

矿山地质环境保护与治理技术方法系列丛书

石灰岩矿山地质环境 风险评价与管理

——以广西凤山石灰岩矿山为例

唐朝晖 柴波 李远耀 贾洪彪 李鑫 张傲 编著



*Research on Geo-environmental Risk Assessment and Management of
Limestone Mine: a Case Study of the Limestone Mine in Fengshan County*



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

矿山地质环境保护与治理技术方法系列丛书

石灰岩矿山地质环境风险评价与管理

——以广西凤山石灰岩矿山为例

Research on Geo-environmental Risk Assessment and Management of
Limestone Mine: a Case Study of the Limestone Mine in Fengshan County

唐朝晖 柴 波 李远耀
贾洪彪 李 鑫 张 傲 编著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

石灰岩矿山地质环境风险评价与管理:以广西凤山石灰岩矿山为例/唐朝晖等编著. —武汉:
中国地质大学出版社,2013.12

(矿山地质环境保护与治理技术方法系列丛书)

ISBN 978-7-5625-3269-9

I. ①石…

II. ①唐…

III. ①石灰岩-矿山地质-地质环境-环境管理

IV. ①TD167

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 309173 号

石灰岩矿山地质环境风险评价与管理——以广西凤山石灰岩矿山为例 唐朝晖等 编著

责任编辑:舒立霞

选题策划:毕克成

责任校对:戴莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:333 千字 印张:13

版次:2013 年 12 月第 1 版

印次:2013 年 12 月第 1 次印刷

印刷:武汉中远印务有限公司

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-3269-9

定价:128.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

长期以来,矿产资源为我国社会经济的快速发展奠定了重要基础。然而,大规模、高强度的矿产资源开发,加之我国矿山地质环境保护恢复工作起步较晚,大量关闭和废弃的矿区地质环境日益恶化,矿山地质环境问题十分突出,已经严重影响到老矿区或当地的社会、经济和环境的可持续发展。

为了有效恢复保护这些闭坑或废弃矿区的地质环境。从2001年起,国家投入专项资金,通过矿山地质环境治理项目的形式在全国范围内对地质环境破坏严重的矿山进行引导性资助。同时,于2005年开始立法建立矿山地质环境保证金制度,并于2010年加大对遗留矿山地质环境治理专项经费投入,先后部署历史遗留老矿山环境治理项目、资源枯竭型城市矿山地质环境治理项目和矿山地质环境治理示范工程项目等一系列专项项目。但是,在目前我国矿山闭坑工程实践中,还缺乏相关理论依据,难以科学有效地指导矿山恢复治理工程的设计和施工。亟需建立矿山地质环境风险评价和管理体系,探索适合我国国情的矿山地质环境治理工程设计理论与技术方法。

本书依托国家财政专项广西凤山县石灰岩矿山地质环境治理项目,围绕石灰岩矿山地质环境风险分析与管理的研究主题,基于风险分析与控制的矿山地质环境问题的分类方案,总结了石灰岩矿山内地质环境问题组合模式和成灾效应,探讨了突发型矿山地质环境问题和渐变型矿山地质环境问题的风险量化理论和方法,在此基础上,提出了基于风险控制和管理矿山地质环境治理方法和技术。

石灰岩矿山是我国最常见的建材类矿山,分布广泛,数量众多。本书以石灰岩矿山为例,总结分析矿山地质环境风险评价与管理理论,对指导我国矿山地质环境治理工程实践具有重要实际意义。同时,本书中的一些地质环境风险分析理论的研究内容,是作者及其课题组成员近年来承担或参与一系列地质环境调查评价、地质灾害调查、矿山地质环境调查评价科研项目的最新研究成果,对于丰富和

完善地质环境评价理论也具有积极的意义。因此,本书可为相关学科的研究技术人员及实际工作者提供一些帮助和借鉴。

本书内容共分为六章。第一章对国内外在矿山地质环境风险研究领域的现状进行了比较全面的梳理,目的是帮助读者了解国内外在这一领域的研究历史与过程。第二章对矿山地质环境风险研究的基本术语和定义进行了总结,归纳了矿山地质环境问题的成因、分类和成灾效应,提出了矿山地质环境风险评价与管理的总体框架。第三章介绍了石灰岩矿山地质环境风险评价现场调查的目的、方法和编录方法。第四章是关于石灰岩矿山突发型地质环境问题风险评价的理论与方法,重点讨论矿山地质灾害的风险评价流程、可靠度分析和易损性评价方法。第五章是关于石灰岩矿山渐变型地质环境问题风险评价的理论与方法,重点讨论了渐变型矿山地质环境问题的易损性评价和风险量化。第六章提出了石灰岩矿山地质环境风险管理的问题,探讨了基于风险调查和评价开展闭坑工程设计的方法,主要是矿山地质环境风险管理理论方法的实践成果。

本书的第一章由唐朝晖、张傲、李鑫编写;第二章由唐朝晖、柴波、贾洪彪编写;第三章由柴波、李远耀编写;第四章由唐朝晖、李远耀、柴波、张傲编写;第五章由唐朝晖、柴波、李远耀编写;第六章由唐朝晖、柴波、李远耀、李鑫编写。全书由唐朝晖、李远耀统稿,柴波校订。罗超、马晓峰、董欣欣、王汉臣、马丽、易红清、苏红瑞、万佳文等参加了资料收集、文字整理、图件清绘等工作。

另外,本书主要内容依托于国土资源部门近年来开展的矿山地质环境恢复治理专项项目,但同时也是作者及其课题组研究人员过去十余年关于地质环境评价问题在矿山领域应用和拓展的研究成果。在研究过程中还得到过中国地质调查局一系列地质调查项目的资助,以及许多学者和学科同仁们提供的热心帮助和建议,在这里一并表示感谢!

由于环境地质学及地质环境评价基本理论与方法近年来发展非常迅速,地质环境风险评价又是一门多学科交叉的前沿性研究,所涉及的内容相当广泛,限于笔者的水平和实践经验有限,书中不足之处在所难免,衷心希望广大读者批评指正。

笔 者

2013 年 10 月 30 日

目 录

第一章 矿山地质环境风险研究现状	(1)
第一节 矿山地质环境风险研究的意义	(1)
第二节 地质环境风险研究概述	(2)
第三节 矿山闭坑工程研究现状	(4)
第四节 石灰岩矿山治理工程研究现状概述	(6)
第二章 矿山地质环境风险基本概念	(8)
第一节 基本术语	(8)
第二节 矿山地质环境问题分类	(8)
第三节 石灰岩矿山地质环境问题成因和形式	(13)
一、石灰岩矿山地质环境问题成因	(13)
二、矿山地质环境问题组合形式	(15)
第四节 石灰岩矿山地质环境问题成灾效应	(16)
第五节 矿山地质环境风险评估与管理基本体系	(17)
第三章 石灰岩矿山地质环境调查及编录	(21)
第一节 矿山地质环境调查的目的和任务	(21)
一、目的	(21)
二、任务	(21)
三、矿山地质环境调查工作内容	(21)
第二节 矿山地质环境调查方法	(22)
一、勘查方法选择原则	(22)
二、调查方法的配置	(22)
三、石灰岩矿山地质环境问题调查常用方法	(23)

第三节 广西凤山县城区周边石灰岩矿山地质环境问题调查实例	(26)
一、矿区地质背景	(26)
二、广西凤山县城区周边石灰岩矿山地质环境问题	(32)
三、典型矿山地质环境调查数据获取过程	(34)
第四章 石灰岩矿山突发型地质环境问题风险评价	(57)
第一节 突发型矿山地质环境问题风险评价基本流程	(57)
第二节 地质灾害破坏概率和可靠度分析	(58)
一、Monte Carlo 模拟法	(58)
二、可靠指标法	(60)
第三节 石灰岩矿山易损性评价	(62)
一、承灾体构成	(62)
二、建筑物易损性评价	(63)
三、室内人员的易损性评价	(65)
第四节 广西凤山县石灰岩矿山地质灾害风险评价实例	(68)
一、落石危险性评价	(68)
二、崩塌危险性评价	(97)
三、建筑物易损性评价	(101)
四、石灰岩矿山突发型地质灾害风险评价	(120)
第五章 石灰岩矿山渐变型地质环境问题风险评价	(126)
第一节 渐变型矿山地质环境问题风险评价内容	(126)
一、评价内容	(126)
二、评价目标	(126)
第二节 渐变型矿山地质环境问题危险性评价	(128)
一、危险性特点	(128)
二、危险性评价的概念模型	(130)
第三节 易损性评价	(132)
一、易损性表达的要素	(132)
二、易损性评价模型	(133)
第四节 渐变型矿山地质环境风险评估	(156)
一、单参数的风险评估	(156)

二、综合评价	(157)
第五节 广西凤山废弃石灰岩矿山渐变型地质环境问题风险评价	(157)
一、地形地貌景观破坏	(157)
二、生态资源破坏	(158)
第六章 石灰岩矿山地质环境风险管理对策	(160)
第一节 矿山地质环境风险管理	(160)
一、风险决策	(160)
二、风险控制手段	(166)
第二节 矿山地质环境治理工程设计	(167)
一、矿山地质环境治理工程设计的特点	(167)
二、矿山地质环境治理工程设计的基本思路	(167)
三、成功案例	(168)
第三节 石灰岩矿山地质环境风险管理与控制工程实践	(170)
一、凤山废弃石灰岩矿山地质环境风险多目标决策	(170)
二、凤山废弃石灰岩矿山地质环境风险控制工程设计方案	(175)
三、矿山地质环境治理工程施工风险管理	(187)
主要参考文献	(190)

第一章 矿山地质环境风险研究现状

第一节 矿山地质环境风险研究的意义

矿产资源对我国经济建设至关重要,长期以来处于大规模和高强度地开发的矿产资源,为国家的经济建设和社会发展作出了巨大贡献(何芳等,2010;姜建军等,2005)。然而,我国对矿山地质环境保护和恢复工作起步相对较晚,对矿山关闭工程缺乏系统的规划和设计。许多已经废弃和关闭的矿山,由于没有开展有效的地质环境治理和恢复工作,矿区内的环境日益恶化(徐友宁,2008;张进德等,2007)。据2002—2006年全国矿山环境调查数据统计,截至2005年底,全国矿山共引发地质灾害1.2万多处,死亡4 251人,造成直接经济损失166.3亿元;调查矿山面积580万 hm^2 ($1\text{hm}^2=10\,000\text{m}^2$),其中采空区面积约80万 hm^2 ,地面塌(沉)陷面积35万 hm^2 ,压占、破坏的土地面积约145万 hm^2 ;采矿活动每年产生的废水、废液数量约61.9亿t;每年产生的尾矿或固体废弃物量约17.6亿t,年排放量约15.3亿t(中国地质调查局,2009)。由于矿山排放的废渣常堆积在山坡或沟谷,在暴雨期间,极易发生滑坡和泥石流,如:河南小秦岭西峪沟金矿在1994年7月,暴雨形成泥石流,毁坏了矿区道路及生产、生活设施,造成51人死亡;2008年9月,山西襄汾塔山铁矿区尾矿坝溃决造成重大损失,导致278人死亡、33人受伤,直接经济损失9 600万元。为了有效地保护这些已关闭老矿区的地质环境,从2010年起,国家财政加大了对老矿山地质环境治理专项经费投入,每年预算达60多亿,并先后部署了老矿山、资源枯竭型城市和示范矿山等一系列的治理工程。这些政策措施的实现需要理论指导,为此,亟待探索适合我国国情的矿山地质环境治理工程设计理论。

诸多发达国家十分重视矿山地质环境的治理与恢复,如:加拿大在矿山闭坑时,要求解决好环境与安全两方面的问题;澳大利亚采取崇尚自然、以人为本、恢复原始的闭矿理念,实施边开采边关闭的治理工程。在矿山关闭工程的实践过程中,也形成了相应的理论体系,如矿山生命周期理论、风险分析理论、矿山关闭的经济学和生态学理论等(Fourie等,2006;Reid等,2009;Laurence等,2006)。在我国,矿山关闭工程仍缺乏科学的理论指导,无法有效地指导治理工程设计和施工,继而造成重大经济损失和人员伤亡,如湖北省远安县盐池河磷矿崩塌,死亡307人。本书以石灰岩矿山为例,讨论矿山地质环境风险评价与管理体系,对我国矿山关闭设计领域的理论研究具有重要作用。

石灰岩矿山是最常见的建材类矿山,多分布在灰岩裸露的山区,采矿后的掌子面内容易形成崩塌和落石等地质灾害。如:2008年11月23日,广西凤山县城区周边1处石灰岩矿山发生体积约2.1万 m^3 的崩塌,造成了6人死亡,6人受伤,16间房屋被掩埋,3间房屋被损坏。由于城市发展离不开对石灰岩建材的需求,全国范围内,类似凤山这样生产石灰岩建材的城镇诸多,并且大部分矿山位于城镇边和主要交通线路旁,崩塌、落石等地质灾害严重威胁道路交通和城镇居民的生命财产安全(唐朝晖等,2013)。对石灰岩矿山地质环境风险分析的研究,对

于指导该类矿山地质环境治理工程具有重要的理论意义。

第二节 地质环境风险研究概述

地质环境风险是多门学科交叉的前沿研究问题,涉及到地质学、环境地质学、灾害学、统计学、经济学和管理学等。与传统的地质灾害成灾机理和灾害预测相比,风险研究针对灾害的损失,以人类社会经济所能接受的风险水平作为地质灾害管理的依据,并提出了减少灾害损失的多种可行途径。经历了 30 多年的发展,地质灾害风险已成为土地利用规划和维护社会安全的重要依据,也成为编制减灾规划和防治工程设计最为有效的标准。

地质环境风险评价最早出现在滑坡灾害研究领域,起初主要通过滑坡事件发生的可能性描述滑坡灾害风险,相当于滑坡灾害的易发程度。自 20 世纪 70 年代开始,滑坡易发性分区被用于城镇建设选址和滑坡治理工程的危险性区划(Brabb 等,1984;Nilsen 等,1979;Kienholz, 1978),通过不同等级的分区表示区域滑坡的稳定性,以及未来一段时间可能受到滑坡的威胁。

Varnes(1978)指出滑坡风险图应该能够反映滑坡发生的概率以及发生的强度等信息。20 世纪 80 年代以后,滑坡风险分析和管理发展迅速,并逐渐运用量化的风险表达,其应用范围也由区域土地利用规划扩展到更广阔的领域,包括单体滑坡的工程治理、管线等基础工程的风险防范、海洋用地的风险管理和大型工程建设的减灾工程等(Varnes, 1984; Whitman, 1984; Einstein, 1988, 1997; Fell, 1994; Leroi, 1996; Wu 等, 1996; Fell 和 Hartford, 1997; Lee 等, 2004; Nadim 等, 2006)。随着研究的逐渐深入,相继出版了一系列与滑坡风险管理相关的研究计划、技术指南及制定了相关的法规条例,并且明确了将滑坡风险作为社会管理中的重要内容。

我国是滑坡灾害多发国家,灾害风险研究开始于 20 世纪 80 年代,很多学者致力于地质灾害风险研究,推动我国地质灾害减灾的技术水平向前发展(张业成和张梁,1996;张梁等,1998;向喜琼和黄润秋,2000;殷坤龙等,2001,2012;刘希林等,2001;乔建平等,2001;唐川等,2005;吴树仁等,2009,2012)。目前,在我国用于度量灾害风险的方法大体分为两类:定性的风险指数和定量的期望损失(殷坤龙等,2012)。受国民经济条件和教育水平的限制,我国各地区对滑坡风险成果应用存在较大差异,经济发达地区和大型工程建设区对风险防范的意识相对较强,并有较为完善的灾害管理体制(殷坤龙等,2003;刘传正,2004;张桂荣等,2007),而欠发达地区则缺乏降低灾害风险的有效措施。

在矿山领域的风险研究,主要集中在矿山地质灾害风险评价和重金属污染等环境风险评价两个方面(Duzgun, 2005; Heinrich, 1980; James 等, 1996; 李静, 2006; 李泽琴等, 2008; 侯佳渝, 2006)。矿山地质灾害类型较多,且与人类的采矿活动密切相关,因此,在矿山地质灾害风险研究中,需要综合考虑人类采矿活动和地质灾害背景条件两方面对地质灾害风险的影响。矿山地质灾害风险评价所采用的方法,多数借鉴于滑坡灾害风险评价的相关理论和方法,如: Duzgun 和 Einstein(2004)通过对 Appalachian 地区 12 个矿山的 1 141 次煤矿顶板坍塌事件进行统计,提出了煤矿顶板坍塌的风险决策方法,总结了顶板坍塌的概率分布函数和期望的损失模型; Palei 等(2009)通过逻辑回归模型,分析地下巷柱开采煤矿顶板塌落的风险; 腾冲(2007)基于金属矿山采空区塌陷、泥石流、滑坡、岩溶塌陷等主要地质灾害的形成机理和发育规律分析,建立了多因素评价模型进行风险预测,并分别对金属矿山地质灾害的生态与经济进

行评价;郭新华等(2006)以河南某地石灰岩矿山为对象,对采矿场、矿石库和废石场等分项工程引发、加剧和遭受地质灾害的风险进行预测,根据地质灾害的危害对象、危害程度和期望价值损失率对分项工程建设场地的危险性及适宜性进行了评估;刘鹏刚(2009)在资源耗竭矿山灾害特征分析和演变机制的基础上,对其灾害风险进行了分析和管理。

矿山地质灾害风险评价是为了达到风险控制的目的,为此,已有研究成果十分重视对矿山地质灾害危险源的识别,如张兵等(2003)提出了凤凰山铜矿危险源的辨识过程和方法,介绍了“三因素(LEC)”评价法在该矿的应用,以及危险分级管理监控体系的构建情况。唐敏康等(2004)对金属矿山重大危险源辨识与控制问题进行了讨论。除此之外,考虑了矿山地质灾害发生后的次生灾害效应,将矿区内的灾害链效应用于风险评价,如郭付三等(2010)以河南豫西灵宝秦岭金矿枣乡峪乱石沟为例,介绍了矿渣堆失稳形成碎屑流在空间上逐级影响形成矿山地质灾害链的灾害效应。

矿山开采和矿业活动常存在重金属、酸性废水和烃类有机污染物引起的环境污染风险,环境污染常通过水、土、空气和作物等影响人类健康。Voulvoulis 等(2013)总结了采矿活动中污染物的形成过程,并提出了环境污染对社会、环境和经济作用风险的评估框架。然而,矿山环境污染风险的实际应用,主要聚焦于人类的健康议题(Kim 等,2005;Lee 等,2006),研究有害污染物进入人体的途径和评价对人体健康造成的影响(Granero 等,2002;Hough 等,2004;Nadal 等,2004;Grasmck 等,2005;Lim 等,2008;Emese 等,2008;Ji 等,2013)。目前,美国环保局 USEPA 所提出的风险指数应用最广泛,该指数通过日平均污染物摄入量和避免癌症发生的污染物允许摄入量来评价矿山环境污染的风险(USEPA,2001,2004,2011;Lim 等,2008;Liu 等,2013;Du 等,2013)。矿山环境污染除威胁人类健康外,对整个矿区的生态系统都存在影响,Eduardo(2009)总结了土壤、水生和陆地生物受污染物影响的风险评价体系。

除针对上述矿山地质灾害或环境污染等单个地质环境问题的评价外,地质环境问题综合评价的思路也被提出,从而形成了矿山地质环境影响性评价、承载力评价和风险评价等相应的指标体系和评价模型(Huang 等,2012;Canbulat 等,2013)。这些矿山地质环境综合评价的成果被用于一些矿产资源富集区或大型矿山的地质环境保护和治理规划。考虑到矿山的生命周期,存在探矿、开采设计、采矿和关闭的整个过程,有学者提出了矿山生命轮回模型,并用于矿山地质环境风险管理,这一模型在加拿大、南非和澳大利亚等一些国家被广泛应用(Ecobalance,2000;Norgate 等,2000;Stewart,2001;Durucan 等,2006;Fourie 等,2006;Mohan 等,2009;Reid 等,2009)。

近些年地质环境风险的研究成果和发展方向主要体现在以下四个方面。

(1)风险评价的理论框架更标准化,实施计划更法制化和普及化。联合国教科文组织及一些国际组织已提出风险评价的框架,并给出了相应的技术指南,如 *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*,在国际范围内被认可。另外,发达国家已经将风险管理法制化和普及化,如欧洲提出的 safeland 项目,通过研究、合作、管理和教育将滑坡风险的成果更加普遍地应用。同样,我国也在探索在县市地质灾害管理中,应用地质灾害风险的技术框架和管理模式。

(2)风险评价结果定量化。逐渐由定性的风险等级向定量的风险结果发展,采用灾害发生概率、污染指数、人口易损性指数和经济损失值等定量指标计算和表达风险值。如香港对应滑坡的风险表达式是通过具体的经济损失数进行核算,从而确定风险管理和控制措施。

(3) 矿山地质环境风险评价系统化。除针对矿山地质灾害和环境污染外,还提出了针对生态环境和矿山土地安全利用的风险管理框架(Neri 等,2010;Maczkowiack 等,2012),扩大了矿山地质环境风险评价的范畴。此外,有学者开始研究矿山地质环境风险综合评价和管理(唐朝晖等,2012;Canbulat 等,2013),将评价结果用于指导矿山开发和采矿后的土地利用。

(4) 矿山地质环境风险评价服务化。矿山地质环境风险评价以矿区防灾减灾、环境保护、土地和生态恢复为目标,风险结果对于服务矿产资源开发和地质环境保护均具有重要意义。对于我国而言,其更是服务生态文明和美丽中国这项国家目标的关键。

第三节 矿山闭坑工程研究现状

矿山关闭是矿山整个生命周期的必经阶段,关闭后的矿山也会带来诸多的环境和社会问题,若没有实施有效的矿山关闭工程,将会给矿区人民的生产生活带来严重影响。

关于矿山关闭工程的技术要求和法律法规,各个国家有不同的规定。美国要求在矿业活动终止时须进行全面的地面复垦工程。1977年,美国国会通过并颁布了第一部全国性的土地复垦法规——《露天采矿管理与复垦法》(以下简称《复垦法》),其目标主要是从法律的角度,要求矿权所有人将开采破坏的土地必须恢复到原来的状态,同时改善矿区的生态环境。大部分矿山关闭的相关治理工程和技术规范都要求以《复垦法》为依据进行制定,该法规主要包括以下四个方面:首先,遵循“原样复垦”的基本原则,必须按采矿前土地地形、生物群体的组成和密度进行恢复;其次,固体废物堆积和填埋都要进行技术处理,防止可能发生的滑坡及填埋废物对水体的污染;再者,厂矿必须自行对在矿产资源的勘探、开采、洗选和加工过程中产生的废水作出处理或将污水排入污水处理厂;最后,在土地复垦治理技术中,对复垦所需要的填充物作出具体规定,如对填充物的密度(根据复垦后的土地用途而定)、填充物混合比例、填充高度和表土覆盖等都提出了具体要求,并有专门技术管理部门负责检查监督。《复垦法》于1990年和1992年经过了两次较大规模的修订和完善。自该法律实施以来,美国废弃矿山的堆石场现已复垦1.3万多公顷(1公顷=10 000平方米);清除了长达240余万英尺(1英尺=0.304 8米)的露天未开采工作面。目前,美国20%以上原先破坏的土地已经得到复垦,极大地改善了矿山地质环境,并提高了土地资源利用率。

加拿大为保证矿业可持续发展战略,提出矿山关闭与复垦制度。各省须按要求在颁发采矿许可证前,提出关闭计划,即关闭、复垦及后续的处理或监督费用的估计及实施计划(Cowan,1999),并通过一系列严格的审查后,方可颁发许可证。澳大利亚的矿山环境管理体制由中央确定立法框架,各州相对有较大权限自己制定执法条例。矿业公司会依据州政府按相关程序审批并签有协议的“开采计划与开采环境影响评价报告”,边开采边对开采结束的矿山进行生态恢复。南非在矿山环境管理与立法方面,主要是通过对矿业法和资源法等法律法规的不断完善来指导矿山的关闭,这些法规包括1991年颁布的《南非矿业法》、1998年颁布的《南非矿产资源政策白皮书》和2002年颁布的《南非矿产和石油资源开采法》,法律规定申请探矿权、采矿权和矿业经营许可证的同时,必须提交环境管理规划书。矿山生产过程中要基本执行环境规划方案,在矿山闭坑时要领取闭坑证明。

Robertson 和 Shaw 认为,一个成功的矿山关闭计划必须充分考虑矿产资源开发对周围自然系统产生的长期影响,它们涉及物理、化学、生物和社会四个方面的影响效应。将矿山关闭

计划总结为 12 步,包括采矿前的环境调查、制定合理的开采方案、制定和评估矿山关闭措施、制定监督和保障措施及关闭计划申请、执行的整个程序。一个完整的矿山关闭计划,也应该包括对矿山开采设施和基础设施的处理,对矿山废弃地的复垦和生态的修复,对三废治理和相应社会经济问题的处理等。

矿山地质环境治理技术是确保矿山关闭计划顺利实施的关键内容。针对矿山地质环境治理技术的研究主要集中在以下四个方面:①固体废弃物的治理技术;②矿山废水的治理技术;③矿山生态恢复技术;④矿山废弃地的复垦技术(Clark, 1999; Hilson, 2000; Bell 等, 2001; 何国清, 1991; 武强, 2003; 徐友宁, 2005)。

早期对于固体废弃物的治理相对较为简单,多数直接堆放到预先划定的场地,这一过程的规划设计相当重要,许多发达国家采取开采与复垦同步进行的规划理念,如德国弗兰格尼亚石膏矿床,在开采过程中,将剥离物及母土就近回填复垦后的土地可用于农林牧渔及修建公共设施等。固体废弃物的回收利用也是治理技术的重要组成部分,一是通过二次筛选选出精矿,二是经过再处理回收有价金属和矿石(杨建民, 2001; 李福来, 2005)。近年来除考虑再回收外,对于固体废弃物的资源化利用的新技术研发及运用较多,将固体废弃物用于建筑材料、作土壤改良剂和磁化复合肥及采空区充填料等(李培良等, 2004; 王湖坤等, 2005),如同济大学利用梅山尾矿烧制的装饰面砖装潢该校的建筑规范学院楼;我国山东招远金矿、焦家金矿采用尾矿砂回填采空区。

我国矿山排放的废水主要有酸性废水、含悬浮物废水、含盐废水和选矿废水等,为消除矿山废水的危害,国内外学者对此做了大量的研究工作。治理矿山酸性废水较为成熟的方法主要分为物理法、化学法和生物化学法三大类(Jönsson 等, 2006; 钟常明, 2007; 彭容秋, 2006)。物理法治理:Eom 等(2005)采用离子交换法处理电镀废水,镍的去除效率高达 99%,并采用硫酸处理交换树脂使其再生;Mohan 等(2006)利用褐煤处理矿山酸性废水,有效地去除了废水中的重金属离子,并通过硝酸解析回收了金属。化学法治理:瞿建国等(2001)在研究中和氧化絮凝工艺处理高浓度含铁废水时,往石灰乳中加入一定比例的 Na_2SiO_3 作为中和沉淀剂能有效压缩沉渣;Herrera 等(2007)采用二段中和法处理日本某矿山酸性废水,用 CaCO_3/MgO 作中和剂,大大降低了废水中的重金属离子浓度。生物化学法方面:利用自然界硫循环原理的生物法处理含重金属离子酸性废水是一门前沿技术,近年来相关研究工作较多。Jong 和 Parry (2003) 在升流式厌氧反应器中利用 SBR 处理重金属离子, Cu 、 Zn 、 Ni 的去除率达到 97.5% 以上。另外随着研究深入,一些新的废水处理技术得到发展,如电化学处理技术、人工湿地和磷灰石排放系统等(姚运先, 2005; Choi 等, 2002)。

近年来,矿山生态恢复技术用于废弃矿山关闭治理工程是研究热点。恢复生态学理论研究大约始于 1973 年,其后矿山生态恢复实践也逐渐展开。迄今,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林业复垦经过几十年的工作,成效显著。澳大利亚是以矿业为主的国家,也是世界上较为先进且成功处理土地扰动的国家,它与新西兰等国家一起堪称世界生态恢复实践的楷模(任海, 2001)。

最常用的生态恢复技术是利用客土法改良土壤,修复被重金属污染的土壤。同时,也可采用微生物的代谢活性加速土壤中污染物的降解过程改良土壤,这在国外使用十分普遍,特别是在油田及石油类污染土壤的微生物降解技术方面(牛一乐等, 2005)。在物种选择方面,常在重金属污染的土壤上种植某特定的植物,用于吸附土壤中的污染元素,达到污染治理与生态修复

的目的(陈奇,2009)。其他的生态恢复技术研究集中在以下几方面:植被恢复制约性因子、植被恢复对生态环境的影响、矿山植被恢复植物品种和选配植物成活技术(Grant,2002;张志权,2001),如 Prakash 等(1995)在灰岩采场研究了四种植入菌根的豆科植物的适宜性;Lubke 等(1999)认为应保留表土层,并充分保护利用,表土使用有利于进行植被恢复;在西班牙中部地区,Martinez Ruiz 等人(2001)研究了基底的粗糙程度和坡向对铀矿废弃堆排物上的植被演替影响。国内学者,郭逍宇等(2004)研究认为,光照和水分是矿山植被恢复进程中起决定性作用的限制性因子;胡振琪等(2003)在对煤矸石山的植物种群生长及其对土壤理化特性的影响进行研究后,认为植被可明显减小煤矸石山的渗透速率,有提高保水和持水能力的作用。

与矿山生态恢复技术密切相关的矿山废弃地复垦技术,也得到了很大程度的发展,主要的复垦技术包括三个方面:物理措施、化学措施和生物措施(李海英,2007)。物理法在经济条件较好、生态环保意识较强的矿山中容易使用,如李小江等(2004)对清水塘矿山重金属污染废弃地,使用客土覆盖法进行复垦,取得了较好的效果。此外,很多矿山废弃地的土壤结构,需要采取一定的化学措施降低其酸性,提高土壤肥力,如 Davis(1995)在对锌污染的土壤治理时,通过加入石灰石提高土壤 pH 值,降低植物中锌的浓度,有效地提高了植物的产量。同时,废弃地生物修复措施常和矿山生态恢复技术交叉,采用植物或微生物的处理技术进行废弃地复垦,如 Mishraa(2008)等对盐碱化土壤种植植物后的理化特征监测发现,随着种植年限的增加,土壤的理化性质发生了明显的改变,土壤肥力得到提高。

矿山关闭工程研究的发展趋势主要表现为以下四个方面。

(1)矿山关闭法规约束多元化。把直接管制和经济手段有机结合,是国际矿山环境管理的发展趋势,如美国、加拿大、澳大利亚、法国等国家,为了确保矿山企业履行其矿山关闭恢复义务,普遍实行了保证金制度。

(2)矿山废弃物的资源化。除固体废弃物治理方面资源化较为普通,在废水治理中也有这方面的趋势,如矿山酸性废水作为原料来合成纳米磁性材料。

(3)矿山关闭工程的综合化。由最早的固体废物单独堆积治理,到现阶段的生态修复技术与土地复垦技术交叉使用,改善了矿山关闭后的地质环境并提高了土地资源的综合利用。

(4)矿山关闭技术的创新化。无论是在对固体废弃物治理技术中,还是废水治理、生态修复技术中,均有较大的创新,为保证矿山关闭顺利进行提供了技术保障。

第四节 石灰岩矿山治理工程研究现状概述

石灰岩边坡治理工程大体可分为传统的边坡防治工程和生态恢复工程。传统防治工程由四类治理技术组成,即改变边坡的几何形态、排水、支挡和边坡内部加固。对于石灰岩采场,多形成由坚硬岩石组成的掌子面边坡,锚索加固技术被广泛应用,如河南省高陡石灰岩边坡采用了中空注浆杆和全长黏结锚杆进行加固,现场试验表明中空注浆锚杆具有较好的加固效果(王四巍等,2008)。其他的传统治理工程也在掌子面边坡整治工程中被广泛使用。

生态恢复边坡最早出现在中国,早在 17 世纪,人们就利用生态恢复技术保护黄河河岸。后来该项技术逐渐被引入欧洲和北美等地。在英国,从 20 世纪 40 年代末开始,将生态护坡用于堤岸和交通工程边坡的保护。美国在 1936 年南加利福尼亚州的 Angelescrest 公路边坡治理中,采用了大量生态护坡技术。在日本,人造的生态护坡技术发展迅速,并将绿化网护坡、厚

层基料喷射和植被型混凝土等技术成功应用于石灰岩边坡防护技术中。然而,我国的现代生态防护技术研究起步较晚,在 2000 年,才有岩石坡面喷混快速绿化新技术的报道。

现今,生态技术恢复石灰岩矿山掌子面边坡已成为治理工程的总体趋势,常用的恢复技术可分为两类:一类是在岩壁通过挂网、喷射人造植物层达到边坡的绿化目的;另一类是通过再造地质环境和生物多样性以恢复自然生态系统(Marin,1995;Gray 等,1996;任海,2001;周德培等,2003)。但由于石灰岩边坡缺乏植物生长所需的土壤、水分和养分条件,其生态恢复和景观再造工程一直以来是一项技术难题。

喷混等边坡绿化技术无法达到生态系统自我稳定的功能,需要人工的维护,且很难达到与周边自然景观协调的效果。王志泰(2012)对黔中岩溶地区高速公路石质边坡人工植被进行研究后认为,人工植被恢复短期效果明显,然而其长期可持续性与生态安全性仍然无法保证。为此,许多石灰岩矿山成功恢复的案例,都是通过再造植物生长所需地境和生物多样性达到生态系统修复的目的。在我国古代,已有利用生态景观重建技术恢复石灰岩采石场的案例,如浙江绍兴东湖景区是在石灰岩采场的基础上建造而成的,其在明清时期已建成风景旅游胜地。国际上,也有许多成功的经典案例,如加拿大布查德花园即是在废弃石灰岩采场的基础上,建设起的生态花园。日本国营明石海峡公园原来是一处大型采石采砂场,其探掘深度达 100m 以上,之后由著名设计师安藤忠雄进行规划设计,其规划的主题是使园区得到生命的回归。1983 年在慕尼黑举行的园林展场地原来是一块平坦的采石场荒地。通过地形塑造,形成谷地式风景,成为观赏、休闲之佳地(吴琳琳,2009)。

综上所述,在传统工程技术加固石灰岩掌子面边坡的基础上,利用生态修复技术完成矿山生态复垦和景观重建是矿山地质环境治理的主要方向,研究趋势包括以下几个方面。

(1)石灰岩矿山生态恢复技术的基础研究。由于石灰岩矿山缺少植物生长所需的土壤、水分和养分,因此,难以构建自然稳定的生态系统。有学者提出地境再造技术,利用石灰岩矿山裂隙空间建造植物生长所需的地境条件。这些技术的实施需要开展生态恢复技术的基础研究,包括矿山边坡浅层裂隙水的运移、裂隙内养分的储存及裂隙内植物根系生长规律等。

(2)石灰岩矿山植物物种选择和培育技术研究。在石灰岩废弃矿山生态恢复方面,需要继续探索经济、适用、高效的生物工程技术措施,加强选育适合石灰岩矿山废弃地生长的植物品种。

(3)石灰岩矿山景观再造技术研究。石灰岩矿山常形成高陡边坡或深挖采坑,岩石壁面裸露、破碎,需要在地形地貌景观和生态景观再造方面开展研究,以实现矿山和周边景观的协调。

第二章 矿山地质环境风险基本概念

第一节 基本术语

根据国内外在地质灾害、地质环境、城市地质环境及矿山地质环境风险评估与管理领域已有的代表性研究成果(陈丽霞,2008),对矿山地质环境风险评价涉及的基本术语作如下定义。

(1)矿山地质环境问题:指受采矿活动影响而产生的地质环境破坏的现象。主要包括矿区地面塌陷、地裂缝、崩塌、滑坡、含水层破坏、地形地貌景观破坏等。

(2)危险性(Hazard):特定区域内某种潜在的地质灾害(本书特指矿山地质灾害)现象在一定时期内发生的概率,危险性 H 为 $0\sim 1$ 之间表示的概率。

(3)易损性(Vulnerability):某种地质灾害以一定的强度(规模、速度和运动距离等)发生后,对承灾体可能造成的损失程度,易损性 V 可以用 $0\sim 1$ 的区间来表示, 0 表示无损失, 1 表示完全损失。

(4)承灾体(Element at risk):特定区域内受灾害威胁的各种对象,包括人口、财产、经济活动、公共设施、土地、资源和环境等,承载体 E 通常指经济价值和人口数量。

(5)风险强度(Specific risk):在一定时期内,承灾体受到某种灾害过程袭击而造成的损失程度。风险强度 $R_s = \text{危险性 } H \times \text{易损性 } V$,风险强度的值介于 $0\sim 1$ 之间。

(6)风险(Risk):一定时期内,各类承灾体可能受到灾害作用而造成的直接和间接经济损失、人员伤亡和环境破坏等。风险 $R = \text{危险性 } H \times \text{易损性 } V \times \text{承灾体 } E$ 。

(7)风险分析(Risk analysis):风险分析包括资料获取、分析方法选择、评价目的确定、风险识别和风险评估的过程。

(8)风险评估(Risk assessment):根据灾害(这里指矿山地质环境问题)影响范围内的经济和社会条件,判断风险分析结果对影响区的重要程度或影响程度,以此决定是否接受或容忍风险。

(9)风险处置(Risk treatment):是应对风险的选择,包括接受风险、回避风险、降低灾害发生概率或强度、减少灾害后果或转移风险。

(10)风险控制(Risk control):为了控制风险而进行的灾害(这里指矿山地质环境问题)防治措施和监测预警措施等。

(11)风险管理(Risk management):将管理政策、程序和经验,系统地应用到风险评估、风险监测预警和风险控制的过程。

第二节 矿山地质环境问题分类

矿山地质环境问题是进行矿山地质环境治理的主要对象,根据工作的目的,合理地划分矿

山地质环境问题的类型是一项基础性的工作。目前,地质环境问题分类方法主要为如下几种。

1. 依据矿山类型的分类方案

该分类模型的基础是不同类型的矿山,将矿山的类型和存在的地质环境问题相对应,可有效地指导不同类型矿山地质环境问题的调查、评价和治理工作。在《全国矿山地质环境调查技术要求》中将矿种划分为能源、黑色金属、有色金属、铂族金属、贵金属、稀有稀土及分散元素、冶金辅助原料非金属、化工原料非金属、特种非金属、建材及其他非金属、水气矿产 11 类。另外,根据矿山的开采方式,可分为井工开采和露天开采两类。在此基础上,武强(2003)根据矿种和开采方式对矿山类型进行了重新组合,并列出了各类矿山主要的地质环境问题(表 2-1)。

这一分类方案,对于矿山地质环境问题调查十分重要,可根据需调查的矿山类型有针对性地进行部署调查工作,并确定调查重点。但该分类方案对地质环境问题的性质没有进行详细定义。

表 2-1 依据矿种类型的地质环境问题分类方案(据武强,2003 修改)

矿种		主要矿山地质环境问题
煤	露天开采	煤矸石的五大环境问题(占用土地、边坡失稳、淋滤污染水土、自燃、风化扬尘);采场、排场风化扬尘;采场、排土场边坡失稳;区域地下水位下降;回填二次污染;采场逆温效应
	井工开采	煤矸石的五大环境问题(占用、边坡失稳、淋滤污染水土、自燃、风化扬尘);诱发地震;泥石流;矿坑排水引发岩溶塌陷;井下粉尘;开采沉陷(冒落式、沉陷式、地堑式);地裂缝;矿井排水破坏含水层和生态环境;土地沙漠化;水土流失;矿坑排水的二次污染
金属矿		废石渣堆积和尾矿库四大环境问题(占用土地、边坡失稳、淋滤污染水土、风化扬尘);矽卡岩型矿床周边充水问题;开采沉陷;岩溶塌陷;崩塌;地裂缝;泥石流;边坡失稳;洗、选矿引发水污染;富含黄铁矿成分的铁矿废石自燃
非金属矿		废石渣堆积和尾矿库四大环境问题(占用土地、边坡失稳、淋滤污染水土、风化扬尘);开采沉陷;地裂缝;地下水均衡失调;废水排放污染水土环境;边坡失稳;泥石流;岩溶塌陷;崩塌
石油、天然气		土壤、水环境有机污染;地面沉降;地裂缝;土地沙漠化;自燃造成大气污染;诱发地震
建材矿		地貌景观破坏;生态破坏;边坡失稳;崩塌;落石;泥石流;风化扬尘;爆破振动;水污染;废石占用土地

2. 依据矿山开采及闭坑对地质环境影响结果的分类方案

依据矿山所引发地质环境问题影响结果的分类方案是目前最常用的,在《矿山地质环境保护与治理恢复方案编制规范》和诸多学者的研究中均采取了该分类方案。在行业规范出台之前,对矿山开采引发地质环境问题的分类有所不同,如武强(2003)将其概括为“三废”问题、地面变形、矿山排(突)水、供水与生态环境之间的矛盾、沙漠化和水土流失五类问题;徐友宁(2008)将问题归为生态破坏、地质灾害和环境污染三大类。至目前,通用的分类方案是资源损毁、地质灾害和环境污染三类(表 2-2)。

该分类方案更多地强调了矿山开采后对地质环境的作用结果,不仅可以有效地指导矿山地质环境危害性(影响性)评价,也明确了矿山地质环境治理工程需要解决的问题。但该方案未涉及矿种、开采阶段等矿山自身的属性,且很多问题是在同一矿山地质体内共存的,如煤矸石堆堆放引发的问题可能包含土地资源占用、滑坡或斜坡失稳和淋滤液水土环境污染三大类