

沙棘“柔性坝”对沟道土壤粒径分布影响的试验研究

张涛¹, 李怀恩¹, 刘健¹, 毕慈芬², 乔旺林³

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048; 2. 黄河上中游管理局, 西安 710043;
3. 鄂尔多斯市水土保持科学研究所, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要:沙棘“柔性坝”取得了良好的拦沙效果, 为了进一步了解其对沟道土壤粒径分布的影响, 试验测定了种植沙棘“柔性坝”的沟道内不同位置、不同深度的土壤颗粒级配, 同时与一条未种植沙棘的小支沟进行了对比分析。结果表明: 同未种植沙棘的沟道相比, 由于沙棘的生长及其对坝内生态环境的逐渐改善, 坝内淤积的泥沙整体上呈细化趋势, 上游断面处此变化最为明显, 受局部地形的影响, 单个坝体内泥沙淤积无明显规律; 由于沙棘“柔性坝”的存在, 沟道内泥沙粒径从上游到下游呈递减趋势, 且沙棘对粒径大于 0.25 mm 的粗颗粒泥沙具有较好的分选效果。
关键词:砒砂岩地区; 沙棘“柔性坝”; 粒径分布; 泥沙淤积

中图分类号: S157.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)02-0022-04

Experimental Research on the Influence of Sea-buckthorn Plant Flexible Dams on Soil Particle Size Distribution

ZHANG Tao¹, LI Huai-en¹, LIU Jian¹, BI Ci-fen², QIAO Wang-lin³

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Bureau of the Upper and Middle Reaches of Yellow River, Xi'an 710043, China; 3. Erdos City Water Science Institute, Erdos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: It has been validated that sea-buckthorn plant flexible dam has positive effects on sediment retainment. In order to further understand the influence of sea-buckthorn plant flexible dam on particle-size distribution of soil in the valley, the distributions of soil particle size at different locations in different depths are measured and analyzed in a valley with sea-buckthorn dam and another small valley without sea-buckthorn planted. Results show that compared with the valley without sea-buckthorn dam, the sediment becomes finer in the sea-buckthorn valley especially in the upper cross section of the reach due to the sea-buckthorn plant self and its improving effects on ecological environment, and that there is no obvious regularity of sediment deposition along a single sea-buckthorn dam as a result of local topographical influence. Further, it is observed that the sea-buckthorn plant flexible dam can diminish the sediment particle size from the upper reach to the lower reach along the valley, and also can effectively filtrate the sediment grain with particle size bigger than 0.25 mm.

Key words: soft rock region; sea-buckthorn plant flexible dam; particle size distribution; sediment deposition

沙棘“柔性坝”是一种以沙棘植物作为坝体材料, 以一定株距和行距在沟道中垂直于水流方向, 交错种植若干行形成既能透水又能溢流的特殊坝体。它改变了沟道内的水流条件, 可以实现对泥沙的天然分选拦截, 达到水沙分治的目的, 把泥沙就近拦截在产沙的沟道之中, 而水可以通过坝体汇入下游河道或被人们生产、生活所利用, 被淤埋以后的枝干又可在淤积体内生出庞杂的侧根, 进一步固定淤积下来的泥沙。这一生态治理措施主要是针对砒砂岩地区特有产流、产沙、输沙特点而提出的。利用增大沟道糙率, 分散股流, 减小水流的行进流速, 消利水流的剪切应力, 使之小于泥沙的沉降速度, 从而起到消能的作用, 改变沟道的输水输沙特性, 最

终达到保水减沙、改善区域生态环境的目的。

1995年毕慈芬等人在内蒙古伊克昭盟(现鄂尔多斯市)准格尔旗西召乡西召沟小流域进行野外试验, 在西召沟左岸东一支沟1#谷坊以上布设沙棘“柔性坝”9座, 其中主沟5座(1#坝、1+1#坝、2#坝、3#坝、0#坝), 左右支沟各2座(6+1#坝、6#坝、4#坝、5#坝), 采用2~4年生沙棘, 共种134行, 总坝长302.5 m, 占东一支沟总沟长22%^[1]。具体布设见东一支沟沙棘“柔性坝”坝系平面布置图(图1)。后续的试验研究结果表明, 沙棘“柔性坝”不仅取得了良好的拦沙效果^[2], 而且改善了土壤水分的再分布^[3], 起到了很好的水土保持作用^[4]。

收稿日期: 2007-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50479067)

作者简介: 张涛(1981-), 男, 内蒙古乌兰察布人, 在读硕士, 主要从事水资源与水环境保护研究。E-mail: zhangtao127162@eyou.com

土壤粒径组成的变化不仅是沙棘“柔性坝”对泥沙分选拦截作用的真实体现,而且与土壤的理化性质紧密联系,影响着土壤的进一步改良。就种植沙棘“柔性坝”的沟道内土壤粒径的变化规律进行研究,试图从机理上对其拦沙过程加以探讨,为在砒砂岩地区进一步推广这一生物治理技术提供理论依据。

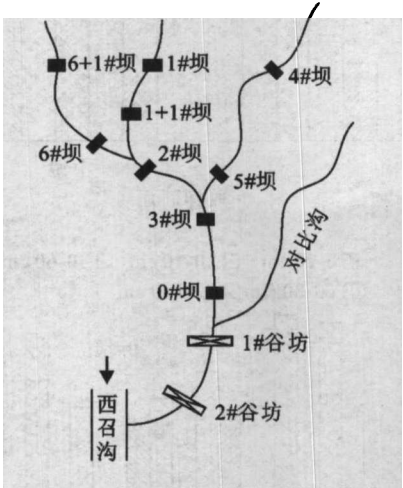


图 1 东一支沟沙棘“柔性坝”

表 1 东一支沟沟道基本特征

项目	沟道长度/ 沟底比降/ 沟道宽度/ 沟谷坡度/			
	m	%	m	(°)
主沟	平均		4.4	36.4
	最大	892	2.4	87.1
	最小		2.5	11.0
左支	平均		3.5	40.4
	最大	300	7.1	67.6
	最小		1.1	8.7
右支	平均		1.5	45.0
	最大	316	7.8	62.2
	最小		0.9	14.6

1 试验区概况

试验小区选择在西召沟左岸东一支沟进行,流域面积 1.70 km²,沟长 1 654 m。距沟头 864 m 处建造 1# 谷坊,1# 谷坊以上流域面积 0.26 km²,占东一支沟总流域面积的 15.3%,流域基本特征详见表 1 及图 1,其内的沙棘植物“柔性坝”,至今已有 12~14 a 树龄,长势良好。西召沟隶属于准格尔旗,地处鄂尔多斯台地的砒砂岩地区,气候变化强烈。四季温差大,夏季极端最高气温可达 40℃,冬季极端最低气温可达-30℃;风沙大,主要集中在冬春季节,平均风速 2~6 m/s,最大可达 20 m/s;暴雨集中,多年平均降雨量 389 mm,且降雨主要集中在 6—9 月,占年降雨量的 88.2%,次最大降雨量超过 59 mm。因此,在水蚀、风蚀、冻融侵蚀共同作用下,再加上人为破坏,径流产沙与非径流产沙交替作用,使该地区成为强水土流失区。径流产沙主要发生在次降雨量较大的暴雨中,非径流产沙随时都在发生,只是随季节侵蚀强度有所变化,并且为径流产沙创造条件,故成为水土保持治理的源头区。

为了研究沙棘“柔性坝”对沟道内土壤粒径分布在空间和时间上的影响,笔者分别于 2005 年 5 月及 2006 年 10 月

在东一支沟主沟道内的 0#,1#,2#,6# 坝及 1# 谷坊上游另一小支沟(对比沟)进行了土壤颗粒级配的试验研究。

2 试验方法

试验在东一支沟原有沙棘“柔性坝”内进行,2006 年测得各坝内沙棘平均高度为 2.28~3.87 m,平均基径为 3~7.5 cm,平均冠幅为 1.03~3.1 m,坝内草被繁茂,植被覆盖度达 75%~95%。试验欲从各坝内采样点垂向粒径的变化来分析沙棘“柔性坝”内泥沙年际间的累积淤积特征,从单座坝及沿沟道多座坝 0—20 cm 土壤粒径的变化来分析沙棘“柔性坝”对泥沙的分选拦截作用。

沿东一支沟从主沟沟头到 1# 谷坊上游沟口处分别对 6#,1#,2#,0# 沙棘“柔性坝”及对比沟分上、中、下游 3 个断面采样。各个坝分布于沟道的上、中、下游,分别与对比沟内的上、中、下游相对应。坝内上、中、下游断面依次为顺水流方向植株第一行、中间一行和最后一行沙棘的断面,对比沟的上、中、下游采样断面分别在距沟口 287,149.5,87 m 处。每个采样点视淤积层厚度挖深为 1 m 的坑(个别采样点淤积层厚度不够 1 m),取土时轻轻拨开枯枝落叶层,分 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 5 层取土样,所得土样经烘干后用筛分法进行级配试验。

以便对沙棘“柔性坝”内泥沙随坝龄增长的普遍淤积特征有一个较全面的了解,将 2006 年 6#,1#,2#,0# 坝内各取样断面各取样层土壤中大于某粒径泥沙累积质量百分含量进行对比,结果见图 2。各坝在东一支沟内所处的位置各不相同,将各坝内上、中、下游各断面不同取样层中大于某粒径泥沙累积质量百分数取均值后与对比沟内相应位置取样点进行比较,从整体上分析沙棘“柔性坝”拦沙特征随时间的变化,结果如图 3,不同填充图案代表不同采样层。

对 2005 年 5 月 1#,2#,5# 坝表层土壤(只有表层土壤颗粒级配数据)及 2006 年 10 月 6#,1#,2#,0# 坝内上、中、下游 0—20 cm 取样层土壤中大于某粒径泥沙累积质量百分含量进行对比来分析单座坝内纵向淤积特征,结果见图 4,不同填充图案代表上、中、下游。

表 2 2005 年 5 月东一支沟与对比沟颗粒级配比较 %

坝 号	粒径范围(粒径单位为 mm)						
	d>5	d>2	d>1	d>0.5	d>0.25	d>0.1	d>0.05
1# 坝	0.12	1.85	3.24	33.32	75.27	94.45	98.80
2# 坝	0.06	0.73	1.50	17.49	46.19	82.60	95.54
5# 坝	0.00	0.44	0.87	9.89	44.48	85.36	97.61
0# 坝	0.00	0.27	1.48	11.06	29.63	52.73	86.61
对上	0.44	8.39	16.41	35.58	50.63	79.04	95.48
对中	0.00	0.92	1.89	9.09	35.30	68.71	93.00
对下	0.00	5.26	11.51	34.13	57.65	82.06	95.18

为了减少取样时引起的随机误差,使试验数据更具有代表性,将 2005 年 1#,2#,5# 各坝内上、中、下游表层土壤大于某一粒径累积质量百分数取平均值,2006 年 6#,1#,2#,0# 各坝内上、中、下游的 0—20 cm 取样层土壤大于某一粒径累积质量百分数取平均值,2005 年 0# 坝和对比沟以及 2006 年对比沟为上、中、下游实测值,计算结果如表 2、表 3。

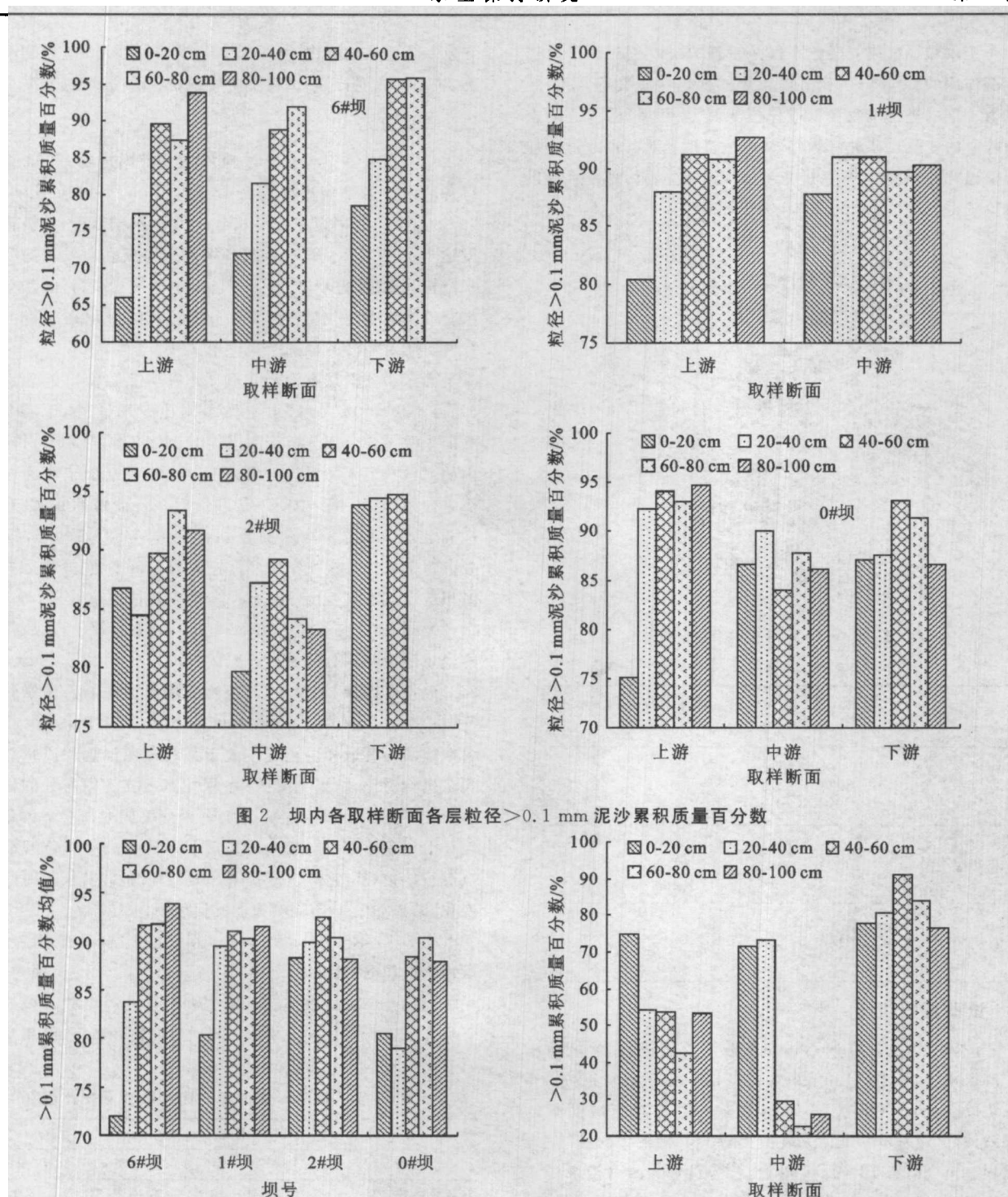


图2 坝内各取样断面各层粒径 >0.1 mm泥沙累积质量百分数

图3 各项在整条沟道内所处位置与对比沟相对位置垂向粒径变化

3 结果与分析

沟道内粗颗粒泥沙之所以能够发生迁移,主要是由于水流的挟带作用使泥沙输移造成的,当水流挟带的泥沙超过它的挟带能力时必定会发生淤积,当水流有富余能力挟带泥沙时必定发生冲刷,沙棘“柔性坝”的存在改变了水流形态,使得淤积或冲刷呈现一定的规律性,从而改变了沟道内泥沙粒径的分布。

3.1 沙棘“柔性坝”内垂向粒径分布

种植了沙棘“柔性坝”的沟道其水流阻力主要由土壤颗粒阻力,沟道形状阻力和植被阻力3部分组成^[5],而垂直作

用在水流上的植被阻力起着主导作用。从图2看出,在各坝上游断面处,垂向粒径变化呈现基本一致的递增趋势, >0.1 mm的土壤颗粒含量随采样层的深入而逐渐增加,只是增幅有所区别,而在中游和下游并无明显规律性。一方面是由于沙棘的自然生长使得坝内水流的流态年际间发生一定变化而且趋向复杂。新植“柔性坝”采用2~4 a生沙棘,株高50 cm左右,基径1 cm左右,枝干细而较软,坝内草被稀疏,此时,沙棘的枝叶起着主要的阻水作用,随着沙棘逐年长大,基径变粗、树高增长,同时由于坝内水分及养分条件的改善促进了坝内植物群落的发展,此时,沙棘干枝及坝内草被植物逐渐代替沙棘枝叶成为阻滞水流的主体,阻力特性发生了根

本变化,阻水效果进一步增强^[6],同时也使得坝内泥沙淤积情况也随之复杂多变。沙棘人工林地上部分生物量的速增期为5~7 a,12 a后便停止生长,生产量在7 a时达最大值^[7],随着植物群落的逐渐稳定,植被阻力才趋于稳定。另一方面沟内水流受到植物的阻滞作用,植物坝上游断面以上流速沿程减小,而且流速的减小幅度与至植物坝的距离成反比,在上游断面处降至最低,该断面后流速逐渐增大,到下游断面后开始逐渐恢复到近似于同样情况下无沙棘“柔性坝”时的流速,而且植物坝对水流的阻力越大,上游断面处水流流速就越小^[8],因而泥沙淤积也会逐渐变细。此外,流速的降低也使得水流对沟底的冲刷作用降低,粗颗粒难以随水流起动,植被覆盖状况的改善,增强了坝内土壤的抗冲性^[9]。6#坝、1#坝处在东一支沟上游位置,2#坝处在中游位置,0#坝处在下游位置,分别与对比沟的上中下游相对应。从图3可看出,虽然各坝内中下游垂向粒径变化无明显规律,

但对各坝内各层粒径 >0.1 mm 累积质量百分数取均值后发现坝内垂向粒径总体呈细化趋势,而对比沟内各取样点垂向粒径变化趋势差异较大。

3.2 单座沙棘“柔性坝”内粒径纵向变化

从图4可以发现各个坝内上、中、下游泥沙粒径变化趋势各异,并不呈现出一定的规律性,有先增后减、先减后增、一直增大几种形态。沙棘“柔性坝”内植物群落相对稳定后,坝内泥沙淤积更多的受到水流宽度、深度、流量、沟底比降等因素的影响,而这些影响因素随地形起伏变化各处不同,加之各坝内沙棘的株距、行距与种植时相比发生了很大的变化,疏密各异,也增加了各坝内纵向泥沙淤积的不一致性。从1#和2#坝两年的试验数据对比可以看出,如果上述影响因素变化不大,其变化趋势趋于一致。

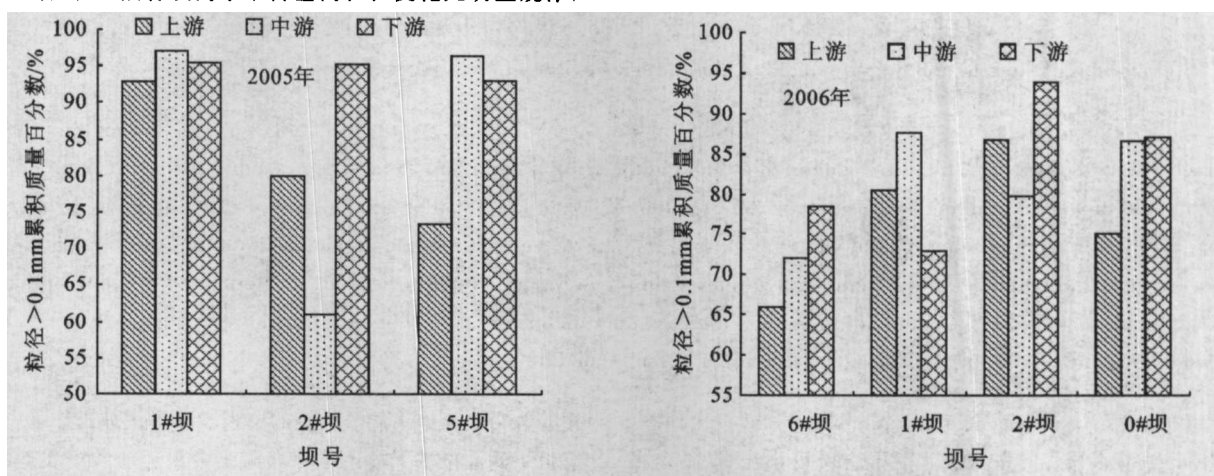


图4 各坝内上中下游粒径大于0.1 mm 泥沙累积质量百分数

表3 2006年10月东一支沟与对比沟颗粒级配比较 %

坝号	粒径范围(粒径单位为 mm)						
	$d>5$	$d>2$	$d>1$	$d>0.5$	$d>0.25$	$d>0.1$	$d>0.05$
6#坝	0.21	1.77	3.25	13.54	33.35	71.98	93.75
1#坝	5.55	11.56	14.85	35.74	64.93	88.26	96.12
2#坝	4.20	10.16	13.58	35.06	58.96	80.35	94.68
0#坝	0.82	3.47	5.19	17.39	45.77	80.55	96.66
0#出	0.00	0.62	1.13	8.18	24.00	41.78	64.96
对上	0.20	0.41	0.88	23.50	45.72	74.78	98.01
对中	0.02	0.03	0.11	8.70	31.43	71.46	96.85
对下	4.47	5.42	5.98	16.63	38.13	77.93	97.38
对出	0.00	0.00	0.28	14.28	41.18	83.39	98.57

3.3 沿沟道沙棘“柔性坝”内粒径纵向变化

从表2、表3可以看出东一支沟从上游到下游粒径变化呈递减趋势,越往沟道下游大于某一粒径的土壤颗粒就越少,其中1#坝→2#坝→0#坝→0#坝出口粒径沿程变化最为典型。两年中粒径 >0.05 mm 和 0.1 mm 两组数据虽排序均与粒径 $>0.25, 0.5, 1, 2, 5$ mm 5组数据排序有所不同,但变化并不显著,由此可以说明沙棘“柔性坝”对粒径 >0.25 mm 的粗颗粒具有较好的分选效果,而对于粒径 <0.25 mm, >0.05 mm 的中等粒径颗粒分选效果不明显。5#坝、6#坝及1#坝处在不同支沟的上下游,将其对比发现,5#坝、6#坝粒径分布均小于1#坝,这主要是由于1#坝处于

支沟上游,而5#坝、6#坝上游各有一座坝,已经拦截了部分粗泥沙。2006年数据中6#坝粒径分布均小于下游各坝,考虑到6#坝处在支沟中,下游各坝均在主沟中,虽经过6#坝的水流单位体积中含沙量及泥沙粒径下降,但随后与主沟水流汇合,而主沟水流含沙量及泥沙粒径仍然较大,从而使下游粒径分布大于上游的情况得以出现。0#坝出口与对比沟出口的粒径分布对比可以明显看出种植有沙棘“柔性坝”的沟道能够实现淤粗排细的分选作用。从图3及表2、表3均可见坝内大于某一粒径土壤颗粒的含量要明显大于对比沟,证明沙棘“柔性坝”对粗砂起到了良好的拦截作用,而对比沟内的粗泥沙流向了下游。对比沟内粒径变化也呈现出一定的规律性,上游和下游泥沙颗粒较粗,而中游较细,认为这主要是由于地形变化造成的,对比沟内只有稀疏草被植物,地形条件对沟道泥沙运移起着决定作用,如年际无较大变化,泥沙粒径分布亦不会有较大变化,这也说明沙棘“柔性坝”能够有效改善沟道输沙特性。

4 结论

沙棘“柔性坝”是一种利用沙棘自身特点和水动力学原理,将泥沙拦截于沟道、减少沟道侵蚀的一种有效的生物治理措施。试验结果表明:(1)沙棘“柔性坝”从种植开始,随着

(下转第39页)

m/s 时则成指数函数关系。但不论哪种函数关系,输沙率和输沙率百分比均随高度的增加而减小。

3.5 上、中、下各层输沙率与总输沙率的关系

为了更清楚揭示 0~48 cm 风沙流的结构特征,根据不同风速下总输沙率在各高度层的分布及其变化趋势,将 0~48 cm 分为 3 个高度层,上层 24~48 cm,中层 3~24 cm,下层 0~3 cm。各层输沙率与风速的拟合方程见表 7。

表 7 不同高度输沙率与总输沙率的关系

高度/ cm	关系式	相关 系数 r	相关选择 ($n=30$)
0~3	$Q_{0-3} = 0.7138 (Q_{0-48})^{0.8651}$	0.9961	最佳
	$Q_{0-3} = 1.3903 \ln(Q_{0-48}) + 0.4855$	0.9943	相关
	$Q_{0-3} = 0.4959 Q_{0-48} + 0.3297$	0.9874	相关
	$Q_{0-3} = 0.6762 e^{0.2947 Q_{0-48}}$	0.9449	相关
3~24	$Q_{3-24} = 0.2973 (Q_{0-48})^{1.1823}$	0.9971	最佳
	$Q_{3-24} = 0.465 Q_{0-48} - 0.2685$	0.9906	相关
	$Q_{3-24} = 0.2629 e^{0.4186 Q_{0-48}}$	0.9831	相关
	$Q_{3-24} = 1.213 \ln(Q_{0-48}) - 0.0326$	0.9281	相关
24~48	$Q_{24-48} = 0.0041 (Q_{0-48})^{2.1129}$	0.9960	最佳
	$Q_{24-48} = 0.0033 e^{0.7447 Q_{0-48}}$	0.9774	相关
	$Q_{24-48} = 0.0391 Q_{0-48} - 0.0613$	0.9197	相关
	$Q_{24-48} = 0.0952 \ln(Q_{0-48}) - 0.0348$	0.8047	不相关

由表 7 可以看出,各层的输沙率均随总输沙率的增加而增加,呈良好的幂函数关系。符合关系式 $y = Ax^b$; 设函数 $Z = Q/TQ$, 则

$$Z_{0-3} = Q_{0-3} / Q_{0-48} = 0.7138 (Q_{0-48})^{0.8651} / Q_{0-48} = 0.7138 (Q_{0-48})^{-0.1349}$$

$$Z_{3-24} = Q_{3-24} / Q_{0-48} = 0.2973 (Q_{0-48})^{1.1823} / Q_{0-48} = 0.2973 (Q_{0-48})^{0.1823}$$

$$Z_{24-48} = Q_{24-48} / Q_{0-48} = 0.0041 (Q_{0-48})^{2.1129} / Q_{0-48} = 0.0041 (Q_{0-48})^{1.1129}$$

式中: Z ——各高度层的相对输沙率。

可以看出,符合关系式 $Z = Ax^d$ 。由于, $d_{0-3} < 0 < d_{3-24} < 1 < d_{24-48}$, 说明 0~3 cm 高度层的相对输沙率随总输沙率的增加而减小, 3~24 cm 高度层、24~48 cm 高度层的相对输沙率随总输沙率的增加而增加, 而 24~48 cm 高度层的变化幅度要远大于 3~24 cm 高度层。

4 结 论

(1) 流动沙丘 0~48 cm 输沙率与风速成幂函数关系, 关系式为 $Q_{0-48} = 0.0001 V^{4.5976}$ 。

(2) 各高度层输沙率均随风速的增加而增大, 6 cm 以下高度层输沙率百分比随风速的增加而减小, 6 cm 以上高度层输沙率百分比随风速的增加而增大。

(3) 在风速一定的条件下, 各高度层输沙率或输沙率百分比均随高度的增加而减小。

(4) 上、中、下 3 层的输沙率均随总输沙率的增大而增大; 下层相对输沙率随总输沙率的增大而减小, 中、上层的相对输沙率随总输沙率的增大而增大。

参考文献:

- [1] 马世威. 风沙流结构的研究[J]. 中国沙漠, 1988, 8(3): 8-22.
- [2] 丁国栋, 奥村武信. 风沙流结构的风洞实验研究[J]. 内蒙古林学院学报, 1994, 16(1): 40-46.
- [3] 李钢铁, 贾玉奎, 王永生. 乌兰布和沙漠风沙流结构的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 276-278.
- [4] 李生宝, 蒋齐. 盐池沙地综合治理优化模式的建立及其结构调整[J]. 农业系统科学与综合研究, 1999, 15(2): 143-148.
- [5] 丁国栋. 野外风沙流结构的定量研究[J]. 内蒙古林业科技, 1994(4): 38-40.

(上接第 25 页)

坝龄的增加, 阻力特性发生了根本变化, 阻水效果进一步增强, 坝内水流形态的复杂多变, 致使局部泥沙淤积无一定规律, 坝前断面处泥沙淤积呈细化趋势, 但从整体上看坝内泥沙淤积也呈细化趋势。(2) 坝内植物群落稳定后, 泥沙淤积更多地受到坝内水流宽度、深度、流量、沟底比降等因素的影响, 坝内纵向变化无一定规律。(3) 种植沙棘“柔性坝”的沟道, 从上游到下游沿程泥沙粒径呈递减趋势, 而且对粒径 > 0.25 mm 的粗颗粒泥沙具有较好的分选效果。从而证明沙棘“柔性坝”具有改善沟道输沙特性, 实现了对泥沙的天然分选、淤粗排细的功能, 最终达到水沙分治的目的。因此, 加快在粗泥沙集中来源区沙棘“柔性坝”的建设, 对有效减少入黄粗泥沙、实现黄河下游河床不抬高将起到一定的积极作用。

参考文献:

- [1] 毕慈芬. 砒砂岩地区沟道植物“柔性坝”拦沙试验[J]. 中国水土保持, 2002(5): 18-19.
- [2] 毕慈芬, 王富贵, 李桂芬, 等. 砒砂岩地区沟道植物“柔

性坝”拦沙试验[J]. 泥沙研究, 2003(2): 14-25.

- [3] 李怀恩, 同新奇, 张康, 等. 沙棘“柔性坝”对土壤水分调控作用的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 69-72.
- [4] 杨方社, 李怀恩, 杨联安, 等. 小流域沙棘植物柔性坝系累积水保效应原型试验[J]. 泥沙研究, 2006(4): 10-14.
- [5] 刘锋, 邱秀云, 周著, 等. 植物“柔性坝”在不同底坡下水流特性的试验研究[J]. 新疆农业大学学报, 2005, 28(3): 53-57.
- [6] 张建军, 毕华兴, 张宝颖. 坡面水土保持林地地表径流挟沙能力研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(5): 25-28.
- [7] 李根前, 唐德瑞, 赵一庆. 沙棘群落生态学研究概述[J]. 水土保持学报, 2000, 14(5): 63-67.
- [8] 邱秀云, 阿不都外力, 程艳, 等. 植物“柔性坝”对水流影响的试验研究[J]. 水利水电技术, 2003, 34(9): 62-65.
- [9] 陈云明, 陈永勤. 人工沙棘林水文水土保持作用机理研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1357-1361.