

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2017.01.010

露天煤矿排土场不同治理模式边坡细沟侵蚀特征研究

陈同德¹, 王文龙^{1,2*}, 董玉锴¹, 郭明明¹, 康宏亮¹, 朱宝才^{1,3}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 山西农业大学林学院, 山西 太谷 030801)

摘要:露天煤矿新建排土场边坡土质疏松, 细沟侵蚀强烈。本文通过野外实地调查, 以裸坡为对照, 对内蒙古永利煤矿排土场边坡 2 种不同治理模式(A 模式—沙柳方格+沙打旺(*Salix Psammophila* Checkerboard + *Astragalus adsurgens*), B 模式—沙柳方格)下边坡的细沟侵蚀特征进行了研究。结果表明:裸坡细沟侵蚀总量为 283.73 kg, A 和 B 治理模式下边坡的细沟侵蚀总量较裸坡减少 46.36% 和 35.09%。细沟密度、割裂度和宽深比从坡顶至坡脚的变化趋势, 在裸坡上表现为减小—增大—减小, 而在 A 模式治理的边坡上均为缓慢增大, 在 B 模式治理的边坡上均为先增大后减小。距坡顶 0~14 m 处, 75% 和 45% 覆盖度沙打旺相比裸坡可使细沟侵蚀量降低 37.29%~70.82% 和 43.10%~70.34%, 二者控蚀效果基本相同; 距坡顶 14~20 m 处, 75% 覆盖度坡面细沟侵蚀量较 45% 覆盖度减小 53.32%~61.49%; 距坡顶 >20 m 处, 沙打旺不能有效控制细沟侵蚀。结果可为矿区生态环境安全与可持续发展提供科学依据。

关键词:露天煤矿; 排土场边坡; 细沟侵蚀; 沙打旺; 沙柳方格

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2017)01-0061-08

The Rill Erosion Characteristics of Dump Slope Managed by Different Models in Opencast Mining Area

CHEN Tong-de¹, WANG Wen-long^{1,2*}, DONG Yu-kong¹, GUO Ming-ming¹,
KANG Hong-liang¹, ZHU Bao-cai^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Soil and Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 3. Forestry College, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi Province 030801, China)

Abstract: Soil erosion in mining area is a major problem for the ecological security, especially in Loess Plateau. Non-conservation managing practices have further aggravated the situation, especially in new dump slope, which are affected by the highest rates of soil erosion among mining area. Therefore, it is necessary to find a right managing model for the environment restoration of mining area. The one-year dump slopes were selected to evaluate rill erosion. Two managing models were applied to these one-year slopes of opencast coal mine in Inner Mongolia Erdos Yongli. Type A was *Salix Psammophila* Checkerboard mixed *Astragalus adsurgens* and type B was *Salix Psammophila* Checkerboard. In order to easily test the effect of A and B, a bare slope was regarded as a contrast (CK). The experiment included five sample sites: two A, two B, and a CK. Results showed that: rill density, degree of rill dissection, and rill width-depth ratio showed the trend of declining-rising-declining with increasing slope length on CK, but steadily rising on A, rising-declining on B; The rill erosion amount of CK increased rapidly 8 m interval, and reached 283.73 kg; the total rill erosion amount of A and B decreased 46.36% and 35.09% compared to CK. Therefore, A type decreased rill erosion due to the function of *Astragalus adsurgens*; The accumulation of rill erosion changed with the increase of slope length, and the relationships among them was exponential function of

收稿日期: 2016-01-26; 修回日期: 2016-11-08

基金项目: 中国科学院西部行动计划“晋陕蒙能源基地受损生态系统恢复重建关键技术与示范”(KZCX-XB3-13); 国家自然科学基金“煤矿开发建设中人为侵蚀机理及新增水土流失预报模型—以神府东胜煤田为例”(40771127); 水利部公益性行业专项“工程开挖面与堆积体水土流失测算技术研究”(201201048)资助

作者简介: 陈同德(1993-), 男, 青海民和人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀机理, E-mail: 1966093839@qq.com; * 通信作者 Author for correspondence, E-mail: wlwang@nwsuaf.edu.cn

CK, and power function of A and B; the effect of control rill erosion was not different between 75% coverage and 45% coverage before 14 m. The 75% coverage was more effective than 45% between 14~20 m, and the rill erosion amount decreased 53.32%~61.49%. However, the effective control on erosion was within 20 m. This study may provide some scientific basis for the management of dump slope and the ecological security of mining area.

Key words: Opencast mining area; Dump slope; Rill erosion; *Astragalus adsurgens*; *Salix Psammophila* Checkerboard

排土场是矿区集中堆置弃土弃渣的场所,属于典型的人造地貌。排土过程中机械车辆反复碾压排土场顶部导致地表致密、平坦,因此降雨在排土场顶部形成汇水,流至表层质地疏松、坡度较大的边坡,引起严重的水土流失。排土场边坡主要的土壤侵蚀类型有面蚀、细沟侵蚀、泄溜、滑坡、泥石流等^[1],有研究表明排土场边坡侵蚀模数为平台面积的 11 倍,成为排土场甚至是矿区的主要水土流失区域之一^[2]。近年来,国内外学者对排土场边坡土壤侵蚀防治技术^[3]、产流产沙特征^[4]、预测模型^[5]等方面展开了研究。关于排土场边坡土壤侵蚀防治取得了丰硕的研究结果,对于矿区边坡治理有重要的指导意义。刘瑞顺^[2]认为针对 1 年排土年限的边坡,稻草帘子覆盖措施的减沙效益可达到 93.63%。郭建英^[6]认为植被恢复初期,不合理的治理模式会导致侵蚀量增大,其中“柾柳方格+牧草混播”措施下的土壤侵蚀量是裸坡土壤侵蚀量的 1.02 倍。产流产沙特征的研究主要用于确定坡面尺度的侵蚀模数以及侵蚀规律,为矿区新增水土流失量的预测提供必要参数^[7]。郭明明^[7]等人研究神府煤田弃土弃渣的侵蚀特征,认为砾石含量对产流特征、侵蚀速率有较大影响,侵蚀模数最高可比撂荒地高 239.2 倍。目前,没有通用的预测模型适用于矿区土壤侵蚀。国外一般使用 ULSE 以及 RULSE 来预测矿区的土壤侵蚀模数^[5,8],取得了良好的效果。由于我国缺少详实的监测资料,ULSE 以及其改进版难以直接用于实际生产^[9]。

细沟侵蚀是坡面侵蚀的主要方式之一,细沟形成后,坡面侵蚀速率会急剧增大,细沟侵蚀量可占坡面侵蚀总侵蚀量的 70%左右^[10-11],细沟对坡面地貌的发育以及演化过程也有着重要的影响^[12]。前期调查发现,永利煤矿排土场边坡,无论有无治理模式,边坡均存在不同程度的细沟侵蚀。研究排土场边坡细沟侵蚀特征是了解坡面土壤侵蚀环境的重要途径,将为评价排土场边坡不同恢复模式控制细沟侵蚀效果提供科学依据。沙打旺在北方水土流失地区有了大范围的推广^[13],但是沙打旺在排土场边坡这一特殊下垫面条件下控制土壤侵蚀的效果如何却

未可知。本研究可用于检验沙打旺的控蚀效果,也能为快速评价排土场边坡不同恢复模式的控蚀效果提供科学方法。因此,本文以永利煤矿排土场边坡为研究对象,通过调查不同治理模式下边坡的侵蚀细沟状况,研究排土场边坡的细沟侵蚀特征、评价不同恢复模式控制细沟侵蚀的效果,以期为矿区排土场边坡治理及生态恢复提供一定的科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗永利煤矿(E 110°17'21", N 39°69'43")。研究区海拔在 1000~1500 m,属于温带大陆性气候,年平均气温 6.2~7.2℃。全年降水量在 300~500 mm 之间,降雨集中在 7—9 月,约占年降水量的 80%,多为侵蚀性暴雨。该区风力资源丰富,春季风速最大,风速可达 5.5 m·s⁻¹。研究区土壤以栗钙土为主,其母质为砒砂岩。砒砂岩结构性差,所以该区易发生风蚀、水蚀和重力侵蚀。自然植被以灌木和半灌木为主,主要有百里香(*Thymus mongolicus* Rom)、本氏针茅(*Stipa capillata*)等。人工植被主要有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom)等。

1.2 样地选择与细沟测量

前期调查发现,永利煤矿排土场治理模式有 A(沙柳方格+沙打旺)和 B(沙柳方格)2 种。因排土年限仅为 1 年,边坡土壤质地松散,最易发生水土流失,所以本研究以 1 年排土年限的边坡为研究对象。为保证植物生境的相对一致性、便于说明 2 种恢复模式相比裸坡的治理效果,经调查和筛选,选择同时具备有 A、B 2 种模式以及裸坡(CK)的边坡。之后通过细沟测量,计算每个样地坡面的细沟密度、细沟割裂度、细沟宽深比和细沟侵蚀量,反映细沟侵蚀状况并探讨 2 种恢复模式效益。

调查确定 2 种治理模式施工工艺及主要技术指标,具体如下:

1)沙柳方格:人工将长约 0.35 m 的沙柳条垂直插入新生边坡约 0.2 m,插入的沙柳呈菱形排列,长对角线(坡面方向)约 5 m,短对角线约 3 m。

2)沙柳方格+沙打旺:沙柳方格施工结束后均匀撒播沙打旺草种,撒播量 $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

调查确定本文研究的 1 年排土年限边坡形成于 2013 年 3—5 月,并于 6—7 月实施上述治理模式,所有边坡在治理前经过平整,坡型均为直型坡。细沟调查时间是从 2014 年 7 月 2 日到 6 日,调查期间无降雨。在 A、B 2 种治理模式的边坡上随机选择坡面进行测量,测量长度和坡长一致,宽 3 m。测量

细沟时自上而下每隔 2 m 分段测量,依次测量每个坡段细沟顶宽、深度、底宽、长度。每种治理模式选择 2 个坡面进行测量,分别为:A1, A2 和 B1, B2。样方法测量并计算植被覆盖度,测量结束后在测量断面处取土样测定容重,每个位置 3 次重复,计算其平均值,作为坡面容重取值。采用郑粉莉^[14]提出的容积法计算各个坡面的细沟侵蚀量,相同治理模式下的边坡细沟特征参数和细沟侵蚀量均取均值作为该治理模式的细沟侵蚀特征参数和细沟侵蚀量,即 A1 和 A2 计算均值, B1 和 B2 计算均值,得到 A 和 B 治理模式下的细沟侵蚀特征参数和细沟侵蚀量。相同方法测量裸坡作为对照。5 个坡面基本概况如表 1 所示。

表 1 样地概况

Table 1 General conditions of sample sites

样地编号 Site NO.	坡长 Slope length/m	坡度 Gradient/°	措施类型 Measure type	措施编号 Measure's NO.	植被覆盖度 Plant coverage/%
1	24	37	沙柳方格+沙打旺 <i>Salix Psammophila</i> Checkerboard+ <i>Astragalus adsurgens</i>	A1	75
2	22	38	沙柳方格+沙打旺 <i>Salix Psammophila</i> Checkerboard+ <i>Astragalus adsurgens</i>	A2	45
3	18	34	沙柳方格 <i>Astragalus adsurgens</i>	B1	4
4	20	34	沙柳方格 <i>Astragalus adsurgens</i>	B2	4
5	18	30	裸坡 Bare slope	CK	0

5 个坡面的坡长均不相同,考虑到坡长因子^[15-16]对细沟发育的影响,因此在后文中如果涉及 2 个及以上不同长度的边坡进行比较分析时,以较短坡长为基准坡长。

侵蚀性降雨是引起黄土高原土壤侵蚀的主要因素之一,谢云、刘宝元等^[17]提出我国侵蚀性降雨标准为日降雨量大于 12 mm,已有广泛应用。侵蚀性降雨情况直接影响 1 年排土场边坡细沟侵蚀特征。永利煤矿 2013 年 6 月至 2014 年 6 月发生侵蚀性降雨 8 次,日降雨量大小在 14.5~60 mm 之间,主要分布在 2013 年 6—9 月。侵蚀性降雨量为 279.4 mm,占总降雨量的 54.13%。

1.3 细沟参数描述

本研究采用细沟密度、细沟割裂度和细沟宽深比来反映不同治理模式下排土场边坡的细沟发育状况。

(1)细沟密度指单位研究区域内的细沟总长度,可以反映边坡的破碎程度以及细沟的分布状况,计算式为:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^m L_{ii}}{A} \quad (1)$$

式中, γ 为细沟密度, mm^2 ; m 为坡面上细沟的总条数; L_{ii} 为坡面上某条细沟总长度,m; A 为研究坡面的面积, m^2

(2)细沟割裂度指单位研究区域内所有细沟面积之和,除了可以反映边坡的破碎程度,还能反映细沟侵蚀强度,计算式为:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m A_i}{A} \quad (2)$$

式中, α 为细沟割裂度; A_i 为坡面上第 i 条细沟的面积, m^2 ; A 为研究坡面的面积, m^2

(3)细沟宽深比是指细沟宽度和对应深度的比值,可以反映细沟横断面积的形状变化,计算式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m W_i}{\sum_{i=1}^m D_i} \quad (3)$$

式中, W_i 为第 i 个测点细沟宽度, cm; D_i 为第 i 个测点的细沟深度, cm

(4) 细沟累计侵蚀量指一段坡面上细沟对表层土壤剥蚀的总重量, 计算式为:

$$G = \sum_{i=1}^m R_i \quad (4)$$

式中, G 为细沟累计侵蚀量, kg; R_i 为第 i 细沟的侵蚀量, kg

(5) 某条细沟侵蚀量 R_i 的计算^[14]。从上到下每隔 2 m 量测每条细沟的宽度 R_w 和深度 R_H , 将每个测量段的细沟面积简化为梯形计算, 计算过程为:

$$R_i = \sum_{j=1}^{m-1} \left[\frac{(R_{w_j} + R_{w_{j+1}}) \times R_{L_j}}{2} \right] \times R_{H_j} \times r_d \quad (5)$$

式中, R_i 为某条细沟的侵蚀量, kg; j 为测量该条细沟宽、深的次数; $R_{w_j}, R_{w_{j+1}}$ 分别代表第 j 次和 $j+1$ 次测量的细沟宽, cm; R_{L_j} 为测量间距, 为 2 m; R_{H_j} 为第 j 次测量的细沟深, cm; r_d 代表土壤干容重, $g \cdot m^{-3}$

用 Excel 2013 进行数据处理和分析, Origin 8.5 进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 不同治理模式下的细沟特征参数

CK(裸坡)和 A(沙柳方格+沙打旺)、B(沙柳方格)2 种治理模式下的坡面细沟特征参数随坡长(从坡顶至坡脚)的变化如图 1 所示。细沟密度(γ)反映坡面细沟的空间分布, 由图 1a 可知, γ_{CK} 随坡长增加先减小后增大再减小, γ_A 随坡长增加逐渐增大, γ_B 变化整体上呈先增大后减小的趋势, γ 大小分别为: $0.00 \sim 1.90 m \cdot m^{-2}$, $0.00 \sim 0.99 m \cdot m^{-2}$ 和 $0.16 \sim 1.85 m \cdot m^{-2}$ 。 γ_{CK} 在距离坡顶 12 m 处达到最大, 为 $1.90 m \cdot m^{-2}$; γ_A 在 18 m 处达到最大, 为 $0.99 m \cdot m^{-2}$, γ_B 在 10 m 处达到最大, 为 $1.85 m \cdot m^{-2}$, γ_A, γ_B 与 γ_{CK} 的最大值相比分别降低 47.89% 和 2.63%。 γ_{CK} 在 2~8 m 处逐渐减小, 其原因是上方汇水流至裸坡后, 抗冲性较差^[18]的表土首先被径流剥蚀、分散、输移, 随着输移沙量的增大, 径流用于输移泥沙能量的消耗也越大^[15], 所以削弱

了径流冲刷能力, 在 2~8 m 甚至出现沉积现象, 导致细沟密度逐渐变小; 而从第 8 m 开始急剧上升, 细沟密度增大约 190 倍, 这表明坡长 > 8 m 后, CK 坡面细沟发育程度大, 侵蚀强烈。相比 γ_{CK}, γ_A 在坡面上增长较缓, 最大值为 CK 的 52.10%, 说明 A 模式可以有效控制细沟发育。 γ_B 和 γ_{CK} 在坡面上的变化规律相同, 都在中间部位达到最大, 因 B 坡面在 2~8 m 处没有类似 CK 的沉积作用, 所以 γ_B 比 γ_{CK} 提前达到最大值。

细沟割裂度(α)反映坡面破碎程度, 从图 1b 中看出, α_{CK} 随坡长增加呈减小—增大—减小趋势, α_A 随坡长缓慢增大, α_B 随坡长先增大后减小。 α_{CK} 在 12 m 处达到最大值, 为 0.32, α_A 和 α_B 分别在 18 m, 10 m 处达到最大值, 分别为 0.07 和 0.10, 3 种坡面 α 的变化范围分别为: $0.00 \sim 0.32, 0.00 \sim 0.07$ 和 $0.009 \sim 0.10$ 。 CK 在 2~8 m 处 α 逐渐减小。 α_A, α_B 的最大值分别为 α_{CK} 的 25% 和 31.25%。另外, B 模式坡面 10 m 处的 α_B 是 α_{CK} 的 0.69 倍, 但 γ_B 却是 γ_{CK} 的 2.03 倍。

细沟宽深比(R)可客观反映细沟沟槽的形态变化, 由图 1c 可知: R_{CK} 和 γ_{CK} 以及 α_{CK} 的变化趋势相同; R_A 在距离坡顶 4~8 m 增大, 8~16 m 保持相对稳定, 16 m 后又缓慢增大, 随坡长呈现波动变化; R_B 在 0~4 m 快速增加, 后减小, 6~16 m 相对稳定, 16 m 后减小。 CK 在 0~4 m 坡段因径流先遇到大量松散物质, 径流含沙量迅速达到饱和, 用于侵蚀、分散表土的能量下降, 后以泥沙沉积作用为主, 表现为细沟宽深比迅速下降。 A 治理模式坡面, 0~4 m 处因沙柳方格和沙打旺的保护无细沟产生, 所以宽深比为 0, 4 m 后产生细沟侵蚀, 并以沟壁的拓宽为主, 因此宽深比越来越大; 8~10 m 细沟下切侵蚀作用加强, 宽深比减小; 随着坡长增加, 沟壁拓宽和下切侵蚀作用交替进行, R_A 呈波动变化。 R_B 变化和 R_A 类似, 但 B 模式的坡面仅有沙柳方格的保护作用, 所以 R_B 的变化幅度明显较大。与 R_{CK} 相比, R_A, R_B 的最大值分别下降 49.04% 和 27.95%, 平均值分别下降 48.89% 和 34.78%, 表明 A, B 2 种模式均能控制细沟长、宽发育, 可防止细沟在局部过度下切或拓宽, A 模式的作用更为明显, 突出了沙打旺的重要性。

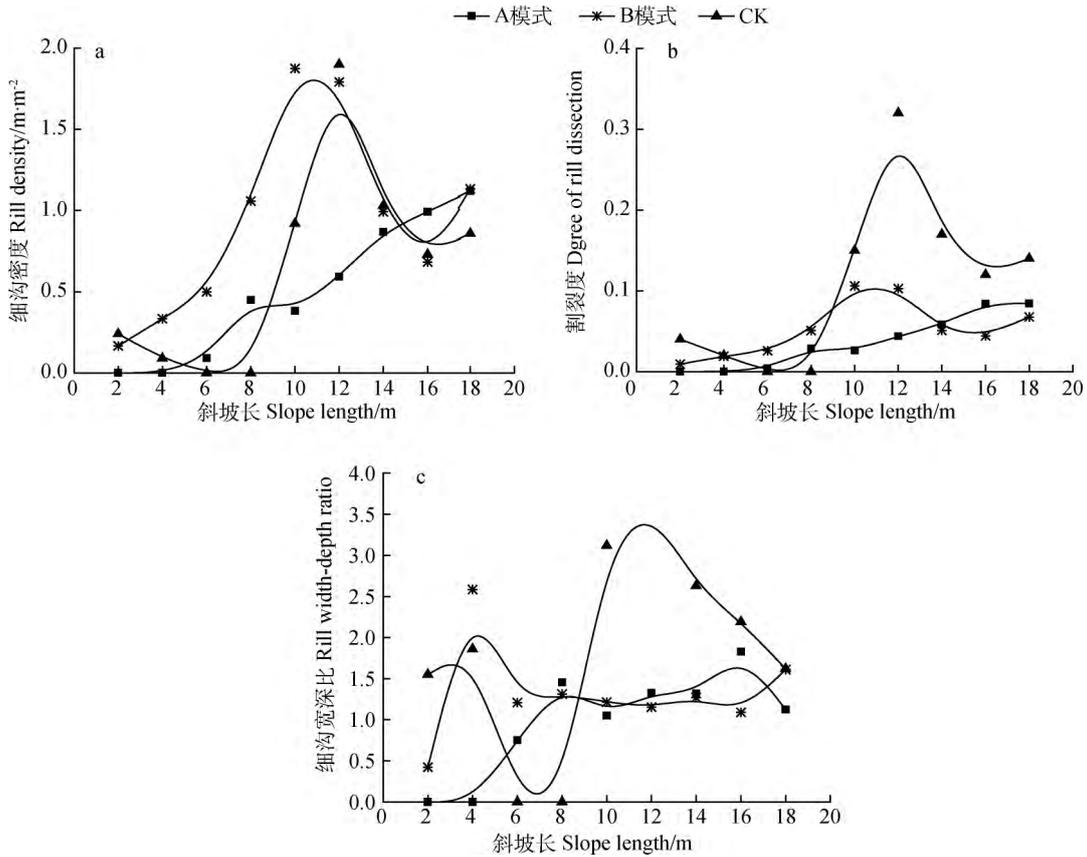


图 1 2 种治理模式和裸坡细沟参数随坡长的变化

Fig. 1 Changes of rill parameter from two management models and bare-slope with slope length

2.2 不同治理模式下的细沟侵蚀量特征

A, B 2 种治理模式及 CK 的坡面细沟侵蚀量 (M) 和细沟累计侵蚀量 (G) 从坡顶至坡脚的变化过程如图 2 所示。 M_{CK} 随坡长的变化剧烈波动, 6~8 m 趋近于 0 kg, 10~12 m 增加至 72.10 kg, 14~16 m 减小至 34.14 kg, 减小 52.65%, 随着坡长延长变化剧烈, 呈现周期性“减—增”变化, 即每隔 8 m 细沟侵蚀量会增大。 M_A 随坡长缓慢增长, 距坡顶 16~18 m 达到最大值, 为 24.86 kg; M_B 先随坡长增大, 10 m 处达到最大, 为 38.21 kg, 后减小。与 M_{CK} 的最大侵蚀量相比, M_A 和 M_B 分别减小 65.52% 和 47.00%。可知 A 和 B 2 种治理模式都能控制细沟侵蚀, 且 A 比 B 效果好, 说明沙打旺使细沟在坡面上的发育受到抑制。

由图 2b 可知, CK 坡细沟累计侵蚀量 (G) 随坡长呈指数函数变化, 回归模型为 $G_{CK} = 4.452e^{0.446x}$, $R^2 = 0.910$; A, B 的累计侵蚀量随坡长均呈幂函数变化, 回归模型分别为: $G_A = 0.041x^{3.737}$, $R^2 = 0.953$; $G_B = 2.954x^{1.899}$, $R^2 = 0.963$, 3 个方程的 R^2

均大于 0.9, 所以以上 3 个方程均能反映累计侵蚀量和坡长之间的关系。总累计侵蚀量 $G_{CK} > G_B > G_A$, 分别为 283.73, 184.16 和 152.19 kg, 相比 CK 的总侵蚀量, A 和 B 减小 46.36% 和 35.09%, 表明 A, B 治理模式均可显著降低坡面细沟侵蚀, 且 A 模式治理效果更佳。有研究表明, 细沟强度的变化规律和细沟累计侵蚀量的变化规律一致^[19]。从图 2b 可知, A, B, CK 3 种坡面 16~18 m 处累计侵蚀量曲线斜率为 $0 < K_A < K_B < K_{CK}$, 表明若非坡长限制, 细沟侵蚀强度将会在一定范围内越来越大。以上为实现控制变量一致, 只表述了坡长在 0~18 m 范围内时各模式下排土场边坡的细沟侵蚀状况, 为进一步研究 18 m 之后排土场坡面细沟侵蚀状况, 以调查 5 个边坡中 3 个大于 20 m 的坡面为例, 分别为 A1 坡面 (坡长为 24 m)、A2 坡面 (坡长为 22 m)、B2 坡面 (坡长为 20 m), 其细沟累计侵蚀量如图 3 所示: 3 个坡面在 18 m 之后细沟侵蚀强度迅速增大, 说明在一定范围内, 若排土场边坡坡长较大, 侵蚀强度将会急剧增大。

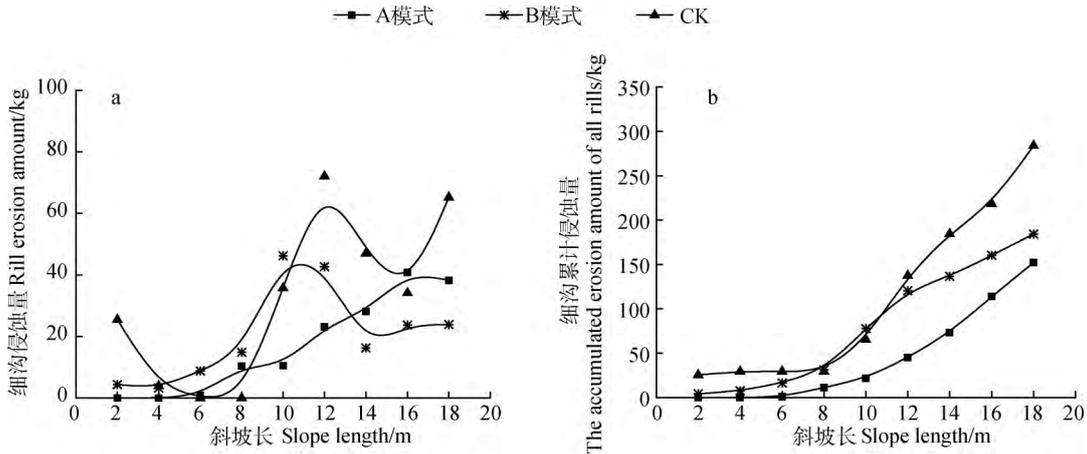


图 2 2 种治理模式和裸坡细沟侵蚀量以及累计侵蚀量随坡长的变化

Fig. 2 Changes of rill and it's accumulate erosion amount from two management models and bare-slope with slope length

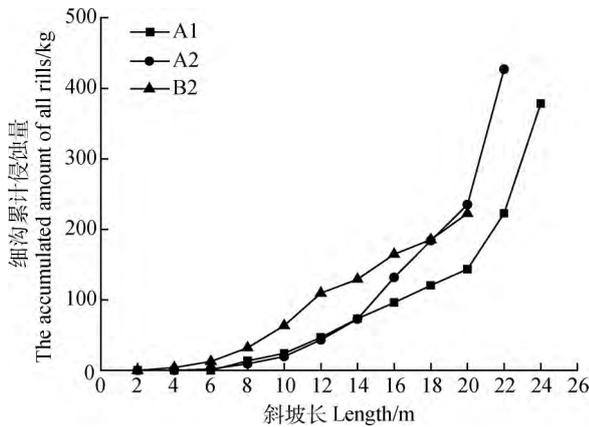


图 3 A1, A2 和 B2 边坡细沟累计侵蚀量随坡长的变化

Fig. 3 Changes of rill accumulate erosion amount of A1, A2 and B2 with slope length

注: A1 边坡的坡长为 24 m, A2 的坡长为 22 m, B2 的坡长为 20 m
Note: slope length of A1 is 24 m, slope length of A2 is 22 m, and slope length of B2 is 20 m

2.3 不同沙打旺覆盖度的细沟侵蚀特征

不同沙打旺覆盖度下, A1、A2 坡面细沟密度(γ)及细沟侵蚀量(cm)从坡顶至坡脚的变化过程, 如图 4 所示。从图 4a 可以看出, 相同坡位(6~8 m 除外), γ_{A2} (沙打旺盖度 45%) 比 γ_{A1} (沙打旺盖度 75%) 大 21%~144%, 整体均随坡长增大而增大。6~8 m 处 A1 坡面的细沟密度较 A2 低, 这是径流能对土壤剥蚀与泥沙转移 2 个过程同时分配的结果。0~18 m, m_{A1} 和 m_{A2} 在坡面上沿程增大, 变化趋势相对稳定, 18 m 后, m 开始较大波动变化。由图 4b 可以看出, 在 14 m 以前, m_{A1} 相比 m_{A2} 减小约 4.48%~9.26%, 控蚀效果相差不大; 14 m 后, m_{A1} 和 m_{A2} 变化趋势虽然相同, 但已经产生明显的数量差异, m_{A1} 与 m_{A2} 差值最大可达到 112.60 kg。由上可

知, 在距离坡顶 0~14 m 时, 75% 和 45% 覆盖度的沙打旺对于控制细沟侵蚀的能力基本一致, 细沟侵蚀量相比裸坡分别减小 37.29%~70.82% 和 43.10%~70.34%; 距离坡顶 14 m 后, 75% 覆盖度的沙打旺比 45% 覆盖度更能控制细沟侵蚀, 降低 53.32%~61.49% 的细沟侵蚀量。其原因主要是坡面径流量的改变, 在降雨过程中, 排土场顶部因其巨大的平台面积, 产生较多上方汇水, 加上沿途降水的不断汇入, 径流量会逐渐增大。沙打旺可以阻挡、分散径流, 使径流能量降低, 但这种能力有限, 从侵蚀量曲线的波动情况可以看出, 沙打旺不同的覆盖度控制细沟侵蚀存在一个“临界坡长”, 当坡长小于临界值时, 细沟侵蚀量随坡长增大缓慢增加或保持稳定; 当坡长大于临界值时, 细沟侵蚀量大幅增加。45% 覆盖度的 A2 坡面的坡长大于 14 m 时, 细沟侵蚀量出现第一次大幅上升, 增长率为 99.85%; 而 75% 覆盖度的 A1 坡面, 侵蚀量第一次出现大幅度上升是在 20 m 处, 增长率为 55.25%, 因此, 45% 和 75% 的沙打旺覆盖度对应的临界坡长分别是 14 m 和 20 m。

3 讨论

A, B 2 种治理模式下坡面细沟侵蚀总量相比 CK 减少 46.36% 和 35.09%, 表明 A, B 2 种措施均能有效控制细沟侵蚀, A 模式的效果更好, 植被作用明显。该结果与其他类型下垫面^[20-21] 所得结果一致: 植被均能不同程度的控制土壤侵蚀。A, B, CK 3 种类型的坡面在 0~2 m 处的细沟侵蚀量分别为: 0.4.4 和 25.53 kg; 其中 CK 坡面顶部(0~2 m) 细沟侵蚀量占坡面总细沟侵蚀量的 7.3%, B 坡顶部

也有细沟侵蚀产生,这与通过人工模拟试验得到的结果有所不同^[22-23],即裸坡顶部就有相对严重的细沟侵蚀,并非只在坡面中下部细沟侵蚀强烈。这是由于排土场是特殊的人造地貌,排土场平台经过机械车辆长期反复碾压,表面变得坚硬、平缓,给边坡提供了大量的上方汇水;上方汇水流入边坡后,将加大坡面被侵蚀的可能性。而 A 模式下边坡因沙打旺覆盖度较大,增加了坡面土壤的抗冲性、抗蚀性,

所以 A 坡面 0~2 m 处的细沟侵蚀很小。从图 2 可知,B 模式坡面距离坡顶 0~2 m 处,细沟密度、细沟割裂度、细沟宽深比 3 个参数均小于 CK,表明 B 类坡面虽然没有种植沙打旺,但沙柳方格控制细沟侵蚀的能力也较明显。因此,在没有种植沙打旺或者其他植被的条件下,可考虑“排水沟+沙柳方格”模式,边坡顶部修筑排水沟以减少上方汇水,沙柳方格控制细沟侵蚀的能力将会加强。

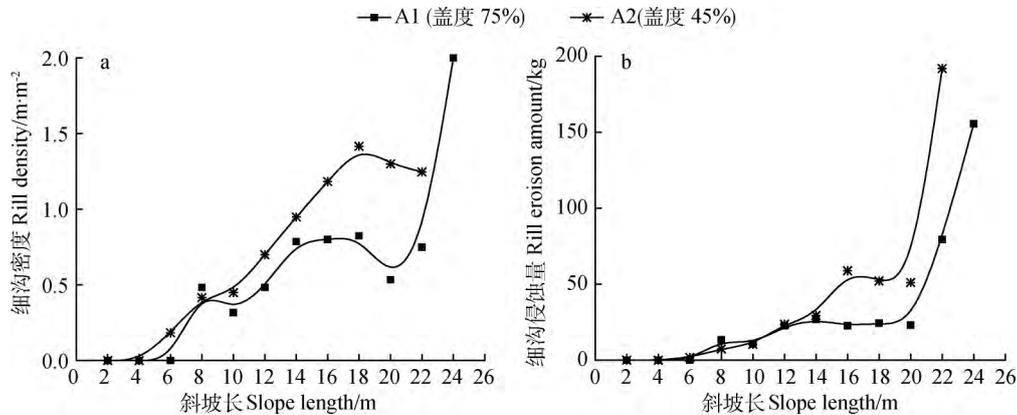


图 4 A1 和 A2 的细沟密度及细沟侵蚀量随坡长的变化

Fig. 4 Changes of rill density and rill erosion amount of A1 and A2 with slope length

坡长影响坡面沿程水流能量以及水流泥沙的运移规律,是影响细沟侵蚀的重要因子。有关坡长对坡面侵蚀量的影响现在并没有一致结论,一些研究发现从坡顶到坡下侵蚀量随着坡长的增加而增加^[24-25],而也有研究和本文研究结果类似^[15,26-27]:侵蚀量随坡长呈现波动性变化,其原因是由于侵蚀作用和沉积作用随坡长的增加不断的交替转换。径流能量包括 2 方面:径流动能和径流势能,用以侵蚀坡面和携带泥沙,在径流能量相对稳定的情况下,侵蚀坡面的能量和携带泥沙的能量互为消长关系,在坡面上表现为侵蚀作用和沉积作用的交替变化。从图 2a 中得知 CK 坡面侵蚀在 0~2 m 处以侵蚀作用为主,到 2~8 m 以沉积作用为主,8 m 后 2 种作用交替变换。上方汇水到达坡面后,顶部大量的松散物质被径流冲起,径流迅速呈现“泥沙饱和”状态,最终导致 CK 坡面出现沉积现象;到 8 m 处径流能量通过降雨叠加和势能转化得到加强,且径流中的泥沙含量因沉积作用变得相对较小,此时的径流又有了较大的侵蚀能力和携沙能力,因此 8~12 m 处侵蚀量迅速增加,之后也是类似的交替现象。由图 2a 可知 CK 坡上每隔 8 m,细沟侵蚀量会迅速增大,可在 8 m 处采取一定的水土保持措施,比如植物藩篱,以起到拦水拦沙的作用,从而控制坡面细沟侵蚀。A、

B 2 种治理模式的坡面也有类似的交替现象,但没有 CK 坡面明显,且无确定周期。王禹^[27]在东北黑土区就坡长对坡面土壤侵蚀影响进行了研究,不同坡长产沙也有类似的大小交替变化现象,但是其周期长度为 142 m,而本研究仅距离坡顶 2 m 处就发生了这种现象。原因可能有 2 个方面:1、本研究中下垫面是采矿过程中产生的弃土弃渣混合体,其有机质含量低、结构松散,抗冲性、抗蚀性相比坡耕地土壤均较差;2、东北黑土区典型耕地坡度约 3°^[27],而本研究中坡度均在 30°及以上,坡度越大,径流动能也越大。

覆盖度控制细沟侵蚀的能力和坡长有关。45% 覆盖度下坡长超过 14 m、75% 盖度下坡长超过 20 m 后,细沟侵蚀量分别增加了 1.70、1.81 倍。由图 4b 可知距坡顶 20 m 处沙打旺难以控制细沟侵蚀。边坡面积越大,其盛雨面积也越大,所以一定覆盖度的植被控制土壤侵蚀的能力却有限。焦菊英^[21]分析了黄土高原人工草地的减水减沙效益和有效盖度,结果表明人工草地在大暴雨条件下仍有减缓土壤侵蚀的作用,但减缓作用随着雨量、雨强增大呈减小趋势。永利煤矿地处黄土高原北部,降雨也以侵蚀性暴雨为主,另外排土场顶部存在大面积平台,提供了上方汇水条件,这种条件下,不可“高估”植被覆

盖度的固土作用,即使采取高覆盖度沙打旺治理坡面,排土过程中也需控制边坡长度,必要时需要采取相应的工程措施。

4 结 论

对永利煤矿排土场治理边坡的细沟侵蚀特征与裸坡进行了对比分析得到以下结论:

1)“沙打旺+沙柳方格”治坡与沙柳方格治坡均能控制排土场边坡细沟侵蚀,与裸坡相比,2种治理坡面细沟侵蚀量分别减小46.36%和35.09%;裸坡细沟侵蚀量随着坡长沿程变化剧烈,呈现周期性变化,即每隔8m细沟侵蚀量会增大。

2)裸坡细沟累计侵蚀量随坡长呈指数变化,治理边坡坡面细沟累计侵蚀量随坡长呈幂函数变化。

3)覆盖度对坡面细沟侵蚀的影响与坡长有关。距坡顶0~14m处,75%,45%覆盖度的沙打旺控制细沟侵蚀的能力无明显差异,侵蚀量较裸坡减少37.29%~70.82%和43.10%~70.34%;距坡顶14~20m处,75%比45%覆盖度坡面侵蚀量降低53.32%~61.49%。距坡顶>20m处,沙打旺不能有效控制坡面细沟侵蚀。

参 考 文 献

- [1] 蒲玉宏,王伟. 煤矿废弃堆积物坡面侵蚀研究初报[J]. 中国水土保持,1995(10):11-14
- [2] 刘瑞顺,王文龙,廖超英,等. 露天煤矿排土场边坡防护措施减水减沙效益分析[J]. 西北林学院学报,2014(04):59-64
- [3] 王治国,白中科,赵景遥,等. 黄土区大型露天矿排土场岩土侵蚀及其控制技术的研究[J]. 水土保持学报,1994(02):10-17
- [4] 陈海迟,丁占强,杨翠林. 降雨特性与排土场边坡水力侵蚀的关系[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2011(02):103-108
- [5] Toy T J, Foster G R, Renard K G. Rusle for mining, construction and reclamation lands[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1999,54(2):462-467
- [6] 郭建英,何京丽,李锦荣,等. 典型草原大型露天煤矿排土场边坡水蚀控制效果[J]. 农业工程学报,2015(03):296-303
- [7] 郭明明,王文龙,李建国,等. 神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测[J]. 土壤学报,2015(05):1044-1057
- [8] Renard K G, Foster G R, Yoder D C, *et al.* Rusle revisited-status, questions, answers, and the future[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1994,49(3):213-220

- [9] 叶翠玲,许兆义,董瑞锦,等. USLE用于估算工程建设项目水土流失量的讨论[J]. 中国水土保持,2001(12):33-34
- [10] Kimaro D N, Poesen J, Msanya B M, *et al.* Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Interrill and rill erosion[J]. CATENA,2008,75(1):38-44
- [11] 郑良勇,李占斌,李鹏,等. 稀土元素示踪坡面次降雨条件下的侵蚀过程[J]. 农业工程学报,2010,26(3):87-91
- [12] 蔡强国,朱远达,王石英. 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[J]. 水科学进展,2004,15(1):12-18
- [13] 李蕾蕾,李聪,王永辰,等. 灌溉与密度对沙打旺种子产量及其构成因素的影响[J]. 草地学报,2008,16(1):65-69
- [14] 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的探讨[J]. 水土保持通报,1989(04):41-45
- [15] 蔡强国. 坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J]. 泥沙研究,1989(04):84-91
- [16] Kara O, Sensoy H, Bolat I. Slope length effects on microbial biomass and activity of eroded sediments[J]. JOURNAL OF SOILS AND SEDIMENTS,2010,10(3):434-439
- [17] 谢云,刘宝元,章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报,2000(04):6-11
- [18] Gilley J E, Gee G W, Bauer A, *et al.* Runoff and Erosion Characteristics of Surface-Mined Sites in Western North Dakota[J]. Transactions of the asae,1977,4(20):697-700,704
- [19] 赵宇,陈晓燕,米宏星,等. 基于体积法对黄土细沟侵蚀沿程分布模拟的研究[J]. 土壤学报,2014(06):1234-1241
- [20] 欧阳潮波,王文龙,黄鹏飞,等. 黄土高原沟壑区植物对土质路蓄水减沙及水力参数的影响[J]. 草地学报,2014(05):971-979
- [21] 焦菊英,王万忠. 人工草地在黄土高原水土保持中的减水减沙效益与有效盖度[J]. 草地学报,2001(03):176-182
- [22] 和继军,宫辉力,李小娟,等. 细沟形成对坡面产沙过程的影响[J]. 水科学进展,2014,25(1):90-97
- [23] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等. 黄土坡面细沟与细沟间水流水动力学特性研究[J]. 泥沙研究,2013(6):45-52
- [24] Kara ö, şensoy H, Bolat İ. Slope length effects on microbial biomass and activity of eroded sediments[J]. Journal of Soils and Sediments,2010,10(3):434-439
- [25] 孔亚平,张科利,唐克丽. 坡长对侵蚀产沙过程影响的模拟研究[J]. 水土保持学报,2001,15(2):17-20,24
- [26] 付兴涛,张丽萍. 红壤丘陵区坡长对作物覆盖耕地土壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报,2014(05):91-98
- [27] 王禹,杨明义,刘普灵. 典型黑土直型坡耕地土壤侵蚀强度的小波分析[J]. 核农学报,2010(01):98-103

(责任编辑 位晓婷)