

梯级水库防洪调度与溃坝洪水的耦合研究

薛阳¹, 侯冰琪^{2,3*}, 郭靖¹, 贺阳^{2,3}, 祝宾皓^{2,3}

¹中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州

²华中科技大学土木与水利工程学院, 湖北 武汉

³数字流域科学与技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年1月17日; 录用日期: 2023年3月8日; 发布日期: 2023年4月28日

摘要

针对现有研究未考虑水库群超标洪水应急处置与溃坝洪水模拟的关联性问题, 本文提出了水库群防洪应急调度-溃坝洪水计算耦合模型。该模型以水库群防洪应急调度模型为基础, 一旦发生溃坝, 快速调用基于实际来水过程与大坝特征参数的溃口洪水与洪水河道演进计算模块, 解决了当流域发生溃坝事故调度过程难以接续的问题, 实现了对流域水库群在遭遇溃坝洪水情况下的全过程、精确化调度模拟。并以泉河流域五座梯级水库为例, 输入不同量级的两次洪水过程, 采用本文所建立的耦合模型进行水库群应急调度计算。结果表明, 所建立的模型能够有效地实现对洪水的削峰错峰, 降低流域梯级水库的防洪风险。研究结果可为各流域水库群溃坝洪水的应急处置方案的快速制定提供科学依据。

关键词

梯级水库群, 防洪调度, 溃坝洪水计算

Coupling Study of Flood Control Operation and Dam-Break Flood of Cascade Reservoirs

Yang Xue¹, Bingqi Hou^{2,3*}, Jing Guo¹, Yang He^{2,3}, Binhao Zhu^{2,3}

¹Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou Zhejiang

²School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

³Hubei Key Laboratory of Digital Valley Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Jan. 17th, 2023; accepted: Mar. 8th, 2023; published: Apr. 28th, 2023

Abstract

The existing research has not considered the correlation between reservoirs emergency disposal of ex-

作者简介: 薛阳, 陕西韩城人, 1983年7月出生, 博士研究生, 正高级工程师, 研究方向为水工设计、水工水力学。Email: xue_y3@hdec.com

文章引用: 薛阳, 侯冰琪, 郭靖, 贺阳, 祝宾皓. 梯级水库防洪调度与溃坝洪水的耦合研究[J]. 水资源研究, 2023, 12(2): 143-153. DOI: 10.12677/jwrr.2023.122017

ceeding standard flood and dam-break flow simulation. Therefore, the coupling model of flood control emergency operation with dam-break flow calculation for reservoir group is proposed. The established model is based on the reservoir flood control emergency operation model. In case of dam break, it can quickly call the calculation model of breach flow and flood evolution process based on actual inflow process and dam characteristic parameters. The coupling model solves the problem that the operation process is difficult to continue when dam break occurs in the basin, and realizes the whole-processed and accurate operation simulation when the reservoir group encounters exceeding standard flood. The established coupling model was applied at five cascade reservoirs in the Quanhe River basin, and two flood processes with different frequencies were used as the inputs. The results indicated that the established model can effectively reduce the flood peak and the flood risk. The research results can provide scientific basis for the rapid formulation of emergency response plan for dam-break flood as well.

Keywords

Cascade Reservoirs, Flood Control Operation, Dam-Break Flow Calculation

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

水库作为水资源综合管理的最有效工具之一，在能源和水需求方面发挥着越来越重要的作用[1]。随着流域水资源开发的逐步深入，各流域大规模水库群逐渐成型并投运[2]。近年来受气候变暖影响，极端气候事件频发。在大坝带来巨大经济效益的同时，其面临的应急处置问题也不容忽视[3]，梯级水库连锁事故尤其需要得到重视。大坝溃决时，库区蓄水急速下泄，下游流量及水位迅速上升[4]，往往对下游人民群众生命、财产和生态环境等方面造成灾难性打击[5][6]。

在水库群防洪调度方面，黄志中等人[7]基于防洪系统各部分的特点，提出了水库防洪系统多目标决策模型，有效降低了系统的洪灾风险；Akbari 等人[8]建立了考虑发电、防洪、供水等多目标的长短期耦合调度模型，实现了对大坝溢流风险与水库运行长期目标的综合考虑；贾本有等人[9]考虑水库群系统安全度、行蓄洪区系统损失以及河道堤防安全行洪等，建立并求解了复杂防洪系统多目标递阶优化调度模型，充分发挥了流域上游水库群防洪能力；岳华等人[10]建立了梯级水库群超标洪水协同应急调度模型，并引入逐步优化算法求解，结果表明，各水库在洪水前期预泄水量有利于确保系统的防洪安全。

现有水库群防洪应急调度研究大多集中于通过调度在最大程度上发挥梯级水库群滞洪削峰能力，缺乏对水库群防洪调度与溃坝洪水模拟的关联考虑。基于此，本文建立了耦合水库群防洪调度-溃坝洪水计算的梯级水库群溃坝洪应急调度模型。以泉河流域五座梯级水库群为研究对象，以流域百年一遇设计洪水和放大后的千年一遇设计洪水流量过程为模型输入进行计算，以对模型进行合理性验证。研究结果可为各流域水库群溃坝洪水的应急处置方案的快速制定提供科学依据。

2. 模型原理

2.1. 防洪调度模型

2.1.1. 目标函数

为在最大程度上保证水库群系统安全度汛，以下式作为水库群防洪应急调度模型的目标函数：

$$F_{i,j} = \min |Q_{i,j}^{out} - Q_{i,j}^{in}| \quad (1)$$

式中, $F_{i,j}$ 为水库 i 在第 j 个调度时段的目标函数; $Q_{i,j}^{out}$ 为水库 i 在第 j 个调度时段的出库流量; $Q_{i,j}^{in}$ 为水库 i 在第 j 个调度时段的入库流量。

2.1.2. 约束条件

综合考虑水库自身运行条件限制及其承担的下游防洪任务等, 所建立的防洪调度模型需要满足以下约束条件:

1) 上下游水力联系约束:

$$Q_{ij}^{in} = \sum_{k=1}^{U_i} Q_{kj}^{out} + B_{ij} \quad (2)$$

式中, Q_{ij}^{in} 为水库 i 在第 j 个调度时段的入库流量; U_i 为水库 i 的直接上游水库集合; Q_{kj}^{out} 为水库 k 在第 j 个调度时段的出库流量; B_{ij} 为水库 i 在第 j 个调度时段的上游区间来水流量。

2) 水量平衡约束:

$$V_{i,j+1} = V_{ij} + (Q_{ij}^{in} - Q_{ij}^{out}) \Delta t \quad (3)$$

式中, $V_{i,j+1}$ 与 $V_{i,j}$ 分别为水库 i 在第 $j+1$ 与第 j 个调度时段的库容; Q_{ij}^{in} 为水库 i 在第 j 个调度时段的入库流量; Q_{ij}^{out} 为水库 i 在第 j 个调度时段的出库流量; Δt 为一个调度时段对应的总时长。

3) 出库流量约束:

$$Q_{ij}^{\min} \leq Q_{ij}^{out} \leq Q_{ij}^{\max} \quad (4)$$

式中, Q_{ij}^{\min} 和 Q_{ij}^{\max} 分别为水库 i 在第 j 个调度时段内流量约束的上限与下限。

4) 水位约束:

$$\begin{aligned} Z_{ij}^{\min} &\leq Z_{ij} \leq Z_{ij}^{\max} \\ Z_{i0} &= Z_i^{begin}, Z_{iT} = Z_i^{end} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, Z_{ij} 为水库 i 在第 j 个调度时段的水位; Z_{ij}^{\min} 与 Z_{ij}^{\max} 分别为水库 i 在第 j 个调度时段水位约束的上限及下限; Z_{i0} 与 Z_{iT} 分别为水库 i 在调度过程起始及结束时段的水位; Z_i^{begin} 和 Z_i^{end} 分别为水库 i 的起调水位和末水位。

5) 出力约束:

$$N_{ij}^{\min} \leq N_{ij} \leq N_{ij}^{\max} \quad (6)$$

式中, N_{ij} 为水库 i 在第 j 个调度时段的出力; N_{ij}^{\min} 与 N_{ij}^{\max} 分别为水库 i 在第 j 个调度时段出力约束的上限及下限。

6) 非负约束:

各调度时段的各种变量如水位、出库流量等均大于等于 0。

2.2. 溃坝洪水计算

在本文所建立的模型中, 溃口最大流量的计算公式选取考虑大坝溃决形式为在坝长和坝高方向同时发生瞬间局部溃坝的计算公式、美国水道试验站的修订公式及黄委水科院通过溃坝实验得到的计算公式[11]; 并选择概化典型流量过程线法, 以四次抛物线确定溃口洪水过程线。具体计算过程如下:

$$Q_1^{b\max} = \frac{8}{27} \sqrt{g} \left(\frac{B}{b} \right)^{1/4} \left(\frac{H_0 - h'}{H_0 - 0.827} \right) b \sqrt{H_0} (H_0 - h') \quad (7)$$

$$Q_2^{b\max} = \frac{8}{27} \sqrt{g} \left(\frac{BH_0}{bh} \right)^{0.28} bh^{1.5} \tag{8}$$

$$Q_3^{b\max} = \frac{8}{27} \sqrt{g} \left(\frac{B}{b} \right)^{0.4} \left(\frac{11H_0 - 10h}{H_0} \right)^{0.3} bh^{1.5} \tag{9}$$

$$Q^{b\max} = \frac{Q_1^{b\max} + Q_2^{b\max} + Q_3^{b\max}}{3} \tag{10}$$

式中， $Q_i^{b\max}$ ($i=1,2,3$)为基于式(10)~(13)计算得到的坝址处溃坝洪水最大洪峰流量； $Q^{b\max}$ 为溃口最大流量； g 为重力加速度； B 为坝顶长度； b 为溃口宽度， $b = k(W^{1/2}B^{1/2}H^{1/2})^{1/2}$ ； H_0 为大坝溃决前上游水深； h' 为溃决后剩余大坝高度； k 为土质系数； W 为溃坝前溃口以上的库区蓄水量； H 为溃坝前坝前水深； h 为残坝坝顶至溃坝前水面的距离，也称为决口顶上水深，即 $h = H_0 - h'$ 。四次抛物线型的概化典型流量过程线如表 1 所示。

Table 1. Quartic parabola table

表 1. 四次抛物线表

t/T	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	1.0
$Q/Q^{b\max}$	1.0	0.62	0.48	0	0.26	0.207	0.168	0.130	$Q_0/Q^{b\max}$

表中： t 为当前计算时刻； Q 为当前溃口流量； T 为溃口流量过程总时长； Q_0 为河道基流； $Q^{b\max}$ 为溃口最大流量。

本文选用概化流量过程线法，通过计算溃坝洪水演进到下游水库时的洪峰流量、溃坝流量演进到下游时的洪水起涨时间、溃口最大流量到达下游时间及坝流量演进至下游结束时间对溃坝洪水河道演进过程进行模拟 [11]。各个参数的计算公式如下：

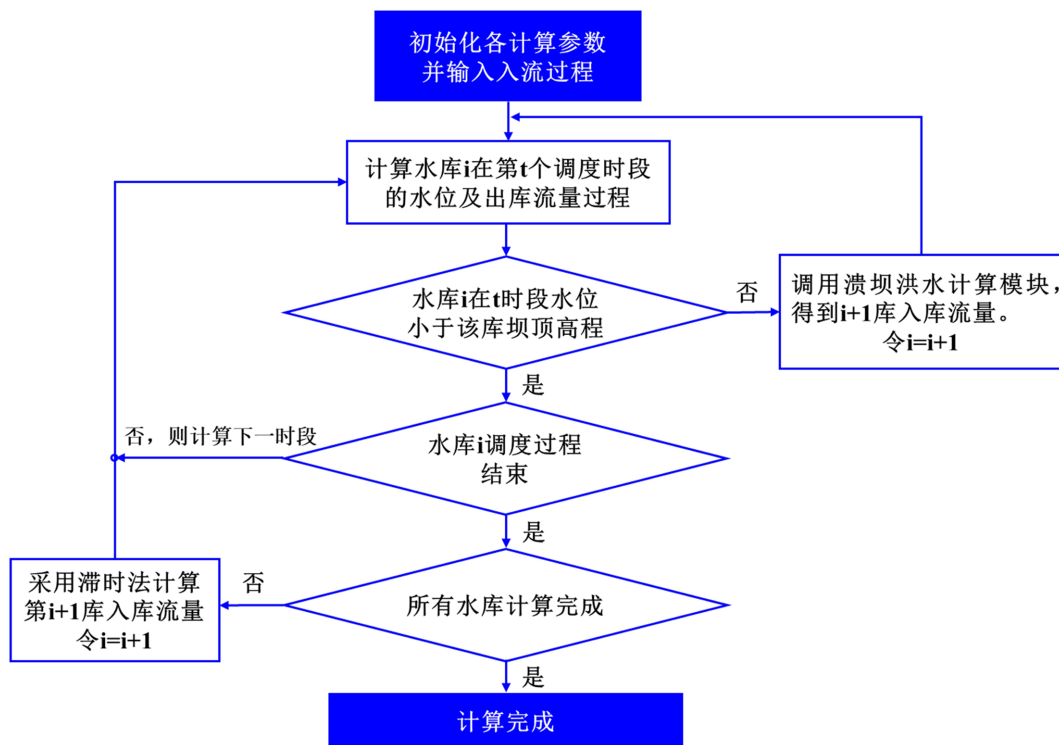


Figure 1. Flowchart of the coupling model of flood control operation of reservoir group and dam-break flow calculation

图 1. 梯级水库群防洪调度 - 溃坝洪水计算耦合模型流程图

$$t_1 = K_1 \frac{L^{1.75} (10 - h_0)^{1.3}}{W^{0.2} H_0^{0.35}} \quad (11)$$

$$t_2 = K_2 \frac{L^{1.4}}{W^{0.2} H_0^{0.5} h_M^{0.25}} \quad (12)$$

$$t_3 = 2W/Q_{low}^{b_{max}} + t_1 \quad (13)$$

$$Q_{low}^{b_{max}} = \frac{W}{W/Q^{b_{max}} + L/(vK_g)} \quad (14)$$

式中, t_1 为溃坝洪水演进到下游时, 下游洪水起涨时间; t_2 为溃口最大流量到达下游的时间; t_3 为溃坝洪水结束时间; L 为距坝址的距离; $Q_{low}^{b_{max}}$ 为溃坝洪水最大洪峰流量演进至距坝址 L 处的最大洪峰流量; H_0 为上游大坝溃决前坝上游水深; h_0 为下游基流水深; K_1 与 K_2 为系数, K_1 一般取 0.70×10^{-3} , K_2 一般取 $0.8 \sim 1.2$; h_M 为最大流量时的平均水深; W 为溃坝库容; $Q^{b_{max}}$ 为坝址处的溃口最大流量; v 为上下游区间水流流速; K_g 为经验系数, 山区 K_g 为 $1.1 \sim 1.5$, 半山区 K_g 为 1 , 平原区 K_g 为 $0.8 \sim 0.9$ 。

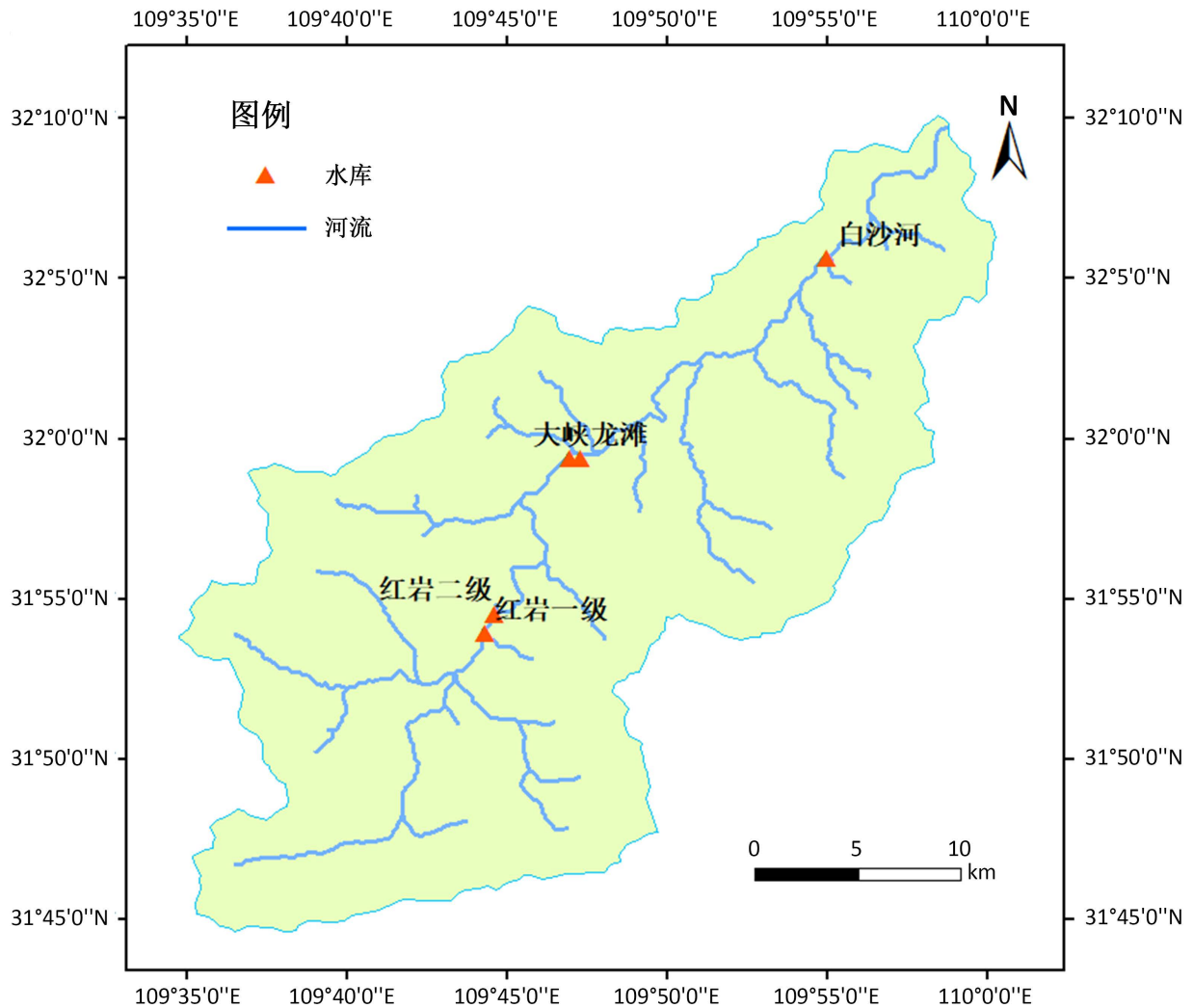


Figure 2. Distribution map of dam embankment in Quanhe basin
图 2. 泉河流域坝堤分布图

结合以上内容, 建立梯级水库群防洪调度 - 溃坝洪水计算耦合模型, 耦合模型流程图如图 1 所示。

3. 流域基本情况

本文选取泉河流域梯级水库群为研究对象, 建立梯级水库群应急调度 - 溃口流量计算 - 河道洪水演进耦合模型。泉河流域全流域位于竹溪县境内。河流全长 82.2 km, 流域面积 894.6 km², 水资源理论蕴藏量 9.61 万 kw。流域汛期处于 4 月至 9 月, 年最大暴雨常发生在汛期。洪水主要由暴雨形成, 多发生在 7~8 月, 且其过程以单峰为主, 陡涨陡落, 汛期径流量约占全年径流量的 85.1%。

流域内开发有五座梯级水电站: 分别为红岩一级、红岩二级、大峡、龙滩和白沙河水电站。在五个梯级电站中, 闸门具有调节能力的为红岩一级水电站、大峡水电站和白沙河水电站。其中红岩一级和大峡电站有一定的蓄水能力, 红岩二级和龙滩电站作为引水式电站, 无防洪能力; 白沙河电站为年调节水库, 在五级电站中调洪能力最大, 其开发任务主要是发电, 兼顾防洪。流域梯级水库群分布如图 2 所示。

4. 结果分析

以大峡水库百年一遇及放大后的千年一遇 72 h 洪水过程作为模型输入, 输入洪水过程如图 3 所示。建立水库群防洪调度模型, 首先采用滞时法模拟下游水库来水情况, 对泉河流域具有调蓄能力的三座梯级水库(红岩一级水库、大峡水库及白沙河水库)进行调度。由于红岩二级水库与龙滩水库无调蓄能力, 在调度过程中将其视为溢流堰。一旦调度过程中某水库出现溃坝情况, 则调用溃坝洪水计算模型, 模拟溃决大坝下游水库入库流量, 继续进行调度过程。

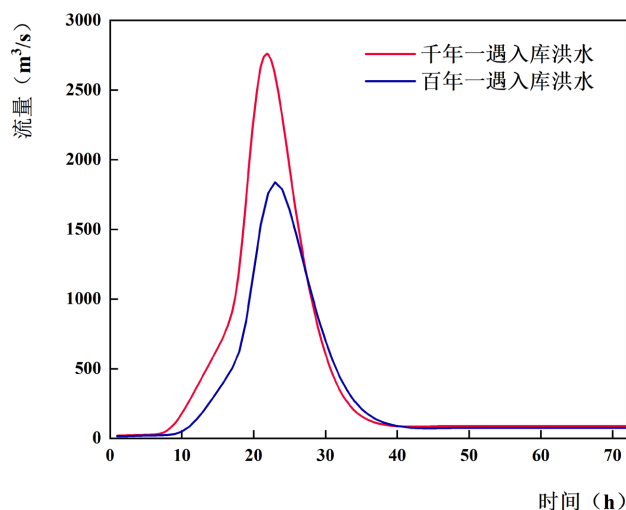


Figure 3. Inflow process with different frequencies

图 3. 不同频率入库洪水过程

4.1. 百年一遇洪水结果分析

当输入百年一遇洪水过程时, 各水库水位与出库流量过程如图 4~6 所示; 各库调度期水位、最大下泄流量与发电量情况如表 2 所示。

由图 4~6 可以看出, 当输入洪水过程为百年一遇时, 三座水库均未发生溃坝。红岩一级、大峡与白沙河水库的最高水位分别为 732.6 m、565.3 m 与 445 m; 平均水位分别为 730.2 m、565 m 与 445 m; 调度期的最大下泄流量分别为 1648.4 m³/s、1633.7 m³/s 与 1637.0 m³/s; 发电量分别为 65.58 万千瓦时、100.49 万千瓦时和 304.53 万千瓦时。

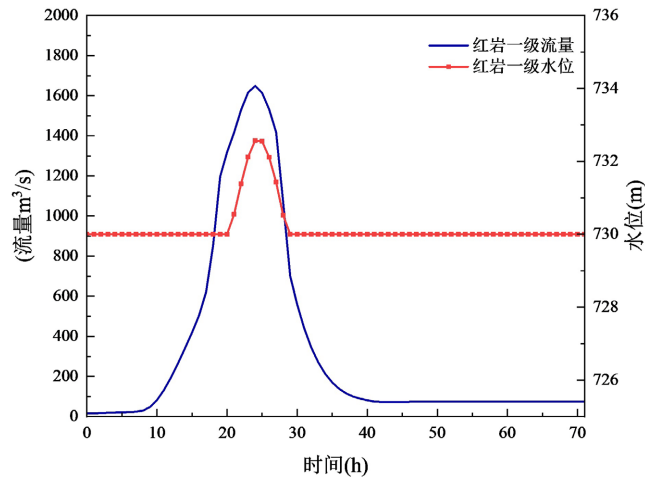


Figure 4. Water level and discharge process of the Hongyanyiji Reservoir

图 4. 红岩一级水库水位与出库流量过程

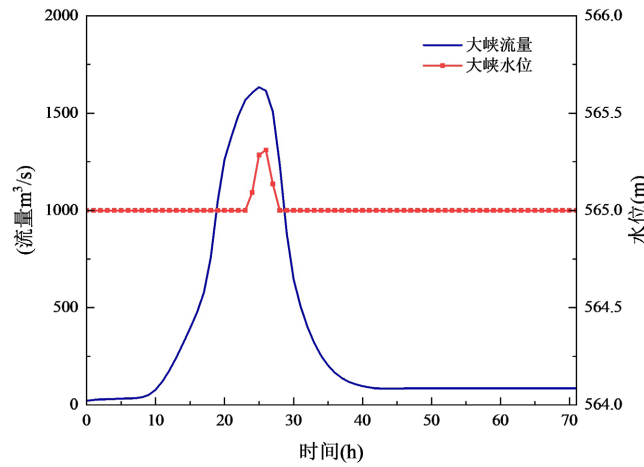


Figure 5. Water level and discharge process of the Daxia Reservoir

图 5. 大峡水库水位与出库流量过程

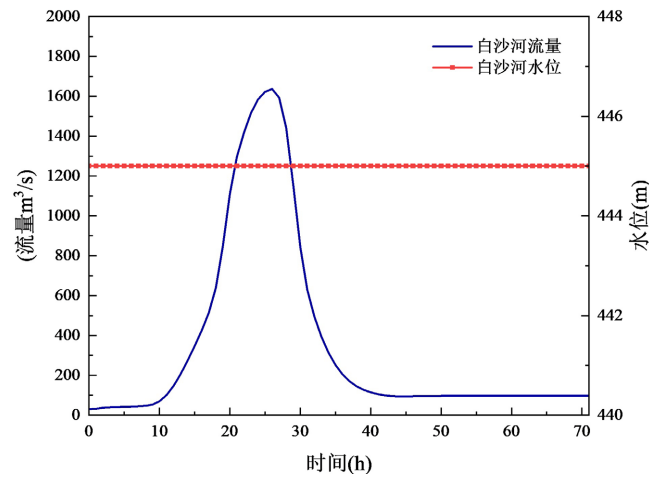


Figure 6. Water level and discharge process of the Baishahe Reservoir

图 6. 白沙河水库水位与出库流量过程

Table 2. Comparison of water level, discharge, and hydropower generation of each reservoir
表 2. 各水库水位、下泄流量及发电量对比

水库	红岩一级	大峡	白沙河
最高水位(m)	732.6	565.3	445
平均水位(m)	730.2	565	445
最大下泄流量(m ³ /s)	1648.4	1633.7	1637.0
发电量(10 ⁴ kW·h)	65.58	100.49	304.53

4.2. 千年一遇洪水结果分析

当输入千年一遇洪水过程时，各水库水位与出库流量过程如图 7~9 所示；各水库溃口洪水过程及河道洪水演进过程如图 10、图 11 所示。

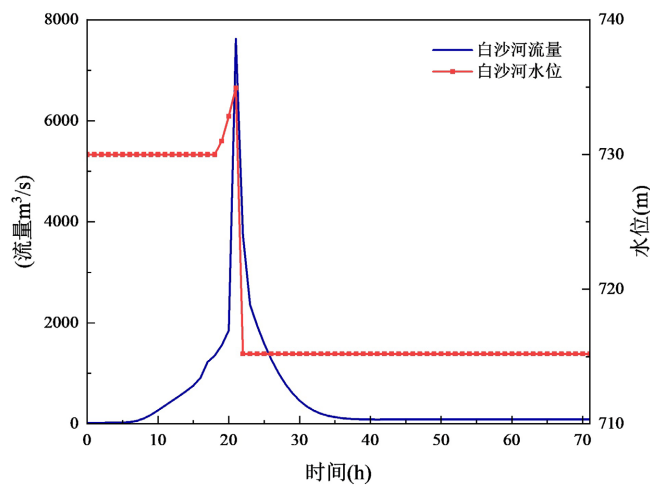


Figure 7. Water level and discharge process of the Hongyanyiji Reservoir

图 7. 红岩一级水库水位与出库流量过程

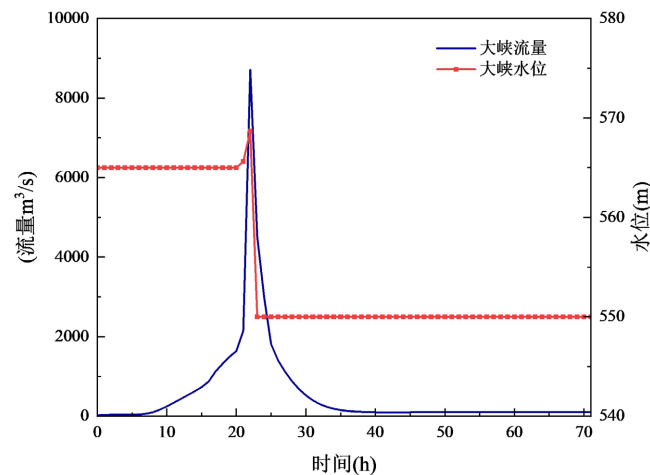


Figure 8. Water level and discharge process of the Daxia Reservoir

图 8. 大峡水库水位与出库流量过程

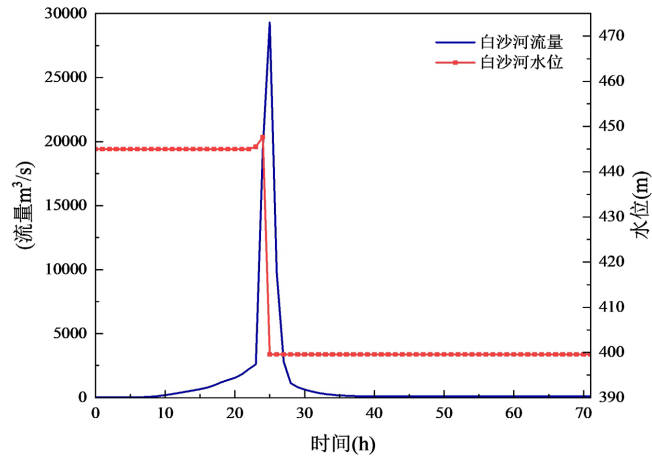


Figure 9. Water level and discharge process of the Baishahe Reservoir

图 9. 白沙河水库水位与出库流量过程

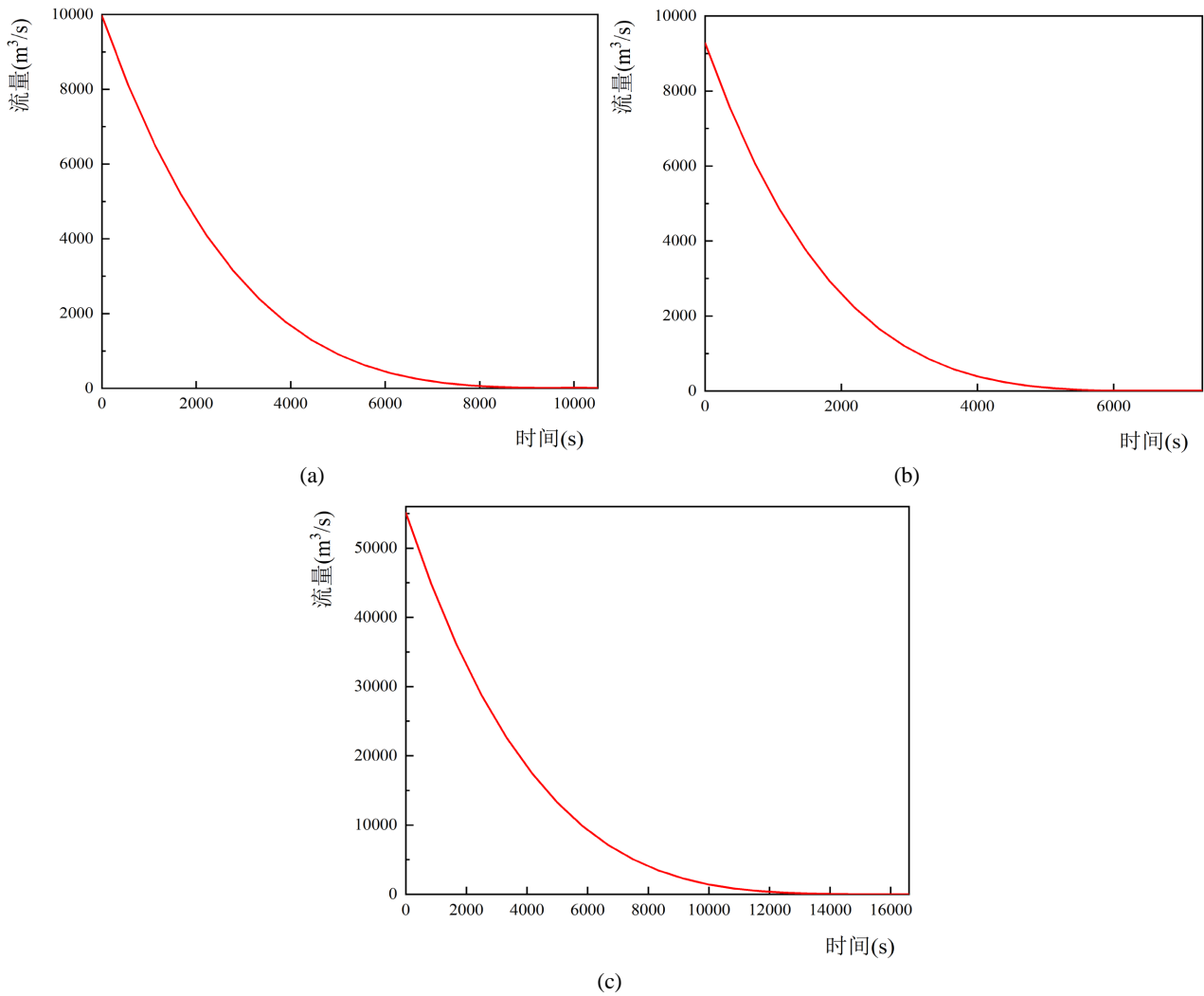


Figure 10. Breach flow process of the Hongyanyiji Reservoir, Daxia Reservoir and Baishahe Reservoir

图 10. 红岩一级、大峡与白沙河水库溃口流量过程

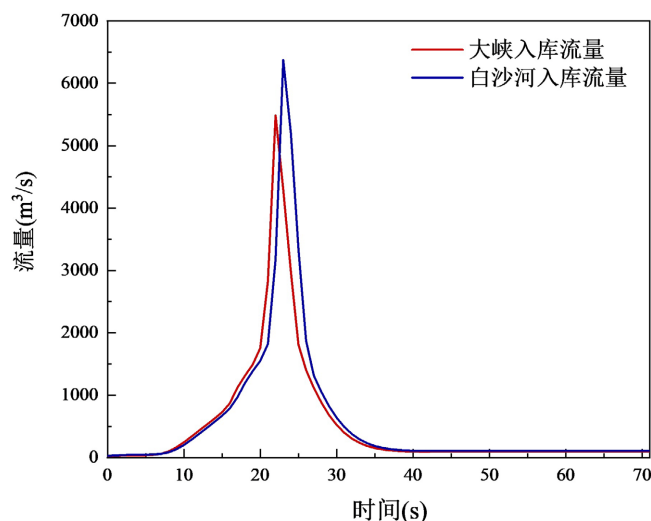


Figure 11. Inflow process of the Hongyanyiji Reservoir and Daxia Reservoir

图 11. 大峡与白沙河水库入库流量过程

当红岩一级、大峡与白沙河水库发生溃坝时，立即调用溃坝洪水过程模拟模型，计算各水库的溃口最大流量，并根据概化典型流量过程线法获得溃口流量过程线。进而结合区间来水等情况计算溃决水库的下游水库入库流量过程。计算得到的大峡与白沙河水库入库流量过程如图 11 所示。

由图 10 可以看出，当来水为千年一遇洪水时，红岩一级、大峡及白沙河水库均发生了溃坝。由溃口流量过程计算公式(7)~(10)可知，溃口流量过程与大坝自身参数有关，且溃坝水量与溃决持续时间与水库总库容成大概的正相关趋势，因此相比于大峡水库，红岩一级与白沙河水库的溃坝水量与溃决过程持续时依次变长，由图 10、图 11 可见，本文建立的溃口洪水计算模型能准确地模拟溃口流量过程与溃坝下游水库入库流量过程。

5. 结论

本文提出建立了水库群防洪应急调度 - 溃坝洪水计算耦合模型，以泉河流域五座梯级水库为实例，以百年一遇与放大后的千年一遇 72 h 洪水过程为输入，研究流域梯级水库群遭遇溃坝洪水下的应急调度与溃口洪水过程，主要得到了以下结论：

1) 当来水为百年一遇洪水时，三座水库均未发生溃坝。红岩一级、大峡与白沙河水库的平均水位分别为 730.2 m、565 m 与 445 m；调度期的最大下泄流量分别为 1648.4 m³/s、1633.7 m³/s 与 1637.0 m³/s。由百年一遇洪水情况下的调度结果可知，本文提出的水库群应急调度耦合模型实现了对洪水的削峰错峰，显著地降低了流域梯级水库的防洪风险。

2) 当来水为千年一遇洪水时，红岩一级、大峡及白沙河水库均发生了溃坝。由调度结果可知，当流域遭遇超标洪水时，本文提出的水库群防洪调度 - 溃坝洪水计算耦合模型能够快速调用溃坝洪水计算模块，实现对溃坝险情的准确模拟，有效地降低水库汛期出库流量。

3) 以水库群防洪应急调度模型为基础，同时耦合基于实际来水过程与大坝特征参数的溃口洪水与洪水河道演进计算模块，解决了当流域发生溃坝事故调度过程难以接续的问题，实现了对溃坝调度过程、溃口洪水发展与演进过程的精确模拟，研究结果可为流域面对突发溃坝险情时的应急响应工作提供决策支持。

本研究提出的梯级水库群溃坝洪水过程的快速计算模型，可实现对不同量级溃坝洪水传播的快速模拟。但在进行溃口洪水计算时仅考虑了瞬间溃决、漫顶溃决情形，仅采用了经验公式进行河道洪水演进计算，在后续研究过程中仍存在进一步深入和完善的空间。

基金项目

十四五国家重点研发计划(2021YFC3200400); 西藏自治区科技计划项目(XZ202301YD0044C)。

参考文献

- [1] CHEN, L., et al. Water-sediment-energy joint operation model of large-scale reservoir group for sediment-laden rivers. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 370: 133271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133271>
- [2] 中华人民共和国水利部. 2020 年全国水利发展统计公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 2020 Statistic bulletin on China water activities. Beijing: China Water & Power Press, 2021. (in Chinese)
- [3] 盛金保, 李宏恩, 盛韬桢. 我国水库溃坝及其生命损失统计分析[J]. *水利水运工程学报*, 2023(1): 15.
SHENG Jinbao, LI Hongen and SHENG Taozhen. Statistical analysis of dam failure and its loss of life in China. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(1): 15. (in Chinese)
- [4] 王立辉, 胡四一. 溃坝问题研究综述[J]. *水利水电科技进展*, 2007(1): 80-85.
WANG Lihui, HU Siyi. Study on dam failure-related problems. *Advances in Science and Technology of Water Resource*, 2007(1): 80-85. (in Chinese)
- [5] 孟相君, 林芝, 薛洋, 童景辉. 水电站大坝溃坝洪水计算现状分析[J]. *大坝与安全*, 2022(4): 6-10.
MENG Xiangjun, LIN Zhi, XUE Yang and TONG Jinghui. Analysis on the current status of dam-breach flow calculation of hydropower stations. *Dam & Safety*, 2022(4): 6-10. (in Chinese)
- [6] MARANGOZ, H. O., ANILAN, T. Two-dimensional modeling of flood wave propagation in residential areas after a dam break with application of diffusive and dynamic wave approaches. *Natural Hazards*, 2022, 110: 429-449.
<https://doi.org/10.1007/s11069-021-04953-w>
- [7] 黄志中, 周之豪. 防洪系统实时优化调度的多目标决策模型[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 1994, 22(6): 16-21.
HUANG Zhizhong, ZHOU Zhihao. A multi-objective decision making model for real-time optimization of flood control systems. *Journal of Hohai University*, 1994, 22(6): 16-21. (in Chinese)
- [8] AKBARI, M., AFSHAR, A. and MOUSAVI, S. J. Multi-objective reservoir operation under emergency condition: Abbaspour reservoir case study with non-functional spillways. *Journal of Flood Risk Management*, 2015, 7(4): 374-384.
<https://doi.org/10.1111/jfr3.12061>
- [9] 贾本有, 钟平安, 陈娟, 吴业楠. 复杂防洪系统联合优化调度模型[J]. *水科学进展*, 2015, 26(4): 560-571.
<https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2015.04.013>
JIA Benyou, ZHONG Pingan, CHEN Juan and WU Yenan. Coordinated optimal operation model of complex flood control system. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4): 560-571. (in Chinese)
- [10] 陈森林, 孙亚婷, 黄宇昊. 水库防洪等蓄量优化调度模型及应用[J]. *水科学进展*, 2018, 29(3): 374-382.
<https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2018.03.009>
CHEN Senlin, SUN Yating and HUANG Yuhao. Development and application of an equal volume of storage optimization model for reservoir flood-control. *Advances in Water Science*, 2018, 29(3): 374-382. (in Chinese)
- [11] 李炜. 水力计算手册[M]. 第 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
LI Wei. Hydraulic calculation manual. 2nd Edition. Beijing: China Water & Power Press, 2006. (in Chinese)