

基于“23·7”特大洪水的永定河系数字孪生流域 防洪模型构建

马 强¹,王浩雯^{2,3},张珂健^{2,3},杨 邦⁴,张晓祥^{3,5},刘昌军¹

(1. 中国水利水电科学研究院防洪抗旱减灾研究中心,北京 100038; 2. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098;
3. 江苏省流域地理空间智能工程研究中心,江苏 南京 211100; 4. 水利部海河水利委员会水文局,天津 300170;
5. 河海大学地理与遥感学院,江苏 南京 211000)

摘要:针对气候变化与人类活动双重胁迫下永定河系极端暴雨频发、自然水循环异变导致的防洪能力协同性不足问题,基于“23·7”永定河系特大洪水案例,采用融合考虑产汇流机制及水利工程分布特点的水文水动力防洪模型构建策略,开展了数字孪生流域框架下兼顾计算效率与精度的普适性防洪模型建模方法研究。结果表明:永定河系防洪模型可以准确反映洪水过程中不同区域产汇流机制时空变化特征;模型计算效率及精度均达到较高水平,全河系 24 d 逐小时模拟总耗时 5 min,官厅山峡区间洪峰模拟误差在 6% 以内;泛区水动力模拟最大淹没面积与遥感实测结果基本一致。
关键词:数字孪生;流域防洪;水文水动力模拟;产汇流机理;“23·7”永定河系特大洪水

中图分类号:TV122 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2025)03-0075-08

Construction of flood control model for digital twin basin of the Yongding River System based on “23·7” catastrophic flood//MA Qiang¹, WANG Haowen^{2,3}, ZHANG Kejian^{2,3}, YANG Bang⁴, ZHANG Xiaoxian^{3,5}, LIU Changjun¹ (1. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Province Engineering Research Center of Watershed Geospatial Intelligence, Nanjing 211100, China; 4. Hydrology Bureau of Haihe River Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Tianjin 300170, China; 5. College of Geography and Remote Sensing, Hohai University, Nanjing 211000, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient coordination of flood control capacity caused by frequent extreme rainstorms and natural water cycle changes in the Yongding River System under the dual stress of climate change and human activities, the “23·7” catastrophic flood in the Yongding River System was used as a case study. The strategy for construction of the hydrological and hydrodynamic flood control model considering the mechanism of runoff generation and confluence and the distribution characteristics of water conservancy projects was adopted, and the universal flood control modeling strategy considering both computational efficiency and accuracy under the framework of digital twin basin was studied. The results show that the flood control model of the Yongding River System can accurately reflect the spatial and temporal variation characteristics of runoff generation and confluence mechanism in different regions during flood process. The model has a high calculation efficiency and accuracy. The 24-d hourly simulation of the whole river system takes 5 min, and the error of the flood peak simulation in the Guanting Shanxia section is within 6%. The maximum inundated area from hydrodynamic simulation in the floodplain is basically consistent with the remote sensing measurement.

Key words: digital twin; basin flood control; hydrological and hydrodynamic simulation; mechanism of runoff generation and confluence; “23·7” catastrophic flood in the Yongding River System

人类社会的数字化转型为现实与虚拟世界的整合提供了强大驱动力。虽然针对数字孪生流域的科学探索尚处于起步阶段,但是相关技术已在多个行业领域得到了广泛应用^[1-2]。近年来,气候变化及人类活动的加剧导致全球极端暴雨事件频发,我国防洪减灾面临前所未有的挑战^[3-7]。为更加科学地应对新时期的防洪挑战,2021 年我国正式提出构建数字孪生流域,并确立了流域防洪在我国水利数字孪

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3006702);水利部重大科技项目(SKR-2022034)
作者简介:马强(1987—),男,高级工程师,博士,主要从事水信息学研究。E-mail:maqiang@iwhr.com
通信作者:杨邦(1982—),男,正高级工程师,博士,主要从事流域洪水预报研究。E-mail:boboyoung@263.net

生建设中的核心地位^[8]。对比传统的防洪处置模式,基于数字孪生的流域防洪为防洪减灾工作中一系列科学问题提供了全新的解决方法和思路,对提高防灾减灾工作效率和效果具有重要意义^[9]。

构建水利专业模型平台,保证多个业务模型在流域洪水分析中的高效运行并提供准确模拟信息是支撑数字孪生流域防洪系统构建、科学开展流域防洪调度的核心。为此,国内外众多专家学者开展了大量研究^[10-14]。Thorarinsdottir 等^[15]通过对挪威 203 个大型集水区数据进行区域分析,提出了基于广义极值分布的贝叶斯分层模型框架,构建的专业模型实现了对区域洪水的高效精准分析与预测。阚光远等^[16]将新安江产流模型与改进的 BP 汇流模型耦合构建了基于 K 最邻近算法的新安江产流模型(XAJ-BP-KNN, XBK),通过在呈村流域与单一新安江模型模拟结果进行对比,发现 XBK 模型精度明显提升。Li 等^[17]对河北省柳林流域进行水文模拟,同样验证了耦合模拟方法在反映河道洪水演进过程中的优越性。对相关模型的深入研究证明,水文水动力耦合模拟可以进一步提高流域洪水模拟精度^[18-21]。Felder 等^[22]利用 PREVAH (precipitation-runoff-evapotranspiration HRU) 水文模型与 BASEMENT (basic simulation environment for computation of environmental flow and natural hazard simulation) 水动力模型对瑞士阿尔卑斯山北部集水区可能出现的 100 个最大降水时空分布情景进行了耦合模拟,发现耦合模拟获得的水文过程曲线和流量极值比单一模型模拟的精度更高。郝思佳等^[23]针对河南省王宗店村“7·20”山洪灾害事件,提出基于水文水动力模拟的山洪灾害快速复盘策略,发现精细化水文水动力模拟可以显著提升洪水过程中对各种水利要素的模拟精度。王船海等^[24-29]也基于水文水动力耦合模型对提升洪水预报和流量过程模拟精度进行了研究,认为耦合模拟思路在实际应用中效果良好。因此,在对产汇流机理复杂且人为影响严重的流域洪水模拟分析中,采用多模型耦合模拟策略,并根据模拟对象特征分类分区优选计算方法是当前被广泛接受的建模原则之一。但如何开展模型选型及流域防洪模型建模,仍需要进一步探索研究。本文针对数字孪生流域防洪模型构建,在综合考虑流域水文特征、水利工程分布及模型算法本身稳定性、时效性、精确性的前提下,提出流域洪水全过程精细化模拟的建模策略。基于“23·7”永定河系特大洪水案例,利用时空变源分布式水文模型和 IFMS (integrated flood modeling system) 二维水动力计算软件等我国自主研发的水利模型工具对流域产汇流机

制变化、水库调蓄作用及蓄滞洪区内的洪水演进过程进行精细化模拟,还原流域洪水发生、发展及处置应对全过程,验证永定河系洪水防御决策制定的科学合理性,为今后我国数字孪生流域防洪模型构建提供借鉴与参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

永定河系是海河流域重要水系之一,地跨京、津、冀、晋和内蒙等 5 省(自治区、直辖市)。永定河系是推进京津冀协同发展战略实施的生态廊道^[30],位于 39°00'N~41°20'N、112°00'E~117°45'E,总面积 4.7 万 km²,山区面积约 4.5 万 km²,占河系总面积的 95.8%。永定河系地处温带大陆性气候带,年平均气温 10℃左右,年降水量为 360~650 mm,几乎 80% 的年降水量集中在 7—9 月,集中性的流域降雨易导致洪水灾害的发生^[31]。为解决流域水资源和防洪等问题,20 世纪 50 年代在永定河系上游修建了官厅水库,之后又陆续修建了册田、友谊两座大型水库。如今,通过多座大型水库的修建,基本实现了对永定河系上游洪水的削峰拦蓄。官厅山峡区间位于官厅水库下游,是永定河系的暴雨多发区,时常遭受由对流天气影响产生的暴雨洪水灾害^[32]。官厅山峡区间河道比降大,产汇流迅速,且缺少大型水库等控制性工程,突发性的洪水易对下游北京、天津、河北等省(市)产生较大影响。目前,在官厅山峡区间下游设置了永定河泛区和三角淀蓄滞洪区,可通过蓄洪、滞洪降低洪水对下游的影响。洪水经调蓄后,少部分入北运河后经海河入海,大部分经永定新河入海。永定河系概况如图 1 所示。

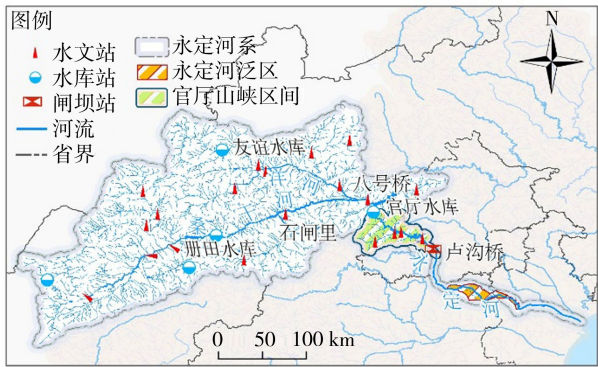


图 1 永定河系概况

Fig. 1 Overview of the Yongding River System

永定河系是国务院 1985 年确定的全国四大防汛重点河流之一,也是北京的母亲河^[33],河系防洪调度事关北京、天津等重要城市以及北京大兴国际机场等重要基础设施的安全。目前,永定河系已形成由水库、河道堤防、蓄滞洪区等组成的防洪工程体

系,基本达到 100 年一遇防洪标准。

1.2 “23·7”永定河系特大洪水

2023 年 7 月,台风“杜苏芮”残余环流北上造成海河流域遭受 1963 年以来最强降雨,引发流域性特大洪水^[34]。降雨从 7 月 29 日至 8 月 2 日持续了 5 d,造成永定河系总降水量 40 亿 m³,累计面平均降水量 84 mm。其中,官厅山峡区间累计面平均降水量达 396 mm(图 2)。累计降水量最大站点为北京市门头沟区清水站(1 014.5 mm)^[35]。

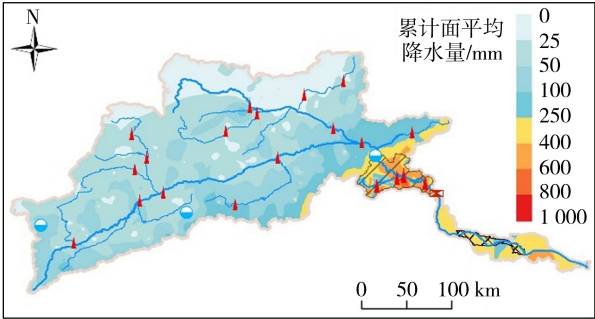


图 2 “23·7”永定河系特大洪水累计面平均降水量分布
Fig. 2 Distribution of cumulative areal average precipitation during “23·7” catastrophic flood in the Yongding River System

“23·7”永定河系特大洪水量级为 1924 年以来最大。7 月 31 日 13:30 三家店洪峰流量达到 3 500 m³/s,形成“永定河 2023 年第 1 号洪水”^[36]。卢沟桥枢纽于 7 月 31 日在 1.5 h 内最大流量由 1 030 m³/s 涨至 4 650 m³/s,三家店、卢沟桥站洪峰流量均为有实测资料以来第二位。“23·7”特大洪水期间,永定河系总产流量 5.36 亿 m³;官厅山峡区间总产流量 3.29 亿 m³,占河系总产流量的 61.4%。8 月 2 日 6:00 永定河泛区确定启用,启用期间最大蓄滞洪量达 2.56 亿 m³。此次流域性的特大洪水也引发了流域境内及下游多地一系列连锁灾害,北京市房山区、门头沟区等山区均发生了山洪灾害,河北省涿州市等平原区遭遇严重的洪涝灾害。

1.3 数据来源

本文采用的逐小时雨水情观测数据由水利部海河水利委员会水文局提供,包括 924 个雨量站、41 个水文站、113 个水库站、2 个闸坝站,记录时间为 2023 年 7 月 15 日 1:00 至 2023 年 8 月 8 日 16:00。分布式水文模型建模所需的小流域、河道、节点、土壤类型(1:100 万精度)、土地利用类型(1:10 万精度)等数据均来自全国山洪灾害调查评价数据集。永定河系官厅水库以上流域包含 2 934 个面积为 15~30 km² 的小流域单元。官厅山峡区间以不同空间尺度划分两套小流域单元组;以 1~10 km² 面积划分 4 728 个小流域单元,以 15~

30 km² 面积划分 126 个小流域单元。二维水动力建模则基于 1:2 000 数字高程地形数据。

2 模型构建

2.1 建模策略

虽然官厅水库以上流域面积占永定河系总面积的 92.3%,但是考虑此次暴雨中心主要集中在官厅山峡区间,且流域上游官厅、册田、友谊 3 座大型水库拦蓄能力较强,上游洪水受水库调蓄后对下游影响较小,因此提出以下建模策略(图 3):①以 15~30 km² 小流域单元作为最小计算单元构建官厅水库以上流域的分布式水文模型;②对于降雨集中、产汇流迅速的官厅山峡区间单独构建模型,分别采用 15~30 km² 和 1~10 km² 两种小流域单元构建分布式水文模型,对 2 个模型进行率定后,根据模拟结果精度进行模型优选;③基于 1:2 000 分辨率地形数据构建精细化二维水动力模型,在永定河泛区分区运用,对洪水演进进行模拟分析。综合考虑流域雨水情特征及水利工程分布情况,本文提出采用多模型联合模拟策略对流域洪水全过程进行精细化分析,通过数值计算,实现洪水溯源与灾害成因的精准解析,支撑数字孪生流域防洪中洪水场景分区分段预演。

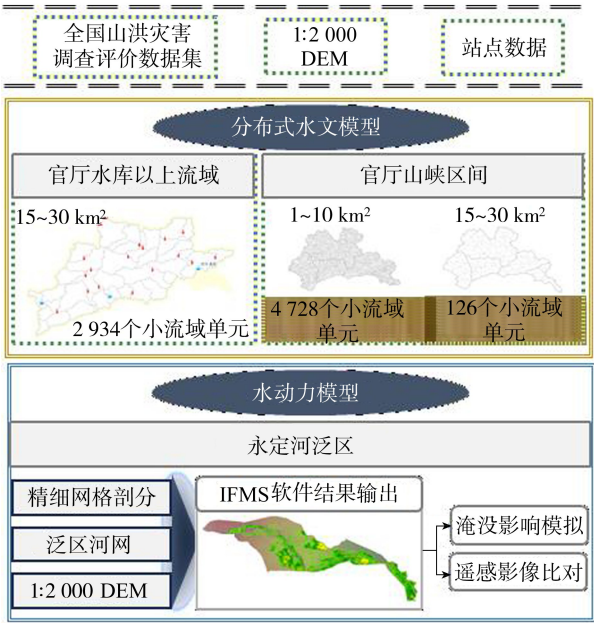


图 3 永定河系洪水模拟建模策略
Fig. 3 Modeling strategy for simulation of floods in the Yongding River System

2.2 模型算法

采用我国自主研发时空变源分布式水文模型对永定河系进行水文模拟。该模型通过对土壤含水量在外因(降雨、入渗和蒸发)和内因(重力和基质吸力)共同作用下的时空变化过程进行精细化模拟,

实时判断小流域的产流机制,从平面、垂向(图4)和时段3个方面进行混合产流计算,实现对模拟区域的分布式水文模拟^[37]。模型主要产流参数包括优先面积占比(r_p)、优先流线性出流系数(k_{p1})、优先流非线性出流系数(k_{p2})、壤中流线性出流系数(k_{i1})、壤中流非线性出流系数(k_{i2})和水力传导系数(K_s)。区别于其他分布式水文模型,时空变源分布式水文模型采用 GARTO 算法模拟表层土壤的下渗能力变化。该方法通过离散土壤含水量,实现对土壤内部湿润锋下移过程的快速计算和对流域表层土壤包气带下渗能力的准确模拟^[38]。

选用国产 IFMS 二维水动力计算软件模拟永定河泛区洪水演进。该软件是我国新一代一、二维可视化水动力学模拟分析软件,包含支持复杂水利工程调度模拟的一维河网计算引擎、二维洪水分析计算引擎及快速非结构网格生成工具^[39]。在对永定河泛区分区模拟中,通过设定分洪口门开启条件,基于时间、水位双重控制口门开闭。口门开启后的过流能力计算公式为

$$q = \begin{cases} 0.35h_1\sqrt{2gh_1} & h_2/h_1 \leq 2/3 \\ 0.91h_2\sqrt{2g(h_1 - h_2)} & 2/3 < h_2/h_1 \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $h_1 = Z_{\text{umax}} - Z_b$ $h_2 = Z_{\text{dmax}} - Z_b$
式中: q 为通过分洪口门的单宽流量; g 为重力加速度; Z_{umax} 为分洪处河道内水位的最大值; Z_{dmax} 为分洪处河道内外水位差的最大值; Z_b 为口门处的堤顶高程。

2.3 模型构建

参考我国三级流域水系划分并综合考虑流域内重要水文站点和水库分布,在官厅水库以上游流域

构建了 39 个计算单元,总建模面积 4.37 万 km²,其中,有实测数据可以进行参数率定的计算单元为 18 个。将清水、青白口、雁翅、三家店水文站和卢沟桥枢纽等 5 个重要模拟站点作为官厅山峡区间分布式水文模型的率定对象(图 4),基于 2 套小流域划分数据分别构建官厅山峡区间分布式水文模型,总建模面积 0.18 万 km²。水文模型模拟时间为 2023 年 7 月 15 日 1:00 至 2023 年 8 月 8 日 16:00,选择模拟时间步长 1 h。水动力学模型覆盖范围为永定河系卢沟桥枢纽以下至河系入海口,总面积 539.60 km²,共建立 3 个水动力模型相互串联进行模拟,分别为卢沟桥枢纽—梁各庄水文站段、梁各庄水文站—屈家店枢纽段(即永定河泛区段)以及屈家店枢纽—河系入海口段。3 个水动力模型均采用非结构网格,总计剖分 7.63 万个网格单元。永定河泛区段模型对 6 个分洪口门设定水位高程作为口门启动条件:茨平口门前水位达 15.40 m 且将继续上涨时,启用茨平口门分洪;西孟村口门前水位达 16.90 m 及池口口门前水位达 21.60 m 且将继续上涨时,启用西孟村、池口口门分洪;南石口门前水位达 17.50 m 且将继续上涨时,启用南石口门分洪;潘庄子口门前水位达 21.00 m 且将继续上涨时,启用潘庄子口门分洪;王玛口门前水位达 17.80 m 且将继续上涨时,启用王玛口门分洪。

3 结果与分析

3.1 流域产流机制

永定河系官厅水库以上流域及官厅山峡区间共构建 44 个分布式水文模型计算单元,采用并行加速技术,全部计算单元 24 d 逐小时分布式水文模拟于 5 min 完成,集成的模型计算效率较高且运行稳定,

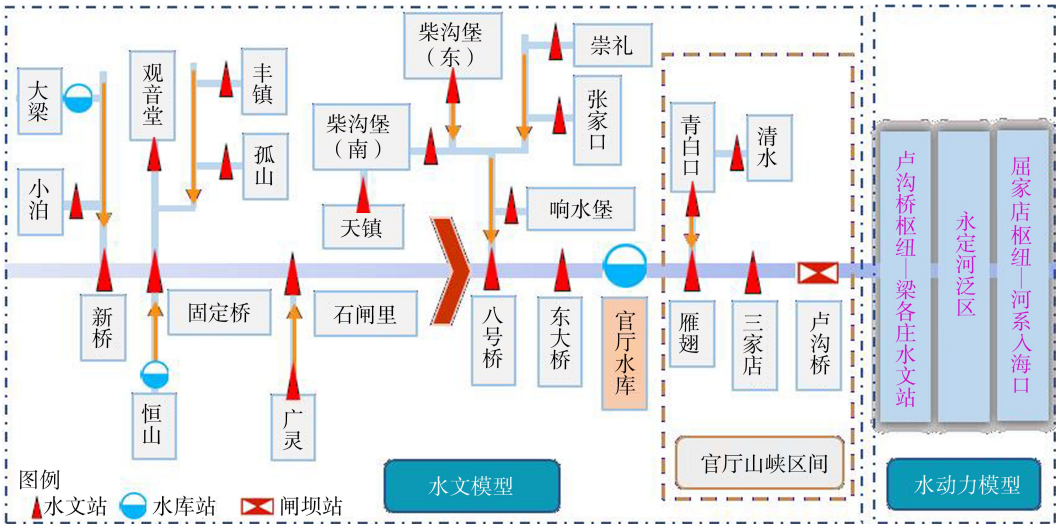


图 4 永定河系防洪模型拓扑概化图
Fig. 4 Topological schematic diagram of the Yongding River System flood control model

可以满足数字孪生流域防洪对模型的要求。

对永定河系官厅水库以上流域的 18 个水文计算单元进行参数率定,其中 7 个计算单元的模拟洪峰误差在 $\pm 20\%$ 以内,4 个计算单元在 $\pm 10\%$ 以内。如图 5 所示,石匣里水文站作为官厅水库上游重要站点之一,模拟与实测洪峰拟合较好,洪峰相对误差仅为 -12.98% ,纳什效率系数为 0.97;八号桥水文站位于石匣里水文站下游,实测洪峰为 $34.20\text{ m}^3/\text{s}$,模拟洪峰为 $31.76\text{ m}^3/\text{s}$,洪峰相对误差为 -7.14% ,纳什效率系数为 0.81。

由于卢沟桥枢纽的流量过程线并非直接来源于实测,而是由该处 3 个观测站点洪水过程叠加组成,因此,本文对模型的精度评定主要采用模拟洪峰与实测值进行对比。对官厅山峡区间 $1\sim 10\text{ km}^2$ 与 $15\sim 30\text{ km}^2$ 小流域单元分布式水文模型率定结果进行对比分析,结果如表 1 所示。 $1\sim 10\text{ km}^2$ 小流域单

元分布式水文模型模拟洪峰误差在 7% 以内,而 $15\sim 30\text{ km}^2$ 小流域单元分布式水文模型模拟洪峰误差在 1% 以内,因此,后者的模拟精度较高。造成精细化模型模拟精度下降的主要原因是下垫面数据的精度及分辨率与模型单元划分尺度的适配度不高。本文采用的 $1:100$ 万分辨率土壤类型数据及 $1:10$ 万分辨率土地利用类型数据均为全国山洪灾害调查评价数据,无法较好地体现 $1\sim 10\text{ km}^2$ 小流域单元下垫面特征变化,因此造成参数率定赋值难度较大,模拟精度反而降低。

官厅山峡区间模型率定后参数值分布如图 6 所示。 $1\sim 10\text{ km}^2$ 小流域单元模型优先流面积占比(r_p)和水力传导系数(K_s)的取值整体高于 $15\sim 30\text{ km}^2$ 小流域单元模型。 $1\sim 10\text{ km}^2$ 小流域单元模型壤中流线性出流系数(k_{i1})、优先流线性出流系数(k_{p1})、优先流非线性出流系数(k_{p2})和壤中流非线

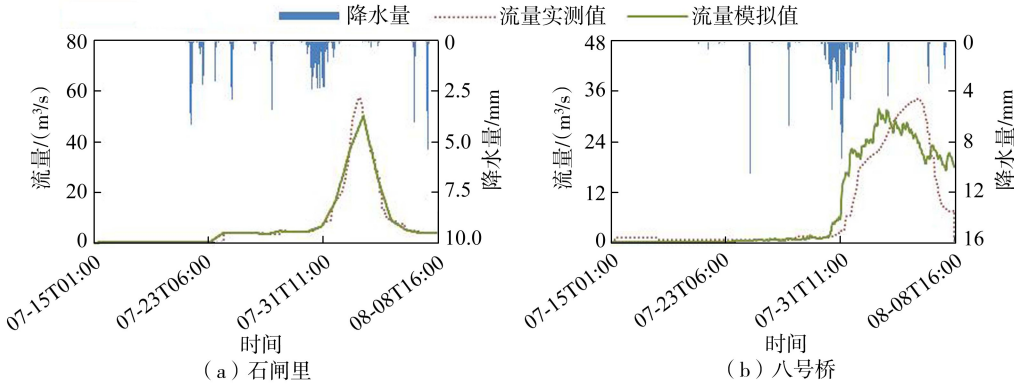


图 5 永定河系上游站点洪水过程模拟结果

Fig. 5 Simulation results of upstream stations in the Yongding River System

表 1 永定河系官厅山峡区间站点模拟误差统计

预报站点	实测洪峰 流量/(m^3/s)	1~10 km ² 小流域单元模型			15~30 km ² 小流域单元模型		
		模拟洪峰 流量/(m^3/s)	洪峰流量 相对误差/%	峰现时间 误差/h	模拟洪峰 流量/(m^3/s)	洪峰流量 相对误差/%	峰现时间 误差/h
		流量/(m^3/s)	相对误差/%	误差/h	流量/(m^3/s)	相对误差/%	误差/h
青白口	1210	1143.03	-5.53	-1	1209.94	-0.01	0
雁翅	1710	1598.13	-6.54	-1	1711.73	0.10	-1
三家店	3500	3527.06	0.77	0	3493.89	-0.17	0
卢沟桥	4650	4620.00	-0.63	0	4656.89	0.15	0

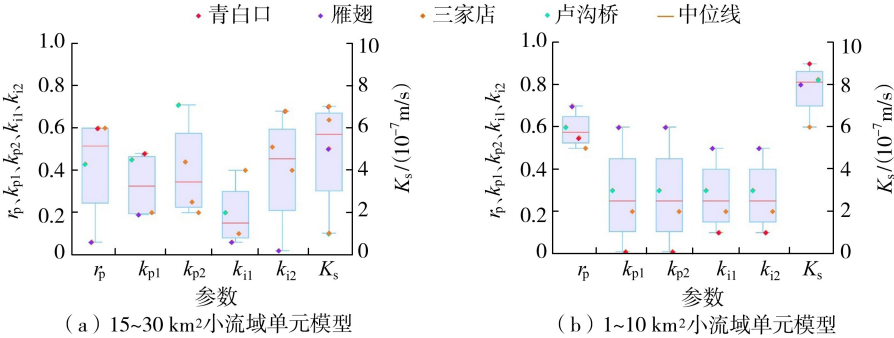


图 6 永定河系官厅山峡区间模型参数率定结果箱形图

Fig. 6 Boxplot of calibrated parameters of Guanting Shanxia section models in the Yongding River System

性出流系数(k_{12})的变化幅度小于 $15\sim 30\text{ km}^2$ 小流域单元模型,无法较好地表征该地区下垫面特性的空间变化,因此模拟精度相对较低。

对官厅水库以上流域及官厅山峡区间产流系数空间分布进行分析,结果如图 7 所示。永定河系官厅水库以上流域产流系数在 $0.02\sim 0.30$ 之间,与该区域多年平均值相近。官厅山峡区间产流系数除清水和雁翅水文站控制区域外均大于 0.80 ,超过该地区的多年平均值。其主要原因之一为官厅山峡区间为此此次洪水暴雨中心区,雨量、雨强远超多年平均值,且该区间平均比降较大,最大坡度达 0.063% ,主要土地利用类型为草地、林地、城镇用地,土壤类型以褐土和棕壤为主,土层偏薄,地表下渗能力弱,产汇流迅速,易形成突发性洪水。

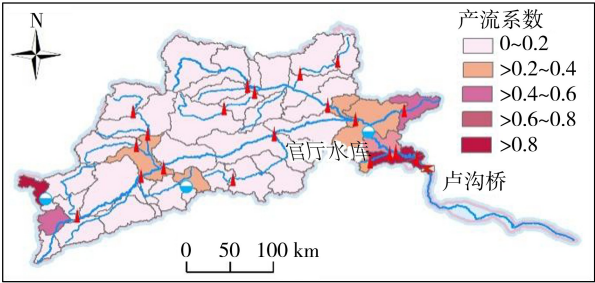
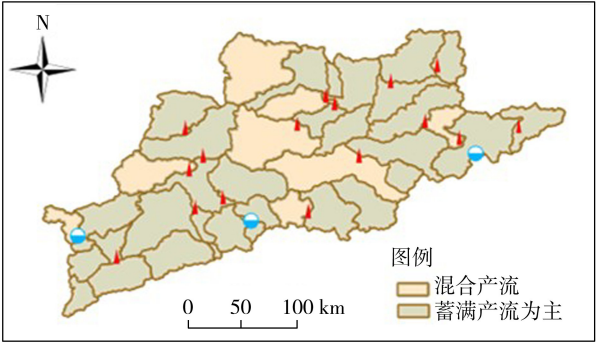


图 7 “23·7”特大洪水期间永定河系产流系数分布
Fig. 7 Distribution of runoff generation coefficient during “23·7” catastrophic flood in the Yongding River System

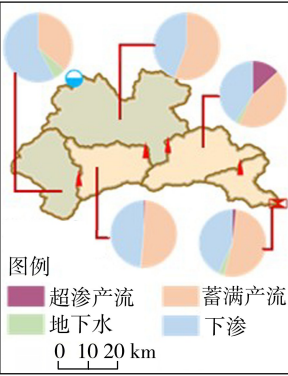
将研究区分为官厅水库以上流域和官厅山峡区间,对“23·7”永定河系特大洪水的流域产流机制进行分析,结果如图 8 所示。官厅水库以上流域整体以蓄满产流为主,发生蓄满产流的流域面积占总面积的 74.97% 。官厅山峡区间则出现明显的超渗、蓄满混合产流,该区域产流以壤中流为主,地表超渗产流占比较小(基本低于 10%)。 $1\sim 10\text{ km}^2$ 小流域单元模型的模拟结果中蓄满产流在总产流量中的占比高于 $15\sim 30\text{ km}^2$ 小流域单元模型的模拟结果,说明 $15\sim 30\text{ km}^2$ 小流域单元分布式水文模型更能体现该区域极端暴雨造成的超渗、蓄满混合产流机制在洪水过程中的变化特征,与实际情况更加贴合。

3.2 泛区洪水演进

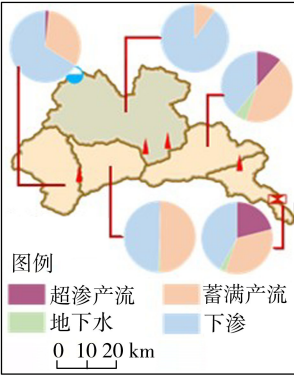
二维水动力学模拟时间为 2023 年 7 月 28 日 8:00 至 8 月 6 日 8:00,结果输出时间步长为 1 h 。采用 CPU/GPU 并行加速后的水动力模型计算总耗时 2 min ,可基本满足对数字孪生流域防洪实时决策的要求。流经永定河泛区入口洪水洪峰 $2250\text{ m}^3/\text{s}$,经泛区分洪滞洪后,屈家店枢纽出口处洪峰削减至 $245\text{ m}^3/\text{s}$,低于永定新河行洪能力



(a) 官厅水库以上流域



(b) 官厅山峡区间
($1\sim 10\text{ km}^2$ 小流域单元)



(c) 官厅山峡区间
($15\sim 30\text{ km}^2$ 小流域单元)

图 8 “23·7”特大洪水期间永定河系产流机制分布
Fig. 8 Distribution of runoff generation mechanism during “23·7” catastrophic flood in the Yongding River System

($500\text{ m}^3/\text{s}$),可以保障下游天津市防洪安全。

永定河泛区模型根据模拟水位判定是否启用分洪口门,模拟启用的顺序为池口、茨平、南石、西孟村,与实际情况一致。但受口门附近地形数据精度的影响,模拟口门启用时间与实际略有不同,但误差均控制在 $\pm 2\text{ h}$ 以内。此次泛区模拟蓄滞洪总量为 3.62 亿 m^3 ,与实测相比增加了 1.4% 。与洪水发生时的卫星遥感监测图进行对比,遥感监测提取最大淹没面积为 96.88 km^2 ,模拟最大淹没面积为 105.46 km^2 ,模拟结果略大于遥感监测结果(图 9)。

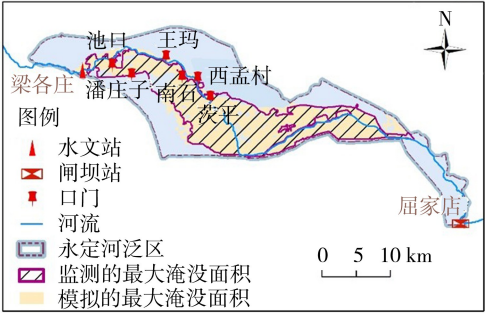


图 9 永定河泛区洪水期间模拟与监测的最大淹没面积对比
Fig. 9 Comparison of simulated and monitored maximum inundated areas in the Yongding River flood detention area during flood period

结合实际情况推测为泛区内高秆作物对遥感监测造成了影响,地表洪水受高秆作物遮挡,导致遥感提取淹没面积偏小。

4 结 论

a. 永定河官厅水库以上流域并非本次暴雨集中区,且区域内多个大型水利工程可对上游来水进行拦蓄,因此选择以 15~30 km² 小流域单元为最小计算单元构建分布式水文模型,可以满足对上游洪水发生、发展、演进全过程的模拟分析。

b. 永定河官厅山峡区间地处本次暴雨中心,区域地形起伏较大,下垫面特征复杂。对比 1~10 km² 与 15~30 km² 小流域单元分布式水文模型模拟结果表明,下垫面数据的精度与 15~30 km² 小流域单元模型更加适配,最终采纳该水文模型模拟结果。

c. 永定河泛区的行洪主要通过分洪口门的分区运用实现。采用高精度二维水动力模型对洪水演进过程进行模拟分析,复盘口门开启顺序及分区运用效果,模拟结果与实测结果基本一致。该模型可以支持数字孪生永定河泛区防洪预演。

参考文献:

[1] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham, Switzerland: Springer, 2016: 85-113.

[2] TAO Fei, QI Qinglin. Make more digital twins[J]. Nature, 2019, 573(7775): 490-491.

[3] KING A D, REID K J, SAUNDERS K R. Communicating the link between climate change and extreme rain events [J]. Nature Geoscience, 2023, 16(7): 552-554.

[4] 胡畔,陈波,史培军. 中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(5): 1148-1162. (HU Pan, CHEN Bo, SHI Peijun. Spatiotemporal patterns and influencing factors of rainstorm-induced flood disasters in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(5): 1148-1162. (in Chinese))

[5] 蒋兴文,李跃清,王鑫. 中国地区水汽输送异常特征及其与长江流域旱涝的关系[J]. 地理学报, 2008, 63(5): 482-490. (JIANG Xingwen, LI Yueqing, WANG Xin. Water vapor transportation over China and its relationship with draught and flood in the Yangtze River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(5): 455-463. (in Chinese))

[6] 张建云,舒章康,王鸿杰,等. 郑州“7·20”暴雨洪涝几个水文问题的讨论[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1618-1626. (ZHANG Jianyun, SHU Zhangkang, WANG Hongjie, et al. A discussion on several hydrological issues of “7·20”

rainstorm and flood in Zhengzhou[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7): 1618-1626. (in Chinese))

[7] 黄晶,吴星妍,李梦晗. 不同主体视角下极端暴雨灾害事件网络舆情演化研究[J]. 水利经济, 2023, 41(4): 94-106. (HUANG Jing, WU Xingyan, LI Menghan. Research on the evolution of network public opinion of extreme rainstorm disaster events from the perspective of different subjects [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(4): 94-106. (in Chinese))

[8] 冶运涛,蒋云钟,梁犁丽,等. 数字孪生流域:未来流域治理管理的新基建新范式[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 683-704. (YE Yuntao, JIANG Yunzhong, LIANG Lili, et al. Digital twin watershed: new infrastructure and new paradigm of future watershed governance and management[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(5): 683-704. (in Chinese))

[9] 陈胜,刘昌军,李京兵,等. 防洪“四预”数字孪生技术及应用研究[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(6): 1-5. (CHEN Sheng, LIU Changjun, LI Jingbing, et al. Study on the digital twin technology and application of flood management with four functions of FEDE[J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(6): 1-5. (in Chinese))

[10] ZHANG Xianqi, QI Yu, LIU Fang, et al. Enhancing daily streamflow simulation using the coupled SWAT-BiLSTM approach for climate change impact assessment in Hai-River Basin[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 15169.

[11] 杨文发,王乐,张俊. 流域多尺度水文预报应用进展及适用性探讨[J]. 人民长江, 2021, 52(10): 84-94. (YANG Wenfa, WANG Le, ZHANG Jun. Application progress and applicability of multi-scale watershed hydrological forecasting [J]. Yangtze River, 2021, 52(10): 84-94. (in Chinese))

[12] MIJIC A, LIU L, O' KEEFFE J, et al. A meta-model of socio-hydrological phenomena for sustainable water management[J]. Nature Sustainability, 2024, 7(1): 7-14.

[13] 马强,王莹,魏琳,等. 基于分布式模型的流域洪水时空特征分析方法[J]. 水科学进展, 2024, 35(5): 726-737. (MA Qiang, WANG Ying, WEI Lin, et al. A modelling-based assessment approach of basin flood spatiotemporal characteristics[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(5): 726-737. (in Chinese))

[14] 张春堂,张珂,陈国鼎,等. 基于智能网格降水和水文-滑坡耦合模型的全国洪水滑坡灾害滚动预报研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 83-92. (ZHANG Chuntang, ZHANG Ke, CHEN Guoding, et al. Flood and landside diaster rolling forecasting in China based on intelligent-grid precipitation and coupled hydrological-landslide model[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 83-92. (in Chinese))

[15] THORARINSDOTTIR T L, HELLTON K H, STEINBAKK G H, et al. Bayesian regional flood frequency analysis for

- large catchments[J]. Water Resources Research, 2018, 54 (9): 6929-6947.
- [16] 阚光远, 刘志雨, 李致家, 等. 新安江产流模型与改进的 BP 汇流模型耦合应用[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 21-28. (KAN Guangyuan, LIU Zhiyu, LI Zhijia, et al. Coupling Xinanjiang runoff generation model with improved BP flow concentration model[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(1): 21-28. (in Chinese))
- [17] LI Jianzhu, WANG Ziqi, ZHANG Ting. Flood simulation using the hydrological model and the hydrological-hydrodynamic coupling model in a small watershed in semi-arid and sub-humid region, North China[J]. Journal of Water & Climate Change, 2023, 14(10): 3496-3516.
- [18] 江春波, 周琦, 申言霞, 等. 山区流域洪涝预报水文与水动力耦合模型研究进展[J]. 水利学报, 2021, 52(10): 1137-1150. (JIANG Chunbo, ZHOU Qi, SHEN Yanxia, et al. Review on hydrological and hydrodynamic coupling models for flood forecasting in mountains watershed[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(10): 1137-1150. (in Chinese))
- [19] LONG Yuannan, CHEN Wenwu, JIANG Changbo, et al. Improving streamflow simulation in Dongting Lake Basin by coupling hydrological and hydrodynamic models and considering water yields in data-scarce areas[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 47: 101420.
- [20] LOPES V A R, FAN F M, PONTES P R M, et al. A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes[J]. Journal of Hydrology, 2018, 565: 177-196.
- [21] 王雨洁, 李致家, 姚成, 等. 基于分布式水文水动力耦合模型的秦淮河流域洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 11-18. (WANG Yujie, LI Zhijia, YAO Cheng, et al. Flood simulation in the Qinhuai River Basin based on a coupled distributed hydrological and hydrodynamic model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(2): 11-18. (in Chinese))
- [22] FELDER G, ZISCHG A, WEINGARTNER R. The effect of coupling hydrologic and hydrodynamic models on probable maximum flood estimation[J]. Journal of Hydrology, 2017, 550: 157-165.
- [23] 郝思佳, 王文川, 马强, 等. 基于水文水动力模型的山洪灾害复盘策略: 以河南王宗店村“7·20”山洪为例[J]. 水利水电技术, 2023, 54(6): 1-11. (HAO Sijia, WANG Wenchuan, MA Qiang, et al. A numerical rehearsal strategy of flash flood disaster with hydrological and hydrodynamic modelling: case study of “7·20” flash flood disaster in Wangzongdian Village, Henan Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(6): 1-11. (in Chinese))
- [24] 王船海, 俞悦, 吴金宁, 等. 基于马斯京根参数 K 、 X 的等效河道计算方法研究[J]. 水利学报, 2023, 54(10): 1257-1265. (WANG Chuanhai, YU Yue, WU Jinning, et al. Research on calculation method of equivalent channel based on Muskingum parameters K and X [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(10): 1257-1265. (in Chinese))
- [25] LAGANIER O, AYRAL P A, SALZE D, et al. A coupling of hydrologic and hydraulic models appropriate for the fast floods of the Gardon River basin (France)[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14(11): 2899-2920.
- [26] CEA M, RODRIGUEZ M. Two-dimensional coupled distributed hydrologic-hydraulic model simulation on watershed[J]. Pure and Applied Geophysics, 2016, 173 (3): 909-922.
- [27] 徐嘉远, 邹磊, 夏军, 等. TVGM-LSTM 耦合模型及其径流模拟效果分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 104-110. (XU Jiayuan, ZOU Lei, XIA Jun, et al. TVGM-LSTM coupling model and its runoff simulation effect analysis[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 104-110. (in Chinese))
- [28] 付晓花, 董增川, 韩锐, 等. 复杂河网地区气候-水文-水动力耦合模型模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 162-169. (FU Xiaohua, DONG Zengchuan, HAN Rui, et al. Simulation of climate-hydrologic-hydrodynamic coupling model in complex river network area[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 162-169. (in Chinese))
- [29] LIU Zhanyan, ZHANG Hongbin, LIANG Qiuhua. A coupled hydrological and hydrodynamic model for flood simulation[J]. Hydrology Research, 2019, 50(2): 589-606.
- [30] 邓延利, 吕政泽, 雷晶, 等. 永定河全流域水利风景区发展模式及对策研究[J]. 水利经济, 2024, 42(6): 8-13. (DENG Yanli, LYU Zhengze, LEI Jing, et al. Research on development model and countermeasures of whole basin water conservancy scenic area in the Yongding River[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(6): 8-13. (in Chinese))
- [31] 褚健婷, 夏军, 许崇育, 等. 海河流域气象和水文降水资料对比分析及时空变异[J]. 地理学报, 2009, 64(9): 1083-1092. (CHU Jianting, XIA Jun, XU Chongyu, et al. Comparison and spatial-temporal variability of daily precipitation data of weather stations and rain gauges in Haihe River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(9): 1083-1092. (in Chinese))
- [32] 赵晓红, 王均平, 魏明建. 永定河历史时期洪水特征及其成因分析[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2013, 37(1): 85-91. (ZHAO Xiaohong, WANG Junping, WEI Mingjian. The characteristics and causes of flood in Yongding River in historical period[J]. Journal of Hebei Normal University (Natural Science), 2013, 37(1): 85-91. (in Chinese))

(下转第 92 页)

1285. (WEI Qing, DAI Kan, LIN Jian, et al. Evaluation on the 2016-2018 fine gridded precipitation and temperature forecasting[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(10): 1272-1285. (in Chinese))

[20] WANG Jiahu, HONG Yang, LI Li, et al. The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model[J]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56(1): 84-98.

[21] MONTRASIO L, VALENTINO R. A model for triggering mechanisms of shallow landslides[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, 8(5): 1149-1159.

[22] YAO Cheng, LI Zhijia, YU Zhongbo, et al. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based Xinanjiang model using geographically based information[J]. Journal of Hydrology, 2012, 468-469: 47-62.

[23] 王晟, 张珂, 晁丽君, 等. 基于集合模拟的汉江上游洪水与滑坡灾害风险评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 70-76. (WANG Sheng, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Assessment of flood and landslide hazard risk based on ensemble simulation over upstream of the Han River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 70-76. (in Chinese))

[24] GATANI F, SEGONI S, FALORNI G. An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale[J]. Water Resources Research, 2010, 46(5): W05508.

[25] MALONE B, SEARLE R. Improvements to the Australian national soil thickness map using an integrated data mining approach[J]. Geoderma, 2020, 377: 114579.

[26] ZHANG Yonggen, SCHAAP M G, ZHA Yuanyuan. A high-resolution global map of soil hydraulic properties produced by a hierarchical parameterization of a physically based water retention model[J]. Water Resources Research, 2018, 54(12): 9774-9790.

[27] 金荣花, 代刊, 赵瑞霞, 等. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. 气象, 2019, 45(4): 445-457. (JIN Ronghua, DAI Kan, ZHAO Ruixia, et al. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(4): 445-457. (in Chinese))

[28] CHEN Guoding, ZHANG Ke, WANG Sheng, et al. PHyL v1.0: a parallel, flexible, and advanced software for hydrological and slope stability modeling at a regional scale[J]. Environmental Modelling & Software, 2024, 172: 105882.

[29] FAWCETT T. An introduction to ROC analysis[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(8): 861-874. (收稿日期: 2024-07-22 编辑: 施业)

(上接第 82 页)

[33] 姚孝迭. 对永定河历史洪水几次波及北京城区的探讨[J]. 海河水利, 1999(1): 46-47. (YAO Xiaodie. Discussion on several historical floods of Yongding River affecting Beijing urban area[J]. Haihe Water Resources, 1999(1): 46-47. (in Chinese))

[34] 刘军梅, 杨毅, 郭金燕, 等. 海河“23·7”流域性特大洪水北京市永定河洪水调查分析及对设计洪水的建议[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(1): 52-57. (LIU Junmei, YANG Yi, GUO Jinyan, et al. Flood investigation and analysis of Yongding River, Beijing of Haihe “23·7” basin-wide extreme flood and suggestions on flood design[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(1): 52-57. (in Chinese))

[35] 水利部海河水利委员会. 海河“23·7”流域性特大洪水调查分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2024.

[36] 中华人民共和国水利部. 海河流域永定河发生 2023 年第 1 号洪水[EB/OL]. (2023-07-31) [2024-04-17]. http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202307/t20230731_1676775.html.

[37] 刘昌军, 周剑, 文磊, 等. 中小流域时空变源混合产流模型及参数区域化方法研究[J]. 中国水利水电科学研究学报, 2021, 19(1): 99-114. (LIU Changjun, ZHOU Jian, WEN Lei, et al. Research on spatio temporally-mixed runoff model and parameter regionalization for small and medium-sized catchments[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(1): 99-114. (in Chinese))

[38] 刘昌军, 文磊, 周剑, 等. 小流域暴雨山洪水文模型与水动力学方法计算比较分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(4): 262-270. (LIU Changjun, WEN Lei, ZHOU Jian, et al. Comparative analysis of hydrological and hydrodynamic calculation method for flash flood in small watershed[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(4): 262-270. (in Chinese))

[39] 张大伟, 李丹勋, 陈稚聪, 等. 溃堤洪水的一维、二维耦合水动力模型及应用[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 149-154. (ZHANG Dawei, LI Danxun, CHEN Zhicong, et al. Coupled one and two-dimensional hydrodynamic models for levee-breach flood and its application[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 149-154. (in Chinese)) (收稿日期: 2024-09-08 编辑: 施业)