

基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城区 上游水库溃坝洪水模拟研究

袁银, 葛均建, 李政鹏, 马春英, 屈志刚

(河南省水利勘测设计研究院有限公司, 河南 郑州 450016)

摘要: [目的] 研究溃坝洪水演进过程模拟方法, 为水库溃决风险防控、制定溃坝早期预警及人员疏散方案提供科学依据。[方法] 以河南省郑州市上游尖岗和常庄水库为例, 基于 GIS 技术构建高仿真地形数字高程模型, 利用 MIKE FLOOD 耦合模型进行水库溃坝一二维模型耦合, 模拟水库溃坝后洪水演进过程, 探讨洪水在下游河道和复杂城区的演进特征。[结果] 常庄水库和尖岗水库溃坝瞬间最大下泄洪峰流量分别为 4 542.03 和 17 549.1 m³/s。贾鲁河下游距尖岗水库约 15.00~31.39 km 范围内河道两岸的漫堤洪水淹没面积为 56.37 km²。常庄水库溃决 1.00 h 后, 河道漫堤, 开始产生淹没区, 溃决 4.25 h 后, 尖岗水库发生溃坝。当尖岗水库溃决洪水演进历时 1.25 h 后, 原淹没区水深显著增加, 溃决 1.92 h 后, 淹没范围开始增大。常庄和尖岗水库溃坝后, 洪水水位均增大至超过南水北调防护堤堤顶, 大量洪水涌进南水北调总干渠, 洪水流速普遍增大。[结论] 尖岗水库溃坝洪峰流量远大于常庄水库, 溃坝危害性更大, 溃坝后洪水大量涌进南水北调总干渠, 堤防、边坡和进出口闸室冲刷风险增大, 下游河道两岸漫堤淹没, 严重影响南水北调总干渠输水安全和人民生命财产安全。

关键词: 城市地区; 水库溃坝; 洪水演进; MIKE FLOOD 耦合模型; 数值模拟

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)06-0159-07

中图分类号: TV122⁺.4, TV672

文献参数: 袁银, 葛均建, 李政鹏, 等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城区上游水库溃坝洪水模拟研究 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 159-165. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.017; Yuan Yin, Ge Junjian, Li Zhengpeng, et al. Dam-break flood simulation of upstream reservoir in urban area based on MIKE FLOOD coupling model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 159-165.

Dam-break Flood Simulation of Upstream Reservoir in Urban Area Based on MIKE FLOOD Coupling Model

Yuan Yin, Ge Junjian, Li Zhengpeng, Ma Chunying, Qu Zhigang

(Henan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450016, China)

Abstract: [Objective] The simulation method of flood evolution process caused by reservoir dam failures in urban areas was analyzed, in order to provide a scientific basis for risk prevention, early warning system development, and evacuation plans. [Methods] Using the upstream Jiangang and Changzhuang reservoirs in Zhengzhou City as case studies, a high-resolution digital elevation model was constructed based on GIS technology. The MIKE FLOOD coupling model was employed to integrate one-dimensional and two-dimensional models of reservoir dam failure, simulating the flood evolution process and exploring the characteristics of floods in downstream rivers and complex urban areas. [Results] Immediately following the dam failure, the peak discharge at the breach quickly reached its maximum. Peak outflow volumes from the Changzhuang and Jiangang reservoirs were 4 542.03 and 17 549.1 m³/s, respectively, with non-converging flood peaks. Portions of both banks downstream of the Jialu River, within 15.00 to 31.39 km from the

收稿日期: 2024-07-02

修回日期: 2024-09-19

资助项目: 国家重点研发计划项目“中小流域堤坝群安全防控技术集成及示范应用”(2022YFC3005505); 河南省水利厅水利工程项目“贾鲁河综合治理工程数字孪生贾鲁河先行先试项目”(HNJLH/JS/CG-2022001)

第一作者: 袁银(1996—), 男(汉族), 宁夏回族自治区固原市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事水利信息化及数值模拟等方面的研究工作。Email: 2369256952@qq.com。

通信作者: 屈志刚(1980—), 男(汉族), 湖北省天门市人, 正高级工程师, 主要从事水利信息化及工程设计等方面的研究工作。Email: 1525783647@qq.com。

Jiangan reservoir, were inundated, covering an area of 56.37 km². One hour after the breach of the Changzhuang reservoir, riverbanks began to overflow, resulting in increased inundation areas. The Jiangan reservoir dam failure occurred 4.25 h later. 1.25 h after the Jiangan reservoir breach, inundation depths significantly increased in the original inundation area, expanding further to the maximum inundation area 1.92 h later. Following the dam breaks of the Changzhuang and Jiangan reservoirs, the floodwater level rose above the top of the south-to-north water transfer protection embankment, and a large volume of floodwater surged into the main channel of the south-to-north water transfer, generally increasing the flood flow rate. [Conclusion] The peak flood flow from the Jiangan reservoir is significantly larger than that from the Changzhuang reservoir, making its dam break more harmful. After the dam breaks, a substantial amount of floodwater enters the main channel of the south-to-north water diversion Project, increasing the risk of erosion of dikes, slopes, and inlet and outlet lock chambers. This situation seriously affects the water conveyance safety of the main canal of the south-to-north water diversion project and the safety of people's lives and property.

Keywords: urban areas; dam-break; flood propagation; MIKE FLOOD coupled model; numerical simulation

水库是非常重要的水利基础设施,建设水库是为人口持续增长满足可持续供水的最佳方法之一^[1]。同时,水库兼具防洪、发电、养殖和旅游等多种功能,在国民经济基础产业中具有重要地位^[2]。尽管水库对社会发展非常有益,但水库坝体一旦溃决,引发的洪水会造成极具破坏性的灾害,严重威胁人民的生命财产安全^[3-4]。因此,进行水库溃坝洪水演进过程模拟研究,对制定应急预案、防洪减灾和保护人民生命财产安全具有重要意义。

近几十年来,国内外学者对溃坝问题进行了大量研究,提出了统计模型、参数模型和基于物理机制的模型等不同类型的溃坝洪水模型^[5]。Hazem Eldeeb 等^[6]采用 HEC-RAS 模型进行了埃塞俄比亚复兴大坝溃坝分析,提出了不同破坏情景下的二维模型。Fang Chonghui 等^[7]建立三维实体模型,采用 ANSYS 软件进行弹塑性有限元分析,定量预测了溃坝破坏范围。A Bharat 等^[1]基于 HEC-RAS 和 HEC-GeoRAS 模型对卡霍夫卡大坝进行溃坝分析,HEC-RAS 模型有助于模拟溃坝情景和决口洪水沿下游河段的路线,同时将 HEC-RAS 结果传输到 HEC-GeoRAS 后可生成淹没图,分析洪水演进范围。马利平等^[8]采用源项法耦合了溃口演变模型 DB-IWHR 与基于 GPU 加速技术的二维水动力模型,建立了上游库区二维水动力过程、溃口演变和下游淹没区二维洪水演进的高性能耦合模型。都利亚等^[9]基于 TELEMAC-2D 模型对龙洞水库二维溃坝洪水进行了演进数值模拟,并与 LISFLOOD-FP, ECA-2D 模型的模拟结果进行对比,结果表明 TELEMAC-2D 模型能更精细地表征城区的复杂地形情况,模拟效果较 LISFLOOD-FP 和 ECA-2D 模型更好。廖威林等^[10]利用 MIKE21 水动力模块对水库溃坝下泄洪水进行演进模拟,研究表明

模型能较好地模拟城区建筑物的雍水效应、城市主干道在洪水演进过程中的引导作用以及局部地区洪水迅速涨落和消退的特点。相关研究表明,MIKE 软件能较好地模拟溃坝洪水演进过程,在洪水溃坝的研究中得到了更广泛的应用^[11-14]。近年来,关于水库溃坝的研究成果虽然已有不少,但溃坝演变过程剧烈,持续时间短,影响因素多且复杂,研究成果离实际需求还相差甚远。

中国是世界上大坝数量最多的国家,根据国际大坝委员会登记注册结果显示,截至 2020 年 4 月,中国的大坝数量为 23 841 座,占全球总数的 40.6%,位居世界第一^[15]。2000 年 1 月至 2021 年 12 月,中国共溃坝 99 座,溃坝事故仍时有发生^[16]。在全球气候变化大背景下,中国极端暴雨事件频发,增加了水库溃决的风险^[17-18]。郑州市区上游尖岗和常庄水库位置毗邻,雨水情几乎一致,一旦发生极端暴雨天气引发超标洪水,两座水库极有可能在较短时间内相继溃坝。鉴于此,在 7·20 郑州特大暴雨灾害的警示下,本文以尖岗水库和常庄水库为研究对象,基于 MIKE FLOOD 耦合模型,MIKE11 和 MIKE21 水动力学模块进行水库溃坝一二维模型耦合,模拟水库溃坝后洪水演进过程,探讨洪水在下游河道和复杂城区的演进特征,旨在厘清下游洪水淹没范围和可能带来的风险,为水库溃决风险防控、制定溃坝早期预警及人员疏散方案提供参考依据。

1 研究区概况与模型原理

1.1 研究区概况

尖岗水库位于淮河流域贾鲁河干流上游的郑州市二七区侯寨乡尖岗村,地理位置为:东经 113°34′,北纬 34°42′。水库地处温带大陆性气候,控制流域面

积 113 km², 夏季炎热多雨。根据 1980—2022 年统计数据, 流域多年平均气温为 14.7 °C, 多年平均水面蒸发量约为 1 455.2 mm, 多年平均降雨量为 646.8 mm, 水库主汛期为 6—8 月, 约占全年降雨量的 80%, 汛限水位为 150.55 m。尖岗水库总库容为 6.07×10⁷ m³, 是郑州市最大的兼具城市防洪和应急供水功能的按大型水库管理的中型水库。大坝为均质土坝, 最大坝高为 34.1 m, 坝顶高程为 158.52 m, 坝顶宽为 8.4 m, 最大底宽为 212.5 m, 坝长为 460 m, 坝顶防浪墙高为 1.0 m。水库下游有南水北调总干渠, 铁路、公路、水厂和电厂等重要设施和人口、工农业聚集区, 防洪位置十分重要。

常庄水库位于淮河流域贾鲁河支流贾峪河下游的郑州市二七区须水镇常庄村。地理位置为东经 113°33′, 北纬 34°44′。水库控制流域面积为 82 km², 总库容为 1.71×10⁷ m³, 主要用于防洪和应急供水。大坝为均质土坝, 最大坝高为 26 m, 坝顶高程为 135.64 m, 坝顶宽为 8.0 m, 坝长为 380 m, 坝顶防浪墙高为 0.96 m。常庄水库坝体与尖岗水库坝体之间的距离为 4.58 km, 尖岗水库可通过自流方式向常庄水库补水充库, 总输水能力可达 8 m³/s。常庄水库下游河道在 1.81 km 处与尖岗水库下游河道交汇, 尖岗水库与常庄水库概况见图 1。

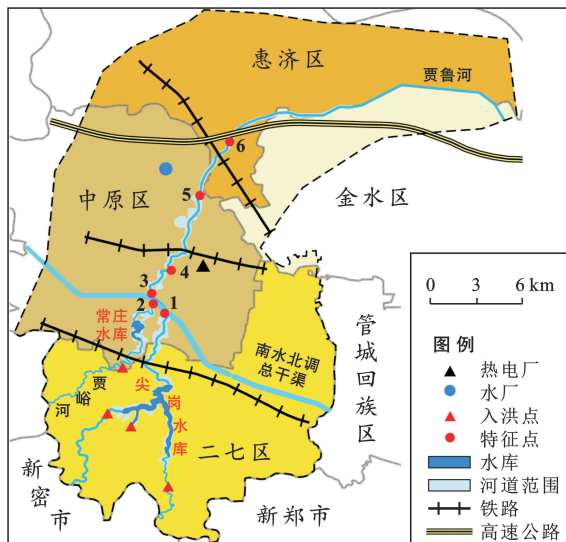


图 1 尖岗水库与常庄水库概况图

Fig.1 Overview map of Jiangang and Changzhuang reservoirs

1.2 模型原理

MIKE11 水动力学模块以求解圣维南方程组为理论基础, 该方程组遵循垂向积分的物质和动量守恒, 具有稳定性好和计算精度高的优点^[19]。其控制方程为:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial [\alpha(Q^2/A)]}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{c^2 AR} = 0 \quad (2)$$

式中: Q 为断面流量 (m³/s); q 为侧向入流流量 (m³/s); α 为动量修正系数; A 为过水断面面积 (m²); h 为水位 (m); R 为水力半径 (m); g 为重力加速度 (m/s²); t 为时间 (s); x 为河道沿程长度 (m)。

MIKE21 属于平面二维自由表面流模型, 水动力模型是 MIKE21 最核心的基础模块。二维水动力模型是基于三向不可压缩和雷诺值均布的 N-S 方程, 并服从 Boussinesq 假定和静水压力假定, 不考虑水流的黏滞性和液体质点之间相对运动^[20]。利用二阶精度的有限体积法对动态流的连续方程和动量守恒方程求解。其控制方程为:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = & \epsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \\ & g \frac{\partial z}{\partial x} - g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{4/3}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = & \epsilon \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \\ & g \frac{\partial z}{\partial x} - g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{4/3}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$Z = Z_0 + H \quad (6)$$

式中: H 为水深 (m); u, v 分别为垂线平均流速在 x, y 方向上的分量 (m/s); Z_0 为地面高程 (m); g 为重力加速度 (m/s²); C 为谢才系数 (m^{1/2}/s); ϵ 为紊动黏性系数 (m²/s); n 为糙率。

2 模型构建

2.1 数字高程模型

数字高程模型 (DEM) 是描述地表起伏形态特征的空间数据模型, 由地面规则格网点的高程值构成的矩阵形成的栅格结构数据集, 是地形、地物识别的重要原始资料^[21-22]。模型精度直接决定模拟结果的准确性, 影响洪水的发展态势和演进结果。本研究在 2023 年 2—3 月期间采用机载 LiDAR, 无人船水下地形航测和人工测量等技术手段对水库库区、下游河道两岸、水下地形和重要建筑物进行测量和模型预处理, 同时借助 GIS 技术将预处理数字高程模型和全流域 1:10 000 DEM 数据融合, 生成 0.6 m 栅格间距高仿真地形数字高程模型 (见图 2)。

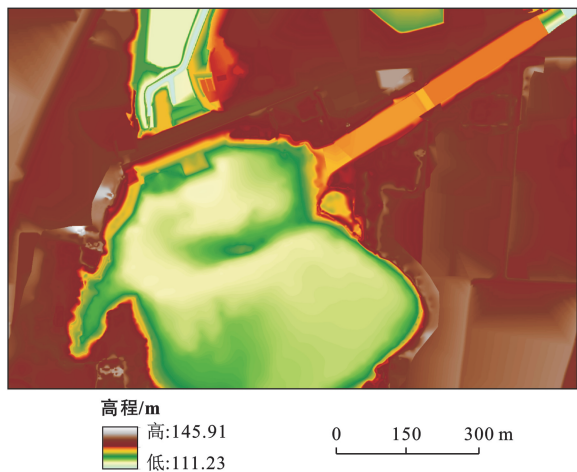


图 2 常庄水库局部高仿真地形数字高程模型
Fig.2 Digital elevation model on local high simulation terrain of Changzhuang reservoir

2.2 一维模型构建

尖岗水库和常庄水库的下游河道都通过倒虹吸穿过南水北调总干渠。根据河道地形特征和建筑物设置情况,构建水库溃坝二维模型,河道倒虹吸穿总干渠一维模型,利用 MIKE Flood 对一二维模型进行耦合。贾鲁河倒虹吸管身段全长 145 m,孔口净尺寸 3 孔 $\times$ 4.5 m $\times$ 4.5 m,贾峪河倒虹吸管身段全长 120 m,孔口净尺寸 6 孔 $\times$ 4 m $\times$ 4 m,一维模型(MIKE11)通过提取河道中心线坐标点、河长,收集贾鲁河和贾峪河倒虹吸参数设置河网文件;同时根据倒虹吸参数结合进出口渐变段情况选取典型断面剖切获取离散点高程设置断面文件。一维模型分别设置贾鲁河和贾峪河倒虹吸入流、出流 4 个开边界,边界类型设置为水位,水位值设置为 0,根据一二维模型耦合自行迭代,用于耦合模拟洪水穿南水北调倒虹吸过程。为保证模型平稳启动,模型初始水位和初始流量均设定为 0.1 m 和 0.1 m³/s,让模型自行迭代计算,糙率(n)根据倒虹吸设计参数设定为 0.015。模拟类型选择水动力模型,模拟方式为非恒定流,计算时间步长经试算调整为 30 s,此时模型稳定收敛,输出结果时间步长取 10 s。

2.3 二维模型构建

二维模型(MIKE21)构建采用非结构化三角形进行网格剖分。为准确描绘地形,对河道、填方公路、铁路和南水北调防护堤等阻水设施绘制控制线进行局部加密,本次计算区域共剖分网格 1.56×10^5 个。网格剖分完成后,利用 0.6 m 高仿真 DEM 对网格进行高程插值,生成高仿真网格地形云图。模型参数和边界条件设置如下。

(1) 本次研究不考虑水库坝体溃决过程,按照水库溃坝产生的最不利后果,采用漫顶 1 min 短时瞬溃

的情况计算。在水库坝体溃口位置设置堤坝(dikes),通过试算法将水库漫顶溢流时刻作为溃决时刻,尖岗水库溃决时水位为 159.75 m,蓄水量为 5.72×10^7 m³,常庄水库溃决时水位为 136.6 m,蓄水量为 1.59×10^7 m³。尖岗和常庄水库溃口底部高程取坝址上边界高程分别为 129 和 116 m,溃口底宽根据经验公式计算分别取 150 和 110 m。

(2) 模型上边界设置点源,根据 2024 年度河南省主要河道及大中型水库防洪任务规划,采用 500 a 一遇校核洪水洪峰流量添加洪水入流过程,根据流域地形和产汇流特征,尖岗水库设置 3 个人洪点源,分别为 jgsk_rh1, jgsk_rh2 和 jgsk_rh3,常庄水库设置 1 个人洪点源为 czsk_rh。设定最开始 1 h 入库流量达到水库初始水位,然后按照正常产汇流来水流量设置入库洪水流量过程。模型淹没演进末端出流边界条件设置为定流速出流,流速设置为 1.5 m/s,宽度为主河槽宽度。

(3) 二维模型可以根据网格设定糙率场,也可统一设定唯一糙率值。本次模型构建综合考虑计算区域地形地貌、植被情况等,对不同地表类型赋予不同的糙率值,生成糙率场。模型干水深、浸没水深和湿水深分别取 0.005, 0.05, 0.1 m。时间步长设置为 30 s,模拟时间为 72 h,计算时间与一维模型保持相同。

3 结果与分析

3.1 溃口流量过程分析

根据模拟和计算结果,得到常庄水库和尖岗水库溃口流量过程见图 3。由图 3 可以看出,常庄水库和尖岗水库洪水流量过程线呈现相同的趋势,即在溃坝瞬间,洪水流量迅速达到峰值后逐渐下降,流量变化梯度逐渐减小。当常庄水库溃决 4.25 h 后,尖岗水库发生溃决,尖岗水库流量变化梯度显著大于常庄水库,溃坝后最大下泄洪峰流量分别为 17 549.10 m³/s 和 4 542.03 m³/s。常庄水库溃坝历时 3 h 后库容被排空,水库处于平稳出流状态,历时 5.00~5.25 h 期间常庄水库溃口监测出流断面短暂出现负值。分析可知,在此期间尖岗水库溃口洪峰流量恰好演进至下游与常庄水库下游河道交汇处,尖岗水库溃坝洪水洪峰高洪量大,且此时常庄水库溃坝洪水已经下泄至趋于稳定出流状态,因此交汇断面较高的洪水位致使常庄水库出现短暂的回水现象,洪峰过后常庄水库恢复正常平稳出流。尖岗水库历时 3.25 h 后库容被排空,尖岗水库的洪峰流量、溃决后流量变化梯度、排空历时均大于常庄水库,与水库规模呈现一致性,溃口流量过程基本合理。

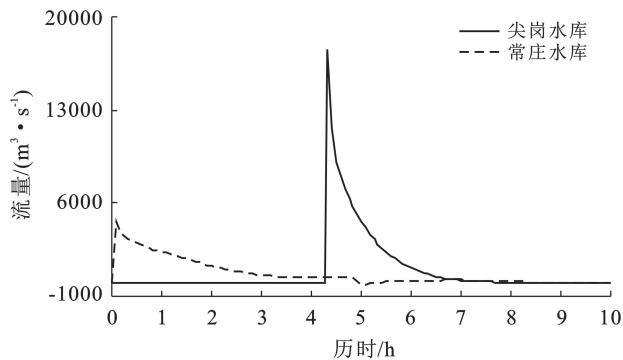


图 3 尖岗水库与常庄水库的溃口流量过程线
Fig.3 Breach flow process line of Jiangang and Changzhuang reservoirs

3.2 溃坝洪水演进分析

最大淹没水深是指溃坝洪水波在演进过程中所达到最高水位时的水深,是反映受灾区洪水淹没严重程度的关键指标之一,最大淹没水深越大,意味着破坏越严重,洪水波及范围越广^[9-10]。本次模拟溃坝洪水演进淹没范围和水深见图 4。由图 4 可以看出,当上游常庄和尖岗水库遇到超标准洪水接连漫顶溃坝,洪水会大量涌进南水北调总干渠,贾鲁河下游距尖岗水库约 15.00~31.39 km 范围内河道两岸部分区域被漫堤洪水淹没。其中,绝大部分区域淹没水深小于 1 m,部分低洼处水深达到了 1~2 m,河道和局部近岸区域水深超过 2 m。淹没区上游河道右岸水深超过 2 m,主要是因为穿河铁路和公路束窄河道断面,河道过流能力下降所致,同时,铁路高填方路段使得高程高于地面起到阻水作用。

依据不同淹没水深将淹没区域划分为低风险、中风险、中高风险、高风险和极高风险 5 个风险区,洪水淹没水深、淹没面积和情景时刻统计分析见表 1。由表 1 可知,当水库溃决后,下游洪水淹没面积为

56.37 km²,其中,低风险区淹没面积 28.6 km²,占总淹没面积的 50.74%;中风险、中高风险和高风险区淹没面积分别为 8.44、2.75 和 1.63 km²,整体来看,随着风险等级的增大,淹没面积依次减小;极高风险区淹没面积为 14.95 km²,所占比例增大(26.52%),主要是因为极高风险区包含水库库区和下游河道水面。

洪水演进历时分析对灾情评估和人员转移非常重要。模拟发现常庄水库先漫顶溃坝,将此时刻记为 0.00 h,当常庄水库溃决 1.00 h 后,下游河道漫堤,开始产生淹没区。当常庄水库溃决 4.25 h 后,尖岗水库发生溃坝,此时下游受常庄水库溃坝洪水影响的洪水淹没范围和水深趋于稳定。当尖岗水库溃决洪水演进历时 1.25 h 后,原淹没区水深显著增加,当尖岗水库溃决 1.92 h 后,淹没范围开始显著增大,直至增大到最大淹没面积,洪水波向下游传播和在淹没演进的过程中不断坦化。

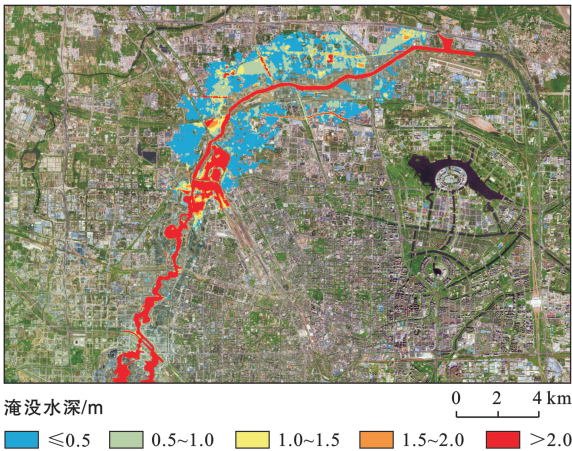


图 4 尖岗水库与常庄水库溃坝洪水淹没范围及水深
Fig.4 Dam-break flood inundated area and water depth of Jiangang and Changzhuang reservoirs

表 1 尖岗水库与常庄水库溃坝后洪水淹没水深、淹没面积和情景时刻统计分析
Table 1 Statistical analysis of flood inundation depth, inundation area and scenario time after dam-break of Jiangang and Changzhuang reservoirs

风险等级	淹没水深/m	淹没面积/km ²	面积比例/%	情景时刻	时间差/h
低风险	≤0.5	28.60	50.74	常庄溃坝	0.00
中风险	(0.5,1.0]	8.44	14.97	尖岗溃坝	4.25
中高风险	(1.0,1.5]	2.75	4.88	开始淹没	1.00
高风险	(1.5,2.0]	1.63	2.89	淹没水深显著增加	5.50
极高风险	>2.0	14.95	26.52	淹没面积显著增大	6.17

3.3 特征点水深及洪水流速

常庄水库和尖岗水库一旦发生溃坝,洪水严重威胁下游南水北调中线工程安全和人民生命财产安全。基于此,根据洪水淹没演进规律,按照下游河道和漫

堤风险特征情况选取了 6 个典型特征点(图 1)来分析水深和洪水流速变化情况。6 个特征点分别为:贾鲁河穿南水北调总干渠倒虹吸入口处(特征点 1)、贾峪河穿南水北调总干渠倒虹吸入口处(特征点 2)、中原

大桥(特征点 3)、建设西路(特征点 4)、科学大道立交桥(特征点 5)和连霍高速(特征点 6),各特征点水深及洪水流速变化见图 5。

图 5a 以常庄水库溃坝时刻为起始时刻,由图 5a 可以看出,当常庄水库溃坝后,特征点 2 水深迅速增加至最大,此时水位超过南水北调防护堤堤顶,洪水漫进南水北调总干渠。特征点 3—6 水深也相应增大,最大水深出现时刻从上游至下游存在滞后性,受洪水演进过程的坦化作用,下游水深低于上游水深。特征点 1 受常庄水库溃坝的回水顶托出现壅水现象,水深增大。当常庄水库洪水演进相对平稳后,尖岗水库发生溃坝,下游水深迅速增加后逐渐消落,洪水涌进南水北调总干渠,下游洪水演进规律与常庄水库溃坝洪水演进规律相似,相应特征点水深最大值大于常庄水库溃坝水深。

图 5b 将整个洪水演进过程分为溃坝前、常庄溃坝、尖岗溃坝和平稳出流 4 个阶段。由图 5b 可以看

出,当常庄水库发生溃坝,特征点 2—6 平均流速增大,特征点 1 受常庄水库溃坝回水的顶托作用平均流速减小,同理,当尖岗水库发生溃坝,特征点 2 流速减小。溃坝后各特征点之间流速大小变化趋势与溃坝前相似,洪水流速大小不仅与洪量有关,同时也与河道坡降、建筑物和横断面宽度等有关,因此,特征点 1 流速整体较小可能与倒虹吸过流能力和闸室前雍水有关。水库溃坝后河道交汇点以上受回水顶托作用明显,穿南水北调总干渠倒虹吸过流能力有限,受雍水作用影响,流速相对较小。溃坝后下游河道各特征点平均流速呈普遍增大趋势,但增幅有限,这主要是因为水流高速下泄到下游地区,随着水流的不断前进以及时间的推移,洪水坦化,洪峰消落,流速逐渐减小^[10]。总体来看,溃坝后洪水漫过南水北调总干渠,洪水流速增大,冲刷能力增强,对堤防、边坡和进出口闸室等设施损毁的可能性增大,进而威胁到输水安全。

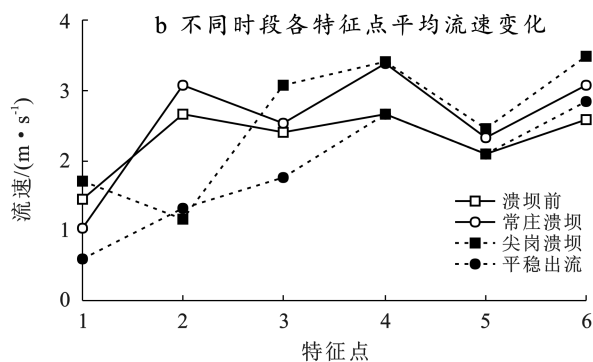
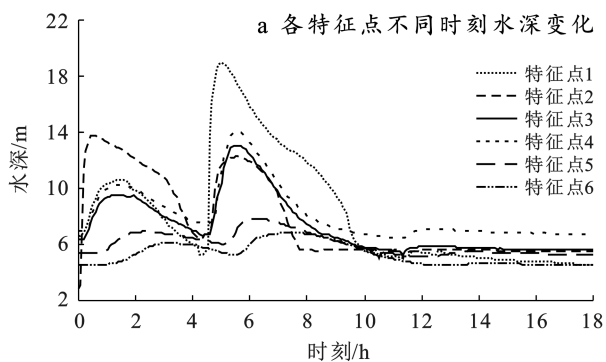


图 5 尖岗水库与常庄水库下游河道各特征点水深及洪水流速变化

Fig.5 Changes of water depth and flood velocity at each characteristic point in downstream channel of Jiangang and Changzhuang reservoirs

4 结论

本文以郑州市城区上游常庄水库和尖岗水库为例,建立了水库漫顶溃坝洪水演进二维耦合模型,对溃口流量变化过程、溃坝洪水演进规律、淹没范围、水深、特征点水位和洪水流速等进行了分析,取得以下主要结论。

(1) 水库溃坝瞬间,洪水流量迅速达到峰值,随之逐渐下降并趋于平缓,常庄水库和尖岗水库最大下泄洪峰流量分别为 4 542.03 和 17 549.1 m^3/s ,洪峰流量不交汇。

(2) 水库漫顶溃坝后,洪水大量涌进南水北调总干渠。同时,贾鲁河下游距尖岗水库约 15.00~31.39 km 范围内河道两岸部分区域被漫堤洪水淹没。其中,绝大部分区域淹没水深小于 1 m,部分低洼处水深达到

了 1~2 m,河道和局部近岸区域水深超过 2 m,下游洪水淹没面积为 56.37 km^2 。

(3) 常庄水库溃决 1.00 h 后,下游河道漫堤,开始产生淹没区,常庄水库溃决 4.25 h 后,尖岗水库发生溃坝。当尖岗水库溃决洪水演进历时 1.25 h 后,原淹没区水深显著增加,当尖岗水库溃决 1.92 h 后,淹没范围开始显著增大,直至增大到最大淹没面积。

(4) 常庄和尖岗水库溃坝后,洪水水位均超过南水北调防护堤堤顶,大量洪水涌进南水北调总干渠,同时,洪水流速普遍增大,冲刷风险增强,严重影响总干渠输水安全。

本文较充分地分析了洪水演进规律及风险特征,厘清了下游洪水淹没范围和存在风险,但为了便于计算,没有考虑溃口发展特性而采取了瞬溃假设,同时,也未考虑到当两座水库因战争或地震造成同时溃坝

使得洪峰叠加等极端情况,因此,在日后研究中尚需进一步分析完善,以期为溃坝早期预警提供更多参考依据。

参考文献(References)

- [1] Bharath A, Shivapur A V, Hiremath C G, et al. Dam break analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: A case study of Hidkal dam, Karnataka State, India [J]. Environmental Challenges, 2021,5:100401.
- [2] Adityawan M B, Sandi C, Harlan D, et al. Numerical modeling of dam break induced flow through multiple buildings in an idealized city [J]. Results in Engineering, 2023,18:101060.
- [3] 张锐,张双虎,王本德,等.考虑上游溃坝洪水的水库漫坝失事模糊风险分析[J].水利学报,2016,47(4):509-517. Zhang Rui, Zhang Shuanghu, Wang Bende, et al. Analysis of the dam overtopping failure fuzzy risk under consideration of the upstream dam-break flood [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(4):509-517.
- [4] 周建银,姚仕明,王敏,等.土石坝漫顶溃决及洪水演进研究进展[J].水科学进展,2020,31(2):287-301. Zhou Jianyin, Yao Shiming, Wang Min, et al. Review on overtopping failure and flood evolution of earth-rock dams [J]. Advances in Water Science, 2020,31(2):287-301.
- [5] 安晨歌,傅旭东,马宏博.几种溃坝模型在溃决洪水模拟中的适用性比较[J].水利学报,2012,43(S2):68-73. An Chengge, Fu Xudong, Ma Hongbo. Applicability of simulation models for dam-break flood due to overtopping [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012,43(S2):68-73.
- [6] Eldeeb H, Mowafy M H, Salem M N, et al. Flood propagation modeling: Case study the Grand Ethiopian Renaissance dam failure [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023,71:227-237.
- [7] Fang Chonghui, Han Xiang, Duan Yahui, et al. Analysis on dam-break case of concrete arch dam and forecast of failure scope based on point safety factor [J]. Procedia Engineering, 2012,28:617-625.
- [8] 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.
- [9] 都利亚,王兆礼,祁旭阳,等.基于 TELEMAC-2D 模型的城区水库溃坝洪水数值模拟:以广州市龙洞水库为例[J].地球科学与环境学报,2022,44(5):850-859. Du Liya, Wang Zhaoli, Qi Xuyang, et al. Numerical simulation of dam-break flood in urban area based on TELEMAC-2D model: A case study for Longdong reservoir in Guangzhou, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022,44(5):850-859.
- [10] 廖威林,周小文,何勇彬.城市地区水库溃坝洪水演进模拟[J].长江科学院院报,2014,31(10):98-103. Liao Weilin, Zhou Xiaowen, He Yongbin. Numerical simulation of flood propagation caused by dam-break in urban area [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014,31(10):98-103.
- [11] Liang Zhongmin, Huang Huaping, Cheng Li, et al. Safety assessment for dams of the cascade reservoirs system of Lancang River in extreme situations [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2017,31(9):2459-2469.
- [12] 孔宇,孙巍,李小龙,等.河道海绵建设中 SWMM-MIKE 11 耦合模型的构建及应用思路[J].水资源保护,2021,37(6):74-79. Kong Yu, Sun Wei, Li Xiaolong, et al. Building and application idea of SWMM-MIKE 11 coupling model in sponge river construction [J]. Water Resources Protection, 2021,37(6):74-79.
- [13] 王欣,王玮琦,黄国如.基于 MIKE FLOOD 的城区溃坝洪水模拟研究[J].水利水运工程学报,2017(5):67-73. Wang Xin, Wang Weiqi, Huang Guoru. Simulation research of urban dam break flood based on MIKE FLOOD model [J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(5):67-73.
- [14] 杨德玮,盛金保,彭雪辉,等.BREACH 模型与 MIKE21 模型在溃坝风险中的耦合分析[J].水利水运工程学报,2016(6):23-28. Yang Dewei, Sheng Jinbao, Peng Xuehui, et al. Coupling analysis of MIKE 21 model and BREACH model for dam-break risk [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(6):23-28.
- [15] 黄强,刘东,魏晓婷,等.中国筑坝数量世界之最原因分析[J].水力发电学报,2021,40(9):35-45. Huang Qiang, Liu Dong, Wei Xiaoting, et al. Reasons for China owning largest number of water dams in the world [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021,40(9):35-45.
- [16] 马黎,钟启明,杨蒙,等.新疆射月沟水库溃坝过程数值模拟[J].水利水运工程学报,2023(6):195-204. Ma Li, Zhong Qiming, Yang Meng, et al. Numerical simulation of dam breach process of Sheyuegou reservoir in Xinjiang [J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(6):195-204.

[29]

Feng Tianjiao, Wei Tianxing, Keesstra S D, et al. Long-term effects of vegetation restoration on hydrological regulation functions and the implications to afforestation on the Loess Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023,330:109313.

[30]

Li Zhongkai, Li Xiaoyan, Zhou Sha, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances [J]. Science China Earth Sciences, 2022,65(11):2083-2114.

[31]

Guo Mingming, Wang Wenlong, Kang Hongliang, et al. Changes in soil properties and erodibility of gully heads induced by vegetation restoration on the Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2018,10(5):712-725.

[32]

Dong Lingbo, Liu Yulin, Wu Jianzhao, et al. The distribution of soil C and N along the slope is regulated by vegetation type on the Loess Plateau [J]. Catena, 2023,226:107094.

[33]

Liang Haibin, Li Yani, An Xiaoxu, et al. Soil moisture dynamics and its temporal stability under different-aged *Caragana korshinskii* shrubs in the loess hilly region of China [J]. Water, 2023,15(13):2334.

[34]

张龙齐,贾国栋,吕相融,等.黄土高原典型地区不同植被覆盖下坡面土壤侵蚀阈值研究[J].水土保持学报, 2023,37(2):187-198.
Zhang Longqi, Jia Guodong, Lü Xiangrong, et al. Research of soil erosion thresholds on the lower slopes of different vegetation cover in typical areas of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(2):187-198.

[35]

罗鑫萍,张祖欣,陈大立,等.黄土高原人工灌草系统不同立地条件土壤种子库特征[J].草地学报,2020,28(4):940-946.
Luo Xinping, Zhang Zuxin, Chen Dali, et al. Soil seed bank characteristics across different stand condition of artificial shrub grass ecosystem on the Loess Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020,28(4):940-946.

[36]

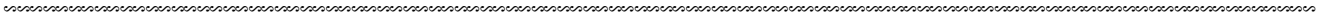
Zhang Xiaofang, Adamowski J F, Liu Chunfang,et al. Which slope aspect and gradient provides the best afforestation-driven soil carbon sequestration on the China’s Loess Plateau? [J]. Ecological Engineering, 2020,147:105782.

[37]

Zhao Yali, Wang Yunqiang, Wang Li, et al. Exploring the role of land restoration in the spatial patterns of deep soil water at watershed scales [J]. Catena, 2019, 172:387-396.

[38]

林枫,王丽芳,文琦.黄土高原土壤有机碳固存对植被恢复的动态响应及其碳汇价值[J].水土保持研究,2021, 28(3):53-58.
Lin Feng, Wang Lifang, Wen Qi. Dynamic responses of sequestration of soil organic carbon to vegetation restoration and the values of carbon sink in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(3):53-58.



(上接第 165 页)

[17]

王建有,张曼曼,孙奔博,等.城市水库溃坝耦合极端降雨前后模拟对比分析[J].人民黄河,2024,46(5):68-73.
Wang Jianyou, Zhang Manman, Sun Benbo, et al. Comparative analysis of urban reservoir dam break simulation under extreme rainfall [J]. Yellow River, 2024,46(5):68-73.

[18]

葛巍,焦余铁,李宗坤,等.溃坝风险后果研究现状与发展趋势[J].水科学进展,2020,31(1):143-151.
Ge Wei, Jiao Yutie, Li Zongkun, et al. Status and development trend of research on risk consequences caused by dam breach [J]. Advances in Water Science, 2020,31(1):143-151.

[19]

张松松,张卫,国林,等.大新水库不同溃坝高度的洪水演进过程模拟研究[J].安全与环境工程,2021,28(6) 16-24.
Zhang Songsong, Zhang Wei, Guo Lin, et al. Simulation study on flood evolution process of Daxin Reservoir with different dam-break heights [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021,28(6):16-24.

[20]

龙志伟.基于 MIKE 21 和 Landsat TM 影像的鄱阳湖水动力模型及水位动态变化分析[D].江西 南昌:南昌工程学院,2020.
Long Zhiwei. Hydrodynamic model and water level dynamic analysis of Poyang Lake based on MIKE 21 and Landsat TM images [D]. Nanchang, Jiangxi: Nanchang Institute of Technology, 2020.

[21]

乔万里.数字高程模型三维可视化技术研究[D].江苏 南京:南京邮电大学,2023.
Qiao Wanli. Research on 3D Visualization technology of Digital Elevation Model [D]. Nanjiang, Jiangsu: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023.

[22]

张效刚,胡良军,宋树祥,等.基于 LiDAR 点云的大型垃圾填埋场数字高程模型建模方法研究[J].环境工程,2024,42(5):192-198.
Zhang Xiaogang, Hu Liangjun, Song Shuxiang, et al. A modeling method of digital elevation model for a large garbage landfill based on LiDAR point cloud [J]. Environmental Engineering, 2024,42(5):192-198.