

不同人工植物配置对排土场边坡水土流失的影响

杨汉宏¹, 张勇¹, 郑海峰¹, 吴丽萍², 吴国玺², 王铁军²

(1. 神华准格尔能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300; 2. 内蒙古自治区水利科学研究院 内蒙古 呼和浩特 010050)

摘要: [目的] 揭示人工植被配置对露天矿排土场边坡水土流失的影响, 为半干旱地区露天矿区排土场边坡水土流失控制提供依据。[方法] 以不同植物配置和对照(未治理)边坡为研究区, 于 2014 年和 2015 年的 5—10 月, 对边坡径流和土壤侵蚀量与降雨量的关系进行了统计学分析。[结果] (1) 控制坡面径流。乔灌草和灌草配置是较好选择, 其坡面径流仅为对照的 42.9% 和 52.6%, 二者无显著性差异。(2) 控制边坡土壤侵蚀。3 种植物配置措施都与对照区存在显著性差异, 其土壤侵蚀量仅为对照区的 2.3%~6.7%。日降雨量与坡面径流和土壤侵蚀量之间都存在显著线性关系。[结论] 不同植被配置对边坡侵蚀控制优于径流深, 与对照区相比侵蚀量减少 93% 以上, 而径流深仅减少了 28%~57%。

关键词: 降雨量; 径流深; 侵蚀量; 半干旱地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)04-0006-06

中图分类号: S157.1, S157.2

文献参数: 杨汉宏, 张勇, 郑海峰, 等. 不同人工植物配置对排土场边坡水土流失的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 6-11. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 04. 002; Yang Hanhong, Zhang Yong, Zheng Haifeng, et al. Impacts of different artificial plant collocations on soil and water loss at side slope in mine dump[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 6-11. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 04. 002

Impacts of Different Artificial Plant Collocations on Soil and Water Loss at Side Slope in Mine Dump

YANG Hanhong¹, ZHANG Yong¹, ZHENG Haifeng¹,
WU Liping², WU Guoxi², WANG Tiejun²

(1. Shenhua Group Zhungeer Energy Co., LTD., Erdos, Inner Mongolia 010300, China;

2. Water Conservancy Science Research Institute of Inner Mongolia, Hohhot, Inner Mongolia 010050, China)

Abstract: [Objective] It is a foundational mechanism to indicate different impacts of artificial vegetation collocation on the runoff depth and soil erosion amount at the side slope of mine dump in semi-arid zone. [Methods] Based on three artificial plant collocations (tree with shrub and grass, shrub with grass, and grass) and contrast plot (no vegetation), we employed statistics method to analyze relationship between the side slope erosion (including side slope runoff and soil erosion amount) and rainfall in daily scale from May to Sep. in 2014 and 2015. [Results] (1) For controlling effect of the runoff, tree with shrub and grass, and shrub with grass performed better in three types and its runoff amounts had no significant difference, their values were 42.9% and 52.6% of the contrast ones, respectively. (2) For the erosive controlling effect, no significant differences between the three types and the contrast plot were found, the amounts of the three types were 2.3%~6.7% of the contrast. There were linear relation between daily rainfall and the side slope erosion. [Conclusion] Vegetation collocations had better effects in erosive control than in runoff prevention.

收稿日期: 2016-12-13

修回日期: 2017-02-24

资助项目: 神华集团科技创新项目“现代露天煤矿水土保持生态修复关键技术及其应用研究”(SHJT-04-02-5)

第一作者: 杨汉宏(1960—), 男(汉族), 陕西省绥德县人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事矿山建设与复垦技术研究。E-mail: yanghanhong_001@163.com。

通讯作者: 吴丽萍(1961—), 女(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail: huanpingwlp@126.com。

and over 93% of erosion control and 28%~57% of runoff prevention were obtained in comparison the corresponding contrast.

Keywords: rainfall; runoff depth; erosion amount; semi-arid region

矿产资源开采过程中废弃物处理是影响矿区及周边地区的主要因素,尤其是在大型露天开采区^[1]。这种影响主要表现在两个方面,其一是开采造成的环境问题,如成为局地沙尘源区、水土流失区和植被严重退化地区等;其二是造成土地资源的浪费^[2]。我国是全球最大煤炭开采国家之一,而且多数大型露天煤矿大多分布在生态环境脆弱干旱、半干旱交错区^[3]。尤其在内蒙古草原区分布着中国最主要的露天矿区,如分布在鄂尔多斯地区的黑岱沟露天煤矿、神府东胜和大唐露天煤矿,分布在内蒙古东部草原区的霍林河矿、伊敏露天煤矿等,这些矿区的开发面积甚至远远超过了一些中小型城镇的规模,露天开采对矿区土地资源与生态环境的压力日趋严重^[4]。大型露天矿各种施工活动所产生的人工排土堆是矿区水土流失最为严重的地貌单元,是一种典型的由土壤、不同粒径碎石组成的松散土石混合物,其与原地貌、土壤或均质岩土体存在较大差别。在降雨条件下,土石混合体边坡会发生较为明显的水土流失,与原地貌侵蚀方式或程度存在差异^[5-6]。从目前该领域研究特点来看主要集中在3个方面:(1)针对排土堆的侵蚀与产沙规律、平台与边坡土壤侵蚀特征等开展的研究较多^[7-9];(2)针对排土场堆积平台和边坡的工程堆积体物理力学性质、侵蚀过程及边坡稳定性等方面进行研究^[10-13];(3)针对排土场稳定性评价方法进行探讨^[14-15]。在这些研究中,排土场平台或边坡的性质被予以了高度的关注并有较完整的研究结果,但是对于排土场人工植被恢复中乔灌草配置对边坡土壤侵蚀的研究相对较少,已有的研究涉及到了植物与土壤侵蚀关系研究,但也是以排土场年限表征植被状况进行分析,而缺少了植物配置对土壤侵蚀影响的研究^[16]。因此,本文在已有研究的基础上,从不同植被配置方式对排土场边坡土壤侵蚀进行研究,主要拟验证的科学问题是不同生长型植物(乔木、灌木、草本)配置对边坡土壤侵蚀的影响机制,为干旱、半干旱地区大型露天矿区排土场基于水土流失控制的人工植被恢复最佳模式选择提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗

东部的黑岱沟露天煤矿。地理坐标为东经 111°10'—111°25',北纬 39°25'—39°59',面积 55 km²。该区地形地貌属于晋、陕、蒙接壤的黄土高原地区,是中国也是世界上土壤侵蚀最严重地区之一。研究区气候属于中温带半干旱大陆性气候,冬季严寒而漫长,夏季温热而短暂,昼夜温差较大。年平均气温为 5.3~7.6℃,多年平均降水量 408 mm,其中 60%~70%集中在每年的 7—9 月;降水量约占全年的 60%~70%;年蒸发量为 1 824.7~2 896.1 mm;日照 3 119.3 h。矿区内地带性土壤不明显,非地带性土壤(黄绵土)分布广泛,其中粉粒占 64%~73%,黏粒占 17%~20%;土质疏松,抗侵蚀能力弱,水土流失严重。矿区内地带性植被属暖温带草原带,天然植被稀疏低矮,盖度在 30%以下。人工植被以油松(*Pinus tabulaeformis*)、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana intermedia*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主,林间坡地主要草本植物有铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)、白藜(*Chenopodium album*)、本氏针茅(*Stipa bungeana*)和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等为优势种。

黑岱沟露天煤矿 1992 年建成投产。在开采近 24 a 里,矿区共设有北排土场、东排土场等 6 处。排土场标高为分布在 1 200~1 320 m,每 15 m 高程设一平台,边坡坡度在 34°~38°之间。在排土场复垦过程中主要以防止水土流失为目标,采用乔、灌、草不同混交配置。主要有油松、沙棘、山杏、无芒雀麦(*Bromus inermis*)和紫花苜蓿(*Medicago sativa*)等。本试验布置在北排土场,该小区从 1995 年开始复垦,到 2003 年完成,累计完成复垦面积 147.96 hm²,分布在 1 200~1 245 m 边坡上。无植被对照区设置在阴湾排土场,坡底标高为 1 450 m 处。

2.2 研究方法

运用坡面径流小区研究天然降雨与水土流失关系是目前常用的研究方法。在本文的研究中,不同人工植被径流小区设置在北排土场的西坡面(1993 年开始植被恢复重建),标高选择在 1 200~1 275 m 坡面上,径流对照区设置在阴沟排土场(表 1)。在每种植被类型和对照区上设长 20 m、宽 5 m 径流小区 3 个,共 12 个。径流小区用 PVC 板材做隔离材料,在坡地平台用砖砌混凝土抹面做汇水池并配有塑料遮

布,汇水池长、宽、高分别为 3,2 和 1 m,最大容量 6 m³,可容纳最大径流量为 60 mm。为了与气象站日降水数据对应,在径流小区入池口设分流调节阀,如降水过程超过晚 12:00,则关闭入池阀,打开侧阀将径流小区水量排到池外,同时用塑料遮布盖住汇水池。在汇水池最低处设排水口,一次降水过程测定后,将水、泥沙排干。由于研究区集中在很小范围内且经过标准化排土堆砌,地形(坡度、坡长)、土壤类型(扰动黄绵土)基本一致,不同地是植被(人工配置)和

降雨量的差异。因此,选取不同人工植被类型(表 1)和日降雨量进行坡面水土流失特征分析。其中,降雨量采用 2014,2015 年 5—10 月数据(11 月到翌年 4 月多有降雪,故不进行观测),期间如果发生连日降水事件,则只选择最完整一天的测定数据参与分析;水土流失特征用坡面径流深(mm)和土壤侵蚀量(kg/m²)2 个参数来表征。日降雨量数据源于距黑岱沟最近的薛家湾气象站数据,不同治理措施对之间的显著性差异分析采用 ANOVA 方法在 SPSS 中完成。

表 1 不同人工治理坡面植物配置与优势种

位置	坡底标高	人工植被类型	盖度/%	建群种
北排土场	1 200	乔木+灌木+草本	>75	油松、山杏、无芒雀麦
	1 245	灌木+草本	>75	沙棘、无芒雀麦
	1 245	草本	>75	无芒雀麦
阴湾排土场	1 450	无	<1	稀有铁杆蒿、白藜

3 结果分析

3.1 研究期间降水量日变化特征

在 2014 年 5—10 月和 2015 年 5—10 月的观测期内,发生降水天数 2014 年为 64 d,2015 年为 60 d(表 2)。从不同级别降水发生的频率和降水量大小特点来看,<5 mm 降水概率最高,在 57%以上;>25

mm 降水概率最低,不足 2%;5~10 和 10~25 mm 发生频率在 11.7%~21.9%之间。从累积降水量来看,10~25 和 5~10 mm 所占比率较高,分别在 23.0%~25.7%和 43.6%~52.2%;>25 mm 降水虽然每年只发生了一次,但所占比例分别为 9.0%和 12.1%;<5 mm 降水尽管发生频次较多,但所占比率仅为 13.1%和 21.3%。

表 2 研究期间降水统计学特征

年份	降雨量级别	<5 mm	5~10 mm	10~25 mm	>25 mm	合计
2014	降水天数/d	37	14	12	1	64
	比例/%	57.8	21.9	18.8	1.6	100
	累积降水量/mm	52.1	102.5	207.8	35.8	398.2
	比例/%	13.1	25.7	52.2	9.0	100
	侵蚀监测天数/d	3	9	10	1	23
	比例/%	13.0	39.2	43.5	4.3	100
2015	降水天数/d	44	8	7	1	60
	比例/%	73.3	13.3	11.7	1.7	100
	累积降水量/mm	56.4	61	115.6	32.1	265.1
	比例/%	21.3	23.0	43.6	12.1	100
	侵蚀监测天数/d	3	5	6	1	15
	比例/%	20.0	33.3	40.0	6.7	100

需要补充说明地是在 2014 年 6 月 24—25 日,8 月 12—13 日,9 月 22—23 日和 2015 年的 6 月 28—29 日,9 月 29—30 日发生了连续降水事件,因此在上述时段只选择最完整一天的测定数据参与分析。在 2 a 的监测期中共获得有效监测天数为 38 d,其中 2014 年为 23 d,2015 年为 15 d。监测频率最高的雨

量在 5~25 mm,共 30 d(表 2)。

3.2 不同人工植物配置对边坡侵蚀的影响

在本文测定的 38 d(次)中,小于 5 mm 降雨量收集到的雨水量和水沙样品较少,没有纳入分析。收集到可准确度量样品的起始降雨量为 5.1 mm,最大降雨量为 35.8 mm。从表 3 可以看出,在研究时期内对

对照区径流深比乔灌草、灌草区和草本区分别多 92.56, 76.79 和 46.71 mm, 是 3 种植被配置区的 1.4~2.3 倍。说明人工植被坡面治理对降雨产生径流具有极大减少功能。从效果来看, 乔灌草配置效果最好, 灌草次之, 单一草本效果相对最低。进一步 ANOVA 分析表明, 对照区和草本治理区径流深之间没有显著性差异 ($p=0.020$); 灌草治理区与乔灌草治理区 ($p=0.342$)、草本治理区 ($p=0.002$) 之间也没有显著性差异。从降雨量对边坡侵蚀量的影响分析中可以看出, 对照区侵蚀量比乔灌草、灌草区和草本区分别多 62.62, 62.30 和 59.77 kg/m², 是 3 种植物治理区的 14~44 倍。说明不同人工植被坡面治理措施对降雨产生的边坡土壤侵蚀量具有极大得减少功能, 从效果来看不同植物措施效果都比较好。进一步 ANOVA 分析表明, 对照区与其他 3 种治理措施都存在显著性差异 ($p<0.001$); 不同植被治理措施中, 灌草治理区与乔灌草治理区之间没有显著性差异 ($p=0.321$)。

从降雨量与径流深的关系来看(图 1), 无论是未

治理的裸坡还是经过 22 a 不同植物措施治理的坡, 二者之间都有较好的线性关系。从 R 值显著性检查结果来看, 对于降雨量达到 6.4 mm 才测到有效数据的乔灌草治理区, $R_{0.001,27} = 0.580$, 其他 3 个区 $R_{0.001,30} = 0.554$, 都小于拟合回归方程 R 值, 说明它们拟合趋势可信。从变化趋势(回归方程斜率)特点来看, 对照区(0.361)大于植被治理区; 在 3 种治理措施中乔灌草区(0.277)与灌草区(0.229)相差无几, 但草本治理区较低为 0.219。

表 3 不同人工植物配置与边坡土壤侵蚀特征(日降雨量 5.1~35.8 mm)

项目	对照	乔灌草	灌草	草本	
径流深/ mm	最小值	2.41	0.30	0.784	1.453
	最大值	12.56	6.22	7.09	8.40
	累积值	162.12 ^a	69.56 ^{bc}	85.33 ^{bcd}	115.40 ^{acd}
侵蚀量/ (kg·m ⁻²)	最小值	0.42	0.01	0.03	0.01
	最大值	4.19	0.11	0.13	0.37
	累积值	64.09 ^a	1.47 ^{bc}	1.79 ^{bc}	4.32 ^d

注: 累计值上角字母有相同者, 表示二者无显著性差异 ($p>0.001$)。

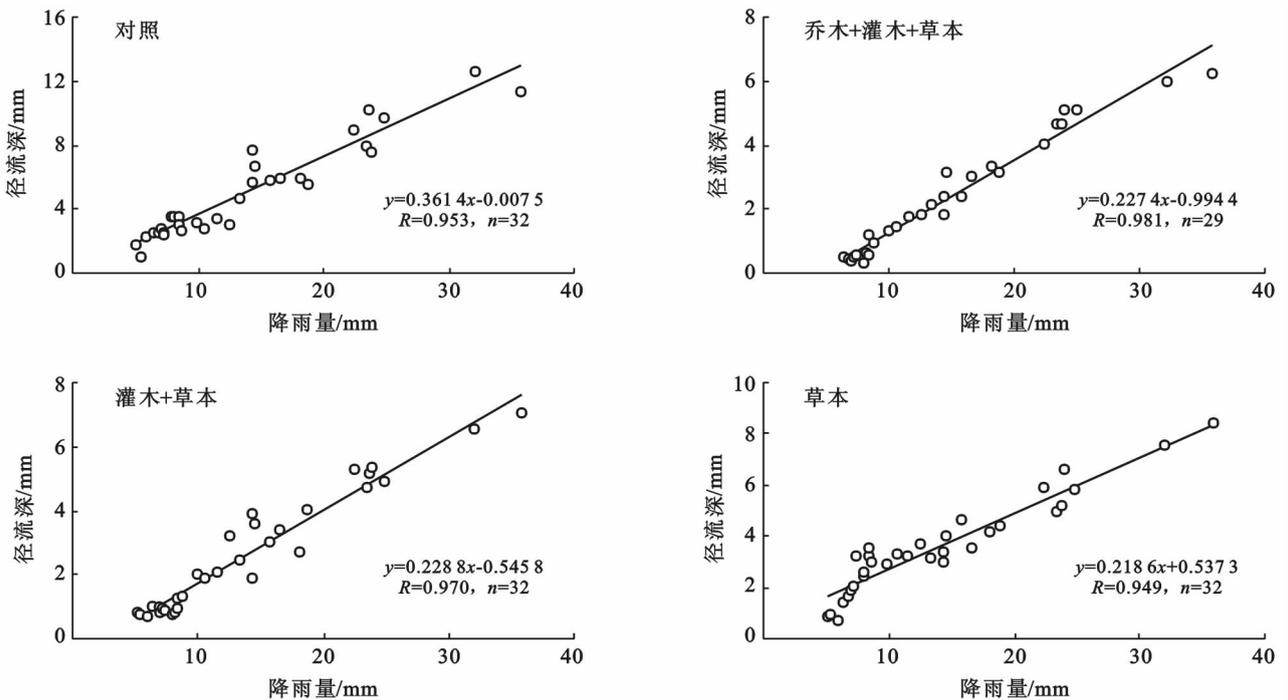


图 1 研究区日降雨量与坡面径流深的关系

从降雨量与侵蚀量的关系来看(图 2), 在对照区和 3 种不同植物措施治理区中, 二者之间同样有较好的线性关系。从 R 值显著性检查结果来看, 都小于拟合回归方程 R 值, 说明它们拟合趋势可信。从变化趋

势(回归方程斜率)特点来看, 变化特点与降雨量和径流深有所不同, 对照区(0.151)大于植被治理区; 在 3 种治理措施中乔灌草区(0.003)与灌草区(0.004)相差无几, 草本治理区较高为 0.015。

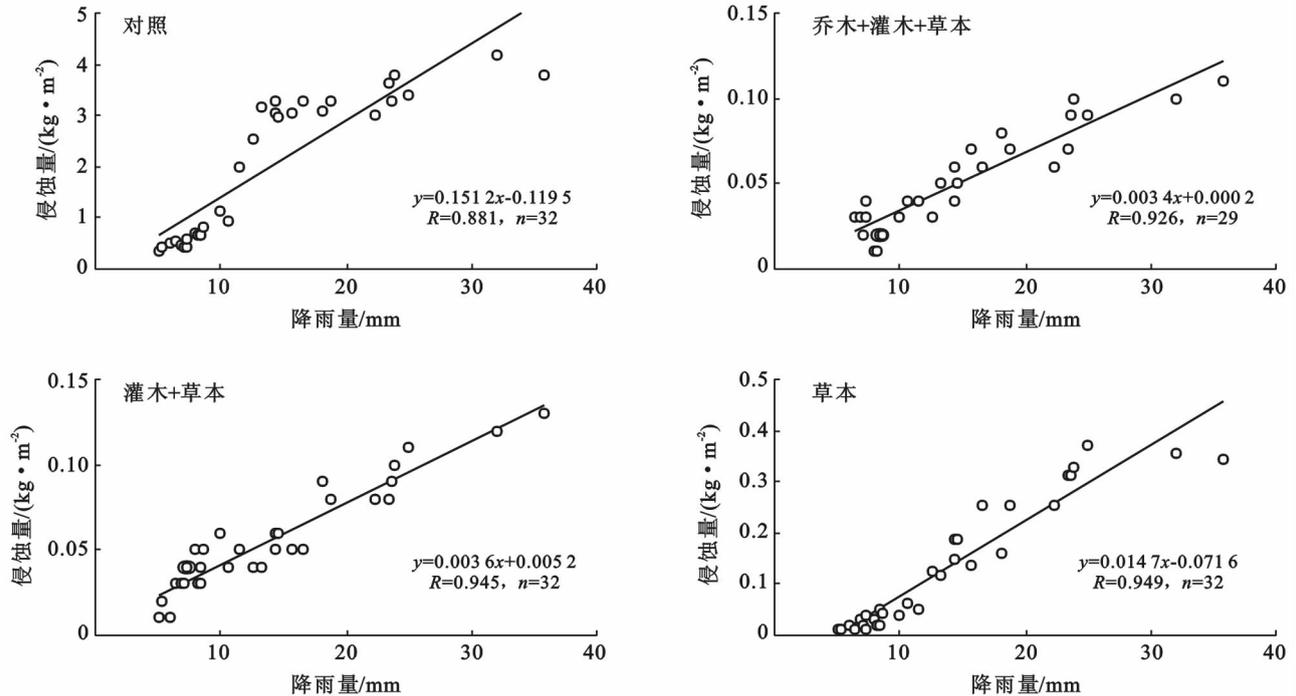


图 2 研究区日降雨量与坡面侵蚀量的关系

4 讨论

土壤侵蚀敏感性是水土保持研究中的核心问题之一^[17]。露天煤矿排土场边坡土壤侵蚀不仅与水土流失所涉及的因子有关^[9,18],而且与排土场堆积平台和边坡的工程堆积体物理学性质也密切相关^[6,11]。特别是对于排土场所导致的水土侵蚀过程研究,不仅对露天煤矿及周边地区环境治理具有重要意义,而且因为工程施工形成的坡度、坡长一致和土壤性质高度相似特点,对区域土壤侵蚀研究提供了较好的典型案例^[6,18]。

从本文研究的半干旱草原区黑岱沟露天煤矿排土场植被恢复 22 a 的边坡土壤侵蚀特征来看,引起边坡土壤径流最小日降雨量大于 5.1 mm。虽然在 2 a 的试验观测中,在降水量小于 5 mm 的情况下监测到 6 次(占该级别的 7.4%)径流现象,但所产生的径流量很小,可以忽略。这种小概率事件的发生原因与雨型有关,因为在降雨量小于 5 mm 的情况下,如果降雨集中(阵雨)同样可产生坡面径流。这一点可以从控制试验是为研究报告中得到旁证^[16,18]。从产生土壤侵蚀的降雨量天数来看以 10~25 mm 为主,发生概率在 43.0%~43.5%;其次为 5~10 mm,在 33.3%~39.2%;而大于 25 mm 降雨量每年只发生了 1 次(表 2)。

从日降水量与边坡径流深的特征来看(表 3),油松+山杏+无芒雀麦组成的乔灌草配置具有最佳减

少边坡径流深的作用,在 2 a 的观测期内产生径流仅为对照区 42.9%;由山杏+无芒雀麦为主的灌草区为 52.6%;以无芒雀麦为主的草本区为 71.2%。其中对照区与草本区之间无显著性差异(0.001 水平),说明从减少坡面径流角度来看,单一草本治理坡面效果较差不宜采用;而乔灌草区和灌草区之间同样无显著性差异,表明在水保措施实施中考虑到资金约束,这二种措施可以相互代替。从控制土壤侵蚀量角度来看,由乔灌草区仅为对照区 2.3%,灌草区为 2.8%,草本区为 6.7%。其中对照区与不同植物配置区之间都存在显著性差异(0.001 水平),说明从减少坡面土壤侵蚀量角度来看,3 种配置模式都可起到较好效果。从日降雨量与径流深和侵蚀量的关系来看(图 1—2),对照区和 3 种植物配置区都有较好的正相关线性关系(最小 R 值为 0.871,0.001 水平上显著)。这一结果与朱高立等^[17]在模拟控制坡度、覆盖度和降雨量条件下获得的结果基本相似,即在坡度一定的条件下,面产流时间与覆盖成正相关。而不同地是降雨量与径流深的变化趋势大于降雨量与侵蚀量,二类线性斜率分别变化在 0.219~0.361,0.003~0.151 之间,这表明坡面径流对降雨量变化的响应要快于土壤侵蚀量。从变化趋势来看二类共同点是斜率都为正值,说明随降雨量(降雨侵蚀力)增加,土壤侵蚀加剧。这一结果与陈海迟等^[16]的模拟降雨控制试验结果相比较,在变化趋势上一致,但在拟合回归表达上有所区别。因为在模拟降雨试验中,降雨量

与径流深、土壤侵蚀量的关系最佳拟合关系为幂函数,其特点是在降雨量较低时径流深和土壤侵蚀量的变化较小,当达到某一值时变化增加。产生这种差异的原因与控制试验降雨量是在设计的时间内完成的(控制试验以30和45 min为时间尺度设定降雨量),这直接导致与本文以天为单位的研究结果之间存在一些细节差异。

5 结论

不同植被配置方式对排土场边坡土壤侵蚀有显著的影响。从控制坡面径流来看,乔灌草和灌草配置是较好选择,其产生的坡面径流仅为对照的42.9%和52.6%,二者无统计学显著性差异。从控制坡面侵蚀量来看,3种植物配置措施都与对照区存在显著性差异,土壤侵蚀量仅为对照区的2.3%~6.7%。日降雨量与坡面径流和土壤侵蚀量之间都存在显著线性关系,但与径流深的关系的线性变化斜率大于与土壤侵蚀量。

[参 考 文 献]

- [1] Modak M, Pathak K, Ghosh K K. Performance evaluation of outsourcing decision using a BSC and Fuzzy AHP approach: A case of the Indian coal mining organization [J]. *Resources Policy*, 2017, 52: 181-191.
- [2] 冯建宏. 我国露天煤矿开采环境问题及防治对策研究 [J]. *中国矿业*, 2002, 11(6): 61-64.
- [3] World Coal Association. The coal resource: A comprehensive overview of coal [EB/OL]. (2005-01-03) [2016-05-06]. World coal association // <http://www.world-coal.org>. 2005.
- [4] 马建军, 张树礼, 李青丰. 黑岱沟露天煤矿复垦土地野生植物侵入规律及对生态系统的影响 [J]. *环境科学研究*, 2006, 19(5): 101-106.
- [5] Peng Xudong, Shi Dongmei, Jiang Dong, et al. Runoff erosion process on different underlying surfaces from disturbed soils in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Catena*, 2014, 123: 215-224.
- [6] 史东梅, 蒋光毅, 彭旭东, 等. 不同土石比的工程堆积体边坡径流侵蚀过程 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 152-161.
- [7] 闫云霞, 许炯心. 黄土高原地区侵蚀产沙的尺度效应研究初探 [J]. *中国科学(D): 地球科学*, 2006, 36(8): 767-776.
- [8] 梁宏温, 马倩, 温远光, 等. 不同造林抚育管理下桉树幼林地水土流失特征 [J]. *水土保持通报*, 2016, 36(6): 26-30.
- [9] 杜忠潮, 贺宝园. 五陵塬边坡侵蚀地貌发育及其影响因素 [J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 316-322.
- [10] Fredlund D G, Krahn J. Comparison of slope stability methods of analysis [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1977, 14(3): 429-439.
- [11] Morgenstern N R. The evaluation of slope stability: A 25 year perspective [J]. *Chemistry*, 2010, 10(13): 3241-51.
- [12] 李树武, 聂德新, 刘惠军. 大型碎屑堆积体工程特性及稳定性评价 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(2): 4126-4131.
- [13] 王自高, 胡瑞林, 张瑞, 等. 大型堆积体岩土力学特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S2): 3836-3843.
- [14] 曹阳, 黎剑华, 颜荣贵, 等. 超高台阶排土场建设决策研究与实践 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(12): 1858-1862.
- [15] 汪海滨, 李小春, 米子军, 等. 排土场空间效应及其稳定性评价方法研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(10): 2103-2111.
- [16] 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*, 2011, 32(2): 103-108.
- [17] 朱高立, 肖泽干, 刘晓静, 等. 模拟降雨条件下崩积体坡面产流产沙特征及其响应关系 [J]. *水土保持通报*, 2016, 36(6): 1-7.
- [18] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(8): 145-153.