

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.04.005

黄土丘陵区淤地坝系对流域洪水过程影响与溃坝模拟

刘刚^{1,2}, 李鹏^{1,2}, 刘强³, 宇涛^{1,2}, 李占斌^{1,2,4},
袁水龙^{1,2}, 周世璇^{1,2}

(1. 西安理工大学 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 陕西 西安 710048;
2. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048;
3. 山西建筑工程集团有限公司, 山西 太原 030031; 4. 中国科学院水利部水土保持研究所
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为科学认识黄土丘陵区淤地坝系对流域洪水过程的作用效果与溃坝洪水风险, 本研究通过一维水动力模型 MIKE 11 和二维水动力模型 MIKE 21 耦合, 模拟坝系连锁溃坝洪水过程。研究结果表明: ①淤地坝系使流域出口洪峰、能峰和挟沙力分别减少 75.76%、80.14% 和 92.47%; ②淤地坝系一旦发生连锁溃坝, 溃坝洪水洪峰是原始沟道洪水的 3.35 倍, 增设溢洪道使连锁溃坝洪峰削减 92.78%、坝前水深平均减小 19.06%; ③修建溢洪道使坝系连通, 提高淤地坝系防洪能力, 可将 300 年一遇洪水调控到 10 年一遇; ④窄深式溢洪道能够更有效地调控坝系洪水过程, 在溢洪道过水断面面积相同的情况下, 随着溢洪道深度增加, 流域出口洪峰流量逐渐减小。研究成果以期为黄土高原淤地坝系安全运行提供参考。

关键词: 淤地坝系; 溃坝模拟; MIKE 模型; 黄土高原

中图分类号: S157.1 文献标志码: A 文章编号: 1006-4710(2020)04-0468-07

Influence of check dam system on flood process and dam break simulation in Loess Hilly region

LIU Gang^{1,2}, LI Peng^{1,2}, LIU Qiang³, YU Tao^{1,2}, LI Zhanbin^{1,2,4}, YUAN Shuilong^{1,2}, ZHOU Shixuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Shanxi Construction Engineering Group Co., Ltd, Taiyuan 030031, China; 4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to scientifically understand the effect of check dam system on the flood process and the risk of dam break flood in loess hilly region, this study simulates the cascading dam system flood process through the coupling of one-dimensional hydrodynamic model MIKE 11 and two-dimensional hydrodynamic model MIKE 21. The results show that. ①The check dam system reduces the flood peak, the energy peak and the sand-carrying capacity by 75.76%, 80.14% and 92.47% respectively. ②Once the interlocking check dam break occurs, the peak of the check dam break flood is 3.35 times that of the original channel flood. The addition of spillway reduces the peak of the interlocking dam break by 92.78%, and the water depth in front of the dam decreases by 19.06% on average. ③The construction of spillway makes the check dam system connected, and improves the flood control ability of the check dam system, which means it can control the flood from once every 300 years to once every 10 years. ④The narrow and deep spillway can con-

收稿日期: 2020-09-25; 网络出版日期: 2020-10-26

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20201023.1849.014.html>

基金项目: 陕西省创新人才推进计划项目科技创新团队资助项目(2018TD-037)

第一作者: 刘刚, 男, 博士生, 研究方向为水文模拟与水土保持。E-mail: liug06200052@163.com

通信作者: 李鹏, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: lipeng74@163.com

control the flood process of dam system more effectively. Under the condition of the same cross section area of spillway, the peak discharge at the outlet of the basin decreases gradually with the increase of spillway depth. The research results are expected to provide reference for the safe operation of the check dam system on the Loess Plateau.

Key words: check dam system; dam break simulation; MIKE model; the loess plateau

淤地坝系具有拦蓄沟道洪水和泥沙、改善小流域生态经济环境、提高水土资源开发利用的作用。小流域各级沟道中科学布设的骨干坝、中型及小型淤地坝,将形成有机结合、功能协调、具有树形结构的小流域沟道工程体系^[1-2]。淤地坝由于工程范围广、数量大、设计标准偏低,以及早期淤地坝多是群众自发修建故工程质量较差,所以一旦遭遇暴雨,容易发生漫顶溃坝^[3]。且当淤地坝系布局不合理时,单坝溃决很容易引起整个坝系连锁溃坝^[4]。超标准暴雨洪水是诱发中、小型坝水毁溃决的主要因素,坝系中缺少骨干工程或者骨干坝布设不合理,将导致整个坝系防洪能力降低^[5]。20世纪70年代和90年代发生的淤地坝大规模水毁事件,大多与淤地坝系的整体防洪能力不足有关^[6-8]。因此,模拟暴雨洪水条件下淤地坝系溃坝过程,分析淤地坝系发生连锁溃决的原因,提出提高坝系防洪能力的措施,对于淤地坝系安全运行具有重要意义。相关学者针对溃坝洪水开展了大量研究工作。侯精明等^[9]通过耦合溃口演变模型 DB-IWHR 和二维洪水演进模型,模拟一个土石坝和两个堰塞坝溃决算例,结果表明基于源项法的耦合模型可实现对土石坝、堰塞坝溃坝等灾害事故的合理高效预测。张幸幸等^[10]对淤地坝进行分级,实现每座单坝的产汇流计算和溃坝洪水分析,并对王茂沟流域连锁溃坝过程进行模拟,评价了淤地坝系防洪能力。张兆安等^[11]基于水动力模型,分析淤地坝淤积过程对漫顶溃坝洪水的影响,研究表明:淤积高度越高,溃坝洪水流量越小;淤地坝运行早期,淤积对洪峰的削减幅度最大。张泽宇^[12]通过一维水动力模型 MIKE 11 中的溃坝模块对王茂沟流域“7.15”暴雨洪水引发的连锁溃坝洪水进行模拟,该模型较好地模拟了溃口形状和溃坝洪水过程,研究表明通过对坝系内重点单坝进行加高,可以防止连锁溃坝情况出现。段金晓^[13]分析淤地坝淤积过程对小流域洪水过程的影响,研究表明不同淤积程度的淤地坝对洪水过程具有不同程度的削减作用。袁水龙等^[14]研究表明,不同坝型和不同坝系级联方式会对小流域洪水产生不同影响,其中,混联坝系对洪水的削减作用最大,并联坝系次之,串联坝系削减作用最小。

目前,虽然学者对单坝溃坝洪水进行了大量研

究,但关于淤地坝系连锁溃坝洪水模拟还鲜有报道。本研究通过一维水动力模型 MIKE 11 和二维水动力模型 MIKE 21 耦合,模拟设计校核洪水条件下车路沟坝系溃坝洪水演进过程和淹没范围,提出了提高坝系防洪能力的改进措施,研究成果以期黄土高原淤地坝系的安全运行提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

车路沟流域位于宁夏回族自治区西吉县东部,属渭河水系一级支流葫芦河的一级支沟。该流域距县城约 15 km,流域面积为 89.5 km²,相对高差为 339 m,为黄土丘陵沟壑第三副区。车路沟流域在平面上呈三角形,主要支沟有大坪和鹳子川两条,主沟道平均比降为 1/180。该流域气候属于中温带半湿润向半干旱过度类型,具有大陆性季风气候,多年平均气温为 4.9℃,最高气温为 32.6℃,最低气温为 -27.9℃。车路沟流域降雨量少,且降雨时空分布不均,其多年平均降雨量为 448 mm;最大降雨量为 667.6 mm;最小降雨量为 206.8 mm。该流域年径流模数为 3.5 万 m³/km²;年侵蚀模数为 4 800 t/km²;水土流失面积为 78.3 km²,且占流域总土地面积之比为 87.5%。车路沟流域沟道长度为 73.39 km;沟壑密度为 0.82 km/km²;强度侵蚀以上面积占水土流失面积之比为 46.61%,且该流域的水土流失以水蚀为主,兼有重力侵蚀。西吉车路沟坝系共有淤地坝 44 座,其中骨干坝 10 座、中型坝 16 座、小型坝 18 座,如图 1 所示。

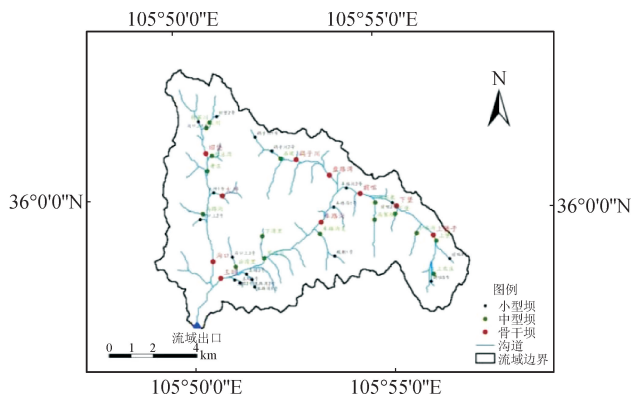


图 1 车路沟流域坝系布局图

Fig. 1 Layout of dam system in Chelugou watershed

1.2 数据来源

车路沟流域的淤地坝数据来源于宁夏回族自治区水保局,主要包括淤地坝位置、建坝时间、总库容、防洪库容、淤积库容、已淤积库容和蓄水量等数据。流域的 DEM 数据来源于中国地理数据云,精度为 30 m。

1.3 设计暴雨计算

根据《榆林水文手册》设计车路沟流域暴雨过程。《榆林水文手册》统计资料表明车路沟流域的暴雨大多以 6 h 暴雨为主,因此确定车路沟流域的暴雨设计时段为 6 h。设计流域中心点处多年最大 1 h、3 h 和 6 h 暴雨均值和变差系数值均可根据《暴雨洪水图集》等值线图分析得到,偏态系数与变差系数的比值取 3.5。车路沟流域不同重现期设计暴雨过程如图 2 所示。

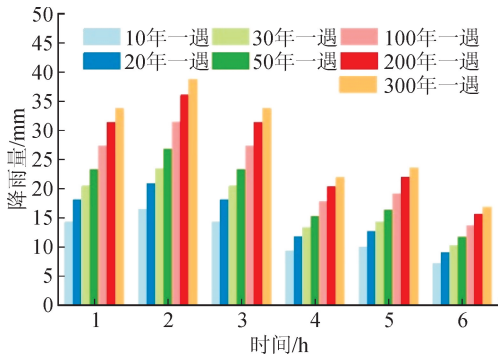


图 2 车路沟流域设计暴雨过程图

Fig. 2 Design rainstorm process in Chelugou watershed

1.4 溃坝模型建立

1) MIKE 11 模型搭建

将 300 年一遇流域暴雨过程输入模型。设置沟道断面,每个断面的断面形状通过 DEM 数据进行提取,获取每个断面的沟道底部、沟道边界以及岸滩边界共计 5 个点的高程值。同时,获取每一个断面位置的沟道里程值。车路沟坝系 MIKE 11 沟道水动力模型如图 3 所示。

2) MIKE 21 模型搭建

地形数据利用收集的 30 m×30 m DEM 高程数据。先通过 Arcgis10.1 对车路沟流域范围内所有高程点进行提取,得到流域内 30 m×30 m 网格的坐标数据和高程数据,生成流域地形高程文件。同时,利用 Arcgis10.1 边界提取功能,提取该流域边界范围内点位置坐标和高程数据,生成流域地形边界文件;再将所提取地形高程文件和地形边界文

件导入 Mesh Generator 模块,生成地形文件;最后通过对地形文件的平滑处理,以及对地形文件的网格划分,可得车路沟淤地坝系 MIKE 21 模型 mesh 文件,如图 4 所示。

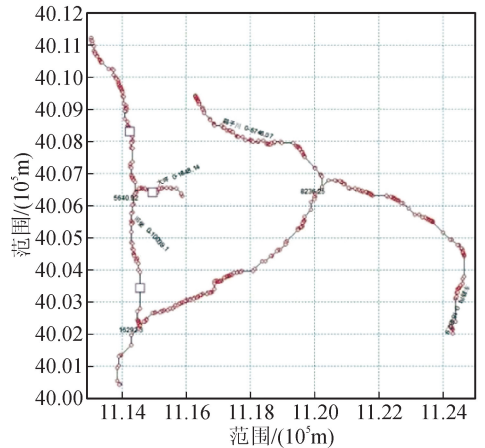


图 3 车路沟坝系 MIKE 11 沟道水动力模型图

Fig. 3 Hydrodynamic model of MIKE 11 channel of Chelugou dam system

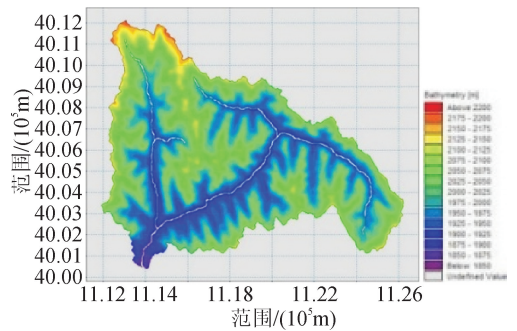


图 4 车路沟坝系 MIKE 21 模型图

Fig. 4 MIKE 21 model of Chelugou dam system

3) 基于 MIKE Flood 平台建立 MIKE 11 和 MIKE 21 耦合模型

基于 MIKE Flood 平台对车路沟坝系的 MIKE 11 沟道水动力模型和 MIKE 21 二维沟道模型进行耦合计算。最终可得车路沟坝系在 300 年一遇暴雨洪水条件下,各淤地坝溃决坝前水深与淤地坝下游范围水深变化,以及流域内淹没范围情况。

4) 模型参数设定

MIKE 11 和 MIKE 21 模型均为基于物理过程的水动力模型,此类模型需要设定的参数较少。由于小流域出口站无实测的径流数据,因此,通过历时洪水的洪痕进行模型验证。参考以往研究成果,沟道 Manning 系数取值为 0.029,其他参数取模型默认值^[15]。

2 结果与分析

2.1 淤地坝系对沟道水动力过程的影响

通过一维水动力模型 MIKE 11 模拟车路沟流域,分别得到 300 年一遇暴雨条件下无坝和修建坝系后不发生溃坝时沟口的洪水过程,并通过洪水过程计算能量和泥沙过程,如图 5~7 所示。由图 5 至图 7 可知,淤地坝系修建后,该流域出口的洪水过程、能量过程和泥沙过程均明显坦化,说明淤地坝系具有明显的调峰消能作用。计算车路沟坝系对流域径流、能量和泥沙的削减作用,详见表 1。

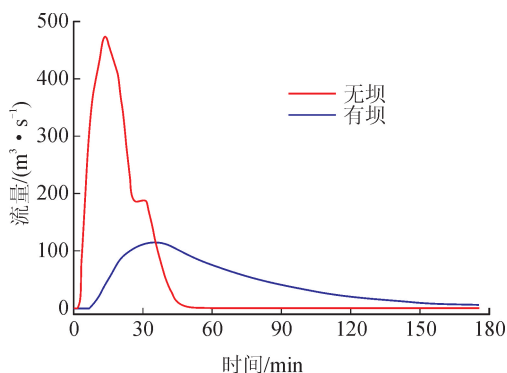


图 5 车路沟流域出口流量过程对比图

Fig. 5 Comparison of discharge processes at the outlet of Chelugou watershed

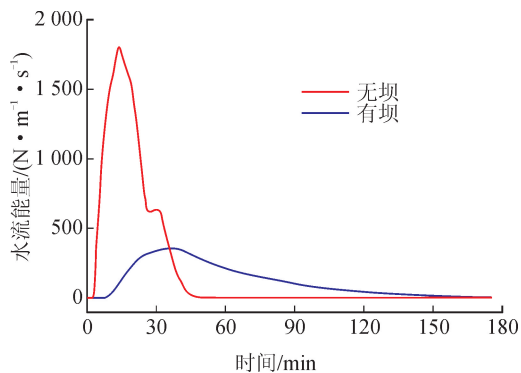


图 6 车路沟流域出口能量过程对比图

Fig. 6 Comparison of energy processes at the outlet of Chelugou watershed

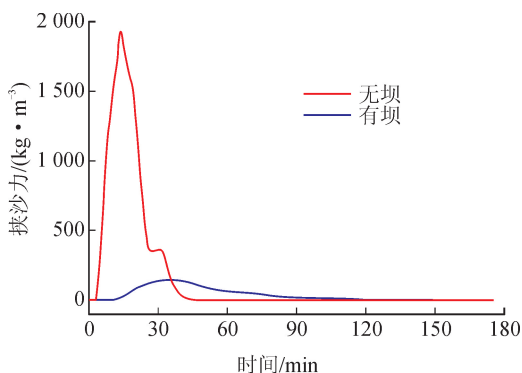


图 7 车路沟流域出口挟沙力过程对比图

Fig. 7 Comparison of sediments carrying capacity at the outlet of Chelugou watershed

表 1 淤地坝系对流域出口水、沙及能量过程调控表

Tab. 1 Regulation of dam system on water, sediment and energy processes at the outlet of watershed

工况	洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	减少比/ %	径流能量/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	减少比/ %	挟沙力/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减少比/ %
无坝	474.20	—	1 803.98	—	1 926.06	—
有坝	114.95	75.76	358.27	80.14	144.97	92.47

由表 1 可知,修建淤地坝系后流域出口洪峰流量、能量和挟沙力分别减少 75.76%、80.14% 和 92.47%。其中,能量和泥沙过程的削减程度明显大于洪水过程,说明淤地坝系通过削峰滞洪使径流能量明显减少,而径流能量的减少又进一步促使挟沙能力极大减小,从而调控流域的水、沙过程。

2.2 淤地坝系对溃坝洪水过程的影响

淤地坝系防洪安全是影响淤地坝系安全运行的重要因素。在特大暴雨条件下,淤地坝的防洪安全更是至关重要,一旦发生溃坝很可能造成严重的生命财产损失。本研究模拟了 300 年一遇暴雨条件下

车路沟坝系运行情况,结果表明,在 300 年一遇暴雨条件下,车路沟坝系中的 10 座骨干坝均会发生溃坝,溃坝洪水叠加后,导致流域洪水急剧增加,流域出口洪峰流量高达 $1\,591\text{ m}^3/\text{s}$,而沟道未建坝时洪峰流量仅为 $474.20\text{ m}^3/\text{s}$,所以溃坝洪水是原始沟道洪水的 3.35 倍。为提高坝系防洪标准,淤地坝系在所设计的淤积库容对应高程处增设溢洪道,溢洪道断面面积为 6 m^2 。增设溢洪道后流域出口洪峰流量仅为 $114\text{ m}^3/\text{s}$,洪峰削减 92.78%,如图 8 所示。修建溢洪道后,车路沟坝系中各骨干坝坝前水深明显降低,确保洪水不漫顶、不溃坝。

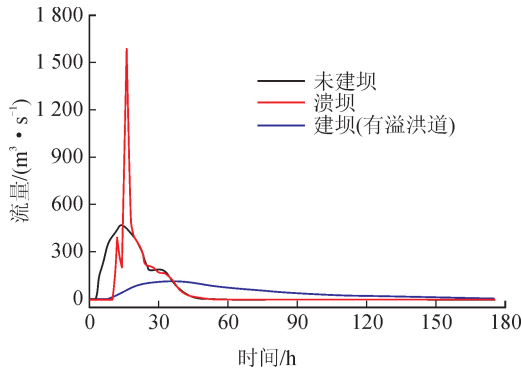


图8 车路沟坝系有无溢洪道出口流量过程对比表

Fig. 8 Comparison of discharge process of Chelugou dam system with and without spillway

对车路沟坝系各骨干坝坝前水深进行统计,详见表2。

表2 溢洪道对各骨干坝坝前水深影响

Tab. 2 Influence of spillway on water depth in front of main dams

淤地坝	无溢洪道(溃坝)时		减少比/ %
	坝前水深/m	坝前水深/m	
鹞子川	15.54	12.52	19.42
盘路湾	17.55	16.26	7.34
大坪	18.01	12.54	30.36
旧堡	19.23	17.61	8.42
沟口	13.25	11.04	16.74
上堡子	11.01	6.80	38.25
下堡	11.73	7.07	39.75
前咀	16.15	14.03	13.16
车路沟	18.29	16.86	7.79
王昭	22.03	19.96	9.39
平均值	16.28	13.47	19.06

不设溢洪道时,车路沟坝系发生连锁溃坝,最大坝前水深达到22.03 m,平均水深为16.28 m;增设溢洪道后,最大坝前水深为19.96 m,平均水深为13.47 m,坝前水深最大减幅为39.75%,坝前水深平均减幅为19.06%。说明淤地坝系增设溢洪道后,明显降低了坝前水深,确保了坝系安全。通过一维、二维水动力模型MIKE 11和MIKE 21耦合,模拟300年一遇暴雨条件下洪水的淹没范围。车路沟坝系不设溢洪道时,淤地坝溃坝以后,下游淹没点较多、淹没范围较大,局部淹没水深可达10.0 m以上,平均淹没水深为2.0~4.0 m;增设溢洪道后,最大淹没水深不超过2.1 m,平均淹没水深仅为0.1~0.2 m。说明淤地坝系增设溢洪道后,淹没水深急剧减小,基本不会

对周围村镇产生影响,如图9、图10所示。

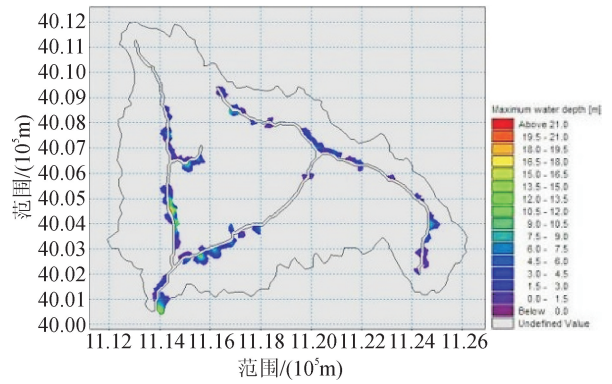


图9 车路沟流域溃坝(无溢洪道)淹没水深分布图
Fig. 9 Distribution of submerged depth of dam break (without spillway) in Chelugou watershed

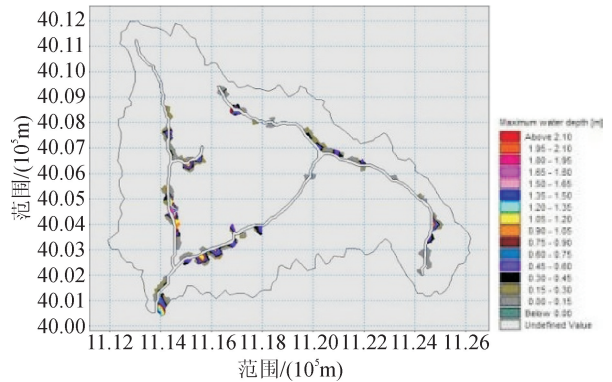


图10 车路沟流域增设溢洪道后淹没水深分布图
Fig. 10 Distribution of submerged depth after adding spillway in Chelugou watershed

2.3 溢洪道尺寸对流域水动力过程的影响

为进一步研究淤地坝溢洪道尺寸对流域水动力过程的影响,模拟了6种工况下流域的洪水过程。按照水土保持沟骨干工程技术规范,为流域所有骨干坝设置溢洪道,溢洪道底板设置在所设计的淤积库容对应高程处^[16]。6种工况下,溢洪道的断面面积均为6 m²,溢洪道深度分别为1 m、1.5 m、2 m、3 m、4 m和6 m,详见表3。

模拟结果表明,溢洪道深度为6 m时,车路沟流域洪水的洪峰最小;深度为1 m时,洪水的洪峰最大。随着溢洪道深度增加,洪峰流量逐渐减小,如图11所示。将修建溢洪道后流域出口洪峰流量和不同重现期设计洪峰流量进行对比可知,修建溢洪道后坝系将300年一遇的洪水调控到不足10年一遇,详见表3、表4。对流域洪峰流量和溢洪道深度进行拟合的结果表明,流域出口洪峰流量与溢洪道深度呈幂函数关系,且相关系数高达0.99,如图12所示。

表3 工况设计和不同工况下洪峰流量表

Tab. 3 Design condition and peak discharge under different conditions

工况	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆
尺寸(深×宽)/(m×m)	1.0×6.0	1.5×4.0	2.0×3.0	3.0×2.0	4.0×1.5	6.0×1.0
洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)	159.75	147.28	138.39	128.39	122.51	114.95

表4 不同重现期设计洪水洪峰流量表

Tab. 4 Peak discharge of design flood in different return periods

重现期/a	10	20	30	50	100	200	300
洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)	160.35	225.65	261.68	308.13	374.42	438.52	474.20

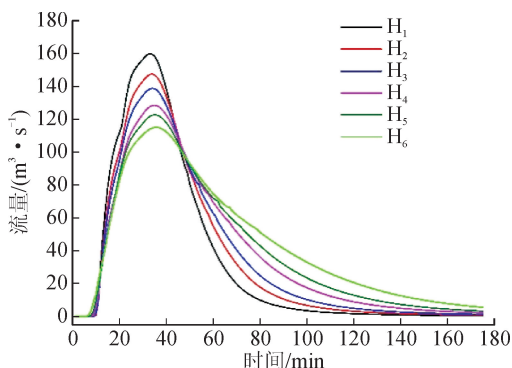


图11 不同尺寸溢洪道工况下流域出口洪水过程对比图

Fig. 11 Comparison of flood process at outlet of drainage watershed in different spillway sizes

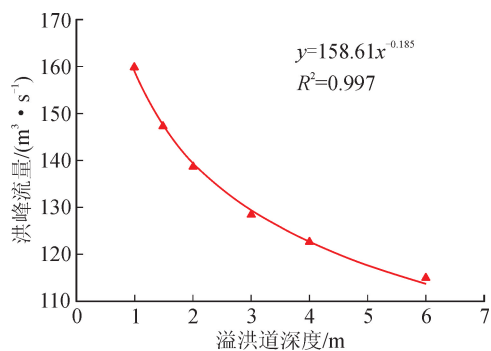


图12 溢洪道深度与流域出口洪峰关系图

Fig. 12 Relationship between spillway depth and outlet flood peak

3 结论

本研究通过一维水力模型 MIKE 11 和二维水力 MIKE 21 耦合,模拟坝系发生连锁溃坝时的洪水演进过程和淹没范围,分析淤地坝系溃坝洪水特征,阐明淤地坝系对流域水力过程的调控效果,提出通过增设溢洪道使坝系连通,以提高坝系防洪能力的改进措施,并得到以下结论。

1) 修建淤地坝系后流域出口洪峰、径流能量和挟沙力分别减少 75.76%、80.14%和 92.47%,且能量和泥沙过程的削减程度明显大于洪水过程。淤地

坝系通过削峰滞洪使径流能量明显减小,但淤地坝系一旦发生连锁溃坝,溃坝洪水是原始沟道洪水的 3.35 倍。

2) 修建溢洪道可以连通坝系,提高淤地坝系防洪能力。增设溢洪道使连锁溃坝洪峰流量削减 92.78%,坝系中各骨干坝坝前水深明显降低,坝前水深最大减幅为 39.75%、平均减幅为 19.06%,不会发生洪水漫顶溃坝。

3) 修建溢洪道的坝系可将 300 年一遇的洪水调控到 10 年一遇,窄深式溢洪道能更有效地调控坝系洪水过程。在溢洪道过水断面面积相同的情况下,随着溢洪道深度增加,流域出口洪峰流量逐渐减小,洪水过程更加平坦,流域出口洪峰流量与溢洪道深度呈幂函数关系。

参考文献:

- [1] 张晓明. 黄土高原小流域淤地坝系优化研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
ZHANG Xiaoming. The research about the check dam system optimization in small watershed on the loess plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [2] 郑宝明,田永宏,郭玉梅. 黄土丘陵沟壑区第一副区小流域坝系建设理论与实践[M]. 郑州:黄河水利出版社,2004.
- [3] 张林红. 小流域淤地坝系溃坝洪水特征与安全评价研究[D]. 西安:西安理工大学,2013.
ZHANG Llinhong. Study on characteristics of dam-break flood and safety assessment of warping dam system in small watershed [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013.
- [4] 王志坚,李冰,王楠. 坝系工程除险加固时防洪标准和洪水组合问题探讨[J]. 中国水土保持,2019(11):12-16.
WANG Zhijian, LI Bing, WANG Nan. Flood control standard and flood combination of dam System works during danger elimination and enforcement[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(11):12-16.
- [5] 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.

- WANG Dang, HA Yuling, LI Zhanbing, et al. Evaluation on the operation risk of dam system in the typical watersheds of Ningxia[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(3): 17-25.
- [6] 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.
LI Li, WANG Feng, SUN Weiying, et al. Analysis on water damage of warping dam in loess plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2014(10): 20-22.
- [7] 李靖, 张金柱, 王晓. 20世纪70年代淤地坝水毁灾害原因分析[J]. 中国水利, 2003(17): 55-56, 32.
LI Jing, ZHANG Jinzhu, WANG Xiao. Analysis on the causes of water damage of warping dams in 1970s[J]. China Water Resources, 2003(17): 55-56, 32.
- [8] 王允升, 王英顺. 黄河中游地区1994年暴雨洪水淤地坝水毁情况和拦淤作用调查[J]. 中国水土保持, 1995(8): 23-26, 62.
WANG Yunsheng, WANG Yingshun. Investigation on water damage and silting function of warping dam in 1994 rainstorm flood in the middle reaches of the Yellow River[J]. Soil and Water Conservation in China, 1995(8): 23-26, 62.
- [9] 马利平, 侯精明, 张大伟, 等. 耦合溃口演变的二维洪水演进数值模型研究[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1253-1267.
MA Liping, HOU Jingming, ZHANG Dawei, et al. Study on 2-D numerical simulation coupling with breach evolution in flood propagation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(10): 1253-1267.
- [10] 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 warping dam system in small watersheds[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(10): 1845-1853.
- [11] 张兆安, 侯精明, 刘占衍, 等. 淤地坝淤积对漫顶溃坝洪水影响数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 151-156, 161.
ZHANG Zhaoan, HOU Jingming, LIU Zhanyan, et al. Numerical simulation on influence of check dam deposition on overtopping dam breaking flood[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(4): 151-156, 161.
- [12] 张泽宇. 淤地坝放水建筑物水流特性与溃坝洪水过程模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
ZHANG Zeyu. Study on characteristics of drainage structure of check dam and simulation on the dynamic process of dam break induced by its failure[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [13] 段金晓. 淤地坝不同淤积程度对水动力过程影响模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
DUAN Jinxiao. Simulation study on influence of sedimentation process of check dam on hydrodynamic process[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [14] 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.
YUAN Shuilong, LI Zhanbin, LI Peng, et al. MIKE coupling model simulating effect of check dam construction on storm flood process in small watershed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(13): 152-159.
- [15] 袁水龙. 淤地坝系对流域水沙动力过程调控作用与模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
YUAN Shuilong. Study on the regulating effect and simulation of check dam system on the dynamic process of water and sediment in basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [16] 中华人民共和国水利部. 水土保持沟骨干工程技术规范: SL289-2003[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 29-36.

(责任编辑 卢秀, 王绪迪)