

# 不同治理度下小流域正态整体模型试验<sup>3</sup> ——工程措施对小流域径流泥沙的影响

袁建平 雷廷武 蒋定生 周群英

(北京师范大学) (中国科学院、水利部水土保持研究所)

**摘 要:** 该文首次运用正态整体模型试验方法研究小流域在不同治理度下的水沙变化规律。试验结果表明小流域坡面治理存在一个明显阈值,黄丘区第二付区为 80%;沟道布坝密度对流域径流泥沙影响显著,并首次提出黄丘区第二付区不同治理度阶段的布坝密度界限值。

**关键词:** 治理度;小流域;模型试验;工程措施

黄土高原多年来的治理开发实践证明,实施以小流域为单元多学科协同攻关的治理模式,是加快黄土高原综合治理的重要手段,并且取得了良好的水保、经济和社会效益。但是由于采用的小流域试验方法是根据大量的、长期的观测资料,经过统计分析来寻求事物的内在规律,因此资料可比性差,试验周期长,投资大,此外由于实际流域治理的不可重复性和对规划缺乏科学的检验,无法预测规划的可行性,如果规划出现技术上的失误,就会造成巨大的经济损失。为此,需要研究一种简化小流域试验周期和投资,并且能在短期内检验在小流域内实施各种水保规划合理性与否的方法,而采用以小流域为单元的正态整体模型试验方法恰好能满足这种要求。它是按照一定比例尺构建小流域试验模型,并配置各种治理措施,在人工降雨条件下,重现大暴雨引发的水土流失现象,观测模型流域产流产沙的变化过程,借以寻求小流域综合治理优化规划方案。

## 1 小流域正态整体模型试验简介

模型试验首先要解决模型与原型的相似性问题,即原型与模型应几何相似、运动相似、动力相似。由于本试验主要着重于小流域水土流失现象和各种综合治理措施的模拟,因此试验只需保证原型与模型几何相似、运动相似、动力相似<sup>[1]</sup>,而对于原型与

模型降雨相似、土壤相似问题参见文献[2,3]。鉴于此,本试验确定原型与模型长、宽、高比例尺分别为 1:400,即实行正态、整体模型试验<sup>[1]</sup>。

模型试验设在中科院、水利部水土保持研究所安塞水土保持综合实验站,原型为地处延河中上游的纸坊沟小流域,流域总面积 8127 km<sup>2</sup>,土壤为黄绵土,侵蚀模数为 14 000 t/km<sup>2</sup>·a,梁峁顶最大相对高差 20517 m,上下游沟床高差 210 m,平均纵比降 37%,沟谷已大多切入基岩。模型面积 5117 m<sup>2</sup>,模型最大长度 1416 m,最大宽度 512 m。

### 1.1 模型建造

1) 根据 1:5000 的原型小流域地形图,确定出小流域边界及流域内部特征地物的坐标和高差,按比例缩小 400 倍。用砖筑砌边墙,水泥砂浆抹面防渗,边墙稍高于小流域边界各对应点的模型高度,为防止流域外降水溅入模型,用水泥沙浆将砖墙顶部作成三角形。

2) 清除模型底部杂草、碎石,并挖松 20 cm,然后向内填土,分层夯实,填土边界到达预定高程后,留出沟道中心线及边缘线位置,对照地形图,并由原型实地考察的标记按比例雕刻出模型微地貌形态。

3) 在模型上按照一定治理度配置各种治理措施,其中包括生物措施(林、草)、工程措施(梯田、柳谷坊、淤地坝)及耕作措施(等高耕作)。

4) 在模型流域出口处建一个径流泥沙观测设施。

### 1.2 下垫面水土保持治理措施的模拟

#### 1.2.1 水平梯田模拟

水平梯田是改造坡耕地的一项重要工程措施。

收稿日期: 1999204227 修订日期: 1999210215

3 国家“九五”科技攻关项目(962004205212)及中科院“百人计划”基金共同资助。

袁建平, 博士后, 北京 北京师范大学资环系, 100875

根据小流域治理经验, 水平梯田一般应配置在地面坡度较平缓, 光温资源条件较好, 离居民点较近的坡中下部。模拟的水平梯田田埂用白铁皮制成, 埂高 10 cm, 为防止雨水沿缝隙向下渗漏, 需要在模型边墙垂直于梯田田埂处筑一高 10 cm 的土埂挡水, 同时在两台梯田的连接处, 培筑土埂, 挡水防渗。

#### 11212 草地模拟

人工草地是治理坡地水土流失, 发展畜牧业生产的一项重要措施。草地模拟时, 先在模型上把拟铺植草皮的区域沿等高线整理成反坡水平阶, 然后铺植根系完好带土的长茅草和白羊草, 用剪刀将铺植草皮修整齐, 草高 5 cm。

#### 11213 林地模拟

林地模拟主要着重于枝叶截留和枯落层构成两方面。先根据纸坊沟流域林地面积和分布区域, 在模型对应区域铺上洋槐林地挖来的完整块状枯落层(厚 3~4 cm), 然后插上高为 10 cm 的带叶新鲜柳枝, 郁闭度约为 0.18。

#### 11214 柳谷坊模拟

制作柳谷坊时, 先用长 20 cm, 直径 1~1.15 cm 的柳枝, 一端削尖, 在谷坊位置处垂直水流方向打入两排排距 10 cm, 桩距 5 cm 的柳桩。柳桩高出沟道 10 cm, 然后用细柳条在每条桩上编织成篱笆, 中间用小石块填实。

#### 11215 淤地坝模拟

淤地坝是黄土高原小流域治理的一项独特的水土保持工程措施。淤地坝模拟采用“二大件”, 即坝体和溢洪道。具体过程为: 在地形图上结合实地调查, 选出坝址, 然后在模型上按地形图上选出的坝址确定模型上淤地坝的坝址; 在修筑溢洪道时, 在坝体地势较好一侧开挖一深渠, 用土将结合部位填实, 一般溢洪道进口距沟道高差 5 cm (骨干坝) 和 315 cm (淤地坝), 进口处用水泥处理, 使之牢固, 免于流水沟蚀。骨干坝的溢洪道用铁槽模拟, 淤地坝的溢洪道用两根上下排列的橡胶管模拟。骨干坝坝高 11 cm, 淤地坝坝高 6~8 cm。

#### 11216 农耕地模拟

农耕地是小流域泥沙的重要来源地。模拟时在模型对应农耕地区域上沿等高线耙松其表土层。

#### 11217 沟床模拟

采用堆砌小石块和水泥沙浆在模型相应区域对沟床及两岸基岩进行模拟, 以保证原型和模型在地貌形态上的相似性。

## 2 试验方法

试验采用人工降雨方法进行。降雨装置为 SR 型野外人工模拟降雨装置, 雨滴发生器为下喷钟摆式降雨器, 兼具侧喷式和下喷式的优点<sup>[4]</sup>。模拟降雨装置的驱动马达由 2 台直流稳压电源控制, 通过调节电源电压, 改变马达的转速来控制喷头的摆动和截流水槽移动的频率, 装置采用潜水泵供水加压, 雨幕控制面积为 5 m × 15 m, 雨滴降落高度为 214 m, 雨滴平均粒径为 118 μm, 降雨均匀系数在 0.175~0.185 之间。由于黄土高原造成强烈土壤侵蚀的降雨为短历时高强度的暴雨<sup>[5]</sup>, 故而本试验采用的降雨强度均为 210 mm/h, 属高强度降雨。

在模型流域出口处设集流堰, 将水沙导入集流桶中。每隔一定时间读取集流桶水位读数, 采集泥沙水样, 用烘干法称取泥沙重量。

## 3 试验结果与分析

模型试验于 1996~1998 年间进行, 本文主要研究坡面(梯田)、沟道(淤地坝、柳谷坊)水土保持工程措施在不同治理度下对小流域径流泥沙的影响, 关于水土保持生物措施(林、草)及生物措施、工程措施综合作用下, 小流域径流泥沙变化规律将在另文予以报道。

### 3.1 坡面治理程度对小流域径流泥沙的影响

随着坡面治理程度的提高, 流域产流产沙过程有明显变化, 当坡面治理度较低时, 流域产流产沙量较大, 坡面治理度提高后, 产流产沙量逐渐减小, 但减流效益不如减沙效益显著。当治理度达到 80% 后, 坡面治理度的提高对产流产沙影响甚微(图 1)。由此可见, 在小流域坡面治理度中, 存在一个明显的适宜值, 我们称之为治理度阈值(约为 80%)。

### 3.2 沟道布坝密度对小流域径流泥沙的影响

沟谷是泥沙、洪流输移通道, 是梁峁坡和沟坡产流的汇集地, 易造成强烈冲刷。因此, 为抬高侵蚀基准, 防止沟床下切, 拦蓄坡面径流泥沙, 常在沟道修筑淤地坝、柳谷坊等工程措施, 而流域内淤地坝设计中布坝密度与工程投资、淤地速度、坝地防洪保收程度及坡面治理等情况紧密相关, 用淤地面积和流域面积之比来表示。根据不同洪水设计标准及控制面积的大小, 试验时布设相应数目的淤地坝, 观测沟口径流、泥沙变化及淤地坝淤积、毁坏情况。

在同一坡面治理度下, 随着布坝密度的增加, 减

流减沙效益十分显著(图 2)。当降雨历时小于 25 min 时,径流量与时间呈指数关系;随着降雨历时的延长,产流速率趋于常数,径流量与时间呈线性相关(表 1)。这主要是因为降雨初期,各坝拦蓄洪水能

力强,而降雨 25 min 后,其拦蓄能力达到极限值,产流也趋于平稳。而产沙量在整个降雨过程中均与降雨历时呈指数相关。

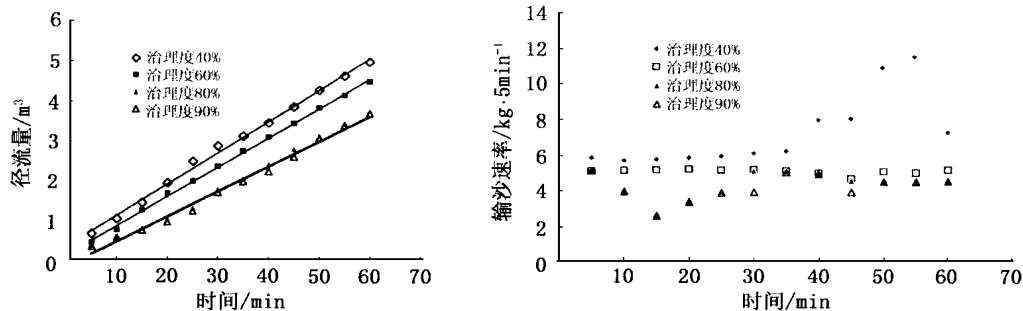


图 1 坡面不同治理度下小流域径流泥沙变化曲线

Fig11 Curves for runoff and sediment of small watershed under different erosion control degrees of slope surface

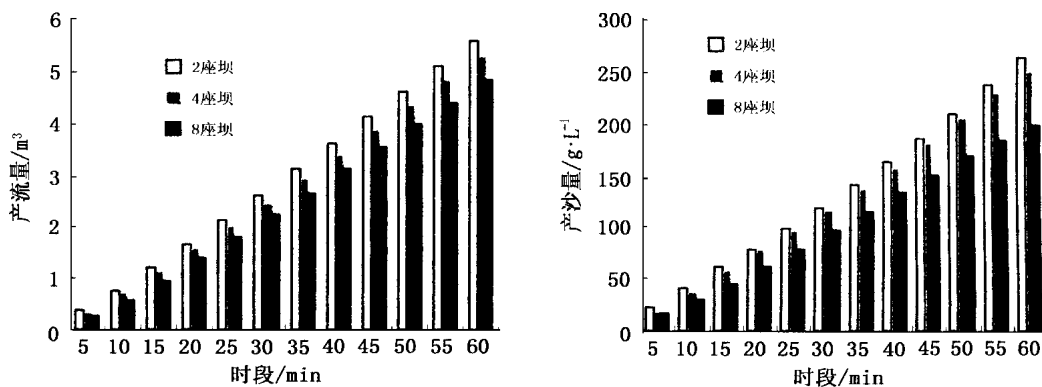


图 2 不同布坝数目下次暴雨径流泥沙变化

Fig12 Runoff and sediment for storm events under the different dam numbers

表 1 不同布坝数目下径流量  $Q$  ( $m^3$ )、产沙量  $Y$  ( $g/L$ ) 与降雨历时  $t$  (min) 关系

Tab11 The relations of runoff ( $m^3$ ), sediment load ( $g/L$ ) with rain duration (min) under different numbers of dams

布坝数目	径流量与降雨历时回归方程	相关指数
2	$Q = 0.1374 \cdot e^{0.1071t}$ ( $t \leq 25$ )	$r = 0.1994$
	$Q = -0.13098 + 0.10983t$ ( $25 < t \leq 60$ )	$r = 0.11000$
	$Y = 43.1319 \cdot e^{0.1031t}$	$r = 0.1993$
4	$Q = 0.1346 \cdot e^{0.1072t}$ ( $t \leq 25$ )	$r = 0.1993$
	$Q = -0.13705 + 0.10945t$ ( $25 < t \leq 60$ )	$r = 0.11000$
	$Y = 42.1304 \cdot e^{0.1031t}$	$r = 0.1991$
8	$Q = 0.1272 \cdot e^{0.1077t}$ ( $t \leq 25$ )	$r = 0.1994$
	$Q = -0.13809 + 0.10872t$ ( $25 < t \leq 60$ )	$r = 0.11000$
	$Y = 35.1669 \cdot e^{0.1030t}$	$r = 0.1988$

由图 2 可知,当布坝密度为 107915 时,支沟(布有淤地坝的除外)、支毛沟沟头侵蚀严重,沟道两岸塌陷等重力侵蚀频繁;当其值为 105415 时,由于支沟沟头已得到较好治理,此时沟口产流、产沙量比 107915 时分别减少了 512% 和 419%;当其值增至 102818,且在支毛沟修建柳谷坊群后,沟头溯源侵蚀、重力侵蚀得以有效控制,沟口产流产沙量比 107915 时减少了 13117% 和 24148%。减流减沙效益的显著提高是由于淤地坝、柳谷坊抬高侵蚀基准面,毛沟的柳谷坊、支沟的生产坝及主沟的骨干坝层层拦蓄,有效地遏制了重力侵蚀,阻止了沟床下切、沟头溯源侵蚀和沟岸扩展。通过比较不同布坝密度下流域产流产沙的变化情况,初步得出以下结论:黄土丘陵沟壑区第二分区小流域当布坝密度小于 1070 时,该流域属于初步治理阶段;当其值为 1060~ 10

50 时, 属于中等治理阶段; 小于 1030 时, 已形成完善坝系, 可产生坝系防洪、拦泥、淤地综合治理规模效益。

#### 4 结 论

1) 小流域综合治理正态整体模型试验是一项开拓性的工作, 国内外均未进行过。其主要是针对水土流失现象进行模拟, 通过模型试验来检验流域内水土保持措施体系的配置对水沙的调控程度。因此, 只要保证模型几何相似、流态相似、泥沙输移问题相似就能取得令人满意的结果。

2) 小流域模型试验结果表明, 流域坡面治理存在一个临界值(阈值), 该值以下, 流域产流产沙量随治理度的变化而变化幅度增大; 该值以上, 量值变化幅度缓慢。

3) 流域内随着布坝密度的加大, 其减流减沙效益明显提高, 初步得出不同治理程度下的布坝密度值。

#### [参 考 文 献]

- [1] 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 水土保持学报, 1994, 8(2): 25~ 30
- [2] 雷阿林, 唐克丽 土壤侵蚀模型实验中的降雨相似及其实现 科学通报, 1993, 40(21): 2004~ 2006
- [3] 雷阿林, 史衍玺, 唐克丽 土壤侵蚀模型实验中的土壤相似性问题 科学通报, 1996, 41(19): 1801~ 1804
- [4] 蒋定生 黄土高原水土流失与治理模式 北京: 中国水利水电出版社, 1997. 293~ 294
- [5] 王万忠, 焦菊英 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙 北京: 科学出版社, 1996 34~ 40

## Simulated Experimental Study on Normalized Integrated Model for Different Degrees of Erosion Control for Small Watersheds

Yuan Jianping Lei Tingwu Jiang Dingsheng Zhou Qunying

(Institute of Water and Soil Conservation, CAS and MWR, Yangling 712100)

**Abstract:** For the first time, a series of simulated experiments on normalized integrated model for different degrees of erosion control were conducted to investigate the relation of runoff and sedimentation. The results showed that there is a critical value for the erosion control of slope surface, which was about 80 per cent, in accordance with the experimental results, in the secondary subregions of Hilly and Gully Loess Regions. Moreover, the density of dams in the gullies had obvious effects on runoff and sedimentation in watersheds. And the critical value for dam density on different degrees of erosion control was suggested for the secondary subregions.

**Key words:** erosion control degree; small watershed; model test; engineering measure