

# 生态修复 理论与实践

Theory and Practice of Ecological Restoration

——以北京山区关停废弃矿山生态修复工程为例

李金海 主编

中国林业出版社

# 生态修复

## 理论与实践

Theory and Practice of Ecological Restoration

——以北京山区关停废弃矿山生态修复工程为例

李金海 主编

中国林业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

生态修复理论与实践: 以北京山区关停废弃矿山生态修复工程为例/李金海主编.—北京: 中国林业出版社, 2008.11

ISBN 978-7-5038-5337-1

I. 生... II. 李... III. 矿山-生态环境-环境治理-研究-北京市 IV. X322.21

中国版本图书馆CIP数据核字 (2008) 第155249号

出版 中国林业出版社 (100009 北京西城区刘海胡同7号)

网址: [www.cfph.com.cn](http://www.cfph.com.cn)

E-mail: [cfphz@public.bta.net.cn](mailto:cfphz@public.bta.net.cn) 电话: (010) 66183789

发行: 中国林业出版社

印刷: 北京地质印刷厂

版次: 2008年11月第1版

印次: 2008年11月第1次

开本: 787mm×1092mm 1/16

印张: 11

插页: 16

字数: 308千字

定价: 48.00元

《生态修复理论与实践》

编 委 会

顾 问

甘 敬

主 编

李金海

副主编

武 雄 张国祯 杨建东

编 委 (以姓氏笔画为序)

王晓东 宁月胜 刘 松 余新晓

陈京弘 武 雄 张国祯 杨建东

周 健 胡 俊 袁定昌 逯进生

续 源 魏 军

地球是人类共同的家园，环境是人类生存和发展的基本条件，是经济、社会发展的基础。千百年来，科学技术的日新月异和生产力的极大发展给人类带来前所未有的物质文明的同时，也带来了全球性的环境污染和生态破坏：土地沙化、水土流失、可利用资源减少、环境污染、物种灭绝、全球气候变暖、极地臭氧空洞等环境问题，已对人类的生存和社会经济的可持续发展造成了严重的威胁。因此，环境保护与可持续发展已成为世界各国共同关注的焦点，保护森林，恢复植被，防治土地荒漠化，改善生态环境，促进人和自然的和谐发展，已成为一个政治化、国际化的命题和我们急需深入研究的重大课题，也是历史赋予当代人及后来者的神圣而光荣的职责。

关停废弃矿山长期以来被认为是我国生态环境建设的“死角”，在长期的矿产资源开发利用过程中，由于观念、体制、管理等多方面的原因，矿山生态破坏和环境污染等问题日益严重，成为影响经济发展和社会稳定的重要制约因素（张梁，2002）。据统计，全国矿区累计被破坏的土地面积 $2.88 \times 10^6 \text{km}^2$ ，并且每年以 $467 \text{km}^2$ 的速度在增长（牛一乐等，2005）。关停废弃矿山是压占和毁损土地、加剧水土流失和土地沙化、造成地下水和重金属污染、形成次生地质灾害等一系列生态环境问题的主要诱因，因此，加快对关停废弃矿山的生态修复和可持续利用已是关系我国生态文明建设进程的迫在眉睫的大事。

北京作为“国家首都、世界城市、文化名城、宜居城市”，目前面临在全国率先基本实现现代化和建设首都生态文明的重要机遇以及生态环境承载力制约城市发展等方面的巨大挑战。《北京城市总体规划（2004~2020年）》提出，要“将北京建设成为山川秀美、空气清新、环境优美、生态良好、人与自然和谐、经济社会全面协调、可持续发展的生态城市”。北京城市发展的功能定位和目标，为首都生态环境建设提出了更高的要求。据2006年北京市园林绿化局和北京市国土资源局关于全市关停废弃矿山的联合调查结果，仅北京山区的关停废弃矿山就有 $5092 \text{hm}^2$ ，其中约 $3866 \text{hm}^2$ 位于奥运场馆周边、主要干道两侧、景点周边等重点地区（这一数据还不包括近 $3500 \text{hm}^2$ 的沙坑），关停废弃矿山已严重影响了首都生态景观效果和生态服务功能的正常发挥，并且成为影响首都经济社会可持续发展的主要障碍之一。随着市民精神文化需求的日益增长和首都生态文明建设进程的加快，市政府对生态环境建设的投入和管理力度进一步加大，特别是加强了对关停废弃矿山、沙坑等生态“死角”的整治力度。2005年3月7日，第75次市长办公会议决定：北京市今后除地热外，限制其他矿产资

源的开采,不再新发采矿许可证,并逐步减少固体矿产的开采;禁采区内采矿许可证未到期的矿山,限期到2007年底前停止开采;大力减少小型以下开采规模的矿山,力争到2007年底将现有固体矿山数量减少70%。因此,随着全市矿山关停并转力度的进一步加大,矿山资源管理工作的进一步规范化,全市关停废弃矿山的面积还将增加,关停废弃矿山生态修复的任务将更加艰巨。

为全面落实《北京城市总体规划(2004~2020年)》提出的目标要求,以实际行动践行科学发展观,全面构建和谐社会的首善之区,2006年,北京市市政府批准实施了北京山区关停废弃矿山试点工程建设项目,对煤矿、采石场、石灰场三种类型的关停废弃矿山生态修复技术进行了试点工程建设。试点工程分别位于门头沟区和房山区,建设规模为629hm<sup>2</sup>,投资4469万元。经过工程建设使用并验证了鑫三角技术、格宾网技术等一批生态修复新技术,探索了三种类型的关停废弃矿山生态修复新模式,为全市关停废弃矿山生态修复工程建设的全面铺开奠定了坚实的理论和技術基础。在此基础上,北京市园林绿化局、北京市发展和改革委员会、北京市国土资源局和北京市财政局共同编制并下发了《北京市山区关停废弃矿山植被恢复规划》,计划2007~2010年投资24.85亿元对山区5092hm<sup>2</sup>的关停废弃矿山进行全面整治。经过2006年的试点探索,2007年,全市关停废弃矿山植被恢复工程全面展开,工程建设范围涉及10个区县,建设面积为1467hm<sup>2</sup>,取得了良好的生态、经济和社会效益。工程建设中不但丰富了新技术和新模式,而且建立了一整套生产、技术规范。

本书以北京山区关停废弃矿山植被恢复工程建设实践为基础,以科学发展观为指导,以加速首都生态文明建设步伐为目标,通过对北京山区关停废弃矿山植被恢复技术与模式进行系统研究和总结,探索构建关停废弃矿山生态修复的理论与技术体系,同时,通过典型案例的分析,展示工程建设过程中理论创新、技术集成、组织管理等方面的成果和经验,以全面指导北京市关停废弃矿山生态修复工程建设,并为全国关停废弃矿山的生态修复工作提供参考。从工程管理者角度出发,本书也是对北京山区关停废弃矿山植被恢复工程建设的一个阶段性总结。

限于水平,书中错误和不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

2008年9月

<b>第一章 总论</b> .....	(1)
第一节 生态修复的概念.....	(1)
第二节 研究内容及方法.....	(3)
第三节 研究的意义.....	(5)
第四节 研究的对象和范围.....	(5)
<b>第二章 废弃矿山生态修复研究进展</b> .....	(7)
第一节 国外废弃矿山生态修复研究进展.....	(7)
第二节 我国废弃矿山生态修复研究进展.....	(13)
第三节 北京市矿山生态修复研究进展.....	(19)
<b>第三章 生态修复的理论基础</b> .....	(22)
第一节 基本理论.....	(22)
第二节 基础理论.....	(31)
第三节 最新发展理念.....	(35)
<b>第四章 北京矿山分布及其环境影响</b> .....	(40)
第一节 研究区概况.....	(40)
第二节 矿产资源分布及关停废弃状况.....	(46)
第三节 关停废弃矿山生态环境问题及危害.....	(53)
<b>第五章 工程前期综合评价</b> .....	(58)
第一节 地质灾害危害性评估.....	(58)
第二节 环境影响评价.....	(70)
第三节 水资源论证.....	(84)
<b>第六章 生态修复规划</b> .....	(88)
第一节 规划的必要性和可行性分析.....	(88)
第二节 规划总体思路.....	(91)
第三节 规划内容.....	(92)
第四节 保障措施.....	(103)
<b>第七章 关停废弃矿山生态修复技术体系</b> .....	(106)
第一节 工程技术体系.....	(106)
第二节 管理体系.....	(113)

第三节	政策体系·····	(121)
第四节	安全保障体系·····	(127)
<b>第八章</b>	<b>典型治理模式·····</b>	<b>(129)</b>
第一节	龙凤岭废弃采石场治理模式·····	(129)
第二节	北京首钢铁矿治理模式·····	(131)
第三节	妙峰山镇废弃石灰场治理模式·····	(133)
第四节	大安山乡永红煤矿治理模式·····	(134)
第五节	百花山道路边坡治理模式·····	(135)
第六节	北宫森林公园坡面治理模式·····	(136)
第七节	封育修复模式·····	(136)
<b>第九章</b>	<b>典型案例分析·····</b>	<b>(138)</b>
第一节	门头沟区潭柘寺镇桑峪石灰场植被恢复工程·····	(138)
第二节	门头沟区斋堂镇军响张家村二号煤矿植被恢复工程·····	(145)
第三节	密云水库周边废弃铁矿植被恢复工程·····	(152)
第四节	房山区河北镇檀木港废弃采石场植被恢复工程·····	(161)
<b>参考文献</b>	·····	<b>(169)</b>



# 第一章 总论

生态系统是一个复杂的系统，它通过自我的不断调节，使自己处于一种动态平衡状态，维持其物质、能量和信息的传递。但是，生态系统的自我调节能力是有限度的。当外界压力很大，使系统的变化超过了自我调节能力的限度即“生态阈值”时，它的自我调节能力随之下降，以至消失。此时，系统结构被破坏，功能受阻，以致整个系统受到伤害甚至崩溃。生态系统受损以后，其生态修复时间与其受损程度、自我修复能力和修复的方向等因素密切相关，当生态系统受损程度未超过其临界值，系统的自我恢复能力较强时，通过自然过程也可实现修复，只是需要较长的时间；而当生态系统受损程度远远超过其临界值，即使自我修复能力再强，通过自然过程的修复几乎是不可能的，就必须依靠人工来重建恢复生态系统。严重受损的生态系统的恢复是一项十分艰巨的系统工程，仅靠基础生态学的理论和方法是难以有效实现的，此时，恢复生态学这一现代生态学的分支便应运而生，其主要目标是恢复受损生态系统到接近于它受干扰前的自然状态，重建该系统受干扰前的结构与功能有关的物理、化学和生物学特征。

## 第一节 生态修复的概念

目前，国内外对于生态修复这一概念尚无统一的认识。为了明确阐述生态修复概念，本节首先介绍了生态系统、退化生态系统、生态建设、生态恢复等相关概念，然后通过相关概念的比较，尽可能准确地理清生态修复概念的发展历程、内涵和外延。

### （一）生态系统

生态系统是指在一定时间和空间范围内，由生物群落与其环境组成的一个整体。该整体具有一定大小和结构，各成员借助能量流动、物质循环和信息传递而相互影响、相互依存，并形成具有自组织和自我调节功能的复合体。

### （二）退化生态系统

退化生态系统是指由于长时间的自然或人为干扰，破坏了生态系统的原有特性，使系统的物质循环、能量流动、信息联系发生了变化和障碍，形成破坏性的波动或恶性循环。主要的标志是生态系统初级和次级生产力降低、生物多样性减少或丧失、土地养分维护能力和物质循环效益降低等。

### （三）生态建设

所谓生态建设，就是指人类有目的的对自身赖以生存与发展的大气、淡水、海洋、土地和森林等自然环境与自然资源的保护和改进的活动。

### （四）生态恢复

关于“生态恢复”，具有代表性的界定主要有：

Harper (1987) 认为，生态恢复就是关于组装并试验群落和生态系统如何工作的过程。Diamond (1987) 认为，生态恢复就是再造一个自然群落，或再造一个自我维持、并保持后代具持续性的群落，他比较侧重于植被的恢复。Jordan (1995) 认为，使生态系统恢复到先前或历史上（自然的或非自然的）状态即为生态恢复。Cairns (1995) 认为，生态恢复是使受损生态系统的结构和功能恢复到受干扰前状态的过程。Egan (1996) 认为，生态恢复是重建某区域历史上有的植物和动物群落，而且保持生态系统和人类的传统文化功能的持续性的过程。

美国自然资源委员会 (The US Natural Resource Council, 1995) 把生态恢复定义为：使一个生态系统恢复到较接近于受干扰前状态的过程。国际恢复生态学 (Society for Ecological Restoration, 1995) 先后提出三个定义：生态恢复是修复被人类损害的原生生态系统的多样性及动态的过程 (1994)；生态恢复是维持生态系统健康及更新的过程 (1995)；生态恢复是帮助研究生态整合性的恢复和管理过程的科学，生态系统整合性包括生物多样性、生态过程和结构、区域及历史情况、可持续的社会时间等广泛的范围 (1995)。

我们认为，生态恢复是指受损生态系统经自然恢复和人类改造作用恢复到它原来的状态或近似原来状态的过程。生态恢复的关键是生态系统功能的恢复和合理结构的构建。

### （五）生态修复

日本学者多认为，生态修复是指外界力量使受损生态系统得到恢复、重建和改进（不一定是与原来的相同）。这与欧美学者“生态恢复”概念的内涵类似。焦居仁 (2003) 认为，为了加速被破坏生态系统的恢复，还可以辅助人工措施，为生态系统健康运转服务，而加快恢复则被称为生态修复。

我们认为，生态修复是指对生态系统停止人为干扰，以减轻负荷压力，依靠生态系统的自我调节能力与自组织能力使其向有序的方向进行演化，或者利用生态系统的自我恢复能力，辅以人工措施，使遭到破坏的生态系统逐步恢复或使生态系统向良性循环方向发展；主要指致力于那些在自然突变和人类活动影响下受到破坏的自然生态系统的恢复与重建工作。

### （六）生态修复与生态恢复的区别与联系

“生态修复”与“生态恢复”这两词，意思相近，有时可以互相通用，有区别有联系。从应用范围和地域讲，生态恢复的称谓主要应用在欧美国家，在我国也有应用。而生态修复的叫法主要应用在日本和我国。

从概念本身来讲，生态恢复可以依靠生态系统本身的自组织和自调控能力，也可以依靠外界人工调控能力，但其概念本身并未强调生态系统本身的自组织、自调控能力和外界人工

调控能力对生态系统恢复作用的主次地位。而生态修复的概念强调生态修复应该以生态系统本身的自组织和自调控能力为主，而以外界人工调控能力为辅。

### （七）生态修（恢）复与生态建设的区别与联系

生态恢复与生态建设两者的出发点不同，目的不同，因而存在着本质上的区别。生态建设是根据人类所期望的某些特点和需要，将生态系统的现有状态进行主动与人为的改造和建设，其结果是经过人类建设的生态系统将进一步降低人类不希望出现的某些自然特点，并进一步远离其初始状态。而生态修（恢）复的对象主要是受损的生态系统，其目的是通过生态系统的自然恢复和人类改造作用恢复到它原来的状态或近似原来状态。在生产实践中，广义的生态建设也包括生态修（恢）复。

## 第二节 研究内容及方法

由于矿区生态修复研究和实施在矿业生产的不同阶段有不同的侧重，因此，在研究过程中不同的阶段采用的技术思路和方法也各不相同。对于开采中的矿区主要考虑充分利用有利于保护和恢复矿区生态环境的技术，减少环境污染和破坏；对于开采后关停或废弃的矿区，主要以恢复当地的生态环境，消除矿业生产造成的环境污染和破坏为主，同时，充分利用当地的土地等自然资源，加强后续产业的培育开发，形成新的经济增长点。基于此，矿区生态系统的修复，不论是基础理论的研究还是整治技术的开发，应根据矿山开采的不同阶段有所侧重。但是，由于矿区生态修复是一个涉及多学科的综合应用学科，因此，矿区生态修复研究的最基本的方法就是利用多个相关学科理论、方法和技术，进行优化组合，加上必要的创新，形成其理论和技术体系。

### 一、基础理论研究

基础生态学理论在解决退化生态系统相关问题上的“力不从心”，导致恢复生态学作为一个新的学科分支的出现和快速发展成为可能。恢复生态学从它产生之初就注定与基础生态学间存在着难以割舍的联系。事实上，恢复生态学的基本理论是以基础生态学原理为基础，通过理论创新和技术组合，综合了景观生态学、工程力学、地质力学、地球化学、社会经济学等多学科的精华。

生态修复基础理论的研究内容，也就是恢复生态学的研究内容。一般地，生态修复基础理论的研究也是通过两种途径来开展，即自然生态修复和人工促进生态修复，这也是生态修复的两种类型。由于生态修复的类型不同，研究的方法也各异。对于依靠自然能够自我修复的退化生态系统，其生态修复的基本理论是基础生态学的基本理论，即封育治理和近自然经营理论，当然也需要加上一些必要的人为辅助措施。而对于受损严重的生态系统，仅靠自然过程无法修复，必须加以人为促进才能得到修复，这类问题就要综合多学科，形成新的理论和技术支撑。

生态修复基础理论研究主要包括：生态系统结构（包括生物空间组成结构、不同地理单元与要素的空间组成结构及营养结构等）、功能（包括生物功能；地理单元与要素的组成

结构对生态系统的影响与作用；能流、物流与信息流的循环过程与平衡机制等）以及生态系统内在的生态学过程与相互作用机制；生态系统的稳定性、多样性、抗逆性、生产力、恢复力与可持续性研究；先锋与顶级生态系统发生、发展机理与演替规律研究；不同干扰条件下生态系统的受损过程及其响应机制研究；生态系统退化的景观诊断及其评价指标体系研究；生态系统退化过程的动态监测、模拟、预警及预测研究；生态系统健康评价、预警、经营技术研究等。

## 二、矿区生态评价研究

由于矿产资源开发利用导致的环境污染和破坏非常明显，所以矿区环境污染及其防治成为人们最早关心的难题，也是矿区生态修复开展最早的领域，这也是恢复生态学产生的最主要的原因之一。由于矿区开采造成的环境问题的严重性，人们对于矿区生态环境问题的关注，也经历了从最初关注矿产资源开发与生态环境保护研究，逐渐发展到矿区生态环境的恢复治理与可持续利用研究的一个渐进发展过程。研究内容涉及矿产资源开发对生态环境的影响，矿产资源综合利用政策，矿产资源综合开发利用与环境治理的政策等。采用的主要方法是矿区生态环境评价与预测。

根据提出问题、分析评价问题和解决问题的研究思路，在进行矿山环境评价之前，首先需要明确对矿山环境所存在的问题进行分类研究，之后依据不同精度的矿山环境调查成果和基础数据，针对不同问题，选择不同方法和方案进行矿山环境评价，在此基础上，才能提出合理解决矿山环境问题、保护与修复矿山环境的各种治理方案。

矿山环境评价是在现场调查和收集分析整理已有资料基础上，根据矿区所存在的各类环境问题所作出的现状模拟和预测预报。根据评价的环境要素，矿山环境评价可划分为单环境问题（要素）评价和多环境问题（要素）综合评价两大类。从时间角度出发，矿山环境评价又包括过去演变历史评价、现状评价和演化趋势预测评价三大部分。

## 三、关键技术的研究

关停废弃矿山生态系统的脆弱性，决定了其生态修复技术的复杂性、综合性。因此，关停废弃矿山生态修复的关键技术不是单项技术，更不是几个单项技术的简单组合，而是经过实践积累和检验的成熟的一套技术体系。但必须强调的是矿区生态修复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。废弃矿区生态修复不仅是对土地、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，矿区生态修复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，实现矿区经济与生态环境的可持续发展。

关键技术研究主要包括：退化生态系统的恢复与重建的关键技术体系研究；生态系统结构与功能的优化配置与重构及其调控技术研究；物种与生物多样性的恢复与维持技术；生态工程设计与实施技术；环境规划与景观生态规划技术；典型退化生态系统恢复的优化模式试验示范与推广研究。

### 第三节 研究的意义

我国是世界上自然生态系统退化和丧失很严重的地区，土地荒漠化、沙尘暴、洪水灾害、水资源短缺等，已严重威胁我国的社会经济发展和国民福利。为此我国采取了一系列工程措施，如植树造林、自然保护区建设、退耕还林等，但总体上我国的生态环境还是相当严峻。跨进新世纪，我国已经进入加快推进社会主义现代化建设和建设生态文明的新阶段。加强生态环境建设、优化人居环境，实现可持续发展，已成为我们需要研究的重大课题。

生态和谐是落实科学发展观、实现可持续发展的基石。我们必须站在构建和谐社会的角度去考虑生态建设、生态恢复、环境保护问题。构建和谐社会离不开统筹人与自然和谐发展，统筹人与自然和谐发展的基础和纽带是生态建设。加强生态建设是构建社会主义和谐社会极为重要的条件。

历史上，人类曾经崇拜依赖于自然、利用改造自然，而现在我们倡导人与自然的和谐发展。在处理人与自然的关系上，倡导三种态度——尊重自然、善待自然的伦理态度；拜自然为师、循自然之道的理性态度；保护自然、拯救自然的实践态度。因此，生态修复是落实科学发展观，建设生态文明的重要途径。

根据不同的社会、经济、文化与生活需要，人们往往会对不同的退化生态系统制定不同水平的恢复目标。但是无论对什么类型的退化生态系统，应该存在一些基本的恢复目标或要求，主要包括：①实现生态系统的地表基底稳定性。因为地表基底（地质地貌）是生态系统发育与存在的载体，基底不稳定（如滑坡），就不可能保证生态系统的持续演替与发展。②恢复植被和土壤，保证一定的植被覆盖率和土壤肥力。③增加种类组成和生物多样性。④实现生物群落的恢复，提高生态系统的生产力和自我维持能力。⑤减少或控制环境污染。⑥增加视觉和美学享受。

### 第四节 研究的对象和范围

本书研究的对象为矿山废弃地，指在采矿过程中所破坏的、未经一定处理而无法使用的土地。它包括：①由剥离表土、开采的岩石碎块和低品位矿石堆积而成的废石堆积地；②矿体采完后留下的采空区和塌陷区形成的采矿废弃地；③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；④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。

研究的范围为北京山区关停、废弃的金属矿、煤矿、采石场和石灰场的矿区及其周边因矿山开采、运输、居住等严重干扰而破坏的非矿区两部分。非矿区的界定主要包括两个原则，一是从地理位置上，处于矿区的周边，一般地，为确保植被恢复效果，以流域为单元进行全面的植被恢复。二是植被因矿山的开采造成了严重破坏，但是尚存一些原生植被。

从地域范围划分，本文研究的对象主要是集中在北京山区，即约1万km<sup>2</sup>的范围内；从时间上来划分，主要是针对建国以来，特别是新世纪以来关停、废弃的矿山，正在开采的矿

山的生态修复工作不包括在本文研究范围内；从类型来分，主要针对以上四种矿山，因建筑挖沙形成的沙坑，不在本书研究的范围。

## 第二章 废弃矿山生态修复研究进展

采矿业在传统上一直被认为是农业之后最重要、历史最悠久的人类活动，它为世界文明作出了巨大贡献（李闽，2003），甚至在有些国家或地区，采矿业已成为支撑区域经济发展的支柱。考古证明，原始人类已能采集石料，打磨成生产工具，采集陶土供制陶。随着科学技术的快速发展，采矿的技术手段日益先进，生产效率进一步提高，同时，也对环境造成了更加严重的负面影响。公众环境意识的不断提高与世界人口的迅速增长，消除矿业开采带来的环境污染，合理保护和利用有限的土地资源，实现可持续发展已成为摆在人们面前迫切需要解决的问题。自产业革命到20世纪60~70年代，矿产资源开发利用引起的公害事件和环境冲突不断发生和升级，致使世界上一些发达国家把矿业废弃地的生态恢复研究与综合整治做为生态环境建设的重点，并制定了严厉的法律规定，督促矿业公司致力于环境保护和矿区复垦。随着世界经济的快速发展，一些发展中国家也加大了对废弃矿山的整治。目前，矿业废弃地的生态修复从基础理论、技术体系、安全保障体系等方面都已日趋成熟。

### 第一节 国外废弃矿山生态修复研究进展

#### 一、研究与实践现状

##### （一）恢复生态学研究进展

生态恢复工作自美国民间组织于1935年开展以来，逐渐由社区性恢复向国家性甚至世界性生态恢复方向发展，由此而诞生的恢复生态学虽然距离成为一门成熟的学科尚有一定距离，但在概念、理论、方法及技术方面已做了大量的研究工作（赵晓英等，2001）。几十年来，国外在恢复生态学方面的研究取得了极大的进展。

英、美、澳等发达国家有着悠久的开矿历史，他们最初在恢复生态学方面的工作主要集中在开矿后废弃地植被的恢复。“恢复生态学”一词最初即缘于此。20世纪80年代以来，随着各类生态系统的退化以及相继引发的环境问题加剧，国外开始注重对不同退化生态系统（主要是采矿废弃地）的恢复重建的研究。

1973年3月，在美国弗吉尼亚理工大学召开了题为“受害生态系统的恢复”国际会议，第一次专门讨论了受害生态系统的恢复和重建等重要的生态学问题。日本人宫脇昭通过改造土壤，利用乡土树种，在较短时间内建立起顶级群落类型，其方法被称为“Miyawaki method”，生态修复理论日见雏形。1980年，Bradshaw和Chdwick出版了*The Restoration of Land, The Ecology and Reclamation of Derelict and Degraded Land*，从不同角度总结了生态恢复过程中

理论和应用问题。1987年, Jordan 等人出版了 *Restoration Ecology, A Synthetic Approach to Ecological Research*, 认为恢复生态学是从生态系统层次上考虑和解决问题, 恢复过程是人工设计的; 在人的参与下, 一些生态系统可以恢复、改建和重建, 生态修复理论日渐发展。1993年, *Restoration Ecology* 杂志创刊, 标志着恢复生态学走向成熟。1995年, 美国生态恢复学会提出, 恢复是一个概括性的术语, 包含改建 (rehabilitation)、重建 (reconstruction)、改造 (reclamation)、再植 (revegetation) 等含义。生态重建 (reconstruction) 并不意味着在所有场合下恢复原有的生态系统; 生态恢复的关键是恢复生态系统必要的结构和功能, 并使系统能够自我维持。1996年在美国召开了国际恢复生态学会议, 专门探讨了矿山废弃地的生态恢复问题。生态修复理论日趋成熟。

## (二) 主要技术研究进展

### 1. 覆盖土壤

对于任何类型的矿山废弃地来讲, 最简单的办法就是覆盖土壤, 这种办法能够解决上述所面临的各种问题。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、生态环保意识较强的矿山较容易使用。

### 2. 物理处理和化学处理

一般情况下, 土壤是很难引进或更换的, 因为费用太高。在废弃地恢复中克服物理因子的不足常在实践中应用, 如挖松紧实的土壤、整理土壤表面的措施是较为有效的措施。废弃地存在 pH 值太低的问题时, 向土壤中添加碱性物质以调整土壤的 pH 值也是非常有效的。

### 3. 添加营养物质

大部分矿山废弃物和类土壤物质缺乏氮、磷等营养物质, 是植物生长的限制因子之一, 解决这类问题的办法是添加肥料或利用豆科植物的固氮能力。早在 1881 年, 英国科学家达尔文曾经进行了“蚯蚓与土壤形成”的关系研究, 认为蚯蚓在改良土壤结构和肥力方面有重要作用, 称它为“农业的犁手”和“改良土壤的能手”。近年来, 有关蚯蚓生物学、生态学有大量研究报告, Curry 系统地报道了蚯蚓在退化土壤生态恢复中的作用。“蚯蚓繁殖盒”技术的成功应用, 更好地将蚯蚓应用到退化土壤恢复之中。研究表明, 蚯蚓对土壤的机械翻动起到疏松、拌和土壤效应, 改造了土壤结构性、通气性和透水性, 使土壤迅速熟化; 同时排出的粪便, 不但含有丰富的有机质和微生物群落, 而且具有很好的团粒结构, 保水保肥能力强, 促进了植物的生长发育, 是目前很好的土壤改良剂之一。但有关蚯蚓在矿山废弃地生态恢复中的作用鲜见有报道。

### 4. 去除有害物质

在废弃地恢复过程中, 有害物质的毒性起着严重的阻碍作用, 如在重金属污染严重的地区, 所能生长的植物仅仅是那些耐重金属污染的物种, 如绊根草 (*Cynodon dactylon*)、水烛香蒲 (*Typha latifolia*)、蜈蚣草 (*Pteris vittata*)、雀稗 (*Paspalum thunbergii*)、黄花稔 (*Sida rhombifolia*) 和银合欢 (*Leucaena glauca*) 等。因此, 这类废弃地生态重建的前提是先锋植



物必须是重金属忍耐种并施加肥料。近年来耐重金属污染植物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。

### 5. 添加物种

在矿山废弃地恢复过程中，通过人工选择物种，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，加快矿山废弃地的生态重建进程。在添加物种时，最先添加的物种往往是按照草本—灌木—木本植物的顺序进行的，其中豆科植物的添加起着关键性的作用。

### 6. 微生物修复技术

地球上存在的微生物超过 18 万种，其中包括约 26 900 种藻类，30 800 种原生动物，4760 种细菌，1000 种病菌和 46 983 种真菌。土壤中的微生物具有范围很宽的代谢活性，因此消除污染物的一个简单方法就是将污染物或含有这些污染物的物质加到土壤中去，依靠土壤中的土著微生物群落降解。反过来，对于被污染的土壤，也可以通过提高土壤微生物的代谢条件，人为增加有效微生物的生物量和代谢活性或添加针对性的高效微生物来加速土壤中污染物的降解过程。生物修复中可以用来接种的微生物从其来源可分为土著微生物、外来微生物和基因工程菌，从其微生物物种类型可分为细菌和真菌。通常土著微生物和外来微生物相比，在种群协调性、环境适应性等方面都具有较大的竞争优势，因此常作为首选菌种。国外在特定污染土壤中进行针对性土著降解菌的筛选和应用已经进行了多年，特别是在油田及石油类污染土壤的微生物降解技术和研究应用方面取得了很大进展。

通常，上述 6 种措施是因时、因地配合使用的。在英国、美国、德国的矿山废弃地生态重建中已经取得了显著效果。

## （三）整治与利用现状

矿山生态恢复作为国内外恢复生态学的重点，其研究和实践已被广泛开展。英国露天煤矿到 1993 年已复垦  $5.4 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，他们采用表面覆盖法成功地处理了锌冶炼厂废弃物，种植耐锌植物，改善了环境。美国 47% 的矿业废弃地恢复了生态环境。德国著名的莱茵褐煤矿区的林业复垦经过几十年的工作已取得很大的成绩。中国对平朔安太堡等露天煤矿及西南岩溶石山贫困地区进行了生态重建的实验示范研究。发达国家如英国、德国、美国等，在矿区土地复垦与生态重建方面处于国际领先水平。

近半个世纪以来，世界发达国家对矿区废弃地治理非常重视，据统计全世界废弃矿区面积约 670 万  $\text{hm}^2$ ，其中露天采矿破坏和抛荒地约占 50%。根据美国矿物局调查，美国平均每年采矿占地 4500  $\text{hm}^2$ ，被占用的土地已有 47% 得到了恢复，20 世纪 70 年代以来，生态恢复率为 70% 左右。在 20 世纪 70 年代，英国有矿区废土地 7.1 万  $\text{hm}^2$ ，其中每年煤矿露天采矿占地 2100  $\text{hm}^2$ ，由于各级政府的重视，通过法律、经济等措施，生态恢复效果显著，1974 ~ 1982 年，采矿废弃土地 19 362  $\text{hm}^2$ ，生态恢复面积达 16 952  $\text{hm}^2$ ，恢复率达 87.6%，到 1993 年露天采矿占地已恢复 5.4 万  $\text{hm}^2$ 。德国是世界上重要的采煤国家，年产煤量达 2 亿吨，以露采为主，德国政府对煤矿废弃地的复垦、生态恢复十分重视，早在 20 世纪 20 年代开始对露天煤矿矿区废弃地进行复垦，到 1966 年全国煤矿开采破坏土地 15.34 万  $\text{hm}^2$ ，已经完