

煤矸石渣土改良及其效果研究

张静雯¹, 张成梁^{2,3}, 宋楠¹, 王贤¹, 张焜¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

2. 轻工业环境保护研究所, 北京 100089; 3. 山西省林业科学研究院, 山西 太原 030006)

摘要: 自燃煤矸石山渣土具有高盐强酸性, 严重制约了植物的生长, 因此在对自燃煤矸石山进行植被恢复时, 首先要对煤矸石山渣土进行改良。以研究区内黄土作为改良剂, 研究了其对自燃煤矸石渣土的改良方法和效果。选取高羊茅、刺槐、紫穗槐、侧柏、山皂角在改良后的渣土中进行种植实验, 测试改良效果, 筛选适宜在煤矸石山上种植的植物, 并确定黄土作为改良剂的施用比例。改良实验结果表明, 黄土作为改良剂对自燃煤矸石渣土的强酸性改良效果良好, 在 pH 值为 2.8 的强酸性渣土中, 加入 25% 的黄土, pH 值可提高至 6.8。对自燃煤矸石渣土的高盐性改良效果较差, 在盐分为 3.8% 的煤矸石渣土中, 加入 62.5% 的黄土, 盐分可降低至 0.97%。种植实验也表明, 高羊茅、紫穗槐、山皂角对改良后煤矸石渣土的适应性较强, 刺槐、侧柏的适应性则较弱。

关键词: 自燃煤矸石渣土; 基质改良; 改良效果; 植被恢复

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)04-0227-05

中图分类号: S151.9

Analysis on Gangue Improvement and Its Effect

ZHANG Jing-wen¹, ZHANG Cheng-liang^{2,3}, SONG Nan¹, WANG Xian¹, ZHANG Kun¹

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

Beijing 100083, China; 2. Environmental Protection Research Institute of Light Industry,

Beijing 100089, China; 3. Shanxi Forestry Science Research Institute, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: Due to its attribute such as high salt and strong acid, the mountainous gangue which had undergone spontaneous combustion seriously constrains plant growth. Therefore it is imperative for ameliorating the conditions of gangue mountain to restore vegetation. The abundant and cheap loess was selected as ameliorant, then the ameliorative effect of the diverse ameliorated methods on *Festuca elata*, *Robinia pseudoacacia*, *Amorpha fruticosa*, *Platycladus orientalis* and *Gleditsia horrida* respectively in the mixed gangue and loess was studied aimed to select the plant which has strong resistance and is suitable for the coal gangue mountain and determine the proportion of loess application. The results showed that the loess as ameliorant was effective for improving the strong acidity, while adding 25 percent of loess into strong acid gangue with pH 2.8 could raise pH to 6.8. However it is un conspicuous for the high salt, adding 75 percent of loess into high salt gangue with salt content of 3.8% could reduce salt content to 1.01%. In addition, *Festuca elata*, *Amorpha fruticosa* and *Gleditsia horrida* were more suitable than *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis*.

Keywords: spontaneous combustion gangue; improved matrix; effect; vegetation restoration

煤矸石是煤炭生产和加工过程中产生的主要固体废弃物^[1], 约占原煤产量的 15% ~ 20%^[2-3]。据统计, 全国年均矸石排放量约达 1.40×10^7 t, 累计堆存量达 5.00×10^9 t, 占地面积 150 km^2 ^[4-5], 是目前危害

极为严重、数量最大的固体排放物之一, 对环境危害极为严重。研究表明, 对煤矸石山进行治理的根本途径就是在煤矸石山上进行植被恢复、建立稳定的人工植物群落^[6]。

收稿日期: 2010-11-18

修回日期: 2010-12-24

资助项目: 国家林业公益性行业科研专项项目“建设工程损毁林地植被修复关键技术研究及示范”(200904030); 北京市科学技术研究院科技创新工程项目“环境修复中微生物资源和渣土改良技术研究”(2011A-4Z)

作者简介: 张静雯(1987—)女(汉族), 宁夏回族自治区银川市人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持与矿区植被恢复。E-mail: zhang8703@163.com。

通信作者: 张成梁(1964—), 男(汉族), 山西省太原市人, 教授, 博士生导师, 主要研究矿区修复及治理。E-mail: zhang64@126.com。

因煤矸石山堆积方式及煤矸石自身的理化特性,堆放成山的煤矸石常有不同程度的自燃现象^[7],煤矸石自燃能够产生多种酸性气体及可溶性盐,在煤矸石山表层形成斑状酸性结晶体和盐结皮,致使煤矸石山局部酸化、盐渍化^[8-9]。经过自燃的煤矸石山表层渣土,全盐含量高达 3.8%,平均达 1.01%; pH 值最低为 2.0,平均达 2.8,其高盐强酸性严重制约了植物生长^[10-12]。因此在对煤矸石山进行植被建设时,首先要通过各种手段改善煤矸石山不利的渣土条件,使其向有利于植物生长的方向改良,同时筛选适宜在自燃煤矸石山逆境条件下生长的植物。位于山西省阳泉市的研究区内具有丰富的黄土资源、经济实惠、取用方便,故采用黄土作为改良剂,研究其对自燃煤矸石渣土的改良方法及效果,并筛选对自燃煤矸石渣土抗性较强、适宜在煤矸石山上种植的植物。达到在最节省黄土的基础上,改良煤矸石渣土、提高土壤肥力、实现植被恢复的目的,因而具有重要的现实意义。

1 研究区概况

研究区位于山西省阳泉市阳泉煤业集团三矿 280 煤矸石山,地理坐标为东经 112°54′—114°04′,北纬 37°40′—38°31′。阳泉市地处黄土高原东缘,地貌以山地为主,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,降水比较集中,辐射强度大,气温较高。多年平均降水量为 564.2 mm。多年平均气温为 11.3℃,全年以西,北偏西风为主,年均风速 2 m/s。280 煤矸石山由三矿开采时产生的煤矸石堆积而成,为小型煤矸石山,总面积 3.80 hm²,其中平台面积 0.84 hm²,斜坡面积 2.96 hm²。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,引进的植物主要有臭蒿(*Artemisia hedinii*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)和狗尾草(*Setaria viridis*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、高羊茅(*Festuca elata*)、百脉根(*Lotus corniculatus*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、山皂角(*Gleditsia horrida*)等抗逆性较强的植物。

2 研究内容与研究方法

2.1 研究内容

(1) 煤矸石渣土基质改良实验。在煤矸石渣土基质中加入不同比例的黄土,研究测定黄土作为添加剂对煤矸石渣土基质的强酸性和高盐性的改良效果,以确定适合的配比。

(2) 植物种植实验。按不同比例混合黄土与煤矸

石渣土,在混合土壤中进行植物种植实验,观测其对植物生长所产生的影响,测定其出苗率/保存率以及植物的生长量,检验黄土对煤矸石渣土的改良效果,并筛选出对改良后的煤矸石渣土抗性较强的植物。

2.2 研究方法

本试验测定的煤矸石渣土基质是在山西省阳泉市 280 煤矸石山上随机选取的表层渣土(0—20 cm),黄土取自周边农田,配比比例分别为:黄土/总土质量比为 100%,75%,62.5%,50%,25%,0;将不同比例的黄土与矸石均匀混合,在实验室内进行煤矸石渣土的改良实验。土壤的 pH 值采用电位法^[13]测定,仪器型号为 PHS-25 型数显式 pH 测定仪,土壤含盐量采用电导分析法进行测定,仪器型号为 DDS-307 型电导率仪。每种比例的土样测量 3 个重复,取其平均值进行比较。并运用计算机软件对其改良效果进行线性拟合。

植物生长实验采用盆栽试验的方法,从燃烧区附近随机收集煤矸石表层风化物,滤去大粒煤矸石块后与上述不同比例的黄土均匀混合,装入花盆中,花盆半径约为 50 cm。选取高羊茅、刺槐、紫穗槐、侧柏、山皂角这 5 种生态恢复中的先锋植物为实验对象,将这些植物种植在不同比例煤矸石渣土与黄土混合的土壤中,每种植物种植 10 盆,每盆中均匀播撒 30 粒种子,观测其生长状况。测定每盆植物的存活率(%)与植物的株高(cm),取平均值进行比较。测定时段为 7—9 月。

3 结果与分析

3.1 煤矸石渣土改良研究

3.1.1 混合土壤的 pH 值 长期堆放的煤矸石渣土经过自燃内部释放大量 CO₂ 和 SO₂ 等酸性气体,酸性气体上升过程中,遇到表面湿润的土壤,溶解成酸,使煤矸石山呈明显的酸性,pH 值达到 2.8。据报道,植物受伤害的临界 pH 值为 3.5^[14],而煤矸石 pH 值达到 2.8,远远超过了植物耐受能力,因此植物在纯的煤矸石渣土里基本不能生长。本研究利用黄土作为改良剂,将黄土与煤矸石按照事先预定的比例均匀混合,测量不同配比下混合土壤的 pH 值,研究黄土对煤矸石渣土强酸性的改良效果。实验表明,加入少许黄土与煤矸石渣土混合后,土壤 pH 值增加明显,土壤由强酸性转化为弱酸性,甚至是中性或弱碱性(表 1)。用计算机软件对土壤 pH 值的变化进行方程拟合,结果表明,土壤 pH 值与黄土占总土的比例呈三次多项式线性关系($R^2 = 0.9939$)。当黄土含量达到 25% 时,混合土壤 pH 值已基本接近于纯黄土,说明当黄土含量达到 25% 时,煤矸石渣土的强酸性

对混合土壤的酸性影响较小, pH 值为 6.8, 能够适宜大多数植物生存。继续加入黄土, 黄土对煤矸石渣土 pH 值调节作用减弱, 土壤的 pH 值变化幅度不大, 当加入 75% 黄土之后, 矸石山与当地纯黄土的 pH 值基本相等。因此, 本着省工省料的原则, 煤矸石渣土与黄土的比例应控制在黄土/总土约为 25%, 可达到改良煤矸石渣土的强酸性的目的。

表 1 不同配比下的土壤 pH 值的变化

黄土/总土	0	25%	50%	62.50%	75%	100%
pH 值	2.80	6.80	7.21	7.50	7.84	7.77

3.1.2 混合土壤的含盐量 经过自燃的煤矸石渣土, 由于矸石组成成分特殊(含 FeS 和 C), 易于自燃, 产生大量热能, 且自燃产生的高温灼烧破坏了铝硅酸盐岩石及矿物的晶格结构, 释放出大量的金属与非金属离子, 而当地降雨量较少, 淋溶微弱, 盐分积聚于表层使得自燃后的盐分含量明显增加, 土层含盐量可高达 3.8%。有研究表明, 当表层土壤盐分含量高于 0.1% 时, 便开始对植物生长有抑制作用, 当总量超过 1% 时, 对作物危害较大^[15]。因此, 本研究利用黄土作为改良剂, 将黄土与煤矸石按照上述的比例均匀混合, 测量不同配比下混合土壤的含盐量, 研究黄土对煤矸石渣土高盐性的改良效果。结果表明, 加入黄土与煤矸石渣土混合之后, 土壤含盐量降低, 随着黄土加入量的增加, 土壤含盐量在不断得减少(表 2)。用计算机软件进行拟合, 混合土壤含盐量与黄土占总土的比例呈三次多项式线性关系 ($R^2 = 0.9991$)。当黄土的含量达到 62.5% 以后, 土壤的含盐量下降为 0.97% ($< 1\%$), 基本能满足植物生长对土壤含盐量的要求。因此, 利用黄土改良煤矸石渣土的高盐性, 比例应控制在黄土/总土为 62.5% 以上, 才能达到改良煤矸石渣土高盐性的目的。

表 2 不同配比土壤含盐量的变化 %

黄土/总土	0	25.00	50.00	62.50	75.00	100
土壤含盐量	3.80	1.51	1.01	0.97	0.87	0.11

3.2 混合土壤对植物生长的影响

对煤矸石山进行植被恢复, 有两个根本的途径, 一是改地适树, 二是改树适地。改良自燃煤矸石渣土的高盐强酸性, 使其能够适宜大多数植物的生长, 是进行植被恢复的良好基础, 属于改地适树的范围; 而在对煤矸石山进行植被恢复时, 能否筛选出适宜在改良后的煤矸石渣土中生存的植物则属于选树适地的范围, 是植被恢复能否实现的关键。因此在研究了黄

土作为改良剂对煤矸石渣土高盐强酸性的改良效果的基础上, 进一步进行了植物种植实验, 研究并筛选出适宜在改良后煤矸石渣土中种植的植物以及不同植物所对应的适宜黄土加入量, 拟达到在最节省黄土用量的基础上, 降低土壤盐分、提高土壤 pH 值和肥力、保证植物生长的目的。

前人已做了较多的关于刺槐、侧柏、紫穗槐、高羊茅、山皂角共 5 种植物抗性的实验, 结果表明, 侧柏、刺槐、高羊茅都具有较强的抗高温和抗旱的能力, 而高羊茅、紫穗槐、山皂角、侧柏都具有较强的抵抗盐分胁迫的能力^[16], 因此研究选择了上述 5 种植物为研究对象, 将其种植在按照不同比例配比后的混合土壤中, 从其成活情况以及生长情况的角度进行分析, 拟筛选出在改良后煤矸石渣土中适宜生长的植物。测定指标为植物存活率以及植物的生长量^[17]。

3.2.1 高羊茅在不同配比土壤中的生长状况 实验表明, 高羊茅在纯黄土中生长状况最好, 出土苗基本都能够保存并生长, 当黄土/总土比例为 75% 时, 生长初期的高羊茅的存活率甚至高于纯黄土, 随着煤矸石渣土混入量的增加, 高羊茅的存活率逐渐降低。从整体上看, 植物的存活率随生长季的延长而不断降低, 这与土壤中的营养元素不断减少有关。当煤矸石渣土含量增加至 75% 时, 出土的高羊茅只能够存活 57% 以下。在纯煤矸石渣土中, 高羊茅基本无法保存并生长。由于高羊茅具有很强的抗逆性和抗酸性, 可以在弱酸性的土壤中生存^[18], 同时结合表 1—2 可以看出, 保证高羊茅生存最基本的黄土/总土的比例应大于 25%。

由图 1 可以看出, 纯黄土与 75% 黄土两种比例的混合土壤中, 高羊茅的生长量基本相同, 都可保持持续高生长的态势, 但随着煤矸石渣土含量的增加, 高羊茅的生长量随即下降。无论在何种土壤中高羊茅的生长量都呈现先增长, 达到峰值后逐渐减小的趋势, 而生长量的峰值随煤矸石渣土基质含量的增加而不断减小, 分别为 62.5% 黄土中峰值为 6 cm, 50% 黄土为 4 cm, 25% 黄土为 3 cm。说明煤矸石渣土的含盐量对植物的生长量影响较大, 煤矸石渣土含量越多, 高羊茅生长的越缓慢。当煤矸石渣土量继续增加, 大于 75% 以后, 高羊茅的生长量已小于 2 cm, 且生长 11 d 便已死亡。

3.2.2 刺槐在不同配比土壤中的生长状况 实验表明, 在纯黄土中刺槐的出苗率/保存率最高, 随着煤矸石渣土的加入, 刺槐的出苗率/保存率大幅下降, 当煤矸石渣土含量高于 62.5% 后, 刺槐的出苗率/保存率已低于 10%, 出苗基本不能保存并继续生长。因此, 保证刺槐生长的最小黄土比例应大于 62.5%。

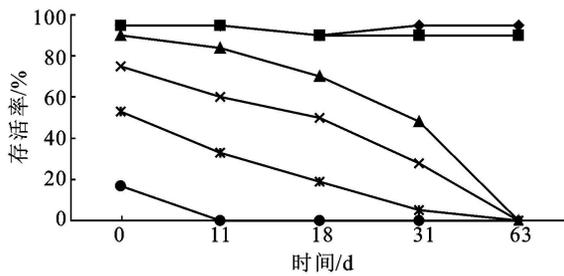
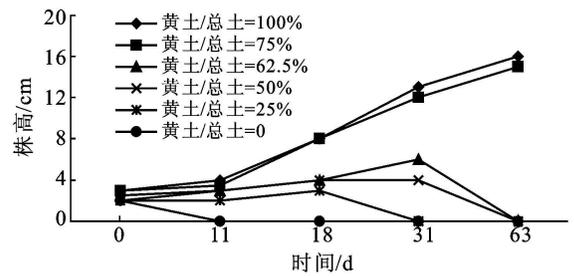


图 1 高羊茅在不同配比土壤中的存活率和株高状况



由实验结果可以看出(图略),刺槐在纯黄土中能保持稳定的生长态势,植物的生长量也不断增加,但加入煤矸石渣土后,刺槐的生长量大幅下降,当煤矸石渣土含量大于 62.5% 时,刺槐只能够在初期生长一段时间,产生较小的生长量,达到峰值后便无法继续生长,且随着煤矸石渣土含量的增加,刺槐生长量的峰值不断减小,分别为:75% 黄土 7 cm, 62.5% 仅为 4 cm, 50% 仅为 1 cm,当煤矸石渣土含量继续增加大于 62.5% 时,刺槐生长已十分缓慢且在一个月出土幼苗相继死亡,这与刺槐存活率图中得出的结论基本一致。因此,为保证刺槐的生长,所覆盖的黄土质量应至少大于 62.5%。

3.2.3 紫穗槐在不同配比土壤中的生长状况 同样,实验证明紫穗槐生长 15 d 后,其出苗率/保存率能够保持比较稳定的趋势,在纯黄土中紫穗槐的出苗率/保存率最高且十分平稳,85% 以上的出苗都能继续保存并生长,当加入煤矸石渣土以后,出苗率/保存率呈下降的趋势,出土的苗木保存并存活的数量越来越小,当煤矸石渣土含量大于 50% (黄土 50%) 以后,紫穗槐的出苗率/保存率已下降至 20% 以下,仅能维持紫穗槐基本的生长(图略)。

在 100% 黄土土壤中,紫穗槐的长势良好,紫穗槐能保持稳定增长的高生长量,一旦混入煤矸石渣土,紫穗槐的生长量明显下降,且生长缓慢;与存活率相对应,当煤矸石渣土含量超过 50% (黄土 50%) 后,生长量下降至 2.5 cm 以下,且随生长季的延长,刺槐的生长更加缓慢。继续加入煤矸石渣土,紫穗槐基本不能继续生长。

因此,实验结果表明,保证紫穗槐生长,混合土壤中黄土的比例应至少大于 50%。

3.2.4 侧柏在不同配比土壤中的生长状况 实验证明,侧柏在 100% 的黄土中存活率最高,达到 75% 以上,一旦加入煤矸石渣土,侧柏的存活率立即下降至 35% 以下,75% 的黄土与 62.5% 两种比例的混合土壤中,侧柏的存活率相差并不大,生长状况基本相同,

但当煤矸石渣土含量高于 50% 以后,侧柏的存活率再次大幅下降,低于 10%,大部分幼苗在生长前期就已死亡,不能满足植被恢复的要求(图略)。

侧柏生长初期(一个月内),适当加入煤矸石渣土能够增加侧柏的生长量,但是随着侧柏生长期的延长,纯黄土中的侧柏生长量有大幅上升,侧柏长势良好,而在 75%~50% 的黄土中侧柏生长量几乎不变,生长趋于稳定;在黄土含量小于 50% 的土壤中,生长初期的侧柏生长量趋于平稳,但随着煤矸石渣土不断风化,酸性不断加强,盐分不断增加,侧柏的生长量逐渐下降,尤其是当黄土含量小于 25% 后,侧柏生长 10 d 即停止生长。结合表 1—2 说明,侧柏的抗酸性并不强,适宜在偏中性的土壤中生长,混入黄土的量应至少大于 50%。

3.2.5 山皂角在不同配比土壤中的生长状况 实验表明,山皂角在纯黄土中出苗率/保存率最高,其次是 75% 在的黄土。在 62.5% 的黄土中,随着植物生长期的延长,山皂角的存活率基本保持不变。当黄土质量小于 62.5% 后,随着煤矸石渣土含量的增加,土壤中山皂角的存活率都呈现先增加后降低的趋势,且存活率增长的峰值随煤矸石渣土含量的增加而减少,分别为 50% 黄土为 30%、25% 黄土为 26%、纯煤矸石渣土仅为 8%,可以看出,25% 黄土与 0% 黄土中侧柏的存活率差异较显著。山皂角在 100% 的纯黄土中始终保持高生长的态势,生长量不断增加,植物长势良好,当混入煤矸石渣土后,植物的生长量随煤矸石渣土含量的增加而不断减少,但仍能维持基本的生长,当加入黄土质量小于 25% 后,山皂角的生长量降至 2% 以下,生长极其缓慢,出苗 1 个月后立即死亡。由实验可以看出,山皂角具有很强的抗酸抗盐能力,即使在试纯的煤矸石渣土山也仍然能够保持一定的生长量,但生长一段时间很快便死亡,因此,保证山皂角生长所需的黄土量应至少大于 25% (表 3)。

综合以上分析,高羊茅、紫穗槐、侧柏、刺槐、山皂角所适宜的黄土加入量以及对应的 pH 值详见表 3。

表3 不同植物适宜黄土用量与土壤 pH 值、盐分对照

植物名称	适宜黄土用量/ %	适宜 pH 值	适宜含盐量/ %
高羊茅	> 25	6.80	1.51
刺槐	> 62.5	7.50	0.97
紫穗槐	> 50	7.21	1.01
侧柏	> 50	7.21	1.01
山皂角	> 25	6.80	1.51

4 结论

(1) 自燃的煤矸石山表面的煤矸石渣土呈强酸性,黄土作为改良剂对于煤矸石渣土酸性的调节作用较强,二者呈线性相关。当黄土加入量达到 25% 时,土壤已呈中性,能够适宜大多数植物的生长,建议在对煤矸石山渣土进行覆土时,加入 25% 黄土,可达到在最节省黄土的基础上,改善土壤 pH 值,提高土壤肥力的目的。

(2) 经过长期堆放的纯煤矸石渣土因自燃产生大量盐分,植物很难生存,加入黄土混合后土壤盐分有所降低,且二者呈三次多项式关系。当加入黄土的比例占总土的 62.5% 时,混合土壤的盐分为下降为 0.97% 低于 1%,但由于使煤矸石山含盐量恢复到正常范围需要使用较多的黄土,故黄土作为改良剂对于改良煤矸石渣土盐性的作用并不理想,建议进一步研究专门针对煤矸石渣土高盐性的改良剂。

(3) 通过植物种植实验表明,高羊茅、山皂角对改良后的煤矸石渣土抗性较强,侧柏、紫穗槐的抗性次之,刺槐的抗性最弱。高羊茅在黄土含量大于 25% 的混合的土壤中既能生存;刺槐适宜采用黄土含量大于 62.5% 的混合土壤;紫穗槐宜采用黄土含量大于 50% 的混合土壤;侧柏适宜采用黄土含量大于 50% 的土壤;山皂角宜采用黄土含量大于 25% 的混合土壤,故建议在对煤矸石山进行植被建设时,黄土加入量应为总土的 25%~50%,并尽量采用高羊茅、紫穗槐、山皂角、侧柏等植物,达到在最大限度节省黄土的基础上,改良煤矸石渣土立地条件,提高土壤肥力、实现植被恢复的目的。

(4) 本研究针对黄土与煤矸石配比进行了 100%, 75%, 62.5%, 50%, 25%, 0 共 6 种比例的实

验,而混合土壤的 pH 值在 0~25% 范围内变化较迅速,土壤的盐分含量在 62.5%~100% 之间变化也很显著,建议下一步的研究能够更加细化黄土与煤矸石配比的比例,使研究更加全面具体。

[参 考 文 献]

- [1] 郭云争. 大力发展煤矸石的综合利用[J]. 砖瓦, 2004(4): 39-41.
- [2] 王伟,张洪江,张成梁,等. 煤矸石山植被恢复影响因子初探[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 147-152.
- [3] 范亚辉,于桂芬. 煤矸石山植被恢复限制因素分析及治理对策[J]. 煤, 2010(2): 54-56.
- [4] 宋智晨. 2010—2015 年中国煤矸石工业投资分析及前景预测报告[R]. 北京: 北京产业研究院, 2010.
- [5] 黄文章. 煤矸石山自然发火机理及防治技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [6] 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.
- [7] 许丽,周心橙,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(3): 117-121.
- [8] 隋淑梅,徐颖. 对矿区煤矸石山植被恢复限制性条件的研究[J]. 能源与环境, 2006(5): 50-51.
- [9] 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.
- [10] 张成梁. 煤矸石排放场植被恢复技术及评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [11] 李鹏波,胡振琪. 煤矸石山植被恢复技术模式研究[J]. 山东林业科技, 2006(4): 13-15.
- [12] 葛向东. 耕地质量变化的临界警戒和评价指标体系研究[J]. 皖西学院学报, 2001, 17(2): 50-54.
- [13] 于天仁,王振权. 土壤分析化学[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 225-270.
- [14] 齐泽民,王玄德,宋光煜. 酸雨对植物的影响研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2004, 26(2): 36-41.
- [15] 吕贻忠,李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 312-316.
- [16] 张成梁. 山西阳泉自燃煤矸石生境及植被构建技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [17] 胡振琪,李鹏波. 煤矸石山复垦[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005: 49-78.
- [18] 许胜,李建龙. 高羊茅的生理生态及其生化特性研究进展[J]. 草业学报, 2004, 13(1): 60-62.