

small watershed, Xiangning County, Linfen City, Shanxi Province. [Conclusion] It is feasible to conduct early risk warning prevention and control in check dam systems through information construction. The method can provide a quick and intuitive information transmission platform that is convenient for staff to operate and manage check dam systems, and effectively prevent the risk of accidents in these systems.

Keywords: check dams; risk warning; prevention and control platform; Linfen City, Shanxi Province

黄土高原地区沟壑纵横,是中国水土流失最严重、生态环境最脆弱的地区之一。水土流失问题严重制约了黄河流域生态保护和高质量发展^[1-2]。淤地坝是黄土高原地区水土保持、淤地造田、改善交通、保护生态的重要工程设施,对黄河流域的生态保护起到重要作用^[3-5]。截至 2019 年 11 月中国共有淤地坝 58 776 座,其中大中型淤地坝 1.80×10^4 座^[6]。

淤地坝常以串联或并联的方式分布于黄土高原地区,因其数量多、建设条件落后等因素,缺少有效的监测设施和管理手段^[7-9],在极端降雨条件下,淤地坝系很可能发生连续溃决,从而引发灾难性的洪水或泥石流^[10],如延河流域淤地坝溃决^[11]、内蒙古达拉特旗淤地坝连续溃决^[12]、陕北“7·26”暴雨洪水灾害^[13]等。

近年来,许多学者对小流域淤地坝系的风险预警问题进行了研究。陈瑾等^[14]、马瑞等^[15]对淤地坝系的运行管理问题进行了总结,目前主要存在风险预警时效性差、预警管理灵活性差、监测机制较为落后等问题。刘刚等^[16]、常光等^[17]、Sepehri 等^[18]、Yazdi 等^[19]都通过建立模型来模拟淤地坝系连锁的溃决洪水过程。李想^[20]、段茂志^[21]、马松增等^[22]分别对淤地坝开发了安全监控模型、实时预警模型、自动化监测系统等。但以上模型的研究及信息化系统的应用均无法满足淤地坝数量较多、分布关系复杂的坝系。因此,目前亟需一个可满足复杂淤地坝系的、实用的、系统化的风险预警防控平台。因此,本文充分调研典型淤地坝水毁的类型及原因,结合淤地坝系溃决理论及模型研究,提出并开发淤地坝系风险预警防控平台,并结合工程实际进行应用测试,以为淤地坝的预警、管理提供有力支撑。

1 工程背景

建立淤地坝系风险预警防控平台的目的是解决在极端降雨条件下淤地坝因数量众多,上下游联动性强,设计等级普遍较低等带来的风险预警防控问题,防止淤地坝发生水毁溃决,避免人民生命财产受到损失。平台通过收集淤地坝系基本信息、巡检记录、监测数据,协调处理问题,完成风险预警。将一套能够满足淤地坝系风险预警防控的软件系统应用到不同流域,供现场人员及管理人员协同使用,最终

为防汛管理和风险预警提供专业、快速、精确的技术支持。

本研究以山西省临汾市西廆沟小流域为具体研究对象,该流域地处山西省临汾市乡宁县昌宁镇南原村境内,属于黄河一级支流鄂河的一级支沟,流域总面积 17.82 km^2 ,年最大降雨量 732.7 mm ,年最小降雨量 312 mm ,多年平均降雨量为 514 mm ,共有 3 座骨干坝,7 座中型坝^[23](图 1)。淤地坝系风险预警防控平台已在多级管理单位及当地巡检人员中试用。



注:g 表示骨干坝; z 表示中型坝。下同。

图 1 西廆沟淤地坝系流域影像

Fig.1 Basin image of the Xi'ao ditch check dam system

2 淤地坝系风险预警防控平台

2.1 平台模块功能及应用

平台基于 iVX 编程语言,使用 MySQL 数据库,

采用分层式架构,平台的前端部分和后台部分的逻辑完全独立,两者通过服务层来通信。前端由用户运行,应用主体使用 React 框架^[24],服务层提供了一个 Http 的服务接口(RESTAPI),可以供前端部分应用来调用,也可以直接操作各种后台资源^[25]。后台部分主要是各种类型的数据存储服务,包括数据库,缓存,消息队列,文件对象存储等,后台资源接口是由

Go 语言实现的微服务集群,基于 Go Micro 微服务框架,可在服务中调用数据库。

针对淤地坝系特点,结合风险预警防控需求,进行功能模块的设计与开发,旨在形成全覆盖、可视化、高效率的软件系统,以解决坝系级别的风险管理难点,各模块之间既有分工又有协同,提供科学合理使用感受。平台模块结构构成如图 2 所示。

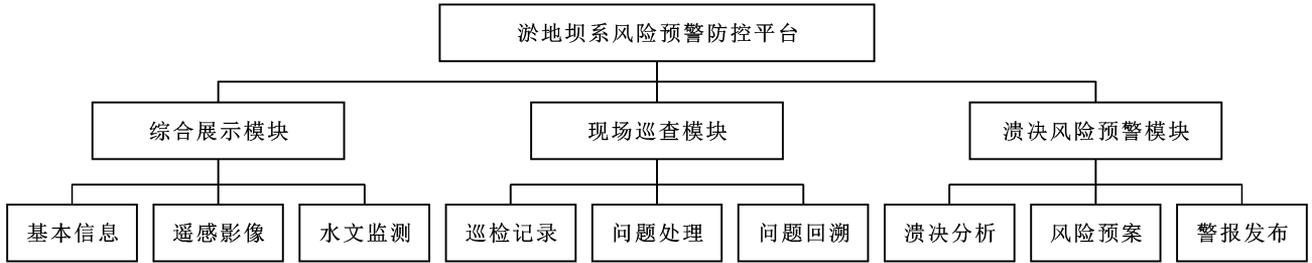


图 2 淤地坝系风险预警防控平台结构

Fig.2 Structure of the risk warning and prevention platform for the check dam system

2.2.1 综合展示模块 本模块采用数据集成方式,对淤地坝系基本信息进行展示,使相关人员能够了解坝系基本情况和一些安全信息,主要包括各坝的行政责任人、技术责任人、巡查责任人的“3 个责任人”及联系方式,方便管理人员迅速联系相关责任人,起到提

高管理效率、监督责任实行的效果(图 3)。通过遥感地图、淤地坝运行中的照片、视频监控,直观地展示淤地坝所在区域地形地貌和运行状况,使淤地坝管理人员足不出户即可掌握现场面貌,方便管理人员及时保障淤地坝的安全稳定。

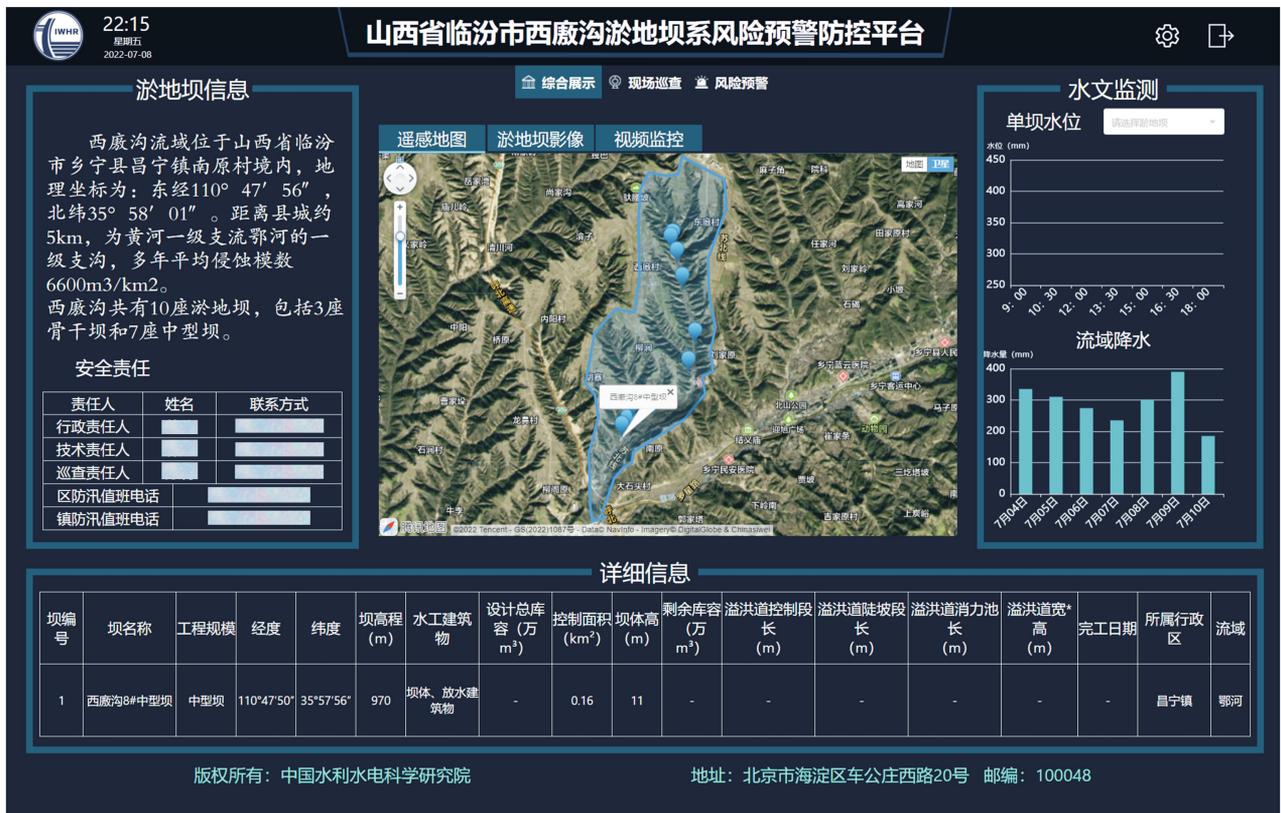


图 3 风险预警防控平台综合展示页面

Fig.3 Risk warning prevention and control platform comprehensive display page

该模块还以物联网的方式接入了视频监控及自动水位雨量监测仪,可以获得实时的淤地坝视频监控情况及坝前水位、降水量,这些监测数据作为后文介绍的坝系溃决分析的参数基础,为预警分析及风险防控提供数据基础。

最后,本模块还录入了该淤地坝系各项的详细信息,包括坝高程、设计总库容等基本参数,使相关人员通过一个界面即可大体掌握坝系基本情况。

2.2.2 现场巡查模块 巡查检查对于淤地坝系而言十分重要,但传统的人工巡检方式发现的问题不能及时记录和反馈,缺少有效的数据管理手段,很难满足淤地坝信息化管理的需要^[26]。

本模块采用数字化巡检,并配备了移动端小程序,平行于 PC 端平台,具备相同功能,可供各级管理人员和巡查人员在手机设备上使用。如 2021 年 8 月

27 日工作人员在现场巡查中发现西廆沟 8# 淤地坝下游坝坡靠右岸处出现局部塌陷,在发现问题后,巡查人员可以对发现问题拍照、录像,通过移动端以图片、录像、文字说明等方式进行及时上报(图 4),及时反馈给相应管理部门。上报完成后,平台能够记录巡检时的责任人信息、巡查地点、巡查时间、照片等,形成电子档案进行记录,为设施的管理和检修提供相应的依据,为以后淤地坝系除险加固、应急决策提供支持,起到事先降低溃决风险的作用。

移动端小程序还提供了巡检记录本地储存功能,若巡检地点信号不佳,可以先将记录储存至本地,待具备信号条件后再进行上报。通过移动端的使用,让巡查人员及时进行反馈,使管理人员更为方便快捷地对运行情况进行了解,更为迅速地处理问题,有助于淤地坝运行管理使用。



图 4 风险预警防控平台现场巡查页面

Fig.4 Risk warning prevention and control platform site inspection page

2.2.3 溃决风险预警模块 溃决风险预警模块是淤地坝风险预警防控平台的核心部分。该模块内嵌陈祖煜院士团队提出的“家谱法”淤地坝系溃决风险分析程序 FT-IWHR 及溃坝洪水计算分析程序 DB-IWHR, DB-IWHR 是现行规范《淤地坝技术规范》(SL/T 804-2020)^[27]推荐的淤地坝溃坝洪水流量计算方法。“家谱法”具有很强的鲁棒性,即使是淤地坝数量更多,分布更复杂的淤地坝系,该方法也可适用,其核心思路是将复杂淤地坝系类看作人类社会的“家谱”,采用人类家谱的逻辑关系分解淤地坝系复杂结构,将淤地坝间的出入流关系比作“母子”,逐级完成整个坝系的分析,实现了充分考虑上游下泄洪水(包括溃坝洪水)的淤地坝系连贯风险分析^[28],如图 5 所示的淤地坝系,我们可将其中的坝分为 3 大类:

(1) 源头坝。源头坝位于坝系主沟道的出口,水流从这里流出后不再流入其他坝。图 5 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 5 中编号为 3,9,10 的坝为边界坝。

(3) 中间坝。除去前两类坝,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一个淤地坝泄流,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”。如图 5 中 8 号坝是 9,10 号坝的“母坝”^[18]。

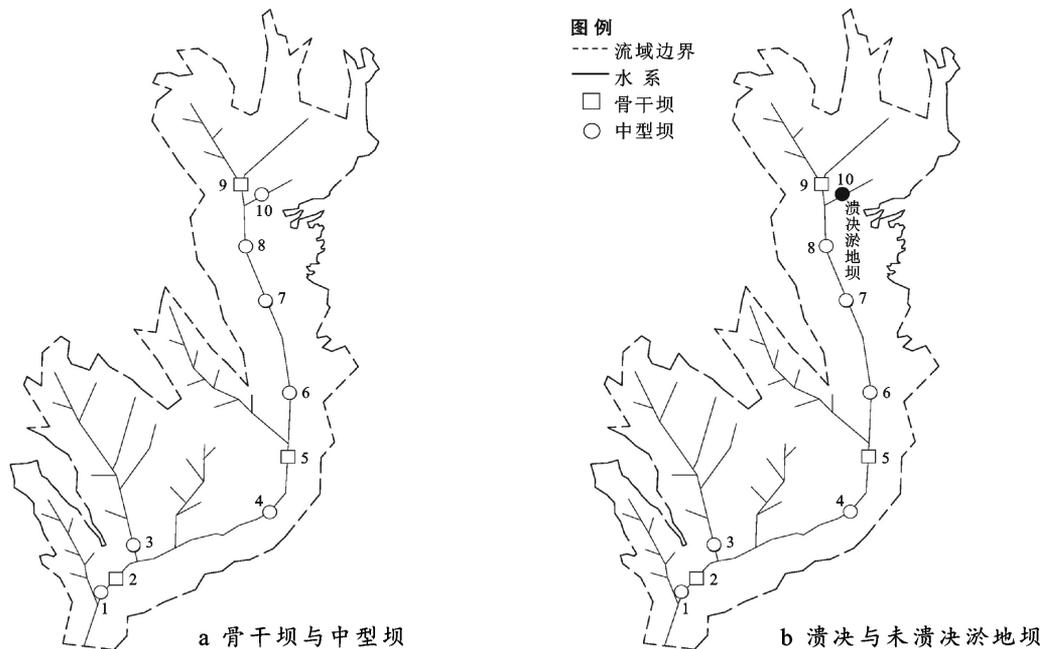


图 5 西廆沟淤地坝系“家谱法”计算示意图

Fig.5 The “genealogical method” calculation diagram of the Xiao ditch check dam system

降雨量对淤地坝单坝贡献的入流量由式(1)确定^[22]。

$$W_m^p = \alpha \times H_p \times F \quad (1)$$

式中: W_m^p 为降雨产生的淤地坝入流(10^4 m^3); α 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)。

为了给溃决预警提供依据,在系统平台中对一定降水量条件下可能出现的淤地坝溃决状况进行预设。根据西廆沟流域的降雨资料,假定了西廆沟小流域日降雨量条件,分别为 50,100,200,500,1 000 mm。尽管 1 000 mm 的日降雨量在山西临汾地区的发生

可能性很小,但考虑近些年来极端降雨事件频发,如 2021 年郑州“7·20”暴雨,最大日降雨量达到了 624.1 mm ^[29],决定将淹没预案的界限降雨量设置范围适当增大。通过对淤地坝系的连贯分析计算不同日降水量条件下淤地坝系的淹没情况(表 1),最终实现可在不同降雨量下模拟淤地坝发生溃决后对下游造成的影响区域,形成淹没范围预警图(图 6)。

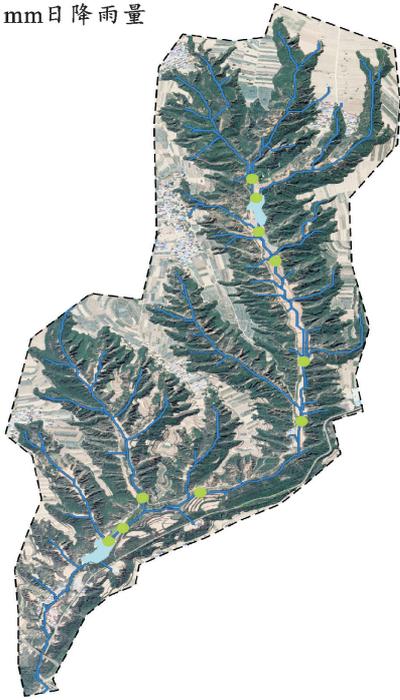
溃决风险预警模块内展示了西廆沟淤地坝系各坝的库水位信息和“3 个责任人”信息(图 7)。预警触发主要有两种模式。①根据淤地坝库内水位监测值达到预警值一段时间后进行触发,将相关警情推送给

管理人员。这种方法将预警触发条件直接与监测仪器进行关联,适用于溃决临近发生的短时间预警,但是由于目前淤地坝的监测布置较少,很难实现对大部分淤地坝进行预警。西廆沟流域仅有 8# 中型坝具有水位雨量监测设施。

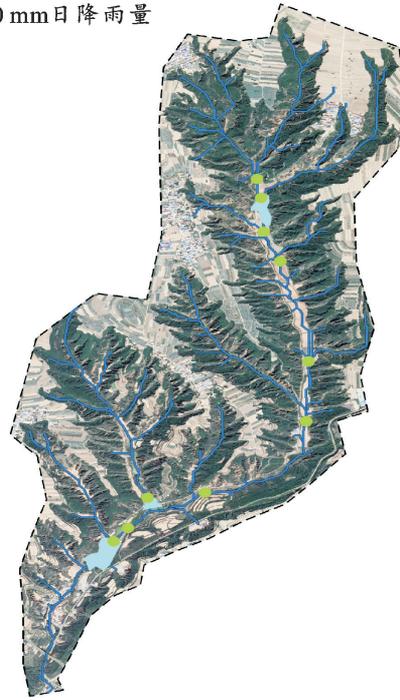
预警触发的第 2 种模式是根据天气预报,对未来一定时间内出现的降雨量进行判断,根据预计降雨量

及平台内置的溃决预警范围判断险情状况,由管理人员协同政府管理人员进行险情预警。这种模式的优势就是具有预判性,对险情发生具有预判和准备时间。本文推荐将两种触发方式相结合使用,通过天气预报对险情进行预判,设置人员转移及应急处置预案,同时可结合具体降水量、库水位监测进行综合判断。

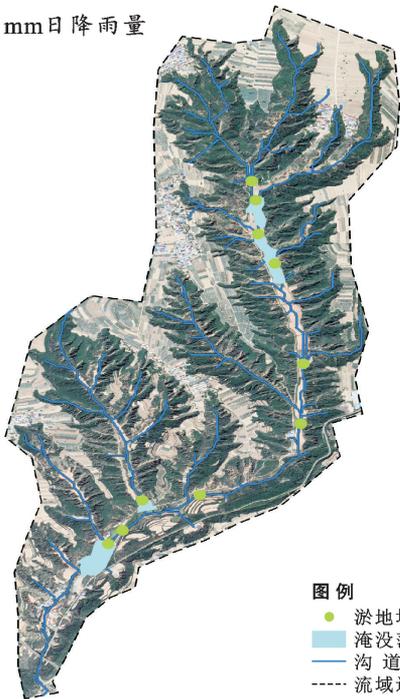
a 100 mm 日降雨量



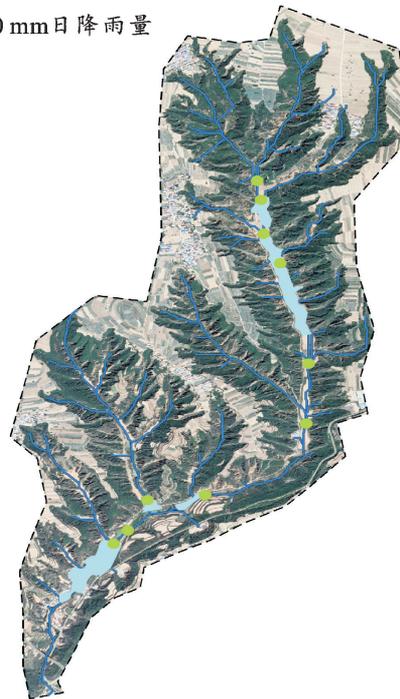
b 200 mm 日降雨量



c 500 mm 日降雨量



d 1000 mm 日降雨量



图例
 ● 淤地坝
 ■ 淹没范围
 — 沟道
 - - - 流域边界

图 6 不同日降雨量下西廆沟淤地坝系淹没范围

Fig.6 Inundation range of Xi'ao ditch check dam system under different daily rainfall

表 1 西厥沟淤地坝系不同日降雨量下的淹没情况

Table 1 Inundation at different daily rainfall levels of the Xiao ditch check dam system

日降雨量/mm	溃决淤地坝	淹没区面积/km ²	受灾设施
50	无	0	无
100	1 [#] , 8 [#] 中型坝	0.66	1 [#] 中型坝坝下农田、农机棚及蓄水池; 8 [#] 中型坝坝下淤田
200	1 [#] , 7 [#] , 8 [#] 中型坝	2.84	1 [#] 中型坝坝下农田、农机棚及蓄水池; 7 [#] 中型坝坝下林地; 8 [#] 中型坝坝下淤田、联络道路
500	1 [#] , 2 [#] , 3 [#] , 7 [#] , 8 [#] 中型坝	5.50	1 [#] 中型坝坝下农田、农机棚及蓄水池、公路苏北线护坡及 2 [#] 中型坝联络道路; 3 [#] 中型坝坝下林地; 7 [#] 中型坝坝下淤田 8 [#] 中型坝坝下淤田、联络道路
1 000	1 [#] , 2 [#] , 3 [#] , 6 [#] , 7 [#] , 8 [#] 中型坝	7.88	沟口村北部房舍及周围农田、储料场; 2 [#] 中型坝坝下农田、农机棚及蓄水池、公路苏北线护坡及联络道路; 3 [#] 中型坝坝下林地; 6 [#] 中型坝到 7 [#] 中型坝之间所有淤田; 8 [#] 中型坝坝下淤田、联络道路

管理人员可以查询某一日降雨量条件下相应的淹没范围及受灾设施,进行相应预案拟定,及时调用应急处置措施,实现淤地坝险情精准预测(图 7)。相关管理人员可根据预报降雨量查询相应的预警等级

及风险涉及范围,也可直接通过风险警报发布相应预警等级,根据事先订制的警报标准对风险等级进行提示,同时还可在降水洪水结束后解除警报,达到减少管理环节,提高警报时效性,最终降低风险损失的效果。



图 7 风险预警防控平台风险预警页面

Fig.7 Risk warning prevention and control platform risk warning page

3 结论

通过研究开发淤地坝系风险预警平台,并在西厥沟小流域进行平台应用。

(1) 开发的淤地坝系风险预警防控平台,可以收录并展示淤地坝系的基本信息、遥感影像、视频监控、

大坝水位及日降雨量,直观清晰地展示淤地坝系的基本情况,为淤地坝系风险预警防控提供快捷直观的信息传递平台。

(2) 利用互联网、移动端小程序等信息媒介,建立巡查和问题在线上报处理机制,可以便于管理人员进行淤地坝巡检,实现发现问题及时上报上传,同时

可以对以往曾经出现过的问题进行回溯,为淤地坝除险加固提供基础资料。

(3) 结合淤地坝库内水位的监测仪器和天气预报以及预先设定的淤地坝溃决警报阈值,进行洪水风险预警,可以降低淤地坝系溃决风险,为人员转移,风险处置提供技术支撑,为解决淤地坝系风险防控问题提供有效方案。

[参 考 文 献]

- [1] 牛玉国,王煜,李永强,等.黄河流域生态保护和高质量发展安全保障布局和措施研究[J].人民黄河,2021,43(8):1-6.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 曲婵,刘万青,刘春春,等.黄土高原淤地坝研究进展[J].水土保持通报,2016,36(06):339-342.
- [5] 朱芷,周波,张富等.黄土丘陵区淤地坝系田园综合体的构建模式[J].水土保持通报,2021,41(4):145-150.
- [6] 刘雅丽,王白春.黄土高原地区淤地坝建设战略思考[J].中国水土保持,2020(9):48-52.
- [7] 张金良,苏茂林,李超群,等.高标准免管护淤地坝理论技术体系研究[J].人民黄河,2020,42(9):136-140.
- [8] 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.
- [9] 张峰,周波,李锋,等.三维激光扫描技术在淤地坝安全监测中的应用[J].水土保持通报,2017,37(5):241-244,275.
- [10] Zhang Fanyu, Yan Binbin, Feng Xiaoming, 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.
- [11] 魏艳红,王志杰,何忠,等.延河流域203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.
- [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] 陈瑾,乔生彩,杨志军,等.淤地坝蓄水兴利库容设计与管理探讨[J].中国水土保持,2021(12):30-32.
- [15] 马瑞,张富,周波,等.甘肃省淤地坝工程的溃坝风险评估模型[J].水土保持通报,2021,41(4):139-144.
- [16] 刘刚,李鹏,刘强,等.黄土丘陵区淤地坝系对流域洪水过程影响与溃坝模拟[J].西安理工大学学报,2020,36(4):468-474.
- [17] 常兴,刘刚,刘亚.黄土高原淤地坝安全运用巡查管理系统的设计与开发[J].水土保持通报,2022,42(02):129-135.
- [18] Sepehri 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] 李想.基于物联网的土质淤地坝监测预警系统[D].山西太原:太原理工大学,2018.
- [21] 段茂志.淤地坝防洪溃坝风险评估与实时预警模型设计[D].陕西西安:西安理工大学,2019.
- [22] 马松增,徐建昭,何明月,等.河南省淤地坝安全自动化监测系统设计与应用[J].水土保持通报,2020,40(5):112-117.
- [23] 祖强,陈祖煜,于沐,等.极端降雨条件下小流域淤地坝系连溃风险分析[J].水土保持学报,2022,36(1):30-37.
- [24] 张玉炳,杨明化,何向阳,等.智慧水库一体化管理平台特点介绍[J].水利规划与设计,2018(2):85-88.
- [25] 郑天民.系统架构设计程序员向架构师转型之路[M].北京:人民邮电出版社,2017.
- [26] 王长生,马福恒,何心望,等.基于物联网的燕山水库大坝智能巡检系统[J].水利水电工程学报,2014(2):48-53.
- [27] 中华人民共和国水利部.SL/T 804—2020 淤地坝技术规范[S].北京:中国水利水电出版社,2021.
- [28] Chen Zuyu, Huang Xieping, Yu Shu, et al. Risk analysis for clustered check dams due to heavy rainfall [J]. International Journal of Sediment Research, 2021,36(2):291-305.
- [29] 任宏昌,张恒德.郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):1-9.