

# 极端降雨条件下小流域淤地坝系连溃风险分析

祖强<sup>1</sup>, 陈祖煜<sup>1,2</sup>, 于沫<sup>2</sup>, 黄谢平<sup>3</sup>, 于坤霞<sup>1</sup>, 王志坚<sup>4</sup>, 王琳<sup>1</sup>

(1.西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048;2.中国水利水电科学研究院岩土工程研究所,北京 100048;3.浙江大学建筑工程学院岩土工程研究所,杭州 310058;4.山西农业大学水土保持科学研究所,太原 030013)

**摘要:**近年来,黄土高原上的淤地坝在减轻水土流失、淤地造田等方面发挥了重要作用。但相较土石坝,淤地坝的防洪标准不高,更容易发生溃坝。淤地坝多以梯级形式分布在若干小流域中,构成了一个复杂的坝系网络,为正确评价溃决风险带来很大的挑战。采用一种基于小流域水文计算和考虑复杂入流条件的淤地坝系连溃风险分析模型及相应的计算程序 FT-IWHR,以山西省西厥沟流域淤地坝除险加固工程为实例,在校核工况(洪水重现期为 200 年)下对现状淤地坝系进行了连溃风险分析。同时在现状坝系和若干年后各项淤积面达到设计淤积高程这 2 种工况下对除险加固方案进行了可行性分析。结果表明:现有 8# 中型坝不满足防洪标准,临界降雨量仅为 133 mm;增设宽 6 m、高 3 m 的溢洪道后临界降雨量增至 945 mm,在淤积面达到设计淤积高程后临界降雨量降为 886 mm,均满足防洪要求;且增设溢洪道能够有效减少淤积面升高带来的风险。研究提出的淤地坝系连溃风险分析方法及实例应用成果对淤地坝系在极端降雨下的防洪风险分析和规划设计具有一定的参考价值。

**关键词:**淤地坝;梯级分布;连续溃坝;风险分析;除险加固

中图分类号:TV122

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)01-0030-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.005

## Risk Analysis of Check Dam System Under Extreme Rainfall in Small Watershed

ZU Qiang<sup>1</sup>, CHEN Zuyu<sup>1,2</sup>, YU Shu<sup>2</sup>, HUANG Xieping<sup>3</sup>,

YU Kunxia<sup>1</sup>, WANG Zhijian<sup>4</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048; 2.Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower

Research, Beijing 100048; 3. Institute of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Zhejiang University,

Hangzhou 310058; 4.Institute of Soil and Water Conservation Science, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030013)

**Abstract:** In recent years, check dams on the Loess Plateau have played an important role in mitigating soil erosion and silting land for land reclamation. But compared with earth and rock dams, the flood control standard of check dams is not high, and the dam break is more likely to occur. Check dams are distributed in a number of small basins in the form of stairs, forming a complex dam system network, which brings great challenges for the correct evaluation of the risk of failure. This paper adopted a failure risk analysis model of check dam systems based on hydrological calculations in small watersheds and considered the complex inflow conditions and the corresponding calculation program FT-IWHR. Taking the check dam reinforcement project in the Xi'ao watershed in Shanxi Province as an example, under the checking conditions (the flood return period is 200 years), the current check dam system was analyzed for continuous collapse risk. At the same time, the feasibility analysis of the danger-removing and reinforcement scheme was carried out under the two working conditions of the current check dam system and the siltation surface of each dam reaching the design siltation elevation after a few years. The results showed that the current 8# medium dam did not meet the flood control standards, and the critical rainfall was only 133 mm. The critical rainfall would increase to 945 mm after adding the spillway of 6 m wide and 3 m high, and the critical rainfall would decrease to 886 mm after the siltation surface reached the siltation elevation. both of which could meet the flood control requirements. And the addition of a spillway could effectively reduce the risk caused by the rise of the siltation sur-

收稿日期:2021-08-02

资助项目:国家自然科学基金项目(51879285,41731289,51909214);2021年山西省水利技术推广项目(2021LS016)

第一作者:祖强(1998-),男,硕士研究生,主要从事淤地坝安全及风险防控研究。E-mail:1433981859@qq.com

通信作者:陈祖煜(1943-),男,博士,教授级高级工程师,主要从事水利水电工程和岩土工程研究。E-mail:chenzuyu@iwhr.com

face. The risk analysis method and practical application results of check dam system have certain reference value for flood control risk analysis and planning design of check dam system under extreme rainfall.

**Keywords:** check dam; cascade distribution; continuous dam break; risk analysis; reinforcement

黄土高原位于黄河中上游,是世界上水土流失最严重的地区之一<sup>[1]</sup>。淤地坝在拦截入黄泥沙<sup>[2-4]</sup>、减少山洪和泥石流<sup>[5-6]</sup>、淤地造田<sup>[7]</sup>等方面发挥了重要作用。截至 2019 年年底,黄土高原共有淤地坝 58 776 座,其中大型坝 5 905 座,中型坝 12 169 座,小型坝 40 702 座<sup>[8]</sup>。

淤地坝作为小流域综合治理的水土保持工程,多以坝系方式开发建设,如陕西省绥德县王茂沟淤地坝系,在 5.97 km<sup>2</sup> 的流域面积内共建设了 23 座淤地坝<sup>[9]</sup>。这些淤地坝通常以串联或并联的方式分布于沟道内,且大多采用竖井或涵管泄水,泄洪能力不足<sup>[10]</sup>。由于黄土高原独特的地质条件、淤地坝本身的缺陷及淤地坝系的密集布局,一旦遭遇极端降雨,淤地坝系可能发生连续溃决,从而引发灾难性的洪水或泥石流<sup>[11]</sup>。近年来,黄土高原地区因极端降雨引发的溃坝案例时有发生<sup>[12-14]</sup>。一些学者已经对小流域淤地坝系的风险评价进行了研究。王丹等<sup>[15]</sup>利用改进的层次分析法对单坝、淤地坝单元及坝系进行了运行风险评价。赵宾华<sup>[16]</sup>运用层次分析法对王茂沟流域淤地坝系防洪风险进行评价。蒋耿民<sup>[17]</sup>提出坝系工程总体布局评价指标,并用多层次模糊综合评价法对蒋家沟流域的坝系工程进行评价。上述研究大多基于少量指标数据对小流域淤地坝系进行定性风险分析,而基于水文分析和水力学计算对淤地坝系进行定量风险分析的研究却鲜有报道。对于 1 座来流清楚的淤地坝来说,确定其防洪风险,相对是容易的。但对坝系中的淤地坝进行调洪演算时,需要追溯上游各支流坝因溃坝或溢洪道泄流汇入的入库流量,相应的水文分析和数学模型则十分复杂。Sepehri 等<sup>[18]</sup>、Yazdi 等<sup>[19]</sup>建立了一些梯级水库溃坝模型,如多准则决策模型(the multi-criterion decision-making model)、简化集总式模型(simplified lumped model)等,但以上模型应用仅限于简单坝系,对于大坝数量较多或分布关系较复杂的坝系,建模的强度不能满足要求。

本文依托山西省乡宁县西廆沟流域 8# 中型坝除险加固项目,使用一种基于小流域水文计算和考虑复杂入流条件的淤地坝系连溃风险分析模型及相应的计算程序 FT-IWHR,在校核工况(洪水重现期为 200 年)下对西廆沟淤地坝系进行了连溃风险分析。同时在现状坝系和若干年后各坝淤积面达到设计淤积高程这 2 种工况下对除险加固方案进行了可行性

分析。研究成果对小流域淤地坝系在极端降雨下的防洪风险分析和规划设计具有一定的参考价值。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

西廆沟流域地处山西省临汾市乡宁县境内,位于东经 110°47'51"—110°48'38",北纬 35°57'55"—36°01'12",属于黄河一级支流鄂河的一级支沟。流域总面积 17.82 km<sup>2</sup>,多年平均侵蚀模数 6 600 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>,年最大降水量 732.7 mm,年最小降水量 312 mm,多年平均降水量为 514 mm。流域内现建有 3 座骨干坝,7 座中型坝(图 1)。其中,3 座骨干坝已经除险加固,8# 中型坝位于坝系末端,但只有卧管这一放水建筑物,缺少溢洪道等泄水建筑物,存在安全隐患。

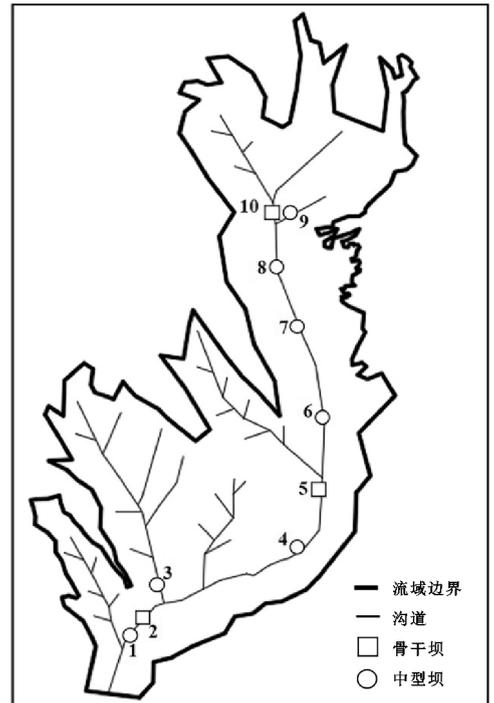


图 1 西廆沟淤地坝系分布示意

### 1.2 连溃模型构建

淤地坝溃决主要有 2 个原因,即漫顶溃坝和渗透破坏<sup>[20]</sup>。由于淤地坝一般处于不蓄水状态,本文只模拟极端降雨条件下淤地坝漫顶溃坝这种情况。作者研究团队前期研究发现,按汇流条件淤地坝系间各坝存在家谱系列的“母子”关系,并使用计算机的鲁棒算法成功分解其复杂结构,实现了充分考虑上下游泄洪水(包括溃坝洪水)的淤地坝系连溃风险分析。基于 VBA 语言开发了溃决风险分析程序 FT-IWHR,实现了给定降雨条件下淤地坝系中单坝溃决分析和临界降雨量计算 2 大功能<sup>[21]</sup>。本次研究依据《淤地

坝技术规范》(SL/T 804—2020)<sup>[22]</sup> 扩展了 FT-IWHR 程序,以三角形洪水过程线作为淤地坝入流条件。淤地坝系连溃模型主要由 3 部分构成:小流域水文计算、单坝溃决计算和坝系连溃分析。

1.2.1 小流域水文计算 大多数淤地坝都处于黄土高原地区的沟道内,水文基础资料十分匮乏,历史洪水调查资料难以获取。因此,采用推理公式法计算无实测资料地区的洪水参数,洪水过程线可概化为三角形(图 2)<sup>[22]</sup>。

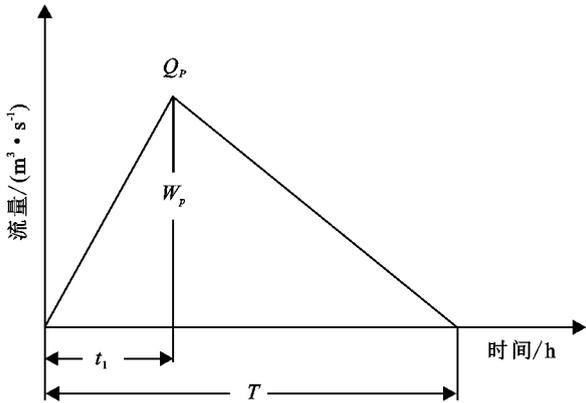


图 2 概化三角形洪水过程线

洪峰流量  $Q_p$  计算公式为:

$$Q_p = 0.278 \frac{h}{\tau} F \quad (1)$$

$$\tau = 0.278 \frac{L}{mJ^{1/3}Q_p^{1/4}} \quad (2)$$

式中: $Q_p$  为设计频率最大洪峰流量( $m^3/s$ ); $h$  为净雨深(mm); $F$  为流域面积( $km^2$ ); $\tau$  为流域汇流历时(h); $L$  为沿主沟道从出口断面至分水岭的最长距离(km); $m$  为汇流参数,可根据《淤地坝技术规范》(SL/T 804—2020)<sup>[22]</sup> 取值; $J$  为沿流程  $L$  的平均比降。

洪水总历时  $T$  计算公式为:

$$T = 5.56 \frac{W_p}{Q_p} \quad (3)$$

式中: $T$  为洪水总历时(h); $W_p$  为设计洪水总量( $10^4 m^3$ )。

涨水历时  $t_1$  计算公式为:

$$t_1 = \alpha_{t1} T \quad (4)$$

式中: $t_1$  为涨水历时(h); $\alpha_{t1}$  为涨水历时系数,其值为 0.1~0.5。

某些流域面积小但纵比降较大的淤地坝,汇流时间很短,通常只有 20~30 min。这对程序的迭代精度提出了很高的要求,且面对由数十座乃至更多淤地坝构成的坝系,逐坝迭代求解是很困难的。为了增强模型和程序的适用性,作出假定:将小流域视作 1 个整体,以小流域出口处的洪水历时作为小流域内单坝的洪水历时,单坝的洪峰流量由入库洪水总量和洪水历时按概化三角形计算得出。对于没有溢洪道的淤地坝来说,其是否溃坝取决于入库洪水总量与剩

余库容的大小关系,不受洪水历时的影响,这类淤地坝占淤地坝总量的绝大多数。且对于 1 个小流域来说,以流域出口断面计算整个流域的洪水历时,意味着不考虑上游各淤地坝的滞洪作用,从安全层面考虑是可以接受的。

1.2.2 单坝溃决计算 为确定单坝的入流和出流,提出假定条件为:

(1)所有降雨量覆盖整个流域并根据径流系数折算为径流。

(2)不考虑沟道断面形状及走向的干扰,上游淤地坝因溃坝或溢洪道排出的水量立即全部流入其下游淤地坝。

单坝的入库流量主要包括自然降雨和上游淤地坝出流 2 部分。降雨贡献的入流量<sup>[23]</sup> 计算公式为:

$$W_{in}^p = \alpha \times H_p \times F \quad (5)$$

式中: $W_{in}^p$  为降雨产生的淤地坝入流( $10^4 m^3$ ); $\alpha$  为洪水径流系数,可由当地水文手册查得; $H_p$  为频率为  $P$  的设计降雨(mm); $F$  为流域面积( $km^2$ )。

上游淤地坝贡献的入流量计算公式为:

$$W_{in}^m = \sum W_{out}^c \quad (6)$$

式中: $W_{in}^m$  为该淤地坝的入流量( $10^4 m^3$ ); $W_{out}^c$  为其上游单个淤地坝的出流量( $10^4 m^3$ )。

溢洪道泄流量采用宽顶堰公式<sup>[24]</sup> 计算。

$$Q = CB(H - z)^{3/2} \quad (7)$$

式中: $Q$  为溢洪道下泄流量( $m^3/s$ ); $C$  为溢流堰综合流量系数( $m^{0.5}/s$ ),可在 1.42~1.62 范围内选取; $B$  为溢流堰顶宽(m); $H$  为水库水位(m); $z$  为堰顶高程(m)。

当坝前水位高于坝顶时,认为该坝发生漫顶溃决。

1.2.3 坝系连溃分析 坝系连溃分析的基本思路是将复杂的淤地坝系比作人类社会的“家谱”,将相邻淤地坝间的出入流关系比作“母子”,逐级完成溃决计算。

根据图 1 的淤地坝系,将其中的坝分为 3 大类:

(1)源头坝。源头坝位于坝系主沟道的出口,意为坝系从此处“开枝散叶”,水流从这里流出后不再流入其他坝。图 1 中编号为 1 的坝为坝系的源头坝。

(2)边界坝。边界坝位于各支沟的最上游,特点是上游没有淤地坝,不需要考虑上游溃坝问题。图 1 中编号为 3,9,10 的坝为边界坝。

(3)中间坝。除去前 2 类坝,其余的坝均属于中间坝。它们的入流不仅来源于降雨,也有可能来自上游淤地坝溃坝或溢洪道出流。

对任一中间坝而言,其上游可能有多个淤地坝向其泄流,但其本身只向下游的 1 个淤地坝泄流。将承受上游来水的淤地坝称为“母坝”,向该“母坝”排水的淤地坝称为该“母坝”的“子坝”。图 1 中 8 号坝是 9,10 号坝的“母坝”。

对复杂淤地坝系进行风险分析的步骤为:

(1)对坝系各个淤地坝进行编号(阿拉伯数字 1~N),找出每个淤地坝唯一的“母坝”,确定其编号。

(2)对所有边界坝进行单坝溃决计算,因为边界坝入流条件仅为降雨,计算难度较小。溃决的淤地坝水量和流域面积全部加入它的母坝,未溃决的淤地坝继续拦蓄洪水,如果有溢洪道则记录溢洪道向“母坝”排泄的水量。

(3)将已经计算过的边界坝全部忽略,此时坝系会出现新一轮边界坝。新一轮边界坝的入流由自然降雨和“子坝”出流构成,开展新一轮计算。

(4)循环第(3)步直到所有淤地坝均已完成溃决计算,得到每座坝的溃决情况。

图 3 给出暴雨洪水下王茂沟淤地坝系溃决模拟的过程,经过 6 次循环完成了全流域的搜索。文献 [21]详细介绍了计算的基础数据和计算过程。

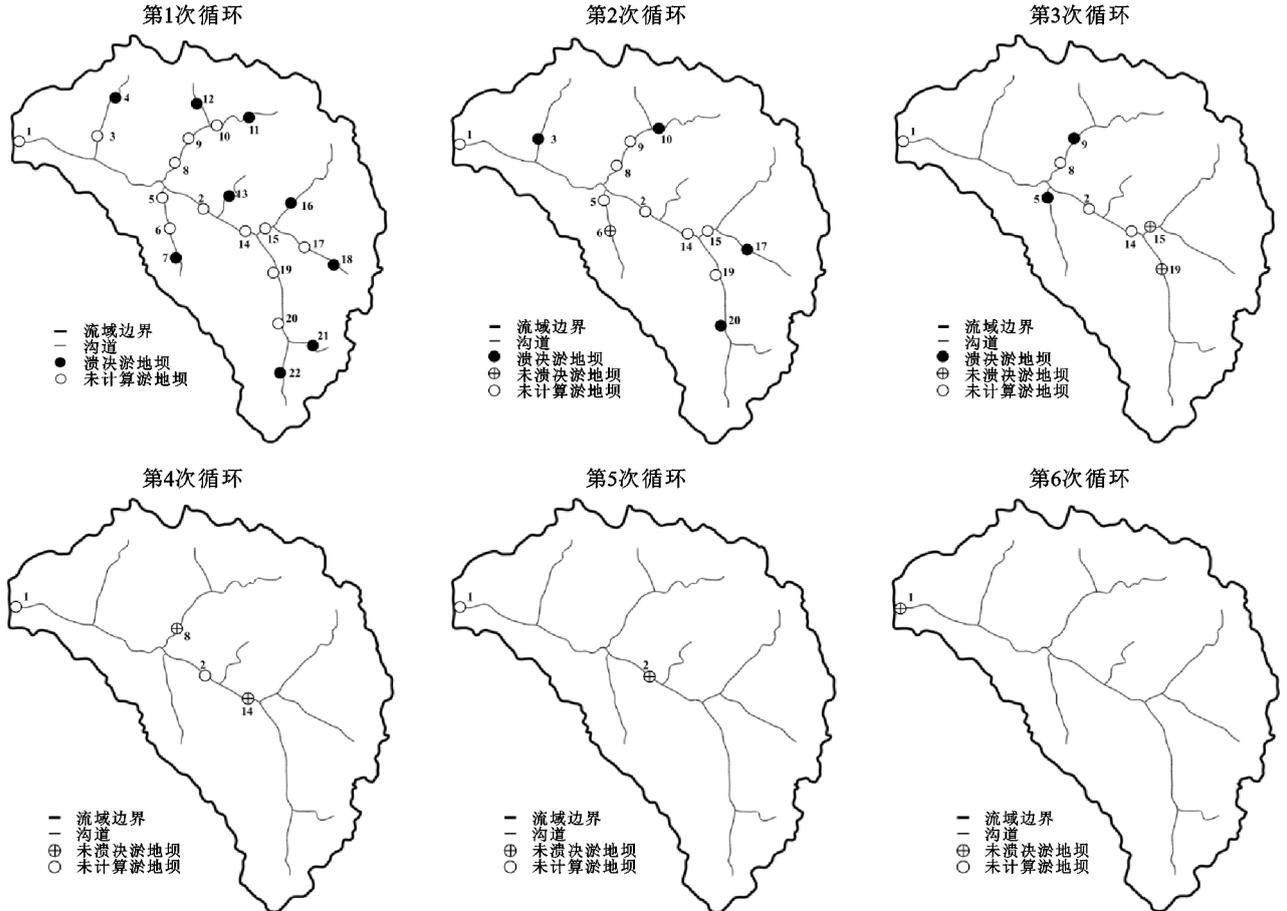


图 3 王茂沟暴雨洪水淤地坝系溃决模拟计算过程

### 1.3 FT-IWHR 程序介绍

在使用该模型进行坝系溃决风险分析时,主要计算过程由 FT-IWHR 程序完成。图 4 为程序各个流程的简单介绍。

**输入框:**输入计算数据。这些数据将服务于程序的 2 个关键部分。一方面用于识别每个淤地坝的编号及其“母坝”的编号,这将用于边界坝的识别;另一方面用于计算的水文参数以及淤地坝的基本参数,这将用于淤地坝的溃坝判断。

**ID=0 判断框:**程序对已经做过溃坝判断的淤地坝做上已处理的标记。 $ID=0$ ,未处理; $ID \neq 0$ ,已处理。当计算机识别到已经处理过的淤地坝时,会自动跳过这个淤地坝。

**IB=0 判断框:**筛选出边界坝。 $IB=0$ ,为边界坝; $IB=1$ ,为非边界坝。当计算机识别到该坝是非

边界坝时,自动跳过该淤地坝。

**ISP=0 判断框:**将筛选出来的未处理过的边界坝按照有无溢洪道归为 2 类。 $ISP=0$ ,为无溢洪道; $ISP=1$ ,为有溢洪道。

**溃坝判断处理框:**根据有无溢洪道,溃坝判断处理框分为单坝有溢洪道溃坝判断和单坝无溢洪道溃坝判断。在这里,筛选出来的未处理过的边界坝都会进行溃坝判断。

**Remain=0 判断框:**确认是否所有坝都已完成溃坝判断。

**输出框:**记录程序的计算过程以及最后的结果。

### 1.4 数据来源

**1.4.1 水文参数** 《淤地坝技术规范》(SL/T 804—2020)<sup>[22]</sup>规定,中型淤地坝的校核洪水重现期为 50~200 年。因 8# 中型坝上游为骨干坝,防洪标准

较高,且下游存在村庄,因此校核洪水重现期取 200 年。水文计算主要参考《山西省水文计算手册》<sup>[25]</sup>。设计暴雨计算公式为:

$$H_{24P} = K_P \bar{H}_{24} \quad (8)$$

式中: $H_{24P}$ 为频率为  $P$  的 24 h 暴雨量(mm); $K_P$ 为频率为  $P$  的皮尔逊Ⅲ型曲线模比系数; $\bar{H}_{24}$ 为最大 24 h 暴雨均值(mm)。 $P=0.5\%$ 时, $\bar{H}_{24P}=171$  mm。

1.4.2 流域及淤地坝参数 使用 Bigemap Gis 下载西廡沟流域的卫图和高程数据。利用 Arc Gis 10.2 中的 Spatial Analyst 工具从 5 m 分辨率的 DEM 进行河网提取,利用 3D Spatial 工具提取淤地坝的库容和流域面积。淤地坝的几何特征数据来源于山西农业大学水土保持科学研究所,主要包括剩余坝高、坝前水位、溢洪道参数。西廡沟淤地坝参数汇总见表 1。

### 1.5 不同分析工况

为了确定 8# 中型坝是否为病险坝,在 8# 中型坝的校核洪水工况下对坝系进行风险分析,探究现状淤地坝系是否满足防洪标准。对病险坝进行除险加固方案初步设计,模拟除险加固后,在校核洪水工况下对坝系进行风险分析;同时,考虑若干年后淤地坝系中各淤地坝淤积面达到设计淤积高程,在滞洪库容

大大减小这一不利工况下,再次对校核洪水下的坝系进行风险分析,结合上述 2 种工况的分析结果探究除险加固方案的可行性。

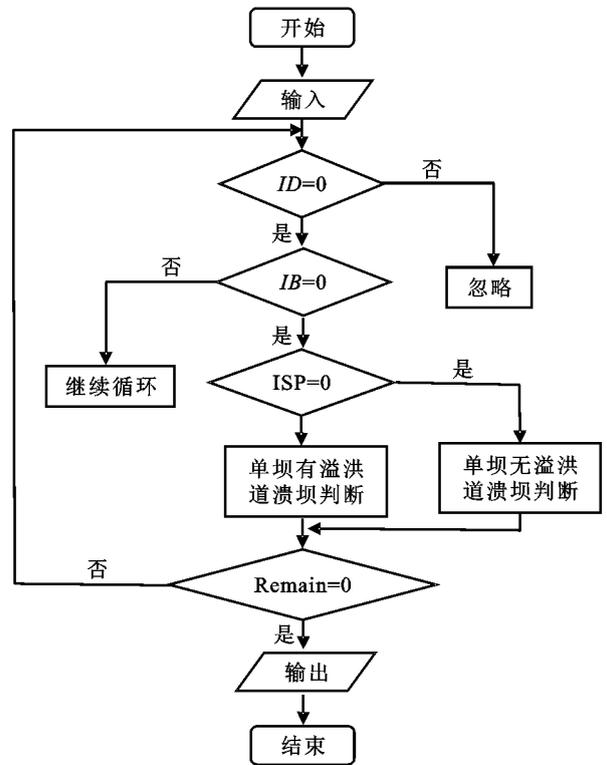


图 4 程序流程

表 1 西廡沟淤地坝参数

淤地坝	淤地坝 编号	$Z_n$ / m	$A_a$ / $\text{km}^2$	$Z_{cr}$ /m	$V_{cr}$ / $\text{m}^3$	$B$ / m	$Z_{sp}$ /m	$k'$ / $10^3 \times \text{m}^2$	$k$ / $10^3 \times \text{m}^2$
8# 中型坝	1	1.2	0.09	10.5	82000	0	0	7.344	13.902
3# 骨干坝	2	1.5	3.20	10.2	472078	8.8	6.4	24.371	59.809
7# 中型坝	3	0	2.18	12.8	250000	0	0	8.673	28.970
6# 中型坝	4	0	1.00	9.0	142742	5.0	5.1	6.465	22.126
2# 骨干坝	5	0	4.60	7.4	510417	5.0	3.3	24.250	81.301
4# 中型坝	6	0	1.38	11.0	201613	4.2	7.6	8.397	30.266
3# 中型坝	7	0	0.30	5.0	128935	4.0	1.6	7.680	26.537
2# 中型坝	8	0	0.50	3.0	90323	5.0	0	14.919	28.226
1# 中型坝	9	0	1.17	3.6	36000	0	0	8.571	10.667
1# 骨干坝	10	0	3.40	6.2	265625	3.5	2.2	23.284	45.573

注: $Z_n$ 为坝前水深; $A_a$ 为区间流域面积; $Z_{cr}$ 为淤积面以上坝高; $V_{cr}$ 为淤积面以上库容; $B$ 为溢洪道宽度; $Z_{sp}$ 为溢洪道底板至淤积面的高度; $k'$ 和 $k$ 为描述蓄水量与高程关系的系数,分别对应水位在溢洪道高程以下和以上。

## 2 结果与分析

### 2.1 校核工况下现状坝系溃决风险分析

在重现期为 200 年的校核洪水下对坝系进行了风险分析。由表 2 可知,8# 中型坝和 1# 中型坝可能发生溃决,其余 8 座淤地坝不会发生溃决。分析溃决原因为:8# 中型坝的剩余库容为 8.2 万  $\text{m}^3$  且没有泄水建筑物,上游 3# 骨干坝虽然未溃,但通过溢洪道向其排泄了 39.93 万  $\text{m}^3$  的水量,大于剩余库容,导致坝前水位超过坝顶,程序判断其为漫顶溃坝。1#

中型坝虽然上游没有子坝向其泄流,但其剩余库容仅为 3.6 万  $\text{m}^3$ ,未设泄水建筑物,降雨在其流域面积内产生的洪水为 6 万  $\text{m}^3$ ,同样导致漫顶溃坝。未溃的 8 座淤地坝,其中有 7 座建有溢洪道,没有溢洪道的 7# 中型坝剩余库容为 25 万  $\text{m}^3$ ,上游无淤地坝,降雨提供的入流量为 11.18 万  $\text{m}^3$ ,因此未发生溃决。溃决模拟结果与淤地坝实际情况较为吻合,证明本次分析结果较为准确。

本次模拟的另一结果为各淤地坝的临界降雨量。

8#中型坝和1#中型坝的临界降雨量分别为133, 110 mm,均小于本次模拟假定的171 mm,与溃决分析结果一致。建有溢洪道的7座淤地坝临界降雨量均大于1 000 mm。分析这一结果的成因可能为溢洪道的尺寸过大。结合实际情况,西廐沟中型淤地坝的溢洪道宽度大多超过4 m,而2#骨干坝和3#骨干坝的溢洪道宽度分别达到5.0,8.8 m。溢洪道的最大泄流能力大于洪水入流量,可以持续泄流保证淤地坝坝前水位始终低于坝顶,因此程序计算出的临界降雨量阈值较高。后续溢洪道的体型设计可以参考程序计算结果进行相应优化,在保证足够泄流能力的前提下减少成本。

流域内降雨产生的径流共91.42万 $m^3$ ,出口处8#中型坝因溃坝向下游排泄41.27万 $m^3$ ,其中40.39万 $m^3$ 为入库水量,0.88万 $m^3$ 为原坝前蓄水量。各坝拦蓄总水量为51.02万 $m^3$ ,水量平衡计算的误差为0.96%,证明程序的计算精度较高,本次模拟结果较为准确。

表 2 校核工况下西廐沟流域风险分析

淤地坝	是否 溃决	临界 降雨量/mm	入流量/ $m^3$	出流量/ $m^3$	拦蓄 水量/ $m^3$
8#中型坝	是	133	403918	412730	0
3#骨干坝	否	+	482884	399301	83583
7#中型坝	否	567	111834	0	111834
6#中型坝	否	+	343170	318724	24446
2#骨干坝	否	+	434965	291870	143095
4#中型坝	否	+	244254	198985	45269
3#中型坝	否	+	196870	173460	23410
2#中型坝	否	+	196531	181480	15051
1#中型坝	是	110	60021	60021	0
1#骨干坝	否	+	174420	110860	63560

注: +表示该坝临界降雨量大于1 000 mm。下同。

## 2.2 8#中型坝增设溢洪道后坝系溃决风险分析

1#中型坝剩余库容很小,且下游2#中型坝有5 m宽的溢洪道能够有效降低洪水来临时的溃坝风险,不会影响下游,因此1#中型坝除险加固意义较小。但8#中型坝位于坝系出口且下游有村庄,需要增设溢洪道以确保校核洪水来临时不会溃坝。经过初步设计,推荐溢洪道的断面尺寸为宽6 m,高3 m。本研究对该方案进行可行性分析。

8#中型坝增设溢洪道后,淤积面到溢洪道底坎的距离 $Z_{sp}$ 由0变更为7.5 m,溢洪道宽度 $B$ 由0变更为6 m,其余参数保持不变。由表3可知,8#中型坝增设溢洪道后在校核洪水下不会溃决,临界降雨量由133 mm增加到945 mm,已经超出了西廐沟流域万年一遇的24 h降雨量,证明增设溢洪道能够极大

提高淤地坝的防洪能力。其他淤地坝的分析结果与2.1节一致,说明下游淤地坝的参数变动并不会影响上游淤地坝的计算结果。

表 3 西廐沟8#中型坝增设溢洪道后风险分析

淤地坝	是否 溃决	临界 降雨量/mm	入流量/ $m^3$	出流量/ $m^3$	拦蓄 水量/ $m^3$
8#中型坝	否	945	403918	387279	16639
3#骨干坝	否	+	482884	399301	83583
7#中型坝	否	567	111834	0	111834
6#中型坝	否	+	343170	318724	24446
2#骨干坝	否	+	434965	291870	143095
4#中型坝	否	+	244254	198985	45269
3#中型坝	否	+	196870	173460	23410
2#中型坝	否	+	196531	181480	15051
1#中型坝	是	110	60021	60021	0
1#骨干坝	否	+	174420	110860	63560

8#中型坝溢洪道堰上水深和泄流量的变化过程见图5。坝前水位随着降雨和上游淤地坝的泄流不断雍高,在0.6 h时到达溢洪道底坎高程,溢洪道开始泄流,泄流量随着堰上水深的增加而增大。在1.67 h时达到坝前最高水位,即堰上最大水头2.49 m,这一水深小于溢洪道的高度,淤地坝不会发生漫顶,此时溢洪道泄流量达到峰值35.47  $m^3/s$ 。此后,泄流量随着坝前水位的回落逐渐减小。溢洪道堰上水深和泄流量的变化过程与假定的三角形洪水过程基本一致,证明洪水模拟结果较为准确。

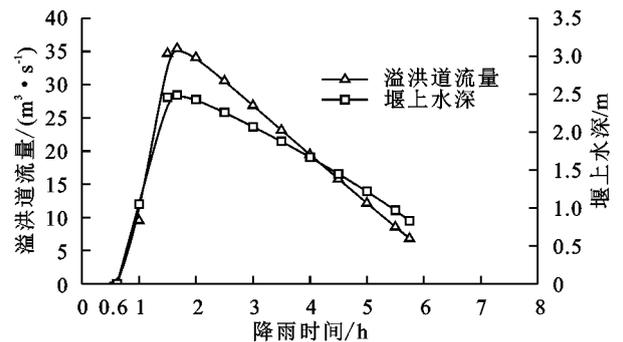


图 5 8#中型坝溢洪道堰上水深和泄流量变化过程

## 2.3 各坝淤积面达到设计淤积高程坝系溃决风险分析

假设淤积若干年后,所有淤地坝的淤积面均已达到其设计淤积高程(通常为溢洪道底坎高程),此时淤地坝的剩余坝高和剩余库容会大大减小。在这种不利工况下,分析拟增设的溢洪道是否满足防洪要求。各坝剩余坝高 $Z_{cr}$ 变更为溢洪道的高度,淤积面到溢洪道底坎的高度 $Z_{sp}$ 变更为0,剩余库容 $V_{cr}$ 由各坝库容—水位曲线查得。由表4可知,8#中型坝不会溃决,但和2.2节的计算结果相比,8#中型坝的临界降雨量由945 mm降为886 mm,7#中型坝的临界降雨量由567 mm降为178 mm,1#中型坝的临界

降雨量由 110 mm 降为 46 mm, 下降幅度分别为 6.2%, 68.6%, 58.2%。其他淤地坝临界降雨量依然大于 1 000 mm。出现这一现象的原因可能是: 7# 中型坝和 1# 中型坝没有溢洪道, 依靠剩余库容拦蓄洪水是其主要的防洪手段, 在本次模拟工况下其防洪能力出现大幅度下降。而 8# 中型坝增设溢洪道后, 溢洪道泄流成为主要防洪措施; 此外, 8# 中型坝的剩余库容本就较小, 因淤积面升高而减少的蓄洪量远小于溢洪道的泄洪量, 防洪能力并不会受到过多影响。因此 8# 中型坝的临界降雨量下降幅度远低于 1# 中型坝和 7# 中型坝, 其他建有溢洪道的 7 座淤地坝临界降雨量也没有出现大幅度下降。值得注意的是, 7# 中型坝的临界降雨量为 178 mm, 已经十分接近西廡沟流域重现期为 200 年的 24 h 降雨量 171 mm, 如果各坝淤积面达到设计淤积高程后流域遭遇重现期大于 200 年的暴雨, 7# 中型坝也存在溃决风险。

表 4 西廡沟各坝淤积面达到设计淤积高程后风险分析

淤地坝	是否 溃决	临界 降雨量/mm	入流量/ m <sup>3</sup>	出流量/ m <sup>3</sup>	拦蓄 水量/m <sup>3</sup>
8# 中型坝	否	886	534346	527213	7134
3# 骨干坝	否	+	574837	529729	45108
7# 中型坝	否	178	111834	0	111834
6# 中型坝	否	+	426053	410677	15377
2# 骨干坝	否	+	485092	374753	110339
4# 中型坝	否	+	272529	249112	23417
3# 中型坝	否	+	219871	201735	18136
2# 中型坝	否	+	220423	204481	15942
1# 中型坝	是	46	60021	60021	0
1# 骨干坝	否	+	174420	134752	39668

此时 8# 中型坝溢洪道堰上水深和泄流量变化过程见图 6。降雨开始后, 溢洪道就开始泄流, 经过 1 h 达到堰上最大水深 2.88 m 和最大泄流量 47.37 m<sup>3</sup>/s。受淤积面升高影响, 堰上最大水深由 2.49 m 增加到 2.88 m, 但依然小于溢洪道高度, 不会发生漫顶。

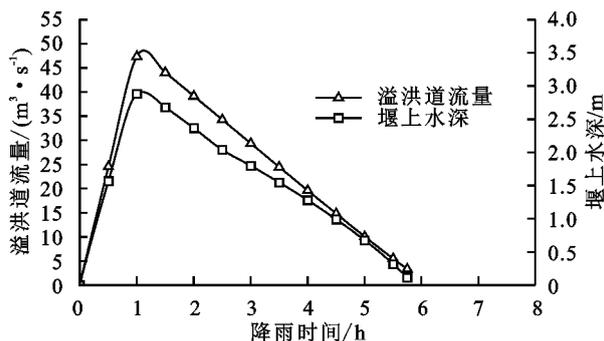


图 6 淤积面达到设计淤积高程时溢洪道堰上水深和泄流量变化过程

### 3 讨论

淤地坝的防洪能力主要体现在 2 个方面: 剩余淤

积库容的大小和有无泄水建筑物。已有研究<sup>[8]</sup>表明, 黄土高原地区中型以上病险淤地坝共计 5 282 座, 现状淤地坝中淤积面高程达到或超过设计淤积高程的大中型淤地坝共 7 305 座, 在洪水来临时, 这些淤地坝因为剩余淤积库容很小和缺少溢洪道等原因更易发生溃决<sup>[10]</sup>。本研究提出了一个极端降雨下小流域淤地坝系溃决风险分析的方法, 相应的模型考虑了坝系内所有淤地坝因溢洪道泄流或溃坝形成的径流。研究成果可以用于判定校核洪水下单坝溃决的风险, 也可计算其在考虑了上游溢洪道和溃坝泄流条件下的临界降雨量阈值。应用该方法模拟了西廡沟淤地坝系在不同工况下各坝的溃决情况和临界降雨量阈值, 分析得出, 对于小流域淤地坝而言, 有无溢洪道及溢洪道的泄流能力是影响淤地坝防洪能力的主要因素, 增设溢洪道能够极大提高淤地坝的防洪能力。对没有溢洪道的淤地坝, 淤积库容的减小会明显降低淤地坝的防洪能力, 体现在临界降雨量的大幅下降, 而建有的溢洪道的淤地坝能够很好地缓解剩余淤积库容减小带来的不利影响, 临界降雨量下降幅度较小。同时, 本研究成果也可以应用于淤地坝预警管理、坝系布局和淤地坝溢洪道体型优化等方面。当预测到某流域可能出现极端降雨时, 可以利用本文提出的方法分析淤地坝可能出现的溃决情况, 结合洪水演进模拟出可能受到影响的区域, 发出预警并提前做好相关工作。需要新建淤地坝及对病险坝除险加固时, 应用该方法对不同设计方案的分析结果可以为方案比选提供参考。

### 4 结论

(1) 运用建立的淤地坝系连贯模型在校核工况下对西廡沟流域淤地坝系进行了溃决风险分析, 结果表明, 现状淤地坝中有 2 座淤地坝不满足防洪要求, 在重现期为 200 年的校核洪水下可能发生溃决。其中 8# 中型坝急需除险加固, 增设溢洪道。

(2) 运用淤地坝系连贯模型对 8# 中型坝的除险加固方案进行可行性分析发现, 增设溢洪道后在坝系现状和所有淤地坝的淤积面达到设计淤积高程这 2 种工况下, 增设的溢洪道均能满足防洪要求。分析计算的结果建议其溢洪道可按宽 6 m, 高 3 m 设计。

(3) 前期规划加固的淤地坝均满足坝系在全流域泄洪条件下的安全要求, 但部分淤地坝的临界降雨量阈值过高, 分析原因为溢洪道的超泄能力过大, 溢洪道体型可以进一步优化。

(4) 增设溢洪道能够极大提高淤地坝的防洪能力, 且能够有效缓解剩余淤积库容减小带来的不利影响, 长期保障坝系防洪安全。

## 参考文献:

- [1] Zhou Z X, Li J. The correlation analysis on the landscape pattern index and hydrological processes in the Yanhe watershed, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 524(5):417-426.
- [2] 杨媛媛,李占斌,高海东,等.大理河流域淤地坝拦沙贡献率分析[J].*水土保持学报*,2021,35(1):85-89.
- [3] 冉大川,姚文艺,李占斌,等.不同库容配置比例淤地坝的减沙效应[J].*农业工程学报*,2013,29(12):154-162.
- [4] 陈祖煜,李占斌,王兆印.对黄土高原淤地坝建设战略定位的几点思考[J].*中国水土保持*,2020(9):32-38.
- [5] Huang Y, Zhang B. Challenges and perspectives in designing engineering structures against debris-flow disaster [J/OL]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020:1-22. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1854126>.
- [6] Cascini L, Cuomo S, Pastor M, et al. Modelling of debris flows and flash floods propagation: A case study from Italian Alps [J/OL]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020:1-24. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1756418>.
- [7] 孙从建,张文强,李新功,等.基于遥感影像的黄土高原沟壑区生态效应评价[J].*农业工程学报*,2019,35(12):165-172.
- [8] 刘雅丽,贾莲莲,张奕迪.新时代黄土高原地区淤地坝规划思路与布局[J].*中国水土保持*,2020(10):23-27.
- [9] 袁水龙,李占斌,李鹏,等.基于 MIKE 模型的不同淤地坝型组合情景对小流域侵蚀动力和输沙量的影响[J].*水土保持学报*,2019,33(4):30-36.
- [10] 李莉,王峰,孙维营,等.黄土高原淤地坝水毁问题分析[J].*中国水土保持*,2014(10):20-22.
- [11] Zhang F Y, Yan B B, Feng X M, et al. A rapid loess mudflow triggered by the check dam failure in a bulldoze mountain area, Lanzhou, China [J]. *Landslides*, 2019, 16(10):1981-1992.
- [12] 汪自力,张宝森,刘红珍,等.2016 年达拉特旗淤地坝水毁原因及拦沙效果[J].*水利水电科技进展*,2019,39(4):1-6.
- [13] 党维勤,郝鲁东,高健健,等.基于“7·26”暴雨洪水灾害的淤地坝作用分析与思考[J].*中国水利*,2019(8):52-55.
- [14] 魏艳红,王志杰,何忠,等.延河流域 2013 年 7 月连续暴雨下淤地坝毁坏情况调查与评价[J].*水土保持通报*,2015,35(3):250-255,2.
- [15] 王丹,哈玉玲,李占斌,等.宁夏典型流域淤地坝系运行风险评价[J].*中国水土保持科学*,2017,15(3):17-25.
- [16] 赵宾华.淤地坝系溃坝机理与防洪风险评价研究[D].西安:西安理工大学,2015.
- [17] 蒋耿民.淤地坝坝系工程总体布局综合评价指标体系及模型研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [18] Sepelri M, Ildoromi A R, Malekinezhad H, et al. Assessment of check dams' role in flood hazard mapping in a semi-arid environment [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, 10(1):2239-2256.
- [19] Yazdi J, Moghaddam M S, Saghafian B. Optimal design of check dams in mountainous watersheds for flood mitigation [J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(14):4793-4811.
- [20] Zhong Q M, Wang L, Chen S S, et al. Breaches of embankment and landslide dams - State of the art review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 216:e103597.
- [21] Chen Z Y, Huang X P, Yu S, et al. Risk analysis for clustered check dams due to heavy rainfall [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2021, 36(2):291-305.
- [22] 中华人民共和国水利部.淤地坝技术规范:SL/T 804-2020[S].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [23] Viglione A, Merz R, Bloschl G. On the role of the runoff coefficient in the mapping of rainfall to flood return periods [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2009, 5(5):205-216.
- [24] 水利部水利水电规划设计总院.水工设计手册.土石坝[M].6卷.北京:中国水利水电出版社,2014.
- [25] 山西省水利厅.山西省水文计算手册[M].郑州:黄河水利出版社,2011.