

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2023341

王玮琦, 林文青, 王帆, 等. 共渠西蓄滞洪区洪水演进数值模拟研究——以海河“23·7”流域性特大洪水为例[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(9): 45-49, 66. WANG Weiqi, LIN Wenqing, WANG Fan, et al. Numerical simulation study on the evolution of floods in the Gongquxi Storage and Retention Area — A case study in the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(9): 45-49, 66. (in Chinese)

共渠西蓄滞洪区洪水演进数值模拟研究 ——以海河“23·7”流域性特大洪水为例

王玮琦 林文青 王 帆 毕吴瑕 张大伟 柴福鑫

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京100038;

2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心(水旱灾害防御中心), 北京100038)

摘 要:受2305号台风“杜苏芮”北上与冷空气交汇带来的强降雨影响, 海河流域发生“23·7”流域性特大洪水。为应对灾情, 中国水利水电科学研究院、水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心(水旱灾害防御中心)针对此次洪水过程启用的蓄滞洪区构建了洪水分析模型, 提供了关键的防洪决策支持。基于中国水科院自主研发的通用高性能洪水分析计算软件FASFLOOD, 结合多时相SAR影像监测分析结果, 开展了海河流域共渠西蓄滞洪区洪水演进模拟推演工作。研究成果揭示了蓄滞洪区洪水的演进过程及滞留分布, 为蓄滞洪区启用决策和管理提供了科学数据参考, 有效支撑了本次洪水防御工作。

关键词:数值模拟; 水动力学模型; 蓄滞洪区; 海河“23·7”流域性特大洪水; 洪水防御; 共渠西蓄滞洪区

中图分类号: TV122

文献标识码: A

文章编号: 1673-9264(2023)09-45-06

0 引 言

在全球气候变化的背景下, 极端降雨事件导致的洪涝灾害愈发频繁, 如何快速准确地进行洪水预警、预演已成为支撑洪水防御工作的关键^[1]。早在20世纪70年代, 美国就开始借助水文模型采用马斯京根方法模拟河流洪水演进过程^[2]。随着数值模拟技术在洪水预警预报方面的应用研究取得长足发展^[3], 多种水动力学模型应运而生, 能够模拟更为复杂的洪水问题, 并在各种复杂地形条件下得到广泛应用^[4-5]。近几年, 高性能计算技术的发展也大大提高了这些模型的计算效率和精度, 特别是图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)并行计算加速技术的应用使得洪水数值模拟计算速度提高了3个数量级以上^[6]。自20世纪90年代起, 我国相关科研单位也致力于水动力模型的研究

发和应用, 这些模型被应用于我国重要水利工程的洪水演进仿真, 在城市内涝和流域防洪规划等方面发挥了重要作用^[7]。

受连续性强降雨影响, 2023年7月底, 海河流域发生“23·7”流域性特大洪水。为防御洪水, 京津冀地区及河南省相继启用8处国家蓄滞洪区。共渠西蓄滞洪区地处河南浚县境内, 是海河流域28处国家蓄滞洪区之一。8月1日15时, 根据漳卫河水系卫河来水情况, 河南省启用共渠西蓄滞洪区。本文基于中国水利水电科学研究院自主研发的高性能洪水分析计算软件FASFLOOD(Fast Analysis System for Flood)^[8], 搭建二维水动力学模型, 开展海河流域共渠西蓄滞洪区洪水演进模拟推演工作, 为掌握共渠西蓄滞洪区洪水演进过程及滞留分布提供可靠的技术手段, 支撑洪水防御工作。

收稿日期: 2023-08-31

第一作者信息: 王玮琦, 男, 博士, E-mail: wangwq@iwhr.com。

基金项目:国家重点研发计划项目课题经费资助(2022YFC3005501); 水利部重大科技项目(SKS-2022007); 水灾害防御全国重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金资助项目(2021491511); 中国水科院科研专项(WH0145B022021、JZ110145B0022023、WH0145B042021)。

1 研究区域概况

河南省海河流域良相坡、长虹渠、白寺坡、共渠西、柳围坡5个联合蓄滞洪区地处河南省豫北黄海平原,分布在卫河、共产主义渠(以下简称共渠)、淇河两岸。共渠西蓄滞洪区是海河流域内28处国家蓄滞洪区之一,在河南省鹤壁市浚县境内,位于漳卫河水系的卫河共渠刘庄闸下左岸。共渠西蓄滞洪区由上、下两个互不相连的洼地组成,上片西南起淇河左堤,东南靠共渠左堤,西北接自然高地;下片东部靠共渠,西部接自然高地,被刑固北至同山的高地与上片隔开。上片设计滞洪水位63.5 m,下片设计滞洪水位60.0 m,总设计滞洪量0.6亿m³,区域总面积95 km²。

行洪区围堤包括淇河左堤、共渠右堤及规划新建盐土庄隔堤。淇河左堤为行洪区西南部边界堤,全长4.16 km,现状堤顶高程73.7~69.4 m,顶宽5 m,边坡比1:3左右。共渠右堤为行洪区东部边界堤防,从浚县刘庄闸至盐土庄,全长30.6 km,现状堤顶高程67.4~61.0 m,顶宽5~8 m,边坡比1:3左右。共渠西蓄滞洪区洪水风险主要来源于淇河、卫河和共渠的洪水,并通过蓄滞洪区内共渠和长丰渠进行退水。

2 蓄滞洪区水动力学模型

2.1 FASFLOOD

FASFLOOD是由中国水利水电科学研究院主持研发的一款具有自主知识产权的国产通用高性能洪水分析计算软件^[8]。FASFLOOD融合了丰富的计算模块,包括降雨产汇流计算模块、一维管道和河网水动力计算模块、二维地表水动力计算模块、一二维耦合计算模块、溃口泥沙冲刷计算模块等,并能够灵活耦合多种模块同时计算,可以准确快速模拟溃坝、山洪、城市内涝等各种复杂的洪水运动过程。FASFLOOD将GPU并行计算加速应用在水动力学数值模拟,实现了百万数量级单元的分钟级计算^[9]。该软件目前已经入选水利部“2023年度水利先进实用技术重点推广指导目录”,并在全国多个城市防洪排涝、洪水风险图编制、数字孪生系统建设等项目中得到应用和推广。

2.2 技术理论

本文将基于FASFLOOD的二维地表水动力计算模

块,开展共渠西蓄滞洪区洪水演进数值模拟研究工作。FASFLOOD以具有明确物理意义的二维浅水方程组为控制方程,其形式如下所示。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} h + \frac{\partial}{\partial x} hu + \frac{\partial}{\partial y} hv &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} uh + \frac{\partial}{\partial x} hu^2 + \frac{\partial}{\partial y} huv + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} gh^2 + gh \frac{\partial}{\partial x} B(x,y) + \tau_{bx} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} vh + \frac{\partial}{\partial y} hv^2 + \frac{\partial}{\partial x} huv + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} gh^2 + gh \frac{\partial}{\partial y} B(x,y) + \tau_{by} &= 0 \end{aligned}$$

式中: h 为水深,m; u 和 v 分别为 x 和 y 方向的流速,m/s; t 为时间,s; $B(x,y)$ 为底坡高程,m; τ 为摩擦项, τ_{bx} 和 τ_{by} 分别为摩擦项在 x 和 y 方向上的摩擦力分力。

浅水方程组是一组非线性双曲型偏微分方程,用于处理复杂流态水体流动问题,但较难得到其精确解。FASFLOOD的二维洪水计算模块基于具有激波捕捉能力的Godunov型有限体积法在非结构网上对二维浅水方程进行离散求解,其中黎曼问题采用HLLC格式近似黎曼求解器进行计算^[10];底坡源项采用隐式离散方法,并通过静水重构来修正干湿边界处负水深问题,以提高模型的稳定性^[11];采用MUSCL空间重构和预测矫正法使得模型具有时间和空间二阶精度^[12]。张大伟^[13]对求解方法进行了详细的阐述,本文不再赘述。

2.3 模型构建

本次共渠西蓄滞洪区二维水动力模型的构建基于全国重点地区洪水风险图编制项目部分成果^[14]。模型研究范围以共渠西洪水风险图划定的界限为边界,最终选定模型的研究范围为95 km²,如图1所示。数字高程模型采用共渠西洪水风险图编制方案使用的精度为1:10 000的数字高程模型(DEM)高程矢量数据,其中共渠DEM数据由河道断面数据插值计算生成。

本研究采用三角形非结构网格对研究区域进行离散剖分,为了兼顾模型计算精度和效率,划分的网格大小限定2 km²以内。本次模拟洪水产生的方式为从共渠自然漫溢至蓄滞洪区。为更好地模拟出实际漫溢效果,本研究将河道视为二维单元进行建模,并提取共渠岸线作为控制线以精细剖分河道单元。以此搭建的共渠西蓄滞洪区二维水动力模型共有49 218个单元,25 394个节点,网格剖分成果及局部细节如图2所示。

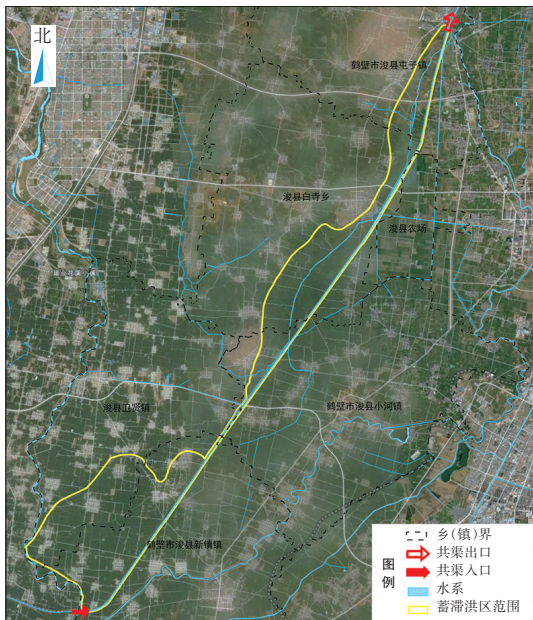


图1 研究范围

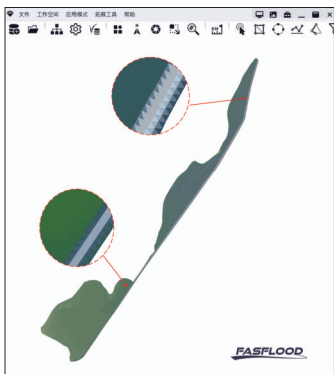


图2 研究区域网格剖分成果示意图

二维水力学模型糙率的选取依据《水力计算手册》^[15]糙率取值范围,借鉴河南省2013年度贾颖片、洪泉片(豫)和泉颖片(豫)防洪保护区糙率取值经验,并结合本片区土地利用图对蓄滞洪区下垫面糙率进行取值,如表1所示。

表 1 糙率取值详细情况

项目	居民地	耕地	道路	空地	河道
糙率	0.070	0.060	0.035	0.035	0.025 ~ 0.035

2.4 边界条件

本次洪水期间,共渠刘庄闸泄量逐渐增至 255 m³/s 以上,达到了共渠西蓄滞洪区启用条件。浚县防汛抗旱指挥部于8月1日15时决定启用共渠西蓄滞洪区(下片),分洪方式为通过共渠左堤无堤段向共渠西蓄滞洪区自由漫溢,

退洪方式为蓄滞洪区尾部自然退洪。根据本次洪水防御工作蓄滞洪区运用方式,本研究定义模型上边界为流量边界,设置在共渠刘庄闸处;下游边界为出流边界,设置在共渠下游;研究区域外边界均为固壁边界。

水利部水文水资源监测预报中心对刘庄闸泄量持续开展监测和预报,图3为刘庄水文站7月30日至8月10日的流量过程。



图3 刘庄水文站流量过程

考虑到蓄滞洪区退水所需的时间,本次模拟的时间范围设定为7月29日8时至8月13日8时,模拟历时15 d的洪水演进及退水过程。为保证模型稳定性,模拟时间步长由 CFL 条件(CFL 数为 0.5)严格限制。

3 模拟结果

3.1 模型验证

水利部遥感技术应用中心利用多时相合成孔径雷达(SAR)影像数据分析水体变化特征,生成了研究区域淹没范围的矢量影像数据。为了验证本模型结果的合理性,本研究采用 ArcGIS 软件对淹没水体的矢量影像数据进行了分析计算,得到了共渠西蓄滞洪区8月2—9日淹没面积的变化情况,并将数值模拟结果与遥感监测结果进行了对比分析,如图4所示。

图中显示,数值模拟和遥感监测两种方法得到的涨水和退水过程高度一致,淹没范围的变化趋势也较为吻合。需要注意的是,数值模拟得到的淹没面积稍大,与遥感影像相比,其平均相对误差为 14.8%。对比分析表明,本文所搭建的数值模型具有较强的可靠性,计算结果合理。遥感监测和数值模拟方法在研究区域淹没范围的分析中提供了互补的信息,遥感监测技术通过对多时相 SAR 影像数据

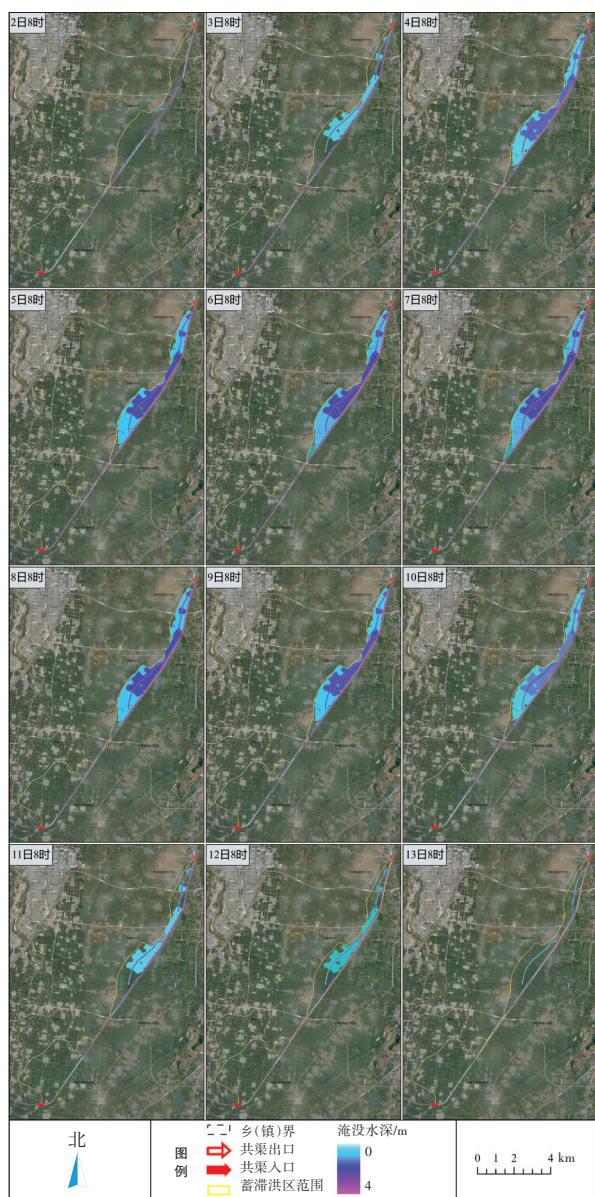


图4 遥感数据与模拟结果对比

的处理,能够提供清晰的淹没范围信息,其结果可为数值模拟的验证提供依据;而数值模拟则能够模拟洪水的动态演变过程,获得蓄滞水量、水深、流速等详细数据,这为进一步开展洪水的演变过程和评估淹没风险提供了重要的论证依据。

3.2 模型结果分析

FASFLOOD用时约20 min完成了历时15 d洪水过程的计算。将计算结果提取分析后,获得了共渠西8月2日8时至13日8时共12 d的洪水演进过程,如图5所示。

8月2日8时起受共渠上游来水量增大的影响,共渠左

岸无堤段处洪水自然漫溢至蓄滞洪区下片长丰渠,开始在长丰渠内演进。3日,鹤壁市浚县屯子镇及白寺乡部分地区被洪水淹没,淹没面积约为10.8 km²。4日,随着刘庄闸下泄量达到最大323 m³/s,蓄滞洪区内蓄滞水量开始快速增加,相较于3日增加了271%,达到2 518万 m³,蓄滞洪区内淹没范围进一步加大。6日,蓄滞洪区内洪水演进速度放缓,蓄滞水量和淹没面积分别为3 725万 m³和26.3 km²,淹没程度达到最大,蓄滞洪区内最大水深和平均水深分别为9.1 m和1.01 m,部分区域流速达到4 m/s。7日,研究区域开始退洪,洪水通过长丰渠退至共渠后逐渐汇入卫河下游,退水过程较为缓慢,蓄滞水量和淹没面积基本与前一日持平。9日,随着刘庄闸下泄流量降到100 m³/s以下,蓄滞洪区退洪速度提升,蓄滞水量和淹没面积分别为2 444万 m³和18.9 km²,相较于前一日分别降低了30%和22%。至13日,蓄滞洪区退水过程进入尾声,洪水仅分布在长丰渠内。研究范围内洪水淹没变化情况如图6所示。

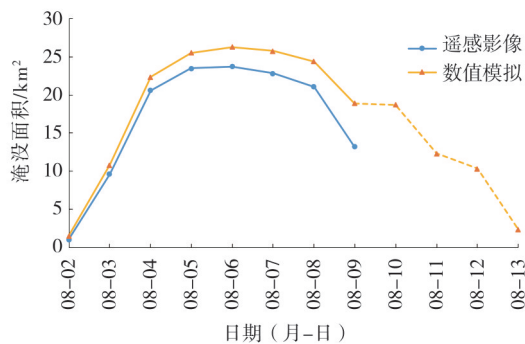


图5 共渠西蓄滞洪区洪水演进过程

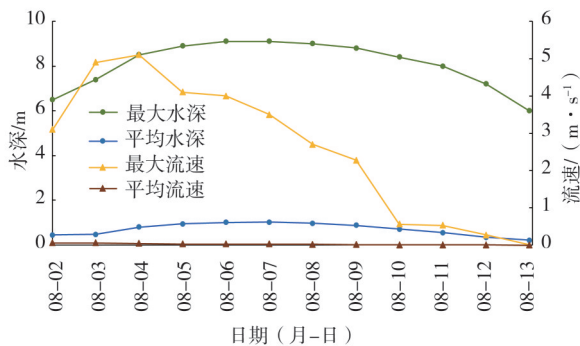


图6 淹没水深和流速变化情况

由本次模拟可知,共渠西蓄滞洪区经历了约10 d的受灾过程。在这段时间内,洪水的涨水和退水过程大约持续

了4 d和5 d。特别是在8月7日,共渠西蓄滞洪区受到了严重的洪水冲击,蓄滞水量达到了峰值,洪水的威力和影响范围进一步扩大。共渠西蓄滞洪区内的土地、农作物和建筑物可能遭到不同程度的损坏。水位上升和洪水冲击可能导致土地、农作物、建筑物等受到损坏,特别是在洪水峰值期间,洪水的流速和水位较高,可能对建筑物的结构稳定性造成一定的威胁。

4 结 语

蓄滞洪区是防洪工程体系的重要组成部分,是洪水防御3张核心牌中的“底牌”。在本次海河“23·7”流域性特大洪水防御工作中,蓄滞洪区的果断启用最大程度地保障了人民群众生命财产安全。为确保蓄滞洪区能够“分得进、蓄得住、排得出、人安全”,采用科学方法对洪水演进过程进行数值模拟显得尤为关键。

本研究以海河流域“23·7”流域性特大洪水为例,基于中国水科院自主研发的FASFLOOD洪水分析计算软件,构建了共渠西蓄滞洪区的二维水动力学模型,开展了洪水演进模拟分析工作,主要结论如下。

(1)本文将模型计算结果与多时相SAR影像数据进行对比分析,验证了模型的可靠性和准确性。该模型能够实时反映并准确预测洪水在蓄滞洪区的动态变化。

(2)本研究提供了蓄滞洪区洪水淹没范围、水深、流速、滞留时间等详细数据,为蓄滞洪区启用决策和管理提供了技术保障,有效支撑了本次洪水防御工作。

(3)本研究充分利用了数值模拟技术和遥感监测技术的互补性,提供了一个科学、系统的洪水研究思路,有助于更好地评估洪水风险和制定防洪策略,为未来的洪水模拟和防御工作提供了技术参考。

参考文献

- [1] 张建云,宋晓猛,王国庆,等.变化环境下城市水文学的发展与挑战——I.城市水文效应[J].水科学进展,2014,25(4):12.
- [2] CUNGE J A. On The Subject Of A Flood Propagation Computation

Method (Muskingum Method) [J]. Journal of Hydraulic Research, 1969, 7(2):205-230.

- [3] 张大伟,向立云.防洪减灾理论及技术研究进展[J].中国防汛抗旱,2022,32(1):7-15,33.
- [4] VREUGDENHIL C B. Numerical methods for shallow-water flow [M]. Berlin:Springer Science & Business Media,1994.
- [5] LIANG Q, SMITH L S. A high-performance integrated hydrodynamic modelling system for urban flood simulations[J]. Journal of Hydroinformatics,2015,17(4):518-533.
- [6] SIMONS F, BUSSE T, HOU J, et al. A model for overland flow and associated processes within the Hydroinformatics Modelling System [J]. Journal of Hydroinformatics,2014,16(2):375-391.
- [7] 刘昌军,吕娟,翟晓燕,等.河南“21·7”暴雨洪水风险模拟及对比分析[J].水利水电快报,2021,42(9):8-14.
- [8] 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心.通用高性能洪水分析计算软件 FASFLOOD[Z]. <http://cdr.iwhr.com/fhkhjzzx/shzhzyfxrjxx/we-binfo/2022/11/1668157350789555.htm>,2021.
- [9] 侯精明,张兆安,马利平,等.基于GPU加速技术的非结构流域雨洪数值模型[J].水科学进展,2021,32(4):567-576.
- [10] SMITH L S, LIANG Q. Towards a generalised GPU/CPU shallow-flow modelling tool[J].Computers & Fluids,2013,88:334-343.
- [11] HOU J, SIMONS F, MAHGOUB M, et al. A robust well-balanced model on unstructured grids for shallow water flows with wetting and drying over complex topography[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2013,257:126-149.
- [12] HOU J, LIANG Q, ZHANG H, et al. An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations - ScienceDirect [J]. Environmental Modelling & Software,2015,66:131-152.
- [13] 张大伟,权锦,马建明,等.基于Godunov格式的流域地表径流二维数值模拟[J].水利学报,2018,49(7):787-794,802.
- [14] 河南省水利勘测设计研究院有限公司.共渠西蓄滞洪区洪水风险图编制成果报告[R].河南:河南省水利勘测设计研究院有限公司,2015.
- [15] 李炜.水力计算手册[M].北京:中国水利水电出版社,2006.

(下转第66页)

Analysis and practice on comparative measurement of automatic flow measurement systems in Anhui Province

DING Lin¹, DENG Shide², ZHANG Chen³, TANG Rong⁴

(1. Hydrology Bureau of Anhui Province, Hefei 230000; 2. Hydrology Bureau of Anqing City, Anqing 246000;

3. Hydrology Bureau of Chuzhou City, Chuzhou 239000; 4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038)

Abstract: Automatic flow measurement system is gradually being promoted and applied in Anhui province as an updated flow measurement. In order to meet the requirements of hydrological modernization, solve the problem of automatic flow monitoring, analysis the comparative measurement of automatic flow monitoring in Anhui Province, determining comparative measurement methods and application standards. Picking point velocity radar wave of Gaotan station and Vertical ADCP of Tianchang station to demonstrate practical results. Use the linear regression and segmented linear regression methods to build the relationship of automatic and manually measured flow rate. The accuracy evaluation results met the standard requirements and can be put into use. Summarize the application experience of automatic flow measurement systems, propose the idea and suggestion which has reference significance for the promotion of automatic flow measurement systems.

Keywords: flow; automatic monitoring; comparative measurement; linear regression; Anhui Province

责任编辑 马 啸

(上接第49页)

Numerical simulation study on the evolution of floods in the Gongquxi Storage and Retention Area — A case study in the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood

WANG Weiqi, LIN Wenqing, WANG Fan, BI Wuxia, ZHANG Dawei, CHAI Fuxin

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038;

2. Research Center on Flood & Drought Disaster Prevention and Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038)

Abstract: The Haihe River Basin experienced a basin-wide extreme flood, known as the “23·7” flood, due to the very heavy rainfall caused by northward movement of No. 2305 Typhoon Doksuri and its interaction with cold air. To effectively respond to this disaster providing critical flood decision supporting, a flood analysis model was developed for the operated flood storage and detention areas by the Research Center on Flood & Drought Disaster Prevention and Reduction (Flood and Drought Disaster Defense Center) of the Ministry of Water Resources, the China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR). This study utilized the FASFLOOD software based on a general high-performance flood analysis and calculation tool developed by IWHR, in conjunction with multi-temporal SAR image monitoring and analysis results, to simulate the flood routing in the Gongquxi Flood Storage and Detention Area within the Haihe River Basin. The results comprehensively depict the evolution process and retention distribution of floods in the Gongquxi Flood Storage and Detention Area, providing scientific reference for decision-making and management related to the operation of flood storage and detention areas, thereby effectively supporting flood defense efforts.

Keywords: numerical simulation; hydrodynamic model; storage and retention area; “23·7” basin-wide extreme flood; flood defense; Gongquxi Storage and Retention Area

责任编辑 田亚男