

典型草原煤矿排土场边坡不同治理措施 次降雨水蚀过程分析

郭建英, 李锦荣, 何京丽, 张铁钢, 梁占岐, 荣浩

(水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘要:以典型草原露天煤矿的排土场边坡为研究对象,利用野外原位径流小区观测设施研究了不同治理措施条件下排土场边坡次降雨的产流、产沙规律。结果表明:在边坡治理初期,首次降雨的土壤侵蚀产沙量均较大,达到中度以上的侵蚀强度,其中铺设植生带措施次降雨产沙量最大,为 $6\,469\text{ t/km}^2$,生态袋一字型布设措施产沙量最小,为 $2\,543\text{ t/km}^2$,分别是裸地产沙量 $5\,640\text{ t/km}^2$ 的1.15倍和0.45倍;随治理恢复年限的增加,恢复第3年时,生态袋一字型治理措施(生物+工程措施)的年径流量比沙地柏+绣线菊灌丛恢复7 a(纯生物措施)的年径流量小;当边坡治理措施的植被盖度 $>35\%$ 时,各治理措施的产沙量均小于未治理裸地的产沙量,且雨强越大,生物+工程治理措施的阻沙能力越明显;生态袋一字型布设措施年土壤侵蚀量由治理当年的 $5\,179\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 下降到治理第3年的 $1\,260.35\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,减少75.7%。因此,在草原矿区的排土场边坡采取生物与工程相结合的治理措施明显优于单纯的生物治理措施,可有效控制排土场边坡的水土流失。

关键词:排土场边坡;工程措施;生物措施;次降雨侵蚀量

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)05-0001-05

Analysis on Water Erosion Process Caused by Secondly Rainfall Under Different Slope Treatment Measures at Dump Site in Typical Steppe

GUO Jianying, LI Jinrong, HE Jingli, ZHANG Tiegang, LIANG Zhanqi, RONG Hao

(Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China)

Abstract: At the beginning of the vegetation restoration, the slope erosion can reach up to moderate level due to the runoff generated by the first rainfall. In such condition, the sediment yield caused by secondly rainfall is $6\,469\text{ t/km}^2$ in vegetation zone, which is 1.15 times of bare land ($5\,640\text{ t/km}^2$); however, the sediment yield under the measure of the eco-bag with ‘—’ type is just 45.1% of the bare land. With the increase of restoration duration, the eco-bag with ‘—’ type which is combined by biological and engineering measures is better than biological measures. For instance, in the third year, the annual runoff depth is less than that under the seven years of *Sabina vulgaris* + *Spiraea* sp. which is completely biological measure. When the vegetation coverage is more than 35%, the sediment yields in different treatment measures are less than those in the bare land; and with the increase of the rainfall intensity, the sediment control capacity of the combination of biological and engineering measures is better. Soil erosion amount under the measure of the eco-bag with ‘—’ type can decrease by from $5\,179\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ (the first year) to $1\,260.35\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ (the third year), the reduction is just 75.7%. In conclusion, combination of biological and engineering measures in the dump slope can control erosion effectively.

Keywords: dump slope; engineering measures; biological measures; single rainfall erosion

内蒙古草原地区既是国家重要的生态安全保障区域,也是重要的矿产、能源供应基地,承担着保障全国“生态安全”与“能源安全”的双重角色^[1]。近年来

内蒙古典型草原地区作为重要的能源基地,对煤炭资源进行了大量的开发和利用,促进了草原地区经济和社会的发展,但也给草原地区的水土流失、景观结构

收稿日期:2016-06-01

修回日期:2016-07-29

资助项目:国家自然科学基金(41301302);内蒙古自治区科技计划项目“重点水土流失区生态系统综合整治技术集成”

第一作者:郭建英(1979—),男,内蒙古清水河县人,博士,高级工程师,主要从事干旱、半干旱地区水土流失与植物生态方面的研究。E-mail: guojianying1980@163.com

通信作者:李锦荣(1980—),男,内蒙古凉城县人,博士,高级工程师,主要从事风沙物理及其草地遥感方面的研究。E-mail:lijingrong918@126.com

带来了一系列负面的生态环境效应^[2-3]。露天煤矿开采过程中导致排土场土体构型紊乱,特别是大型机械碾压使排土场的土壤被压实,造成植物很难扎根进行生长,加之排土场的边坡较陡,在降雨时极易形成大量地表径流,加剧了排土场边坡的水土流失,甚至局部地段出现滑坡等灾害^[4-6]。多年来国内学者针对不同生态类型的煤矿开发区进行了较为系统的研究,主要集中在煤炭资源开发较早的黄土丘陵区及我国东部煤矿开发区侵蚀地貌的土地整理、困难立地生态系统恢复与重建、土壤质量变化与修复、不同类型矿区的土壤侵蚀过程、煤矿开发区景观格局变化、环境效应等方面^[7-13],而对于北方典型草原露天煤矿排土场边坡治理措施的土壤侵蚀过程研究较少。因此,本研究选取内蒙古典型草原区的露天煤矿排土场边坡为研究对象,通过在排土场边坡上设置不同治理措施的径流小区,于 2013—2015 年连续 3 a 对排土场边坡不同治理措施的产流、产沙过程进行观测,分析不同治理年限和不同治理措施下次降雨的坡面产流、产沙变化规律,探讨不同治理措施对排土场边坡水土流失的控制作用,为典型草原煤矿排土场边坡的生态恢复重建及水土流失治理技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区锡林浩特盟锡林浩特市胜利东二号露天矿的南排土场,地理坐标为东经

116°06′41″—116°14′11″,北纬 44°02′07″—44°07′05″。属于典型的干旱半干旱中温带气候,多年平均降水量 289 mm,年内降水分布不均,主要集中在 6—8 月,占全年降水量的 70%以上,多年平均蒸发量 1 830.8 mm;开采区土壤主要以栗钙土和暗栗钙土为主,土壤较为贫瘠,有机质含量低,土壤养分状况是缺磷,富钾,氮中等^[14];植被为典型的草原植被,以克氏针茅(*Stipa krylovii*) + 羊草(*Aneurotepidimu chinense*)为主要建群种,植被高度 15~30 cm,植被盖度为 25%~45%。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 排土 3 a 后的排土场边坡沉降量可达到总沉降量的 80%以上^[15],因此,试验区选择 2009 年 10 月排土到界并进行了覆土的边坡,该排土场相对高度 100 m,为平台与边坡相间分布的阶梯式地貌,试验区的坡面角为 33°,坡面长 21 m,坡面为煤矸石与土混排后覆土,覆土厚度为 20~40 cm。于 2013 年 5 月在选定的排土场边坡上布设径流小区,每种治理措施设置 2 个重复观测径流小区,共布设 14 个径流小区,径流小区的面积为 100 m²,即倾斜坡长 20 m,宽 5 m,为方便观察取样,在径流小区间设置步道,宽 0.5 m,径流小区采用用彩钢板加钢骨架围起,在径流小区前设置导流槽(两边高,中间低),将水流汇集于导流孔,在径流小区的底部设计径流采集池。各径流小区于 2013 年 5 月开始进行观测,观测时间为 2013 年 6 月—2015 年 9 月。不同治理措施情况见表 1。

表 1 径流场治理措施基本情况

类型编号	措施类型	治理措施
1 [#]	裸露边坡	裸地(对照)
2 [#]	生物措施+工程措施	生态袋一字型布设,生态袋间距 1 m,在生态袋间撒播种草
3 [#]	生物措施+工程措施	生态袋品字型布设,水平间距 0.5 m,垂直间距 1 m,牧草混合撒播
4 [#]	生物措施	草灌结合种植:灌木种植株行距为 1 m×1 m,种植 2 a 生柠条,牧草混合撒播
5 [#]	生物措施	全部铺设植生带
6 [#]	生物措施+工程措施	桧柳沙障+牧草混播:沙障规格为 1 m×1 m 的网格,牧草混合撒播
7 [#]	生物措施(2010 年种植)	种植沙地柏+绣线菊,沙地柏与绣线菊为 3:1 种植,株行距为 0.5 m×0.5 m

1.2.2 监测内容 (1) 降雨过程观测:利用反斗式自记雨量筒记录逐次降雨的起始时间,每 1 min 记录一次降雨量,降雨量精确至 0.1 mm;(2) 径流量观测:每次降雨停止后立即测量径流量。采用钢尺测定径流池内的水位,在进行径流池内水位观测时,如果底部集水槽内有淤滞的泥沙,先将泥沙刮入径流池内,再进行水位读数;(3) 泥沙量观测:测定径流池的水位后,然后将池内的水充分搅浑,用铝盒取水样,每次取 60 ml 左右,3 次重复,现场测定浑水质量,记录浑水体积,带回实验室过滤掉清水后,在 105℃下烘箱内烘烤 12 h,测定铝盒加干土重量,计算干土质

量;(4) 植被生长状况观测:每次降雨后分别对坡面上部、中部、下部的植被进行调查,样方面积为 1 m×1 m,调查样方内的植被高度、植物种数及生物量。

2 结果与分析

2.1 试验观测期的降雨变化特征

雨强和降雨历时是影响地表产流、产沙的主要因素。由表 2 的统计结果可知:2013 年排土场边坡产生径流的总降雨量为 167.1 mm,占 2013 年雨季总降雨量的 71.4%;2014 年排土场边坡产生径流的总降雨量为 72.8 mm,占 2014 年雨季总降雨量的

35.5%;2015 年排土场边坡产生径流的总降雨量为 118.4 mm,占 2015 年雨季总降雨量的 38.8%。按照我国气象防灾减灾标准化技术委员会编制的《降水量等级》国家标准的规定^[16],试验区 2013—2015 年

24 次产流的次降雨中,小雨 10 次,中雨 10 次,大雨 4 次,其中 13 次降雨的最大 60 min 的降雨量都占次降雨总量的 62.0%以上,最高可达到 97.6%,由此可知,试验区的降雨以短历时、高强度的降雨为主。

表 2 试验观测期间的次降雨特征

降雨日期(年月日)	历时/min	雨量/mm	雨强/ (mm·min ⁻¹)	最大时段雨量/mm		
				10 min	30 min	60 min
2013-06-16	902	32.8	0.036	3.9	5.3	7.5
2013-07-07	191	11.5	0.06	0.9	2	2.7
2013-07-14	456	26.1	0.057	3.2	6.3	8.9
2013-07-18	323	24.9	0.077	14.4	16.2	16.9
2013-07-21	81	8.8	0.109	6.2	7.9	8.4
2013-08-06	67	8.1(有冰雹)	0.121	2.8	5.4	7.9
2013-08-15	135	39.9	0.296	18.2	23.3	27.9
2013-08-31	171	9.2	0.054	2.8	3.4	5.7
2013-09-08	129	5.8	0.044	1.9	2.6	3.9
2014-06-09	262	15.6	0.060	4.2	8.0	9.2
2014-06-21	210	12.8	0.061	2.2	3.8	5.2
2014-06-25	68	29.8	0.438	12.4	26.4	29.6
2014-07-07	230	9.8	0.043	2.2	2.6	3.8
2014-08-21	118	4.8	0.041	1.8	3.2	3.6
2015-06-10	30	6.6	0.220	2.8	6.6	—
2015-06-14	48	10.2	0.213	3.6	8.4	—
2015-06-24	192	13.0	0.068	3.2	4.6	6.2
2015-07-09	66	8.8	0.133	4.8	7.8	8
2015-07-21	166	5.8	0.035	0.8	1.8	2.8
2015-07-23	74	7.8	0.105	3	6.2	7.6
2015-07-25	80	23.4	0.293	9.8	18	21.8
2015-08-01	416	20.4	0.049	3.6	5.2	6.4
2015-08-05	36	14.0	0.389	8.2	13.8	—
2015-08-21	194	8.4	0.043	2.0	4.0	6.4

注:研究区 2013 年 5—9 月降雨量为 233.9 mm,2014 年 5—9 月降雨量为 204.8 mm,2015 年 5—9 月降雨量为 305.2 mm。

2.2 不同恢复年限对坡面产流产沙的影响

地表植被盖度与植株密度增加,土壤结构也明显改善,且地表粗糙率随之加大,使地表径流的流速明显减小,有效遏制或减少了坡面的土壤侵蚀^[17]。由图 1,图 2,图 3 可知,不同治理措施实施后(图 1)坡面产流、产沙结果表明:在植被恢复初期,由于在治理过程中人为对边坡干扰,导致植被盖度较低,不同治理措施的蓄水保土作用不明显。在 2013 年 6 月 16 日的降雨中,1[#]—6[#]治理措施的植被处于苗期,植株较矮且覆盖度很低,不同治理措施产生的地表径流量是裸地的 68.2%~79.1%,变化幅度小,而种植 4 a 的沙地柏+绣线菊灌丛(7[#])的径流量是裸地(1[#])的 59.6%;另外,由于不同治理措施的植被覆盖度低导致首次降雨产流时坡面的产沙量均较大,达到中度以上的侵蚀强度,铺设植生带措施(5[#])的产沙量为 6 469 t/km²,桧柳沙障+牧草混播(6[#])产沙量为 5 768 t/km²,均达到了强烈侵蚀,其分别是裸地产沙量 5 640 t/km²

的 1.15 倍和 1.02 倍;而生态袋一字型布设措施(2[#])表现出明显的阻沙能力,其产生的泥沙量为 2 545 t/km²,是裸地产沙量的 45.1%。

随着植被不断生长发育,当植被盖度>35%时,治理当年不同治理措施的产沙量均小于裸地的产沙量,且随降雨强度的增加,生态袋一字型布设措施(2[#])的阻沙能力越明显。如次降雨的平均雨强为 0.296 mm/min 时,生态袋一字型布设措施产沙量仅为裸地的 6.29%,是植被恢复 4 a 沙地柏+绣线菊灌丛的 16.8%。随植被恢复年限的增加,植被盖度和植株密度明显增加,坡面粗糙率变大,不同治理措施的次降雨产流、产沙量迅速下降。如 2015 年次降雨量为 23.4 mm,雨强为 0.29 mm/min,其生态袋一字型布设措施(2[#])径流深为 3.46 mm,产沙量为 180.54 t/km²,而在 2013 年降雨量为 24.9 mm,雨强为 0.08 mm/min,与 2015 年次降雨量(23.4 mm)

相近,且雨强仅是 2015 年 27.5%的情况下,生态袋一字型布设措施(2[#])径流深为 7.65 mm,产沙量为 829.77 t/km²,次降雨径流深与产沙量分别为 2015 年相似降雨条件下的 2.21 倍和 4.59 倍。铺设植生

带措施(5[#]) 在 2013 年治理初期无论何种雨强条件下,其产沙量是各种措施中最大,甚至大于边坡未治理的裸地,随恢复年限的延长,在 2015 年时,不同雨强条件下其径流量和产沙量均少于未治理的裸地。

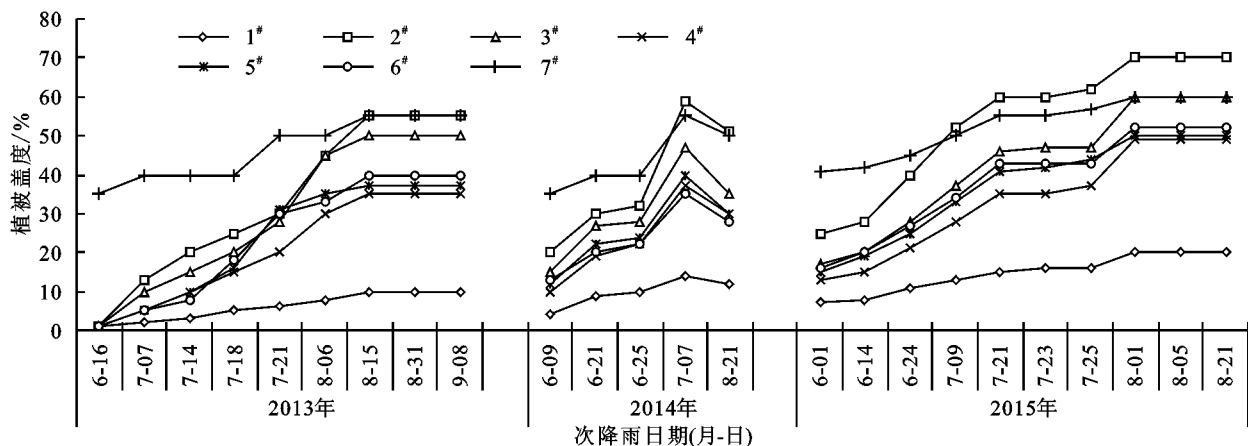


图1 不同治理措施径流小区次降雨植被盖度变化

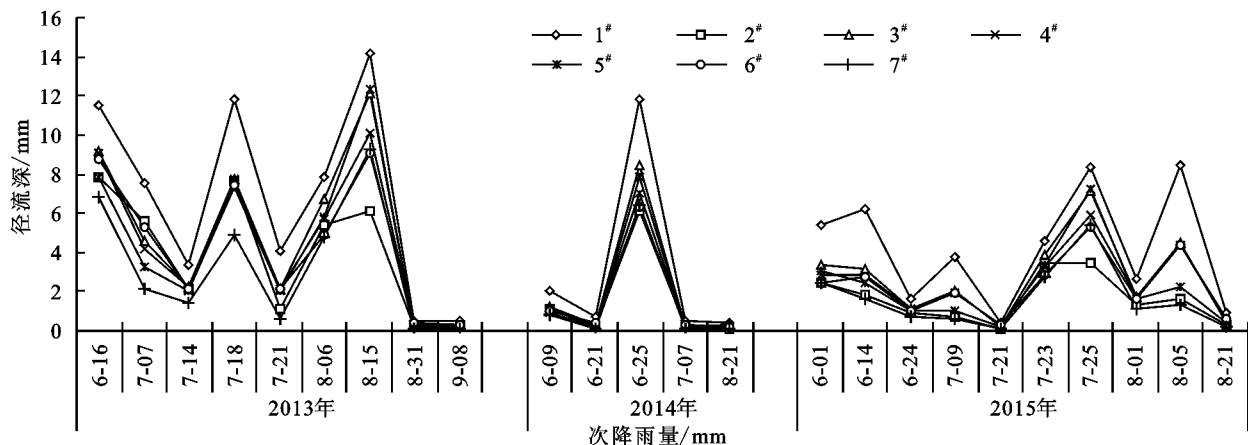


图2 不同治理措施径流小区次降雨径流量变化

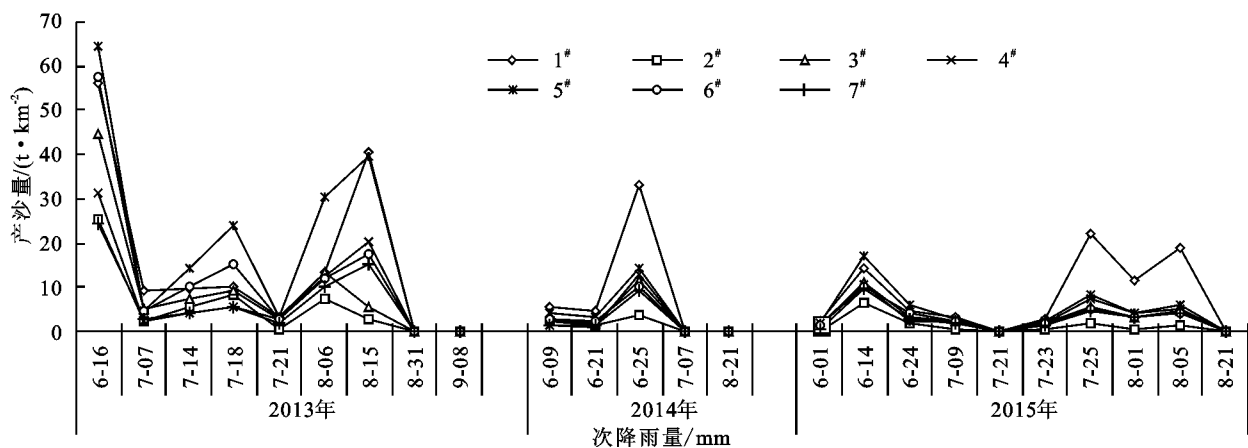


图3 不同治理措施径流小区次降雨产沙量变化

2.3 不同治理措施植被恢复期坡面年产流、产沙量变化

由图4可知,裸地(1[#])的径流量无论在何种雨强条件下均表现为最大,其年径流量在2013年、2014年、2015年分别为61.3 mm,15.46 mm,42.45 mm,因为2014年降雨较少,所以产生的径流量较少,而

2015年雨季降雨量为305.2 mm,是2013年雨季降雨量233.9 mm的1.31倍,但其年径流量是2013年的69.2%,不同治理措施下沙地柏+绣线菊灌丛植被(7[#])的年径流量最小,2013年、2014年、2015年的年径流量分别为30.17 mm,7.56 mm,16.23 mm,分别是裸地的49.2%,48.9%,38.1%,其次为生态袋

一字型布设措施(2[#]),其2013年、2014年、2015年的年径流量分别为对应年份无治理措施(1[#])的64.1%,51.1%,38.2%,生态袋品字型布设措施(3[#])的年径流量最大,其2013年、2014年、2015年的年径流量分别为对应年份无治理措施的73.7%,67.3%,64.5%。通过对比分析可知,不同治理措施间对径流的调控作用具有明显差异,但随着恢复年限的增加,生态袋一字型布设措施(2[#])恢复3 a后在2015年的年径流深为16.26 mm,较纯生物治理措施沙地柏+绣线菊灌丛(恢复7 a)年径流深16.23 mm略小。通过以上分析发现,生物+工程混合措施控制水土流失的效果要好于单纯的生物治理措施,能够有效地控制排土场边坡的水土流失。

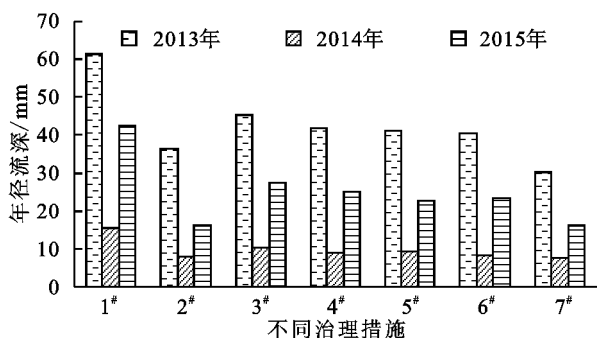


图4 不同治理措施径流小区年径流量比较

由图5的统计结果表明:坡面治理措施实施当年(2013年),铺设植生袋措施(5[#])的年土壤侵蚀量最大,为18 041 t/(km²·a),达到了剧烈侵蚀。其次为无任何治理措施的裸地(1[#]),其土壤侵蚀量为14 183 t/(km²·a),为极强烈侵蚀,生态袋一字型布设措施(2[#])的年土壤侵蚀量最小,为5 179 t/(km²·a),是沙地柏+绣线菊灌丛(7[#])治理措施年土壤侵蚀量6 358 t/(km²·a)的81.5%,治理当年各治理措施年土壤侵蚀量大小的顺序为:5[#]>1[#]>6[#]>3[#]>4[#]>7[#]>2[#],比值为3.5:2.7:2.3:1.7:1.5:1.2:1。措施实施第三年(2015年),工程+生物措施相结合的治理措施的水蚀控制效应明显,即生态袋一字型布设措施实施当年(2013年)的土壤流失量是未治理措施的36.5%,措施实施第三年时(2015年),生态袋一字型布设措施的年土壤流失量1 260.35 t/(km²·a),为轻度侵蚀,是未治理措施的15.9%。各治理措施实施3 a后(2015年)产沙量大小顺序为:1[#]>5[#]>4[#]>3[#]>6[#]>7[#]>2[#],其比值为6.3:3.8:2.8:2.6:2.5:2.2:1.0。通过上述试验数据的对比分析,随治理年限的增加,在排土场边坡实施治理措施后,其控制水蚀产沙效果逐步提高,且采取工程措施+生物措施相结合的水土流失控制效果要明显优于单纯的生物治理措施。

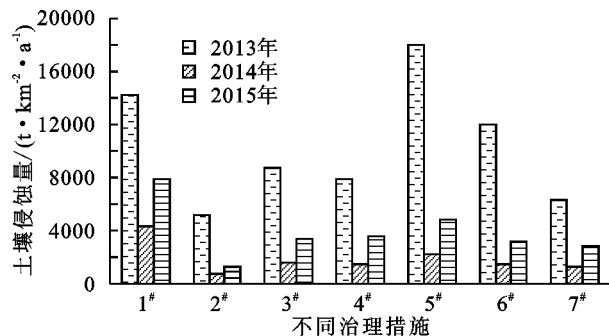


图5 不同治理措施径流小区年土壤侵蚀量比较

3 结论

(1) 在边坡治理初期,各治理措施之间坡面次降雨产生的径流量变化幅度较小,是裸地径流量的68.2%~79.1%,其不同治理措施的拦水蓄水功能较弱;治理措施恢复第3年时,生态袋一字型布设措施在2015年的年径流深为16.26 mm,比纯生物治理措施恢复7 a的沙地柏+绣线菊灌丛年径流深16.23 mm略小。

(2) 治理措施恢复初期,首次降雨产流时,排土场边坡的土壤侵蚀强烈,次降雨侵蚀量均达到中度以上的侵蚀强度,其中铺设植生带措施的产沙量为6 469 t/km²,是裸地产沙量5 640 t/km²的1.15倍,达到强烈侵蚀强度,而生态袋一字型布设措施的产沙量为2 545 t/km²,是裸地产沙量的45.1%。

(3) 当治理措施的植被盖度>35%时,各治理措施的产沙量均小于裸地,且雨强越大,生态袋一字型布设措施的阻沙能力越强,如在次降雨雨强为0.296 mm/min时,其产沙量仅仅为裸地的6.29%。

(4) 不同治理措施的年土壤侵蚀量差异明显,在治理措施实施当年,铺设植生袋措施的年土壤侵蚀量最大,为18 041 t/(km²·a),其次是裸地土壤侵蚀量,为14 183 t/(km²·a),生态袋一字型布设措施的年土壤侵蚀量最小,为5 179 t/(km²·a),是未治理措施裸地的36.5%;措施实施第3年时生态袋一字型布设措施的年土壤流失量为1 260.35 t/(km²·a),是未治理措施裸地的15.9%。

参考文献:

- [1] 白淑英,吴奇,沈渭寿,等.内蒙古草原矿区土地退化特征[J].生态与农村环境学报,2016,32(2):178-186.
- [2] 郭建英,何京丽,李锦荣.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,2015,31(3):296-303.
- [3] 徐嘉兴,李钢,陈国良,等.土地复垦矿区的景观生态质量变化[J].农业工程学报,2013,29(1):232-240.
- [4] 白淑英,朱倩文,沈渭寿,等.白云鄂博矿区生态退化研究[J].生态与农村环境学报,2016,32(3):367-373.

益评价是采用直接价值计算进行的一种初步尝试,此评价方法还有待于进一步完善。随着水土保持时间的增长,阳坑小流域水土保持综合效益也将逐步发挥出来,水土保持治理工作将取得更大成效。

参考文献:

- [1] 余新晓,毕华兴.水土保持学[M].3版.北京:中国林业出版社,2013:435-440.
- [2] 刘震.我国水土保持小流域综合治理的回顾与展望[J].中国水利,2005(22):17-18.
- [3] 孙昕.南方红壤区典型小流域水土保持综合效益评价[D].南京:南京林业大学,2009.
- [4] 何圣嘉,谢锦升,杨智杰,等.南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治[J].中国水土保持科学,2011,9(6):65-70.
- [5] 聂碧娟,林敬兰,赵会贞.水土保持综合治理效益评价研究进展[J].亚热带水土保持,2009(12):50-53.
- [6] 陈渠昌,张如生.水土保持综合效益定分析方法及指标体系研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2007,5(2):95-104.
- [7] 康玲玲,王云璋,王砚.小流域水土保持综合治理效益指标体系及其应用[J].土壤与环境,2002,11(3):271-278.
- [8] 孙昕,李德成,梁音.南方红壤区小流域水土保持综合效益定量评价方法探讨[J].土壤学报,2009,46(3):374-380.
- [9] 钟源,陈菊红,马安妮,等.南水北调陕西水源区水土保持效益评价[J].水土保持研究,2016,23(3):119-124.
- [10] 赵建民.基于生态系统服务的水土保持综合效益评价研究:以黄土高原中部丘陵为例[D].陕西杨凌:西北农

林科技大学,2010.

- [11] 车克钧,傅辉恩,等.祁连山水源涵养林综合效能的计量研究[J].林业科学,1992,28(4):290-296.
- [12] 沈慧,姜凤岐.水土保持林效益评价研究综述[J].林业科学,1998,10(4):492-496.
- [13] 林积泉,王伯铎,马俊杰,等.小流域治理环境质量综合评价指标体系研究[J].水土保持研究,2005,12(1):68-71.
- [14] 王建民,王如松.中国生态资产概论[M].南京:江苏科学技术出版社,2001:89-93.
- [15] 国家林业局.森林生态系统服务功能评估规范(LY/T1721—2008)[S].北京:中国标准出版社,2008:4-6,12.
- [16] (美)雷蒙德. M. 布鲁克斯著.财务管理[M].2版.路蒙佳,译.北京:中国人民大学出版社,2014.
- [17] 杨文利,罗煜全,赵建民.赣江中游阳坑小流域水土保持生态承载力估算[J].南昌工程学院学报,2015,34(3):67-70.
- [18] 李高飞,任海.中国不同气候带各类型森林的生物量和净第一生产力[J].热带地理,2004,24(4):306-310.
- [19] 许信旺,潘根兴,孙秀丽,等.安徽省贵池区农田土壤有机碳分布变化及固碳意义[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2551-2558.
- [20] 王兵,魏江生,胡文.中国灌木林—经济林—竹林的生态系统服务功能评估[J].生态学报,2011,31(7):1936-1945.
- [21] 《中国生物多样性国情研究报告》编写组.中国生物多样性国情研究报告[M].北京:中国环境科学出版社,1998.
- [22] 张颖.我国林木核算模型及其最优核算价格计算[J].林业经济,2009(12):49-52.

(上接第5页)

- [5] 卞正富,许家林,雷少刚.论矿山生态建设[J].煤炭学报,2007,32(1):13-19.
- [6] 付慧,白中科,张树礼.呼伦贝尔草原矿生态受损预测与修复对策[J].农业工程学报,2008,24(5):90-94.
- [7] 李永庚,将高明.矿山废弃地生态重建研究进展[J].生态学报,2004,24(1):95-100.
- [8] 王金满,杨睿璇,白中科.草原区露天煤矿排土场复垦土壤质量演替规律与模型[J].农业工程学报,2012,28(14):229-235.
- [9] 王治国,白中科.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,1994,8(2):10-17.
- [10] 王玲玲,姚文艺,王文龙,等.黄丘区坡沟系统不同时间尺度下的侵蚀产沙特征[J].水利学报,2013,44(11):1347-1351.

- [11] 台培东,贾宏宇,李培军,等.安太堡露天煤矿水土流失特征与控制[J].水土保持学报,2002,14(3):27-30.
- [12] 白中科,胡振华.露天矿排土场人为加速侵蚀及分类研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(1):34-40.
- [13] 李智佩,徐友宁,郭莉,等.陕北现代化煤炭开采区土地沙漠化影响及原因[J].地球科学与环境学报,2010,32(4):398-403.
- [14] 刘伟民,邢万昱.胜利东二露天矿排土工艺研究露天采矿技术[J].2009,(4):14-16.
- [15] 苏文贤.高台阶排土场的稳定性[J].矿山技术,1986(3):11-16.
- [16] 全国气象防灾减灾标准化技术委员会.《降水量,等级》(GB/T28592—2012)[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [17] 苗百岭,梁存柱,王伟,等.植被退化对典型草原地表径流的影响[J].水土保持学报,2008,22(2):10-14.