估算方法,结合改进的土壤侵蚀模数,计算了矿山的土壤侵蚀总量。通过对典型特征坡面的调查分析,采用聚类分析、判别分析方法构建了矿山土壤侵蚀强度判别模型。通过利用遥感和 GIS 技术的土壤侵蚀遥感监测室定量和快速的监测图像,为土壤的动态监测提供了科学、实用和便捷的技术方法。这些措施在一定程度上都有效地控制了水土流失,减轻了环境污染。

1.3.2 矿山废弃地土地复垦与生态重建研究进展

1.3.2.1 国外矿山废弃地复垦与生态重建研究进展

矿山废弃地土地复垦与生态重建一向为经济发达国家所重视。最早开始土地复垦与生态重建的是德国和美国。德国早在 20 世纪 20 年代初就开始对露天开采褐煤区进行绿化。美国 Indiana 煤炭生产协会 1918 年就自发地在煤矸石堆上进行种植实验,《1920 年矿山租赁法》又明确要求保护土地与自然环境。50 年代末,一些国家的土地复垦区已系统地进行绿化。60 年代末,许多工业发达国家加速复垦规划的制订和复垦工程实践活动,比较自觉地进入了科学复垦的时代。70 年代以后,复垦技术逐渐形成了一门多学科、多行业、多部门联合协作的系统工程,许多企业自觉地把土地复垦纳入采矿设计、施工和生产过程中。到 1975 年全美已有 38 个州制定了有关土地复垦的法律,1977 年美国国会通过并颁布了《露天采矿管理与土地复垦法》,促进土地复垦率明显提高,以规范采矿业和解决废弃矿山的问题,详尽规定了包括原有矿和新开矿作业的标准和程序及复垦技术与目标。例如,规定将使用土地恢复到原用途要求的环境、稳定矿渣堆、恢复表层土壤、尽可能降低矿山排水危险、因地制宜种草植树等。1971 年前平均土地复垦率为 40%;1977 年《联邦土地复垦法》颁布后的新的破坏土地实行边开采边复垦,复垦率为 90%,同时又不断地复垦以前废弃的土地。苏联 1976 年 6 月部长会议颁布了《关于有用矿物和泥炭开采、地质勘探、建筑和其他工程的土地复垦、肥沃土壤保存及其合理利用规定》,并成立了国立土地复垦研究所,研究矿山被破坏土地资源的复垦利用技术。自 70 年代以来,黑色金属矿山平均年复垦率已提高到 50%。民主德国 60—

80年代,复垦土地面积是同期开采占地面积的92%;联邦德国莱茵河煤矿山到1985年土地复垦率达62%;英露天煤矿1942—1975年总复垦率达76%。

国外土地复垦组织管理也十分成功。美国、英国、加拿大、匈牙利等国政府对复垦资源给予补贴,或者建立复垦基金,疏通各种渠道筹集资金,支持土地复垦工作,并且都有专门的土地复垦学术团队、研究机构。如美国专门成立了国家矿山土地复垦研究中心,并由国家每年拨付140万美元作为土地复垦研究的专项经费,组织多学科专家攻关。美国露天采矿与土地复垦学会还每季度出版一期会讯,每年组织一次全国学术会议。加拿大政府也每年出资支持土地复垦研究,土地复垦协会每年召开一次学术年会并负责编辑出版国际土地复垦专家联合会会讯和《国际露天采矿、复垦与环境杂志》。英国、美国等国家多由专业复垦公司承包矿山和政府复垦工程。苏联、德国、匈牙利等国家有自行联合组织的土地复垦机构和专业队伍,承担矿山企业复垦任务。澳大利亚在新南威尔士州成立了采矿工业土壤保持服务公司,能够为企业提供各种服务,如详细的防蚀工程、进行矿山土壤调查和土壤化学分析,为设计排水系统提供各种水文调查资料,推荐种子、苗木、肥料,租赁复垦设备,提供技术咨询和技术管理人才等。为了保证矿山废弃地生态环境恢复的工作顺利进行,许多国家如美国、加拿大、德国、澳大利亚及东欧一些国家都先后制定了有关法律、法令、规章来约束采矿业对土地的破坏,以法律形式要求对采矿占用、破坏的土地生态环境进行恢复。

国外在矿山土地复垦与生态重建方面侧重于:①矿山复垦土壤侵蚀控制的研究。土壤侵蚀控制是露天矿土地复垦成败的关键,美国、加拿大等国都将其作为主要研究课题。②矿山复垦土壤熟化改良的研究。目前国外主要采用人工加速风化、熟化法,比如利用城市垃圾和煤渣对褐煤开采形成的废弃地进行农业复垦,同时还加以生物复垦措施来熟化和改良土壤。③矿山复垦土地植被重建技术研究。研究重点在于植被恢复技术和植被重建技术。如在复垦土地上引入红树并对其生长进行深入研究以及A.P.Schwab对美国Kansas州西部粉煤灰复垦后废弃地上植物进行的研究表明,植物体内重金属含量与粉煤灰有着一定的关系。国外还重点研究了利用遥感和计算机信息技术指导煤矿山土地复垦。如将GIS用于废弃地矿山复垦工程,通过遥感监测来反映矿山覆被变化。此外,国外对于土地复垦的相关因素也作了相应的研究,认为不同国家或地区由于法律法规、开采技术和开采地理形势的不同,其矿山生态恢复战略将会不同。

1.3.2.2 我国矿山废弃地复垦与生态重建研究进展

我国矿山废弃地的生态重建工作早在古代就开始了。近代矿山废弃地的生态重建工作开始于20世纪50年代末60年代初,是随着国民经济和社会主义建设的发展自发开展起来的。如辽宁省桓仁铅锌矿1957年开始在废弃的尾矿坝上覆土造田;河南小关铝矿在1958年设计动工时就考虑了复垦问题,造地千余亩;钹潭锡矿1964年开始利用剥离废土边采矿边回填采矿山,开始了当年征地当年造地补偿的先例,但废弃地的复垦工作在当时并没得到足够的重视。直到80年代初随着人地矛盾的加剧被再次提出,并立即得到了国家计委、科委,煤炭、冶金、化工、电力、建材和土地管理等系统和行业部门

的重视,编制了有关法规,同时开展了多学科交叉复垦实验、规划实施及学术探讨。

土地复垦与生态重建在中国真正得到重视是在20世纪80年代,从自发、零散状态转变为有目的、有组织、有计划、有步骤的复垦阶段。1989年1月1日正式颁布了《土地复垦规定》,使该项工作步入了法治轨道,1990年以后才初具规模。在这种形式下,我国矿山土地复垦理论研究虽起步晚,但是短短的几年时间里也取得了长足的进步。据不完全统计,80年代末以来,全国人大常务委员会、国务院、国家计划委员会、国家经济委员会、水利部、财政部、煤炭部、冶金部、环境保护局、土地管理局等有关部门先后制定了与矿山土地复垦、水土保持、环境保护有关的法律、法规和规章30余部,如《中国21世纪人口、环境与发展白皮书》(1994)、《中华人民共和国煤炭法》(1996)以及《土地复垦规定》(1988)等。相继有50余个科研单位、高校及工矿企业承担了不同类型的课题40余项,其中国家自然科学基金、国家重点攻关课题10余项,如“准格尔煤田开发对生态环境影响及治理对策的研究”“安太堡露天煤矿废弃地复垦系统工程的研究及其开发示范”“矿山资源开发中生态、经济、社会协调发展模式研究”“矿产资源开发对环境影响的时空模拟”“我国煤矿开发后生态环境综合整治可行性总体方案与试验示范前期研究”等。在我国相继召开了数次与矿山土地复垦、生态重建相关的重要会议、如退化土地的整治与管理国际会议、矿山环境管理生态重建的理论与方法专题研讨会、生态工程国际会议,土壤—人类—环境相互影响国际学术讨论会、矿山生态重建与环境管理研究网络筹备会议和第六次全国土地复垦与生态重建学术讨论会等。

矿山废弃地复垦与生态重建的研究至今大致可划分为两个阶段。第一阶段为80年代末,以马恩霖等编译的《露天开采复田》为标志,介绍和引进了国外土地复垦的经验,并推动了我国矿山废弃地复垦和综合治理研究工作,有限地开展了我国主要矿山废弃地复垦技术和模式探索。有关部门在借鉴国外经验的基础上结合我国实际制定了《土地复垦规定》。第二阶段是90年代以来,以我国《土地复垦规定》颁布为标志。研究力量增加,研究队伍向专业化、多学科综合的高层次迈进,推动了矿山复垦研究的蓬勃发展。主要研究方面包括矿山土地复垦规划理论和方法、矿山生态工程复垦、矿山废弃地复垦与绿化、塌陷地复垦工艺、土地复垦政策与战略。

我国矿山土地复垦与生态重建侧重于露天煤矿排土场地表径流观测研究,排土场渗流场模拟实验,排土场地基承载力,堆置合理参数,高台阶排土场稳定性以及排土场滑坡、泥石流的形成机理及防治技术等;井工煤矿沉陷地复垦工程技术研究,侧重研究“挖深垫浅”、充填复垦、疏排法、生态复垦和工程复垦技术;矿山废水处理、循环利用的技术研究,研究采用乔—灌—草混交多种生态结构的污水慢速渗透土地处理系统,实现污水闭路循环使用;固体废弃物处理及复垦绿化技术研究,侧重于二次利用,比如将煤矸石进行发电、建材、矸石肥料等综合利用;露天矿排土场植被重建及生产力恢复技术研究,研究适宜当地的乔、灌、草混交品种、合理的配置模式和栽培技术,以及土壤熟化培肥和土地生产力恢复提高技术研究;人为加速土壤侵蚀控制技术研究,研究侧重于传统方法,而“过滤墙”和“石筐”等侵蚀控制构筑物未形成产业化。

另外,我国在矿山废弃地艺术与景观再造方面也进行过研究,其中,张红卫等探讨了大地艺术家对于工矿山损毁土地的创作活动对于矿山废弃地进行景观设计的借鉴意义;王向荣等概括介绍了欧美发达国家的后工业景观、大地艺术和生态景观的设计思想和手法以及在矿山复垦土地再利用中的应用。矿山工业场地旧建筑改造在资源型城镇(地区)二次利用中也具有明显的借鉴意义,吴良镛1983年提出了城市有机更新理论,促进引领了我国资源型城镇(地区)土地更新利用的发展。90年代兴起大规模的城市开发热潮,使我国城市更新改造利用面临的问题和挑战逐步突显。刘伯英从矿业用地性质转换、用地更新驱动方式、旧工业建筑再利用、生态景观塑造等角度探讨了资源型城市(地区)工业地段的更新实施。

这些研究对推动矿山废弃地的复垦理论的发展和矿山生态环境的综合整治具有重要作用。目前,生态学的观点在我国矿山废弃地治理研究与应用中被广泛接受,但客观地说,这种朴素的实用生态学观点与上升到西方科学家所推崇的“完全生态恢复”,在理论上还是有差别的。矿山废弃地土地修复是以植被恢复和生物多样性保护为目标的生态修复,当前的修复更多是指“改造”和“恢复”,远远不是“复原”。植物修复是矿山土地复垦中一项新兴的有潜力的绿色植物技术,随着该领域研究的不断深入,可以预见,这些新理念新技术将会得到广泛应用,并在实践中进一步完善。

1.3.3 土壤优先流研究进展

1.3.3.1 国外土壤优先流研究进展

对于优先流的研究,其实早在1864年研究入渗过程中的“大孔”现象就是优先流研究的开始,通过排水实验,研究了这一现象。G. R. Free等研究了68种土壤的理化性质,发现入渗速率与非毛管孔隙度之间有一定的联系。Bodman等发现当水被加入到干旱土壤时,有一个特殊的湿润峰,其最大土壤含水量接近田间持水量。R. E. Horton认为,土壤裂隙、虫孔和根孔,都能显著增加入渗。Hill分析得出多孔介质孔隙在重力驱动下存在非饱和流现象。上述研究,都是停留在有关优先流的描述,当时并未引起人们足够的重视。随着Hounsfield在1973年发明的计算机层析成像技术问世以来,到90年代初期,以CT成像技术为代表的现代化仪器以及染色剂示踪等无损伤试验技术在优先流研究领域得到了广泛的运用,极大地推动了优先流的量化研究,如,Warner等借助CT成像技术扫描确定了岩土体的大孔隙数目、大小等,实现了大孔隙的可视化和量化;冯杰等对含有各种大孔隙的原状土柱和已知直径大孔隙的填充土柱进行了CT扫描实验,得到了大孔隙数目、大小、形状和连通性在土柱横断面和纵断面上的分布。进入21世纪,优先流的研究侧重于采用现代化仪器观测,进一步揭示优先流的形成机制以及对优先流的量化研究。例如, Marcus等研究了在有明显分层土壤中初始含水量对优先流的量化影响,总的来说,优先流的研究进展可以大概归结为“定型化、半量化、量化”,当前借助科技手段,正朝着精确量化的方向发展。

然而优先流并没有统一的概念,许多科学家仅针对自己的研究成果,从不同角度提