

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230559

# 黄土高原淤地坝溃损条件下坝地侵蚀机理及溃口水流特征

尹国龙<sup>1,2</sup>, 乐茂华<sup>3</sup>, 易靖松<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 成都华建地质工程科技有限公司, 四川 成都 611734; 3. 中国水利水电科学研究院泥沙研究所, 北京 100048)

**摘要:** 研究淤地坝溃损条件下的坝地侵蚀机理及水沙过程对于淤地坝的建设和后期管护具有重大意义。基于文献调研和实地调查分析,发现淤地坝溃损后的坝地侵蚀主要受坝地土体性质、坝地形成特征及淤地坝溃损模式影响,坝地侵蚀造沟模式可概括为“淤地坝溃损→溯源侵蚀→冲刷下切→沟壁坍塌→水沙混合流”;以山西省吕梁市离石区马槽里<sup>#</sup>2骨干坝为例,通过数值计算不同淤地工况下淤地坝溃损时的溃口流量过程和水位过程得知,淤地坝溃损条件下的水沙过程受库区的淤地情况显著变化,且坝地具有削峰落沙的作用。

**关键词:** 淤地坝; 溃损条件; 坝地侵蚀; 溃口水流

**中图分类号:** TV649

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)09-0085-04

## 1 引言

淤地坝是黄土高原地区一种行之有效的既能拦截泥沙、保持水土,又可淤地造田、增产粮食的水土保持工程措施。我国黄土高原淤地坝的建设大致经历了四个阶段<sup>[1]</sup>,即1950年代的试验示范阶段、1960年代的全面推广阶段、1970年代的高潮阶段和1980~1990年代以治沟骨干工程为主体的坝系建设阶段。长期以来,黄土高原的淤地坝建设和管理工作取得了巨大成就,产生了显著的社会、经济和生态效益,然而多年来极端暴雨事件等造成的溃损问题却一直困扰着黄土高原地区淤地坝的建设发展<sup>[2]</sup>。王乃欣等<sup>[3]</sup>采用3ds Max等软件开展了淤地坝溃决的仿真研究;袁水龙等<sup>[4]</sup>采用MIKE耦合模型分析了淤地坝对沟道

洪水过程的影响;李彬权等<sup>[5]</sup>基于库容变化规律提出了淤地坝拦蓄作用下的产流阈值估算方法,但目前关于淤地坝溃损条件下坝地侵蚀机理及溃口水流特征的研究较少。为此,本文将基于文献调研及实地调查阐述淤地坝溃损后坝地侵蚀机理,并通过实例计算分析不同淤地工况下淤地坝溃损时溃口水流特征,研究成果对于黄土高原淤地坝的建设和后期管护具有重要意义。

## 2 研究资料与方法

### 2.1 研究资料

根据实地调查访问、历史资料查阅及相关文献报道<sup>[2]</sup>,统计黄土高原地区几次极端暴雨事件导致的淤地坝溃损情况,见表1,以此研究淤地坝溃损后坝地侵蚀机理。以山西省吕梁市离石区马槽里<sup>#</sup>2骨干坝为例,计算分析淤地坝溃损时溃口

表1 历史极端暴雨事件导致淤地坝溃损情况  
Tab. 1 Several historical warping dam failures by extreme rainstorm events

时间	地点	暴雨频率	淤地坝溃损情况
1977年8月	清涧县、子长县、绥德县	100年一遇	冲毁大小淤地坝2700座、930座、2640座,毁坝数占坝总数的70%~80%
1994年7~8月	绥德县、定边县、吴旗县	超过100年一遇	冲毁淤地坝798座、272座、65座,占当地淤地坝总数三成以上
2000年7月	吕梁市离石王家沟流域	50年一遇	5座淤地坝部分水毁,2座淤地坝涵洞部分水毁
2010年9月	吕梁市方山县、离石区	超过200年一遇	4座淤地坝坝体冲沟,1座淤地坝坝体冲毁
2012年7月	绥德县韭园沟流域	80年一遇	24座淤地坝及其放水建筑物发生不同程度损毁
2016年8月	鄂尔多斯地区	超过300年一遇	19座淤地坝溃损,占流域内总数的11%
2017年7月	绥德、子洲县	超过100年一遇	损毁淤地坝337座

收稿日期: 2023-04-01, 修回日期: 2023-05-06

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U2243237, U22A20237)

作者简介: 尹国龙(1988-),男,硕士、工程师,研究方向为岩土力学与边坡工程, E-mail: 623531503@qq.com

通讯作者: 乐茂华(1986-),男,博士、高级工程师,研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: lemh@iwhr.com

的水流特征。马槽里<sup>#2</sup>骨干坝隶属离石区阳坡流域坝系,该坝建于2005年,2017年7月遭遇暴雨后坝体发生溃损,形成一个约5 m宽贯通到坝底的缺口。

### 2.2 研究方法

基于黄土高原地区淤地坝溃损的调研与实地调查,阐述淤地坝溃损后坝地侵蚀机理。采用中国水利水电科学研究院岩土所开发的DB-IWHR模型<sup>[6,7]</sup>,计算分析不同淤地工况下马槽里<sup>#2</sup>骨干坝溃损时溃口水流特征。

(1)基于水量守恒原理,采用宽顶堰公式计算溃口断面流量 $Q$ :

$$Q = CB(H - z)^{3/2} = \frac{\Delta W}{\Delta H} \frac{\Delta H}{\Delta t} + q \quad (1)$$

式中, $C$ 为流量系数,其值为 $1.3 \sim 1.7 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ;  $B$ 为溃口宽度;  $H$ 为库水位;  $z$ 为溃口底高程;  $W$ 为库容;  $t$ 为时间;  $q$ 为入库流量。

(2)采用双曲线形式的冲刷速率公式:

$$dz/dt = \Phi(\tau) = \nu / (a + b\nu) \quad (2)$$

其中  $\nu = k(\tau - \tau_c)$

式中, $\nu$ 为扣除临界剪应力后的剪应力;  $1/a$ 表示 $\nu$ 等于0时曲线的斜率;  $k$ 为在剪应力 $\tau$ 范围内允许冲刷速率接近其极值 $1/b$ 的单位变换因子,取100;  $\tau_c$ 为岩土体临界剪应力。

(3)溃口扩展模式。在溃口底部不断冲刷过程中,两侧发生崩塌失稳,侧面不断扩大。采用岩土工程中经典的简化Bishop法侧向冲刷和圆弧形边坡稳定分析两者联合的侧向扩展模式计算侧向崩塌过程。

## 3 淤地坝溃损后坝地侵蚀机理

### 3.1 坝地侵蚀的影响因素

根据黄土高原地区淤地坝溃损的实地调查,不同流域淤地坝坝地组成的土体物理力学性质存在差异。由于坝地形成过程不同,有些坝地有持续的水沙补给,有些坝地的来水来沙则具有显著的场次特征,坝地形成过程的差异直接影响坝地淤积物重度、分层特性;在不同的洪水条件下,淤地坝溃损程度及其溃决模式也不同,上述差异共同影响着淤地坝溃损后坝地侵蚀过程。

(1)坝地土体性质。淤地坝库区类似于流域的沉砂池,坝地泥沙主要由流域内侵蚀土壤淤积而成,坝地的沉积物与流域土壤侵蚀产沙存在一定对应关系<sup>[8]</sup>。同时,坝地的侵蚀特征也受流域土壤的物理力学性质影响,在黄土高原地区,不同

类型的黄土因物理力学性质存在差异而呈现不同的侵蚀强度。黄土高原土质主要为第四系黄土,从上至下依次为全新世黄土、马兰黄土、离石黄土和午城黄土,堆积厚度主要在50~100 m,其中全新世黄土和马兰黄土土层质地疏松,垂直节理发育,遇水极易崩解湿陷,粉粒含量往往高于60%,而粘粒含量低。

(2)坝地形成特征。坝地的形成过程直接影响坝地淤积物重度、分层特性等。根据水中泥沙沉降规律,沉降过程中存在颗粒分选作用,通常粗颗粒最先沉积,其次为粉砂,最后为粘粒。一般而言,每场洪水过程在淤地坝内均能形成一个明显的沉积旋回层,即下粗上细的剖面结构,其厚度与次降雨侵蚀产沙量密切相关<sup>[9]</sup>。坝地的这种旋回层特点也决定了其侵蚀过程具有自身的特殊性。

(3)淤地坝溃损模式。根据天然堰塞体破坏机制的分类<sup>[10]</sup>,淤地坝溃损模式可分为漫顶破坏、管涌破坏和整体失稳三类。在坝体溃损过程中,其过水方式包括漫流侵蚀、渗透、漫流-渗透。随着淤地坝破损,坝地的侵蚀方式也将发生变化,坝地可能发生崩塌、泻溜、剥落等重力侵蚀。根据淤地坝过水方式和溃损程度的差异,坝地发生的重力侵蚀程度也将不同。

综上所述,淤地坝坝地土体性质及坝地形成特征共同决定着坝地侵蚀的基本特征;淤地坝溃损条件下的坝地侵蚀过程主要受坝体过水方式及其溃损程度影响,这两者可能增强坝地的水力侵蚀程度,并引起坝地发生不同程度的重力侵蚀。

### 3.2 坝地侵蚀的造沟模式

在淤地坝溃损条件下,对坝地最直接的影响为可能触发重力侵蚀。首先,淤地坝溃口处的坝地土体发生不同程度的崩塌、剥落,形成初始沟头;其次,在水流作用下,溃口产生溯源侵蚀,使得沟头向上游发展,并伴随新生沟道的下切侵蚀;同时,沟壁发生侧蚀坍塌使得新生沟道得以扩张展宽,从而形成“淤地坝溃损→溯源侵蚀→冲刷下切→沟壁坍塌→水沙混合流”的坝地侵蚀造沟模式,见图1。

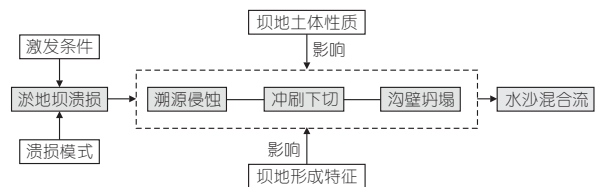


图1 淤地坝溃损条件下坝地侵蚀的概化模式  
Fig. 1 A generalized model of dam-land-erosion under the condition of the warping-dam failure

在整个坝地侵蚀造沟过程中,冲刷下切主要受水力条件控制,而溯源侵蚀和沟壁坍塌均为水力侵蚀和重力侵蚀联合作用的结果,它们具有一定的随机性<sup>[11]</sup>,溯源侵蚀改变了侵蚀沟的长度,冲刷下切增加了侵蚀沟的深度,沟壁坍塌则影响着侵蚀沟的宽度。溯源侵蚀、冲刷下切和沟壁坍塌是塑造坝地侵蚀沟的主要过程,且三者还将不同程度地影响着淤地坝溃坝条件下的泥沙输量。

## 4 淤地坝溃坝的溃口水流特征

### 4.1 库容—水位特征

马槽里<sup>#</sup>2 骨干坝坝址以上流域面积 7.99 km<sup>2</sup>,设计标准 20 年一遇设计,200 年一遇校核,淤积年限 15 年,可淤地 5.4 hm<sup>2</sup>,坝高 29.5 m,相应坝顶高程为 1 391.0 m,总库容 97.33 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,相应高程为 1 389.5 m,拦泥库容为 41.19 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,相应高程为 1 380.9 m。上游坝坡坡比 1 : 2.5,下游坝坡坡比 1 : 2.0,坝顶宽 4 m,坝长 146 m。淤地坝溃坝前,淤面高程 1 375.0 m,淤面与坝顶高差 16 m,已淤泥 22.89 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,已淤坝地 3.87 hm<sup>2</sup>。基于库区地形资料,统计不同水位下库区的水面面积,计算相应库容,得到不同淤地工况下淤地坝的库容—水位曲线见图 2。

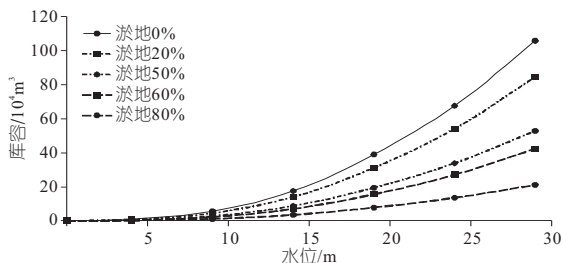


图 2 不同工况马槽里<sup>#</sup>2 骨干坝的库容—水位曲线

Fig. 2 Storage capacity-water level curves of the Macaoli #2 backbone dam under different working conditions

### 4.2 溃口水流特征

从物理机制上看,淤地坝溃坝是非恒定水流流态变化和基于泥沙非恒定输移与坝体垮塌溃决相互作用的耦合过程。根据马槽里<sup>#</sup>2 骨干坝淤地设计资料,采用 DB-IWHR 程序计算淤地坝在无淤地、淤积库容 20%、50%、60%、80% 5 种工况下溃坝时溃口流量过程线和水位过程线,溃坝部位泥沙中值粒径 0.05 mm,溃坝沟床孔隙率为 0.43,计算结果见图 3。

由图 3(a)可知,淤地坝溃坝时溃口流量过程线为一条非对称曲线,在库区有淤地情形下,流量过程上升阶段较为迅猛而下降阶段较为平缓;随着淤地坝库区淤地增加,坝体溃坝后的洪峰流量

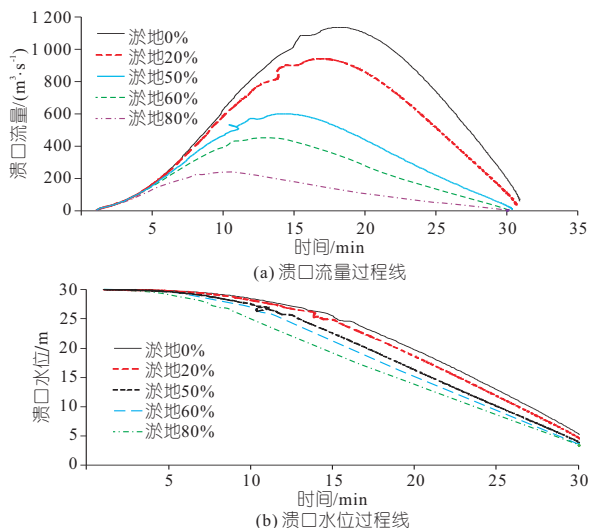


图 3 不同工况马槽里<sup>#</sup>2 骨干坝的溃口流量、水位过程线

Fig. 3 The flow and water level hydrograph of breaks in Macaoli #2 backbone dam under different working conditions

减小,由于计算中假定了坝体一溃到底,故此时洪峰峰值削减效应主要归于坝地作用。由图 3(b)可知,淤地坝溃坝时溃口水位过程线近似为一条反 S 型曲线,随着淤地坝库区淤地增加,溃口水位近线性降低,水动能减小,溃决水流的输沙力亦降低,故淤地增加的坝地发挥了落沙作用。由此可见,淤地坝溃坝条件下的水沙输移特征受库区淤地情况显著变化,且坝地具有削峰落沙的作用。

## 5 结论

a. 通过调研和实地调查分析,发现坝地土体的物理力学性质、坝地的旋回式沉积特征及淤地坝的溃决模式与溃坝程度共同影响着淤地坝溃坝后坝地侵蚀过程。淤地坝坝地土体性质及坝地形成特征决定着坝地侵蚀的基本特征,淤地坝溃坝时坝体过水方式及其溃坝程度,可能增强坝地的水力侵蚀程度,并引起坝地发生不同程度的重力侵蚀。坝地侵蚀造沟模式可概括为“淤地坝溃坝→溯源侵蚀→冲刷下切→沟壁坍塌→水沙混合流”。

b. 基于案例计算结果可知,淤地坝溃坝时溃口流量过程线是一条非对称曲线,在库区有淤地情形下,流量过程上升阶段较为迅猛而下降阶段较为平缓,淤地坝溃坝时溃口水位过程线近似为一条反 S 型曲线。随着淤地坝库区淤地增加,坝体溃坝后的洪峰流量减小,溃口水位降低,淤地坝溃坝条件下的输沙特征受库区淤地情况显著变化,且坝地具有削峰落沙的作用。

### 参考文献:

- [1] 魏霞,李占斌,沈冰,等. 淤地坝建设中的水毁问题及其防御措施[J]. 水资源与水工程学报,2004,15

(4):55-59.

[2] 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.

[3] 王乃欣,王志坚,梁小卫. 基于虚拟现实的淤地坝溃决模拟[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(5):162-167.

[4] 袁水龙,李占斌,李鹏,等. MIKE 耦合模型模拟淤地坝对小流域暴雨洪水过程的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(13):152-159.

[5] 李彬权,朱畅畅,梁忠民,等. 淤地坝拦蓄作用下的产流阈值估算[J]. 水电能源科学,2019,37(8):11-13.

[6] CHEN Z, MA L, YU S, et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan barrier lake [J]. Journal of hydraulic engineering, 2014, 141(4): 05014011.

[7] 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.

[8] 张风宝,杨明义,张加琼,等. 黄土高原淤地坝沉积泥沙在小流域土壤侵蚀研究中的应用[J]. 水土保持通报,2018,38(6):365-371.

[9] 魏霞,李占斌,李鹏,等. 黄土高原典型淤地坝淤积机理研究[J]. 水土保持通报,2006,26(6):10-13,31.

[10] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams [J]. Geological society of America bulletin, 1988, 100(7): 1054-1068.

[11] 韩鹏,倪晋仁,李天宏. 细沟发育过程中的溯源侵蚀与沟壁崩塌 [J]. 应用基础与工程科学学报,2002,10(2):115-125.

## Erosion Mechanism of Dam Lands and Flow Characteristics of Dam-Break Under Warping-Dam-Break Conditions in the Loess Plateau

YIN Guo-long<sup>1,2</sup>, LE Mao-hua<sup>3</sup>, YI Jing-song<sup>1</sup>

(1. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, China; 2. Chengdu Huajian Geological Engineering Technology Co., Ltd., Chengdu 611734, China; 3. Department of Sediment Research, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The study of water-sediment processes and dam-land-erosion mechanisms under warping-dam-break conditions is of great significance for the construction and later management of warping dams in the Loess Plateau. Based on the literature research and field investigation, this paper identified the main causes of dam-land-erosion under warping-dam-break conditions, including the nature of the dam soil, the formation characteristics of the dam and the check dam break mode. It proposed that the process of dam erosions and gully erosions after warping dam failures was as follows: "warping dam failure → retrogressive erosion → scouring and undercutting → collapse of gully walls → mixed flow of water and sand". Taking the #2 main dam in Macaoli of Lishi District in Lvliang City, Shanxi Province as an example, the numerical calculation results indicate that the water-sand process under the condition of warping dam failures was significantly changed by the siltation of the reservoir areas, and the dam lands have the role of shaving peaks and sinking sands.

**Key words:** warping dam; dam-break condition; dam-lands erosion; dam-break flow

\*\*\*\*\*  
(上接第 67 页)

## Bibliometric Analysis of Chinese Literature on Reservoir Regulation for Flood Control Purposes Using CiteSpace and VOSviewer

WANG Jun<sup>1</sup>, WANG Jia-chang<sup>1</sup>, WANG Hai-jun<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, WANG Kai<sup>3</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, CAO Sheng-le<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Hydrologic Center of Shandong Province, Jinan 250002, China; 3. Hydrology Bureau of Huaihe River Water Resources Commission (Information Center), Bengbu 233000, China)

**Abstract:** Climate change and urbanization development have brought great challenges to reservoir flood control and disaster mitigation, and reservoir regulation is one of the important non-structural means for controlling floods. Therefore, this study applies the bibliometrics method and visualization analysis tools (CiteSpace and VOSviewer) to conduct a systematic quantitative analysis of the Chinese literature regarding the research topic of reservoir flood control regulation. The results indicate that the number of Chinese literature on reservoir flood control regulation can be divided into three periods in terms of the publication time, and the number of publications in different periods witnesses the development history of reservoir flood control regulation technology in China; The co-occurrence analysis of keywords provided the top 10 keywords in terms of frequency and centrality. The emergence analysis provided the development history of high popularity keywords since 2000. Cluster analysis classified keywords with significant correlation and displayed the relationship between different clusters; The analysis of authors, institutions, and literature sources can provide guidance for relevant researchers in the Chinese journal selection during the manuscript submission and the collaborator choices in Academia.

**Key words:** reservoir operation; flood control; CNKI; CiteSpace; VOSviewer