

# 黄土丘陵沟壑区小流域治沟骨干工程淤积量 预报模型探讨

张维江<sup>1</sup>, 孙保平<sup>1</sup>, 郭文锋<sup>2</sup>, 李亚军<sup>3</sup>

(1 北京林业大学资源与环境学院, 北京 100083;

2 宁夏自治区水土保持局, 宁夏银川 750001; 3 宁夏西吉县水利水保局, 宁夏西吉 756200)

**摘 要:** 黄土丘陵沟壑区治沟骨干工程泥沙淤积来源于坡面侵蚀、沟道侵蚀和库区岸坡坍塌。控制面积的坡面侵蚀量可以根据同一地区的径流试验小区资料进行计算; 库区岸坡坍塌量可以通过实测现库岸地形, 并与建库初期库岸地形比较计算而得; 通过实测已建骨干工程的淤积量, 并减去相应的坡面侵蚀量和库区岸坡坍塌量, 便可求得沟道侵蚀量。在先期建立坡面侵蚀量、沟道侵蚀量分别与降雨、土地利用状况和流域特征等相应预测因子相关关系的基础上, 建立了治沟骨干工程淤积量的预测模型, 实际检验结果表明, 模型的最低精度为 79%。

**关键词:** 小流域; 治沟骨干工程; 土壤侵蚀; 黄土丘陵沟壑区; 淤积量

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2002)01-0107-05

## Approach to the Sediments Prediction Model of Check Dam in Loess Hilly-gully Area

ZHANG Wei-jiang<sup>1</sup>, SUN Bao-ping<sup>1</sup>, GUO Wen-feng<sup>2</sup>, LI Ya-jun<sup>3</sup>

(1 Resource and Environment College of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2 Soil and Water conservation Bureau of Ningxia, Yinchuan 750001, Ningxia Autonomous Region, China;

3 Water Conservancy and Soil and Water Conservation Bureau of Xiji County 756200, Ningxia Autonomous Region, China)

**Abstract:** Sediments of check dam in small watersheds in loess hilly-gully area come from three proportion, i.e., soil erosion on the sloping area, gully erosion and bank breakdown around the reservoir. Amounts of soil erosion on slope could be calculated on the basis of the data of plot experiment in the same area, and the sediments induced from bank breakdown could be calculated out by comparing the original and current landform of the bank. Through surveying the sediments of the check dam, the sediments from gully erosion would be the difference between total amounts and parts from slope erosion and bank breakdown. According to the prediction models established firstly between the slope erosion amounts, gully erosion amounts and their corresponding predictors such as rainfall, land use and topographic features of the small watershed, a model for predicting the total sediments of check dam could be derived with a precision of 79% at least.

**Key words:** small watershed; check dam; soil erosion; loess hilly-gully area; amount of sediments

## 1 前 言

水土保持治沟骨干工程是小流域综合治理的最

后一道防线, 它除了抬高侵蚀基点、保证小流域内坡面治理达到一定程度时泥沙不出沟而减少进入下游水库和入黄泥沙量, 同时所蓄积的水量可供当地人

畜饮用和作为灌溉水源,起到了治理与开发的综合作用,深受当地人民欢迎。

治沟骨干工程的坝高与其设计使用年限内的淤积库容密切相关,而目前使用的利用悬移质多年平均输沙模数确定其淤积量存在以下问题:

(1)此种方法只适合于大、中流域。  
(2)不能较准确地考虑流域治理状况对土壤侵蚀以及淤积量的影响。

(3)小流域土壤侵蚀量与流域出口的输沙量之间的关系与大、中流域是有区别的。

(4)已建成的治沟骨干工程的淤积实况表明,按上述方法设计的工程有些在建成后近10年淤积量较少,而有些工程在建成后很快出现大量的淤积。

针对上述问题,并结合对各种水土保持措施进行评价和对水土流失预防监督工作中的有关保护、预防、监督措施进行量化,进行以小流域为研究对象的土壤侵蚀与其出口的输沙过程之间的关系研究是十分必要的。

## 2 小流域的基本概况

试验选择了葫芦河上游西吉县境内的小甘井、窦家坝、高同、芦子沟和三岔等5个小流域及相应的骨干工程为研究对象。葫芦河为渭河上游的一级支流,位于六盘山西麓,在宁夏区内面积为 $3\,281\text{ km}^2$ ,其位置为东经 $105\,25\sim 106\,14$ ,北纬 $35\,29\,32\sim 36\,11\,37$ 。试验小流域所在地多年平均气温 $4\,5$ , $10$ 的有效积温为 $1\,900\sim 2\,100$ ,年平均日照时数 $2\,322\text{ h}$ ,无霜期为 $106\text{ d}$ ,多年平均降雨量 $428\text{ mm}$ ,降雨主要发生在7~9三个月。试验区内自东向西沟岸逐渐变陡,蓄水后岸坡坍塌逐渐加剧;悬移质多年平均输沙模数为 $2\,000\sim 10\,000\text{ t/km}^2$ 并由东向西逐渐增加。地表大量分布为第四纪新黄土,沟底出露有第四纪老黄土,属中、重粉质壤土。滥泥河是葫芦河的一级支流,位于研究区的西部。各小流域基本情况大致如下(流域特征见表1):

(1)小甘井、窦家坝小流域:位于西吉县新营乡境内,沟道属葫芦河一级支流,两流域相邻。其中小甘井小流域进行了大规模的治理,效益显著;窦家坝小流域自然条件与小甘井相同,但未曾进行大规模治理。

(2)高同、芦子沟小流域:均位于西吉县城郊,沟道亦属葫芦河一级支流,小流域内未进行大规模的综合治理,坡耕地占绝大部分。

(3)三岔小流域:在西吉县马建乡境内,位于葫

芦河一级支流——滥泥河上,进行了小规模治理。

表1 小流域特征表

流域名称	流域面积/ $\text{km}^2$	流域长度/ $\text{km}$	流域宽度/ $\text{km}$	沟壑密度/ $(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	平均坡度/ $(^\circ)$
小甘井	3 766	2 76	0 80	0 92	13 5
窦家坝	3 344	3 00	1 20	0 88	10 5
三岔	4 920	2 40	1 00	0 97	19 5
芦子沟	9 104	4 72	2 12	1 02	11 2
高同	14 500	4 48	1 48	1 20	10 7

## 3 研究方法和内容

骨干工程淤积量是土壤侵蚀的结果。所谓土壤侵蚀,主要指不同营力作用下,地表物质受侵蚀后的分离、分散、搬运和堆积、沉积的过程。就本地区而言,降雨及径流为主要侵蚀力,表现为水蚀的各种类型并兼有不同程度的重力侵蚀。土壤水力侵蚀的机理、形式尤其是流域出口的输沙过程,大流域与小流域存在很大差别。就小流域而言,流域内坡面坡度单一,沟道组成简单,这就决定了小流域和大流域的流域土壤侵蚀与流域出口的输沙过程关系是完全不同的。根据研究的目地和获得资料的方法,这里把小流域出口的输沙量定义为“小流域土壤侵蚀量”;而骨干工程的淤积量即多年的小流域土壤侵蚀量。

小流域土壤侵蚀量由三部分组成:坡面土壤侵蚀量、沟道侵蚀量和重力侵蚀量。这样划分是基于雨滴击溅和径流冲刷能力在各种土壤侵蚀类型中所起的作用不同。雨滴击溅对各种土壤侵蚀类型产沙量的影响程度按从大到小的次序排列为:面蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀、切沟侵蚀、沟道侵蚀,浅沟以下其影响已经很小;径流的冲刷能力对各种土壤侵蚀类型产沙量的影响程度是从小到按上述次序排列的,且从浅沟开始已起主导作用;骨干工程库水位以外的沟道岸坡坍塌是沟道长期冲刷累加效应,因而归于沟道侵蚀;水面范围内的所谓库区岸坡坍塌是由于受水长期浸泡其土壤抗剪强度降低而发生滑坡所致,虽属降雨间接引起,但滑动机理主要决定于土体本身物理力学性质,把这一部分称为重力侵蚀。研究径流场小区侵蚀规律时,由于受出口(坡面下部)集流设施(一般为砂浆抹面)控制,坡面上也仅发生到细沟侵蚀为止,因而对小流域土壤侵蚀进行这样的划分也正与其试验研究方法取得了一致。因此骨干工程的淤积量亦即多年小流域土壤侵蚀量可分为多年坡面侵蚀量(面蚀、细沟侵蚀)、多年沟道侵蚀量(浅沟侵蚀、切沟侵蚀和沟道侵蚀)和多年重力侵蚀量三部分组成。

坡面侵蚀量可通过径流小区预报模型进行计算。沟道侵蚀量可通过对实测的骨干工程淤积量进行分析而得到的预报模型进行计算。

3.1 坡面侵蚀量

在大坪水保站布设径流小区,共设置了4种土地利用方式为农地、多年生经济作物、灌木林地和荒坡地,每种土地利用方式对应10°、15°、20°、25°四种坡度,设置自记雨量计,测得不同坡度不同土地利用方式下的产流量、产沙量、降雨前后土壤含水量以

及次降雨量、降雨历时和最大30 min降雨量。通过1993~1996年共计16次产流降雨,共计244组数据,利用非线性回归和剔除变量分析,得出径流小区年坡面产沙模数 $M_1(t/km^2)$ 与年降雨量 $X(mm)$ 、坡度 $I(°)$ 和年产流降雨次数 $n$ 有下列关系:

$$M_1 = K I^{\alpha} n^{\beta} X^{\gamma} \tag{1}$$

$K、\alpha、\beta、\gamma$ 与土地利用方式有关,见表2,(1)式中 $I、n、X$ 对 $M_1$ 的偏相关系数 $R_1、R_2、R_3$ 及复相关系数 $R$ 见表3。

表 2 方程(1)回归系数及相关系数取值表

系 数	$K$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R$
农 地	$3.85 \times 10^{-25}$	1.5524	4.0411	8.7112	0.9397	0.8347	0.6365	0.9728
多年生经济作物	$5.89 \times 10^{-25}$	1.2519	3.9740	8.7295	0.8453	0.9176	0.7492	0.9417
灌木林	$107 \times 10^{-25}$	1.1597	3.4108	8.3769	0.6279	0.7376	0.5135	0.8056
荒 坡	$417175 \times 10^{-25}$	0.8458	3.0439	6.6919	0.6572	0.8218	0.5776	0.8600

由表2可知,偏相关系数在0.5135~0.9397之间,复相关系数在0.8056以上。

小流域年坡面侵蚀量 $(m^3)$ :

$$W_1 = \sum_{i=1}^n A_i M_{1i} / \gamma \tag{2}$$

式中: $A_i$ ——第 $i$ 种土地利用方式对应的面积 $(km^2)$ ; $\gamma$ ——淤积泥沙容重 $(t/m^3)$ 。

3.2 沟道侵蚀量

对上述的5座骨干工程中的小甘井、窦家坝、三岔各年度的淤积量和土地利用情况进行观测和调查,取得小甘井1993~1996年、窦家坝1993~1995年、三岔1996年的各年度数据见表3。先用(1)式计算各年度各种土地利用方式的坡面侵蚀量,因为观测年份库区无明显坍塌,利用下式推算出实际沟道

侵蚀模数(详见表3)。

$$M_2 = (W_1 - A M_1) / A$$

通过对小流域年降雨量 $X$ 、产流降雨次数 $n$ 、流域平均坡度 $I$ 、流域面积 $A$ 、流域长度 $L$ 和宽度 $B$ 、沟壑密度 $G$ 、坡耕地比例 $P$ 、林地比例 $V$ 、荒坡地比例 $U$ 等因子与沟道侵蚀模数 $M_2$ 之间进行多因子线性回归和剔除变量分析,得:

$$M_2 = -4617.6 + 300.4I + 2.7X + 19.43P - 42.3U \tag{3}$$

其偏相关系数和复相关系数均达0.95以上。

小流域年沟道侵蚀量 $W_2(m^3)$ 为:

$$W_2 = A M_2 / \gamma \tag{4}$$

表 3 小流域实际沟道侵蚀模数观测与计算表

流域名称	年份	骨干工程淤积量 $/m^3$	降雨量 $/mm$	坡耕地面积 $/km^2$	坡耕地坡面侵蚀模数 $/(t \cdot km^{-2})$	林地面积 $/km^2$	林地坡面侵蚀模数 $/(t \cdot km^{-2})$	荒坡面积 $/km^2$	荒坡坡面侵蚀模数 $/(t \cdot km^{-2})$	沟道侵蚀模数 $/(t \cdot km^{-2})$
窦家坝	1993	47	311.5	2.130	6.67	0.539	5.329	0.472	4.19	14.0
	1994	584	313.7	2.327	55.90	0.264	32.3	0.421	20.8	200.4
	1995	2594	420.2	2.599	288.30	0.068	173.8	0.262	74.3	852.6
小甘井	1993	23	311.5	0.537	9.86	0.468	7.13	0.480	5.183	5.6
	1994	250	313.7	0.203	82.58	0.889	43.18	0.294	25.725	76.3
	1995	1161	420.0	0.240	425.86	0.644	232.49	0.280	91.93	358.1
	1996	976	476.7	0.057	1283.5	0.416	671.57	0.462	214.53	242.8
三岔	1996	19000	350.9	2.817	3757.2	0.012	1028	0.483	292.8	3224

3.3 骨干工程淤积量预报模型

骨干工程在设计使用年限 $T$ 内,其淤积量 $V(m^3)$ 为:

$$V = \sum_{i=1}^T W_{1i} + W_{2i} + \dots + W_3 \tag{5}$$

$W_{1i}、W_{2i}$ 为多年小流域坡面侵蚀量和沟道侵蚀量,用式(1)、(2)、(3)、(4)计算,各年度降雨

量可用多年平均降雨量代替。

$W_3$  为  $T$  年内库区岸坡坍塌量, 可根据  $T$  时间内历时最大和最小水位通过滑坡分析得出, 此处不作讨论。

4 成果检验与说明

4.1 模型检验

表 4 骨干工程淤积量预报模型检验成果表

年度		1997	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	合计/m <sup>3</sup>	相对 误差/%
窦家坝	实测						1609	47	584	2594	1160	1851	2696	10550	12
	计算						2325	58	147	3363	1813	1839	2270	11815	
小甘井	实测							79000	19000	3300	13700	115000			6.5
	计算						1990	73	207	1226	452	0	2209	6157	
三岔	实测								7900		19000	3300	13700	115000	21
	计算							14655	11063	14282	10434	13812	13161	77407	
芦子沟	实测					103000						3430	18800	125230	0.09
	计算	5244	10166	7415	44216	5920	6303	6230	9292	9523	5560	3923	11232	118894	
高同	实测								67000		12300	29000	108300		17.2
	计算							14655	18152	18430	11783	8953	15521	85514	

注: 实测淤积量中已扣除了库区岸坡坍塌量。

骨干工程的淤积量在扣除岸坡坍塌量后, 可反推出各流域的实际侵蚀模数 $M_{实}$ ; 用式(1)~(4)计算出各小流域在骨干工程运行期间的侵蚀模数 $M_{计}$ ; 将各小流域的林地、草地及梯田全部假定为坡耕地, 采用各小流域的多年平均降雨量用式(1)~(4)计算出各小流域在骨干工程运行期间的未经治理的侵蚀模数 $M_{未}$ ; 查《宁夏回族自治区地表水资源》的“悬移质多年平均年输沙模数分区图”得各小流域的悬移质多年平均输沙模数 $M_{沙}$ , 详见表 5。

表 5 各小流域的 $M_{实}$ 、 $M_{计}$ 、 $M_{未}$ 和 $M_{沙}$ 数值表  
 $t/(km^2 \cdot a)$

流域	高同	小甘井	窦家坝	芦子沟	三岔
$M_{实}$	1743	307	631	1605	5454
$M_{计}$	1376	327	707	1524	3671
$M_{未}$	1932	2096	953	1703	4347
$M_{沙}$	4250		4700		> 5000

由表 5 可知, 骨干工程在运行期间, 小流域的实际侵蚀模数 $M_{实}$ 与预报计算值 $M_{计}$ 比较接近, 小于我们假定未经任何治理而计算出的侵蚀模数 $M_{未}$ , 而悬移质多年平均输沙模数远远大于上述三个值。另外, 从高同到三岔, 侵蚀模数和输沙模数的地区分

布规律趋势是一致的。 $M_{实}$ 与 $M_{计}$ 相近, 说明预报模型可以应用于骨干工程的淤积量计算中; $M_{实}$ 、 $M_{计}$ 均大于 $M_{未}$ , 说明不同程度的小流域治理措施使小流域土壤侵蚀量有不同的减少; $M_{沙}$ 偏大, 说明在小流域土壤侵蚀计算中, 使用“悬移质多年平均年输沙模数分区图”是不合适的, 况且, 也不能反映流域治理对其产生的影响。

布规律趋势是一致的。 $M_{实}$ 与 $M_{计}$ 相近, 说明预报模型可以应用于骨干工程的淤积量计算中; $M_{实}$ 、 $M_{计}$ 均大于 $M_{未}$ , 说明不同程度的小流域治理措施使小流域土壤侵蚀量有不同的减少; $M_{沙}$ 偏大, 说明在小流域土壤侵蚀计算中, 使用“悬移质多年平均年输沙模数分区图”是不合适的, 况且, 也不能反映流域治理对其产生的影响。

布规律趋势是一致的。 $M_{实}$ 与 $M_{计}$ 相近, 说明预报模型可以应用于骨干工程的淤积量计算中; $M_{实}$ 、 $M_{计}$ 均大于 $M_{未}$ , 说明不同程度的小流域治理措施使小流域土壤侵蚀量有不同的减少; $M_{沙}$ 偏大, 说明在小流域土壤侵蚀计算中, 使用“悬移质多年平均年输沙模数分区图”是不合适的, 况且, 也不能反映流域治理对其产生的影响。

4.2 说明

(1) 土地利用方式中, 把近些年修建的高标准梯田的降雨侵蚀产沙量做零处理。该项目的准备工作开始于 1992 年, 在所研究的流域内至 1998 年未发生梯田水毁现象, 所以我们认为在骨干工程设计标准之内做这样的处理是合理的。

(2) 该地区人工林(尤其是乔木)少量零星分布, 对小流域土壤侵蚀影响甚微, 在小流域沟道侵蚀建模过程中被剔除, 而在坡面侵蚀中均作柠条处理。因此人工乔木林对土壤侵蚀的影响尚须进一步研究。另外, 建模过程中把人工草地归于农地类。

(3) 该地区年产流降雨次数在试验观测期为 3~5 次, 均取平均值 4 进行计算。

(4) 坡面侵蚀中荒坡(未经扰动的裸露坡面)产沙量最少。沟道侵蚀中产沙量与荒坡比例呈负相关,

这是模型本身的特点所致,但也说明荒坡面积增大可减少沟道侵蚀量。因此,从减少土壤侵蚀角度出发,除了为促进当地经济发展而投资修筑高标准梯田外,封围保护是一种快速而经济的方法。

(5)有关库区岸坡坍塌量计算,主要决定于土壤的物理和力学性质和库水位,牵涉到黄土丘陵沟壑区山体滑坡这样一个广泛的课题,应作为专项研究课题进行研究。

#### 参考文献

- [1] 王治华,黄联捷 降雨与流域产沙——黄土高原产沙模型之一[J]. 中国科学(B 辑), 1992, 9(9).
- [2] 吴发启,赵晓光,刘秉正 黄土高原南部坡耕地土壤侵蚀预报[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 6(2).
- [3] 焦菊英,刘元保,唐克丽 小流域沟间与沟谷地径流泥沙来量的探讨[J]. 水土保持学报, 1992, (3): 4- 6
- [4] 雷阿林,唐克丽 坡沟系统土壤侵蚀研究回顾与展望[J]. 水土保持通报, 1997, 6(3).
- [5] 美国土壤保持协会 土壤侵蚀预报与控制[M]. 北京: 农业出版社, 1981.
- [6] 长江水利委员会主编 水文预报方法(第二版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993
- [7] 孙立达,孙保平等 小流域综合治理理论与实践[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992
- [8] 江忠善,王志强,刘志 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 1(2).
- [9] 辛树帜,蒋德麒 中国水土保持概论[M]. 北京: 农业出版社, 1982 年.
- [10] 朱显谟 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[M]. 水土保持通报, 1981(3- 4), 1982, (1- 3).
- [11] R·拉格尔主编 土壤侵蚀研究方法[M]. 黄河水利委员会宣传出版中心译, 北京: 科学出版社, 1991.

(上接第 93 页)

### 3.3 实物量汇总

根据实际要求,可将项目中所要使用的各种物资逐年用量采用不同的方式汇总。

## 4 输出结果

COSTAB 根据所输入的基础数据可产生一系列结果,包括:

(1)详细成本表。经计算详细列出某一项目工程的逐年投资和总投资额,可以包括基本费用、含物价波动费和不可预见费的总费用、每个投资者对这项工程每年每项所应支付的金额等,这些都可以按需要选择地计算。

- (2)按子项目计算的成本表。
- (3)按概算科目计算的项目总费用。
- (4)投资计划表。
- (5)采购计划表。
- (6)实物量汇总表。

## 5 COSTAB 软件的优缺点

### 5.1 优点

- (1)速度快,可节省大量人力物力。
- (2)准确性高。
- (3)分析全面。

(4)便于操作。这种软件系统均采用对话框式显示,比较直观。

(5)修改方便。由于该系统都只涉及项目的基础数据,当方案变动时只需修改有关的基础数据就可以了。

### 5.2 缺点

(1)操作系统特殊。这种系统要求必须使用英文 WINDOW S3.0 或英文 W N 95, 否则不能进行计算。但是结合中文之星软件可以将其汉化。

(2)该软件是英文软件,产生的报表也是英文的,对于英文基础差的人来说使用不方便。

(3)操作者应当具备计算机和农、林、牧等方面的综合专业知识,对计算机结果能迅速进行分析与调整。

## 6 结 语

COSTAB 软件应用方便,各种数据能够保存,更新,反复使用。它可以很方便地计算建设期内某一年,某几年或所有年份的某一项,某几项或全部的成本。

COSTAB 软件的运用,使得水土保持规划成本的分析趋于自动化,规范化和系统化,能够极大地减少人力、物力和财力的浪费,缩短规划工作的周期,从而在有限经费的情况下,推动水土保持规划工作向“高、深、细”发展。