

建坝顺序对坝系拦沙效率影响的试验研究

徐向舟^{1,2} 张红武³ 许士国¹ 王文龙²(1 大连理工大学土木水利学院 2 中国科学院水利部水土保持研究所,
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 3 清华大学水利水电工程系)

摘要:模型试验是验证坝系规划方案可靠性的重要方法。该研究以黄土丘陵沟壑区典型小流域的降雨产沙条件为背景,采用模型试验的方法,对两种布坝顺序的拦沙效果进行了对比试验。模型和原型各降雨输沙要素之间的比例关系通过理论推导和试验率定相结合的手段确定。试验结果证实,在各淤地坝的坝址、坝高(或库容)、控制面积上的平均侵蚀模数等参数都确定的条件下,若按照先主后支、先下后上的方案布坝,则经历相同系列年的降雨以后,沟道坝系总的拦沙、淤地效益高,且有利于坝系实现相对稳定。

关键词:黄土高原;沟道坝系;拦沙减蚀;半比尺模型试验

中图分类号:S774 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2009)01-0139-06

XU Xiang-zhou^{1,2}; ZHANG Hong-wu³; XU Shi-guo¹; WANG Wen-long². **Effects of dam construction sequences on soil conservation efficiency of a check-dam system.** *Journal of Beijing Forestry University* (2009) **31**(1) 139-144 [Ch, 11 ref.]

1 School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Province, 116024, P. R. China;

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling District, Shaanxi Province, 712100, P. R. China;

3 Department of Hydraulics & Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, P. R. China.

This study presents a physical modeling experiment to test the soil conservation efficiency of a check-dam system with different dam construction sequences. A conceptualized typical small watershed in the Loess Plateau was chosen as the prototype study area. Some of the model scales used in the experiment were determined by theory, whereas others were obtained by preliminary tests on the prototype rainfall-erosion parameters and those of the model. The results indicate that sediment in the catchment is easy to be trapped and the relative stability of the check-dam system is also easy to be realized when the check dams being built first main channel and then branch gully, meanwhile starting from the lower reaches of the watershed and moving to the upper reaches.

Key words the Loess Plateau; check-dam system; soil conservation; semi-scale model experiment

淤地坝的最佳建筑顺序及时间间隔问题是坝系优化规划的重要内容之一。坝系的最佳建筑时间顺序与时间间隔是指各坝的坝址、坝高(或库容)、控制面积上的平均侵蚀模数等参数都确定时,使坝系在计算期内总效益最大的建坝顺序与间隔^[1]。目前,黄土高原沟道坝系常用的规划方法有经验规划法和数学模型法。如果能将经验法或数学模型法初步确

定的坝系规划方案,通过实体模型的降雨模拟试验进行验证,根据降雨产沙试验的结果,从若干初选的坝系规划方案中,优选出一个最好的方案,则设计方案的可靠性将大为提高。但是,由于目前国内外还没有关于水土保持比尺模型相似性的比较成熟的研究成果,因此,进行坝系规划的实体模型试验比较困难。蒋定生等^[2]和袁建平^[3]曾以黄土高原典型小

收稿日期:2008-01-14

<http://www.bjfujournal.cn>, <http://journal.bjfu.edu.cn>

基金项目:黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(10501-175)、英国赠款中国小流域治理管理项目(K1-1)。

第一作者:徐向舟,博士,副教授。主要研究方向:水土保持和水环境治理。电话:0411-84708946 Email: xz xu@dlut.edu.cn 地址:116024 大连理工大学土木水利学院

流域为背景,采用流域几何地貌,根据原型按比例缩小,工程治理度、植物郁闭度及降雨和土壤条件都与原型一致的室内模型,研究淤地坝等水土保持措施对小流域水沙输出的影响,模型试验在一定程度上实现了模型与原型水土流失现象的相似,但学术方面仍存在争议^[4]。本研究拟采用文献[5]中提出的半比尺模型试验方法,以黄土丘陵沟壑区第Ⅰ副区典型小流域的坝系拦沙效应为背景,探索建坝顺序对坝系拦沙效率的影响。

1 原型概化情况

为进行方法探讨和规律性的研究,把具备黄土高原侵蚀产沙特点共性的典型小流域作为原型^[6]。概化后的黄土丘陵沟壑区第Ⅰ副区典型小流域面积为 3.32 km²,主沟长约 3 km,总高差 694 m,沟口以上 960 m 的沟床比降 2.3%。原型流域多年平均径流模数为 3.67 万 m³/(km²·a),多年平均土壤侵蚀模数为 20 811 t/(km²·a),多年平均清水径流深 2.72 cm,平均每年冲刷深度为 1.48 cm,年降暴雨总历时 120~480 min。概化原型治理前的年降雨产沙量 S_p(天然产沙量),相当于原型流域(治理前)出口处测得的一年输沙量总和,可以根据原型流域的多年平均侵蚀模数来计算: S_p = M_p A_p = 20 811 × 3.3 ≈ 6.87 × 10⁴ (t)。式中: M 为流域多年平均侵蚀产沙模数(t/(km²·a)), A 为流域面积(km²), p 代表原型。

2 试验概述

2.1 模型设计参数

本试验在清华大学黄河研究中心李各庄基地的 1# 试验场上进行,降雨模拟设备采用 SX2004 喷射

式降雨模拟试验系统。该装置的有效降雨高度约 5.5 m,可控降雨强度在 1.0~2.0 mm/min 之间。在可控雨强范围内,雨滴中径 1.0~1.5 mm,雨滴击溅速度接近雨滴终速,各种雨强下对应的降雨均匀度接近或超过 80%。模型的初始形态根据原型流域的地貌特征设计,根据原型尺寸和试验场地的条件,确定模型的水平比尺和垂直比尺均为 240,即模型坝高、沟道尺寸等按原型的 1/240 缩小,试验场地投影面积 10.8 m×6 m。模型土壤为与原型黄土接近的李各庄试验场附近的黄土。李各庄黄土的粒径分布与山西、甘肃、陕西各地的黄土粒径分布^[7]接近,如图 1 所示。

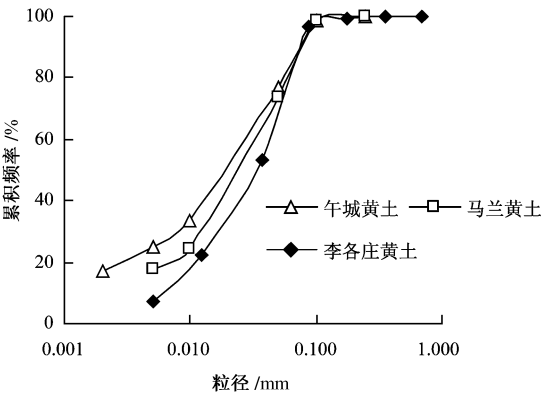


图 1 模型黄土与原型黄土粒径分布比较
FIGURE 1 Comparison of the particle size distribution between the model soil and the prototype one

参考坝系建设规范的有关要求,拟在原型的主沟和各支沟修建淤地坝,沟道坝系的平面布置见图 2 所示。模型次降雨持续时间 20 min,雨强约 1.60 mm/min(误差在 10% 以内)。模型的设计参数见表 1。

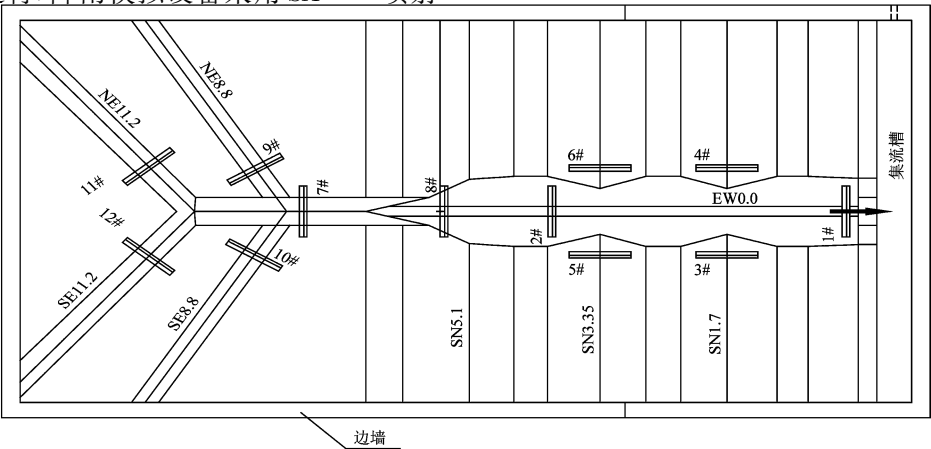


图 2 模型下垫面平面图及坝系布置方案

FIGURE 2 Plane graph of the model relief and arrangement scheme of the check-dams

注: ①A 方案建坝顺序:第 1 场雨前建 1# 坝→第 3 场雨前再建 2# 坝→第 4 场雨前再建 3#、4#、5#、6# 坝→第 5 场雨前再建 7# 坝→第 6 场雨前再建 8#、9#、10#、11#、12# 坝; ②B 方案建坝顺序:第 1 场雨前建 9#、10#、11#、12# 坝→第 2 场雨前再建 7# 坝→第 3 场雨前再建 3#、4#、5#、6# 坝→第 4 场雨前再建 8# 坝→第 5 场雨前再建 2# 坝→第 6 场雨前再建 1# 坝。
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 坝系模型设计参数

TABLE 1 Experimental parameters for the model check-dam system

原型流域参数		比尺	说明
名称	尺寸		
主沟道长度 L/m	3 008	$\lambda_L \approx 240$	试验场地要求
坝高 H/m	*	$\lambda_H \approx 240$	几何相似
流域面积 A/km^2	3.3	57 600	几何相似
降雨时间 t/min	120~480	$\lambda_t \approx 7.75$	重力相似
含沙量 $C/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	≈ 200	$\lambda_C \approx 3$	参见文献[8]
建坝前降雨产沙量 S/kg	6.87×10^7	$\lambda_S \approx 5.65 \times 10^5$	原型资料对模型率定, 见式(1)
干容重 $\gamma_0/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	≈ 1.56	$\lambda_{\gamma_0} \approx 1$	模型表面手工拍实

注: * 1#、2#、8# 为 68 m; 7# 为 35 m; 3#、4#、5#、6#、9#、10#、11#、12# 为 20 m。

2.2 试验步骤与观测方法

降雨后沟道的地形变化采用水准仪和测杆配合观测,流域出口处径流池中收集的次降雨泥沙量采用烘干法和密度瓶法配合测定,即模型出口输沙量的测量应采用泥沙粗细分层,将径流池中的细沙部分分离出来,采用密度瓶法观测;剩余的粗沙则采用加温的办法除去水分后称量即可^[9]。这种观测方法不仅结果可靠,而且工作效率也比较高。坝地面积采用数码相机和已知面积的长方形木框配合测量。由于坝地平整,在俯视的相片中,摆在坝地上的木框与坝地是按同样的比例变形的,于是通过 AutoCAD 测出相片中的坝地面积与木框面积,两者的比值乘以木框的实际面积即得试验中坝地的真实面积。每次试验前,先用小雨强湿润地面,对于原型流域同一个系列的降雨模拟试验,每次降雨后,间歇 24 h 再进行下一次降雨,这样除地形做好后的第一次降雨模拟试验以外,其余各次降雨下垫面的初始含水量和密实度都差不多。试验分以下两个系列进行。

首先,进行建坝前模型的降雨产沙特性率定。模型流域按设计的平面图纸和各特征点高程做好以后,连续进行 7 场变雨强的降雨模拟试验,研究非饱和含水裸地小流域模型建坝前的降雨产沙规律。在生产实践中,通常采用多年平均洪量模数和侵蚀模

数,作为流域产流产沙的指标来进行坝系建设进度计划的安排^[10-11]。在本试验中,可以根据建坝前原型流域的多年平均侵蚀产沙模数及模型流域的降雨/产沙关系,计算出原型与模型之间的输沙比例关系。根据试验的结果,在建坝前的第 5 场降雨模拟试验后,模型的降雨、下垫面土壤湿度和密实度等因素与建坝后历次降雨相应的条件最接近,这一组降雨产沙资料即为所需模拟的治理前模型降雨产沙资料;雨强 1.53 mm/min,降雨历时 20 min,天然产沙量 121.53 kg。于是,模型的次降雨输沙量比尺 λ_s 为:

$$\lambda_s = \frac{S_p}{S_m} = \frac{6.87 \times 10^7}{121.53} = 5.65 \times 10^5 \quad (1)$$

式中: S 为天然产沙量(kg), m 代表模型。

然后,进行不同布坝方案下的降雨产沙模型试验。在本试验中,淤地坝的布置顺序分 A 和 B 两种方案,A 方案是先主后支、先下后上,B 方案是先支后主、先上后下(图 2)。除了布置顺序不同以外,这两种方案对应的坝址、坝高都相同。按照概化的地貌做好模型初始下垫面地形,先根据图 2 中所示的 A 方案布坝,降雨模拟试验共进行 10 次,观测历次降雨的产流产沙变化过程及雨后地形。然后恢复地形,按 B 方案布坝,并采用与 A 方案一致的降雨,再进行 10 次降雨模拟实验,观测历次降雨的产流产沙变化过程及雨后地形。

3 结果与讨论

3.1 拦沙、淤地效果比较

小流域坝系规划的主要目标是拦沙和淤地造田。而且,由于淤地造田与拦沙量的多少有关,所以最重要的目标是拦沙,在此基础上,再确定经济和生态效益目标。本研究通过半比尺模型试验,比较两种不同布坝方案对小流域坝系拦沙、淤地效果的影响。两种布坝方案的降雨侵蚀试验结果如表 2 所示。

表 2 两种布坝方案的模型试验结果

TABLE 2 The observed data in the experiments with two dam arrangement schemes

试验组次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	合计
A 方案出口输沙量/万 t *	2.27	7.80	4.12	2.52	2.76	2.66	2.07	2.67	3.47	2.29	32.65
B 方案出口输沙量/万 t *	12.61	11.88	5.93	4.15	2.89	1.07	0.78	0.78	0.81	0.69	41.61
A 方案出口输流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ **	0.89	1.78	1.46	1.49	1.66	1.46	1.52	1.26	1.6	1.39	14.52
B 方案出口输流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ **	1.39	1.87	1.38	1.45	1.34	1.39	1.43	1.43	1.35	1.55	14.56

注: * 输沙量已按输沙量比尺式(1)转化为原型值; ** 输流量为模型试验值。

由于建坝前流域的下垫面状态相同,建坝后历次降雨动力及地形的雨前初始含水量也一致,即两种方案的天然产沙量一致,而天然产沙量为出口输沙量与坝系拦沙量之和,于是在两种方案中,10 次

降雨后出口输沙量之和较小者,其拦沙效果较为显著。模型试验的结果表明,经过 10 次特征降雨,若按 A 方案布坝,小流域总计输沙 32.65 万 t;若按 B 方案布坝,小流域总计输沙 41.61 万 t,前者比后者

少 21.54%。尤其在初期的几场降雨中,A 方案的拦沙效益更为显著。因此,从拦沙的角度而言,A 方案优于 B 方案。图 3 显示了两种布坝方案历次降雨后累计的出口输沙量,两种方案的次降雨输沙量已通过输沙量比尺转换成原型值。

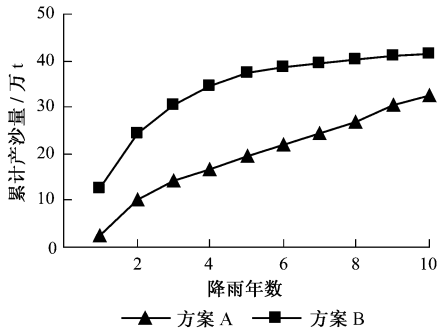


图 3 两种布坝方案的输沙量比较

FIGURE 3 Comparison of the cumulative sediment transport between scheme A and scheme B

淤地造田目标是根据小流域的沟道形态、经济社会现状及农村经济发展需求综合确定的。经过一定的年限后,坝系中累积形成的坝地面积越大,则沟道的侵蚀就越小,且坝系农业的效益就可能越高。

本研究中,两种布坝方案历次降雨后累计的坝地面积如图 4 所示。由图 4 可以看出,除了在第 3 次降雨以外,在其他历次降雨中,A 方案的淤地面积都大于 B 方案。经历 10 次特征降雨后,若按 A 方案布坝,累计淤地 0.42 km²;若按 B 方案布坝,累计淤地 0.35 km²,前者约为后者的 1.23 倍。因此,从淤地造田的角度考虑,A 方案亦优于 B 方案。

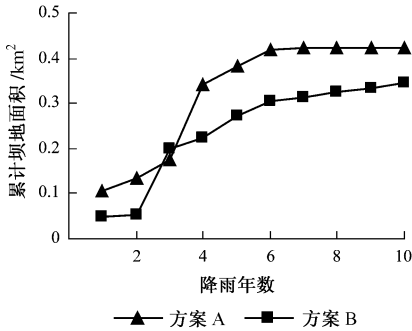


图 4 两种方案的淤地面积比较

FIGURE 4 Comparison of the dam-land area between scheme A and scheme B

当然,如果继续对模型实施降雨,随着降雨次数的增多,A 方案中各坝已经淤满,B 方案的个别坝库仍然还有库容,达到一定年限后,两种方案最终的拦沙量应趋于一致。但是,由于 A 方案较早地拦截了大量的泥沙,因此按该方案建坝,不仅较快地形成了坝地,有益于农业生产,而且能尽早地实现水土保持的治理效果。

3.2 机理分析

3.2.1 流量与输沙浓度对比

通过比较试验中两种布坝方案模型出口处降雨径流的平均含沙浓度(简称“输沙浓度”)和平均流量,可以得出两种布坝方案拦沙效果发生差异的原因。两种布坝方案历次降雨平均径流的流量相差不大(图 5)。10 次模拟降雨后,两种方案模型试验总的径流量几乎相等(A、B 方案模型试验流量分别为 14.52 和 14.56 m³,见表 2)。但两种布坝方案对流域出口处径流的含沙浓度影响较大(图 6)。

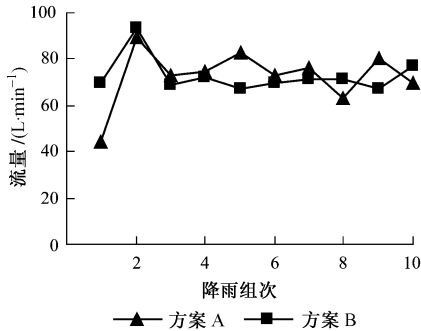


图 5 两种方案的流量比较

FIGURE 5 Comparison of the flow rate between scheme A and scheme B

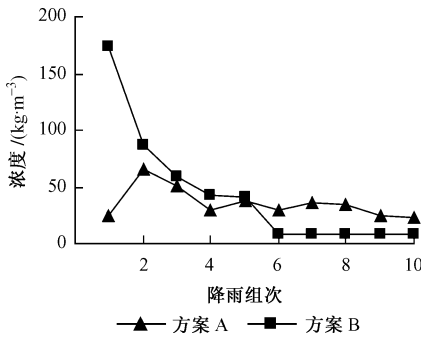


图 6 两种方案的平均输沙浓度比较

FIGURE 6 Comparison of the mixture concentration in the outlet between scheme A and scheme B

由图 6 可以看出,在前 4 次降雨中,A 方案的输沙浓度都大于 B 方案,尤其是第一次高强度降雨,A 方案的模型径流平均含沙浓度(25.32 kg/m³)仅为 B 方案浓度(174.39 kg/m³)的 14.52%。这说明本试验中,建造在主沟沟口的库容最大的 1#淤地坝拦截了大量泥沙,而且这种拦泥作用在坝系建设的初期流域输沙浓度较大时,效果最为明显;A 方案第一次降雨输沙量为 2.27 万 t,占总输沙量的 6.94%;B 方案 12.61 万 t,占总输沙量的 30.30%(表 2)。当然,由于 1#坝的库容较大(超过 9#~12#共 4 座淤地坝的库容总和),降雨后,蓄积在库内的浑水量也相对大一些,但在 B 方案中,虽然 1#坝的库容与 A 方案中 1#坝库容相等,但由于入库水流的含沙浓度

较小,大库容 1# 坝的拦沙优势没有发挥出来,所以总地来说,10 次模拟降雨以后,A 方案的拦沙量仍然大于 B 方案。

3.2.2 淤地面积与拦沙减蚀的关系

模型试验的研究成果证实,黄土高原典型小流域沟道侵蚀量大于坡面侵蚀量^[5]。淤地坝建成后,由于泥沙的淤积使库区原来侵蚀剧烈的沟道变成平整的坝地,减少了沟道侵蚀,但由于小流域不同部位的侵蚀程度不同,安排建坝顺序时及早控制土壤侵蚀剧烈的区域,必将有助于控制整个小流域的水土流失。相对于方案 A,方案 B 按自上而下、先支后主的顺序建坝,在起初的几场降雨中,发生在侵蚀现象最活跃的主沟道(冲沟侵蚀)和支沟的下游沟道中(切沟侵蚀或冲沟侵蚀)的水土流失完全没有控制,因而造成了巨大的水土流失。由表 2 可以看出,方案 B 中,前两场降雨的输沙量约占总输沙量的 58.87%;而在方案 A 中,前两场降雨的输沙量仅占总输沙量的 30.84%。

另外,在相同的初始地形、同样的建坝条件下(淤地坝的数量及各坝的坝高、坝址相同),由于建坝顺序的不同,导致淤地面积形成的速度不同,于是在相同场次的降雨后,累计形成的坝地面积不同。图 7 反映了两种布坝方案的淤地速度:按照 A 方案布坝,经过 6 场模拟降雨后,主沟道的所有淤地坝均已淤满;而按 B 方案布坝,10 场模拟降雨以后,库容最大的 1# 坝仍然没有淤满。较慢的坝地淤积速度也耽误了农业生产,影响了坝地经济效益的发挥。

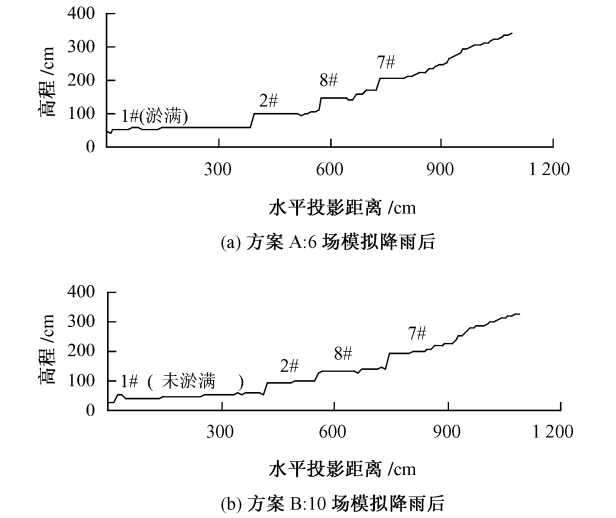


图 7 模型主沟道沟底纵剖面图

FIGURE 7 Profile of the main gully in the model experiment

坝系建成后,由于坝地的增加,一方面控制了更多的沟底冲刷,增加了淤地坝的减蚀能力;另一方面,由于坝库滞洪能力的减小,削弱了淤地坝的拦沙能力。总体来看,随着坝地面积的增加,坝系的拦沙

能力是逐渐减弱的。研究图 3 可以看出,当坝系建成后,随着降雨的持续,A、B 两种布坝方案的拦沙能力趋于接近,并且都逐渐减小(流域次降雨出口的累计输沙量增大),即坝系建成后,随着坝地的扩大,坝系的拦沙能力是逐渐减小的。

3.2.3 模型黄土对试验模拟的影响

本研究中,采用均质的、接近原型土壤的黄土作为模型沙,没有考虑到小流域中局部区域的侵蚀率特殊情况。同时,由于模型试验中初始含水量没有达到饱和,多次降雨后,模型表面将出现结皮现象,使模型天然产沙量逐次减小,这些都将对试验成果的精度造成一定的影响。然而,本研究旨在定性地比较两种布坝方案的拦沙减蚀效果,除了布坝顺序以外,淤地坝数量和结构设计以及模型小流域的初始地形、每次降雨模拟前的初始含水量都一致,因而对于 A、B 两种布坝方案,局部区域侵蚀率对总体土壤流失量的影响是一致的。同时,由于沟道建坝后只是将水沙就地拦蓄,对占流域面积绝大部分的坡面而言,其侵蚀情况并不因建坝而受到影响,因而,在本试验中,其土壤结皮对两种布坝方案次降雨天然产沙量的影响是同步的。因而,采用均质模型土壤和下垫面的结皮现象,并不影响对两种布坝方案优越性的定性判断。

4 结 论

本文采用半比尺模型试验方法,对比演示了黄土丘陵沟壑区第 I 副区典型小流域两种布坝方案不同的拦沙减蚀效果,证实了先主后支、先下后上布坝顺序的优越性。模型中的人工结构物及特征地貌根据原型按 1/240 的比例缩小,原型流域的次降雨产沙量按照年侵蚀产沙模数换算。研究结果表明:

- 1)半比尺模型试验是实现坝系优化规划的一种有效手段。通过实体模型的降雨模拟试验,从若干初选的坝系规划方案中,优选出一个最佳方案,可使设计方案的可靠性大为提高。
- 2)沟道坝系的拦沙、淤地效果与建坝顺序有很大的关系,先下后上、先主后支的 A 布坝方案较为优越。10 场模拟降雨后,A 方案的模型出口输沙量比 B 方案小 27.4%;同时,A 方案的淤地面积约为 B 方案的 1.23 倍。

3)A 方案拦沙效益大于 B 方案的原因主要有两个:一是方案 B 按自上而下、先支后主的顺序建坝,在起初的几场降雨中,发生在侵蚀现象最活跃的主沟道和支沟的下游沟道中的水土流失完全没有控制,因而造成了巨大的水土流失;另外,在早期的降雨模拟试验中,沟道洪水的含沙量较大,A 方案本着

先主后支的布坝顺序,大库容的 1 井、2 井坝较早修建,因而拦沙效率高,较早淤满。

参 考 文 献

[1] 武永昌, 黄林. 骨干坝系最佳建筑时间的存在条件及实际淤积期的计算[J]. 中国水土保持, 1995(6): 21-24.
WU Y C, HUANG L. Existing condition of the best time of key dam system construction and calculation of actual silting-up date[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1995(6): 21-24.

[2] 蒋定生, 周清, 范兴科, 等. 小流域水沙调控正态整体模型模拟实验[J]. 水土保持学报, 1994, 8(2): 25-30.
JIANG D S, ZHOU Q, FAN X K, et al. Simulated experiment on normal integral model of water regulating and sediment controlling for small watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 8(2): 25-30.

[3] 袁建平, 雷廷武, 蒋定生, 等. 不同治理度下小流域正态整体模型试验——工程措施对小流域径流泥沙的影响[J]. 农业工程学报, 2000, 6(1): 22-25.
YUAN J P, LEI T W, JIANG D S, et al. Simulated experimental study on normalized integrated model for different degrees of erosion control for small watersheds[J]. *Transactions of the CSAE*, 2000, 6(1): 22-25.

[4] 张丽萍, 张妙仙. 土壤侵蚀正态模型试验中产流畸变系数[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 450-455.
ZHANG L P, ZHANG M X. Research on runoff formation distortion coefficient in soil erosion experiment of a normal model of small drainage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4): 450-455.

[5] 徐向舟. 黄土高原沟道坝系拦沙效应模型试验研究[D]. 北京: 清华大学水利水电工程系, 2005.
XU X Z. A laboratory study on sediment-storage effect of check-dam systems in the small watershed of the Loess Plateau, China [D]. Beijing: Department of Hydraulics and Hydropower Engineering of Tsinghua University, 2005.

[6] 张红武, 徐向舟, 吴腾. 黄土高原沟道坝系模型设计实例与验证[J]. 人民黄河, 2006, 28(1): 4-5.
ZHANG H W, XU X Z, WU T. Examples and verification on model design of dam system in gullies of the Loess Plateau [J]. *Yellow River*, 2006, 28(1): 4-5.

[7] 刘东生. 中国的黄土堆积[M]. 北京: 科学出版社, 1965: 144-151.
LIU D S. *Loess distribution in China* [M]. Beijing: Science Press, 1965: 144-151.

[8] 张红武. 黄河下游洪水模型相似律的研究[D]. 北京: 清华大学水利水电工程系, 1995.
ZHANG H W. *The study of the law of similarity for models of flood flows of the lower reach of the Yellow River* [D]. Beijing: Department of Hydraulics and Hydropower Engineering of Tsinghua University, 1995.

[9] 徐向舟, 张红武, 张力, 等. 水土保持模型试验中产沙量观测方法的研究[J]. 中国水土保持, 2007(1): 35-37.
XU X Z, ZHANG H W, ZHANG L, et al. Study on methods of sediment yield measurement in model tests of soil and water conservation[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2007(1): 35-37.

[10] 郑新民. 黄土高原沟壑坝系建设有关问题探讨[J]. 中国水利, 2003(9): 19-22.
ZHENG X M. Discussion on construction of the check-dam system in the Loess Plateau, China [J]. *China Water Resources*, 2003(9): 19-22.

[11] 黄河上中游管理局. 淤地坝规划[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004: 62.
The Upper and Middle Reaches Administration of the Yellow River. *Arrangement of the check-dams* [M]. Beijing: China Planning Press, 2004: 62.

(责任编辑 李 慧 李 慧 女)