

建立砒砂岩区坝系相对稳定规模模型的探讨
——以内蒙古皇甫川西黑岱沟小流域坝系为例

康 熠¹, 侯华敏², 秦新平²

(内蒙古鄂尔多斯市水保队, 鄂尔多斯 017000; 鄂尔多斯市伊旗水土保持监督局)

摘 要: 以位于黄土丘陵沟壑区第一副区砒砂岩区的内蒙古皇甫川流域的西黑岱沟小流域坝系为典例, 在坝系相对稳定分析的基础上, 利用处于相对稳定的单坝资料, 通过回归分析法, 推求淤地面积、坝高和控制面积的相关关系, 初步分析并建立不同频率暴雨洪水条件下坝系相对稳定的数学模型, 探求相对稳定单坝设计及坝系规划的规模依据, 以期抛砖引玉、起到推进该地貌类型区坝系相对稳定的研究与实践的作用。

关键词: 黄土丘陵沟壑区第一副区; 砒砂岩区; 坝系相对稳定; 数学模型

中图分类号: S 157 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2003) 04-0022-04

Exploration on Founding the Pattern in Scale of a
Relatively Stable Dam System in Sandstone Area

KANG Yi¹, HOU Hua-min², QIN Xin-ping²

(1. Erdos Water and Soil Conservation Surveying and Planning Team, Erdos 017000, Inner Mongolia, China;

2. Yijinhulo Banner Water and Soil Conservation Supervisory Office, Erdos 017200, Inner Mongolia, China)

Abstract: Based on the typical case- Inner Mongolia Xiheidai gully small vallay's dam system that is situated in the first vice-area of the loess hills gully area, and the analysis about the relatively stable dam system, in order to inquire into the interrelation among silt area, dam's height and controlling area, these sinlge-dam data were used to be in relative stableness and the mathematical patterns of relatively stable dam system under different conditions for torrential rain frequency was found through regression analysis, and the scale basis for relatively stable single-dam design and dam system plan as well. It will play a part in advancing research and practice about relatively stable dam system in the same geomorphologic area.

Key words: the first vice-area of loess hills gully area; sandstone area; relatively stable dam system; mathematical pattern

1 流域概况

西黑岱沟小流域位于黄土高原北部内蒙古西部皇甫川流域, 属黄土丘陵沟壑区第一副区的砒砂岩区, 是皇甫川的三级支沟暨国家一期治理工程的重点小流域, 坡面治理与沟壑治理程度都较高。据 2002 年调查, 全流域 32 km² 的面积内治理措施面积为 21. 71 km², 治理度达到 67. 8%, 输沙模数已由治理前的 1. 48 万 t/(km² · a) 减少为现状的 0. 90 万 t/(km² · a)^[1], 减水效率达到 57. 3%^[2]。

流域内黄土层厚达 20 ~ 30 m, 黄土下伏三叠系泥质砂岩——砒砂岩, 主沟较为宽阔, 沟底由上游的 50 ~ 80 m 到下游的 100 ~ 200 m, 呈 U 型, 沟深 30 ~ 100 m; 支毛沟切割较深, 沟底狭窄, 呈 V 型, 沟坡较陡, 最大可达 70 以上; 天然开析度 38. 8%, 沟壑密度 3. 7 km/ km², 沟壑面积 0. 237 km²/ km², 达到极强度侵蚀程度。

流域水沙的产生是基于降水的产生而产生的。多年平均降雨量 385 mm, 多以暴雨形式出现, 集中产生于 6 ~ 9 月份, 占年降雨量的 84. 9%, 其中, 产流雨量占集中降雨的 78. 3%; 多年平均降雨侵蚀力 920 mm/(hm² · h), 强度降雨侵蚀力占 85. 7%; 降雨产流频率 67. 2%; 径流平均含沙量 315 kg/m³。自 1975 ~ 1996 年, 经过试验探索(1982 年以前, 低标准)、新技术运用总结提高(1982 ~ 1986 年, 较高标准) 和全面规划(1986 年以后, 高标准) 三个阶段, 特别是 1984 年到 1986 年集中强度建设, 流域内共建坝 32 座, 其中 3 座已水毁, 现存骨干坝 7 座, 淤地坝 21 座, 总控制面积 29. 1 km², 可淤地 151. 4 hm², 已淤地 113. 33 hm², 在利用 74. 19 hm²。坝系及其分布情况见表 1。

1989 年 7 月 21 日至 22 日, 流域内降雨达到 115. 1 mm, 其中 21 日 6 时 40 分到 8 时 06 分的 86 min 内降雨达 50 mm, 坝系有效地拦蓄了洪水, 保证了主沟 42 hm² 坝地和沟

¹ 收稿日期: 2003-04-16
作者简介: 康熠(1964-), 男, 内蒙古商都县人, 工程师, 从事水土保持工程勘测、设计与科研工作。

口川掌沟的安全, 坝系中各单坝均未出现险情。

2 坝系相对稳定状况分析

2.1 分析原则及计算依据

根据坝系相对稳定理论研究, 本文坝系相对稳定分析原则为: 坝地生产临界淹水深度 0.8 m, 淹水历时 7 昼夜, 临界年淤积厚度 0.3 m, 当达到某一淤控比时所能承受的暴雨频率为 50~100 年一遇(24 h 雨量), 可实现防洪保收, 也满足坝系自身的安全, 坝系达到相对稳定。我们通过坝地实际年淤积厚度与最大年淤积厚度的对比和实际淤控比与相对稳定临界淤控比的对比的综合分析来判断坝系相对稳定的程

度。

为叙述方便起见, 我们记输沙模数 $M_s(10^4\text{ t/km}^2\cdot\text{a})$ 、控制面积 $F_c(\text{km}^2)$ 、坝地面积 $A(\text{hm}^2)$ 和临界淹水深度 $d_c(\text{m})$, 则坝地年淤积厚度 $T(\text{m})$ 和淤控比 I 如下:

$$T=M_sF_c/A$$

$$I=A/(100F_c)$$

当相对稳定临界年淤积厚度 $T_c(\text{m})$ 和临界淤控比 I_c 满足 $T_c\leq T$ 且 $I_c\leq I$ 时, 坝系达到相对稳定; 否则, 坝系未达相对稳定。这里, I_c 与设计暴雨频率 p 时的洪量模数 $M_{24\cdot fp}(10^4\text{m}^3/\text{km}^2)$ 的关系如下:

$$I_c=M_{24\cdot fp}/(100d_c)$$

表 1 西黑岱沟坝系情况表

坝名	代号	控制面积 / km ²	坝高 / m	总库容 / 万 m ³	拦泥库容/ 万 m ³		淤地面积/ 万 m ³			配套 工程	建坝 时间	水毁 时间
					设计	已拦泥	设计	已淤地	在利用			
弧儿光掌坝	Y1	0.90	12.1	14.2	9.4	3.0	1.67	0.73	0.73	溢洪道	1973	
弧儿沟坝	G1	3.00	17.8	68.4	31.2	29.4	8.67	1.27		涵洞	1986	
右 1 号支沟坝	Y2	0.80	6.4	6.3	4.5	4.7	0.47	0.33	0.33	溢洪道	1987	
右 2 号支沟坝	Y3	0.26	11.8	4.2	2.4	2.4	0.53	0.33	0.33	溢洪道	1987	
主沟 1 号坝	Y4	0.84	4.6			4.8	2.13	2.13	2.13		1984	1985
学校坡坝	G2	3.70	16.7	114.0	60.0	39.2	10.93	3.80		涵洞	1996	
右 3 号支沟坝	Y5	0.34	10.8	5.2	3.2	2.7	0.73	0.60	0.60	溢洪道	1984	
满连沟掌坝	Y6	1.20	7.0	3.6	2.8	1.9	1.60	0.53	0.27		1984	1985
小黑岱沟坝	G3	3.20	17.2	73.8	44.4	26.4	10.27	7.00	4.33	涵洞	1986	
满连沟坝	G4	3.00	18.0	68.4	41.7	34.8	10.00	5.00	1.33	涵洞	1980	
主沟 2 号坝	Y7	2.70	6.6	50.1	26.5	24.5	8.00	8.00	6.80	溢洪道	1988	
主沟 3 号坝	Y8	0.60	10.0	13.5	10.5	11.3	5.00	4.33	4.33	溢洪道	1987	
恼木兔 1 号坝	Y9	0.22	9.9	20.5	16.1	13.0	4.80	4.07	4.07	溢洪道	1982	
恼木兔 2 号坝	G5	4.50	17.6	104.4	63.0	54.2	18.67	15.4	4.00	涵洞	1986	
哈拉干沟坝	G6	3.20	16.9	73.8	44.4	30.7	10.27	8.67	6.67	涵洞	1986	
纳林沟 1 号坝	Y10	1.10	9.0	14.8	4.2	12.9	3.20	2.40		溢洪道	1984	
纳林沟 2 号坝	Y11	1.04	3.5								1980	1985
邬家坡 1 号坝	Y12	0.07	7.3	1.5	1.0	0.8	0.27	0.13	0.13		1982	
邬家坡 2 号坝	Y13	0.08	7.7	1.5	1.1	0.6	0.40	0.20	0.20		1984	
主沟 4 号坝	Y14	1.37	12.0	112.3	80.5	72.1	8.00	8.00	6.00		1988	
肖家沟 1 号坝	Y15	0.50	7.3	2.3	1.5	6.2	2.67	2.67	1.00		1974	
肖家沟 2 号坝	Y16	0.18	3.8	1.8	1.2	1.0	0.33	0.20			1990	
肖家沟 3 号坝	Y17	0.28	16.4	26.0	18.1	18.8	3.33	3.20	3.20	溢洪道	1979	
贾家圪旦 1 号坝	Y18	0.14	5.9	3.5	2.1	1.7	0.27	0.20	0.20		1987	
杨家沟坝	G7	1.85	17.6	68.4	41.7	30.0	6.00	4.00	2.00	涵洞	1986	
贾家圪旦 2 号坝	Y19	0.03	7.4	1.4	1.0	0.7	0.33	0.20	0.13		1986	
裴家沟 1 号坝	Y20	0.36	8.3	2.9	2.2	1.5	0.53	0.33	0.20	涵洞	1985	
裴家沟 2 号坝	Y21	0.07	7.5	0.8	0.6	0.7	0.33	0.27	0.27		1986	
徐家圪旦坝	Y22	0.20	6.2	1.2	1.1	0.7	0.40	0.27	0.27		1988	
主沟 5 号坝	Y23	1.06	17.5	86.8	68.2	61.0	18.67	16.8	15.27	溢洪道	1984	
主沟 6 号坝	Y24	0.57	15.0	95.0	63.0	68.0	8.13	8.47	5.60	溢洪道	1985	
主沟 7 号坝	Y25	0.72	12.3	45.5	17.2	14.2	4.80	3.80	3.80	溢洪道	1983	
合 计				1086.1	664.8	573.9	151.40	113.33	74.19			

2.2 计算参数及坝地相对稳定基础计算

本文水文计算参数及公式取自于《内蒙古自治区水文手册》,暴雨均值 65 mm, 变差系数 $C_V=0.73$, 偏差系数 $C_S=3.5C_V$ 。输沙量计算以现状输沙模数 $(0.9\times10^4\text{ t/km}^2\cdot\text{a})$ 为基础, 泥沙容重 $1.38\text{ t/m}^{3[2]}$; 洪水总量也以现状平均洪量模数(它等于未治理时的洪量模数乘以流域平均减水效率 57.3%)为基础计算。据此得到该流域不同频率暴雨洪水情况及其坝地相对稳定临界淤控比如表 2。

2.3 相对稳定分析

根据上述公式和表 1 所载信息计算单坝及坝系的年淤积厚度和淤控比两个因素, 将年淤积厚度不超过 0.3 m 且淤控比不小于 50 年一遇暴雨频率临界淤控比 0.032 的单坝及坝系情况归纳于表 3, 结合表 2 得到处于相对稳定的单坝及坝系情况列于表 4。据此可知: 目前, 西黑岱沟坝系淤控比为 0.039, 已实现暴雨频率 $p=2\%$ 情况下的基本稳定阶段并进入暴雨频率 $p=1.25\%$ 的初步稳定阶段, 正向更高层次发展。

表 2 西黑岱沟不同频率暴雨洪水暨坝地相对稳定临界淤控比计算表

暴雨频率 $P/\%$	模比系数 Kp	暴雨量 H_{24}/mm	径流深 $H_{24\cdot p}/\text{mm}$	洪量模数 $M_{24\cdot fp}/\text{万 m}^3$		临界淤控比	
				治理前	现状	治理前	现状
2	3.23	209.95	45.0	4.50	2.58	0.056	0.032
1.25	3.67	238.55	54.6	5.46	3.13	0.068	0.039
1	3.82	248.3	65.5	6.55	3.75	0.082	0.047
0.5	4.42	287.3	92.0	9.20	5.27	0.115	0.066

表 3 西黑岱沟单坝暨坝系年淤积厚度与淤控比计算结果表

坝代号	Y8	Y9	G5	Y14	Y15	Y17	Y19	Y21	Y23	Y24	Y25	坝系
年淤积厚/m	0.10	0.04	0.20	0.12	0.13	0.06	0.11	0.18	0.04	0.05	0.13	0.18
淤控比	0.072	0.185	0.034	0.058	0.053	0.114	0.067	0.039	0.168	0.149	0.053	0.039

表 4 西黑岱沟坝系相对稳定结果表

暴雨频率 $P/\%$	单坝相对稳定程度											坝系稳 定程度	占现存坝数 比例/%
	Y8	G5	Y9	Y14	Y15	Y17	Y19	Y21	Y23	Y24	Y25		
2	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	39.3
1.25	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	35.7
1	√		√	√	√	√	√		√	√	√		32.1

下面,我们从4个方面来说明坝系向高层次稳定发展的现实可能性。

(1)从坝系总体结构来看,流域内已基本形成了‘支沟骨干坝控制滞洪、主沟生产为主’的蓄、排、灌、生产相结合的坝系结构,只要合理增大布坝密度并加固配套某些单坝,就能够基本保证坝系向高层次的相对稳定发展。

(2)从现有坝系防洪拦沙能力来看,流域内现有小型淤地坝基本淤满,其防洪拦沙潜力较小,只有几座大型淤地坝

(配套工程均为溢洪道)和7座骨干坝(配套工程均为泄水涵洞)的剩余防洪拦沙潜力仍然较强(见表5),尤其是骨干坝,它们不仅设计防洪拦沙能力大,又处于初步运行阶段,而且剩余防洪拦沙库容也较大,即使遇到未治理状态下的连续两次校核洪水也可以容纳,具有很强的防洪拦沙能力,成为下游淤地坝及坝地生产的较好保护屏障,在坝系相对稳定的形成中起着极其重要的作用。

表 5 西黑岱沟现有骨干坝防洪拦沙潜力表

坝代号	控制面积 $/\text{km}^2$	校核洪水 重现期/a	防洪库容/ 万 m^3		已拦泥 $\text{万}/\text{m}^3$	洪量模数/ 万 m^3		一次校核洪水总量/ 万 m^3	
			设计	现状		治理前	现状	治理前	现状
G1	3.0	50	37.2	39.1	1.8	4.50	2.58	13.50	7.74
G2	3.7	200	54.0	74.8	20.8	9.20	5.27	34.04	19.50
G3	3.2	100	29.4	47.4	18.0	6.55	3.75	20.96	12.01
G4	3.0	50	26.7	33.6	6.9	4.50	2.58	13.50	7.74
G5	4.5	200	41.4	50.2	8.8	9.20	5.27	41.40	23.72
G6	3.2	100	29.4	43.1	13.7	6.55	3.75	20.96	12.01
G7	1.9	50	26.7	38.4	11.7	4.50	2.58	8.55	4.90

(3)从坡面治理对坝系相对稳定的影响来看。金争平、高志明等在《皇甫川小流域地块土壤侵蚀预报模型及应用》^[3]一文中指出:径流系数 $R_c(\%)$ 、侵蚀模数 $M(\text{t}/\text{km}^2\cdot\text{a})$ 与植被覆盖度 $V(\%)$ 存在着如下关系:

$$R_c=42.19e^{-0.0228V}(n=6,r=0.994)$$

$$M=22.855-5.133\ln V(n=6,r=-0.996)$$

可见,植被覆盖度与径流量和侵蚀量之间存在着显著的负相关。西黑岱沟坡面治理措施占总治理面积的97.51%,植被覆盖度比治理前增加66.17%,按上式计算,坡面径流量和土壤侵蚀量分别减少78.99%和43.01%,进入沟道的泥沙愈来愈少。这样,坡面治理措施蓄水保土效益的日益发挥将成为坝系相对稳定向更高层次发展的重要促进保证因素。

(4)从单坝的稳定性来看。尽管流域整体坝系尚未达到

暴雨频率 $p=1\%$ 时的相对稳定,但单坝已有10座(占现存坝数的35.7%)进入了80年一遇暴雨频率下的相对稳定,且已有9座(占现存坝数的32.1%)进入了100年一遇暴雨频率下的相对稳定,其中4座淤控比超过0.10而达到了高水平稳定阶段。

由此看来,西黑岱沟坝系相对稳定向更高层次发展的前景是乐观的。

3 坝系相对稳定模型的建立

鉴于以上分析,笔者认为可以在本流域资料的基础上初步建立坝系相对稳定的规模模型。为此,利用现状达到相对稳定的单坝资料系列进行统计回归分析,在现状拦泥库容和淤地面积的基础上,得到了不同防御暴雨水平下、坝控面积

小于 2 km^2 的数学模型。

3.1 拦泥规模模型

不同暴雨频率 p 时拦泥库容 V_n (万 m^3) 与淤地面积 A (hm^2) 的关系如下:

$p = 2\%$ 时 $A = e^{-0.256} V_n^{0.59} (n = 10, r = 0.811, F = 18.2 > F_{0.01}(1, 8) = 11.3)$

$p = 1\%$ 时 $A = e^{-1.023} V_n^{0.832} (n = 8, r = 0.958, F = 64.7 > F_{0.01}(1, 6) = 13.7)$

淤地面积与拦泥库容呈正相关。它们的相关关系都是显著的。根据表 1 所载实际拦泥量数据和利用上述模型计算得到的拦泥库容值进行误差计算和检验: $p = 2\%$ 时误差为 -5.3% , $p = 1\%$ 时误差为 21.6% , 负号寓含的意义是计算值较实践值大, 不过, 误差均在允许范围之内; 检验结果如图 1。由图可知, 大多数坝的计算值与实际值接近。

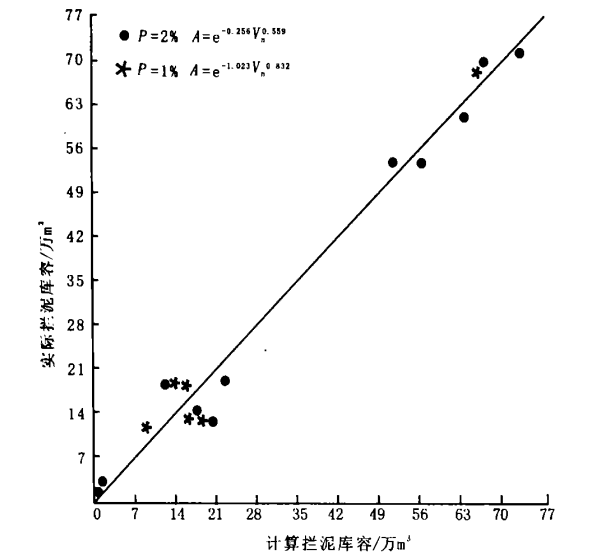


图 1 拦泥库容检验图

模型说明: 单坝及坝系相对稳定需要足够的拦泥库容 (或来沙量) 才能保证淤造足够的坝地。

3.2 坝高规模模型

不同暴雨频率 p 时坝高 H (m)、控制面积 F_c (km^2) 与淤地面积 A (hm^2) 的关系如下:

$p = 2\%$ 时 $A = e^{-2.247} H^{1.627} F_c^{0.674} (n = 10, r = 0.944, F = 28.9 > F_{0.01}(2, 7) = 9.6)$

偏相关系数 $r_{AH \cdot F_c} = 0.416, r_{AF_c \cdot H} = 0.769, r_{HF_c \cdot A} = 0.005$

$p = 1\%$ 时 $A = e^{-1.018} H^{1.244} F_c^{0.805} (n = 8, r = 0.949, F =$

$22.4 > F_{0.01}(2, 5) = 13.3)$

偏相关系数 $r_{AH \cdot F_c} = 0.322, r_{AF_c \cdot H} = 0.867, r_{HF_c \cdot A} = 0.002$

淤地面积与坝高、坝控面积均呈正相关。它们都呈显著的相关性, 且偏相关性也符合实际情况, 总体误差水平为 $p = 2\%$ 时 -9.5% 和 $p = 1\%$ 时 5.1% , 误差很小, 精度均达 90% 以上。以模型计算进行淤地面积检验的情况如图 2, 结果表明: 大多数的单坝其计算值与实际值偏离不大, 说明坝高、坝控面积与淤地面积的模型关系能够反映实际。

模型说明: 单坝及坝系相对稳定的坝高、坝控面积都需要一定的规模才能实现所需的淤地面积。

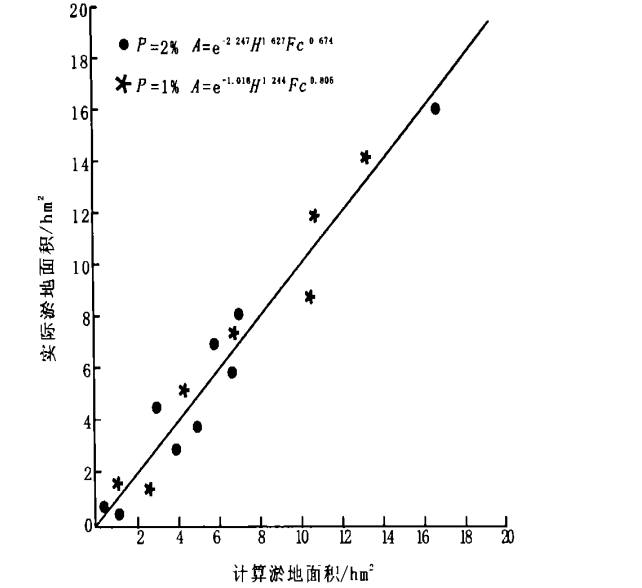


图 2 淤地面积检验图

4 结 论

西黑岱沟属黄土丘陵沟壑区第一副区, 其微地貌以砒砂岩为主, 是一个在该地貌类型区发展起来的以沟壑治理为主、骨干坝比较集中的典型示范^[1], 且坝系已进入相对稳定阶段, 因此, 以此为基础建立的不同暴雨频率时的数学模型在一定程度上基本可以反映该地貌类型区的实际, 具有一定的代表性。

这些模型是在相对稳定的单坝较少的基本上建立的, 虽然可能存在某些偏差, 需要深入研究, 不过, 可以运用于该类型区尤其是皇甫川流域及其邻近流域或相似流域坝系规划暨建设的实践中, 在实践总结中不断加以完善。

参考文献:

[1] 陈彰岑, 于德广, 等. 黄河中游多沙粗沙区快速治理模式的实践与理论[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
[2] 苗宗义. 黄土高原综合治理皇甫川流域水土流失综合治理农林牧全面发展试验研究文集[M]. 北京: 中国农业技术出版社, 1992.
[3] 金争平, 史培军, 等. 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.