

# 我国矿山开采的生态环境效应及 土地复垦典型技术

彭 建<sup>1</sup>, 蒋一军<sup>2</sup>, 吴健生<sup>1</sup>, 刘 松<sup>3</sup>

(1. 北京大学环境学院, 北京 100871; 2. 中国人民大学公共管理学院, 北京 100872;  
3. 国土资源部土地整理中心, 北京 100035)

**摘 要:** 矿产资源开发已成为我国国民经济增长的重要手段, 但矿山开采又引发了一系列生态环境问题, 导致矿区生态退化与环境污染, 严重制约了矿区社会经济的可持续发展。本文系统分析了矿山开采的生态环境效应, 并根据典型矿区土地复垦的成功经验, 总结了适合我国矿区土地复垦的典型技术, 包括剥离-采矿-复垦一体化工程技术, 矿区废弃物综合利用技术, 大气污染治理技术, 地表整形工程技术, 土壤重金属污染治理技术, 土壤培肥改良技术, 植被恢复技术, 水土流失综合治理技术等。

**关 键 词:** 矿区土地复垦; 生态环境效应; 典型技术

中图分类号: X171.4

据统计, 我国95%以上的能源, 80%以上的工业原料, 70%以上的农业生产资料都来自矿产资源<sup>[1]</sup>, 矿山开采已成为我国生产活动与经济增长的重要手段。但由于矿藏的不可移动性, 以致矿山开采长期占用、破坏、污染土地, 改变了区域水热结构, 毁灭了动植物区系, 引发一系列社会经济与生态环境问题, 成为全球环境与发展面临的焦点问题之一。因此, 为了实现矿山开采与生态环境的协调发展, 开展矿区土地复垦, 使退化土地得以恢复和重新利用, 优化景观结构, 完善景观功能, 逐步解决由采矿引发的社会、经济与生态环境问题, 已成为我国能源与资源持续发展政策优先关注的关键问题之一<sup>[2]</sup>。但我国矿区土地复垦工作起步较晚, 土地复垦率较低, 迫切要求探索适合我国国情的土地复垦技术, 提高土地复垦率和生产潜力。本研究将在系统分析矿山开采生态环境效应的基础上, 根据典型矿区土地复垦的成功经验, 总结适合我国矿区土地复垦的典型技术, 以期推动全国土地复垦工作的进一步发展。

## 1 矿山开采的生态环境效应

### 1.1 地表景观破坏

矿山开采包括露天开采和地下开采两种方式, 露天开采以剥离挖损土地为主, 显著改变

收稿日期: 2004-12; 修订日期: 2005-01.

基金项目: 国家重点基础研究项目(G2000046807); 国家自然科学基金重点项目(90102018)。

作者简介: 彭建(1976-), 男, 四川成都人, 博士研究生, 主要从事景观生态与土地利用等方面的研究, 已发表  
相关论文数篇。E-mail: jianpeng@hotmail.com

了地表景观;井工开采将矿物从地下采出后,其上覆岩层失去支撑,岩体内部应力平衡受到破坏,从而导致采空区上覆岩层发生位移、变形直至破坏。伴随着塌陷、裂缝、坡地等新地貌形态的出现,矿区城镇的发展方向和规划布局必然受到制约。此外,矿山开采前一般多为森林、草地等自然植被覆盖的山体。开采后砍伐森林,压覆、毁坏土地,山体遭到破坏,废石与垃圾堆置,严重破坏地表自然景观,形成一个与周围环境完全不同甚至极不协调的外观<sup>[3]</sup>。随着人们社会生活需求的提高,景观破坏越来越引起当地群众的强烈反应。

## 1.2 诱发地质灾害

由于地下采空,地面及边坡开挖影响了山体、斜坡的稳定,往往导致地面塌陷、开裂、崩塌和滑坡等频繁发生。而矿山排放的废渣堆积在山坡或沟谷,废石与泥土混合堆放,使废石的摩擦力减小,透水性变小而出现渍水,在暴雨下也极易诱发泥石流。而井工开采闭坑后形成巨大采空区,几亿或上亿吨水量的地下水涌入将导致周围边坡岩体内的地应力重新分布。地下水浸入后,会使围岩体内软弱夹层的力学强度降低,从而造成采场边坡的大规模滑坡,并在周围地区诱发一系列地质活动和规模不等的地震<sup>[4]</sup>。

## 1.3 水文干扰与水质污染

矿区塌陷、裂缝与矿井疏干排水,使矿山开采地段的储水构造发生变化,水文的自然平衡被破坏:一方面,改变了地下水的水文条件,导致地下水系的枯竭或转移,使地下水沿裂隙不断涌入矿井形成矿井水排出地面,地下水位下降、井泉干涸,形成大面积的疏干漏斗;另一方面,导致地表径流的变更,使水源枯竭,水利设施丧失原有功能,形成水淹地和季节性水淹地,直接影响农作物耕种。同时,矿山开采过程中产生的矿坑水、废石淋滤水、选矿水及尾矿坝废水等,一般较少达到工业废水排放标准,必然造成水体污染,严重影响水生生物的生存繁衍与人畜生活饮用。金、铀、汞等金属矿藏开采过程中的矿坑水、选冶水往往还含有毒矿物和放射性,其危害更为深远,这也是某些矿区癌症发病率居高不下的主要原因<sup>[5]</sup>。

## 1.4 大气污染与微气候扰动

矿业开发造成的大气环境影响主要包括两种类型:一是采矿、爆破、运输、冶炼等过程中造成的烟尘、粉尘等物理污染。据测定<sup>[6]</sup>,一个大型尾矿场扬出的粉尘可以飘浮到 10~12km 之外,降尘量达 300t/hm<sup>2</sup>,粉尘污染可使谷物损失达 27~29%,土豆、甜菜减产 5~10%,人畜也受粉尘之害;二是采矿、炼焦过程中有机、有毒、有害及酸性气体物质释放造成的化学污染,并易引发温室效应、酸雨、光化学烟雾等一系列大气环境问题。此外,矿山植被破坏常导致地表干燥、热容量降低和反射率增加,形成区域热岛和干热风害,导致矿区微气候的恶化。

## 1.5 土地资源破坏与占用

对大量土地资源的占用与破坏,是采矿活动引发的最直接的资源问题。一方面,露天采矿剥离的表土,井工采矿由井下运到地面的废土石,以及选矿后的尾矿石的堆积,都必然导致对矿区土地的大量占用与破坏。据不完全统计<sup>[7]</sup>,全国仅历年煤矸石累计存量约 30 亿 t,占地 5500hm<sup>2</sup>,并且每年新增排放量 1.5~2.0 亿 t,占地约 300~400hm<sup>2</sup>。另一方面,露天采矿

会挖损大量土地,井工开采则会导致大面积的土地沉降,地面沉降、塌陷等又会引起一系列地表变形和破坏,造成表土性状改变,加速土壤侵蚀,将连续成片的耕地分割成破碎的地块,地表高低起伏,坑穴众多,致使耕作机械,甚至人畜无法作业,不少农田被迫弃耕。据测算<sup>[5]</sup>,全国采矿业破坏土地面积为 14~20 万 km<sup>2</sup>,并以 200km<sup>2</sup>/a 的速度增加。

## 1.6 土壤退化与污染

由于表土被清除或挖走,采矿后留下的通常是心土或矿渣,加上大型采矿设备的重压,往往使土壤坚硬、板结,土壤重度加大,有机质、养分与水分缺乏。据测定<sup>[8]</sup>,不同矿区土壤中有有机质、氮、磷的含量均很低,只有正常植被覆盖土壤的 20~30%。同时,矿区地面塌陷形成大面积的下沉盆地,因潜水位相对提高,极易引起土壤次生盐渍化。固体排弃物在风雨侵蚀下,其中的盐类成分淋失汇集到低洼处,经过蒸发作用也会使周围土壤盐渍化。而地面塌陷导致地下水位下降、土壤裂隙产生,不仅使土壤返湿非常困难,也大大加强了风力挟走土壤水分的能力,土壤湿度大幅下降。土壤中的营养元素也随着裂隙、地表径流流入采空区或洼地,造成许多地方土壤养分短缺,土壤承载力下降。

矿山固体废渣(煤矸石等)在堆积过程中,经雨水冲刷、淋溶,极易将其中的有毒有害成分渗入土壤中,造成土壤的酸碱污染(主要是强酸性污染)、有机毒物污染与重金属污染。而土壤的纳污和自净能力有限,当污染物超过其临界值时,将向外界环境输出污染物,其自身的组成结构与功能也会发生变化,尤其是当土壤受到重金属污染时,土壤酶的活性受重金属抑制,造成土壤中 C、N 营养元素循环速率和能量流动减弱,最终导致土壤资源的枯竭。并且,土壤污染在地表径流和生物地球化学作用下还会发生迁移,危害毗邻地区的环境质量,受污染的农产品则会通过食物链危害人体健康。据报道<sup>[9]</sup>,江西钨矿区居民肝癌的高发病率与土壤中钼、镉、铜、铁的高含量有关。

## 1.7 水土流失加剧

我国矿山大多地处干旱、半干旱丘陵山区,雨季常引发洪流,大量土壤被冲蚀,水土流失严重。而矿山开采直接破坏地表植被,露天矿坑和井工矿抽排地下水使矿区地下水位大幅度下降,造成土地贫瘠、植被退化,最终导致矿区大面积人工裸地的形成,极易被雨水冲刷;由于挖掘和排土场尾矿占地,形成地面的起伏及沟槽的分布,增加了地表水的流速,使水土更易移动、坡面冲刷强度加大;而新移动的岩土在风雨作用下极易风化成岩屑,则为水土流失提供了丰富的物质来源;因此,矿山开采往往导致水土流失的加剧。据不完全统计<sup>[10]</sup>,截至 1996 年,生态脆弱的中西部矿区每年增加水土流失面积 0.2 万 hm<sup>2</sup>。

## 1.8 生物多样性损失

植被清除、工业“三废”排放、土壤退化与污染、水土流失,对矿区生物多样性的维持都是致命打击,严重威胁了动植物生存。据统计<sup>[11]</sup>,我国因采矿直接破坏的森林面积累计达 106 万 hm<sup>2</sup>,破坏草地面积为 263 万 hm<sup>2</sup>。而生物多样性丧失后,虽然某些耐性物种能在矿地实现植物的自然定居<sup>[12]</sup>,但由于矿山废弃地土层薄、土质差、肥力薄、微生物活性差,受损生态系统的自然恢复是非常缓慢而困难的,通常需要 50~100 年,特别是土壤的恢复,需要 100~

10000 年<sup>[13]</sup>,即使形成的植被质量也相对低劣,木本植物经过 20~30 年后冠层盖度才仅达到 14~35%左右<sup>[14]</sup>。因此,矿区生物多样性的损失往往是不可逆的。不仅如此,矿业废弃地的裸露和矿山排水还会继续加强这种破坏,造成更大范围内生物多样性的减少和生态平衡的失调<sup>[15]</sup>。

## 2 我国矿区土地复垦的典型技术

尽管矿区土地复垦技术因复垦目标的不同而异,但大致可分为两类技术体系,即环境要素(包括土地、土壤、水资源、大气等)的重建、利用技术,与生物要素(包括物种、种群和群落等)的恢复、再生技术。具体而言,针对我国矿区生态环境特点,土地复垦主要包括以下几方面的典型技术。

### 2.1 剥离-采矿-复垦一体化工程技术

剥离-采矿-复垦一体化工程技术,指在编制矿山采掘计划时,综合考虑生产供矿和土地复垦要求,融复垦与采矿于一体,统筹规划采剥作业与复垦覆土作业。该技术是采矿工艺的有机构成,是矿区土地复垦与采矿工程最直接有效的结合形式<sup>[16]</sup>,适用于大矿山、地形较平坦的矿区。该技术的关键,在于对采场复垦进行远景规划和实施方案设计,搞清能用于复垦的表土量及其平面位置与采出时间,确定采场表土层剥离和复垦参数。

我国目前采用的剥离-采矿-复垦一体化工程技术,主要应用条带剥离、强化采矿、条带复垦及循环道路等先进技术<sup>[17]</sup>,即首先将矿区划分为若干区段,在每个区段中划分剥离条带,每年根据剥离量具体确定剥离位置及条带数量;同时,采矿作业采取条带开采,采场外部进行配矿及强化采矿等先进技术;然后,利用大型铲运机将剥离的条带岩石和表土“剥皮式”分开铲装,沿着循环道路运行,在复垦条带分别按顺序“铺洒式”排放,岩石排放在下部,表土排放在上部,并利用大型平地机进行平整,一次达到复垦的土地标准要求;从而“边开采,边复垦”,实现“采掘-运输-排弃-整形-复垦”的良性循环。

### 2.2 矿区废弃物综合利用技术

#### 2.2.1 煤矸石综合利用技术

煤矸石是煤矿中夹在煤层间的脉石,是煤矿区主要污染源之一,目前主要用于充填复垦。其中,燃过的煤矸石多用于充填农林复垦,未燃过的煤矸石则可充填营造基建用地,前者的关键是强酸性煤矸石的中和处理,后者则在于采取合理的充填方式和地基加固处理措施。此外,煤矸石还可用于制砖、水泥、混凝土和铺路;回收煤炭、黄铁矿,利用高硫煤矸石提取硫磺、制取硫酸;生产有机矿物肥料,作土壤改良剂;作热电厂燃料发电等。由于煤矸石中含有大量重金属元素,受地下水长期浸泡,其溶出物对土壤、地下水和周围环境存在潜在污染,因此,二次污染的防治应引起重视,减少煤矸石淋溶及有害污染物的迁移机会。

#### 2.2.2 粉煤灰综合利用技术

目前我国的粉煤灰主要用于充填塌陷区复垦土地,因粉煤灰中含有的某些重金属元素

在淹水状态下易于浸出,形成污染,粉煤灰充填复垦土地相对适合旱作,不适合用作水田<sup>[18]</sup>。粉煤灰的另一大用途是土壤改良,可以改变土壤质地,增加土壤持水量,提高土壤 pH 值,增加土壤肥力<sup>[19]</sup>,且不会对环境及食物链造成污染<sup>[20]</sup>。此外,粉煤灰还可作为建筑材料抹墙、铺路、生产彩色粉煤灰砖等;用作井下喷浆,替代河沙及石子;用作水泥活化剂,提高水泥质量;注浆充填用于煤矿采空区的密闭隔离与防火灭火。

### 2.2.3 废弃矿坑综合利用技术

废弃矿坑是伴随着采矿活动结束而产生的人为遗迹,根据不同矿坑的不同特点,可以有许多不同的用途,主要包括:用作地下仓库,储存液体燃料、武器、农副产品;堆存有毒、放射性废料,或用于垃圾处理;将古矿坑改造成博物馆、研究中心、档案馆;将废矿坑及其周围环境加以改造,建成旅游区;废矿坑坑塘养殖、种植开发等<sup>[21]</sup>。

### 2.2.4 矿井水综合利用技术

按污染物的特性,矿井水一般可分为洁净矿井水、含悬浮物矿井水、高矿化度矿井水、酸性矿井水、碱性矿井水及含特殊污染物的矿井水,多适用于工农业生产。各类矿井水的处理工艺技术,取决于其自身理化性质及其处理后的用途:①洁净矿井水,水质较好,只需经过源头截流、分排、消毒等工艺即可达到生活饮用水标准;②含悬浮物矿井水的净化处理,采用常规的自然沉降、混凝沉淀、过滤、消毒工艺即可;③高矿化度矿井水净化的关键是脱盐处理,可采用蒸馏法、离子交换法、电渗析法和反渗透法,其中,电渗析法最为经济适用;④酸性矿井水水质复杂,一般处理后达标排放或用于对水质要求低的工业用水,化学中和法是最常用的处理方法,生物化学法、湿地生态工程法、反渗透法等则是近年来研究的重点;⑤含铁、锰与含氟的矿井水,通常采用混凝、沉淀、吸附、离子交换、电凝聚和膜技术等方法处理,回收利用;⑥含放射性元素的矿井水,对中、高水平放射性废水采用浓缩储存和固化方法处理,对低放射性废水则可采用混凝沉降及净化的方法处理。

### 2.2.5 尾矿综合利用技术

按利用程度与工艺,尾矿综合利用包括以下 6 方面:①尾矿再选,将尾矿作为二次资源筛选伴生矿,是主要的利用方向;②尾矿砂制建材,如高硅尾矿可作为建筑材料、公路用砂,用于生产陶瓷、玻璃、微晶玻璃花岗石等;③尾砂改良土壤,尾矿砂一般有良好的透水、透气性能,用作客土可有效改善土壤的结构性、孔隙度、透气性。同时,尾矿还含有一些植物生长所必须的锌、锰、钼、矾等微量营养元素,可用于生产肥料。而含钙、镁和硅的尾矿,则可施于酸性土壤进行钙化中和处理;④尾矿充填,是利用尾矿的最有效途径之一。为避免对地下水造成化学污染,在充填前应采取措施,将其中易溶解的有毒有害离子吸附、分离出去;⑤尾矿库复垦,一般可用作农业用地、林业用地与建设用地。复垦为建设用地时,地基处理是关键。

## 2.3 大气污染治理技术

对于采矿、运输、冶炼等过程中造成的烟尘、粉尘等物理污染,主要采用喷雾洒水降尘的湿法治理措施。爆破产生的粉尘污染可采取向预爆破矿体撒水、水封爆破等措施防治,也可



通过大爆破后的通风降尘来稀释、外排有害杂质。

对于采矿、炼焦等过程中有机、有毒、有害及酸性气体物质释放造成的化学污染,可采用硫化床脱硫、有机物吸附等物理化学工艺技术,去除废气中的有毒、有害物质,最大限度降低酸雨等化学污染对区域生态环境与人畜健康的潜在危害。

同时,改变矿区生产、生活能源结构,发展煤气;集中供热供暖,并对工业和生活锅炉采用除尘脱硫措施;采用复盖法、表面浇灌法与注浆法防止矸石山自燃,以减少大气污染<sup>[22]</sup>;加强矿区绿化,大力种植吸尘能力强的草木,提高环境自净能力。

## 2.4 地表整形工程技术

地表整形工程技术指对复垦土地地形地貌的整理,以适于农业开发,主要包括:①梯田法复垦技术,即沿等高线平整矿区塌陷土地,改造成环形宽条带水平梯田或梯田绿化带,一般适用于潜水位较低的沉陷区、积水沉陷区的边坡地带、井工矿矸石山、露天矿剥离物堆放场等。梯田平台应修整为略向内倾的反坡,以挡蓄雨水保持水土。梯坎高度与田面宽度,则应根据地面坡度、土层薄厚、工程量大小、种植作物种类、耕种机械化程度等因素综合确定<sup>[23]</sup>;②疏排法复垦技术,即在地面标高高于外河水位的沉陷区,通过强排或自排的方式疏干积水后复垦,一般适用于我国东部河湖水系发达地区。该技术的关键在于疏排水方案的选择及排水系统的设计,并需重点防洪、除涝和降渍;③挖深垫浅法复垦技术,即将积水沉陷区下沉较大的区域再挖深,形成水塘,用于养鱼、栽藕或蓄水灌溉,再用挖出的泥土垫高开采下沉较小地区,达到自然标高,经适当平整后作为耕地或其它用地,从而实现水产养殖和农业种植并举的目的,一般适用于局部或季节性积水的塌陷区;④泥浆泵充填复垦技术,即模拟自然水流冲刷原理,运用水力挖塘机组将塌陷地低洼处的沙土冲成泥浆,然后用泥浆泵抽进要平整的地域内,沉淀后成为耕地,主要适用于常年积水且洼地多沙质良土的沉陷区。由于该技术从本质上讲是一类特殊的挖深垫浅法复垦技术,故也被称作泥浆泵挖深垫浅复垦技术。

## 2.5 土壤重金属污染治理技术

从技术的方法原理来看,国内外矿区土壤重金属污染治理主要包括物理、化学和生物治理技术三类。其中,生物治理技术包括微生物修复技术、动物修复技术与植物修复技术,设施简便、投资少、对环境扰动也少,被认为是最有生命力的。

目前,国内外矿区土壤重金属污染治理的具体技术主要包括以下 9 类:①机械工程技术,即应用机械工程措施,对被污染土壤进行物理转移或隔离,降低土壤重金属浓度,或减少重金属污染物与植物根系的接触。该技术具体包括客土、换土、翻土、去表土和隔离等措施,一般适用于小面积、重污染土壤<sup>[24]</sup>;②电动力学技术,即基于重金属的电动力学特性,在污染土壤中通电,以电流打开金属-土壤链,从而使土壤中的重金属在电解、电迁移、电渗和电泳等作用下在阳(或阴)极被移走。该技术不适于渗透性高、传导性差的土壤,而特别适用于其他方法难以处理的、适水性差的粘土类土壤;③热解吸技术,即将污染土壤加热,使重金属污染物产生热分解、挥发,然后进行回收处理。该技术适用于受热易分解挥发的重金属污染,主要是汞污染;④化学淋洗技术,即用清水或能提高重金属水溶性的化学溶液来淋洗土壤,吸附固定在土壤颗粒上的重金属形成稳定的溶解性离子,金属-试剂络合物或生成沉淀,然后

收集淋洗液回收重金属。该技术的关键是淋洗试剂的选择,表面活性剂是近年来研究的重点<sup>[25]</sup>,较适合于砂土、砂壤土、轻壤土等轻质土壤,但易造成地下水污染、土壤养分流失及土壤变性;⑤化学改良技术,即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。该技术对污染不太重的土壤特别适用,但需防止重金属的再度活化;⑥动物修复技术,指在土壤中的低等动物(蚯蚓和鼠类)吸收、富集重金属后,采用电激、灌水等方法从土壤中驱出这些动物集中处理,从而降低污染土壤中重金属的含量,但由于蚯蚓吸收重金属后随时会释放回土壤,鼠类对庄稼又有危害,该技术还有待进一步研究;⑦植物修复技术,即利用部分植被能忍耐和超量累积某些重金属的特性,通过植物的提取作用、挥发作用、稳定化作用与根际过滤作用来原位清除、稳定污染土壤中的重金属。这是一种很有希望的、可有效和廉价处理土壤重金属污染的新技术<sup>[26]</sup>;⑧微生物修复技术,即利用土壤中某些微生物对重金属的吸收、沉淀、氧化和还原等作用,降低重金属的毒性与生物有效性。运用基因工程培育对重金属具降毒能力的微生物,并运用于污染治理是目前环境科学研究最活跃的领域之一<sup>[27]</sup>;⑨农业耕作管理技术,即因地制宜的改变受污染农田的耕作管理制度,如增施有机肥、控制土壤水分、选择合适形态的化肥、选育优良作物品种等,以减轻重金属对农作物的危害,避免重金属离子进入人类食物链。该技术具有费用低、实施方便等优点,但周期长和效果不显著,适于中、轻度污染土壤的治理<sup>[24]</sup>。

## 2.6 土壤培肥改良技术

土壤培肥改良技术就是对土壤团粒结构、pH 值等理化性质的改良及土壤养分、有机质等营养状况的改善,这是矿区农用地复垦的最终目标之一,具体包括以下技术措施:

### 2.6.1 表土转换

为维持质地好、易培肥的土壤剖面,在采矿前先把表层(30cm)及亚表层(30~60cm)土壤取走并加以保存,待工程结束后再放回原处。这样虽破坏了植被,但土壤的物理性质、营养条件与种子库基本保持原样,本土植物能迅速定居。该技术的关键在于表土的剥离、保存和复原,应尽量减少对土壤结构的破坏和养分的流失。

### 2.6.2 客土覆盖

废弃地土层较薄时,可采用异地熟土覆盖,直接固定地表土层,并对土壤理化特性进行改良,特别是引进氮素、微生物和植物种子,为矿区重建植被提供了有利条件。该技术的关键在于寻找土源和确定覆盖的厚度,土源应尽量在当地解决,也可考虑底板土<sup>[28]</sup>与城市生活垃圾、污水污泥<sup>[29]</sup>;覆土厚度则依废弃地类型、特点及复垦目标而定,一般覆土 5~10cm 即可。

### 2.6.3 土壤物理性状改良

土壤物理性状改良的目标是提高土壤孔隙度、降低土壤容重、改善土壤结构。短期内可采用犁地和施用农家肥等方法,但植被覆盖才是解决这个问题的永久性方法<sup>[30]</sup>。此外,粉煤灰可以变重土和轻沙土为中间结构土壤,增加土层保水能力和孔隙度;降雨能有效地淋洗出

土壤中的盐份,覆盖有机物料、修筑梯田都是常用的增加淋漓效果的方法;深耕则能有效解除土壤压实,对容重和水分入渗率的影响比穿透阻力和土壤水分含量要大<sup>[31]</sup>。

#### 2.6.4 土壤 pH 值改良

对于 pH 值不太低的酸性土壤可施用碳酸氢盐或石灰来调节酸性,既降低土壤酸碱度,又能促进微生物活性,增加土壤中的钙含量,改善土壤结构,并减少磷被活性铁、铝等离子固定。但在 pH 值过低或产酸较久时,宜少量多次施用碳酸氢盐或石灰,也可施用磷矿粉,既提高土壤肥力,又能在较长时间内控制土壤 pH 值。炼铬厂废弃物和粉煤灰一般呈碱性,可采用硫磺、氯化钙、石膏和硫酸等酸性试剂进行中和改良。

#### 2.6.5 土壤营养状况改良

土壤营养状况改良,主要包括以下改良物:①化学肥料,其合理施用是矿区复垦增产的有效措施,综合施加氮、磷、钾肥要比单施某一种肥料好。由于土壤盐害会阻碍植物对氮、磷、钾肥的吸收,在施肥前经过一番天然淋溶实属必要<sup>[29]</sup>;②有机废弃物,由于污水污泥、生活垃圾、泥碳及动物粪便等有机废弃物的分解能缓慢释放出氮素等养分物质,可满足植物对养分持续吸收的需要;有机物质还是良好的胶结剂,能使土地快速形成结构,增加土壤持水保肥能力。虽然有机废弃物中存在重金属和毒性有机物,但可采用污染源控制、化学浸提法与微生物淋滤法、堆沤等措施予以处理<sup>[32]</sup>,因此,有机废弃物已成为当前矿区土壤基质改良的主要手段;③固氮植物,利用生物固氮(主要是豆科植物),是经济效益与生态效益俱佳的改良方法。生物固氮在重金属含量较低的废弃地上潜力很大,据研究,固氮植物每年每公顷可以固氮 50~150kg<sup>[12]</sup>。对于具较高重金属毒性的废弃地,必须采用相应的工程措施解除重金属毒性,才能保证成功的结瘤与固氮;④绿肥,提高土壤养分肥力水平的作用相当于十年以上的培肥功能<sup>[33]</sup>,多为豆科植物,根系发达,生长迅速,适应性强,含有丰富的有机质和氮、磷、钾等营养元素,可为后茬作物提供各种有效养分,改善土壤理化性状,并能加快矽石风化速度;⑤微生物,具有迅速熟化土壤、固定空气中的氮素、参与养分转化、促进作物吸收养分、分泌激素刺激作物根系发育、改进土壤结构、减少重金属毒害及提高植物的抗逆性等功能。利用微生物的分解特性,采用菌根技术快速熟化和改良土壤,恢复土壤肥力的活性,在矿区土地复垦中受到越来越多的重视,已成为世界各国复垦研究的新热点<sup>[34]</sup>。

### 2.7 植被恢复技术

#### 2.7.1 植被品种筛选

按照复垦规划,对计划植被的作物、牧草、林木品种进行的选择工作,是矿区植被恢复成败的关键因素之一。根据矿区的气候和土壤条件,植被筛选应着眼于植被品种的近期表现,兼顾其长期优势,通过实验室模拟试验、现场种植试验、经验类比等过程筛选确定。一般筛选的原则是:速生能力好、适应性强、根系发达、抗逆性好;优先选择固氮植物;当地优良的乡土品种优于外来速生品种;树种选择宜突出生态功能,弱化经济价值。具体而言,我国各矿区土地复垦的适宜植被差异较大,但多年生豆科牧草、一年生和两年生禾本科、茄科植物与刺槐、沙棘、柠条等乔灌木是主要的适选品种



### 2.7.2 植被工艺

科学合理的植被工艺可有效提高植物对矿区脆弱生态环境的承受能力:①植被顺序。农业复垦一般先种植豆科牧草培肥土壤,然后耕种豆科作物增加土壤氮素,在土地达到一定肥力后再种植一般农作物。林业复垦一般直接进行绿化种植,也可先种植豆科牧草,而后栽种林木;②植被结构。不同植物对矿区生境的适应性有限,其生存离不开一定的植物群落。植被品种筛选好后只能作为先锋品种来种植,要达到长久治理的目的,必须乔、灌、草、藤组合,进行多植被间种、套种、混种,并有目的的进行其它生物接种;③植被密度。不同立地条件、不同植被恢复目的、不同植被品种的种植密度是不同的,即速生喜光植物宜稀一些,耐阴且初期生长慢的植物宜密一些;树冠宽阔、根系庞大的宜稀一些,树冠狭窄、根系紧凑的宜密一些;高海拔、高纬度、低温、土壤瘠薄地区的植被密度应大一些;在栽植技术精细、水分供应良好、管理好的地区,密度宜稀一些;水土保持林可密一些,农田防护林、用材林则宜稀一些;④植被格局。在废弃地上普遍种植植物,无疑是一种快速恢复植被的良好方法。但在人、财、物力不足的情况下,依据景观生态学原理,最优的植被格局应由几个大型的自然植被斑块组成本底,并由周围分散的小斑块及其中的小廊道所补充、连接。这样既节约了人工和经费,又为植被的自然恢复提供了空间。

## 2.8 水土流失综合治理技术

### 2.8.1 工程治理技术

工程治理是矿区水土流失综合治理的一种快速有效的临时方法,主要包括坡面整治、涂层、网席和抗侵蚀被等方法。坡面整治法首先沿平台眉线修筑梯形土石埂,拦截平台汇水,避免形成径流冲刷边坡;再沿平台内缘或缓坡坡底线挖掘纵向排水沟,用以导出坡地和平台的汇水;最后在坡面上沿垂直等高线方向,以 1m 间距修建若干平行于等高线的小台阶,与地表水流方向垂直,从而紊乱、改变坡面径流方向,缓解径流强度,并拦截径流携带的大部分泥沙。同时,还能给植物提供一定的土壤水分和阴郁环境,为植被生长创造良好的立地条件<sup>[34]</sup>。

涂层法是国外广泛采用的方法之一,以沥青乳液和棉籽醇树脂乳液等粘性物质作涂层材料,对松散易蚀的排土场表面作固结处理,可有效防止风蚀和水蚀,可用于新排弃尚不稳定的岩土表面;网席法是将易侵蚀的坡面用草席或纤维织网压草覆盖坡面,防止坡面侵蚀;抗侵蚀被法与网席法类似,侵蚀被由一面能光降解,一面能生物降解的草与椰子纤维等材料织成,使用时将其铺于坡面,不回收,可在其上直接播种草籽<sup>[35]</sup>。

此外,为控制水土流失,避免泥沙进入河流,按照位置及地形,可在矿区排土场下游的适当位置设置控制坝——一种小型透水构筑物。控制坝能减缓水流,使土壤颗粒沉积在坝的迎水面上,从而避免和减少排土场排弃物冲至下游沟溪,减少水土流失。

### 2.8.2 生物治理技术

植被稀少、土壤裸露是矿区水土流失的直接诱因,植被恢复后能迅速固定疏松土层,大大减少降水对土壤的溅蚀和径流的冲刷作用,从而有效地控制采矿迹地的水土流失,是最根本的治理方法。矿区水土保持林草的建设要做到因地制宜,宜林则林宜草则草,根据当地自然状况,选择合适的植物种类。缓坡地上最适选用的护坡植被一般包括:乔灌木中的银合欢、

木豆、金合欢;多年生禾本科牧草中的宽叶雀稗、糖蜜草、狗牙根、苇状羊茅;多年生豆科牧草中的小叶银合欢、大翼豆、紫花圆叶舞草、柱花草、铺地木兰;田菁、竹豆、合萌等一年生护坡植物;以及宽叶雀稗、银合欢、木豆和狗牙根等生长速度稍慢,但根系发育、网络性好、覆盖度高的护坡植物。研究表明<sup>[36]</sup>,油松×沙棘×豆科、禾本科牧草配置模式,是典型的乔灌草护坡植被结构,生长结构稳定,水土保持效果好,在矿区水土流失生物治理中较为常用。

### 3 结语

矿山开采极大地改变了原生景观生态系统,导致矿区生态退化与环境污染,主要表现为:地表景观破坏;诱发地质灾害;水文干扰与水质污染;大气污染与微气候扰动;土地资源破坏与占用;土壤退化与污染;水土流失加剧;生物多样性损失。针对矿区生态环境特点,我国当前矿区土地复垦的典型技术体系主要包括:剥离-采矿-复垦一体化工程技术;矿区废弃物综合利用技术;大气污染治理技术;地表整形工程技术;土壤重金属污染治理技术;土壤培肥改良技术;植被恢复技术;水土流失综合治理技术。

但必须强调的是,矿区土地复垦不仅仅是一个技术工程层面的问题,而且与矿区的社会经济发展密不可分,是一项耦合了社会、经济、资源与环境的系统工程。矿区土地复垦不仅是对土地、土壤、水、大气、生物等生态环境要素的单要素恢复利用,而且要求对景观生态系统的整体恢复与重建,并强调矿区与区域的综合协调。因此,矿区土地复垦是以人类发展为核心,对土地自然、经济与社会属性的综合整治,在消除环境危害的同时重建生态平衡,恢复土地的生物生产力与非生物生产力,且与周围景观价值相协调,因地制宜地综合利用矿区废弃自然要素,尤其是土地资源,实现矿区社会经济与生态环境的可持续发展。

### 参考文献

- [1] 阎敬,杨福海,李富平. 冶金矿山土地复垦综述. 河北理工学院学报, 1999, 21(增刊):41~47.
- [2] 龙花楼. 采矿迹地景观生态重建的理论与实践. 地理科学进展, 1997, 16(4):68~74.
- [3] Toomik A., Liblik V. Oil shale mining and processing impact on landscapes in north-east Estonia. *Landscape & Urban Planning*, 1998, 41: 285~292.
- [4] 刘志斌. 大型露天煤矿闭坑后的生态环境问题及其对策. 露天采矿技术, 2003(3):1~3.
- [5] 孙庆先, 胡振琪. 中国矿业的环境影响及可持续发展. 中国矿业, 2003, 12(7):23~26.
- [6] 束文圣, 张志权, 蓝崇钰. 中国矿业废弃地的复垦对策研究( I ). 生态科学, 2000, 19(2):24~29.
- [7] 姜军, 程建光. 煤矿矿区生态恢复与可持续发展. 煤田地质与勘探, 2001, 29(4):7~9.
- [8] 黄铭洪, 骆永明. 矿区土地修复与生态恢复. 土壤学报, 2003, 40(2):161~169.
- [9] 陈怀满, 郑春荣, 涂从等. 中国土壤重金属污染现状与防治对策. 人类环境杂志, 1999, 28(2):130~134.
- [10] 杨选民. 煤炭矿区水土流失特点及其防治措施. 中国煤炭, 1998, 24(12):7~9.
- [11] 张应红, 文志岳. 矿山环境综合治理政策研究. 中国矿业, 2002, 11(6):57~60.
- [12] Bradshaw A.D. Restoration of mined lands—Using natural process. *Ecological Engineering*, 1997, 8: 255~269.
- [13] Dobson A.P., Bradshaw A.D., Baker A.J.M. Hopes for the future: Restoration ecology and conservation biology. *Science*, 1997, 277: 515~522.
- [14] Skousen J.G., Call C.A., Knight R.W. Natural revegetation of an unreclaimed lignite surface mine in east-central Texas (USA). *Southwestern Naturalist*, 1990, 35: 434~440.
- [15] Cherry D.S., Currie R.J., Soucek D.J., et al. An integrative assessment of a watershed impacted by abandoned mined land discharges. *Environmental Pollution*, 2001, 111: 377~388.
- [16] 王仰麟, 韩荡. 矿区废弃地复垦的景观生态规划与设计. 生态学报, 1998, 18(5):455~462.
- [17] 赵继新, 屈信明, 孙兆学等. 剥离-采矿-复垦一体化复垦新工艺. 轻金属, 1997(5):10~13.

- [18] 胡振琪, 戚家忠, 司继涛. 不同复垦时间的粉煤灰充填复垦土壤重金属污染与评价. 农业工程学报, 2003, 19(2): 214~218.
- [19] Carlson C.L, Adriano D.C. Environmental impacts of coal combustion residues. Journal of Environmental Quality, 1993, 22(2): 227~247.
- [20] Schumann A W, Sumner M E. Plant nutrient availability from mixtures of fly ashes and biosolids. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(5): 1651~1657.
- [21] 王永生, 郑 敏. 废弃矿坑综合利用. 中国矿业, 2002(6): 65~67.
- [22] 陈明智. 煤矿矿区大气环境保护(技术)对策. 煤矿环境保护, 1997, 11(6): 12~18.
- [23] 李树志. 煤矿塌陷区土地复垦技术与发展趋势. 煤矿环境保护, 1993, 7(4): 6~9.
- [24] 李永涛, 吴启堂. 土壤污染治理方法研究. 农业环境保护, 1997, 16(3): 118~122.
- [25] 夏星辉, 陈静生. 土壤重金属污染治理方法研究进展. 环境科学, 1997, 18(3): 72~76.
- [26] 沈德中. 污染土壤的植物修复. 生态学杂志, 1998, 17(2): 59~64.
- [27] 余贵芬, 青长乐. 重金属污染土壤治理研究现状. 农业环境与发展, 1998(4): 22~24.
- [28] 马彦卿, 张文敏. 矿山复垦地再造耕层材料的筛选. 有色金属, 1998, 50(2): 8~11.
- [29] 蓝崇钰, 束文圣. 矿业废弃地植被恢复中的基质改良. 生态学杂志, 1996, 15(2): 55~59.
- [30] 宋书巧, 周永章. 矿业废弃地及其生态恢复与重建. 矿产保护与利用, 2001(5): 43~49.
- [31] 胡振琪, S.K.Chong. 深耕对复垦土壤物理特性改良的研究. 土壤通报, 1999, 30(6): 248~250.
- [32] 莫测辉, 蔡全英, 王江海 等. 城市污泥在矿山废弃地复垦的应用研究. 生态学杂志, 2001, 20(2): 44~47.
- [33] 林大仪, 王志亚, 金志南 等. 加速阳泉露天矿区复垦地成土速度的研究初报. 土壤通报, 1993, 24(5): 200~201.
- [34] 马彦卿. 矿山土地复垦与生态恢复. 有色金属, 1999, 51(3): 23~25.
- [35] 卞正富, 张国良, 胡喜宽. 矿区水土流失及其控制研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(4): 31~36.
- [36] 王志宏, 刘志斌, 陈建平. 黑岱沟露天煤矿土地复垦及生态重建规划研究. 露天采矿技术, 2003(1): 19~21.

## Eco-environmental Effects of Mining and Related Land Reclamation Technologies in China

PENG Jian<sup>1</sup>, JIANG Yijun<sup>2</sup>, WU Jiansheng<sup>1</sup>, LIU Song<sup>3</sup>

(1. College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. School of Public Management, Renmin University of China, Beijing, 100872, China;

3. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Land and Resource, Beijing 100035, China)

**Abstract:** Today, mining has become an important means of social production and economic development. But mining also results in a series of eco-environmental problems, leading to ecological degradation and environmental pollution in mining area and restricting regional sustainable development. In the paper, the eco-environmental effects are systematical analyzed. And based on successful experiences of land reclamation in typical mining areas, land reclamation technologies are summarized, including technology of integrating operation of mining and land reclamation, technology of reutilization of mining castoff, technology of air pollution prevention, technology of transfiguration engineering, technology of soil metal pollution prevention, technology of soil cultivation and improvement, technology of vegetation restoration, and technology of water and soil conservation.

**Key words:** land reclamation in mining area; eco-environmental effects; technology