

煤矸石山植被恢复影响因子初探 ——以山西省阳泉市 280 煤矸石山为例

王伟¹, 张洪江¹, 张成梁², 郑国强¹, 李美生³

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 山西绿宝园林设计研究所, 山西 太原 030006; 3. 山西国阳新能股份有限公司, 山西 阳泉 045000)

摘要: 对山西省阳泉市 280 煤矸石山小气候特征、地形条件、煤矸石理化性质、水分和生物特点进行了调查分析。结果表明,煤矸石山的小气候特征表现为以干热和干旱为主。煤矸石自燃致使地温产生较大异常,局部自燃的煤矸石坡面地表温度远高于植物生长的正常温度范围。煤矸石山坡度大,堆积松散,易产生坡面侵蚀。表层煤矸石经侵蚀后,植被根系周围缺乏附着物,生长势逐渐变弱。煤矸石物理特性与黄土相比,其持水能力差,有效水分含量低,缺乏下层水分补给,直接影响到植物正常生长。自燃后的煤矸石 pH 值降低,表层煤矸石养分状况差,微生物种类和数量均偏少。煤矸石山植物生长状况显示,地表温度、侵蚀状况、酸性和含水量是影响植物生长的重要因子。地温高于 50 或 pH 值小于 5 的地区植物均不能生长。植物盖度在含水量小于 15% 的区域较含水量为 20% 的区域下降约 10%~20%,在侵蚀区植物盖度下降约 30%。

关键词: 煤矸石山; 植被恢复; 影响因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)02-0147-06

中图分类号: S151.9

Influencing Factors of Vegetation Restoration in Coal Waste Piles —A Case Study of 280 Coal Waste Piles in Yangquan City, Shanxi Province

WANG Wei¹, ZHANG Hong-jiang¹, ZHANG Cheng-liang², ZHENG Guo-qiang¹, LI Mei-sheng³

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University,
and Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification

Combating of MOE, Beijing 100083, China; 2. Shanxi Lubao Garden Institute, Taiyuan,

Shanxi 030006, China; 3. Shanxi Guoyang New Energy Co., Ltd., Yangquan City, Shanxi 045000, China)

Abstract: An investigation which includes microclimate, gangue physical and chemical properties, terrain, gangue moisture, and organism was carried out in 280 coal waste piles in Yangquan City, Shanxi Province. Microclimate of coal waste piles was hot and dry, and ground temperature was abnormal by spontaneous combustion of gangues. Temperature of sloping surfaces where partly had been burning was exceeded the normal temperature range for plant growth. Coal waste piles easily generated slope erosion due to their large slopes and lax accumulations. After surface gangues had been eroded, no soil adhered to plant roots and plant growth vigor gradually became weak. Compared with loess, gangues had poor water holding capacity and low available water capacity. Surface gangues lacked water supplements from lower layers, which affected plant growth directly. The pH value of ignited gangues declined, nutrient status of surface gangues was bad, and species and quantity of gangue microbe were small. Plant growth condition in the coal waste piles indicated that ground temperature, erosion condition, acid, and moisture were factors affecting vegetation restoration. Plants could not grow if ground temperature exceeded 50 or pH value was low than 5. Compared with the regions of 20% water moisture, vegetation coverage in the region of <15% water moisture declined by about 10%~20%. In the eroded areas, vegetation coverage declined by about 30%.

收稿日期: 2007-10-30

修回日期: 2007-12-03

资助项目: 山西省重大科技攻关项目“山西省工矿区土地沉陷防治、复垦与生态重建研究”(2006031099-01-06); 山西国阳新能股份有限公司项目“自然煤矸石山生态重建试验研究”

作者简介: 王伟(1983—), 男(汉族), 河南省郑州市人, 在读硕士生, 主要研究方向为水土保持与森林水文。E-mail: vane_bjfu@tom.com。

通讯作者: 张洪江(1955—), 男(汉族), 河北省易县人, 教授, 博士生导师, 主要研究土壤侵蚀与流域管理。E-mail: zhanghj@bjfu.edu.cn。

Key words : coal waste pile ; vegetation restoration ; influencing factor

煤矸石作为煤炭开采的伴随产物,全国年平均排放量达 2.0×10^8 t,占原煤产量的 15%~20%。除部分被利用外,煤矸石的处理多以堆放为主。据 1995 年统计,已累计占压土地 2.2×10^5 hm^2 ^[1]。鉴于目前我国土地资源紧缺状况,其占压土地的危害很严重。

因煤矸石山堆积方式及煤矸石自身理化特性的差异,煤矸石常有不同程度的自燃现象^[2]。我国统配煤矿有煤矸石山 1 500 座左右,近 300 座发生过自燃或正在发生自燃^[3]。积存的煤矸石自燃会导致严重社会问题和环境问题。煤矸石自燃产生 H_2S 、 SO_2 、 CO 和氮氧化物等有毒气体,危害着当地群众的身体健康,影响着煤矸石堆积地区的植物生长^[4]。常年自燃的煤矸石山,每 1 km^2 燃烧面积每天可向大气排出 CO 10.8 g、 SO_2 6.5 g、 H_2S 和 NO_2 2 g^[5],这些刺激性气体持续地释放,影响矿区的空气质量,引起煤矿区呼吸道、癌症等方面的疾病增加^[6]。煤矸石燃烧后能够释放大量的金属和非金属离子,导致土壤酸化和盐渍化^[7-9]。煤矸石中的重金属元素容易释放^[10-11],可能造成一定的水域污染^[12-13],对煤矸石山附近的地下水及农田系统构成潜在威胁^[14]。

在煤矸石山人工构建以植物为主的生态系统,利用植物改良和保持煤矸石及其风化物,达到吸附有害物质和净化空气的目的,从而改善煤矸石山及其周围地区的生态环境^[15-19]。煤矸石山的环境因子决定着植被生长的成败与好坏,自燃煤矸石山与非自燃煤矸石山相比,其自然条件显著不同^[20]。对自燃煤矸石山的环境条件进行调查和分析,探讨植被恢复的主要影响因子,以建立适应煤矸石山环境和较为稳定的人工植被生态系统。

1 研究区概况

研究的阳泉矿区位于山西省阳泉市,地理坐标为东经 $112^\circ 54' - 114^\circ 04'$,北纬 $37^\circ 40' - 38^\circ 31'$ 。地处黄土高原东缘,地貌以山地为主,约占全市总面积的 73.44%。阳泉矿区沟谷纵横,为低山丘陵区,地势为西北高,东南低,最低点位于阳泉市区,海拔 660 m,最高点位于西北担山,海拔 1 373 m,最大相对高差 713 m。阳泉市属暖温带半湿润大陆性季风气候区,四季分明。夏季日照时间长,辐射强度大,气温较高,降水比较集中,降水量约占年降水量的 70%左右;冬季冷空气活动频繁,气候寒冷干燥,多晴天,降水稀少。年降水量北部多于南部,多年平均降水量为 564.2 mm。据阳泉市气象台历年资料统计,多年平

均气温为 11.3℃,年极端高温高达 40.2℃,年极端低温为 -19.1℃。无霜期由西北向东南逐渐延长,平均日数为 130~180 d。年均风速 2 m/s,全年以西北偏西风为主。

所研究的 280 煤矸石山属山西省阳泉市阳煤集团三矿,为小型煤矸石山,由阳泉三矿开采时产生的煤矸石堆积而成。总面积 3.8 hm^2 ,其中平台面积 0.84 hm^2 ,斜坡面积 2.96 hm^2 。位于阳泉市区的西北部,阳泉三矿竖井西南 500 m 处。2005 年 6 月开始以自然恢复和人工引种相结合的方法进行植被恢复。自然恢复的植被呈簇状分布,主要为升马唐 (*Digitaria ciliaris*)、马齿苋 (*Portulaca oleracea*)、蒺藜 (*Tribulus terrestris*)、臭蒿 (*Artemisia annus*)、荆条 (*Vitex negundo*) 和狗尾草 (*Setaria viridis*) 等,人工引种植物主要为紫穗槐 (*Amorpha fruticosa*)、高羊茅 (*Festuca arundinacea*)、百脉根 (*Lotus corniculatus*) 和刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 等。

2 研究方法

气候、地形、地质、地貌、土壤、水文及生物等因子,直接或者间接影响到植物的成活与生长发育^[22]。对于煤矸石山而言,与植被恢复有关的主要影响因子包括煤矸石山的小气候、土壤、地形、水分和土壤生物等。本文针对以上 5 个因子进行研究。

2.1 野外调查与取样

野外调查煤矸石山小气候条件、地形特点、水分动态及表层生物状况。用三杯风速仪测定风速,降水量用自记式雨量计测定,蒸发量用蒸发皿测定,地温用 DIGIMULTI model D611 便携式多功能温度计测定,空气 SO_2 和 NO_2 含量委托当地环保部门测定。用坡度仪测定煤矸石山各坡面的坡度,用皮尺测定其坡长。用 Diviner 2000 水分测定仪定期测定表层矸石含水量,每个取样点重复 3 次。应用生态学的样方调查方法,以面积为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的样方调查矸石山的植物种类及植物盖度。在植被调查的同时,以探查法和手检法对煤矸石山可目测到的动物活动情况进行记录。用 100 cm^3 的环刀或土盒(根据测定项目不同)采集煤矸石样品,根据各矸石剖面的具体情况分层,每层 3 个重复,以备进行室内分析。

2.2 室内分析

煤矸石物理性质的测定,用环刀法和烘干法测定煤矸石容重和孔隙度,用筛分法测定其机械组成,双环法测定矸石水分渗透性能。煤矸石化学性质的测

定,以 2.5 : 1 的水土比配制溶液,酸碱性的用 Orion pH 测定仪测定,有机质用重铬酸钾法测定,有效(碱解)N 用 NaCl 浸提法测定,速效 K 用 NH_4Ac 浸提火焰光度计法测定,速效 P 用 NaHCO_3 法测定。

3 结果与分析

3.1 小气候特征

280 煤矸石山具有典型的干热小气候环境。阳泉地区风速大,气温高,降水量偏少,空气干燥,而煤矸石成暗色,吸热性强,因此煤矸石山较周围黄土山地更加炎热和干燥。根据 2006 年 4—10 月测定,煤矸石自燃放热使 280 煤矸石山气温较周围黄土山地平均偏高 3.2,空气相对湿度较周边地区低 5.5%。

煤矸石山植被生长稀疏,山顶平台风速较大,实测年平均风速为 3.2 m/s,高于周边地区(2 m/s)。煤矸石堆放时间较长,表层煤矸石松散且粒径较小,因此大风天气易将小颗粒风化物吹起,频繁出现扬尘天气。煤矸石自燃会产生大量的 SO_2 和 NO_2 ,2005 年 4 月煤矸石山治理前矿区环保部门大气污染物监测结果显示,280 煤矸石山坡面 1.5 m 高度空气样品中 SO_2 浓度为 0.777 mg/m^3 , NO_2 浓度为 0.0097 mg/m^3 ,均超过 GB16297—1996 大气污染物综合排

放标准,空气质量较差,危害着周围群众的身体健康和动植物生长。

局部煤矸石山自燃导致 280 煤矸石山地表温度极为异常。煤矸石山 20 cm 深处温度现场测定结果显示,自燃点表层最高温度可达 192.0,平均温度 145.3。自燃点周围 10 m 范围内平均温度为 59.5,非自燃区平均温度为 23.4,矸石山附近农田 20 cm 深土壤温度仅为 20.3。植物高温胁迫实验表明,地温平均在 35 以下时,多数植物能够生长,35 ~ 38 时,短时间不会对植物形成致命的伤害,45 以上时,短时间就会对绝大多数植物造成致命危害。煤矸石山自燃点及其周边不适合植物生长,如进行植被恢复必须先对煤矸石山进行灭火处理。

3.2 煤矸石理化性质

280 煤矸石山矸石组成物质主要为高岭石、炭质、石英、伊利石、硫、铁以及泥沙等,含硫量较高,平均为 3.1%,高含硫矸石更加容易自燃。经 10 余年的堆积风化,煤矸石山表层形成约 5 ~ 15 cm 厚的矸石风化层。风化层煤矸石的石砾和石块占 72.43%,砂粒及以下细粒物质占 27.57%。风化层以下的煤矸石含石砾、石块物质更多,约占 87% ~ 85%,细粒物质仅占 12% ~ 15%(表 1)^[21-22]。

表 1 280 煤矸石山煤矸石机械组成及其变异系数

煤矸石类别		石块 (10 mm)	石砾 (10 ~ 1 mm)	砂砾 (1 ~ 0.05 mm)	砂砾以下粒级 (< 0.05 mm)
机械组成/ %	风化层	13.74	58.76	11.18	16.39
	风化层下	40.68	47.09	5.24	6.91
变异系数	风化层	0.59	0.34	0.41	0.38
	风化层下	0.37	0.29	0.37	0.33

未燃的煤矸石一般呈弱碱性^[3],煤矸石自燃能够产生多种酸性气体,同时在煤矸石山表层形成斑状酸性结晶体,致使煤矸石山局部酸化。280 煤矸石山周围黄土山地土壤 pH 值约为 6.50 ~ 8.00,当地乡土植物(如荆条、臭蒿等)一般在此 pH 值范围内的土壤中能够正常生长。280 煤矸石山曾经发生过长时间的自燃。目前由自然植被生长处的不同深度煤矸石 pH 值测定结果可以看出(见图 1),由于植物的生长及淋溶作用,地表 15 cm 内的煤矸石 pH 值平均为 7.79,已经与周围黄土山地土壤接近,能够满足乡土植物生长需求。通过现场调查,地表植物的根系也多集中分布在此深度范围内。15 cm 以下煤矸石层 pH

值平均为 4.47,基本无植物根系分布。深层自燃的煤矸石保持了较强的酸性,不利于植物根系生长,因此自燃后的煤矸石山不利于深根性植物的生长。

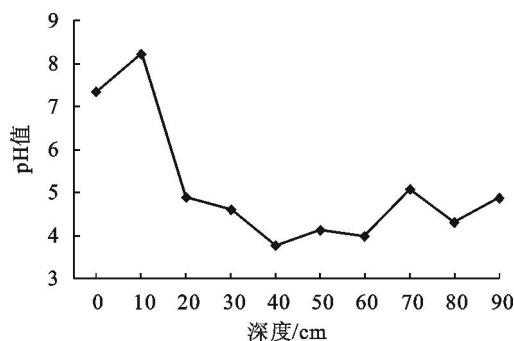


图 1 280 煤矸石山不同深度煤矸石 pH 值变化

280 煤矸石山与周围农田黄土相比,养分状况较差(见表 2),不能有效地为植物提供生长所必需的营养物质。

经测定煤矸石山表层风化物速效 P 含量仅为

2.7 mg/kg,速效 K 含量为 123 mg/kg,全 N 含量虽然较大,但多存在于杂环物质中,植被难以吸收。为了满足植物生长的基本需要,必须进行施肥和熟化处理,以提高表层煤矸石风化物的养分含量。

表 2 煤矸石及周围黄土 pH 值及养分状况

物质	pH 值	有机质/ %	全 N/ %	速效 P/(mg·kg ⁻¹)	速效 K/(mg·kg ⁻¹)
黄土	6.97	0.140 2	0.025 5	3.6	61
煤矸石	2.93	3.457 5	0.372 5	2.7	123

注:煤矸石风化物中含有大量碳元素,对有机质测定具有一定影响。

3.3 地形条件

280 煤矸石山属倾倒矸石自然堆砌而成,最大坡度 36.6°,最长坡长 100.3 m。平台部分面积 0.84 hm²,坡度 < 3°;东坡部分面积 0.62 hm²,坡度 15°~24°,坡长 30 m 左右;南坡部分面积 1.29 hm²,坡度 19°~27°,坡长 60~100 m;西坡部分面积 1.05 hm²,坡度 24°~36°,坡度最陡,坡长 50~90 m。280 煤矸石山底边线总长度 925 m,平台边线长 475 m。

280 煤矸石山在排矸期间,坡面推进速度较慢,使得煤矸石长时间处于可能自燃的暴露状态。斜坡暴露面积大,占煤矸石山总表面积的 77.89%,煤矸石堆积疏松,供氧条件好。在重力作用下,大块矸石更多滚落到矸石山底部,粒径小的矸石多留在上部,导致孔隙率增大,发热量高的小粒径矸石富集。280 煤矸石山的地形和物质组成特点导致了其容易发生自燃。煤矸石山表层风化物堆积松散,斜坡风化物稳定性差,经大风吹蚀和降雨形成的地表径流冲刷,常出现面蚀、沟蚀及崩塌等形式的土壤侵蚀。由于煤矸石山自然植被根系分布一般较浅(小于 20 cm),煤矸

石表层风化物经侵蚀后,植被根系周围缺乏附着物,生长势逐渐减弱。根据 2006 年 7—8 月的测定,280 煤矸石山总侵蚀量为 694.5 t/km²(见表 3)。

调查结果表明,当一次降水量小于 20 mm 时,基本上不产生侵蚀,当一次降水量大于 20 mm 时,降水量与侵蚀量呈现显著的线性正相关关系:

$$E = 0.679 H - 166.47, R^2 = 0.9354 \quad (1)$$

式中: H ——降水量; E ——侵蚀量。

暴雨还可造成煤矸石山体产生滑坡,危害山脚居民的安全,影响植物的演替进程。

3.4 煤矸石水分状况

煤矸石与黄土相比,其持水能力差,有效水分含量低,直接影响植物正常生长。280 煤矸石山表层煤矸石容重为 1.742,总孔隙度为 35.6%。与当地黄土相比,密度相近,但总孔隙度偏小。煤矸石的田间持水量为 137 g/kg,小于黄土,其持水能力与黄土相比偏低。在充分供水条件下,煤矸石所能储存的水分少于黄土。煤矸石的有效含水量为 103 g/kg,仅为黄土有效含水量的 61.68%(见表 4)。

表 3 2006 年 7—8 月 280 煤矸石山矸石侵蚀量

测定日期	--0709	--0710	--0714	--0805	--0813	--0814	--0825	--0826	--0828	--0830	合计
降水量/mm	2.75	1.55	75.2	5.4	60.5	22.4	41.0	0.45	53.6	48.2	311.0
侵蚀量/(t·km ⁻²)	0	0	390.0	0	214.0	20.3	92.8	0	178.2	150.2	694.5

表 4 煤矸石及黄土与水分有关的基本物理常数

物质	田间持水量/ (g·kg ⁻¹)	凋萎系数/ (g·kg ⁻¹)	有效含水量/ (g·kg ⁻¹)	容重/ (g·cm ⁻³)	密度/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度/ %
黄土	212	45	167	1.357	2.37	45.7
煤矸石	137	34	103	1.742	2.56	35.6

经降水(降水量为 22.4 mm)后 3 d 与降水后 10 d 两次现场测定显示,煤矸石山表层煤矸石含水量随

垂直深度的增加逐渐增大(见图 2),但 30—40 cm 深处明显存在 5—10 cm 厚的水分干层。其原因主要是

煤矸石颗粒较粗,与下层毛管孔隙联系较弱,下层大多数水分需通过扩散作用方可被蒸发,表层失水后,深层水分难以迅速予以补充。干层的存在,使40 cm深度以下的煤矸石与0—20 cm表层煤矸石相比,受降水、蒸发等因素影响较小,含水量相对稳定。根据图2结果,0—20 cm深煤矸石层含水量平均变化为36.67%,40—100 cm深含水量平均变化仅为9.69%,40 cm以下的煤矸石层水分含量变化较缓和,有利于水分的保存,能够在旱季为深根性植物提供一定的水量。

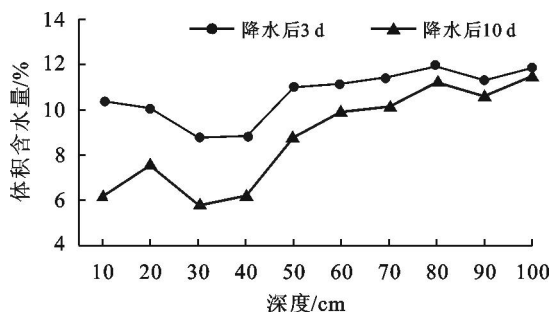


图2 280 矸石山表层煤矸石含水量分布

3.5 生物特点

土壤中的动物与微生物对于土壤改良和植被恢复均具有十分重要的意义。土壤动物通过扰动土壤,促进了土壤孔隙的形成,土壤空气流通和水分的渗入,为植物生长提供了良好的水、气条件。2006年4—10月调查表明,280煤矸石山未发现有蚯蚓、鼠类等周围黄土地区常见的土壤动物的活动。

土壤微生物能够改善土壤养分状况,提高植物抗性。洪坚平等对阳泉三矿煤矸石山矸石微生物量调查研究结果表明,矸石中细菌量为 8.2×10^4 个/g,放线菌量为 1.6×10^4 个/g,真菌量为 2.08×10^4 个/g^[6],与周边黄土相比较,微生物含量明显偏少,不利于植物抗性的提高和煤矸石肥力的改善。

煤矸石山由矸石堆砌而成,缺乏成土过程,再加之缺乏动物和微生物活动,延缓了表层煤矸石及其风化物熟化速度,不利于其物理结构的改善,使理化性质较差的煤矸石更难以具备良好的水分养分条件,制约了植物的生长发育。

3.6 植物生长状况

由于煤矸石自燃与煤矸石山山体侵蚀,280煤矸石山局部地区地温、pH值及自然含水量状况具有一定差异。以280煤矸石山分布的自然植物荆条(*Vitex negundo*)与人工引种植物紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)在不同条件下的生长状况为例,分析以上环境因子对煤矸石山植物生长的影响。植物盖度与

环境因子数据均为2006年7—8月间的测定结果(见表5)。

表5 植物盖度与环境因子

植物种类	盖度/%	地温/°C	pH值	自然含水量/%	是否发生侵蚀
荆条	0	79.5	4.73	21.46	否
	12.46	23.8	6.14	20.12	否
	40.71	24.2	7.54	16.40	否
	59.69	24.0	7.86	23.35	否
	29.75	23.7	7.11	19.68	是
紫穗槐	0	86.3	4.96	20.35	否
	10.71	28.6	6.06	18.49	否
	48.73	23.7	7.59	15.28	否
	65.18	23.9	8.03	23.11	否
	36.61	24.1	7.62	20.28	是

注:环境因子数据为地面表层20 cm厚煤矸石情况。

地温是影响植物生长的重要因子。煤矸石山局部自燃部分地温均在50以上,自燃使煤矸石呈强酸性,其pH值小于5,此范围内荆条和紫穗槐均不能生长。pH值在7~8范围内的煤矸石坡面,植物盖度均在30%以上。随着酸性的升高,在pH值小于6的区域中,荆条与紫穗槐盖度均小于15%。含水量也制约着植物的生长,测定期内煤矸石山的表层自然含水量在20%左右,含水量小于15%的局部范围,植物盖度较含水量高的局部下降约10%~20%。由于煤矸石山表层物质松散,降水能使煤矸石山局部范围出现面蚀与沟蚀等形式的侵蚀,发生侵蚀的局部坡面植物生长受扰动,因此其植物盖度下降约30%。

4 结论与建议

煤矸石山表现出以干热和干旱为主的小气候特征。煤矸石自燃致使地温异常,局部自燃的煤矸石山地温远远高于植物正常生长的温度范围。煤矸石山坡度大,堆积松散,容易产生坡面侵蚀,表层煤矸石经侵蚀后,植被根系周围缺乏附着物,生长势逐渐减弱。煤矸石山表层矸石风化物物理结构差,与黄土相比,其持水能力差,有效水分含量低,缺乏下层水分补给,直接影响植物正常生长。自燃后的煤矸石pH值降低,表层煤矸石养分状况差,微生物种类和数量偏少。

煤矸石山的植物生长状况显示,地表温度、侵蚀状况、pH值和含水量是影响植物生长的主要因子。地温高于50或pH值小于5的地区植物均不能生长。植物盖度在含水量小于15%的区域较含水量为20%的区域下降约10%~20%,在侵蚀区植物盖度下降约30%。

针对以上影响植物生长的环境因子,建议今后应深入研究煤矸石自燃机理,寻求有效的灭火方法控制自燃对煤矸石地表温度及煤矸石酸碱性变化的影响,加强对煤矸石及其风化理化性质改良方法的研究,特别是加强对应用微生物改良方法,改善表层煤矸石的保水能力及养分含量方面的研究,为植物生长提供适合的环境。

[参 考 文 献]

- [1] 苏光全,何书金,郭焕成. 矿区废弃土地资源适宜性评价[J]. 地理科学进展, 1998, 17(4):39—46.
- [2] 张振文,宋志,李阿红. 煤矿矸石山自燃机理及影响因素分析[J]. 黑龙江科技学院学报, 2001, 11(2):12—14.
- [3] 张光灿. 煤矸石生态重建模式及其效应的研究[D]. 北京:中国国家图书馆, 2002.
- [4] 武钢,姚宇平. 阳泉煤矸石自燃原因及治理方法的研究[R]. 山西阳泉:山西国阳新能有限公司, 1997:449—452.
- [5] 常前发. 开展固体废弃物综合利用促进矿业可持续发展[J]. 金属矿山, 2001, 36(2):56—58.
- [6] 陈贵荣,张红英. 煤矸石自燃的机理、污染及防治措施[J]. 西山科技, 2000, 3(4):7—9.
- [7] 段永红,赵景逵. 煤矸石山表层矸石风化物的盐分状况与复垦种植[J]. 山西农业大学学报, 1998, 18(4):337—339.
- [8] Kimber A J, Pulford I D, Duncan H J. Chemical variation and vegetation distribution on a coal waste tip[J]. Journal of Applied Ecology, 1978, 15(2):627—633.
- [9] Carlson C L, Carlson C A. Impacts of coal pile leachate on a forested wetland in South Carolina. Water[J]. Air & Soil Pollution, 1994, 72(14):89—109.
- [10] 魏忠义,胡振琪,司继涛. 采煤沉陷地粉煤灰充填复垦土壤元素淋溶特性实验研究[J]. 农业环境保护, 2002, 21(1):13—15, 18.
- [11] 王辉,卞正富. 采煤废弃物对作物生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):209—211.
- [12] Martin J, Haigh, Ben Sansom. Soil compaction, runoff and erosion on reclaimed coal-lands (U K) [J]. J SM, 1999, 13(4):135—146.
- [13] Dang Zhi, Liu Congqiang, Haigh M J. Mobility of heavy metals associated with the natural weathering of coal mine spoils[J]. Environmental Pollution, 2002, 18(3):419—426.
- [14] 王金达,于君宝,刘景双,等. 北煤矿区环境风险评价探讨[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2):210—213.
- [15] 胡振琪,魏忠义,秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法[J]. 土壤, 2005, 37(1):8—12.
- [16] 张文敏. 国外土地复垦法规与复垦技术[J]. 有色金属(矿山部分), 1991, 15(4):41—46.
- [17] 许丽,周心澄,王冬梅. 煤矸石废弃地复垦研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(9):117—122.
- [18] 赵永红. 矸石山造林技术探讨[M]. 北京:中国林业出版社, 1995:149—151.
- [19] 洪坚平. 绿肥牧草对矸石山生态环境的改善[J]. 农村生态环境, 1996, 12(4):55—57.
- [20] 高建钰,白中科. 煤矸石山立地条件与林业复垦研究:以山西统配煤矿为例[J]. 山西林业科技, 1999, 8(3):18—21.
- [21] 洪坚平,谢英荷,林大仪. 矿山复垦区土壤微生物及其生化特性研究[J]. 生态学报, 2000, 20(7):669—672.
- [22] 胡振琪,李鹏波,张光灿. 煤矸石山复垦[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2006:37—43.