

# 降雨诱发的黄土高原淤地坝溃决灾害快速动态评价研究

王琳<sup>1</sup>, 唐倩<sup>1</sup>, 于沐<sup>2</sup>, 薛一峰<sup>3</sup>, 单熠博<sup>4,5</sup>

(1. 西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001; 4. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 5. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 超标准降雨导致淤地坝溃决事件频发, 亟需开展黄土高原淤地坝溃决灾害快速动态评价研究。以降雨诱发的淤地坝溃决灾害过程为研究核心, 构建“雨-洪-沙-溃”灾害评价方法, 将“土-水-沙”耦合作用贯穿于溃决灾害全过程, 建立淤地坝水沙动力-溃坝数学模型。并以王茂沟流域 2012 年“7·15”降雨为实例, 开展淤地坝溃决状态快速判定、泥沙补给突变溃决影响规律研究、危险坝体快速定位研究, 从而实现溃决灾害快速动态评价。结果表明: 采用水沙动力-溃坝数学模型判定黄柏沟 1#坝、康河沟 1#坝和康河沟 2#坝溃决, 结果符合实际溃决情况; 考虑降雨诱发的径流激增和泥沙补给突变对溃决灾害评价的影响, 黄柏沟 1#坝、康河沟 1#坝和康河沟 2#坝洪峰时间分别提前 24min、21min、26min, 洪峰流量分别增大 4.24%、1.53%、4.76%, 洪峰时间提前, 洪峰流量偏大, 结果偏安全, 有助于提前发出预警; 随着降雨量的增大, 忽略泥沙作用时所判定的溃坝数量均小于考虑泥沙作用时所判定的结果, 泥沙作用不可忽视。

**关键词:** 淤地坝; 雨-洪-沙-溃; 溃决灾害评价; 泥沙补给突变

中图分类号: TV122.4

文献标识码: A

文章编号:

**作者简介:** 王琳 (1989—), 女, 博士, 副教授, 主要从事堰塞坝、梯级水库群灾害识别与灾害链效应研究等方面的工作。E-mail: linwang@xaut.edu.cn。

## Research on rapid dynamic assessment of rainfall-induced check dam breach disasters in the Loess Plateau

WANG Lin<sup>1</sup>, TANG Qian<sup>1</sup>, YU Shu<sup>2</sup>, XUE Yifeng<sup>3</sup>, SHAN Yibo<sup>4,5</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Hydropower Engineering Branch, Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an 710001, China; 4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 5. Key Laboratory of Reservoir and Dam Safety of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Excessive rainfall has led to frequent incidents of check dam breaches, and there is an urgent need to conduct rapid dynamic evaluation research on check dam breach disasters on the Loess Plateau. Taking the process of rainfall induced dam breach as the research core, a "rain flood sand breach" disaster evaluation method is constructed, and the coupling effect of "soil water sand" is integrated throughout the entire process of dam breach, establishing a mathematical model of water sand dynamic dam breach for check dams. Taking the "7.15" rainfall in the Wangmaogou watershed in 2012 as an example, rapid determination of the failure status of check dams, research on the impact of sudden changes in sediment supply, and rapid positioning of dangerous dam bodies were carried out to achieve rapid dynamic evaluation of dam failure disasters. The results indicate that the use of the water sediment dynamics dam breach mathematical model to determine the dam breaches of Huangbaigou 1 # dam, Kanghegou 1 # dam, and Kanghegou 2 # dam is consistent with the actual breach situation; Considering the impact of rainfall induced runoff surges and sudden changes in sediment recharge on the evaluation of dam failure disasters, the peak flood times of Huangbaigou 1 # Dam, Kanghegou 1 # Dam, and Kanghegou 2 # Dam were advanced by 24 minutes, 21 minutes, and 26 minutes, respectively. The peak flow rates increased by 4.24%, 1.53%, and 4.76%, respectively. The peak flood times were advanced and the peak flow rates were higher, resulting in safer results and helping to issue early warnings;

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目 (42330719);

国家自然科学基金面上项目 (52279111);

中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目 (Y324005)

收稿日期: xxxx-xx-xx

With the increase of rainfall, the number of dam failures determined by ignoring sediment action is smaller than that determined by considering sediment action, and sediment action cannot be ignored.

**Key words:** check dam; rain flood sand collapse; assessment of breach disasters; sudden change in sediment

# 0 引言

淤地坝作为黄土高原地区治理水土流失的独特建筑物,不仅拦截泥沙、保持水土,还用于淤地造田、增产粮食<sup>[1]</sup>。截止 2020 年,黄土高原地区建有淤地坝 58776 座,其中大型坝 5905 座、中型坝 12169 座、小型坝 40702 座<sup>[2]</sup>。淤地坝坝体基本结构形式与现有均质土坝较为相似,坝高最高可达 30 余米,属于水利规范中的小型坝。但与土石坝的区别在于其修建时忽略放水、泄洪建筑物的建设,泄洪能力不足,与现有的土石坝设计规范要求存在较大差距,建设标准较低,许多工程已淤满或老化失修。截止目前<sup>[3]</sup>,陕西省共建成淤地坝 3.5 万座,其中大型坝 3338 座,中型坝 9174 座,大中型病险淤地坝达 4 千余座。近年来黄土高原地区气候异常,超标准降雨频发<sup>[4]</sup>,如 2012 年 7 月 15 日,陕西省绥德县 1h 最大降雨量达到 75.7mm,韭园沟流域内 24 座淤地坝不同程度地损毁;2017 年 7 月 25 日至 26 日,陕北绥德、子洲地区发生降雨,历时 12 小时,最大降雨量达到 211mm,最大洪峰流量 6010 m<sup>3</sup>/s,远超历史最大流量 3820 m<sup>3</sup>/s,仅绥德县受灾人口就达 17.12 万人,直接经济损失 42.17 亿元<sup>[5]</sup>。因此,开展降雨条件下的淤地坝溃决灾害快速动态评价迫在眉睫。

但是,现有淤地坝研究主要集中于拦沙减蚀、保持水土、淤地增产、改善生态等治理效益、监测方面<sup>[6]</sup>。对淤地坝灾害的研究多集中于调查分析,如焦菊英<sup>[2]</sup>认为淤地坝溃决原因多为坝体建设标准低,超过淤积年限,无法抵御降雨山洪;王文龙<sup>[9]</sup>发现坝体管理不善、年久失修是溃决的主要原因。目前对淤地坝溃决开展的灾害动态评价多套用现有的土石坝、堰塞体溃决模型<sup>[10]</sup>,如张泽宇<sup>[19]</sup>采用 MIKE11 溃决计算程序分析淤地坝的溃决过程。但其筑坝材料为压实黄土,抗冲蚀能力远低于常规粘土,压实度、构筑方法与现有的土石坝、堰塞体存在较大差别,若直接套用,将与实际情况存在较大差异。

基于此,本团队前期<sup>[20]</sup>开展了淤地坝溃决灾害研究,提出了坝系溃决风险的评价方法——家谱法。根据坝系结构特点开发了计算机程序,可识别在特定降雨量条件下将被漫坝洪水冲垮的淤地坝。但并未考虑泥沙因素对溃决灾害的影响。

综上所述,目前黄土高原地区的淤地坝溃决灾害研究采用传统的“降雨-洪水-水位”方法,并未考虑降雨作用下径流激增诱发泥沙变化对溃决灾害过程

的影响规律,构建的溃决模型尚未考虑水沙动力影响机制。

本文以降雨诱发的黄土高原地区淤地坝溃决灾害过程为研究核心,构建“雨-洪-沙-溃”灾害评价方法,将“土-水-沙”耦合作用贯穿于溃决灾害全过程,通过分析降雨诱发的径流激增和泥沙补给突变对溃决灾害评价的影响过程,建立淤地坝水沙动力-溃坝过程模型。并以王茂沟流域 2012 年“7·15”降雨实例,分析泥沙补给突变对淤地坝溃决灾害评价的影响规律,实现黄土高原地区淤地坝溃决灾害快速动态评价,期为黄土高原小流域淤地坝的安全防控提供技术参考。

# 1 溃决灾害快速动态评价方法

淤地坝与土石坝最大的差异,在于其不蓄水,溃决主要由超标准的降雨诱发<sup>[1]</sup>。一旦降雨降临,坝体区域坡地遭受冲刷,水流携沙冲入河道,水位急剧升高。本文基于降雨诱发的径流激增和泥沙补给突变过程,考虑降雨引起的入库洪量与其所携泥沙体积化的耦合过程,建立淤地坝水沙动力-溃坝数学模型,构建“雨-洪-沙-溃”灾害评价方法,开展黄土高原地区淤地坝溃决状态快速判定、泥沙补给突变溃决影响规律分析、危险坝体快速定位研究,从而实现溃决灾害快速动态评价,如图 1 所示。

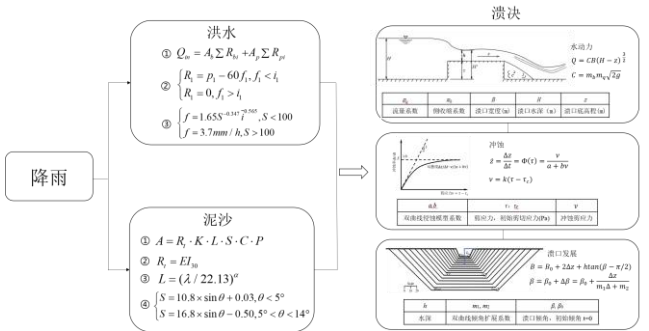


图 1 淤地坝溃决灾害快速动态评价方法

Fig. 1 Rapid dynamic evaluation method of check dam break disaster

## 1.1 入库洪量计算

入库洪量计算采用超渗产流<sup>[21]</sup>的计算方法:

$$Q_{in} = A_b \sum R_{bi} + A_p \sum R_{pi} \quad (1)$$

式中,  $Q_{in}$ —入库洪水总量, (m<sup>3</sup>);  $A_b$ —坝地面积, (m<sup>2</sup>);  $A_p$ —坡地面积, (m<sup>2</sup>);  $R_{bi}$ —坝地净雨深, (m);  $R_{pi}$ —坡地净雨深, (m)。

净雨计算公式为:

$$\begin{cases} R_1 = p_1 - 60f_1, f_1 < i_1 \\ R_1 = 0, f_1 > i_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $p_1$ —第一时段降雨量, (mm);  $f$ —平均入渗率, (mm/min);  $\bar{i}$ —产流期平均雨强, (mm/min)。

坡地部分的入渗计算依据《延安地区实用水文手册》, 产流期平均入渗率按下式计算:

$$\begin{cases} f = 1.65S^{-0.347}\bar{i}^{0.565}, S < 100 \\ f = 3.7\text{mm}/h, S > 100 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $S$ —土壤含水量, (mm), 设计条件下, 降雨开始时刻的土壤含水量初始值  $S_0$  取 33mm。

## 1.2 输沙量计算

采用通用土壤侵蚀方程 RUSLE 模型<sup>[22]</sup>构建单坝泥沙模型计算降雨产沙量。

$$A = R_i \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (4)$$

式中,  $A$ —单位面积内降雨及其径流作用下坡面发生侵蚀的土壤侵蚀量, (t/hm<sup>2</sup>);  $R_i$ —一次降雨侵蚀力, [MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)];  $K$ —土壤可蚀性因子, [t·hm<sup>2</sup>·h/(hm<sup>2</sup>·MJ·mm)];  $L$ —坡长因子;  $S$ —坡度因子;  $C$ —植被覆盖与管理因子;  $P$ —水土保持因子。

式中, 次降雨侵蚀力  $R_i$  采用 EI<sub>30</sub> 法进行计算:

$$R_i = EI_{30} \quad (5)$$

$$E = \sum e \times p \quad (6)$$

$$e = 11.879 + 8.73 \lg i \quad (7)$$

式中,  $I_{30}$ —最大 30min 雨强, (mm/h);  $E$ —一次降雨动能, (J/m<sup>2</sup>);  $i$ —时段平均雨强, (mm/h);  $e$ —单位雨量的动能, [J/(m<sup>2</sup>·mm)];  $p$ —时段降雨量, (mm)。

坡长因子计算采用 Wischmeier 提出的计算公式:

$$L = (\lambda / 22.13)^\alpha \quad (8)$$

$$\alpha = \beta / (\beta + 1) \quad (9)$$

$$\beta = (\sin \theta / 0.0896) / [3.0 \times (\sin \theta)^{0.8} + 0.56] \quad (10)$$

式中,  $\lambda$ —水平坡长, (m);  $\alpha$ —坡长指数;  $\beta$ —细沟侵蚀与面蚀之比;  $\theta$ —利于 DEM 提取的坡度;。

坡度因子采用 McCool 等建立的计算公式:

$$\begin{cases} S = 10.8 \times \sin \theta + 0.03, \theta < 5^\circ \\ S = 16.8 \times \sin \theta - 0.50, 5^\circ < \theta < 14^\circ \end{cases} \quad (11)$$

为实现库容比对的溃决判断条件, 将输沙量进行概念性体积转化计算:

$$V_{\text{泥沙}} = m_{\text{泥沙}} / \rho_d \quad (12)$$

式中,  $V_{\text{泥沙}}$ —洪水所携泥沙的总体积, (万 m<sup>3</sup>);  $m_{\text{泥沙}}$ —输沙质量, (t);  $\rho_d$ —平均干密度, (g/cm<sup>3</sup>)。

## 1.3 溃决判断

淤地坝溃决多以洪水漫顶为主<sup>[24]</sup>。通过考虑泥沙补给与洪水的耦合过程, 以降雨水沙总量与淤地坝剩余库容对比判断淤地坝是否发生溃决, 则漫顶溃决发生的条件为:

$$W(t) \geq W_0 \quad (13)$$

式中:  $W_0$ —淤地坝剩余库容, (万 m<sup>3</sup>);  $W(t)$ —某一时刻所占库容, (万 m<sup>3</sup>), 考虑来自次洪水与其所携泥沙体积化线性加和。

本团队构建了水沙动力-溃坝数学模型, 自主开发了基于物理机制的溃决特征值计算软件 DB-IWHR2.0<sup>[10]</sup>, 具体如下:

(1)水动力。溃口流量采用宽顶堰公式计算, 满足水量平衡原理:

$$Q = UB(H-z)^{3/2} = m_b m_q \sqrt{2g} B(H-z)^{3/2} \quad (14)$$

$$U = m_b m_q \sqrt{2g} \quad (15)$$

式中:  $Q$ —溃口流量, (m<sup>3</sup>/s);  $m_q$ —流量系数, 可取 0.320-0.385;  $m_b$ —侧向收缩系数, 可取 0.910-0.997;  $B$ —溃口宽度, (m);  $g$ —重力加速度, (m/s<sup>2</sup>);  $U$ —综合流量系数;  $H$ —溃口水深, (m);  $z$ —溃口底部高程, (m)。

(2)冲蚀。溃口冲蚀率按双曲线模型确定:

$$\dot{z} = \frac{\Delta z}{\Delta t} = \Phi(\tau) = \frac{v}{a + bv} \quad (16)$$

$$v = k(\tau - \tau_c) \quad (17)$$

式中:  $\dot{z}$ —土体冲蚀率, (10<sup>-3</sup>mm/s);  $\Phi(\tau)$ —关于冲蚀率和剪应力的函数;  $v$ —去除临界剪应力后的冲蚀剪应力, (Pa);  $a, b$ —参数,  $\tau$ —剪应力, (Pa);  $\tau_c$ —临界剪应力, (Pa);  $t$ —时间, (s);  $k$ —单位转换系数, 可取 100。

(3)溃口发展。假定溃口横向扩展等于下切深度, 对整个溃口断面而言, 两侧均向河岸靠近, 溃口的滑坡过程可以逐级计算:

$$B = B_0 + 2\Delta z + h \tan(\beta - \pi/2) \quad (18)$$

$$\beta = \beta_0 + \Delta\beta = \beta_0 + \frac{\Delta z}{m_1 \Delta z + m_2} \quad (19)$$

式中:  $B_0$ —溃口的初始宽度, (m);  $\beta_0$ —溃口的初始倾角, (°);  $\beta$ —溃口倾角, (°);  $h$ —水深, (m);  $m_1, m_2$ —双曲线模型系数。



2 降雨诱发的黄土高原淤地坝溃决灾害快速动态评价——以 2012 年 7 月 15 日王茂沟流域溃决坝体为例

2.1 2012 年 7 月 15 日王茂沟流域溃决坝体

王茂沟流域位于陕西省绥德县韭园沟中游左岸，是无定河中游左岸的一条二级支沟，流域面积 5.97km<sup>2</sup>，地形为典型的黄土地貌，以峁状丘陵为主<sup>[24]</sup>。流域多年平均降水量 513mm，一次降雨产沙量占全年总产沙量的 60%以上。该流域现有淤地坝 23 座，坝系分布如图 2 所示。流域内具有完备资料的坝体基本参数见表 1<sup>[22]</sup>。

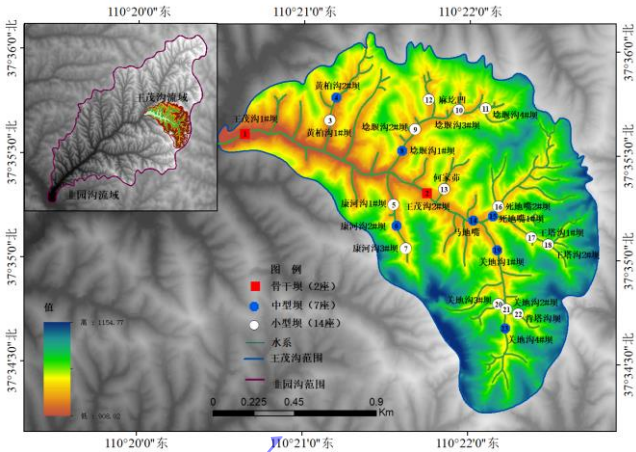


图 2 王茂沟流域坝系分布图

Fig. 2 Layout of damsystems in Wangmaogou watershed

表 1 王茂沟流域单坝坝体资料<sup>[22]</sup>

Table 1 Components of cement and industrial residues

序号	坝名	类型	坝地面积 /hm <sup>2</sup>	其他面积 /hm <sup>2</sup>	有效坝高 /m	剩余库容 /万 m <sup>3</sup>	实际水毁情况	
							溃口断面形状	溃口尺寸/m
1	王茂庄 1#坝	骨干坝	7.17	114.01	1.57	10.63	*	*
2	王茂庄 2#坝	骨干坝	9.54	76.65	12.2	42.86	*	*
3	黄柏沟 1#坝	小型坝	0.46	14.16	3.52	1.50	圆形	d=2
4	埝堰沟 1#坝	中型坝	1.14	14.19	1.62	4.80	*	*
5	埝堰沟 2#坝	小型坝	3.39	14.61	3.62	0.17	梯形	*
6	埝堰沟 3#坝	小型坝	1.78	33.84	0.2	2.37	梯形	b=4,h=4
7	康河沟 1#坝	小型坝	0.32	4.37	0.39	0.39	圆形	d=2
8	康河沟 2#坝	中型坝	0.59	8.36	1.7	1.70	圆形	d=0.5
9	康河沟 3#坝	小型坝	0.31	20.94	0.048	0.05	梯形	b=7,h=4
10	王塔沟 1#坝	小型坝	0.7	4.84	0.09	0.09	圆形	d=2
11	王塔沟 2#坝	小型坝	1.9	27.11	0.035	0.04	梯形	b=11.6,h=4.6
12	死地嘴 1#坝	中型坝	5.33	54.21	5.7	5.70	*	*
13	关地沟 1#坝	中型坝	3.29	35.99	21.1	21.10	*	*
14	关地沟 3#坝	小型坝	0.32	10.27	0.3	0.30	梯形	b=9,h=10
15	背塔沟坝	小型坝	1.45	17.67	0.05	0.05	梯形	b=6.8,h=8.4

注：\*表示坝体未溃决；d表示圆形溃口直径；b表示梯形溃口宽度，h表示梯形溃口深度。

2.2 淤地坝溃决灾害动态评价

2012 年 7 月 15 日王茂沟流域遭遇降雨，本次降雨造成王茂沟流域共 10 座淤地坝发生溃决，具体情况见表 1。

选取具有完备资料的 15 座淤地坝为研究对象，以 2012 年“7·15”降雨下王茂沟流域溃决坝体为例，开展溃决状态快速判定、泥沙补给突变溃决影响规律分析、危险坝体快速定位研究，从而实现淤地坝溃决灾害快速动态评价。

2.2.1 坝体溃决状态快速判定

王茂沟流域“7·15”1 h 最大降雨量为 75.7 mm，历时 2 h 45 min<sup>[20]</sup>，累计降雨量 132.48mm，如图 3 所示。考虑降雨作用下径流激增诱发泥沙变化对溃决

灾害评价的影响过程，采用超渗产流与 RUSLE 模型计算。其中：土壤可蚀性因子 K 值取 0.039，坡度因子与坡长因子乘积 L<sub>1</sub>S<sub>1</sub> 取 15.224，植被覆盖因子 C 取 0.012，水土保持因子 P 取 0.5，泥沙容重取 1.28 g/cm<sup>3</sup><sup>[24]</sup>。15 座淤地坝洪水-泥沙计算结果如图 4 与表 2 所示：

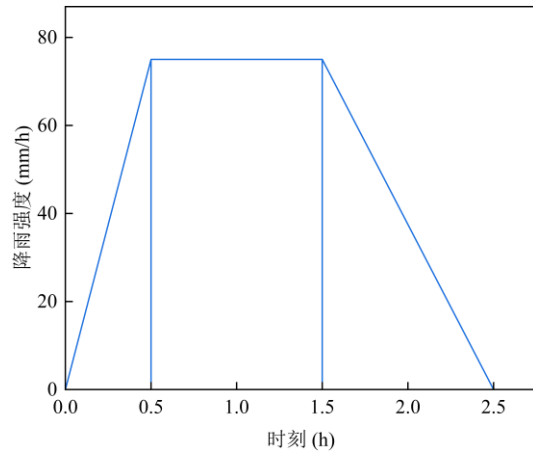
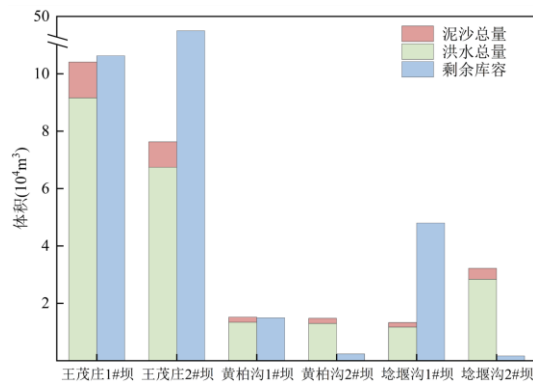
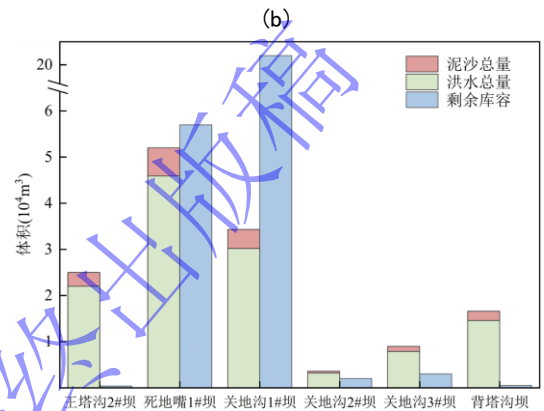
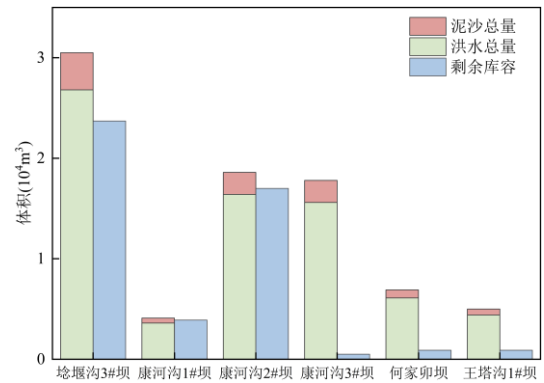


图 3 计算采用的降雨过程

Fig. 3 Calculation of rainfall process used



(a)



(c)

图 4 洪水-泥沙计算结果

Fig. 4 Flood sediment calculation results

表 2 溃决坝体判定结果

Table 2 Judgment result of dam failure

序号	坝名	实际水毁情况	溃决判定		与实际相比	
			忽略泥沙	考虑泥沙	忽略泥沙	实际情况
1	王茂庄 1#坝	*	不溃	不溃	符合	符合
2	王茂庄 2#坝	*	不溃	不溃	符合	符合
3	黄柏沟 1#坝	圆形 直径 2 米	不溃	溃决	不符合	符合
4	埵堰沟 1#坝	*	*	不溃	符合	符合
5	埵堰沟 2#坝	*	*	溃决	符合	符合
6	埵堰沟 3#坝	梯形 宽 4 米、深 4 米	溃决	溃决	符合	符合
7	康河沟 1#坝	圆形 直径 1 米	不溃	溃决	不符合	符合
8	康河沟 2#坝	圆形 直径 0.5 米	不溃	溃决	不符合	符合
9	康河沟 3#坝	梯形 宽 7 米、深 4 米	溃决	溃决	符合	符合
10	王塔沟 1#坝	圆形 直径 1 米	溃决	溃决	符合	符合
11	王塔沟 2#坝	梯形 宽 11.2 米、深 4.6 米	溃决	溃决	符合	符合
12	死地嘴 1#坝	*	不溃	不溃	符合	符合
13	关地沟 1#坝	*	不溃	不溃	符合	符合
14	关地沟 3#坝	梯形 宽 9 米、深 10 米	溃决	溃决	符合	符合
15	背塔沟坝	梯形 宽 6.8 米、高 8.4 米	溃决	溃决	符合	符合

注：\*表示坝体未溃决。

分析表 2 与图 4 发现，“7·15”降雨导致王茂沟流域共 10 座坝体发生溃决。溃决灾害动态评价后判定

王茂庄 1#坝、王茂庄 2#坝、埵堰沟 1#坝、死地嘴 1#坝和关地沟 1#坝不发生溃决，其余 10 座坝体均溃决。若忽略泥沙作用，则王茂庄 1#坝、王茂庄 2#坝、黄柏

沟 1#坝、埝堰沟 1#坝、康河沟 1#坝、康河沟 2#坝、死地嘴 1#坝和关地沟 1#坝不发生溃决,其余 7 座坝体均溃决。与实际相比,如果忽略泥沙补给突变对溃决灾害评价的影响过程,黄柏沟 1 坝、康河沟 1#坝与康河沟 2#坝不会发生溃决,与王茂沟流域“7·15”降雨溃决坝体实际情况存在差异。

2.2.2 降雨诱发的泥沙补给突变对淤地坝溃决灾害评价的影响规律研究

研究降雨诱发的泥沙补给突变对淤地坝溃决灾害评价的影响规律,黄柏沟 1#坝、康河沟 1#坝与康河沟 2#坝考虑泥沙与忽略泥沙时的溃决流量过程如图 5-图 7 所示。

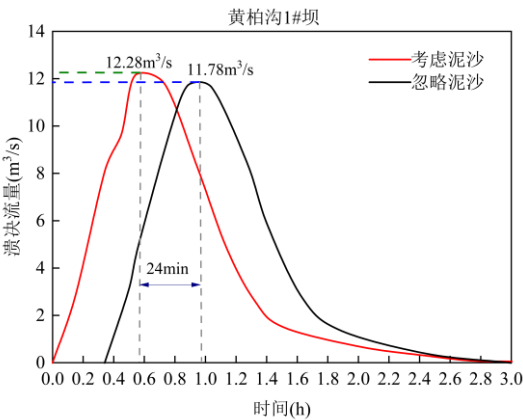


图 5 黄柏沟 1#坝溃决流量过程  
Fig. 5 Flow Process of Huangbaigou Dam 1# Collapse

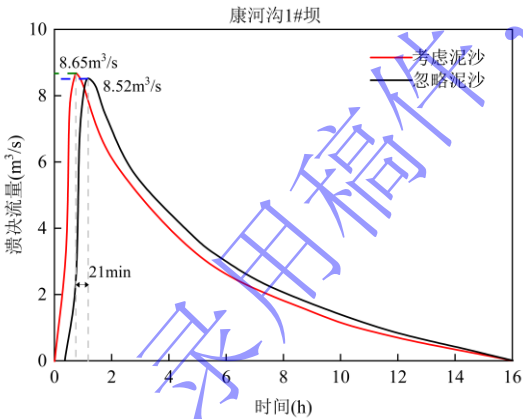


图 6 康河沟 1#坝溃决流量过程  
Fig. 6 Flow Process of Kanghegou Dam 1# Collapse

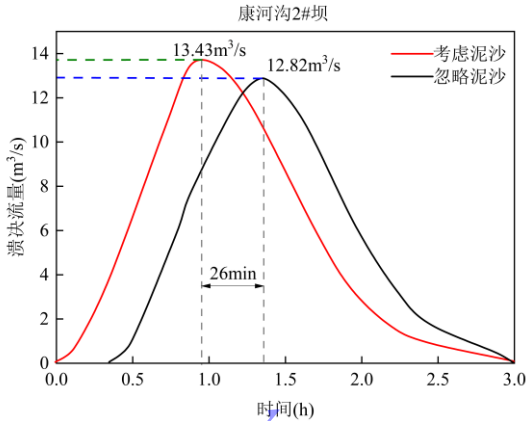


图 7 康河沟 2#坝溃决流量过程

Fig. 7 Flow Process of Kanghegou Dam 2# Collapse

分析图 5-图 7 发现,若忽略降雨诱发的径流激增和泥沙补给突变对溃决灾害评价的影响过程,2012 年“7·15”降雨中黄柏沟 1#坝在降雨后 2.79h 发生溃决,在溃决后 0.65h 达到洪峰,溃决洪峰流量为 11.78m³/s;康河沟 1#坝降雨后 2.71h 发生溃决,在溃决后 0.85h 达到洪峰,溃决洪峰流量为 8.52m³/s;康河沟 2#坝降雨后 2.59h 发生溃决,在溃决后 0.94h 达到洪峰,溃决洪峰流量为 12.82m³/s。

考虑降雨诱发的径流激增和泥沙补给突变对溃决灾害评价的影响过程,黄柏沟 1#坝在降雨后 2.45h 发生溃决,在溃决后 0.5h 达到洪峰,溃决洪峰流量为 12.28m³/s;康河沟 1#坝降雨后 2.35h 发生溃决,在溃决后 0.85h 达到洪峰,溃决洪峰流量为 8.65m³/s;康河沟 2#坝降雨后 2.28h 发生溃决,在溃决后 0.94h 达到洪峰,溃决洪峰流量为 13.43m³/s。

与忽略降雨诱发的径流激增和泥沙补给突变相比,若考虑泥沙作用,淤地坝溃决起溃时间与洪峰时间均提前,且洪峰流量偏大。在 2012 年“7·15”降雨中,考虑泥沙作用时黄柏沟 1#坝起溃时间提前 20min,洪峰时间提前 24 min,洪峰流量增大 4.24%;康河沟 1#坝起溃时间提前 21min,洪峰时间提前 21 min,洪峰流量增大 1.53%;康河沟 2#坝起溃时间提前 19min,洪峰时间提前 26 min,洪峰流量增大 4.76%。考虑降雨诱发的径流激增和泥沙补给突变对溃决灾害评价的影响,洪峰时间提前,洪峰流量偏大,结果偏安全,有助于提前发出预警。

采用水沙动力-溃坝数学模型分析黄柏沟 1#坝、康河沟 1#坝与康河沟 2#坝溃口宽度结果如图 8-图 10 所示。

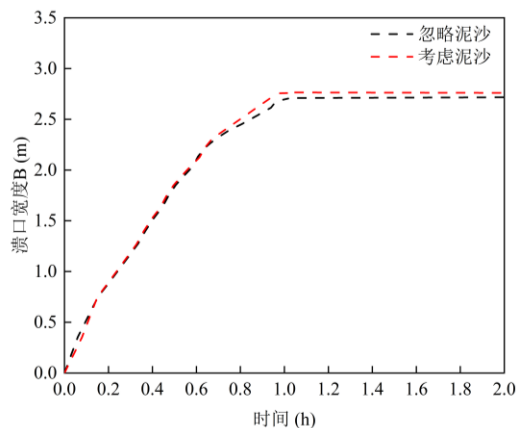


图 8 黄柏沟 1#坝溃口发展过程

Fig.8 Development process of Huangbaigou 1 #dam breach

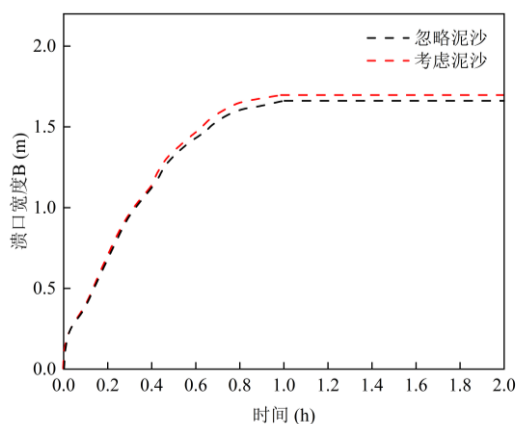


图 9 康河沟 1#坝溃口发展过程

Fig. 9 Development process of Kanghegou 1# dam breach

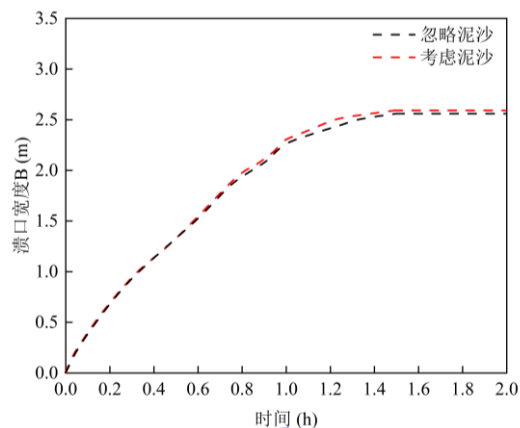


图 10 康河沟 2#坝溃口发展过程

Fig. 10 Development process of Kanghegou 2 #dam breach

分析图 8-图 10 发现, 若考虑降雨诱发的径流激增和泥沙补给突变溃口宽度仅增大 5cm, 无明显变化, 表明泥沙作用对溃口宽度的影响较小。

### 2.2.3 危险坝体快速定位

依据《榆林市实用水文手册》, 基于水沙动力-溃坝数学模型, 采用 P-III型频率曲线表, 对王茂沟流域 15 座淤地坝在不同重现期 (5 年、10 年、20 年、50 年、100 年、200 年) 降雨量下溃决灾害开展危险坝体快速定位研究。不同重现期时段降雨量如图 11 所示, 计算结果见表 3。

表 3 王茂沟流域不同重现期降雨量溃坝结果判定

Table 3 Determination of dam failure results in different recurrence periods of rainfall in Wangmaogou watershed

序号	坝名	溃坝结果判定					
		5 年	10 年	20 年	50 年	100 年	200 年
1	王茂庄 1#坝	不溃	不溃	不溃	不溃	不溃	溃决
2	王茂庄 2#坝	不溃	不溃	不溃	不溃	不溃	不溃
3	黄柏沟 1#坝	不溃	不溃	不溃	不溃	不溃	溃决
4	埵堰沟 1#坝	不溃	不溃	不溃	不溃	不溃	不溃
5	埵堰沟 2#坝	溃决	溃决	溃决	溃决	溃决	溃决
6	埵堰沟 3#坝	不溃	不溃	不溃	不溃	溃决	溃决
7	康河沟 1#坝	不溃	不溃	不溃	不溃	不溃	溃决
8	康河沟 2#坝	不溃	不溃	不溃	不溃	溃决	溃决
9	康河沟 3#坝	溃决	溃决	溃决	溃决	溃决	溃决
10	王塔沟 1#坝	溃决	溃决	溃决	溃决	溃决	溃决
11	王塔沟 2#坝	溃决	溃决	溃决	溃决	溃决	溃决
12	死地嘴 1#坝	不溃	不溃	不溃	不溃	不溃	不溃
13	关地沟 1#坝	不溃	不溃	不溃	不溃	不溃	不溃
14	关地沟 3#坝	不溃	溃决	溃决	溃决	溃决	溃决
15	背塔沟坝	溃决	溃决	溃决	溃决	溃决	溃决



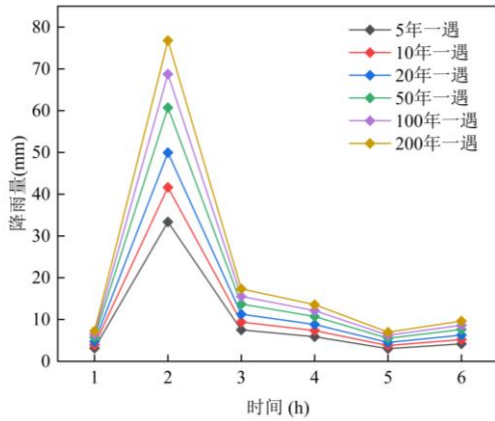


图 11 不同重现期时段降雨量

Fig. 11 Rainfall during different recurrence periods

分析表 3 发现, 5 年一遇降雨量下, 仅有 5 座坝体溃决, 10 座淤地坝能够抵御 5 年一遇的降雨量。而 200 年一遇降雨量下, 仅剩王茂庄 2#坝、埝堰沟 1#坝、死地嘴 1#坝和关地沟 1#坝 4 座坝体不会溃决, 可抵御 200 年一遇降雨量, 其余 11 座淤地坝均溃决。在 100 年与 200 一遇降雨条件下, 随着降雨量的增大, 忽略降雨诱发的径流激增和泥沙补给突变所判定的溃坝数量均小于水沙动力-溃坝数学模型所判定的结果。由此可见, 降雨诱发的径流激增和泥沙补给突变对淤地坝溃决灾害评价的影响不可忽视。

采用水沙动力-溃坝数学模型分析康和沟 3#坝不同重现期降雨量下的溃决流量, 如图 12 所示。分析图 12 发现, 随着不同重现期降雨量的增大, 康和沟 3 坝在 5 年一遇降雨下的溃决峰值流量为  $5.62 \text{ m}^3/\text{s}$ , 洪峰出现时间为  $1.30\text{h}$ , 200 年一遇下的溃决峰值流量为  $7.21 \text{ m}^3/\text{s}$ , 洪峰出现时间为  $0.21\text{h}$ 。洪峰流量增幅为  $28.3\%$ , 洪峰时间提前  $1\text{h}5\text{min}$ 。因此, 随着重现期降雨量的增大, 溃决峰值流量不断增大, 洪峰时间不断提前。

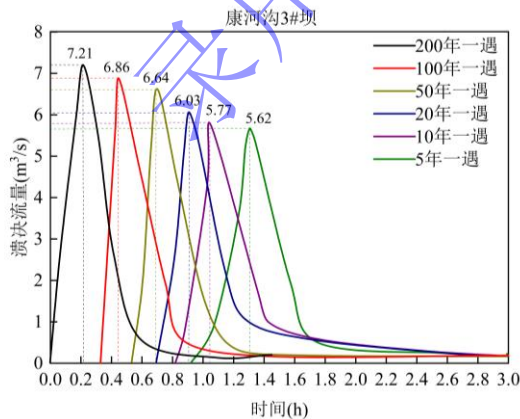


图 12 康和沟 3 坝不同重现期溃坝流量

Fig. 12 Kanghegou Dam 3 dam failure flow rate with different recurrence periods

### 3 结论

本文建立了淤地坝水沙动力-溃坝数学模型, 实现了黄土高原地区淤地坝溃决灾害快速动态评价。主要结论如下:

(1) 水沙动力-溃坝数学模型能够较为准确地得到降雨产沙结果。与实际溃决情况相比, 在 2012 年“7·15”降雨中, 忽略降雨诱发的径流激增和泥沙补给突变对溃决灾害评价过程的影响, 判定黄柏沟 1#坝、康河沟 1#坝与康河沟 2#坝不会发生溃决, 而考虑泥沙作用后则判定该 3 座淤地坝均发生溃决, 判定结果与实际情况一致, 验证了模型的准确性。

(2) 考虑降雨诱发的径流激增和泥沙补给突变过程对淤地坝溃决灾害评价过程的影响, 黄柏沟 1#坝、康河沟 1#坝和康河沟 2#坝洪峰时间分别提前  $24\text{min}$ 、 $21\text{min}$ 、 $26\text{min}$ , 洪峰流量分别增大  $4.24\%$ 、 $1.53\%$ 、 $4.76\%$ , 洪峰时间提前, 洪峰流量偏大, 结果偏安全, 有助于提前发出预警。

(3) 考虑降雨诱发的径流激增和泥沙补给突变过程对淤地坝溃决灾害评价过程的影响, 王茂沟流域在 100 年与 200 一遇降雨条件下, 随着降雨量的增大, 忽略泥沙作用时所判定的溃坝数量均小于考虑泥沙作用时所判定的结果。随着重现期降雨量的增大, 溃决峰值流量不断增大, 洪峰时间不断提前。

### 参考文献:

- [1] 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, (09): 32-38. (CHEN Zuyu, LI Zhanbin, WANG Zhaoyin. Pondering over Strategic Orientation of Check dam Construction in Loess Plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2020, (09): 32-38. (in Chinese))
- [2] Chen Y, Li J, Jiao J, et al. Modeling the impacts of fully-filled check dams on flood processes using CAESAR-lisflood model in the Shejiagou catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2023, 45: 101290.
- [3] Zhang H, Liu S, Yuan W, et al. Loess Plateau check dams can potentially sequester eroded soil organic carbon[J]. Journal of geophysical research-biogeosciences, 2016, 121(6): 1449-1455.
- [4] Chen Y, Li J, Jiao J, et al. Assessing the risk of check dam failure due to heavy rainfall using machine learning on the Loess Plateau, China[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2024, 12(3): 506-520.
- [5] Chen Z, Huang X, 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.



- [6] 冉大川,左仲国,上官周平.黄河中游多沙粗沙区淤地坝拦减粗泥沙分析[J].水利学报,2006,(04):443-450. (RAN Dachuan, ZUO Zhongguo, SHANGGUAN Zhouping. Effect of check dam on retaining and reducing coarse grain sediment in middle reaches of Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,(04):443-450. (in Chinese))
- [7] 刘晓燕,高云飞,马三保,董国涛.黄土高原淤地坝的减沙作用及其时效性[J].水利学报,2018,49(02):145-155.(LIU Xiaoyan, GAO Yunfei, MA Sanbao, DONG Guotao. Sediment reduction of check dams and its timeliness in the Loess Plateau[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,49(02):145-155. (in Chinese))
- [8] Luo Z, Fan J, Hu W, et al. Soil water dynamics and groundwater evolutions of check dams under natural rainfall reduction in semi-arid areas[J].Journal of Hydrology. 2023,617:129099.
- [9] Guo W, Wang W, Xu Q, et al. Distribution failure risk and reinforcement necessity of check-dams on the Loess Plateau:A review [J]. Journal of Mountain Science.2021.18(2):499-509.
- [10] Zhong Q, Wang L, Chen S, et al. Breaches of embankment and landslide dams - State of the art review[J]. Earth-Science Reviews, 2021(12):103597.
- [11] Zhong Q, Chen S, Mei S, et al. Numerical simulation of landslide dam breaching due to overtopping[J]. Landslides, 2018, 15(6): 1183-1192.
- [12] Shan Y, Chen S, Zhong Q, et al. Development of an empirical model for predicting peak breach flow of landslide dams considering material composition[J]. Landslides, 2022, 19(6): 1491-1518.
- [13] 杨蒙,钟启明,林忠,李宇,卢洪宁.沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝试验与溃坝过程数值模拟[J].岩土工程学报,2024,46(07):1534-1540.(YANG Meng, ZHONG Qiming, LIN Zhong, LI Yu, LU Hongning. Model tests and numerical simulation of overtopping-induced breach process of asphalt concrete core dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(7): 1534-1540.(in Chinese))
- [14] 钟启明,沈光泽.混凝土面板砂砾石坝漫顶溃坝模型研究[J].岩土工程学报,2019,41(09):1591-1598.(ZHONG Qiming, SHEN Guangze. Numerical model for breach of concrete face sand-gravel dams due to overtopping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(09):1591-1598.(in Chinese))
- [15] Wang L, Zu Q, Zhang Q. A procedure for risk assessment of check dam systems: A case study of Wangmaogou watershed. [J].PloS One. 2023,18(6):e0287750.
- [16] Zhong Q, Wang L, Shan Y, et al. Review on risk assessments of dammed lakes[J].Frontiers in Earth Science. 2023 (6):10:981068.
- [17] Wang L, Chen Z, Wang N,et al. Modeling lateral enlargement in dam breaches using slope stability analysis based on circular slip mode [J].Engineering Geology. 2016,209:70-81.
- [18] 沈光泽,盛金保,向衍,钟启明.堰塞坝漫顶溃决过程数值模拟及应用[J].岩土工程学报,2018,40(S2):82-86.(SHEN Guangze, SHENG Jinbao, XIANG yan, ZHONG Qiming. Numerical modeling of breach process of landslide dams due to overtopping and its application[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018,40(S2):82-86. (in Chinese))
- [19] Zhang Z, Chai J, Li Z,et al. Approximations Of The Darcy-Weisbach Friction Factor In A Vertical Pipe With Full Flow Regime[J]. Water supply, 2020, 20(4): 1321-1333.
- [20] 张幸幸,陈祖煜.小流域淤地坝系的溃决洪水分析[J].岩土工程学报,2019,41(10):1845-1853.(ZHANG Xingxing, CHEN Zuyu. Breach flood analysis of check dam system in small watersheds[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019,41(10):1845-1853. (in Chinese))
- [21] 吴垚,许月萍,刘莉,何柯琪.基于分布式产流要素和时空深度学习算法的径流后处理研究[J].水利学报,2024,55(09):1123-1134.(WU Yao, XU Yueping, LIU Li, HE Keqi. Streamflow post-processing based on distributed hydrological fluxes and spatio-temporal deep learning algorithm[J].Journal of Hydraulic Engineering, 2024,55(09):1123-1134. (in Chinese))
- [22] Zeng Y, Meng X, Wang B, et al. Effects of soil and water conservation measures on sediment delivery processes in a hilly and gully watershed. Journal of Hydrology[J]. Journal of Hydrology, 2023,(616): 128804.
- [23] Zhao G, G. M K, Mu X, et al. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the loess plateau, China[J], Catena, 2017, 148: 126-137.
- [24] 王琳,褚珍雄,薛一峰,何小亮,黎静.考虑降雨-洪水-泥沙作用下的淤地坝溃决致灾风险评估[J].水力发电学报,2024,43(08):32-45.(WANG Lin, CHU Zhenxiong, XUE Yifeng, HE Xiaoliang, LI Jing. Risk assessment of check dam breaching caused by rainfallflooding-sedimentation interaction [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2024,43(08):32-45. (in Chinese))