

平朔露天煤矿土地复垦与生态重建技术研究

李晋川¹, 白中科², 柴书杰³, 岳建英¹, 王文英¹, 王宇宏¹

1. 山西省生物研究所, 太原 030006

2. 中国地质大学(北京)土地科学技术系, 北京 100083

3. 平朔安太堡露天煤矿, 山西朔州 038506

摘要 中国是煤炭资源开采大国, 因采煤特别是露天开采造成的土地资源破坏、生态环境退化已成为制约中国经济可持续发展的重大战略问题。研究并构建适合中国国情的露天采煤土地复垦与生态重建技术体系, 对探索适合中国矿区土地复垦与生态重建的基础理论, 实现煤炭绿色开采和可持续发展意义重大。通过应用露天采矿、土壤学、生态学、植物学、地质学、地理学、农学、水土保持等多学科专业知识和技术方法, 对平朔露天煤矿土地复垦与生态重建进行 20 余年的系统研究, 初步形成适合黄土高原类似矿区土地复垦与生态重建的相关技术体系, 包括矿区生态系统受损分析、生态重建障碍因子分析、人工生态系统重建规划与设计、土地重塑工艺、土壤重构工艺和植被重建工艺, 并提出平朔矿区重建人工生态系统将引伸今后研究的技术要点。

关键词 露天煤矿; 生态重建; 土地复垦

中图分类号 TD88

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)17-0030-05

Study on Technology of Land Reclamation and Ecological Rehabilitation of Waste Land in Pingshuo Surface Mine

LI Jinchuan¹, BAI Zhongke², CHAI Shujie³,
YUE Jianying¹, WANG Wenying¹, WANG Yuhong¹

1. *Biological Institute of Shanxi Province, Taiyuan 030006, China*

2. *Department of Land Science Technique, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*

3. *Pingshuo Antaibao Surface Mine, Shuozhou 038506, Shanxi Province, China*

Abstract China is a big nation in the exploitation of coal resources. The destruction of resources and the degradation of the ecological environment, as a result of open-pit coal mining in particular, become important issues and constrain economic sustainable developments in China. It is important to build a

technology system for land reclamation and for ecological reconstruction in the opencast mine area, under some basic principles of land reclamation and ecological reconstruction suitable for the mining situation in China, to achieve green mining and sustainable development in mine area. With due consideration of open-pit mining, soil science, ecology, botany, geology, geography, agronomy, soil and water conservation and other multi-disciplinary knowledge and technology, a systematic research of more than 20 years on Pingshuo opencast mine has built a relevant technical system for land reclamation and ecological reconstruction of mining areas in the Loess Plateau, including damage analysis of mining ecosystem; analysis factor of barriers about ecological reconstruction; planning and design of artificial ecological system reconstruction; land remodeling; soil-body construction and vegetation reconstruction. Also, the directions for further researches are suggested to follow the reconstruction of artificial ecological system in Pingshuo opencast mine.

Keywords surface mine; ecological rehabilitation; land reclamation

0 引言

环境与发展是当今国际社会普遍关注的重大问题, 而人

收稿日期: 2009-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(40071077, 40471132); “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC09B02-6); 山西省重点攻关项目(2006031099-01-04)

作者简介: 李晋川(中国科协所属全国学会个人会员登记号: S283500262S), 研究员, 研究方向为露天煤矿土地复垦与生态重建, 电子信箱: sxsxsljc@yahoo.com.cn

类生产活动的经济增长所依赖的重要手段——矿产资源的开发和利用,其所引起的矿区环境问题则是环境与发展的焦点问题之一^[1]。据统计,中国一次性能源消费结构中,煤炭占65%,并且在21世纪的相当一段时间里,这个结构不会改变。随着煤炭资源日趋减少,资源回收率的要求已提上日程,为此,中国将大力发展露天采矿技术,在未来20年中,露天采矿比例将由目前的4%提高到15%。然而,露天采矿对生态环境和土地资源的破坏极为严重。据有关资料不完全统计,中国露天开采每万吨煤约破坏土地0.22 hm²,今后30年累计破坏土地将达13.5万hm²,这对于人均土地资源极少的中国来说,开展露天煤矿土地恢复的生态重建意义重大。矿业废弃地的生态恢复已成为中国当前所面临的紧迫任务之一,也是中国实现可持续发展战略优先关注的问题之一。中国露天煤矿土地复垦与生态重建研究起步较晚,由于受经济、社会和自然等因素的限制,国内研究无法套用国外成熟技术,使得该项研究的复杂性和技术的难度均高于国内外已有的同类研究。本文初步总结了平朔露天煤矿土地复垦与生态重建研究的部分工作,为构建适合中国国情的露天矿区生态重建理论提供依据。

1 研究区概况

平朔露天煤矿是中国最大的露天煤矿区之一,规划面积380 km²,设计产量1亿t/a,位于山西省西北部,东经112°10′~113°30′,北纬39°23′~39°37′。该区属温带半干旱大陆性季风气候,平均降雨量为428.2~449.0 mm,年蒸发量为1 786.6~2 598.0 mm,是降水量的4倍。平均气温4.8~7.8℃,无霜期约115~130 d,年平均风速2.5~4.2 m·s⁻¹。该区地处丘陵缓坡区,黄土广布,植被稀少,水蚀风蚀严重,冲刷剧烈,形成典型的

黄土高原地貌景观,土壤物理风化强烈,土质偏砂,土体干旱。矿区地带性植被属干草原类型。由于开发历史悠久,耕垦指数高,天然次生林已毁坏殆尽亦很少见到大片草原群落,而呈零星分布,植被覆盖率低。

2 主要生态重建技术

平朔露天煤矿地处黄土高原脆弱生态区,由于采矿剧烈扰动,原地形地貌、地层结构、生物种群已不复存在。对于如此极度退化的生态系统,要想恢复重建一个结构合理、稳定健康的人工生态系统,须在遵循自然规律的基础上,通过人工措施,按照技术上适当、经济上可行、社会能接受的原则,使受害系统重新恢复,并有益于矿区清洁生产和社会可持续发展。按照平朔矿区土地复垦与生态重建的技术工艺流程,可将其分为6部分,即矿区生态系统受损分析、生态重建障碍因子分析、生态重建规划优化设计、土地重塑工艺、土壤重构工艺和植被重建工艺。

2.1 矿区生态系统受损分析

平朔矿区特有的采排工艺、赋存的地理条件,使得矿区生态系统演变过程和受损特征既不同于原地貌自然灾害诱发的生态退化,也不同于因人类经济社会活动导致的井工采煤塌陷地的退化和中、小型露天煤矿产生的生态退化^[2]。

平朔露天矿区属极度退化生态系统,按照其受损过程和重建目标可将其划分为3个阶段4种类型(图1)。

从图1可以看出,第1阶段由原脆弱生态演变为极度退化生态,即矿区生态系统破损阶段;第2阶段由极度退化生态演变为生态重建雏形,即矿区生态系统雏形建立阶段;第3阶段由重建生态雏形演变为重建生态相对稳定型,即矿区生态系统动态平衡阶段。第1阶段为结构、功能完全丧失过程;

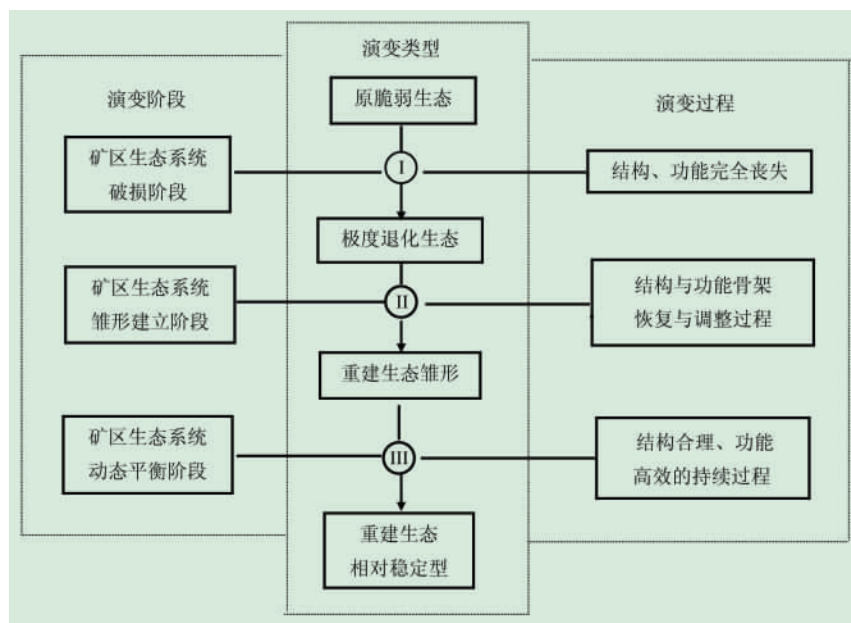


图1 平朔矿区生态系统演变的阶段、类型和过程

Fig. 1 Evolution stage, type and process of ecosystem in Pingshuo mine area

第2阶段为结构与功能骨架恢复与调整过程,其主要目的是重塑地貌、再造土体、改善生境;第3阶段为结构合理、功能高效的持续过程。

通过分析矿区生态受损过程,确定挖损、压占、占用和污染为主要诱发因子。生态受损特征表现为原生境在100年左右时间尺度下,以每年约 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的岩土搬运速度,累计消失面积约 180 km^2 ,而所形成的生境与原生境相比,虽沟壑消失使地貌趋于简单,但重新组合堆置的固相岩土结构松散、地层层序紊乱,地表物质更趋复杂,而其平台地表因严重压实,容重为 $1.6 \sim 1.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,比原生境的土壤容重大 $0.2 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;表土稳渗率为 $0.16 \sim 0.28 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,比原生境小 $0.12 \sim 0.84 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$;根系穿透阻力为 $30 \sim 60 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$,比原生境大 $23.88 \sim 57.87 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$;径流系数高达68.8%,是原生境的2.9~6.1倍。土壤性质更趋恶化,加之区域性气候干旱,天然植被和受损生态系统难以恢复,新的侵蚀地貌会加速形成。

2.2 生态重建障碍因子分析

平朔矿区采煤废弃地生态重建属极端生态条件下的退化生态系统恢复和重建,重建的策略是要重点解决影响复垦与生态重建的主要障碍因子。按照不同的诱发因子可分为自然因素和工程因素。自然因素包括水分、光照、大风、温度、大气,依照对生态重建影响的大小排序,水分>低温>大风>光照>大气。其中水分是主要限制因子,具有双重影响作用,春天降水少,干旱,影响植被种植;7、8、9月雨季,暴雨易造成水土流失,进而引发地质灾害。工程因素主要包括土地非均匀沉降,排土场基底不稳定,地表物质组成复杂,平台表面容重过大,边坡面蚀、沟蚀等。由于采掘工艺及超大设备所致,上述影响因子是不可避免的,降低风险的办法是科学合理的工艺设计,并通过一些关键技术减少危害。由此可以看出,控制水土流失提高水分利用效率、表土快速熟化提高生产力水平是首选治理策略。

2.3 生态重建规划与设计

矿区生态重建是指对采矿引发的结构缺损、功能失调的极度退化的生态系统,借助人工支持和诱导,对其组成、结构和功能进行超前性的规划、设计和调控,同时对逐渐逼近最终目标这一逆向演替过程中可能出现的各种问题,进行跟踪、评估并匹配相应的技术经济措施,最终重建一个符合实际(间)需求和价值取向的可持续的生态系统。

矿区生态环境问题是各种因素相互作用的结果,矿区生态重建应以实现矿区生态全面恢复为最终指标,而单一的治理是不能达到这一目标的。因此,从对过去矿区生态重建的单项研究向系统的综合研究转变,已成为矿区重建的必然趋势。这就要求与矿区生态重建有关的各种方案有良好的相容、衔接关系。具体来说,矿区生态重建方案是在遵循矿区环境评价和土地利用总体规划的原则、标准的基础上,融采矿规则与设计、矿区水土保持规划、土地复垦规划等为一体的综合整治方案,这样可以大大减少各子系统分散的重复投资,并能充分发挥各部门、各学科联合的群体效应,在统一目

标,统一规划下攻克矿区极端生境下生态重建中的关键的、共性的技术难题,尽快实现矿区生态重建的目标^[3]。

由于现代化大型露天煤矿具有开采速度快、挖掘幅度深、占地面积大、影响范围广、开采时间长、地貌构造特殊等特点,其退化的类型、过程、阶段和程度,与其他矿区废弃地相比迥然不同,故恢复与重建的理论、方法与技术也迥然不同。为了正在开采矿区和今后将要开采矿区的持续发展,尤其是能够较准确地估计和把握平朔矿区生态重建与经济发

2.4 土地重塑工艺

土地重塑工艺是指从工程复垦角度进行合理的地貌重塑和土体再造,尽可能消除影响植被恢复的生存限制因子。重点解决排土场基底不稳、非均匀沉降、水土流失严重、水分利用效率低、岩土污染、重塑地形坡度等问题^[4]。

平朔露天矿区排土场土地重塑工艺的关键技术主要包括:排土场基底构筑工艺、排土场主体构筑工艺、排土场平台构筑工艺、排土场边坡构筑工艺、排土场水土保持与排洪渠构筑工艺等。面对时空变化巨大的松散堆积地貌,其水保措施应是暂时性水保措施、过渡性水保措施与永久性水保措施的结合;排水渠系是永久性硬化骨干排水渠系和临时性非硬化排水渠系的结合,且前期主要是利用易修复的非刚性材料修筑土渠、石砾沟、宽浅干砌渠路面等,排泄地面径流。本课题组提出了“黄土母质直接铺覆工艺”、“堆状地面排土工艺”、“造地造土约束条件”等关键技术和原则,有效地解决了排土场初期水土流失、自然沉降和环境地质灾害发生等问题。

2.5 土壤重构工艺

土壤重构是指在土地重塑的基础上,再造一层人工的土体,并通过各种农艺措施,使土壤的理化性质不断改善、肥力不断提高。由于平朔矿区扰动后的地表大多覆盖的是黄土母质,在很大程度上承袭了母质的特性,其通气透水性、蓄水保水性、保肥供肥性经常发生矛盾。因此,必须通过土壤重构,才能为植物提供良好的立地条件,也为恢复植被、提高土地生产力打下良好的基础。

土壤重构重点对复垦土壤的母质类型、剖面构造、物理性状、化学性状、元素组成、生物性状进行深入研究。为此,全面、系统地分析了复垦土来源的地质背景、物理性质、化学性质和生物性状,涉及40种元素,15 000余个数据。结果表明,地层结构中除黄土以外的任何母质和岩石排在地表都不利于植物生长,高岭土和红黏土对植物生长尤为不利;平台表面土壤容重过大,水分不易渗透,而易产生地表径流,加重水土流失;土壤瘠薄,虽无明显的重金属超标,但植物生长需要



的必需养分严重不足,有机质含量极低,土质沙散,pH 值在 8.0 以上,这些指标说明平朔矿区复垦地土壤先天不足,不良的物理化学和水热条件,不利于土壤矿物元素的释放和元素的迁移富集及向有效态的转化。

针对复垦土壤的理化性质、元素组成、生物性状,提出解决问题的主要技术措施:改善排弃工艺,避免有害物质排在地表,有害物质的压埋、包埋,应纳入排弃工艺;要求排弃作业终止前应保证地表有 0.5~1 m 的黄土覆盖,减少地表过度碾压,降低地表容重;采用堆状地面排土工艺、生物措施及各种水保措施,有拦蓄天然降水、减少水土流失;采用固氮植物作为先锋植物或与其他植物合理配置,改善土壤养分状况^[5]。

2.6 植被重建工艺

平朔露天矿区生态重建的核心是植被重建。重建的目的是要控制水土流失,快速熟化土壤,稳定土层结构,尽快形成可自我调节的健康生态系统。最终目标是构建结构合理、功能高效的农林复合生态系统。因原地貌是干草原植被类型,属黄土高原重点治理的脆弱生态区,故重建系统应优于原地貌生态系统,能适应当地恶劣的自然条件,改变极度退化的立地条件。

技术方案主要是应用植被演替理论,在人为诱导支持和调控作用下,重建生态系统,可以缩短演替的进程,或跨过较低的植被类型直接形成较高级别或较为稳定的植被群落。此外还运用生物多样性原则、生态位与生物互补原则、物能循环与转化原则、物种相互作用原则、食物链网原则等。重建技术方案经历了纯草、纯灌、纯乔模式;随机配比的草、灌、乔组合和优化配置的草、灌、乔组合模式。经过时间的检验,单一品种种植模式易出现病虫害和种群退化问题;随机组合的草、灌、乔结构,大多数由于相互竞争养分与水分或拮抗作

用,也出现整体退化现象。只有设计合理、搭配科学的草、灌、乔复合结构,才能形成稳定的植被群落结构,完成植被群落正常演替。该项研究历时 20 余年,先后引进 100 余种试验植物,经适应性评价确定刺槐 (*Robinia pasudoacacia*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、沙枣 (*Elaeagnus angustifolia*)、榆树 (*Ulmus pumila*)、沙柳 (*Salix cheilophila*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides ssp.sinensis*)、柠条 (*Caragana korshinskii*)、沙打旺 (*Astragalus adsurgens*)、白花草木樨 (*Melilotus albus*)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 等作为该区生态重建的先锋树种和适生种植品种。经过系统科学研究及评估,筛选出油松+刺槐+柠条,刺槐+沙棘+草木樨、沙打旺+沙棘+柠条等 20 余种草、灌、乔组合作为矿区生态重建的植被配置模式^[6]。这些模式的共同特点是易形成较为稳定的植被群落和结构趋于合理的生态系统。草、灌、乔的组合不求各植物种都能长期共存,只求阶段性共生,起到促进物质循环和养分的传递、熟化土壤的作用,逐步过渡到相对稳定的森林草原生态系统。豆科牧草在完成其使命后自行退化消失,为乔灌的生长提供必需的养分。伴随着野生植物的侵入,逐步形成与自然相适应、种间和谐共存、群落结构稳定的人工生态系统。此外,选择对立地条件影响较大的土壤污染、地面坡度、地表物质、覆土厚度、土体容重、坡向 6 个因子进行排列组合,形成 100 余个立地类型,从中筛选出 17 个立地类型,有利于生态重建,针对不同的立地条件,配以适宜的草灌乔优化组合,大大地提高了复垦和生态重建的成功率,有效地解决了植被重建的难题。在已复垦的 2 000 hm² 土地上,大多数样地植被覆盖率大于 80%,少数样地大于 90%,野生植物和动物大量侵入,已初步形成结构合理、功能较为健康的人工生态系统。

平朔露天矿区生态重建技术体系如表 1 所示。

表 1 平朔矿区土地复垦与生态重建技术体系			
Table 1 Technological systems for land reclamation and reconstruction of ecosystems in Pingshuo surface mine			
重建类型	重建对象	技术体系	技术类型
非生物环境因素	土壤	土地重建技术体系	排土场基底构筑工艺;排土主体构筑工艺;排土场平台构筑工艺;黄土母质直接铺覆工艺;堆状地面排土工艺;排土场边坡构筑工艺;排土场排水渠构筑工艺
		土壤重构技术体系	土壤快速培肥技术;固氮植物引入改良技术;绿肥与有机肥施用技术;活性污泥改良技术;水分利用调控技术
		水土流失控制与保持技术体系	暂时性、过渡性、永久性水保措施结合技术;复合农林技术;网状整地技术;边坡防崩防滑技术;谷坊
		土壤污染控制技术体系	有害物质包埋、压埋技术;煤矸石自燃防治技术;移土、客土种植技术;废弃物资源化利用技术
生物因素	物种	植物品种引入和筛选技术体系	先锋植物引入技术;土壤种子库引入技术;林草植被再生技术
	群落	群落结构优化配置与组建技术体系	乔、灌、草搭配技术;群落组建技术;择伐技术;生态位优化配置技术
		群落演替调控技术体系	人工与自然侵入演替技术;病虫害防治技术;封山育林技术
生态系统	结构与功能	生态评价与规划技术体系	土地资源评价与规划技术;环境评价与规划技术;景观生态评价与规划技术;3S 辅助技术;专家系统技术



3 展望

平朔露天矿区采煤废弃地土地复垦与生态重建的工作虽经过 20 年的持续研究,但随着研究工作的深入,对矿区土地复垦和生态重建的认识和理解正在改变,许多问题逐渐由技术层面上升到科学探索,研究的内容及深度也在不断扩展。随着平朔露天矿区采煤面积的不断扩大,新建人工生态系统是否稳定,能否与自然生态系统相融合、共存,仍然有许多问题待深入研究。今后应重点开展新建人工生态系统的稳定与调控技术;矿区新建生态系统自然演替的过程与机制;人工植被群落结构与功能的关系;重建生态系统养分的积累、转化与循环规律;人工生态系统重建技术与效益评价体系等研究工作,进一步探索脆弱生态区生态重建的过程和机制。

参考文献 (References)

- [1] 陈昌笃. 持续发展与生态学 [M]. 北京: 中国科技出版社, 1993: 132-138.
Chen Changdu. Sustainable development and ecology [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1993: 132-138.

- [2] 白中科, 王文英, 李晋川, 等. 矿区生态重建基础理论与方法研究[J]. 煤炭环境保护, 1993, 13(1): 10-14.
Bai Zhongke, Wang Wenying, Li Jinchuan, et al. Coal Mine Environment Protection, 1993, 13(1): 10-14.
- [3] 白中科, 赵景逵, 李晋川, 等. 大型露天煤矿生态系统受损研究——以平朔露天煤矿为例[J]. 生态学报, 1999, 19(6): 870-875.
Bai Zhongke, Zhao Jingkui, Li Jinchuan, et al. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(6): 870-875.
- [4] 白中科, 王文英, 李晋川, 等. 黄土区大型露天煤矿剧烈扰动土地生态重建研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 621-626.
Bai Zhongke, Wang Wenying, Li Jinchuan, et al. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(6): 621-626.
- [5] 李晋川, 白中科. 露天煤矿土地复垦与生态重建——平朔露天矿的研究与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Li Jinhuan, Bai Zhongke. Land restoration and ecological rehabilitation on open surface mine—Study and practice of Pingshuo surface mining[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [6] 郝蓉, 白中科, 赵景逵, 等. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1470-1476.
Hao Rong, Bai Zhongke, Zhao Jingkui, et al. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 1470-1476.

(责任编辑 吴晓丽)

时间: 2009年10月

地点: 安徽合肥

2009年中国工程热物理学会 (燃烧学) 学术年会

主 办: 中国工程热物理学会

承 办: 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室

通信地址: 北京2706信箱 (100080)
中国工程热物理学会秘书处
电子信箱: cset@mail.etp.ac.cn