

【水土保持与荒漠化防治系列专著】



矿业废弃地 生态恢复材料与应用技术研究

杨建英 赵廷宁 赵方莹 王夕刚 苗世龙/著



科学出版社

水土保持与荒漠化防治系列专著

矿业废弃地生态恢复材料 与应用技术研究

杨建英 赵廷宁 赵方莹 王夕刚 苗世龙 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从保水剂生态恢复材料、煤炭燃烧废弃物生态恢复基质材料、煤矸石粉碎物生态恢复绿化基质配比、矿业废弃地裸露边坡喷播绿化基质、矿区种植槽基质配比、矿山边坡生态恢复苔藓的筛选及应用、矿业废弃地植被分布与植物种选择 7 个方面阐述矿业废弃地生态恢复材料与应用技术,研究成果在生态环境建设的各个领域有着极其广泛的应用前景。

本书既可供土地整理、矿山生态环境综合整治、矿山植被恢复、工程绿化以及开发建设项目水土保持领域的科研、生产、教学人员参考,也可作为环境学相关专业在校本科生、研究生学习及参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

矿业废弃地生态恢复材料与应用技术研究 / 杨建英等著. —北京:科学出版社,2011

(水土保持与荒漠化防治系列专著)

ISBN 978-7-03-032424-5

I. ①矿… II. ①杨… III. ①矿山-生态环境-环境治理-研究 IV. ①X322

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 196048 号

责任编辑:朱 丽 贺窑青 / 责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬 / 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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 10 月第一次印刷 印张:14 1/2

印数:1—1 200 字数:328 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛 书 序

水土流失与荒漠化直接关系到国家生态安全。严重的水土流失与荒漠化是生态恶化的集中反映,已成为我国生态环境最突出的问题之一。水土流失与荒漠化不仅导致土地退化、毁坏耕地,制约山区社会经济发展,使人们失去赖以生存的基础,而且加剧江河湖库淤积和洪涝灾害,加剧贫困,威胁国家粮食安全和生态安全;这不仅影响当代社会的发展,而且影响子孙后代的生存。因此,加强水土保持与荒漠化防治基础理论研究,找出科学合理的防治方法与措施,开展生态环境建设、资源与社会可持续发展的理论研究与实践,已成为关系国家生态安全和社会可持续发展的当务之急。

《水土保持与荒漠化防治系列专著》是在北京林业大学“985”优势学科创新平台“脆弱生态系统退化机制与恢复重建”和“211”工程(三期)的资助下编写出版的,分册相对独立,以水土保持与荒漠化防治基础理论与水土流失和荒漠化综合防治实践为基础,从不同角度、综合反映了研究团队新的科研成果。该系列专著以土壤侵蚀动力学过程及其机制、生态水文过程与调控、植被力学过程与调控、土壤风蚀过程与防控、水土流失区林草植被快速恢复与生态修复关键技术、开发与建设城市化损毁土地生态系统快速恢复与重建技术等为主要研究内容,系统反映了在长期水土保持荒漠化防治实践中积累的丰富防治经验,有针对性地提出了我国水土保持荒漠化防治生态建设面临的主要问题的防治对策,为今后进一步加强水土保持荒漠化防治研究奠定了坚实的基础。

该系列著作的内容均为水土保持与荒漠化防治研究领域的热点问题,引领了该学科的发展方向,在理论框架、新方法和新技术方面做了很多开创性的工作,在推动水土流失与荒漠化防治综合防治关键技术研究方面进行了有益的探索,对我国进行水土保持与荒漠化防治综合管理研究起到了积极的推动作用。

该系列著作不仅为地学、生态学、环境学、土壤学等学科的科研和教学工作提供有益的参考,也是我国水土保持与荒漠化防治生态建设相关技术人员、行政管理人员的一套好的参考书。该系列著作的出版,无疑将对我国水土保持与荒漠化防治生态建设的深入开展起到积极的推动作用。

中国工程院院士

李文华

2011年5月

前 言

2007年全国矿山企业矿产资源开发利用情况统计年报显示,2007年我国共有各类非油气矿产企业124 930个,其中又以煤炭、建筑采料矿产企业最多,小型矿产企业占总矿产企业的90%以上。矿产资源的开发利用,为社会经济发展提供了重要的原材料和能源,对经济与社会发展产生了巨大的推动作用。但是,矿产开采对土地及环境的破坏也是相当严重的。采矿活动及其废弃物的排放不仅破坏和占用了大量的土地资源、日益加剧人地矛盾,而且也带来了一系列诸如植被破坏、空气污染、水体污染、土壤污染、土地退化、景观破坏和生态系统失调等一系列影响深远的环境问题,进而制约了当地的社会与经济发展,危害人体健康。

环境与发展是当前国际社会普遍关注的重大问题,而人类生产活动和经济增长所依赖的重要手段——矿产资源开发利用所引起的生态、社会及经济等问题又是环境与发展问题的焦点之一。世界各国都在积极寻求有效解决矿山环境综合整治的方法和措施,矿业废弃地植被恢复与重建作为其中的重要措施,对国土资源的合理利用与生态环境保护具有重要意义。目前,矿业废弃地的植被恢复与重建及复垦,已成为我国当前所面临的紧迫任务之一,也是我国实施可持续发展战略应优先关注的问题之一。

在这种背景下,我们先后组织实施了“矿业废弃地生态恢复材料与应用技术研究”课题,申请执行了林业公益性行业科研专项“建设工程损坏林地植被修复关键技术与示范(200904030)”项目,就“保水剂生态恢复材料”、“煤炭燃烧废弃物生态恢复基质材料”、“矸石粉碎物生态恢复绿化基质配比”、“矿业废弃地裸露边坡喷播绿化基质”、“矿区种植槽基质配比”、“矿山边坡生态恢复苔藓的筛选及应用”、“矿业废弃地植被分布与植物种选择”7个方面的问题进行了研究。本书就是在系统总结“矿业废弃地生态恢复材料与应用技术研究”成果及“建设工程损坏林地植被修复关键技术与示范”部分成果的基础上形成的,这些研究成果在生态环境建设的各个领域有着极其广泛的应用前景。

本书既可供土地整理、矿山生态环境综合整治、矿山植被恢复与绿化、边坡绿化以及开发建设项目水土保持领域的技术人员参考,也可作为环境学相关专业在校本科生、研究生学习及参考用书。

在课题研究过程中,张华、李一为、黄栋学、岳焕丽、张国芝等研究生参与完成了大量工作,本书出版由北京林业大学教育部水土保持重点实验室出版基金资助,在此一并表示衷心感谢。

鉴于作者水平有限,许多技术问题还有待进一步研究,书中难免有疏漏不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者
2011年8月

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 主要研究内容	2
1.3 研究概述	4
1.3.1 煤矸石山植被恢复基质改良研究	4
1.3.2 客土喷播及喷播绿化基质研究	8
1.3.3 边坡生态恢复中苔藓的资源利用研究	10
1.3.4 矿山废弃地植被演替与植物种选择研究	11
1.4 研究区域概况.....	15
1.4.1 地理位置及地形地貌	15
1.4.2 气候	15
1.4.3 土壤	15
1.4.4 植被	15
参考文献	16
第 2 章 保水剂生态恢复材料试验研究	18
2.1 试验研究方法.....	18
2.1.1 试验材料与设备	18
2.1.2 试验设计及方法	19
2.2 试验结果分析.....	20
2.2.1 不同保水剂不同用量水平对土壤水分蒸发量的影响	20
2.2.2 不同保水剂不同用量水平对试样出苗率的影响	21
2.2.3 不同保水剂不同用量对试样土壤硬度的影响	21
2.3 结论.....	23
参考文献	23
第 3 章 煤炭燃烧废弃物生态恢复基质材料试验研究	25
3.1 试验研究方法.....	25
3.1.1 试验材料.....	25
3.1.2 试验方法.....	26
3.1.3 观测指标.....	27
3.2 结果与分析.....	27
3.2.1 基质理化性质分析	27

3.2.2 植物生长指标分析	28
3.3 结论	30
参考文献	31
第4章 煤矸石粉碎物生态恢复绿化基质配比试验研究	32
4.1 研究目的及技术路线	32
4.2 试验研究方法	33
4.2.1 试验材料	33
4.2.2 试验方法	34
4.2.3 试验方案	34
4.3 结果与分析	36
4.3.1 基质理化性质分析	36
4.3.2 草本植物生长状况分析	41
4.3.3 灌木生长状况分析	50
4.3.4 基质对植物适宜性的综合分析	55
4.4 基质施用后效益分析	58
4.4.1 经济效益分析	59
4.4.2 生态效益分析	61
4.5 结论与讨论	61
4.5.1 结论	61
4.5.2 讨论	62
参考文献	62
第5章 矿业废弃地裸露边坡喷播绿化基质试验研究	64
5.1 研究目的及技术路线	64
5.2 盆栽试验	65
5.2.1 试验评价指标与试验因素的选择	65
5.2.2 试验材料与分组	65
5.2.3 试验方法	66
5.2.4 试验结果与分析	67
5.2.5 最优基质配方筛选	99
5.2.6 试验结果综合分析	106
5.3 人工模拟降雨侵蚀试验	106
5.3.1 试验设备及材料	107
5.3.2 试验分组	108
5.3.3 试验方法	108
5.3.4 结果与分析	110
5.4 结论	120
参考文献	122

第 6 章 矿区种植槽基质配比试验研究	124
6.1 技术路线	124
6.2 盆栽试验	125
6.2.1 试验材料及研究方法	125
6.2.2 结果与分析	129
6.2.3 各基质试样合理配比综合分析	150
6.2.4 小结	157
6.3 野外试验	158
6.3.1 廊涿高速中央分隔带立地条件分析	158
6.3.2 主要材料配比	160
6.3.3 植物生长情况	161
6.3.4 小结	164
6.4 结论	165
参考文献	166
第 7 章 矿业废弃地边坡生态恢复苔藓的筛选及应用研究	167
7.1 研究技术路线	167
7.2 实验材料与内容	168
7.2.1 试验藓种	168
7.2.2 仪器与药品试剂	168
7.2.3 土壤基质材料	169
7.2.4 植物材料	170
7.2.5 试验研究方法	171
7.3 结果与分析	174
7.3.1 野外调查结果及分析	174
7.3.2 苔藓在不同湿度下的生长情况	174
7.3.3 基本培养基筛选	176
7.3.4 最适土培基质筛选	177
7.3.5 耐旱藓种土培基质筛选	177
7.3.6 扩大繁殖材料培养	184
7.3.7 野外喷播试验结果分析	187
7.4 结论	192
参考文献	193
第 8 章 矿业废弃地植被分布规律与植物种选择	195
8.1 研究技术路线	195
8.2 研究方法	195
8.2.1 野外调查	195
8.2.2 数据处理与分析	196
8.3 结果与分析	197

8.3.1 矿业废弃地立地条件划分	197
8.3.2 北京地区矿业废弃地植被聚类分析	198
8.3.3 不同立地条件下的植被分布	200
8.3.4 不同生态恢复年限废弃地的植被状况	205
8.3.5 废弃地周边未破坏地的优势种分布	209
8.3.6 不同海拔废弃地的植被状况	210
8.4 结论	218
参考文献	219

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

根据 2007 年全国矿山企业矿产资源开发利用情况统计年报,2007 年全国共有各类非油气矿产企业 124 930 个,以煤炭、建筑采料矿产企业最多,小型矿产企业占总矿产企业的 90%以上。到 2000 年,全国矿区累计破坏的土地面积已达 288 万 hm^2 ,并且每年以大约 4.67 万 hm^2 的速度增长。煤矿开采破坏的土地最为严重,据不完全统计,仅大中型煤矿就已占地 16 200 万 hm^2 (束文圣等,2000)。煤炭开采引起的塌陷地面积高达 233 万 hm^2 ,并且每年仍以 2 万~2.67 万 hm^2 的速度继续增长,采煤过程中排放的煤矸石、粉煤灰等固体废弃物累计达 $7.40 \times 10^8 \text{t}$,占压耕地 1.33 万~2.00 万 hm^2 (何书金和苏光全,2002)。铁矿方面,目前已建成的铁矿产量上亿吨,其中露天矿占 90%,年剥离土岩量在 2 亿 t 以上。有色金属工业每年排放的固体废弃物达 6000 多万吨,累计堆存量已达 10 亿 t,占用土地 7 万多公顷。采矿业中各类型占地的分布情况:采矿活动本身占 59%、排土场占 20%、尾矿占 13%、废石堆占 5%、塌陷区占 3%。

环境与发展不仅在我国也是当前国际社会普遍关注的重大问题,而人类生产活动和经济增长所依赖的重要手段——矿产资源开发和利用所引起的生态、社会及经济等问题又是环境与发展的焦点问题之一。采矿活动及其废弃物的排放不仅破坏和占用大量的土地资源,日益加剧我国人多地少的矛盾,而且矿山废弃物的排放和堆存也带来了一系列如土地退化、生态系统和景观受到破坏、侵占土地、污染环境等影响深远的环境问题,进而制约了当地的社会、经济发展,也危害到人体的健康。因此,矿业废弃地的复垦已成为我国当前所面临的紧迫任务之一,也是我国实施可持续发展战略应优先关注的问题之一。矿产资源的开发利用,既为经济发展提供了重要的原材料和能源,对经济发展起到巨大的推动作用,同时由此而产生的空气污染、水体污染、土壤污染和土地荒漠化等也对环境产生了重大影响。不仅在我国,随着世界各国工业化进程的加快,环境污染和破坏造成的土地废耕、工业废弃地、生态系统失调等环境问题已成为当今制约社会、经济发展,威胁人类生存的重大问题。为此,世界各国都在积极寻求有效地解决这些问题的方法和措施,而矿业废弃地的植被恢复与重建对国土资源合理利用及生态环境保护均有重要意义。

我国矿业废弃地的生态恢复工作始于 20 世纪 50 年代末,但由于社会、经济和技术等方面的原因,直到 80 年代这项工作基本还处于零星、分散、小规模和低水平的状况。1988 年我国颁布了《土地复垦规定》,使我国采矿废弃地的生态恢复工作步入了法制化轨道,其恢复速度和质量均有较大的提高。据统计,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、中型矿区恢复废弃地约 4.67 万 hm^2 ,占全国累计矿区废弃地面积的 1.62%,但对 389 座乡镇矿区的调查表明,乡镇小型矿区对土地破坏十分严重,

生态恢复率几乎为零。总体上,我国各类矿山废弃地生态恢复工作仍处于初期阶段。国外的矿业废弃地生态恢复技术研究和实施工程起步较早,特别是在欧、美等一些发达国家已有几十年的历史,其基础研究起点可追溯到 19 世纪末期,大规模的生态恢复工程在 20 世纪中期普遍展开,并在施工技术、土壤改造、政策法规、现场管理等领域取得了大量成果和成功的经验,且各具特色。

我国矿业废弃地面积大、种类复杂,目前有 80% 的矿业废弃地尚未修复(束文圣等, 2000),无论是研究领域还是生产领域都面临诸多难题。矿业废弃地生态恢复目前所面临的主要问题有以下几个方面:

(1) 因大量开挖形成的矿业废弃地其土壤物理性状较差——缺肥、缺水,氮、磷及有机质含量很低,造成土地贫瘠、植被退化,最终导致矿业区大面积人工裸地的形成,极易被雨水冲刷,加剧水土流失的发生,生态恢复难度大。

(2) 地面及边坡开挖影响了山体、斜坡的稳定,往往致地面塌陷、开裂、崩塌和滑坡等频繁发生。

(3) 矿区废渣主要来自采矿、选矿过程中的废石、煤矸石和尾矿,“三废”造成的土壤污染、水体污染、空气污染严重,主要污染有:①地下及露天采矿在生产中会产生大量的如 CO 、 CO_2 、 NO_2 、 SO_2 、 H_2S 等有毒有害气体,选矿生产过程中产生的大量粉尘和有毒物质;②矿区运输产生的富含重金属物质的废气、矿山工厂燃煤产生的浓烟及有害物质;③废石、煤矸石和尾矿堆积,其淋洗物直接进入土壤,并随降雨渗流进入地下水,随降雨径流进入地表水,使土壤和水体遭受严重污染。

(4) 重金属污染严重。矿业废弃地一般都存在重金属污染问题,稍多量的铜、铅、锌等就能完全阻止植物生长,矿区废弃地遭受污染后,生态恢复困难。

(5) 植被破坏严重。矿区森林植被的破坏主要是由于矿区工业广场的建设、矸石堆放、开山修路、地面塌陷与露天采矿剥离引起的。矿区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,它的破坏使矿区土地及其临近地区的生物生存条件同时也遭受破坏,生物量减少,生态系统结构受损、功能及稳定性下降,引起水土流失和沙漠化。

1.2 主要研究内容

针对矿业废弃地生态恢复中存在的主要问题,本书主要进行了以下 7 个方面的研究。

1) 保水剂生态恢复材料试验研究

针对矿业废弃地土壤破坏程度严重、土壤水分大幅度减少,造成植物生长环境极为干旱等问题,采用两种新型保水剂进行对比试验,研究不同保水剂的保水性能、对土壤物理性质的改善情况及施用不同保水剂植物的生长效果。

2) 煤炭燃烧废弃物生态恢复基质材料试验研究

充分利用煤炭燃烧废弃物炉渣和粉煤灰,同时添加秸秆,经混合配比后得到的基质,通过测定各基质的理化性质,并测定植物的出苗率、成活率和生物量,从而得到最优基质

配比,将其作为覆盖物,既可为废弃矿山的生态恢复提供优良的土壤基质,同时也可变废为宝,减轻煤炭燃烧废弃物对生态环境的污染。

3) 煤矸石粉碎物生态恢复绿化基质配比试验研究

将煤矸石的粉碎物作为煤矸石山绿化基质的主要组成部分,同时添加不同比例的土壤、保水剂、缓释肥和菌肥,组成混合基质,测定混合基质的理化性质、保水性能,观测分析植物的成苗率、地上生物量、地下生物量、地径、苗高等指标,确定最优基质配比。进一步研究应用该配比基质和采用一般基质对煤矸石山改良效果的差异、用该基质后可以节约的成本及在改善生态效益方面的效果。

4) 矿业废弃地裸露边坡喷播绿化基质试验研究

针对矿业废弃地裸露边坡添加喷播绿化基质后的植被恢复能力及土壤侵蚀情况,选出几种新型绿化基质材料并按不同的用量混合,对不同配比喷播绿化基质的功能和特性(基质容重、自然含水量、孔隙度、水分常数、有机质、pH、氮磷钾含量等指标)进行测定和分析;通过盆栽试验测定喷播绿化基质的保水性,高羊茅(*Festuca arundinacea*)和紫花苜蓿(*Medicago sativa*)的出苗时间、出苗率、生长高度、生物量等指标,分析保水剂、鸡粪、草炭土、土壤、秸秆和速效肥的用量及比例对各项指标的影响;通过人工模拟降雨侵蚀试验测定边坡的土壤流失量,分析黏合剂用量、雨强、坡度和植被对坡面土壤流失量的影响;对各试验指标进行正交试验的极差、方差分析,通过综合评分法得出喷播绿化基质的最优配方及各影响因素的主次顺序。

5) 矿区种植槽基质配比试验研究

以改善种植槽植物生长的土壤环境为目的,将有机无机复合肥、秸秆、液态地膜和保水剂4种物质应用正交试验设计方法进行试验设计,应用盆栽方法种植高羊茅和紫穗槐,通过观测基质的保水性、水平收缩性、土壤流失量,以及高羊茅和紫穗槐的生长指标(出苗率、生长高度、总生物量),分析判断得出种植槽最优基质类型和最佳基质配比。同时对紫穗槐植物进行水分生态研究,并通过野外试验验证盆栽试验结果。可为工程实践提供技术方法和科学理论依据。

6) 矿业废弃地边坡生态恢复苔藓的筛选及应用研究

苔藓具有边坡生态恢复植物材料期望的多重特征,但苔藓至今未真正作为生态护坡的重要植物材料而加以利用。选取北方生长有苔藓的工程废弃边坡,调查分析苔藓植物的组成与生长状况,采集苔藓种作为初代藓种进行耐旱试验。对经过耐旱试验培养后的第一代苔藓按照组织培养、土壤培养炼苗、大量扩繁的技术路线,应用正交设计,进行最适培养基研究、最佳培养基质筛选及最佳培养条件的确定。将乡土草种与商品草种混合喷附于岩体上,将扩大培养后的二代苔藓——真藓(*Bryum argenteum*)、丛生真藓(*B. caespitium*)、混配苔葫芦藓(*Funaria hygrometrica*)、刺叶墙藓(*Weisiopsis anomala*)培养后在温度5~20℃、相对湿度80%的环境下保存备用,以不同的组合及配比量与乡土草种混合喷附于岩体上,研究苔藓联合乡土植物在常规植物生长困难地上的应用可行性和最佳配比。

7) 矿业废弃地植被分布规律与植物种选择

以矿业废弃地植被为研究对象,在划分立地条件的基础上,对不同立地条件植被进行

详细调查。运用组间联结法和欧几里德直线距离平方度量法,并采用 SPSS 软件,对研究区域植物群落进行聚类分析,研究不同立地条件下植被的分布规律。按照恢复年限不同进行分段,计算各恢复年限段每个植物种的多度、频度、相对密度、相对频度、相对显著度、重要值和生态位宽度 B_i 值,研究不同生态恢复年限的植被分布规律,最后将每个年限划分段的植被与周边未经破坏地的植被进行相似性分析。对研究区域矿业废弃地生态恢复过程中的植被优势种种间相关性和优势种的生态位宽度进行分析。最后提出不同立地类型、不同海拔高度、不同恢复年限条件下矿业废弃地生态恢复的植物配置模式。

1.3 研究概述

1.3.1 煤矸石山植被恢复基质改良研究

煤矸石是煤炭开采、洗选及加工过程中排放的废物,约占煤炭产量的 15%。目前,我国煤矸石的综合利用率仅为 30%,除少部分被用于生产建筑材料或供热发电外,更多的煤矸石堆置于矿井周围,而且以每年 1.5 亿~2.0 亿 t 的速度递增,压占耕地面积每年以 300 万~400 万 m^2 的速度持续增加。煤矸石长期堆放,其表面会产生风化,被雨水淋洗后会产生酸性废水并携带重金属离子渗入地下,煤矸石中还有其他物化反应发生及氟、氨等成分析出,由此对土壤和地下水造成污染。同时煤矸石表面容易吸热,造成煤矸石表面温度升高,导致植被恢复困难。自燃的煤矸石山会带来更加严重的环境污染,并对人的生命及财产产生严重危害,煤矸石已成为我国各种工业废渣中排放量最大、占地最多、污染较严重的固体废物。因此,进行煤矸石废弃地植被恢复,无论从合理利用土地资源角度还是从环境保护角度,都迫在眉睫。

矿山废弃地的植被恢复一直是国内外研究的热点和难点,煤矸石山植被恢复已经成为废弃地植被恢复研究中的重要内容,在煤矸石生态恢复的植被重建过程中,基质改良是主要问题,也是煤矸石废弃地生态恢复中的核心问题。煤矸石废弃地基质改良的材料和方法很多。由于受纬度的影响,不同地区治理煤矸石山的措施略有不同。例如,在福建等地的煤矸石山就可以不用覆盖而直接播种,直播植物种以草本为主,生长良好;而在华北地区直接播种效果差,保存率低,植物难以正常生长。从长远来看,生态恢复是一种长期有效的废弃地治理措施。但是对于短期目标,必须还要用一些短期、快速的改良措施,以保证一个良好的生态恢复效果。

用于改良煤矸石地土壤的材料极其广泛,如表土、化学肥料、有机废弃物、绿肥、固氮植物及作物的秸秆等(陈建平等,2005;束文圣等,2001)。在国外,废弃地土壤治理的方法主要有以下几种。①覆盖土壤:煤矸石地恢复最简单的办法就是覆盖土壤,但覆盖土壤的费用很高,因此在具体实践中恢复的程度取决于投入的费用,在经济条件较好、环保意识较强的地区较容易做到(戚家忠等,2002)。②物理处理和化学处理:一般情况下,更换或覆盖土壤,其费用过高,还会因异地挖土产生严重的二次水土流失。因此,实践中还经常采用整治煤矸石地土壤理化性质的方法,以期改善植物的生长条件,如挖松紧实的土壤、整理土壤表面。煤矸石地 pH 太低时,向土壤中添加碱性物质以调整土壤的 pH 等。

③添加营养物质:一般煤矸石地缺乏氮、磷等营养物质,是植物生长的限制因子之一,解决此类问题的主要方法是添加肥料或利用具有固氮能力的豆科植物,尤其利用固氮植物和菌根植物改良废弃地是经济效益与生态效益俱佳的方法。④去除有害物质:在煤矸石地生态恢复过程中,有害物质的毒性对植物的生长起着严重的阻碍作用,如在重金属污染严重地区,所能生长的植物仅仅是那些耐重金属污染的植物种,因此,此类煤矸石地生态重建的前提是先锋植物必须为重金属忍耐种并施加肥料。近年来耐重金属污染植物种的筛选及其蕴藏的基因资源受到科学界的普遍关注,人们开始利用现代生物技术克隆耐重金属污染的基因,试图培育出适于在重金属污染土壤上生长的植物种类(束文圣等,2001)。⑤添加植物种:在煤矸石地恢复过程中,通过人工选择植物种,使土壤的物理化学性质得到改良,从而缩短植被演替的进程,加快废弃地的生态重建进程(束文圣,2000;莫测辉等,2001)。在添加植物种时,最先添加的植物种往往按草本—灌木—木本植物的顺序进行,其中豆科植物的添加起着关键性的作用(Sklenicke and Lhota,2002)。

1.3.1.1 物理法改良基质

1) 表土转换、覆盖表土

表土转换、覆盖表土主要针对重金属污染严重且多集中于地表数厘米的较浅土层,挖去污染层,用无污染客土盖于污染土之上,以此隔离重金属对植物生长的危害,促进植物生长,增加生物量,保证成活率。此法需耗费大量劳动力,并需有丰富的客土资源为条件。霍宗宝等(1995)通过在煤矸石表面分别覆盖 10cm、20cm、30cm、50cm 厚的土壤,种植大豆和番茄进行试验,结果表明,大豆和番茄的产量随着覆土厚度的增加而增加。综合考虑以覆土 30cm 为宜。段永红等(1999)的研究表明,在覆土 10cm 和 20cm 两种处理中,牧草根系分布有所差异。两种处理方法豆科牧草根系下扎达 70~80cm,根长约 1m,在土层与煤矸石层分界处附近的土层中,豆科的主根迅速由粗变细,支根细并产生畸变。两种处理方法相比,覆土 20cm 较覆土 10cm 有更多的根系分布,但根系不易扎入煤矸石层。作为对照的未覆盖区,禾本科和豆科根系下扎深度都较大,分别达 35cm 和 1.2m,禾本科根系集中分布于 25cm 以内,且根毛明显增多;而豆科根系集中分布于 40cm 以内,下层根量也明显增多,且根系发育正常,无粗细突变现象。由此可知粗粒煤矸石会促使根毛增多,以扩大根系的吸收面积,这是煤矸石层根系发育的特征。覆土 3cm 小区(薄层覆盖区)根系分布状况与对照区相同,而植被覆盖率明显高于对照区,产草量与厚层覆土区相近。由试验可知,覆盖后,植物抗逆性下降,根下扎深度变浅,多集中分布于覆盖层中,并呈水平伸展,因而不利于深层水分和养分的吸收。覆土区则有较多的根系扎入煤矸石层,扎入煤矸石层的根系由覆土 20cm、10cm 到 3cm 依次递增,且覆土 3cm 小区的根系绝大部分扎入煤矸石层。

冯金生等(1995)在阳泉煤矸石山种植大面积的牧草,通过对牧草根系的研究,观察得出覆盖黄土小区特别是覆盖焦土后,黄土层上的牧草,发现几乎所有的根系都集中分布在黄土层内,上浮于煤矸石层上而不向下扎根。在干旱高温季节煤矸石层严重影响了地上生物量及植物的正常生长。煤矸石风化小区的牧草,为了适应其贫瘠的立地条件,滋长了比在黄土中要强大好几倍的根系,且根系深深扎进了煤矸石深处,但是亩产量低、成活率

低。在煤矸石山上种植牧草要在地面上覆盖厚度为 2~5cm 的黄土层,它除能为种子发芽、幼根生长提供较好的立地条件外,还可以降低地表温度,从而提高幼苗在煤矸石山上的出苗率。整体上看,豆科牧草在成苗率、覆盖度、生长势(产量)均高于禾本科牧草。混播比单播的长势好、长草量高。覆盖黄土,草种均可以出苗、开花、结实。不覆盖黄土,一般出苗较困难,成活率低,一旦出苗,覆盖面积大,生长健壮。

2) 覆盖淤泥

一些研究表明,污泥在改良煤矸石基质中有很好的效果,主要体现在:施用污泥与施氮肥相比产量差异达极显著水平。污泥的不同用量造成的产量差异不显著,化肥的不同用量其产量差异也不显著。煤矸石风化物所含植物必需的肥料三要素(氮、磷、钾)有效养分极度贫乏,即使施用磷、钾肥料进行对照处理,产量也无明显变化,增施氮肥和污泥后,产量有明显增加,因为污泥中含有丰富的氮、磷、钾植物营养物和植物所必需的其他微量元素等。此外,污泥具有可流动性,可有效填堵由于表层煤矸石风化造成的大孔隙。

为寻找更有效的煤矸石山绿化技术,阳泉矿区在煤矸石山进行了覆盖污泥绿化试验,结果表明该技术可有效减少覆盖层的运输环节,降低覆盖绿化成本和污水处理厂的处理成本,提高废物利用率,减少二次污染,同时可提高煤矸石山表层保水性能及肥力,确保灌溉需求,可全面改善绿化植物的生长环境。但也存在有害病菌的处理,输泥管道堵塞等问题。吕珊兰通过覆盖淤泥,研究煤矸石山上植物的生长状况。武冬梅等(1998)通过盆栽试验进行研究分析,认为污泥作为一种有机肥料,不仅可使苇状羊茅产量增加,煤矸石山肥力提高,更重要的是污泥可作为丰富的微生物库源,使煤矸石山微生物区系更好地建立起来,促进其养分的转化,尽快形成有机养料库,使煤矸石风化物的养分容量与供应强度提高,最终建成一个可自我维持植被生长的循环系统,从而实现煤矸石山的生态重建。

3) 覆盖粉煤灰

粉煤灰是一种高分散度的固相集合体,其颗粒形态主要为非晶质相的空心微珠、无定形的碳粒、不规则的玻璃体及其他矿物碎屑。矿物组合中除一部分未燃尽的细小碳粒外,大部分是 SiO_2 和 Al_2O_3 的固熔体,另有石英、方解石、钙长石、赤铁矿、磁铁矿及莫来石,还有一些残留的煤矸石等。这些矿物一般不以单体矿物状态存在,通常以多相集合体形式出现。冯金生等经过三年(1988~1990 年)的研究,初步认为煤矸石风化物上覆盖的黄土和粉煤灰,可以改善植物的立地条件。一些煤矿试验发现粉煤灰作为煤矸石山的覆盖物,可成功地改良土壤,向煤矸石中掺入干粉煤灰,灰矸配比为 1:4,厚度大约 25cm,覆盖后可直接进行种植。

鉴于煤矿废弃地多为采空区或塌陷区,而当地又有大量的粉煤灰,因此,在一些煤矸石地区,可以利用粉煤灰做覆盖材料,其上覆盖 30~40cm 的黄土,进行造林或种植农作物,结果表明,刺槐、柳树、泡桐和火炬树等树种都可以获得正常生长,尤以刺槐、柳树生长较快,其根系可以扎入粉煤灰中。

1.3.1.2 有机物法改良基质

利用有机改良物进行废弃地改良符合以废治废原则,有很好的经济效益。污水污泥、生活垃圾、泥炭及动物粪便都被广泛用于矿业废弃地植被重建时的基质改良。因为其富

含养分且养分释放缓慢,可供植物长期利用。所含的大量有机物质,可以螯合部分重金属离子,缓解其毒性,同时改善基质的物理结构,提高基质的持水保肥能力。富含较高碳酸钙且 pH 较高的煤矸石地,可利用适当的煤炭腐殖酸物质进行改良。研究表明,施用低热值煤炭腐殖酸物质,仅仅依靠干湿交替的土壤热化过程,就可以提高石灰性土壤中磷的供应水平,从而达到对土壤的改良作用。有机肥对多种污染物在土壤中的固定有明显影响。适量使用有机肥还可以防止作物的汞污染,这可能是汞与腐殖酸的螯合作用而降低了汞的迁移能力。有机肥对各种污染物的作用在不同土壤中的表现不同,因此在施加有机肥时应根据不同的土壤并结合实验结果,施加适当和适量的有机肥(艾应伟等,2001)。另外,作物秸秆也被用作废弃地的覆盖物,可以改善地表温度、维持湿度,有利于种子的萌发及幼苗生长。秸秆还田能改善基质的物理结构,增加基质养分,促进养分转化。

1.3.1.3 化学法改良基质

煤矸石地一般缺乏氮、磷、钾肥料,所以,三者配合使用一般能取得迅速而显著的效果(吕珊兰和赵景逵,1997)。在施用速效肥料时应采取少量多施的办法或选用长效肥料效果更好。在 pH 过高或过低,盐分或金属含量过高的情况下,首先要进行土壤排毒,然后再施用化学肥料。对于重金属含量过高的废弃地可施用碳酸钙或硫酸钙来减轻金属毒性。如果废弃地处于酸性条件,可施用石灰等碱性物质中和,当废弃物的酸性较高或产酸持久时,则应少量多次施入石灰。硫黄、石膏和硫酸等则主要用于改善废弃物的碱性。另外,乙二胺四乙酸(EDTA)可使金属离子形成稳定络合物,降低重金属离子的毒性。化学改良技术,除具有调节土壤使其适合植物生长,降低土壤酸碱度外,还具有促进微生物活性,增加土壤中钙含量,改善土壤结构的作用。向污染土壤投加化学改良剂,与重金属发生氧化、还原、沉淀、吸附、络合、抑制和拮抗等化学作用,降低重金属污染物的水溶性、扩散性和生物有效性,从而降低它们进入植物体、微生物体和水体的能力。

煤矸石山堆积年限和风化程度不同,风化物的酸碱度也不同。一般新煤矸石中性偏碱,老煤矸石则呈酸性,因此,在煤矸石山基质改良的过程中,对于强酸性地带,每公顷施熟石灰 1200kg,可使 pH 由 4.5 以下上升至 6.0~7.0;对 pH8.1 以上地段,每公顷施硫酸亚铁 2250kg,可使 pH 调整至 6.5~7.5,如此改良后的煤矸石山,造林效果较好。Gitt 和 Dollhopf(1991)用 CaO 和 CaCO₃ 混合物来中和 pH 为 2.1 的强酸性煤矸石风化物,效果良好。研究表明,中和酸碱性后的煤矸石山在播种两年后,植物生长健壮旺盛。因此应用石灰中和酸性煤矸石的做法,在国内外非常普遍。还有人进行过用自然土壤过滤煤矸石的酸性沥出液的试验,结果沥出液 pH 升高,铁和铝的氧化沉积物形成,认为含碳酸盐土壤能很好地中和煤矸石的酸性,并且能减少由废弃物进入环境的污染物通量。

1.3.1.4 微生物法改良基质

微生物法复垦技术主要有菌肥和微生物活化剂两种方法,菌肥用来改良土壤理化性质和肥力状况,目前主要有根瘤菌肥料和固氮菌肥料。前者主要存在于土壤及豆科植物根瘤内,将其施入土壤后,能固定空气中的氮素,并转变为植物可利用的氮素化合物,对大豆、花生、紫云英等根瘤菌剂使用最广。后者含有大量好气性自生固氮菌的细菌肥料,张

文敏等的试验结果表明,使用菌肥能改善土壤质量,对各种作物都有一定的增产效果,试验中施加菌肥的玉米每 12 亩^①可增产约 750kg。根瘤菌最好作种肥,固氮菌适宜作基肥与有机肥一起施用,微生物活化剂主要用来使煤矸石、露天剥离物等固体废弃物充填的土层快速形成耕质土壤,改善土壤结构。

在微生物新陈代谢作用下,岩石加速分化,其理化性质不断改进,游离磷、钾和腐殖质不断增加,使废弃物肥力快速增加,并使养分以植物生长可吸收的形态在土中积累,经过一个植物生长周期,就会迅速形成熟化土壤,最终形成适合于耕作的土壤。

张文敏和张美庆(1996)将菌根真菌接种于复垦土壤中,进行盆栽试验研究。结果表明,植株的生物量随覆土厚度增大而增大;与非菌根植物相比,接种菌根真菌的植物可以吸收更多的营养,而向地上部移送的钠较少,抑制植株积累过量的钠盐;植株生物量及其植株体内的营养元素含量,在接种菌根真菌后,覆土少的(覆厚 5cm 的土壤于厚 10cm 的粉煤灰上)相应高于不接种且覆土厚(覆厚 10cm 的土壤于厚 5cm 的粉煤灰上)的,说明接种菌根具有抵消由于覆土少而导致的植株产量降低的潜力,其对粉煤灰充填复垦的植被重建具有重要作用,且可以节约复垦费用。

研究表明,不同的微生物对不同的污染物也有一定的适应性。例如,氧化亚铁硫杆菌在 pH 3 时能将 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ;在汞污染的河泥中,还存在一些抗汞的微生物(假单胞菌属等),能把甲基汞还原成元素汞;土生假丝酵母、粉红黏帚酶和青霉等能使肿酸盐形成甲基肿;光合紫细菌则能使氧化元素硒转化为硒酸盐(龙健等,2002,2004)。因此,在煤矸石地生态重建中,微生物的恢复是至关重要的一环。武冬梅等研究了施用污泥与化肥种植苇状高羊茅后煤矸石风化物的微生物活性。结果表明:污泥与化肥配施比单纯施用化肥能更好地提高煤矸石风化物的微生物总数量 4~23 倍(达 2.39×10^7 个/g 矸石)、脲酶活性 1.8~2.8 倍、生物量碳 0.3~2.4 倍,并使煤矸石风化物有效养分提高,同时,各指标随污泥施用量增加而提高,6%(135t/hm²)的污泥施用量对矿区生态系统的重建有积极意义(武冬梅等,2000)。

1.3.2 客土喷播及喷播绿化基质研究

客土喷播是将植物种子、肥料、保水剂、土壤、有机物、稳定剂等混合物充分混合后,通过高压设备和喷射机按设计厚度均匀喷到需防护的工程坡面,经过养护管理后,植物发芽成长,达到快速绿化贫瘠坡面目的的一种绿化技术(杨雄,2008)。其优点是:在岩石上能为植物创造生长基础,也能满足对土壤要求严格的植物的生长(杜娟,2000)。它恢复了因工程建设开发而破坏的生态系统,制造了与自然表土相近的生长基础,培育出稳固边坡和与周边环境和谐的植被,有效地恢复了生态(王京云,2007),做到尽快而正确地恢复到自然本来具有的绿化状态(仓田益二郎,1993),在短期内形成良好植被演替群落(陈懿,2006)。该技术适用于坡面底层稳定、坡度较陡、坡面质地较坚硬的岩石或土石坡面,最大坡度在 60°左右。

由于在城市建设、道路、工矿等边坡生态恢复,以及草坪建植中需要广泛应用各种工

^① 1 亩≈666.7m²,后同。