

煤矸石山风化堆积物水分动态研究

张锐¹, 张成梁^{1,2}, 李美生³, 张洪江¹, 程金花¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

2. 山西绿宝园林设计研究所, 山西 太原 030012; 3. 山西国阳新能股份有限公司, 山西 阳泉 045000)

摘要: 以山西省阳泉市 280 煤矸石山为研究对象, 通过对煤矸石物理性质、水分入渗特性和水分含量的分析, 初步研究了煤矸石山风化堆积物水分的动态特征。研究表明, 煤矸石质地较差, 砾石和块石平均含量达 86.07%。煤矸石山孔隙组成以非毛管孔隙为主, 其剖面 4 个深度 (0—15 cm, 15—30 cm, 30—45 cm, 45—60 cm) 的毛管孔隙度平均值分别为 1.40%, 1.36%, 1.32% 和 1.17%, 导致土壤持水量常年维持在较低水平, 0—60 cm 的平均土壤持水量为 19.7 t/hm²。Kostiakov 入渗模型能较好地反映研究地区煤矸石风化物的入渗过程, 且在入渗过程中煤矸石风化物一直保持着较高的渗透速率。煤矸石风化堆积物水分季节性变化主要受降水量及其季节分配的影响, 随着季节性降水量的增加, 矸石风化物水分平均含量也相应升高。煤矸石山的储水量与降水量之间, 表现出较好的一元线性正相关关系。在降雨量较少, 或是降雨次数多, 雨强较大的情况下, 裸露煤矸石地的储水量往往大于覆土煤矸石地的储水量。一般情况下, 煤矸石山 30—40 cm 深处有明显的干层, 使得煤矸石山下层在旱季保持有较多的水分。

关键词: 煤矸石山; 风化堆积物; 水分动态; 入渗; 储水量

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)01—0124—06

中图分类号: S157.2

Research on Water Dynamics of Weathered Coal Gangue Dumps

ZHANG Rui¹, ZHANG Cheng-liang^{1,2}, LI Mei-sheng³, ZHANG Hong-jiang¹, CHENG Jin-hua¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Baolv Design and Research Institute of Gardens, Taiyuan, Shanxi 030012, China;

3. Guoyang New Energy Resources Co., Ltd., Yangquan, Shanxi 045000, China)

Abstract: Water dynamics of the 280 coal gangue dumps in Yangquan City, Shanxi Province was preliminarily studied by the analyses of physical properties, water infiltration characteristics, and water content of the weathered gangue. Results showed that coal gangue texture was poor and the average content of gravel and boulder was as high as 86.07%. The coal gangue dumps were dominated by non-capillary pore and the average values of capillary pore at the four depths (15, 30, 45, and 60 cm) in the profile were 1.40%, 1.36%, 1.32%, and 1.17%, respectively. This caused soil water-holding capacity maintaining at a low-level throughout the year and the average water-holding capacity at 60 cm depth was 19.7 t/hm². Kostiakov infiltration model can well describe the infiltration process of weathered gangue. During the infiltration process, weathered gangue had higher infiltration rate. The seasonal change in water content of weathered gangue was mainly influenced by the amount of rainfall and its distribution. With the increasing seasonal rainfall, the average water content of weathered gangue rose correspondingly. Water storage of gangue dump was linearly related with the amount of rainfall. When the amount of rainfall was low, or rainfall event was highly frequent, water storage of exposed gangue was more than that of the gangue dump covered with soil. Generally speaking, there was a dry layer between 30 and 40 cm in gangue dump, which made the lower layers of gangue dump keeping more moisture in dry season.

Key words: coal gangue dump; weathered accumulation; water dynamics; infiltration; water storage

收稿日期: 2007-08-30

修回日期: 2007-10-10

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); 山西国阳新能股份有限公司“自然煤矸石山生态重建试验研究”

作者简介: 张锐 (1982—), 女 (汉族), 硕士, 黑龙江省大庆市人, 主要从事水土保持方面的研究。E-mail: zhangrui1031@163.com。

通讯作者: 张成梁 (1964—), 男 (汉族), 博士, 研究员, 山西省太原市人, 主要从事水土保持方面的研究。E-mail: zhang64@126.com。

煤矸石作为煤炭开采和加工过程中的必然产物,是矿区环境污染和恶化的主要影响因素之一。目前我国煤矸石的利用率不到 30%^[1],其常用的处理方法是将被废弃的煤矸石堆放于沟道或地表,形成煤矸石山。存积的煤矸石会导致多种环境问题和社会问题,如占压土地,使土地生产力下降,引起大气环境和水环境污染等^[2-4]。因此,煤矸石山植被恢复与重建成为目前煤矸石山治理的重要问题。解决植物生存所需的水是煤矸石山植被恢复最为关键的一步。煤矸石山的组成和结构完全不同于自然山体,其特定的水分及其动态特征以及时间变化也均显著不同于自然山体^[5]。另外,土壤水分的有效供应与植物的物候期关联等问题也不同于一般地区的植被问题。因此研究煤矸石山的风化堆积物水分动态特征,探索制约植物生长的机理,是解决其生态重建的重要内容之一。

1 研究区概况

研究区位于山西省阳泉市三矿 280 煤矸石山顶部风化壳上。该地属暖温带大陆性季风气候,年均气温 11.3℃,年降水量 576 mm,光照资源较丰富,全年实际日照时数 2 696.3 ~ 2 886.3 h。该煤矸石山排矸结束约 20 a 余,顶部已经过平整,并覆黄土,微地形复杂多样,风化层厚度不一。其煤矸石岩性多为炭质页岩,少量为煤质泥岩和砂岩。山体自燃并未结束,其表层风化颗粒较细,局部平均地温可达 61℃,最高可达 192℃。矸石山主要种植树种有刺槐 (*Robinia pseudoacasia*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、荆条 (*Vitex negundo* var. *heterophylla*) 等,草种以禾本科和豆科牧草为主。

2 研究方法

2.1 煤矸石物理性质

煤矸石无真正意义上的“土壤”,而是由煤矸石

及其它岩石矿物组成^[6]。在矸山上选取典型地段开挖土壤剖面,按煤矸石的堆放层次用 100 cm³ 的环刀取样,每层重复两次,共取样 3 次,供室内分析用。煤矸石总孔隙度和毛管孔隙度测定采用环刀法^[7]。选择 2 处代表性区域进行煤矸石粒径级配测定,在煤矸石表层采取土样,每处取两个重复。样品风干后分别用 2.0, 1.0, 1.0 和 0.5 mm 的土壤筛逐级过筛,得到各粒径级颗粒重量,计算出其各重量的百分含量^[8]。

2.2 煤矸石山水分入渗测定

采用双环法进行煤矸石的水分入渗测定^[9-10],保证外环水层厚度维持在离环顶部约 5 cm 高度,并在内环使土壤表层保持 4 ~ 5 cm 水层,不断补充渗入的水量并记时,试验至稳渗为止,以此来测定煤矸石渗透性能。每个标准地的渗透性作 3 个重复。

2.3 煤矸石山风化堆积物水分测定

采用澳大利亚时频反射仪 (FDR) 作为研究区风化堆积物水分测定的主要仪器,该仪器是利用电容原理来测量土壤水分的,具有便利、快捷、准确的特性,并能连续、自动地定位监测土壤水分动态变化。

研究区共布设 6 个风化堆积物水分监测点,涉及不同坡向、坡位、覆土情况、植被生长情况等,基本能体现研究区风化堆积物水分状况。总测量深度为 1 m,每隔 10 cm 测定一组数据,每测点重复 5 次。

对研究区煤矸石山的水分变化观测,从 2006 年 4 月初土壤完全解冻时开始,持续到 2006 年的 9 月雨季结束时为止。

3 结果与分析

3.1 煤矸石物理性质分析

3.1.1 煤矸石粒径组成 煤矸石山质地状况是影响其性质的重要指标,选择了 2 个有代表性的区域,对煤矸石山的粒径级配进行了分析。煤矸石剖面不同深度煤矸石粒径级配结果如表 1 所示。

表 1 煤矸石剖面不同深度煤矸石粒径级配

剖面深度/ cm	块石		砾石 (10 ~ 1 mm)	砂粒 (1 ~ 0.5 mm)	砂粒以下 (< 0.5 mm)
	> 20 mm	20 ~ 10 mm			
0—20	17.3	21.9	41.7	8.6	10.5
20—40	28.1	23.0	34.3	5.7	8.9
40—60	43.8	23.4	24.7	3.1	5.0

结果表明,煤矸石山质地较差,主要以砾石和块石为主,砂粒以下细粒含量很少,且颗粒粗细差异极大,其表层下砾石、块石更多,细粒风化物更少,因而

难以形成对土壤来说至关重要的团粒结构。煤矸石山不良质地状况,决定了煤矸石山的可耕性和保水保肥能力差,水分与养分易流失,土温易升高,植被恢复

工程困难较大。但煤矸石的通气性和透水性较好,植物根系容易生长并向煤矸石山的深部扩展,同时有利于增加水分入渗量,减少地表径流。

3.1.2 煤矸石风化物孔隙度及其持水能力 土壤持水性能取决于土壤的颗粒组成,结构性和孔隙特性,因此孔隙度是反映土壤水分含量和持水性能的重要指标^[7]。

由表 2 可知,煤矸石山剖面 4 个深度(0—15 cm, 15—30 cm, 30—45 cm, 45—60 cm)的总孔隙度平均值分别为 32.21%, 31.30%, 28.34% 和 25.29%。土壤持水能力用下式计算^[11]：

$$S = 10\,000\ hp \quad (1)$$

式中： S ——土壤持水能力(t/hm^2)； h ——土层厚度(m)； p ——毛管孔隙度(%)。

从表 2 可看出,煤矸石山的孔隙组成以非毛管孔隙为主,保水保肥性强的毛管孔隙极少。由于煤矸石山的风化堆积物缺乏持水力强的毛管孔隙,导致土壤持水量常年维持在相当低的水平,各层土壤持水能力分别只有 21.0, 20.4, 19.8 和 17.6 t/hm^2 。根据段永红等人研究表明,煤矸石水分以毛管孔隙和非毛管孔隙中贮存的有效水为主^[12]。有关研究表明,煤矸石山的田间持水量在 7%~11% 之间,平均值为 8.92%^[1],黄土的田间持水量为 20%~22% 左右。

表 2 煤矸石风化物孔隙度及持水能力

剖面深度/ cm	孔隙度/ %			风化堆积 物持水量/ ($t \cdot hm^{-2}$)
	总孔隙度	非毛管孔 隙度	毛管孔 隙度	
0—15	32.21	30.81	1.40	21.0
15—30	31.30	29.94	1.36	20.4
30—45	28.34	27.02	1.32	19.8
45—60	25.29	24.12	1.17	17.6

3.2 煤矸石风化物水分入渗特点

水分入渗能力是重要的土壤物理指标之一^[7,13]。煤矸石风化物水分入渗特性直接反映出水分在煤矸石中的运动状况,且影响到煤矸石山坡面的植被成活率。水分入渗速率与土壤质地、结构、孔隙度、有机质含量和土壤湿度等因素有关。根据 Kostikov 入渗方程^[13-14,16]：

$$f(t) = kt^{-a} \quad (2)$$

式中： $f(x)$ ——入渗速率(mm/min)； t ——入渗时间(min)； k ——入渗系数(mm/min)； a ——入渗指数。

以实测数据拟合系数 k 和指数 a , 得到煤矸石风化物 and 对照黄土的水分入渗方程(表 3)。

表 3 煤矸石风化物 and 对照黄土入渗回归方程及入渗特性

土壤类型	Kostikov 入渗方程	相关系数 r^2	初渗速率	稳渗速率
煤矸石风化物	$f(t) = 7.59t^{-0.2551}$	0.914	8.00	1.87
对照黄土	$f(t) = 3.0915t^{-0.4444}$	0.895	1.51	0.27

以实测数据计算得出的入渗速率 $f(t)$ 为因变量,以 渗时间 t 为自变量,将煤矸石风化物 and 对照黄土不同时间所对应的 渗速率作散点图,并根据 Kostikov 土壤渗透方程模拟出两者的入渗过程曲线(图 1),以反映煤矸石风化物 and 对照黄土不同入渗速率变化情况及达到稳渗所需时间和稳渗速率。

由图 1 可知,煤矸石风化物 and 黄土的渗透速率随时间延长呈幂数函数关系变化,均表现为随入渗时间的延长,速率由大迅速变小,然后趋于稳定。整个入渗分为 2 个阶段:初渗阶段(0~30 min)和稳渗阶段(30 min 以后)。在整个入渗过程中,煤矸石的初渗速率和稳渗速率均明显高于黄土。

由于煤矸石风化物总孔隙度低,以非毛管孔隙为主,田间持水量和饱和持水量都远低于黄土,故煤矸

石在渗透过程中一直保持着较高的渗透速度。渗透速率过高,虽然不易产生地表径流,但易导致土壤的垂直侵蚀(即养分的淋溶损失和水分的渗漏损失),直接影响到植被生长。

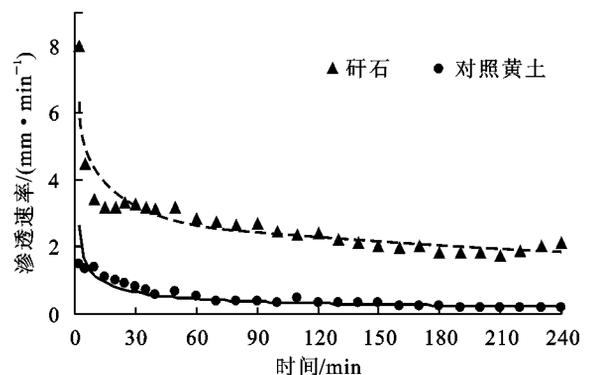


图 1 对照黄土 and 煤矸石风化物水分入渗过程

3.3 煤矸石山地水分季节变化

土壤水分条件是影响植被生存与生长最关键的立地因子,其季节的变化是土壤水分增失规律的直观反映^[15-16]。本研究选取裸露煤矸石地进行分析,每点重复 5 次,长期定位观测其风化堆积物水分动态变化。研究区 2006 年降水量季节分配情况见表 4。从

表 4 中可以看出 4—5 月份干旱少雨,6 月降水稍有增加,7—8 月份降水较多,达到峰值。2006 年研究区降雨特点为次数多,强度较大。4—8 月内超过 50 mm 的降水有 3 次,超过 20 mm 的降水有 11 次,且这些高强度降雨主要集中在 6 月底至 8 月底。图 2 为煤矸石风化物不同深度水分随季节变化状况。

表 4 2006 年降水量季节分配

月份	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	总计
降水量/mm	34.8	47.0	82.7	116.43	247.65	528.58

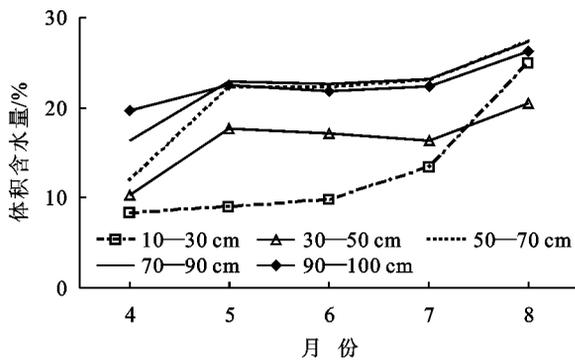


图 2 煤矸石风化物不同深度水分季节变化

由图 2 可知,不同层次的煤矸石水分季节动态变化,基本有着相似的规律,即各煤矸石层水分季节动态变化与降水的季节变化基本一致,其季节性变化主要受降水量及其季节分配的影响。虽然 4,5 月降水量较少,但水分主要来源于冬春季的融雪,而且气温相对较低,植物地上部分生长发育刚刚开始,有利于水分的保持,因此风化堆积物的水分曲线在 5 月出现小幅度的峰值。由于在该季节风力较大且频繁,随着气温的回升,矸石风化物水分蒸发损失增大,植物生长速率也加快,对风化堆积物水分的利用和蒸腾耗水量也随之提高,土壤含水量在 6 月稍有下降。

随着雨季来临,土壤含水量呈升高趋势,植被生长达到旺盛阶段,虽然土壤蒸发和植被蒸腾作用强烈,但由于降水量较大,土壤含水量仍然持续升高,到 7 月底和 8 月初煤矸石山土壤含水量达到最高值。

3.4 煤矸石山地储水量变化

土壤储水量是指在自然状况下,某一特定土壤层次中土壤的含水量^[8]。土壤储水量可以更直接地反映各类型风化堆积物水分的量值。

3.4.1 储水量与降水量关系 可用储水量公式^[17]计算煤矸石的储水量。

$$W_i = 10 \times K_i \times H_i \quad (3)$$

式中: $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$; 0 为土壤表层; 1, 2,

3, ..., n ——表层以下土层序号; W_i ——地表至第 i 层土壤储水量(mm); K_i ——第 i 层土壤体积含水量(%) ; H_i ——第 i 层的取样深度(cm)。

选取裸露煤矸石地进行分析,对每次取样前的降雨量之和与取样点处 0—100 cm 的储水量进行分析并作图,求出其回归方程为

$$y = 0.534x + 139.59 \quad (r^2 = 0.92) \quad (4)$$

式中: y ——为 0—100 cm 煤矸石风化物的储水量(mm); x ——每次取样前的降雨量之和(mm)。

由图 3 可见,裸露煤矸石地储水量与降雨量呈显著正相关关系。第一次取样时,0—100 cm 煤矸石风化堆积物的总含水量为 125.53 mm,这是煤矸石长期积累的水分。随着降雨后水分的下渗,煤矸石地储水量增加。降雨量的 53.4% 被贮存在煤矸石中,使煤矸石地储水量增加,其余的 46.6% 通过蒸散而损失。较丰富的降雨及煤矸石较多的非毛管孔隙,使大部分雨水通过煤矸石层下渗,使其储水量增加。

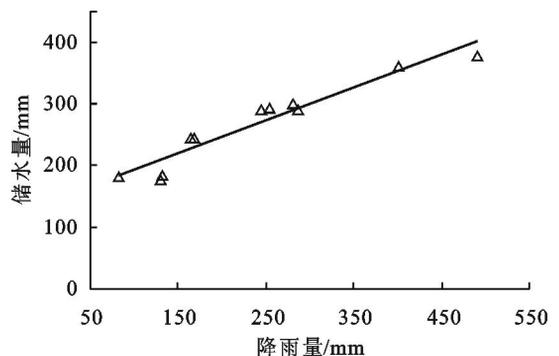


图 3 裸露煤矸石风化物的储水量与降雨量关系

3.4.2 各月储水量变化 由图 4 可知,裸露煤矸石地和覆土煤矸石地 0—100 cm 层的储水量均呈整体上升趋势,且裸露煤矸石地各月储水量均大于覆土煤矸石地的储水量。

因煤矸石风化物非毛管孔隙多,蒸发损失少,虽然煤矸石风化物田间持水量和凋萎系数都较低,其总

有效水量比黄土低,但在降雨量少的条件下,裸露煤矸石比覆土煤矸石能保存更多的水分,且含水量在一定深度内随深度增加而增多^[2]。因此,在 4,5 月及 6 月中上旬降雨量少的情况下,裸露煤矸石地比覆土煤矸石地的储水量大。

由于研究区 6 月下旬和 7,8 月份降雨次数多,且强度较大,对于覆土(黄土)60 cm 的煤矸石地而言,在降雨强度较大时,极易产生地表径流,从而造成大量水土流失,而裸露煤矸石地非毛管孔隙多,下渗速率较大,更容易将雨水贮存在煤矸石中,因此,在降雨强度较大,次数多的雨季,裸露煤矸石储水量仍较覆土煤矸石大。

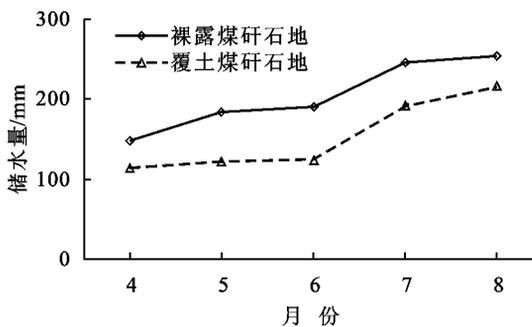


图 4 裸露煤矸石地和覆土煤矸石地各月储水量平均值

3.5 煤矸石山地水分垂直变化

由图 5 可知,280 矸山裸露煤矸石表层含水量变化幅度较大,主要是由于 0—30 cm 的煤矸石表层受气候影响,特别是在降水较多的 7 月,其表层土壤含水量达到 21.4%~29.7%。

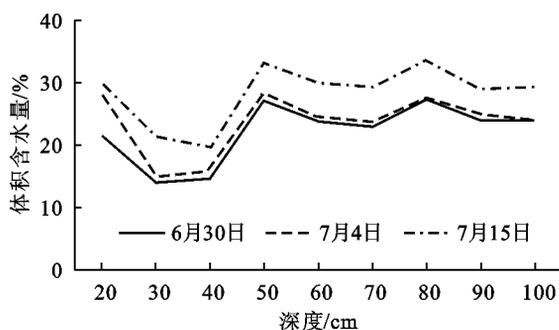


图 5 裸露煤矸石水分垂直变化

30—40 cm 深处有明显的干层,该深度处土壤含水量突然降低,主要是由于煤矸石颗粒较粗,与下层的毛细管联系较弱,下层的大多数水分需通过扩散作用方可被蒸发,因此,表层失水后,会有 5—10 cm 厚的明显干层,这与段永红等所研究的结果基本一致^[2,18-19]。

50—100 cm 深的煤矸石层含水量与表层水分含量的变化相比有明显的滞后现象,受大气降水影响相

对较小,变化比较缓慢。在 7,8 月份降水量较大的情况下,由于煤矸石非毛管孔隙较多,所以更多的水分通过重力水的形式补给到下层,使该层风化堆积物水分变化相对比较稳定且含量较高,而且干层的存在有利于该层水分的保存,致使下层在旱季可能含有较多的水分。

4 结论

煤矸石山质地较差,砾石和块石平均含量达 86.07%,砂粒以下细粒含量很少,且颗粒粗细差异极大,这决定了煤矸石山的可耕性差和保水保肥能力差,但通气性和透水性较好。煤矸石山孔隙组成以非毛管孔隙为主,保水保肥性强的毛管孔隙极少,其剖面 4 个深度(0—15,15—30,30—45,45—60 cm)的毛管孔隙度平均值分别只有 1.40%,1.36%,1.32%和 1.17%。因此,导致矸石风化物的持水量常年维持在相当低的水平,其各深度的矸石风化物持水量分别为 21.0,20.4,19.8 和 17.6 t/hm²。

Kostiakov 入渗模型能够较好地反映煤矸石风化物的入渗过程,即渗透速率随入渗时间的延长由大迅速变小,然后趋于稳定。煤矸石风化物的初渗速率和稳渗速率比一般土壤入渗速率高。因此,在煤矸石山地易产生土壤的垂直侵蚀,影响植被生长。

研究区各煤矸石层水分季节动态与降水的季节变化基本一致,其季节性变化主要受降水量及其季节分配的影响。4—6 月少雨期,风化堆积物水分较少,因 6 月水分损耗大,会在 5 月出现小幅度峰值,7—8 月多雨期,风化堆积物水分含量会持续增高至 8 月底。裸露煤矸石地储水量与降雨量之间,表现出较好的一元线性正相关关系。降雨量的 58.9% 被贮存在煤矸石中,其余的 41.1% 通过蒸散而损失。在降雨量较少,或是降雨次数多,雨强大的情况下,裸露煤矸石地 0—100 cm 层的储水量往往大于覆土煤矸石地的储水量。裸露煤矸石表层(0—30 cm)受气候条件影响使其含水量变化幅度较大,在 30—40 cm 深处有明显的干层,该处风化堆积物含水量突然降低,50—100 cm 深的煤矸石层含水量变化缓慢,该层风化堆积物水分变化相对比较稳定且含量较高,而且干层的存在有利于该层水分的保存,致使下层在旱季可能含有较多的水分。

[参 考 文 献]

- [1] 张光灿. 煤矸石生态重建模式及其效益研究[M]. 北京: 中国国家图书馆, 2002: 61—65.
- [2] 段永红, 白中科, 赵景. 阳泉煤矸石山浅层煤矸石风化物水分特性初探[J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 534—537.

- [3] 段永红,庞亨辉,王景华. 阳泉煤矸石山煤矸石风化物剖面水分变化特征初探[J]. 山西农业大学学报, 2001, 21(2):125—127.
- [4] 叶冬梅,秦佳琪,韩胜利,等. 乌兰布和沙漠流动沙地土壤水分动态、土壤水势特征的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(3):126—130.
- [5] 黄德青,张耀生,赵新全,等. 祁连山北坡主要草地类型的土壤水分动态研究[J]. 草业科学, 2005, 22(8):6—10.
- [6] 刘孝义. 土壤物理及土壤改良研究法[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1982:70—93.
- [7] 北京林业大学. 土壤学(上册)[M]. 北京:北京林业大学, 1982:75—97.
- [8] 庞敏,侯庆春,薛智德. 延安研究区主要自然植被类型土壤水分特征初探[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2):139—140.
- [9] 解文艳,樊贵盛. 土壤结构对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(4):382—384.
- [10] 解文艳,樊贵盛. 土壤含水量对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 1(2):63—64.
- [11] 唐松青. 闽江上游木荷与杉木人工林的持水能力和入渗特征比较[J]. 中国水土保持科学, 2003, 2(1):76—79.
- [12] 刘春利,邵明安,张兴昌. 神木水蚀风蚀交错带退耕坡地土壤水分空间变异性研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1):132—135.
- [13] 赵西宁,吴发启. 土壤水分入渗的研究进展和评述[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(1):42—45.
- [14] 许丽. 阜新矿区煤矸石山生境演变特征及其评价研究[D]. 北京:北京林业大学, 2006.
- [15] Gtt M J, Dollhopf D J. Coal waste reclamation using auto-mated weathering to predict lime requirement[J]. Journal of Environmental Quality, 1991, 20(1):285—288.
- [16] Stewart B R, Daniels W L. Physical and chemical characteristics of coal prep plant wastes from southwest Virginia[J]. Proceedings of the Conference Reclamation, a Global Perspective, 1989, 2:607—616.
- [17] Martin J, Haigh, Ben Sansom. Soil compaction, runoff and erosion on reclaimed coal-lands (U K) [J]. JSM, 1999, 13(4):135—146.
- [18] Yao L, Wilding L P. Micromorphological study of compacted mine soil in east Texas [J]. Developments in Soil Science, 1994, 22:707—718.
- [19] Carlson C L, Carlson C A. Impacts of coal pile leachate on a forested wetland in South Carolina [J]. Water, Air & Soil Pollution, 1994, 72(14):89—109.
- [20] Zielinski R A, Otton J K, Johnson C A. Sources of salinity near a coal mine spoil pile. North-Central Colorado [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(4):1237—1248.