

矿山废弃地土壤基质改良研究的现状、问题及对策

莫爱^{1,2}, 周耀治^{1,2}, 杨建军^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 本文回顾并总结国内外矿山废弃地土壤基质改良研究的状况, 介绍基质改良常用的三种方法: 物理方法、化学方法、生物方法。指出当前我国在矿山基质改良、生态修复方面存在的政策、法规、技术等问题, 提出应对措施, 保障我国矿山文明建设的顺利进行, 促进矿山开采与环境保护协调发展。

关键词: 矿山废弃地; 基质改良; 研究现状; 应对措施

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2014)04-0292-09

Existing situation, problems and countermeasures on amelioration of soil matrix in mining wasteland

MO Ai^{1,2}, ZHOU Yao-zhi^{1,2}, YANG Jian-jun^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: This paper reviews and summarizes the domestic and foreign conditions of substrate amelioration in the mining wasteland, presents three commonly used methods of soil improvement: physical method, chemical method and biological method. In addition, it points out problems of policies, regulations and technologies of mine soil improvement and ecological restoration in our country, and puts forward the corresponding measures. These can ensure mine civilization progress and promote the coordinated development of mining and environmental protection.

Key words: mining wasteland; substrate amelioration; research status; corresponding measures

矿产资源的开发创造了财富, 促进了社会经济的发展, 但是在目前的开发技术水平和管理水平下, 矿山开采与生产过程都不同程度地造成了生态破坏和环境污染, 且点多、量大、面广、历史“欠账”多, 这已成为世界性难题, 其中影响最深刻的是矿区土壤环境(徐冬寅, 2011)。据统计, 我国因采矿占用、破坏的土地达 330 万 hm^2 (刘玉强, 2012), 且每年仍以约 4 万 hm^2 的速度递增 (Li, 2006)。其中, 侵占农田和林地等土地问题尤为突出 (Lin and Ho, 2003; Li, 2006)。而全国受矿业影响的土地复垦率却仅有 13.3%, 其中主要以煤矿山为主, 金属矿山的复垦率相对较低,

这与发达国家 75% 的复垦率有较大差距 (杨金燕等, 2012)。矿山开采对土地的破坏使我国本已稀缺的土地资源呈加速减少的趋势。

矿山废弃地是指因采矿活动而导致的原地貌被破坏或者被占用, 无整治措施因而失去经济利用价值的土地, 如露天采矿场、塌陷区、排土场、尾矿库以及被重金属污染的土地等。矿山废弃地不仅破坏和侵占大量土地资源, 日益加剧我国人多地少的矛盾, 矿山废弃物的排放和堆存也带来了一系列的环境问题。矿山废弃地往往含有多种污染物, 如高含量的重金属、极端的 pH 值和有害的选矿材料等。这些污染物通过大气和水体等途

收稿日期: 2014-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51104127)

通讯作者: 周耀治, E-mail: xdaliaosha@sina.com

径广为扩散,严重影响周边生态环境和人居质量(Cooke and Johnson, 2002; Obiri et al, 2006; 黄显东等, 2011); 未经处理的废石和尾矿堆,因其结构不稳定,还会导致严重的水土流失,并可能引发地质灾害等。因此,土壤基质改良是矿山废弃地生态恢复过程中首要解决的问题也是核心问题。针对目前我国矿山生态环境面临的严峻形势,探讨矿山废弃地土壤基质改良研究,实现矿山开采与生态保护同步进行,为我国建设矿山文明、实施可持续发展战略提供科技支持。

1 国内外研究现状

1.1 研究进展

1.1.1 国外研究进展

早在100多年前,在恢复生态学方面就有关于山地、草原、森林和野生生物等自然资源管理的研究(彭少麟, 2007)。最早开展矿山生态恢复重建的是德国和美国,他们从20世纪20年代就开始在废弃的矿地上植树以恢复植被(刘国庆, 2008)。20世纪30年代,有关煤矿开采区生态恢复的研究就已经在发达国家得到重视,50年代起,一些发达国家就制定了有关矿山塌陷土地治理等方面的法律法规,采取多种措施防止土地荒芜并恢复已受破坏的生态环境(胡颖颖, 2013)。从有关国际学术组织的活动提到相关资料文献的数量显示,上世纪80年代末至90年代以来,国外矿区土地复垦的理论研究处于高潮时期(曾发治, 2008)。目前,国外的专家与学者在对煤田灭火区废弃地生态修复的研究中主要对生态修复的理论和方法,生物措施的研究和开发,资金、法规与政策的管理和制定,矿山废弃地的改造与利用,环境与可持续发展对策等进行了深入研究。

在法规、政策制定方面,20世纪30年代美国各州就相继制定了有关采矿区域的土地复垦法律制度,1977年还正式颁布实施了《露天采矿管理与恢复(复垦)法》,该法明确了“谁破坏,谁复垦”的原则,并要求复垦率必须达到100%;该法还规定在法律颁布前已被破坏的废弃矿区由国家通过筹集复垦基金的方式组织修复治理(吴鹏, 2013)。英国早在1951年便出台了矿区复垦法规并设立复垦基金,并于1969年颁布《矿山采矿场法》,规定矿山企业开矿时统筹考虑采后的复垦和管理工作,明确要求按农业、林业等相关复垦标准进行复垦。德国在《联邦采矿法》中对老矿

区采取政府全额拨款成立矿山复垦公司,对新矿区要求矿主制定复垦计划、预留复垦专项资金(黄占斌和孙朋成, 2013)。此外,前苏联在1960年通过的《自然保护法》中对土地复垦也做出了明确规定(黎炜和赵建林, 2011)。

在研究方法方面,澳大利亚被认为是世界上先进而且成功处置扰动土的国家,其关注的焦点在于防止地表侵蚀和稳定地表技术,研究地表侵蚀和坡度变形之间的关系。同时,借助各种先进设备进行生态恢复过程中的观测,采用效用—效率优化原则来设计生态修复方案(Shu et al, 2012)。其废弃地采取综合治理的模式,恢复过程不仅注重土地的恢复,还考虑到动物栖息地的恢复(Spencer and Johnston, 2002),其复垦以不局限于土壤的恢复,而是注重整个生态的恢复。澳大利亚还在新南威尔士州成立了采矿工业土壤保持服务公司,该公司制订长期的生态修复研究计划,对恢复方法进行改进,协助矿业部门进行恢复工作,进行矿区及煤田火区土壤调查和土壤理化分析,提供种子、苗木和专门的技术人才(钟爽, 2006)。美国在利用电厂粉煤灰改良土壤、矸石山植树等方面做了很多工作,积累了大量经验(Pinto et al, 2006; 钟爽, 2006)。英国、德国、前苏联等也在矿区废弃土壤改良方面做了大量的研究,其中英国在这方面的研究成果处于世界领先水平。此外,国外还重点研究了利用遥感和计算机信息技术指导煤矿区土地复垦,如Bakr et al (2010)在埃及土地复垦研究中,将GIS用于废弃矿区复垦工程,通过遥感监测来反映矿区覆被变化。

1.1.2 国内研究进展

我国早在20世纪60年代就开展了矿山废弃地的复垦工作,主要有海南石碌铁矿、广东液坂潭锡矿、湖南常德金刚石矿和山东掖县镁矿等十几个矿山(吴欢和周兴, 2003)。土地复垦与生态重建真正得到重视是在20世纪80年代(胡振琪等, 2008),由于当时的政策和技术方面的原因,废弃地生态恢复工作在总体上处于零星、分散、小规模、低水平的状态。改革开放以来,我国土地复垦经历了从自发性零星复垦到自觉性有计划复垦、从单一型复垦到多形式复垦、从无组织到有组织、从无法可依到有法可依的巨大变化。

我国有关废弃地生态恢复的理论研究起步于20世纪80年代,90年代以后才初具规模。1989年以前,以《露天开采复田》和《矿区造地复田

中的矿山测量》等法规的制定为代表,主要介绍了发达国家在土地复垦方面取得的先进成果,为我国矿山废弃地复垦治理提供了理论指导。1989年,制定了第一部关于土地复垦的法规——《土地复垦规定》,以此标志着我国矿区生态修复工作开始走上法制化轨道。20世纪90年代以来,伴随着《土地复垦规定》的制定和实施,我国矿区生态修复研究得到了迅猛发展(任虹,2013)。在这一时期,研究机构和研究队伍不断壮大,复垦研究从单一学科向多学科综合的方向发展,这些都极大地促进了矿山复垦研究向深层次迈进(黎炜和赵建林,2011)。我国矿区土地复垦理论研究虽然总体落后于西方发达国家,但是经过20多年的发展取得了许多进展。2011年2月,国务院颁布实施了《土地复垦条例》,近期又完成了《土地复垦条例实施办法》征求意见稿。国土资源部也明确要求,到2015年,我国矿区恢复率将达到30%,并力争到2020年使大中型矿山建设基本达到绿色矿山标准(宋波,2013)。由此标志着我国矿区生态修复进入快速发展期。

在研究方法方面,关于矿区废弃物土壤性能自然恢复机理的研究较少,矿区土壤修复研究主要集中在土壤重构方面。土壤重构是土地修复的核心任务,是决定修复成败与否的关键。目前,我国对这一领域的研究还不足:有的修复土壤土层顺序颠倒;有的修复土壤可能导致二次污染。由中国矿业大学胡振琪教授牵头的“矿区复垦土壤重构的理论与方法”课题研究,提出了:泥浆泵挖深垫浅复垦采煤沉(塌)陷地;无污染充填复垦等新工艺、新技术(胡振琪,2008),极大地推动了我国矿区土地复垦工作的前进步伐。此外,魏忠义等(2001)以安太堡大型露天煤矿排土场为研究区,提出了“堆状地面”土壤重构方法,并通过水文分析计算进一步研究了堆状地面的侵蚀控制机理,据此提出了优化的堆状地面排土方式。总之,近年来我国在矿区土壤重构等方面的研究已取得了重大进展,但在矿区土地复垦率、生态修复后的质量和后续管护等方面仍存在诸多问题,与西方发达国家还存在很大差距。

1.2 改良方法

1.2.1 物理方法

改良矿区受污染土壤的物理方法主要包括表土回填、客土覆盖等。这两种方法对改良土壤都能起

到很好的效果,但费用较高,存在很大局限性,在经济条件好、生态环保意识较强的矿区较容易使用。

表土保护利用:一般认为,回填表土是一种常用且最为有效的措施(Bell, 2001)。在地表扰动破坏前先把表层(30 cm)及亚层(30~60 cm)土壤取走,加以保存,尽量减少其结构的破坏和养分流失,以便工程结束后再把它们运回原处利用。西欧大多数国家已要求在露天矿山中采用此技术。在我国,卞正富和张国良(1999)以开滦矿区为试验点,研究认为通过条带式覆土或全面覆土,矸石酸性得到较好控制,而穴植覆土不能有效控制。回填表土所产生的改土和修复效果比较显著,很多研究都表明,在无表土回填的矿地,生物多样性的恢复速度受到抑制(Holmes and Richardson, 1999; 夏汉平和蔡锡安, 2002)。但回填表土也存在较大的局限性,主要因为此项工程涉及到表土的采集、存放、二次倒土等大量工程,所需费用很高、管理不便,而且我国大部分矿区在山区,土源较少,多年采矿后取土也越来越困难,不少矿区已无土可取,一些矿山企业甚至花费巨资进行异地熟土覆盖(彭建等, 2005; 张鸿龄等, 2012)。这种做法既解决不了矿山长期使用土源问题,又破坏我国宝贵的土地资源。因此,回填表土的基质改良方法只能在条件允许的矿区适用,在土源短缺的矿区,应该选择其他行之有效的基质改良措施。

客土覆盖:废弃地土层较薄时或是缺少种植土壤时,可直接采用异地熟土覆盖,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,为矿区重建植被创造有利条件。客土作业中尽可能利用城市生活垃圾污泥或是其他项目剥离表土,减少对其他区域的土壤土层破坏。对于采空区和塌陷,可以将粉煤灰作为充填材料,这样既利用了固体废弃物,又防止其占用土地和污染地下水,上部覆盖30 cm的黄土,用于造林和种植,会收到良好的综合效益(王志宏和李爱国, 2005; 李若愚等, 2007)。客土法和表土回填法一样,因工程涉及到的诸多问题,存在很大的局限性,关键在于寻找适用的土源和确定覆盖的厚度与方式。

对于废弃地的物理改良还有动电法,它是在污染土壤中插入电极对,并通以直流电,使重金属离子在电场作用下通过电渗析向电极室迁移,然后将其收集,并作进一步的处理。动电修复作为一种原位修复技术,近年来发展较快。但由于

土壤系统中组分的复杂性,经常出现实际应用与实验结果相反的现象,而使该方法的推广受到限制(李海英等,2007)。此外,热力修复等一些方法都可以作为物理改良法应用到基质改良中。

1.2.2 化学方法

由于矿区废弃地受到破坏与污染,其土壤结构很差或被破坏,土壤养分流失严重,有的还含有过高的重金属以及过酸和盐渍化。因此,需要采取一定的措施缓解其重金属毒性、降低其酸性、提高土壤肥力等。目前,常用的化学改良方法主要有:

添加营养物质提高土壤肥力:研究表明,矿地恢复初期,施肥能显著提高植被的覆盖度,特别是在无表土覆盖的矿地(张鸿龄等,2012)。Ye et al (2001)、张鸿龄等(2012)等观测到,每公顷施用80 t以上的石灰配合施用100 t有机肥,不仅显著降低土壤酸度、电导率和Pb、Zn的有效性,而且有效促进植物萌发,并使生物产量达最大值。相关研究(Sheoran et al, 2009)表明,木屑可以提高树木、非禾本草植物和灌木的存活率。通过应用含氮的木屑增加了土壤肥料如N、P、K或石灰的作用。此外,在土壤中施加易溶性磷酸盐(Na_3PO_4 等),不但可增加土壤肥力,而且可促使重金属形成不溶性化合物(磷酸盐),降低其生物可利用性。Sally et al (2005)用交互实验研究调查镉、铅和锌污染土壤修复的效果,结果发现磷以颗粒态或磷酸的形式加入可降低重金属的生物有效性,增加植物产量。鉴于有些废弃地基质结构不良,速效的化学肥料极易被淋溶,这样只有少量、多次施用速效化肥或选用一些分解缓慢的长效肥料。

施加含 Ca^{2+} 化合物缓解重金属毒性:实验证明, Ca^{2+} 的存在显著降低植物对重金属的吸收, Ca^{2+} 的存在也会减轻铬酸盐的毒性,在废弃地中施加 CaSO_4 或 CaSO_3 等以解决 Ca^{2+} 含量低的问题。周航等(2010)以湖南郴州柿竹园铅锌矿区一块重金属污染的菜园土地做试验,研究认为碳酸钙能有效降低土壤中交换态重金属Pb、Cd、Zn含量。Kuznetsov et al (2009)在灰森林土壤中施用沸石8~16 t·hm⁻²,发现可移动的重金属Pb、Ni和Cu含量明显减少。此外,土壤中施用石灰,使重金属生成氢氧化物,可以提高土壤的pH值,引起重金属与钙共沉淀现象来促进重金属沉淀的产生。Davis et al (1995)通过对污染土壤中锌毒性实验

研究发现,加入石灰石能提高土壤pH值,降低植物中锌的浓度,同时提高了植物的产量。

调节土壤pH值:当废弃地的酸性较高时,应少量多次施用碳酸氢盐与石灰,防止局部石灰过多而使土壤呈碱性。胡宏伟等(1999)在Pb/Zn尾矿废弃地上铺盖厚约20 cm垃圾与20 kg·m⁻²石灰石,不但提高了尾矿pH值、降低了电导率,而且较有效地防止了下层尾矿的酸化,植物生长也较好。Ye et al (2000)观测到施用160 kg·hm⁻²石灰能使基质的pH从2.4上升至7左右。但是,这一改良措施可能只在一段时间内有效,原因是所加入的石灰量通常是从土壤的有效酸度计算出来的,并没有考虑潜在酸度和未风化的硫铁矿的进一步氧化(Bradshaw, 1997; Schaaf, 2001)。而且硫铁矿的氧化并不会因为酸度升高而停止,特别是非微生物因子所引起的氧化还会随pH升高而增加(Evangelou, 1998)。因此,为了确定所需的总石灰量,就必须要考虑硫铁矿的总量和所有残留量。对于碱性废弃地,我们宜采用硫酸以及硫酸氢盐等物质来改善废弃地的环境(王志宏和李爱国, 2005)。 $\text{CaSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ 可以将土壤中的钠离子替换成钙离子减轻土壤盐碱化程度,从而增强土壤中水的渗透能力改善土壤基质(魏远等, 2012)。

1.2.3 生物方法

植物改良:重金属等污染土壤的植物修复近年来受到人们的广泛关注(Pulford and Watson, 2003; An et al, 2006; Fayiga et al, 2007)。植物改良是指用植物来清除、转化、稳定从而降低土壤重金属残留水平且逐步改善土壤养分状况并同时恢复土壤原有地貌,促使局部气候的改善、微环境得以优化的方法(Khan et al, 2000),主要包括植物提取、植物挥发、植物过滤、植物钝化等。若要植物吸收有较明显的效果,就必须选择吸收能力强且生物量大的种类,目前,已经发现700多种植物能超量富集重金属(高晓宁, 2013)。香根草被证明属于这类植物(夏汉平和束文圣, 2011),它在Cd浓度仅为0.33 mg·kg⁻¹的土壤上,能吸收Cd 218 g·hm⁻²(Chen et al, 2000)。2004年,中国科学院南京土壤研究所宋静基于土培试验,验证海州香薷为铜的耐性植物,可用于铜污染土壤的植物固定(Song et al, 2004)。龙新宪等(2002)通过对浙江几个典型铅锌矿区生长的耐性植物的室内水培试验证明,*Sedum alfredii* Hance(东南景天)的地上部锌累积

量最高可达 $19090 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 并生长良好,且地上部与根的锌含量之比大于 1。胡振琪等(2006)和 Hu et al (2012) 等认为固氮植物和绿肥植物能够改良煤矸石山表层土壤的理化性质。豆科植物能够与根瘤菌共生,可将大气中的氮气转化为氮素固定到土壤中,相关研究(王婧静,2010)表明,豆科植物能生长于污染土壤并进行有效的固氮作用,使土壤中的氮积累大幅度提高,特别是一些有根瘤和茎瘤的一年生豆科植物,能耐受有毒金属和低营养水平,是理想的先锋植物。植物改良作为一种新兴的矿山废弃地修复技术,是一种低投入、可持续的绿色修复(Vera and Uta, 2006; Mendez and Maier, 2008),最适合我国等发展中国家(Ghosh and Singh, 2005)。但到目前为止,有关超积累植物大量富集重金属的机理仍不清楚,许多问题有待更深入的研究。

微生物改良:微生物改良是指利用微生物的生命代谢活动减少土壤环境中有毒有害物的浓度或使其完全无害化,从而使受污染的土壤环境能够部分或完全地恢复到原始状态的过程。例如,在铁污染的土壤中可以接种铁氧化菌,不仅效果好,而且比传统的方法节约 1/3 的费用(孙翠玲等,1999);在汞污染的河泥中,存在一些抗汞微生物(假单胞菌属等),能把甲基汞还原成元素汞,降低了汞的毒害。Frost et al (2001) 实验表明丛枝菌根真菌能够显著改善土壤结构,增加土壤有机质。赵永红等(2008)认为植物与固氮菌、菌根真菌或专性、非专性降解菌群协同作用,增加对污染物的吸收和降解,是一个很有价值的研究方向。

微生物改良技术利用了微生物的接种优势,是对复垦区土壤进行综合治理与改良的一项生物技术措施。借助向新建植的植物接种微生物,在改善植物营养条件、促进植物生长发育的同时,利用植物根际微生物的生命活动,使失去微生物活性的复垦区土壤重新建立和恢复土壤微生物体系,增加土壤生物活性,加速复垦地土壤的基质改良,加速自然土壤向农业土壤的转化过程,使生土熟化,提高土壤肥力,从而缩短复垦周期。

土壤动物改良:土壤动物在改良土壤结构、增加土壤肥力和分解枯枝落叶层促进营养物质的循环等方面有着重要的作用。作为生态系统不可缺少的成分,土壤动物扮演着消费者和分解者的重要角色。如蚯蚓是世界上最有益的土壤动物之一,其在改良土壤结构、增加土壤肥力和加快生

态恢复的进程等方面都起着重要作用。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”(Edwards and Bohlen, 1995; 李永庚和蒋高明,2004)。Boyer et al (2010) 发表的蚯蚓在矿山废弃地生态恢复中应用综述,指出蚯蚓不仅能改良废弃地的理化性质,同时还能富集重金属,从而达到矿山废弃地土地复垦和生态恢复的双重目的。戈峰等(2001)研究发现蚯蚓对铜矿中的铜元素富集能力很强,可达到体内组织的 $82.5 \sim 1218.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,尾砂土和复垦土中加入蚯蚓和蚓粪后,西红柿的茎长、根长和干重均明显高于对照。因此,在废弃地生态恢复中若能引进一些有益的土壤动物,将能使重建的系统功能更加完善,加快生态恢复的进程。

2 我国矿山废弃地基质改良存在的问题及相应对策

2.1 资源开发利用方式长期得不到转变

我国矿山开采长期以来实行的是粗放型资源利用模式和无规划、无措施的掠夺式开采,带来了诸如土壤污染、水污染、大气污染等一系列生态环境问题。因此,我们要摒弃传统的以单纯消耗矿产资源、牺牲生态环境为代价和高耗能为特点的开发利用方式,从根本上转变发展方式和经济增长方式,实行集约型资源利用模式,真正实现资源合理开发利用与环境保护协调发展。此外,矿山开采要从源头抓起,建设绿色矿山,实施绿色开采,实现生态保护与矿区建设的协同创新。

2.2 缺乏适用的政策、法律、法规以及相应的资金作支撑

由于长期以来没有指导土地复垦工作的专门立法,也缺乏相应的复垦技术体系和资金作为支撑,我国矿山土地复垦工作举步维艰。到上世纪 80 年代后期,我国开展复垦的矿山企业不足 1%,已复垦的土地不到被破坏土地的 1%(刘晓星,2013)。直到 1989 年《土地复垦规定》的制定才标志着我国矿区生态修复工作开始走上法制化轨道。2011 年 2 月,国务院颁布实施了《土地复垦条例》,由此我国矿区生态修复进入快速发展期。同时,我国还应建立国家矿山生态保护与矿产资源开发互相协调的长效机制,制定一系列的标准、

规范、技术,编制综合整治实施方案。另外,整顿、规范矿山企业,提高新建矿山准入门槛也是保障我国矿山生态修复工作的一项有效措施。

在资金方面,我国正逐步建立起“修复保证金制度”,依据新矿山设计年限或已服役矿山的剩余服务年限等因素,确定按矿产品销售收入的一定比例,由矿山企业分年预提矿山环境治理恢复保证金。此外,我们还应该多渠道筹集社会资金,通过鼓励企业和私人基金注入,吸引社会及外部资金,增大复垦的资金投入以此保障矿山地质环境的快速恢复。

2.3 因地制宜地开展矿山废弃地基质改良工作,加快技术创新步伐

我国地域辽阔,矿山分布于不同的生态环境中,在进行矿区基质改良工作时不能以偏概全,应当依据当前国内外矿山土壤基质改良的基本方法,针对具体的矿区生态环境现状,整合生物、物理和化学修复技术及遥感、地理信息系统等多种手段,因地制宜地开展矿山废弃地基质改良工作。运用适宜的土壤改良策略,构建最优土壤,以更好地推动矿区生态修复的进程。同时,伴随我国当前经济稳定、快速发展的势头,我们应当加大经济投入、加快人才队伍建设,将当前国内外最新的科技成果:如基因工程技术、3S技术等运用到改良工作中来,实现技术创新。

2.4 加强对矿山开采、矿山生态修复工作的监管

应建立严格的监督检查管理体系,明确矿山生态环境治理监督管理内容、制度和办法,监督各级政府和企业切实执行土地复垦法规和复垦标准。还应建立环境监理制度,加强对矿山开采活动环境监理,预防和减少环境污染和生态破坏,做好对矿区生态环境质量动态监管工作。同时,我国还应该对矿区修复进行长期性的跟踪研究,确保现在的修复成果能够世代享用。

3 小结

经过近几十年的研究与实践,国内外在矿山废弃地的土壤基质改良方面的研究有了突破性进展。但由于矿区废弃物构成的多样性、地带性差异以及恢复利用的目标不同,致使土壤基质改良更为复杂,还存在着很多需要解决的问题。我国应该抓住当前经济快速发展的机遇,加大对生态修复的引导和支持,积极技术创新,找出一条矿山开采与环境保护

协调发展的道路,着力建设矿山文明。

参考文献

- 卞正富,张国良. 1999. 矿山土复垦利用试验[J]. *中国环境科学*, 19(1): 81-84. [Bian Z F, Zhang G L. 1999. Reclamation and utilization of minesoils experiment [J]. *China Environmental Science*, 19(1): 81-84.]
- 高晓宁. 2013. 土壤重金属污染现状及修复技术研究进展[J]. *现代农业科技*, (9): 229-231. [Gao X N. 2013. Research advances on soil heavy metal pollution and remediation technology [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, (9): 229-231.]
- 戈峰,刘向辉,潘卫东,等. 2001. 蚯蚓在德兴铜矿废弃地生态恢复中的作用[J]. *生态学报*, 21(11): 1790-1795. [Ge F, Liu X H, Pan W D, et al. 2001. The role of earthworm in the ecological restoration of mining wasteland of dexing copper mine in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 21(11): 1790-1795.]
- 胡宏伟,姜必亮,蓝崇钰,等. 1999. 广东乐昌铅锌尾矿废弃地酸化控制研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 38(3): 68-71. [Hu H W, Jiang B L, Lan C Y, et al. 1999. Effects of different improvements on controlling acidification of Pb/Zn tailings [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 38(3): 68-71.]
- 胡颖颖. 2013. 新疆松树头煤田灭火区生态修复与植被重建对策及技术规范编制[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学. [Hu Y Y. 2013. Technical criterion and measures of revegetation and ecological restoration in Xinjiang songshuto coalfield firefighting area [D]. Urumqi: Xinjiang University.]
- 胡振琪,卞正富,成枢,等. 2008. 土地复垦与生态重建[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社. [Hu Z Q, Bian Z F, Cheng S, et al. 2008. Land reclamation and ecological reconstruction [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press.]
- 胡振琪,李鹏波,张光灿,等. 2006. 煤矸石山复垦[M]. 北京: 煤炭工业出版社. [Hu Z Q, Li P B, Zhang G C, et al. 2006. Coal waste pile reclamation [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House.]
- 胡振琪. 2008. 矿山复垦土壤重构的理论和办法—中国矿大科技成果[EB/OL]. http://www.hjxf.net/tech/2008/0917/article_21.html, 2008-09-17. [Hu Z Q. 2008. The theory and method for soil reconstruction in mined land reclamation [EB/OL]. http://www.hjxf.net/tech/2008/0917/article_21.html, 2008-09-17.]

- 黄显东, 莫测辉, 李彦文, 等. 2011. 水生植物对金属矿山丁铵黑药污染的生长响应与植物修复 [J]. *农业工程学报*, 27(2): 255–260. [Huang X D, Mo C H, Li Y W, et al. 2011. Growth response and phytoremediation of several species of hydrophytes to ammonium butyl aerofloat in metal mines [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 27(2): 255–260.]
- 黄占斌, 孙朋成. 2013. 矿区重金属污染土壤的修复技术 [C]. 中国环境科学学会学术年会论文集, 4897–4906. [Huang Z B, Sun P C. 2013. Remediation of soil contaminated by heavy metal in mining area [C]. Proceedings of the Symposium Chinese Institute of Environmental Sciences, 4897–4906.]
- 黎 炜, 赵建林. 2011. 矿区废弃地复垦概况及展望 [J]. *科技信息*, (11): 468. [Li W, Zhao J L. 2011. Abandoned mine survey and prospect of land reclamation [J]. *Science & Technology Information*, (11): 468.]
- 李海英, 顾尚义, 吴志强. 2007. 矿山废弃土地复垦技术研究进展 [J]. *矿业工程*, 5(2): 43–46. [Li H Y, Gu S Y, Wu Z Q. 2007. The research advance of reclamation technology for mining wasteland [J]. *Mining Engineering*, 5(2): 43–46.]
- 李若愚, 侯明明, 卿 华, 等. 2007. 矿山废弃地生态恢复研究进展 [J]. *矿产保护与利用*, (1): 50–54. [Li R Y, Hou M M, Qing H, et al. 2007. Advances in the research on ecological restoration of mining wasteland [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, (1): 50–54.]
- 李永庚, 蒋高明. 2004. 矿山废弃地生态重建研究进展 [J]. *生态学报*, 24(1): 95–100. [Li Y G, Jiang G M. 2004. Ecological restoration of mining wasteland in both China and abroad: an over review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 24(1): 95–100.]
- 刘国庆. 2008. 准格尔旗煤田塌陷地生态修复研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学. [Liu G Q. 2008. Research on the eco-rehabilitation modes of coal mine subsidence of Zhunger county coal field [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University.]
- 刘晓星. 2013. 求解矿区修复难题 [N]. 中国环境报, 2013-01-21(006). [Liu X X. 2013. To solve the problem of restoration in mining area [N]. China Environment News, 2013-01-21(006).]
- 刘玉强. 2012. 建设绿色矿山, 发展绿色矿业是中国矿业发展的必由之路 [J]. *中国矿业*, 21(S1): 1–3. [Liu Y Q. 2012. Building the green mine, developing the green mining which is the only road in China mining development [J]. *China Mining Magazine*, 21(S1): 1–3.]
- 彭 建, 蒋一军, 吴健生. 2005. 我国矿山开采的生态环境效应及土地复垦典型技术 [J]. *地理科学进展*, 24(2): 38–48. [Peng J, Jiang Y J, Wu J S. 2005. Eco-environmental effects of mining and related land reclamation technologies in China [J]. *Progress in Geography*, 24(2): 38–48.]
- 彭少麟. 2007. 恢复生态学 [M]. 北京: 气象出版社. [Peng S L. 2007. Restoration Ecology [M]. Beijing: China Meteorological Press.]
- 任 虹. 2013. 推动矿区生态修复, 着力建设矿山文明 [J]. *科学之友*, (2): 155–156. [Ren H. 2013. To promote the ecological restoration of mining area, focus on building the mine civilization [J]. *Friend of Science Amateurs*, (2): 155–156.]
- 宋 波. 2013. 矿山修复: 蛋糕诱人分享难 [N]. 中国花卉报, 2013-01-03(S01). [Song B. 2013. The mine restoration: tempting cake to share [N]. China Flower & Gardening News, 2013-01-03(S01).]
- 孙翠玲, 顾万春, 郭玉文. 1999. 废弃矿区生态环境恢复林业复垦技术的研究 [J]. *资源科学*, 21(3): 68–71. [Sun C L, Gu W C, Guo Y W. 1999. The technology of afforestation for eco-environmental rehabilitation of abandoned mining areas [J]. *Resources Science*, 21(3): 68–71.]
- 王婧静. 2010. 金属矿山废弃地生态修复与可持续发展研究 [J]. *安徽农业科学*, 38(15): 8082–8084. [Wang J J. 2010. Research on the ecological restoration and sustainable development of discarded land of metal mine wasteland [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 38(15): 8082–8084.]
- 王志宏, 李爱国. 2005. 矿上废弃地生态恢复基质改良研究 [J]. *中国矿业*, 14(3): 22–27. [Wang Z H, Li A G. 2005. Amelioration of soil media during ecological restoration in the mining wasteland [J]. *China Mining Magazine*, 14(3): 22–27.]
- 魏 远, 顾红波, 薛 亮, 等. 2012. 矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展 [J]. *中国水土保持科学*, 10(2): 107–114. [Wei Y, Gu H B, Xue L, et al. 2012. Review of studies on reclamation and ecological restoration of abandoned land of mine [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 10(2): 107–114.]
- 魏忠义, 胡振琪, 白中科. 2011. 露天煤矿排土场平台“堆

- 状地面”土壤重构方法[J]. *煤炭学报*, 26(1): 19–22. [Wei Z Y, Hu Z Q, Bai Z K. 2001. The loose-heaped-ground method of soil reconstruction on the stackpiles of open-pit coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 26(1): 19–22.]
- 吴欢, 周兴. 2003. 矿山废弃地生态恢复研究进展[J]. *广西师范学院学报(自然科学版)*, 11(S1): 32–35. [Wu H, Zhou X. 2003. The review of research on ecological restoration of abandoned mines [J]. *Journal of Guangxi Teachers College (Natural Science Edition)*, 11(S1): 32–35.]
- 吴鹏. 2013. 论采煤塌陷区生态修复法律制度的完善——以淮南市采煤塌陷区为例[J]. *资源科学*, 35(2): 455–461. [Wu P. 2013. Improving the legal framework for the ecological restoration of subsided coal mining areas in China [J]. *Resources Science*, 35(2): 455–461.]
- 夏汉平, 蔡锡安. 2002. 采矿地的生态恢复技术[J]. *应用生态学报*, 13(11): 1471–1477. [Xia H P, Cai X A. 2002. Ecological restoration technologies for mined lands: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13(11): 1471–1477.]
- 夏汉平, 束文圣. 2001. 香根草和百喜草对铅锌尾矿重金属的抗性与吸收差异研究[J]. *生态学报*, 21: 1121–1129. [Xia H P, Shu W S. 2001. Resistance to and uptake of heavy metals by *Vetiveria zizanioides* and *Paspalum notatum* from lead/zinc mine tailings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 21: 1121–1129.]
- 徐冬寅. 2011. 金矿区农田土壤重金属污染与人体健康风险研究[D]. 西安: 长安大学. [Xu D Y. 2011. The heavy metal pollution and risk assessment on human health of farmland soil in the goldfield [D]. Xi'an: Chang'an University.]
- 杨金燕, 杨锴, 田丽燕, 等. 2012. 我国矿山生态环境现状及治理措施[J]. *环境科学与技术*, 35(S2): 182–188. [Yang J Y, Yang K, Tian L Y, et al. 2012. Environmental Impacts of Mining Activities in China and the Corresponding Management and Remediation Strategies: An Overview [J]. *Environmental Science & Technology*, 35(S2): 182–188.]
- 曾发治. 2008. 神府矿区土地生态损害分析与修复[D]. 西安: 西安科技大学. [Zeng F Z. 2008. Analysis of land ecological damage and land restoration in Shenfu mining area [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology.]
- 张鸿龄, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 2012. 矿山废弃地生态修复过程中基质改良与植被重建研究进展[J]. *生态学杂志*, 31(2): 460–467. [Zhang H L, Sun L N, Sun T H, et al. 2012. Substrate amelioration and vegetation reconstruction in ecological remediation of abandoned mines: research advances [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 31(2): 460–467.]
- 赵永红, 张涛, 成先雄, 等. 2008. 矿山废弃地植物修复中微生物的协同作用[J]. *中国矿业*, (10): 46–48, 67. [Zhao Y H, Zhang T, Cheng X X, et al. 2008. Cooperation effect of microbe in plant remediation of mining wasteland [J]. *China Mining Magazine*, (10): 46–48, 67.]
- 钟爽. 2006. 矿山废弃地生态恢复理论体系及其评价方法研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学. [Zhong S. 2006. The theory system of ecologic restoration and research of assessment method in the mine disposal site [D]. Fuxin: Liaoning Technical University.]
- 周航, 曾敏, 刘俊, 等. 2010. 施用碳酸钙对土壤铅、镉、锌交换态含量及在大豆中累积分布的影响[J]. *水土保持学报*, 24(4): 123–126. [Zhou H, Zeng M, Liu J, et al. 2010. Influence of application CaCO_3 on content of Pb, Cd, Zn exchangeable in soil and the cumulative distribution of soybean plants [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 24(4): 123–126.]
- An Z Z, Huang Z C, Lei M, et al. 2006. Zinc tolerance and accumulation in *Pteris vittata* L. and its potential for phytoremediation of Zn and As contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 62(5): 796–802.
- Bakr N, Weindorf D C, Bahnassy M H. 2010. Monitoring land cover changes in a newly reclaimed area of Egypt using multi-temporal landsat data [J]. *Applied Geography*, 30(4): 592–605.
- Bell L C. 2001. Establishment of native ecosystems after mining: Australian experience across diverse biogeographic zones [J]. *Ecological Engineering*, 17: 179–186.
- Boyer S, Wratten S D. 2010. The potential of earthworms to restore ecosystem services after opencast mining: A review [J]. *Basic and Applied Ecology*, 11(3): 196–203.
- Bradshaw A D. 1997. Restoration of mined lands—Using natural process [J]. *Ecological Engineering*, 8: 255–269.
- Chen H M, Zheng C R, Tu C, et al. 2000. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals [J]. *Chemosphere*, 41: 229–234.
- Cooke J A, Johnson M S. 2002. Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and

- industrial minerals: A review of theory and practice [J]. *Environmental Reviews*, 10(1): 41–71.
- Davis J G, Weeks G, Parker M B. 1995. Parker use of deep tillage and liming to reduce zinc toxicity in peanuts grown on flue dust contaminated land [J]. *Soil Technology*, 8(2): 85–95.
- Edwards C A, Bohlen P J. 1995. Biology and Ecology of Earthworm [M]. London: Chapman and Hall.
- Evangelou V P, Seta A K, Holt A. 1998. Potential role of bicarbonate during pyrite oxidation [J]. *Environmental Science & Technology*, 32: 2084–2091.
- Fayiga A O, Ma L Q, Zhou Q. 2007. Effects of plant arsenic uptake and heavy metals on arsenic distribution in an arsenic-contaminated soil [J]. *Environmental Pollution*, 147(3): 737–742.
- Frost S M, Stah I D D, Williams S E. 2001. Long-term reestablishment of arbuscularmycorrhizal fungi in a drastical disturbed semiarid surface mine soil [J]. *Arid Land Research and Management*, 15(1): 3–12.
- Ghosh M, Singh S P. 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 3(1): 1–18.
- Holmes P M, Richardson D M. 1999. Protocols for restoration based on recruitment dynamics, community structure and ecosystem function: Perspectives from South African fynbos [J]. *Restoration Ecology*, 7: 215–230.
- Hu Z Q, Wang P J, Li J. 2012. Ecological restoration of abandoned mine land in China [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 3(4): 289–296.
- Khan A G, Kuek C, Chaudhry T M, et al. 2000. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation [J]. *Chemosphere*, 41(1–2): 197–207.
- Kuznetsov M N, Motyleva S M, Leonicheva E V, et al. 2009. Zeolite effect on heavy metal content in grey forest soil in conditions of technogenic pollution [J]. *Russian Agricultural Sciences*, 3(3): 179–181.
- Li M S. 2006. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: a review of research and practice [J]. *Science of the Total Environment*, 357(1): 38–53.
- Lin G C S, Ho S P S. 2003. China's resources and land-use change: insights from the 1996 land survey [J]. *Land Use Policy*, 20(1): 87–107.
- Long X X, Yang X E, Ye Z Q, et al. 2002. Differences of uptake and accumulation of zinc in four species of Sedum [J]. *Acta Botanica Sinica*, 44(2): 152–157.
- Mendez M O, Maier R M. 2008. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments—an emerging remediation technology [J]. *Environmental Health Perspectives*, 116(3): 278–283.
- Obiri S, Dodoo D K, Okai Sam F, et al. 2006. Cancer and non-cancer health risk from eating cassava grown in some mining communities in Ghana [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 118(4): 37–49.
- Pinto V, Font X, Salgot M, et al. 2002. Using 3-D structures and their virtual representation as a tool for restoring open-pit mines and quarries [J]. *Engineering Geology*, 3(6): 121–129.
- Pulford I D, Watson C. 2003. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review [J]. *Environment International*, 29(4): 529–540.
- Sally Brown, Barbara Christensen, Enzo Lombi, et al. 2005. An inter-laboratory study to test the ability of amendments to reduce the availability of Cd, Pb and Zn in situ [J]. *Environmental Pollution*, 138: 34–45.
- Schaaf W. 2001. What can element budgets of false-time series tell us about ecosystem development on post-lignite mining sites? [J]. *Ecological Engineering*, 17: 241–252.
- Sheoran V, Sheoran A S, Poonia. 2009. Phytomining: A review [J]. *Minerals Engineering*, 22(12): 1007–1019.
- Song J, Zhao F J, Luo Y M, et al. 2004. Copper Uptake by *Elsholtzia splendens* and *Silene vulgaris* and Assessment of Copper phytoavailability in Contaminated Soils [J]. *Environmental Pollution*, 128: 307–315.
- Spencer R H, Johnston R P. 2002. Technology best practice [M]. New York: Wiley.
- Vera Göhre, Uta Paszkowski. 2006. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation [J]. *Planta*, 223(6): 1115–1122.
- Ye Z H, Wong J W C, Wong M H. 2000. Vegetation response to lime and manure compost amendments on acid lead/zinc mine tailings: A greenhouse study [J]. *Research Ecology*, 8: 289–295.
- Ye Z H, Yang Z Y, Chan GYS, et al. 2001. Growth response of *Sesbania rostrata* and *S. cannabina* to sludge-amended lead/zinc mine tailings: A greenhouse study [J]. *Environment International*, 26: 449–455.