

黄土高原煤炭开采区水土流失特征的研究

王青杵, 王贵平  
(山西省水利厅水土保持局, 太原 030002)

摘 要: 采取野外调查和模拟径流冲刷实验方式, 探讨了黄土高原煤炭开采区水土流失的特征和规律。黄土高原煤炭开采区水土流失形式复杂多样, 既与原地貌条件下的水土流失有着天然的联系, 又有采煤区独特的侵蚀形式。在模拟径流冲刷实验中, 分析了煤矸石、自燃煤矸石、煤矸石覆土三种堆置形式的坡面产沙规律和侵蚀特点。  
关键词: 黄土高原; 煤炭开采区; 水土流失; 特征  
中图分类号: S 157 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409( 2001) 04-0083-03

Research on Characteristics of Soil and Water Loss in Coal Mining Area of Loess Plateau

WANG Qing-chu, WANG Gui-ping  
(Soil and Water Conservation Bureau of Shanxi Water Conservancy Department, Taiyuan 030002, Shanxi Province, China)

**Abstract:** The characteristics and laws of soil and water loss in coal mining area of loess plateau were discussed by using field investigation and experimental method of simulated runoff scour. The types of soil and water loss in coal mining area on loess plateau are complex and diverse, which has the inherent relation with soil and water loss under the condition of original landforms and has its distinctive erosive form. Finally, the law of sediment yield and erosive characteristic on slopes of three types of coal heaps, i. e., gangue, pyrophorus gangue, and gangue covered with earth.  
**Key words:** loess plateau; coal mining area; soil and water loss; characteristic

黄土高原煤炭开采区水土流失形式复杂多样, 既与原地貌条件下的水土流失有着天然的联系, 又有采煤区独特的侵蚀形式。崩塌、塌陷、地表裂缝随处可见, 此外, 煤矸石山自燃后发生爆棚引起的泥石流和滑坡等重力侵蚀和混合侵蚀表现尤为突出。本研究采用野外调查、坡面径流观测、模拟径流冲刷实验等方法, 对煤炭开采区水土流失的形式和煤矿固体废弃物坡面的产沙规律、侵蚀特点进行探讨, 旨在为开采区水土流失治理提供科学的理论依据, 为排弃堆放固体废弃物的工艺革新提供实践指导。

1 煤炭开采区水土流失形式

1. 1 以水资源系统的破坏为主的水土流失形式

煤炭开采采用井采方式时, 采空区地下水以多

种形式涌入矿坑, 为了便于生产, 只好将矿坑水排出, 这样使矿区及其周围相当范围内的地下水被疏干, 加速了地表水向地下水转化, 导致地下储水结构破坏, 原来向河川沟道作为基流的地下水泄漏于深层或变成矿坑水, 造成河流干涸断流。同时会使地下水位下降而出现降落漏斗, 干扰正常的水循环。

1. 2 以径流冲刷为主要营力的水土流失形式

1. 2. 1 坡面径流引起的水土流失 细沟侵蚀主要发生在固体废弃物堆置体边坡上, 侵蚀的发生不同于一般耕地上的细沟侵蚀, 表现在: ( 1) 矸石废渣为主的堆置体坡面下切困难, 细沟呈宽浅式。 ( 2) 颗粒大小组成变异大的废弃物堆置体上细沟流冲刷有分选作用, 上坡部位以细小颗粒搬运为主, 越到下坡搬

\* 收稿日期: 2001-08-25  
作者简介: 王青杵, ( 1970- ), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持管理和水土保持研究。

运颗粒越大,致使细沟底和细沟壁呈犬齿状。(3)由于废弃物堆置体坡面具有显著的不均匀性和不平整性,细沟极易发展为浅沟或切沟,且流路不变,只向宽、深扩展。野外调查中,对煤矸石、自燃煤矸石以及覆土煤矸石坡面的细沟侵蚀情况进行了调查,结果如表 1 所示。

表 1 三种堆置体坡面细沟侵蚀特征	
特征	坡面细沟侵蚀特征
煤矸石山 (表层已风化)	坡面上上部细沟平均宽 $W$ 8 cm, 平均深 $D$ 5 cm, 在坡面下部 $W$ 15 cm, $D$ 7~8 cm, 坡面中部细沟发生频数为 15 条/20 m, 细沟形态为浅而宽
自燃煤矸石	坡面上上部细沟 $W$ 13 cm, $D$ 8.5 cm, 在坡面下部 $W$ 23 cm, $D$ 16 cm, 坡面中部细沟发生频数为 32 条/20 m, 细沟形态宽而较深
覆土煤矸石	坡面上上部细沟 $W$ 7 cm, $D$ 6 cm, 在坡面下部 $W$ 15 cm, $D$ 13 cm, 坡面中部细沟发生频数为 4 条/m, 细沟形态为深而窄

1.2.2 地下径流引起的水土流失 地表径流沿堆积体沉陷裂缝或陷落洞穴汇集,并从裂缝洞穴中灌入,与大孔隙串通,形成地下径流。地下径流流动过程中,水流通道周围的细小颗粒发生搬运和沉积,产生管状侵蚀。侵蚀发展的沟槽排水系统在浅层可能陷落、坍塌而成为明渠,最终形成浅沟。

1.2.3 集中股流引起的水土流失 发生在人工边坡上,受汇水面积控制,多以浅沟侵蚀为主。自燃后的矸石山坡面发生频数大,侵蚀剧烈。野外调查表明:矸石山坡面浅沟平均宽  $W$  80 cm, 平均深  $D$  45 cm, 发生频数为 5 条/20 m; 自燃煤矸石山坡面浅沟  $W$  100 cm,  $D$  75 cm, 发生频数为 7 条/20 m; 覆盖黄土的矸石山,因覆盖层薄,浅沟侵蚀使黄土全部被冲蚀掉。

1.3 以重力为主要营力的水土流失形式

1.3.1 泻溜 表现在洗选煤之后的煤矸石山上,这些矸石因干湿、冷热、冻融而破碎成更小的碎屑,在自重作用下,沿坡面向下滚动和滑落形成碎屑堆。

1.3.2 崩塌 采空塌陷引起的崩塌。由于地下煤层的开采形成采空区,使采空区顶板岩石受到应力变形,随之出现地面沉陷。沉陷发生的初期,采空区与煤层接触的顶板首先发生塌落,继而影响到上面地表的崩塌。在镇城底矿开采区,沟道边缘发生严重的崩塌,崩塌体堆积于沟底,影响到其行洪能力。

固体废弃物松散体的崩塌。固体废弃物松散体常呈非固结或半固结状态,堆积体与基底之间结合不良,在外部因素的诱发下极易产生崩塌。如堆积在河岸坡上的固体松散物,因洪水冲刷底部而悬空产生崩塌。

1.3.3 滑坡 采煤区主要有两种类型滑坡:(1)废弃物堆积体沿基底面滑动。滑动常因雨水浸润基底与废弃物交接带而诱发产生。(2)废弃物堆置在河流两岸的岸坡上,当洪水暴发时,冲刷搬运走堆积体底部物质,堆积体上部失去平衡,并沿岸坡向下滑动。

1.4 以空气动力为主要营力的水土流失形式

煤炭开采区风蚀首先表现为扬尘。在煤场,由于风力吹蚀,煤尘遮天蔽日,向周围飘移扩散,即使是在无风或风力很小的情况下,车辆运输也能导致煤尘飞扬,形成沿公路延伸的煤尘飘浮带,煤尘落入两侧农田、河流等,周围环境受到严重污染。

1.5 开采区特殊的水土流失形式

1.5.1 固体废弃物堆置体的非均匀沉降侵蚀 煤矸石山由于泥岩、页岩、煤、煤矸石的风化,出现黏性可压缩固结的颗粒后,发生裂隙错位,但很快又被上部滑落下来的物质充填覆平。另外,煤矸石山的自燃经常引起局部塌陷,在表面也引起非均匀沉降,出现陷穴、小裂缝、大裂隙。表 2 描述了山西省古交市西曲矿煤矸石山自燃后非均匀沉降的特征。

表 2 自燃煤矸石山非均匀沉降侵蚀特征	
种 类	特征描述
陷 穴	直径: 10~85 cm, 最深达 30 cm, 多出现在正在自燃的煤矸石山平台上。有的单独存在, 但多由裂缝串联, 在长 15 m 的范围内高达 7 个陷穴
小裂缝	分布在距平台边缘或堆积体与原自然地貌交接处 30 m 的范围内, 长 5~20 m, 宽度有 2 cm 左右。走向比较乱, 有的与小陷穴相连, 一般无错位
大裂隙	分布在距平台边缘或堆积体与原自然地貌交接处 20 m 的范围内, 长 10~50 m, 宽度 2~6 cm。走向平行于边坡, 由好几条大裂隙组成且平行分布, 错位明显, 有的沉降高度达 10 m

1.5.2 采空区的沉陷侵蚀 地下矿层大面积采空后,矿层上部的岩层失去支撑,以致地表下沉变形,产生一系列裂隙和塌陷坑、塌陷台地等,见表 3 所述。

表 3 采空区的沉陷侵蚀特征	
种 类	特征描述
裂 隙	长 50~200 m, 宽 15~30 m, 有的单独出现, 有的多条互相交错出现, 有很明显的错位裂痕, 两壁较平直
陷 坑	在耕地上多以椭圆形出现, 长轴 1~3 m, 短轴 1~1.5 m, 深 2 m, 有的单独出现, 有的好几个接连出现。尤其独特的是出现几个长方形的陷坑, 长 3~6 m, 宽 1.5~2.5 m, 顺着长边有裂隙出现
台阶状塌陷	沉陷产生好几级台阶, 最多的达 6 台, 台阶间落差 20~150 m, 台阶间裂缝 10~150 cm

1.5.3 煤矸石自燃爆崩引起的混合侵蚀 自燃后的煤矸石前期降雨充足,当遇到特大暴雨时,径流突然灌入煤矸石山内部自燃区域,使自燃后产生的气体和热量来不及散发而产生猛烈的爆炸。由于爆炸,

使疏松的煤矸石与水充分混合成石流并倾泻而下,产生强烈的混合侵蚀。这种侵蚀形式独特,危害剧烈。1996 年 7 月古交西曲煤矿的龙王沟自燃煤矸石山上发生这种侵蚀,石流冲毁 3 间房屋,死伤 8 人,冲出长百米、深 4~5 m,宽 20 m 的切沟。

## 2 煤炭开采区水土流失特征

### 2.1 野外布设径流小区观测

古交市水利局在西曲矿和镇城底矿选择不同堆积年限、不同堆积物种类坡面上布设了径流小区观测点,采用面蚀和沟蚀分别测量的方法,确定了几种堆积物坡面多年平均侵蚀量,见表 4 记录:从侵蚀模数的观测值中可以看出煤炭开采区废弃物堆置体形成的侵蚀量是很大的。侵蚀模数大部分在 5 000 t/(km<sup>2</sup>·a)左右,最大的达 15 000 t/(km<sup>2</sup>·a)。

表 4 不同堆积物坡面侵蚀模数

测点号	堆积物类型	堆积年限/ a	侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )		
			面积	沟蚀	总侵蚀模数
1	岩土堆积体	10	5100	10695	15795
2	岩土堆积体	4	6460	5350	11810
3	煤矸石山	5	1800	3100	4900
4	煤矸石山	10	2800	4600	7400
5	自燃煤矸石山	8	5830	8620	14450
6	自燃煤矸石山	7	5800	8410	14210

### 2.2 径流槽冲刷实验

本研究设计内径长 2 m、宽 0.4 m、深 0.3 m 的径流槽,槽的底端为地下渗流留有出口,槽的坡度取矸石山的自然安息角 35°。固体废弃物选取煤矸石(堆积 10 a)、自燃煤矸石(堆积 8 a)和煤矸石覆盖黄土(覆盖 10 cm)三种作为冲刷实验材料,三种堆积物表层 0~10 cm 颗粒级配情况见表 5。冲刷流量确定为 1.6 L/min、2.4 L/min、3.2 L/min。如果在前两个流量冲刷下便能看出其侵蚀规律,便不做第三个流量的冲刷实验。冲刷时间取 15 min,即冲刷产流后,继续冲刷 15 min。冲刷时记录产流和终流时间,产流后每隔 1 min 在堰口处采样,计算各时间段的径流量和含沙量。

表 5 三种堆积物表层 0~10 cm 颗粒级配情况分析表

堆积物 种 类	小于该粒径的堆积物占测试堆积物的重量/%			
	0.3 mm	1 mm	3 mm	10 mm
煤矸石	9.3	20.6	36.8	76.1
自燃煤矸石	14.7	30.5	48.9	77.8
覆土煤矸石	94.5	100		

2.2.1 产沙过程分析 产沙过程主要体现在含沙量变化或输沙率变化方面,图(1)是在 1.6 L/min 流

量冲刷下覆土煤矸石和自燃煤矸石的含沙量随时间变化情况。二者在产流初期,含沙量都很大,尤其是覆土煤矸石。随着冲刷的进行,覆土煤矸石坡面形成固定流路后,侵蚀趋于减弱,含沙量变小。自燃煤矸石从整时间段的产沙情况看,含沙量是逐渐减小,且其波动幅度变小,但与覆土煤矸石相比,峰值还是尤为突出。煤矸石在这个流量冲刷下含沙量几乎为零。图(2)是在 2.4 L/min 流量冲刷下覆土煤矸石和自燃煤矸石含沙量随时间变化情况。二者在产流初期含沙量也是很大。在整个冲刷过程中,自燃煤矸石在初期峰值很突出,但含沙量趋于减低,波动幅度变小,冲刷后期,含沙量基本趋于稳定。覆土煤矸石则被冲刷成窄而深的细沟,冲刷后期,细沟出现崩塌,崩塌物随径流而下,使后期含沙量又加大。在这个流量冲刷下,煤矸石在坡面上部虽然又细碎物蠕动,但到下部便又沉积下来,因此,在堰口仍没有泥沙。为此,本实验研究了冲刷流量为 3.2 L/min 时煤矸石的冲刷过程。图(3)反映了煤矸石含沙量随时间的变化情况。冲刷初期,煤矸石处于渗透湿润阶段,径流

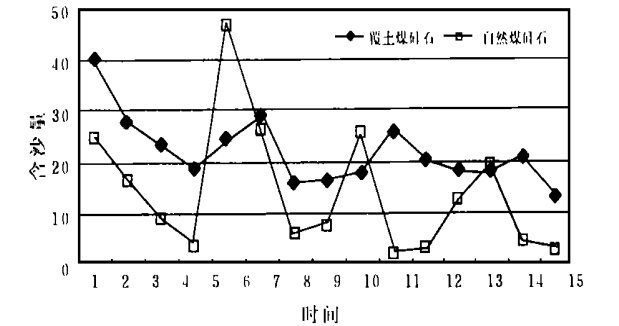


图 1 两种堆积物在 1.6 L/min 流量冲刷下含沙量随时间变化图

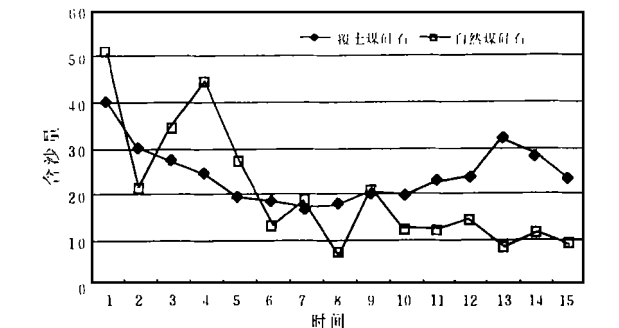


图 2 两种堆积物在 2.4 L/min 流量冲刷下含沙量随时间变化图

(下转第 132 页)

(5): 65~71.

[ 14 ] 王岩, 杨振明, 沈其荣. 土壤不同粒级中 C、N、P、K 的分配及 N 的有效性研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 86~94.

[ 15 ] 郑粉莉, 张成娥. 加速侵蚀对土壤腐植酸动态变化的影响[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 194~199.

[ 16 ] 沈宏, 曹志洪, 徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(2): 166~173.

[ 17 ] Marrs, R.H. Soil fertility and nature conservation in Europe: Theoretical considerations and practical management solutions[A]. In: Advances in ecological research[C]. London Academic Press, 1993.

[ 18 ] 庄恒扬, 黄丽芬, 王小兵. 等. 不同管理模式下生土有机质动态模拟[J]. 江苏农业研究, 2000, 21(1): 52~55.

[ 19 ] 钟华平, 杜占池. 川东中高山地区红三叶、鸭茅凋落物分解速率与气候因子之间的定量关系[J]. 中国草地, 1997(6), 29~32.

[ 20 ] 王青春, 邓红兵, 王庆礼, 等. 三峡库区柏木林降雨的再分配及养分循环研究[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9(4): 452~457.

[ 21 ] 朱波, 李同阳, 张先婉. 耕作制度对紫色土养分循环的影响[J]. 山地研究, 1996, 14(增刊): 51~54.

[ 22 ] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 等. 三峡库区坡地生态工程控制土壤养分流失研究. 地理研究[J]. 2000, 19(3): 303~310.

(上接第 85 页)

量、含沙量都很小, 但吸水达到一定量后, 在其自重和流水冲力下, 局部出现滑动, 并且速度越来越快, 即刻到达堰口, 使含沙量骤增, 这样连续冲刷几次后, 便产生固定流路, 侵蚀轻微, 含沙量变小。

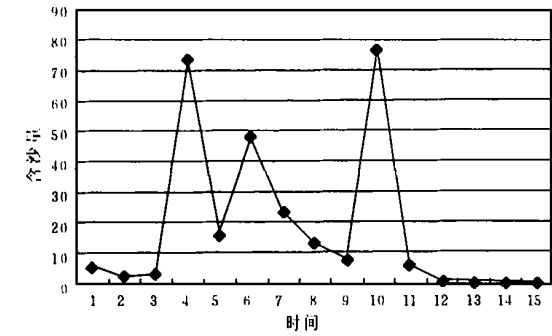


图 3 煤矸石在 3.2 L/min 流量冲刷下含沙量随时间变化图

2.2.2 侵蚀过程分析 覆土煤矸石的侵蚀过程基本类似于黄土坡面的径流侵蚀。冲刷初期以层状面蚀为主, 随着径流的汇集, 坡面出现股流, 产生细沟侵蚀。细沟侵蚀的发展使细沟中出现微型陡坎, 借助于微型陡坎下射流所产生的“水枪”效应, 细沟在长度和深度上急剧发展, 但流路很稳定。随着冲刷流量的加大, 这种侵蚀形式更明显, 细沟深可达 7 cm, 而宽仅有 2~4 cm, 因此, 在冲刷后期必然出现沟壁崩塌, 使产沙模数变大。自燃煤矸石坡面侵蚀过程与覆土矸石根本不同。冲刷时, 流水对自燃煤矸石有浸润饱和作用, 当它过度充水后, 堆置体充水部分的平衡条件遭破坏, 形成涌动性泥石流小批量向前蠕动。蠕动一定距离, 当水流挟沙力不能再搬运时, 便停留在

某一部位, 形成冲积堆, 冲积堆使上部水流或另外小批量泥石流受阻, 能量在此重新聚集, 为下一次涌动准备了条件。因此, 自燃煤矸石坡面侵蚀是在重力和流水冲力作用下产生的脉动性泥石流侵蚀。冲刷形成的泥石流极不稳定, 出现袭夺现象。只有当设计流量很难再产生新的涌流时, 细沟便向深和宽发展, 直到形成稳定的流路。煤矸石在 1.6 L/min 和 2.4 L/min 流量冲刷下, 基本没有产生侵蚀。径流通过时, 表层矸石对水的吸力很大, 使矸石表面产生一层膜状水, 这样, 径流只能从矸石浅层漫漫流动, 因此, 很难产生侵蚀。当流量加大到 3.2 L/min 时, 煤矸石坡面才能发生侵蚀。侵蚀过程类似与自燃煤矸石, 但其侵蚀的突发性更为明显, 侵蚀沟的形态较自燃煤矸石的更宽、更浅。

3 结论

在小流量冲刷下, 煤矸石抗冲刷性能最大, 坡面侵蚀轻微, 几乎没有产沙, 但是自燃后的煤矸石侵蚀却较严重。因此, 矸石的堆放应以防止自燃和大的径流冲刷为原则, 选择适宜的沟道修建拦矸石坝, 矸石排满后在其上覆土, 之后立即建造先锋植物, 使地表迅速覆盖。另外, 要注意修建排水工程, 地表径流以排为主, 排蓄结合。如取土不便利, 煤矸石山可不覆土, 等表层风化后, 直接采取一些技术措施进行复垦。煤矸石局部自燃后要立即采取治理措施, 以免大范围自燃后给复垦工作带来不便。