

SHENGTAI
YU HUANJING
HUIFU JISHU XILIE



生态与环境恢复技术系列

铁矿废弃地植被 恢复技术与效应研究

TIEKUO FANGQI DI

赵方莹 © 著

FEIQIDI
ZHIBEI

HUIFU JISHU YU XIAOYING YANJIU



生态与环境恢复技术系列

铁矿废弃地植被 恢复技术与效应研究

赵方莹 著

中国林业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

铁矿废弃地植被恢复技术与效应研究/赵方莹著. —北京: 中国林业出版社, 2009. 10
(生态与环境恢复技术系列)

ISBN 978-7-5038-5719-5

I. 矿… II. 赵… III. 铁矿床-矿业-工业用地-植被-恢复-研究
IV. Q948.15 TD88

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 179893 号

策 划: 邵权熙 刘家玲 严 丽

责任编辑: 周军见 刘家玲

出 版: 中国林业出版社 (100009 北京西城区德内大街刘海胡同 7 号)

网 址: www.cfph.com.cn

E-mail: cfphz@public.bta.net.cn 电话: (010) 83224477

发 行: 新华书店北京发行所

印 刷: 中国农业出版社印刷厂

版 次: 2009 年 10 月第 1 版

印 次: 2009 年 10 月第 1 次

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 8.75

字 数: 218 千字

印 数: 1~2000 册

定 价: 30.00 元

**“生态与环境恢复技术系列”
编 委 会**

主 编 赵方莹

副主编 孙保平 张洪江

编 委 (按姓氏笔画排序)

丁国栋 王 宁 吴敬东 李余波 李江锋

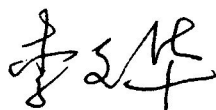
孟 强 杨建英 杨 光 罗俊保 周连兄

赵廷宁 凌 霞 程堂仁

生态与环境的保护和建设已经成为当今人类社会共同面临的重要课题，在人口增长和经济发展的双重压力下，我国的生态环境不容乐观。党和政府高度重视生态环境问题，在科学发展观和构建和谐社会的指导思想中均将“人与自然和谐”作为重要内容，国家把节约自然资源和保护生态环境列入国民经济和社会发展规划纲要。生态环境的恶化直接威胁人类的生存条件和生活质量，建设与生态的良性循环已成为衡量发展科学性的标准之一。

近年来随着社会经济的飞速发展，我国基本建设速度加快，城市建设与生态保护的矛盾日益加剧。交通、水利、矿山、电力等建设项目造成了大面积植被破坏和新增水土流失，影响了生态景观，并造成地质灾害隐患，加剧了人类生存环境的恶化和生态系统的退化。加强建设项目生态与环境的保护与建设，实现开发建设与环境保护兼顾成为经济社会可持续发展的重大课题。

由于这些项目涉及交通、水利、矿山、电力、城镇建设多个不同行业，并且涵盖生态学、植物学、林学、土壤学、水土保持学、土木工程学等多个学科，所以急需系列有针对性的专业技术书籍，指导不同行业相关技术人员进行生态环境建设。为了满足这一需求，该系列书作者们根据多年的实践经验结合新技术、新工艺，从设计、施工、管理的角度，结合规划设计和工程实践进行案例分析，介绍相关成套技术。按照自然规律的要求，因地制宜选择适用技术措施或技术组合，实现近自然的生态治理。作者们既有深厚的理论基础，又有丰富的实践经验。该系列书注意理论联系实际，实践性和操作性强，对建设项目生态与环境的保护与建设具有重要指导意义，它的出版将在很大程度上推动我国生态环境建设事业的健康发展，为山川秀美、民强国富宏伟目标的实现献计献策。



2009年10月10日

人类对矿产资源需求的迅速增加及矿业经济的迅猛发展，矿山开采造成大规模的土地破坏和植被破坏，在中国乃至世界，都是一个十分严重且日益受到高度重视的问题。生态环境的保护和建设已经成为当今人类社会共同面临的重要课题，生态环境的质量直接关系到经济社会能否可持续发展，建设与生态的良性循环是衡量发展科学性的标准之一。矿山的生态植被恢复已成为我国生态环境建设的重要组成部分，通过对废弃矿区的生态植被恢复，能够有效改善矿区生态环境，促进社会经济的良性循环。矿业废弃地的植被自然恢复是非常缓慢的，应采取积极的人工措施来加快植被恢复，以恢复、改善矿区生态环境。在矿山生态植被恢复中要遵循生态学自然规律，师法自然，实施近自然的生态植被恢复。

北京作为首都，其生态环境问题始终受到党和国家各级政府的高度重视。“宜居城市”、“生态城市”已经成为城市总体建设的发展方向，明确了建设“绿色北京、人文北京、科技北京”的目标，在北京市城市总体规划中明确将北部和西部山区定位为“生态涵养发展带”。北京的铁矿开采主要分布于北部的“生态涵养发展带”，铁矿废弃地的生态恢复已经成为首都山区生态建设的主要内容，是区域生态涵养功能的关键。北京市的铁矿开采利用一度曾是区域的支柱经济，支持了城市建设，但由于管理和采矿业行业性质，多年开采形成了大量的裸露山体和废弃矿场，废弃地出现了生态系统退化和恶化现象，影响了矿山及周边居民的生产生活，严重制约了区域经济可持续发展，对铁矿废弃地进行植被恢复意义重大。矿山植被恢复可以提高植被覆盖率，恢复景观效果；改良土壤，提高土壤肥力、改善土壤结构；防治水土流失、控制扬尘；提高生物多样性，优化植物群落结构，有效改善矿山生态环境。

由于铁矿开采造成的生态破坏和形成的地形地貌等立地类型差异变化都很大且各区域社会经济发展并不平衡，生态修复需因地制宜，采用生态经济的生态修复技术模式；目前虽然采用一些技术模式进行矿山植被恢复，技术措施的采用缺少对立地土壤条件的分析和对当地乡土植物种的调查研究、应用，后期效果的持续稳定性和目标群落能否实现没有保障。尽管已有众多学者对矿业废弃地生态恢复进行了许多研究和实践，但针对北京铁矿废弃地植被恢复还没有系统的研究结果，急需开展铁矿不同生境下的植被恢复基础性、

规律性研究，为铁矿废弃地植被恢复提供技术支撑。针对这一现状，选择北京市范围内建设规模最大，并具有典型代表性的北京首云铁矿作为研究区域，开展“铁矿废弃地植被恢复技术与效应研究”。

本书作者通过对研究区域的地形地貌、植被、土壤、气候气象、社会等情况进行调查分析，研究矿山废弃地植被和土壤理化性质，摸索矿山生态植被恢复的限制性因子；对矿山废弃地植被调查，分析其生境特征并进行物种生态位、物种相关性、生物多样性研究，摸清植被演替规律，从而为该矿山废弃地植被恢复的植物选择、配置和调控，缩短植被演化进程等提供理论依据，选择适宜的植物品种；研究分析出适宜土壤恢复和植物品种选配技术，落实“因地制宜、适地适树”的矿山生态植被恢复理念，对指导北京及其他类似地区铁矿科学地进行生态植被恢复具有重要的意义。

本书是在作者博士论文的基础上编著而成的一本工程绿化学——矿山植被恢复方向的专著，涉及了植物学、土壤学、恢复生态学、水土保持学等多个学科范畴，对国土矿山、林业生态、水土保持、环境保护等相关行业研究、教学、管理、工程技术人员具有一定的参考和指导价值。

本书在出版之际，衷心感谢我的博士论文导师北京林业大学周心澄教授，感谢北京林业大学孙保平教授、赵廷宁教授、丁国栋教授等给予的指导与关心，同时还得到了北京林丰源生态环境规划设计院有限公司、北京首云铁矿、北京林枫园林绿化工程有限公司等单位领导和科技人员的大力支持和帮助，书中参考和引用了国内外有关书籍和文献，在此一并表示衷心的感谢！

由于作者水平和时间有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

赵方莹

2009年6月于北京



序

前言

第一章 矿山开采及其植被恢复研究的现状	(1)
第一节 国内外矿山开采现状	(1)
第二节 矿山开采的生态环境影响	(2)
一、植被景观破坏	(2)
二、地质灾害隐患	(2)
三、地形地貌扰动	(3)
四、水土流失加剧	(3)
五、土地大量占用	(3)
六、土壤、水体污染	(3)
七、生物多样性降低	(4)
八、对地下水的影响	(4)
第三节 国内外矿山废弃地生态植被恢复研究概况	(4)
一、矿山废弃地及其生态恢复	(4)
二、国内外矿山废弃地生态恢复历史进程	(5)
三、国内外矿山废弃地生态恢复理论与技术研究进展	(6)
四、国内外矿业废弃地植被恢复存在的问题与发展趋势	(9)
第四节 矿山废弃地植被恢复主要限制性因子	(10)
一、土壤物理结构	(10)
二、土壤肥力	(10)
三、土壤 pH 值	(10)
四、重金属含量	(10)
第二章 研究区概况	(12)
第一节 自然地理概况	(12)
一、地理位置	(12)
二、地形地貌	(12)
三、水文	(13)
四、气象	(13)
五、地质	(14)
六、植被	(14)

七、土壤	(14)
第二节 矿山开采及平面布局	(15)
一、矿山开采与建设	(15)
二、矿山组成与平面布局	(15)
第三章 研究内容与技术途径	(16)
第一节 研究内容	(16)
第二节 研究技术路线	(17)
第三节 研究方法	(18)
一、资料收集与野外调查	(18)
二、数据分析处理	(19)
第四章 矿山废弃地立地类型划分与植被恢复	(24)
第一节 矿山废弃地立地类型划分	(24)
一、立地类型划分方法	(24)
二、立地类型划分因子	(24)
三、立地类型划分	(25)
第二节 矿山不同立地类型植被恢复	(26)
一、矿山不同立地类型自然植被恢复	(26)
二、矿山不同立地类型人工植被恢复	(26)
第五章 矿山不同立地类型土壤(母质)理化性质研究	(29)
第一节 棕壤阳坡缓坡土壤理化性质	(30)
第二节 尾矿砂阳坡缓坡土壤(母质)的理化性质	(30)
一、尾矿砂阳坡缓坡无客土改良土壤理化性质动态分析	(31)
二、尾矿砂阳坡缓坡客土改良后土壤理化性质分析	(32)
三、尾矿砂阳坡缓坡不同恢复方式土壤理化性质对比分析	(33)
第三节 碎石夹微土阳坡缓坡土壤(母质)的理化性质	(34)
一、碎石夹微土阳坡缓坡自然恢复土壤理化性质动态分析	(34)
二、碎石夹微土阳坡缓坡客土改良土壤理化性质动态分析	(36)
三、碎石夹微土阳坡缓坡不同恢复方式土壤理化性质对比分析	(37)
第四节 裂隙裸岩及风化物阳坡陡坡土壤(母质)的理化性质	(38)
一、裂隙裸岩及风化物阳坡陡坡自然恢复土壤理化性质动态分析	(38)
二、裂隙裸岩及风化物阳坡陡坡客土改良土壤理化性质	(40)
三、裂隙裸岩及风化物阳坡陡坡不同恢复方式土壤理化性质对比分析	(40)
第五节 土石混合物阳坡缓坡土壤的理化性质	(41)
一、土石混合物阳坡缓坡自然恢复土壤理化性质	(41)
二、土石混合物阳坡缓坡客土改良土壤理化性质动态分析	(42)
三、土石混合物阳坡缓坡不同恢复方式土壤理化性质对比分析	(43)

第六章 矿山不同立地类型废弃地土壤种子库特征研究	(45)
第一节 不同立地类型废弃地土壤种子库种类组成和种子密度	(45)
一、尾矿砂阳坡缓坡土壤种子库的种类组成和种子密度	(45)
二、碎石夹微土阳坡缓坡土壤种子库的种类组成和种子密度	(46)
三、不同立地类型土壤种子库的种类组成和种子密度比较	(47)
第二节 不同立地类型废弃地土壤种子库垂直分布规律	(47)
一、尾矿砂阳坡缓坡土壤种子库垂直分布规律	(47)
二、碎石夹微土阳坡缓坡土壤种子库的垂直分布规律	(48)
三、不同立地类型废弃地土壤种子库的垂直分布比较	(49)
第三节 不同立地类型废弃地土壤种子库多样性	(49)
一、尾矿砂阳坡缓坡土壤种子库的物种多样性	(49)
二、碎石夹微土阳坡缓坡土壤种子库的物种多样性	(50)
三、不同立地类型废弃地土壤种子库的物种多样性对比	(50)
第四节 土壤种子库与地上植被的关系	(51)
一、尾矿砂阳坡缓坡土壤种子库与地上植被的关系	(51)
二、碎石夹微土阳坡缓坡土壤种子库与地上植被的关系	(51)
第七章 矿山不同立地类型植被特征研究	(52)
第一节 棕壤阳坡缓坡植物群落植被特征	(52)
一、植物群落物种组成	(52)
二、植物群落物种多样性	(52)
三、植物群落物种生态位分析	(53)
第二节 不同立地类型废弃地植物群落物种变化分析	(54)
一、尾矿砂阳坡缓坡植物群落物种变化	(54)
二、碎石夹微土阳坡缓坡植物群落物种变化	(57)
三、裂隙裸岩及风化物阳坡陡坡植物群落物种变化	(60)
四、土石混合物阳坡缓坡植物群落物种变化	(63)
第三节 不同立地类型废弃地植物群落生物多样性变化特征	(66)
一、尾矿砂阳坡缓坡植物群落生物多样性变化特征	(66)
二、碎石夹微土阳坡缓坡植物群落生物多样性变化特征	(69)
三、裂隙裸岩及风化物阳坡陡坡植物群落生物多样性变化特征	(71)
四、土石混合物阳坡缓坡植物群落生物多样性变化特征	(74)
第四节 不同立地类型废弃地植物种群生态位分析	(76)
一、尾矿砂阳坡缓坡植物种群生态位分析	(76)
二、碎石夹微土阳坡缓坡植物种群生态位分析	(80)
三、裂隙裸岩及风化物阳坡陡坡植物种群生态位分析	(85)
四、土石混合物阳坡缓坡植物种群生态位分析	(90)
第八章 矿山废弃地自然恢复生态效应研究	(95)
第一节 植物群落特征及数量分类排序	(95)

一、自然恢复植物群落特征	(95)
二、自然恢复植物群落数量分类	(95)
第二节 植物群落的多样性及物种生态位研究	(99)
一、植物群落的 α 多样性特征	(99)
二、植物群落 β 多样性指数分析	(100)
三、植物群落主要种生态位分析	(100)
第三节 各类群落的土壤理化性质及植物对土壤改良效应研究	(103)
一、各类群落的土壤理化性质	(103)
二、物种自然侵入对矿山废弃地土壤改良效应研究	(103)
第九章 矿山废弃地人工恢复生态效应研究	(105)
第一节 植物群落特征及数量分类排序	(105)
一、人工恢复植物群落特征	(105)
二、人工恢复植物群落数量分类	(105)
第二节 植物群落的多样性及物种生态位研究	(109)
一、植物群落的 α 多样性特征	(109)
二、植物群落 β 多样性指数分析	(109)
三、植物群落主要种生态位分析	(110)
第三节 各类群落的土壤理化性质	(112)
第十章 研究结论	(114)
第一节 结论	(114)
第二节 深入研究建议	(116)
参考文献	(118)
附录 1 样方概况	(123)
附录 2 植物名录	(126)

第一章 矿山开采及其植被 恢复研究的现状

第一节 国内外矿山开采现状

矿山资源开采为人类社会经济的发展提供了丰富的矿物原料,极大地满足了社会经济发展的需要,带动了相关产业的发展,随着社会的发展,对矿产资源的需求还在不断增加(兰平等,2003)。矿山开采是人类改变地球表面景观和破坏地表生态系统的有组织的人为活动,矿产开采已有3000年以上的历史,但是对矿山生态系统的有序恢复还不足100年。由于矿山开采产生的尾矿、废弃地、废渣等都导致了巨大的生态环境影响(夏汉平等,2002)。

有色金属、采石、煤炭等矿山开采活动随着社会经济的的发展和城市化进程的加快而发展迅速,然而为经济发展做出了巨大贡献的同时也带来了一系列严重的生态环境问题。在英国每年有4000hm²的土地被用于采矿业,其中1400hm²为煤矿(露天或井工),1600hm²用于采砂业,600hm²用于黏土、白垩和石料开采。在1976年,50000hm²的废弃地有近一半来自矿业开采(Davis,1979)。据2000年度全国矿山企业矿产资源开发利用情况统计年表明,2000年度全国共有各类矿山企业(不包括海域石油和天然气)15.3万多个。根据《中国环境年鉴2003》的统计资料,2002年我国产生尾矿2.65亿t,煤矸石1.3亿t,冶炼废渣1.07亿t,累积工业固体废弃物贮存量63.4亿t。金属矿山开采、冶炼和加工产生的固体废弃物占工业固废总量的42.7%,非金属矿开采产生的固体废弃物占15.7%(刘国华等,2005;李明顺等,2005)。我国因矿产开采造成的废弃地在20世纪末约为300万hm²。

随着社会经济的发展,钢铁工业突飞猛进的快速发展,国内对铁矿石的需求大幅度增加。1996~2001年国内铁矿石产量年均递减2.97%,2001~2005年平均递增16.88%,2005年国内生产铁矿石40500万t,增长30.6%。对铁矿石的大量需求促进了一批矿山开采项目的上马,2005年正在建设和即将建设的生产规模达200万t的铁矿山就达15个之多(邹健,2006)。我国铁矿资源的特点是小矿多、大矿少且分布不均衡。全国已开发利用的铁矿山1079个,占已查明资源量的42.99%,可规划矿山353个,占已查明资源量的33.27%,难以利用的矿山550个,占已查明资源量的23.74%,通过数10年的发展,已形成了十大铁矿石生产基地:鞍钢—本溪、西昌—攀枝花、冀东—密云、五台—岚县、包头—白云鄂博、鄂东、宁芜、酒泉、海南石碌、邯郸—邢台地区(赵海燕,2007)。石料开采是城市建设材料的重要来源,据统计在广东省总计约有13000个采石场,涉及土地面积超过30000hm²(陈法扬,2002)。浙江省有采石场5000多个(汤惠君等,2004)。

1998 年英国受石灰石开采影响的土地面积是 $14\,000\text{hm}^2$ (Cullen *et al.*, 1998), 雅典目前近郊有 60 多个采石场, 占地达 200hm^2 (Damigos *et al.*, 2003)。

北京市矿产资源丰富, 固体矿产共有 65 个矿种, 矿产地 349 处。主要固体矿产包括煤炭、铁矿、金矿、钼矿、水泥用石灰岩、冶金用白云岩、溶剂用灰岩、制灰用灰岩、大理岩、建筑用砂等。矿种相对分布集中且分区明显, 铁矿主要分布在东北部山区, 而煤矿大部分产于西部山区, 有色金属则主要分布在北山一带, 各种用途的石灰岩分布于山区与平原交界的西部、北部山前一带 (李新玉, 2003)。矿业及其相关产业为北京市现代化建设和工业体系的建设做出了历史性的贡献, 为首都经济建设和区域经济发展发挥了重要作用。但是首都矿业面临严峻的形势, 矿产资源开发利用中存在问题与首都性质和地位不相适应。矿山开采造成了一系列的地质灾害和生态环境破坏问题, 矿山的“三废”已经成为重要的污染源, 造成了植被和生态景观的破坏。

根据 2003 年北京市 101 地质大队和北京市环境保护监测中心开展的“北京市矿山生态环境调查及防治对策研究”课题研究成果, 北京市固体矿山每年产生固体废物约 1100.3 万 t, 历年累计堆积量达 5.1491 亿 t, 矿山占地面积 516.87km^2 (李怀永, 2003)。

第二节 矿山开采的生态环境影响

矿山是原料和能源的生产基地。然而由于矿产资源的分布具有地带性, 大多深埋地下, 其采矿位置也具有固定性, 因此矿山开发不可避免地会造成土地占用和环境的破坏, 加上采矿过程中有毒矿业废弃物的排放, 产生了大量的废弃地, 形成了严重而持久的污染源。土地是最重要的自然资源之一, 是人类赖以生存和发展的物质基础。大量的矿业废弃地不仅占用和破坏了土地资源, 加剧了人地矛盾, 而且对矿山地质环境产生了巨大的影响, 严重者导致资源毁损、诱发地质灾害、污染矿区环境 (徐友宁, 2008; 徐友宁等, 2006)。因此, 加快矿业废弃地的治理, 实现区域生态经济的可持续发展, 已经成为环境生态研究的焦点问题。

一、植被景观破坏

露天开采必然破坏地表植被和剥离表土, 毁坏了植被和生态环境, 影响了矿山植被景观 (蒋承崧, 2004)。在一些自然保护区、风景名胜区、森林公园以及交通干线两侧的可视范围内都可以看到采矿留下的痕迹, 从而破坏了自然地貌景观, 影响了整个地区环境的完整性。采矿产生的废石堆放占压地表植被, 地表渣体裸露, 植被难以恢复, 矿山道路系统和尾矿库废弃地的建设运行使占地范围植被产生严重的损坏。

二、地质灾害隐患

矿山地下开采经常会出现地表塌陷、开裂、沉降现象。矿石采出后, 原岩应力平衡遭到破坏, 使围岩发生变形、位移、开裂和塌落, 甚至产生大面积移动。随着采空区不断扩大, 岩石移动范围也相应扩大, 当岩石移动扩大到地表时, 地表将产生变形和移动, 形成下沉盆地或塌陷坑, 局部出现断层和裂缝。地表坡度的改变, 破坏了地表物质的平衡临界

状态,容易出现裂隙、滑动,继而出现大面积的山体滑坡(武雄等,2008)。大型排土场废弃地、矸石山、尾矿库废弃地堆放的废弃物,由于堆放不当或遇到极端自然条件时,就会引发溃堤、垮坝、泥石流等灾害事故,造成严重的环境污染并威胁下游居民的生命财产安全。

三、地形地貌扰动

矿山开采过程中的开挖、剥离、废弃物的堆放将造成地表形态的改变。在基建过程中采矿作业平台、矿井挖掘、修建厂区道路、埋设管道及选矿厂、尾矿库废弃地的修建等都要挖、填大量的土石方,发生地貌重塑。运营期间采装产生大量废石,运往废石场堆置,废石场地形的影响较大。采空区开始塌陷时,采空区周围会出现裂缝、断层和陷落,会破坏原有土地景观,使其高低起伏,支离破碎,使矿山周围地形地貌发生较大的变化(武雄等,2008)。

四、水土流失加剧

矿山开采造成大面积的地表植被破坏、表土剥离,废土废石及尾矿等松散物质的堆积,由于植被破坏、废石堆放高度过高,遇到暴雨会产生面蚀、沟蚀,遇大风则会发生风蚀,造成的侵蚀量常常高出天然地貌条件下土壤侵蚀量的几倍。矿山开采最终导致水土流失加剧,使土壤肥力减退,同时也会影响地表水水质,对周边生态环境造成严重负面影响(张建彪等,2008)。矿山生产的各环节会产生很多粉尘,矿山废石场、尾矿库废弃地、运输道路等也会产生粉尘。这些粉尘在风力作用下逐渐在空气中弥散,造成沙尘飞扬,使空气能见度降低。

五、土地大量占用

矿山开采不可避免会占用并破坏了大量土地。矿体开采和基础设施的建设需要占用一定面积的土地,同时生产运行期间产生的废弃土石和尾矿均要占压大量土地。据国家统计局资料:1957~1990年,全国各项建设用地、弃地、浪费与因灾损失的耕地达42.73万 hm^2 ,矿山占地达49.1%。据统计,目前全国矿区废弃地面积达40000 km^2 ,并以每年330 km^2 的速度增加(李永庚等,2004)。造成矿山大面积占地的原因主要是露天采场及各类矿渣、工业垃圾堆置所致。由于矿山采矿活动长期挤占了大量的土地和农田,造成农田减产或绝收。

六、土壤、水体污染

矿山开采和选矿过程中会产生大量的废水、废矿、矸石和尾矿砂中常含有大量具有酸性、碱性、毒性或重金属成分的物质,这些物质可经雨水侵蚀、淋滤和长期风化,污染水、大气、土壤及生物环境。重金属污染是矿山废弃地普遍存在且最为严重的问题,特别是有色金属矿山废弃地常含有大量的有毒重金属。这些重金属能迅速向四周扩散并在土壤中积累,当积累达到一定量后就会对土壤植物系统产生毒害,不仅导致土壤退化,农作物产量和品质降低(唐文杰和李明顺,2008),而且还将通过径流和淋洗作用污染地表水和地下水(时红,2002)。

七、生物多样性降低

矿山开采对天然植被的砍伐、矿山废弃物中的有害物质对周围环境所造成的毒害和污染都严重摧毁了动植物和微生物的生存环境。水土流失与野生动植物生存环境的改变，地面沉降、土壤退化、水体污染，导致水生物资源系统的破坏，大气有害气体会使一些动植物变异或灭绝等都会严重导致生态系统的破坏和生物多样性的降低（张建彪等，2008）。矿山开采时对土地的扰动、机器的轰鸣、爆破的震动，动物和鸟类因受惊或生境改变而逃离矿山，植物和微生物因人为破坏或无法抵抗极端生境而繁殖能力降低或死亡。生物数量和种类减少，生物多样性急剧下降，生态平衡遭到严重破坏。

八、对地下水的影响

矿山由于疏干排水及废水废渣的排放，破坏了地下水均衡系统，导致区域性地下水位大幅度下降，造成地下水疏干漏斗，破坏了整个地下水均衡系统，使水资源短缺，泉水干枯。水环境发生变异甚至恶化，水资源逐步枯竭、河水断流，地表水入渗或经塌陷灌入地下，影响了矿山地区的生态环境。沿海地区的一些矿山因疏干漏斗不断发展，当其边界达到海水面时，易引起海水入侵现象。

由于矿山废弃地具有众多不良的理化性质，尤其是重金属含量过高，而有毒重金属在土壤系统中的污染过程又具有隐蔽性、长期性和不可逆性，因此常给周边地区地下水环境造成重大的影响。矿山雨水淋滤采矿堆积的尾矿砂，下渗进入地下含水层，均可以造成地下水的污染，废弃的坑道也可能成为地下水污染的通道。

第三节 国内外矿山废弃地生态植被恢复研究概况

一、矿山废弃地及其生态恢复

矿业废弃地是指为采矿活动所破坏的，未经治理而无法使用的土地。根据其来源可分为4种类型：一是由剥离的表土、开采的废石及低品位矿石堆积形成的废石堆废弃地；二是随着矿物开采形成的大量的采空区域及塌陷区，即开采坑废弃地；三是利用各种分选方法分选出精矿物后的剩余物排放形成的尾矿废弃地；四是采矿作业面、机械设施、矿山辅助建筑物和道路交通等先后占用后废弃的土地（Bradshaw，程志勤译，1990）。

目前，国内外关于矿业废弃地有多种定义，主要包括：从土地利用角度，矿业废弃地是指采矿、选矿和炼矿过程中被破坏或污染的因采矿活动所破坏的，非经治理而无法使用的土地（Gemmell，1977）。苏光全等（1998）认为矿山废弃地是指矿产开采及其相关产业生产建设占用和破坏了的、较难以被农业和其他生产活动所利用的土地资源。美国矿务局（USBN）将矿业废弃地定义为未经改造的闲置或废弃的矿山开采或者勘探活动的区域，这个地方可能包括：平硐、竖井、矿井、废石堆、尾矿、构筑物、道路、勘探活动以及其他与矿业开采和勘探活动有关的特征和扰动。矿业废弃地是一种严重退化的生态系统，其生态特点接近于裸地，对周围环境有着较大的负面影响（陈芳清等，2003）。

矿山废弃地生态恢复是指将受损生态系统恢复到接近于矿山开采前的自然状态,或重建符合人类某种有益用途的状态,或是恢复成与其周围环境(景观)相协调的其他状态。几乎在所有的情况下,开采活动的干扰都超过了开采前生态系统的恢复力承受限度,若任由采矿废弃地依靠自然演替(natural succession)恢复,可能需要100~10 000年(Bradshaw, 1997)。在废弃地生态系统的退化和自然恢复的过程与机理等理论研究的基础上,建立相应的技术体系,指导因采矿活动所破坏的生态系统的恢复。随着社会的发展,废弃地生态恢复的目的不同,给矿业废弃地的生态恢复赋予了不同的含义,其内涵也是一个不断完善和发展的过程。

二、国内外矿山废弃地生态恢复历史进程

矿山废弃地的植被恢复最早始于德国和美国(高国雄等, 2001), 这些国家早在20世纪初就开始对矿山土地进行复垦。德国是世界上重要的采煤国家(刘国华等, 2003), 年产煤量达2亿t, 以露天开采为主。德国政府从制定法律、确保恢复资金、重视科技等方面入手, 矿山废弃地的生态恢复工作取得了很大成绩。德国在20世纪20年代初开始对露天开采褐煤区进行绿化, 其发展过程大致经历了实验阶段(1920~1950年)、综合种植阶段(1951~1958年)、物种多样化和分阶段种植阶段(1958年以后)3个阶段。到1996年, 全国煤矿采矿破坏土地15.34万 hm^2 , 已经完成复垦、生态恢复的面积有8.23万 hm^2 , 恢复率达53.5%(李树志等, 1998)。

美国早在1918年就在印第安纳州煤矿的矸石堆上进行再种植试验。1939年以后, 美国西弗吉尼亚、印第安纳、伊利诺斯等39个州先后制定露天开采和土地复垦法, 使土地复垦逐步走上了法制轨道。根据美国矿务局调查, 每年平均采矿占用土地4500 hm^2 , 已有47%的废弃地进行了生态恢复, 20世纪70年代以来生态恢复率为70%左右(刘国华等, 2003)。英国在20世纪30~40年代就已开始这方面的研究, 但大规模、有计划、有目的的生态恢复研究工作也不过20多年历史。目前英国的许多度假休闲公园就是建立在早期矿山废弃地上, 并得到综合利用。前苏联也十分重视土地复垦工作, 早在1954年苏联部长委员会决议中就明确指出:“利用后的土地必须恢复到适宜农业利用或其他建设需要状态”。1960年各加盟共和国通过的《自然保护法》和1962年的部长委员会决议中更明确地要求进行土地复垦。在1968年的苏联宪法和1976年的部长会议决议中, 土地复垦法得以进一步发展。澳大利亚是铁矿石主要出口国之一, 采矿业是其主导产业, 矿山废弃地的土地复垦、生态恢复已经成为开采工艺和后续产业的重要组成部分(刘国华等, 2003; 李树志等, 1998)。此外, 日本、法国、加拿大等国在矿山废弃地的生态植被恢复方面也做了大量的工作(高国雄等, 2001)。

我国矿山生态环境修复工作始于20世纪50年代, 起初往往是个别矿山自发进行的一些小规模修复治理工作; 20世纪50~70年代, 该项工作还处于自发探索阶段; 进入20世纪80年代, 才被真正得到重视, 从自发、零散状态转变为有组织的修复治理阶段。特别是1988年颁布《土地复垦规定》和1989年颁布《中华人民共和国环境保护法》, 标志着矿山生态环境修复走上了法制化的轨道。这项工作在我国尽管起步较晚, 但发展十分迅速。

总的来看我国的矿地复垦率呈逐年上升的趋势(彭少麟, 2003)。在20世纪80年代

初,复垦率在0.7%~1%左右,80年代末期为2%左右,90年代初为6.67%,到1994年达13.33%(束文圣等,2000)。1990~1995年全国累计恢复各类废弃土地约53.3万 hm^2 ,其中1526家大、中型矿山恢复废弃地约为4.67万 hm^2 ,占全国累计矿山废弃地面积的1.62%。

我国矿山废弃地的生态恢复工作主要经历了4个阶段:①20世纪50~60年代,以实现矿山土地可进行农业耕种为目标的植被恢复。②20世纪70~80年代,以矿山土地资源稳定与持续利用为目标的环境工程恢复工作。③20世纪90年代,在矿山废弃地基质改良方面更多地强调了生态学理论的运用。④进入21世纪以来,以矿山生态系统健康与环境安全为目标的生态恢复。

三、国内外矿山废弃地生态恢复理论与技术研究进展

生态系统一般具有很强的自我恢复能力和逆向演替机制,即使在植被完全破坏的情况下,生态系统都有可能实现自我恢复(陈波等,2003)。但是,由于矿业废弃地极端恶劣的环境条件,其受损生态系统自我恢复很难实现或实现过程漫长。自然条件下废弃地的土壤恢复往往要花费数十年以上的时间,从裸地到草地再到灌丛与森林的生态恢复过程一般则需要数十年到数百年的时间来完成。因此,通过人工采取生态恢复措施来加快废弃地植被的生态恢复是废弃地治理的必然选择(陈芳清等,2004)。在极端困难的矿山立地类型进行人工生态恢复,首先要克服矿山废弃地的限制性因子,开展相关技术研究,使矿山废弃地受破坏的生态植被系统得以快速、科学的恢复。

国内外近年来矿山废弃地生态恢复技术研究领域主要集中于以下几个方面:

1. 矿山生态植被恢复制约性因子研究

废弃地如果存在不利的pH值、盐浓度或者高浓度毒性的重金属离子,那么即使对废弃物添加各种主要养分(N、P、K)也不能促进植物生长(Gemmel, 1977)。Martínez-Ruiz等(2005)研究了坡向对露天矿废弃物土壤自然恢复的影响,认为北坡的植被演替速度较快。Martínez-Ruiz等(2001)在西班牙中部地区还研究了基底的粗糙程度和坡向对铀矿废弃物上的植被演替影响,认为在北坡和破碎化的废弃物上的植被演替要更快。束文圣等(1997)认为尾矿的重金属毒性尤其是有效态Zn和Cd的毒性是铅锌尾矿影响植物定居的限制性因子。陈芳清等(2001)对磷矿废弃地植物群落的形成与演替进行了研究,认为随着废弃地植物群落的形成与演替过程中植物成分有所消长,并且在磷矿废弃地植被中几种优势种植物的生长和分布与土壤速效磷浓度存在着显著的负相关性。光照和水分是安太堡矿山植被恢复进程中起决定性作用的限制性因子,二者当中由于光照不受人为控制,所以矿山在物种的选择和种类配置时将水分作为主要因子考虑(郭道宇等,2004)。

2. 矿山土壤基质改良研究

土壤作为植物生长的基础,理化性质和营养状况是生态恢复与重建成功与否的关键。在生态环境恢复与重建的过程中,研究用于废弃地基质改良的复垦材料和土地整理技术是非常重要的。影响植物生长的土壤条件主要有3种,分别是物理条件、某些营养物质的缺乏和毒性(Bradshaw, 1997)。聂湘平等(1998)在研究锌对大叶相思(*Acacia auriculaeformis*)及其根际微生物的影响时发现,根瘤菌对锌的耐受力明显高于寄主植物,能够有