

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.002

基于分布式模型的永定河流域“23·7”特大洪水模拟

李致家¹, 李安琪¹, 姚成¹, 张欣², 刘雨彤², 刘田伟², 曾萌²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 北京市水文总站, 北京 100089)

摘要: 为准确呈现“23·7”特大洪水的过程特征, 为永定河流域特大洪水的预防与预警工作提供理论支持, 采用网格新安江模型和网格蓄超模型对永定河流域5个关键控制断面(斋堂水库、青白口、雁翅、三家店、卢沟桥)进行了模拟分析, 采用2000—2022年的典型洪水事件率定模型参数, 并采用“23·7”特大洪水事件进行验证。结果表明: 网格新安江模型和网格蓄超模型均能够较为准确地模拟“23·7”特大洪水的全过程, 且在青白口断面, 2个模型的确定性系数均达到甲级精度; 在雁翅、三家店和卢沟桥控制断面, 模型精度均达到乙级, 模拟效果优良; 网格新安江模型与网格蓄超模型在5个控制断面的洪量、洪峰及峰现时间等指标表现良好, 可较好地模拟半干旱半湿润地区的特大洪水。

关键词: “23·7”特大洪水; 洪水预报; 网格蓄超模型; 网格新安江模型; 分布式水文模型; 永定河流域

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)05-0010-08

Simulation of “23·7” catastrophic flood in the Yongding River Basin based on distributed models

LI Zhijia¹, LI Anqi¹, YAO Cheng¹, ZHANG Xin², LIU Yutong², LIU Tianwei², ZENG Meng²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Beijing Hydrological Station, Beijing 100089, China)

Abstract: In order to accurately reconstruct the process characteristics of “23·7” catastrophic flood and provide theoretical support for the prevention and early warning of catastrophic floods in the Yongding River Basin, the grid-based Xin'anjiang (Grid-XAJ) model and Grid-XAJ based on saturation-infiltration double excess (Grid-XAJ-SIDE) model were used to simulate and analyze five key control sections in the Yongding River Basin: Zhaitang Reservoir, Qingbaikou, Yanchi, Sanjiadian, and Lugou Bridge. Typical flood events from 2000 to 2022 were selected for parameter calibration, and the “23·7” catastrophic flood event was used for validation. The results show that both the Grid-XAJ and Grid-XAJ-SIDE models can accurately simulate the entire process of the “23·7” catastrophic flood. In the Qingbaikou section, the determination coefficients of both models achieve Class A accuracy; at the Yanchi, Sanjiadian, and Lugou Bridge control sections, the model accuracy reaches Class B, indicating excellent simulation performance. The study demonstrates that the Grid-XAJ and Grid-XAJ-SIDE models perform well in simulating flood volume, peak flow, and peak time at the five control sections, making them effective for simulating catastrophic floods in semi-arid and semi-humid regions.

Key words: “23·7” catastrophic flood; flood forecasting; Grid-XAJ-SIDE model; Grid-XAJ model; distributed hydrological model; the Yongding River Basin

随着极端气候事件的频发与城市化进程的推进, 洪水灾害的发生愈发频繁、灾情愈发剧烈, 这对传统的洪水预警和应急响应系统提出了严峻的挑战^[1-4]。在此背景下, 针对特大洪水的预报与研究显得极为关键。近年来, 我国多个重要流域频繁发生特大洪水事件, 其降水量与洪峰流量屡破历史纪录, 给社会经济、生态环

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3006500); 国家自然科学基金项目(52079035)

作者简介: 李致家(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文预报研究。E-mail: zjli@hhu.edu.cn

通信作者: 李安琪(2000—), 男, 博士研究生, 主要从事水文预报研究。E-mail: 240401010004@hhu.edu.cn

引用本文: 李致家, 李安琪, 姚成, 等. 基于分布式模型的永定河流域“23·7”特大洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 10-17.

LI Zhijia, LI Anqi, YAO Cheng, et al. Simulation of “23·7” catastrophic flood in the Yongding River Basin based on distributed models [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5): 10-17.

境以及人民生命财产安全带来了严重威胁。

2023 年 7 月,受台风“杜苏芮”减弱后的低压环流以及冷空气的协同影响,海河流域发生了历史上罕见的“23·7”特大流域性洪水^[5]。此次降水具有持续时间长、降水量大、短时强降水和降水区域高度重叠等特点,降水累计时间长达 83 h,仅次于 1963 年 8 月“63·8”特大暴雨(144 h)。降水总量为 316.7 mm,约为“63·8”暴雨降水量的 1.35 倍,最大小时降水强度在门头沟区燕家台测得 146.5 mm,位列历史第二,仅次于枣树林站的 147.1 mm^[6-7]。此次强降水使得大清河、永定河、潮白河和北运河等主要河流出现显著的水位上涨现象。目前学界已从降雨时空分布特征^[8-9]、洪水演进过程^[10-11]、地下水位变化^[12]、防洪调度^[13]等多个维度,对“23·7”特大流域性洪水开展了系统且深入的复盘研究。而永定河流域具有数量众多且匮乏历史监测流量资料的山洪沟,面对这次极端且复杂的流域性特大洪水事件,传统的洪水预测预警方法未能对永定河流域众多山洪沟进行有效建模与预测,迫切需要借助更加精确的水文模型对永定河流域进行深度分析与研究,以提高对未来类似灾害的预警能力。

在此背景下,基于分布式水文模型对特大洪水的模拟与复盘研究成了关键的研究方向。分布式水文模型通过对流域内降水、径流、蒸发等多种水文过程的精细模拟,尤其是在复杂地形条件和台风导致的降雨分布极其不均的气象条件下,能够更加精准地反映流域内水文要素的时空动态变化^[14-15]。研究^[16]表明,选择合适的产流计算方法可有效提高分布式水文模型在半干旱半湿润地区的洪水预报精度。产流模式主要有蓄满产流和超渗产流^[17],前者适用于南方湿润地区,后者适用于北方干旱地区。而半干旱半湿润地区由于气候条件以及下垫面复杂多变,降雨年内、年际变化大,不同产流模式在不同条件下混合出现^[18-19],限制了基于固定产流模式的传统水文模型在该地区的应用^[20-22],因此判别不同情况下的产流模式是在该地区进行洪水预报的重点和难点。李致家等^[23]认为半干旱半湿润地区的产流模式是超渗产流和蓄满产流在空间上的动态组合,提出了增加超渗产流机制的新安江模型。随着遥感、地理信息系统等技术的发展,李致家等^[24]结合流域 DEM 高程、植被和土壤类型等下垫面资料,提出了基于地形曲线数及地形指数划分的蓄满超渗空间组合模型,将子流域划分为蓄满子流域与超渗子流域。在此基础上,Liu 等^[25]研究了基于分布式模型的产流模式时空变化,基于有物理基础的 TOKASIDE 模型构建蓄超空间动态组合的 TOKASIDE-D 模型,并在我国华北地区的洪水预报得到了良好的验证。杜若愚等^[16]在网格新安江模型的基础上,借鉴 TOKASIDE-D 模型构建了基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型(Grid-XAJ-SIDE),在半干旱的绥德流域洪水预报结果良好。

本文基于分布式的网格新安江模型(Grid-XAJ)和蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型(Grid-XAJ-SIDE)对永定河流域的斋堂水库、青白口、雁翅、三家店以及卢沟桥这 5 个控制断面进行建模及分析,重现“23·7”特大流域性洪水的过程特征,并评估模型的适用性与精度,以期为今后类似极端事件的预警和防控提供科学依据。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

永定河上游由桑干河和洋河在河北省汇合后形成,河水流入北京境内经过怀来县,穿过门头沟区东部、石景山区、丰台区西部,横跨了大兴区与房山区。之后,河流继续流向东南,成为北京市与河北省涿县、固安县的界河,最终在大兴区崔指挥营村东侧出境。永定河流域总面积为 3 210 km²,其中山区占 2 490 km²,平原区占 720 km²,河道总长为 187 km。永定河流域属于温带大陆性季风气候区,年均降水量在 470~660 mm 之间,且降水分布极不均衡。大部分降水集中在 4—9 月,占全年降水量的 90%以上,而 10 月至次年 3 月的降水量不到 10%。

本文选取永定河流域的官厅水库以下至卢沟桥水文站区间作为研究区域,涵盖 5 个主要水文控制站,分别为斋堂水库、青白口、雁翅、三家店和卢沟桥。其中,斋堂水库和青白口水文站处于永定河支流,斋堂水库控制的流域面积为 353.55 km²,斋堂水库至青白口区间的流域面积为 448.56 km²。雁翅水文站、三家店水文站以及卢沟桥水文站在永定河干流上,其中青白口至雁翅区间的流域面积为 321.02 km²,雁翅至三家店区间为 448.56 km²,而三家店至卢沟桥区间的流域面积为 126.1 km²。该区间的总流域面积为 1 697.79 km²。相关水文站和水系分布如图 1 所示。

1.2 研究数据

构建模型使用的数据包括北京市水文总站提供的基于北京 2000 坐标系下的 DEM 数据,分辨率为 100 m;从世界土壤数据库 HWSD (Harmonized World Soil Database version) 1 : 100 万的土壤栅格数据下载到 0~30 cm 以及 30~100 cm 的土壤类型数据;从美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS) 下载的土地利用类型数据,分辨率为 1 km 的矢量文件;由北京市水文总站提供的雨量站用反距离权重法插值得到的北京市网格降雨数据,分辨率为 500 m。

基于 2000—2023 年期间的 4 场洪水(表 1),采用人工优选法对参数进行率定。

2 模型构建

2.1 Grid-XAJ 模型

Grid-XAJ 模型是以蓄满产流理论为基础的分布式水文模型,包含 3 层蒸散发计算、蓄满产流计算、三水源划分计算以及逐网格的马斯京根汇流计算 4 个模块。模型假设每个计算单元内部的降雨和下垫面空间分布均匀,仅考虑各个特征在栅格间的分布。Grid-XAJ 模型已在全国多处湿润与半湿润地区得到广泛应用。Grid-XAJ 模型的详细介绍参见文献[26]。

2.2 Grid-XAJ-SIDE 模型

Grid-XAJ-SIDE 模型基于 Grid-XAJ 模型增加了超渗产流模块,并利用径流曲线数及地形指数法对初始的蓄满超渗分布进行判定,且在计算过程中实时动态地进行蓄满产流与超渗产流的转换,将不同径流成分逐网格演算到流域出口。Grid-XAJ-SIDE 模型的详细介绍参见文献[26]。

模型的蓄满产流参数包括上层张力蓄水容量 W_{LM} 、下层张力蓄水容量 W_{UM} 、张力水蓄水容量 W_M 、自由水蓄水容量 S_M 、地下径流出流系数 K_C 以及壤中流出流系数 K_I ,每个网格的参数利用土壤和植被等下垫面数据进行估算^[27]。超渗产流参数包括湿润锋处土壤吸力 φ 、饱和水力传导度 K_s 以及土壤总孔隙度 θ_e 、土壤有效孔隙度 θ_s 等,每个网格的参数根据 Rawls 等^[28-30]的研究确定,最大累积下渗量 I_0 较不敏感,在经验取值范围内进行选取。其余参数包括蒸发折算系数 K 、深层蒸散发系数 C 等蒸发参数,地下径流消退系数 C_C 、壤中流消退系数 C_I 、河网蓄水消退系数 C_S 、滞后时间 L_{ag} 和河道径流逐网格马斯京根法演算参数 K_{ech} 与 X_{ech} 、地表径流逐网格马斯京根法演算参数 K_{es} 与 X_{es} 等。新安江模型中常用 GA、SCE-UA、CMA-ES、PSO 等算法进行参数率定^[31],由于分布式模型计算量大、计算时间长,除 θ_e 、 θ_s 等土壤相关参数根据土壤类型和已有研究确定的参数取值范围确定以外,其余参数本文基于人工优选法和降雨径流等资料在经验取值范围内进行率定。

3 模拟结果与分析

3.1 斋堂水库

由于斋堂水库以上区间的流量资料多为经过水库调节后的出库流量,其流量数据不能有效反映斋堂水库以上区间的产汇流特性,故选取“23·7”特大流域性洪水期间 2023072808 号的入库洪水反推流量进行该区间的分析和验证。斋堂水库 2 种模型经人工优选后的参数见表 2。

由表 3 可知,斋堂水库的 Grid-XAJ 模型与 Grid-XAJ-SIDE 模型在径流深相对误差、洪峰流量相对误差、峰现时间误差等关键指标上均表现出较好的模拟精度,验证了这 2 种模型在该区域的适用性。由图 2 可知,Grid-XAJ 模型模拟流量过程与斋堂水库以上区间反推的入库流量(实测流量)过程相比在第 2 个洪峰处流量偏大,Grid-XAJ-SIDE 模型第 2 个洪峰的表现优于 Grid-XAJ 模型,但仍旧略微偏大。洪量方面,在涨洪段

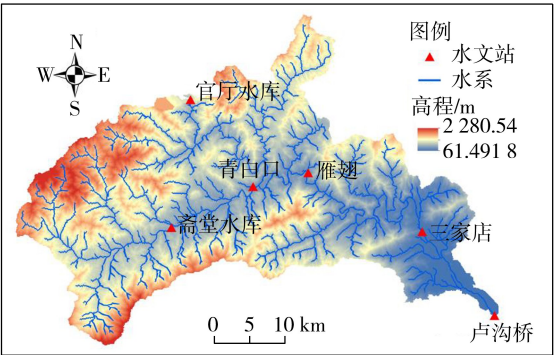


图 1 研究区水文站和水系分布

Fig. 1 Distribution of hydrological stations and water systems in study area

表 1 洪水场次基本信息

Table 1 Flood event information

序号	洪号	开始时间	结束时间
1	2000070308	2000-07-03T8:00	2000-07-05T20:00
2	2016071808	2016-07-18T8:00	2016-07-22T8:00
3	2021071608	2021-07-16T8:00	2021-07-20T8:00
4	2021072108	2021-07-20T8:00	2021-07-21T8:00

处 Grid-XAJ 模型模拟的流量过程与实测较为吻合,Grid-XAJ-SIDE 模型由于加了超渗产流模块,导致前期有部分区域产生超渗地面径流汇至流域出口,但反演入库流量过程并未体现这一现象,表明斋堂水库区间的蓄水滞水能力较好。2 种模型的模拟峰现时间表现出较好的效果,误差均为 1.0 h。在确定性系数方面,Grid-XAJ 模型的确定性系数为 0.50,Grid-XAJ-SIDE 模型的确定性系数为 0.57,表明 Grid-XAJ-SIDE 模型在斋堂水库区间整体拟合效果更好。

表 2 斋堂水库 2 种模型的参数
Table 2 Parameters of the two models in Zhaitang Reservoir

模型	K	C	C_1	C_G	L_{ag}/h	K_{ech}	K_{es}	X_{ech}	X_{es}	α	β	I_0/mm
Grid-XAJ	0.995	0.18	0.9	0.999	0.0	0.000 6	0.01	0.45	0.3	0.00	0.5	
Grid-XAJ-SIDE	0.995	0.18	0.9	0.999	0.0	0.000 6	0.01	0.45	0.3	0.00	0.5	2000

注: α 、 β 为计算分布式河网蓄水消退系数的相关参数。

表 3 斋堂水库 2023072808 号洪水模拟结果对比
Table 3 Comparison of model simulation results for No. 2023072808 flood in Zhaitang Reservoir

模型	径流深/mm		径流深 相对误差/%	洪峰流量/(m^3/s)		洪峰流量 相对误差/%	峰现时间 误差/h	确定性系数
	实测值	模拟值		实测值	模拟值			
Grid-XAJ	12087.07	14049.84	16.24	1170.0	1330.0	13.35	1.0	0.50
Grid-XAJ-SIDE	12087.07	13654.76	12.97	1170.0	1110.0	-5.2	1.0	0.57

斋堂水库区间位于永定河上游支流,流域地形起伏较大,下垫面以山区为主,土壤前期含水量较低,遭遇短时强降雨易导致部分区域出现超渗产流,而部分植被覆盖较好或土壤蓄水能力较强的区域则表现为蓄满产流,形成 2 种产流模式的交替过程。Grid-XAJ-SIDE 模型通过引入超渗产流模块,能够动态捕捉降雨过程中土壤含水量变化及产流模式转换,因此在洪峰流量模拟和整体拟合效果上优于仅基于蓄满产流的 Grid-XAJ 模型。尽管反演的入库流量可能存在偏差,但模型在复杂产流机制下的适应性仍得到了验证,表明上游支流区域需考虑超渗与蓄满产流的共同作用。

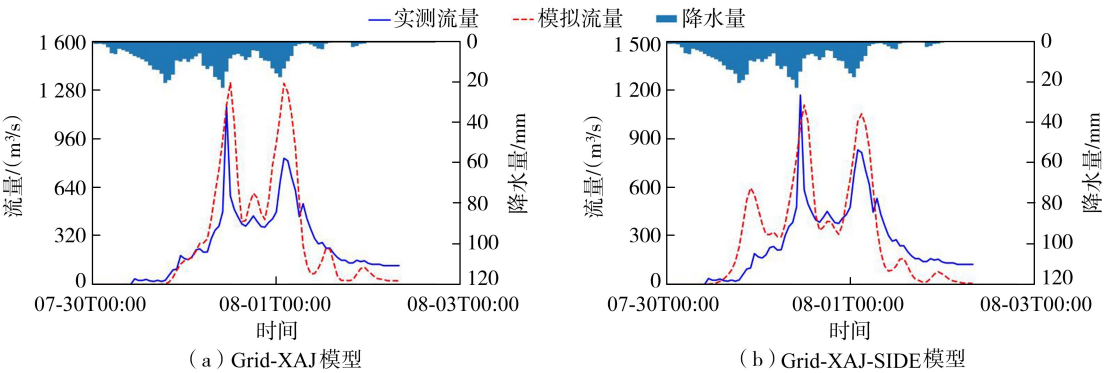


图 2 斋堂水库 2023072808 号洪水过程线
Fig. 2 Hydrograph of No. 2023072808 flood in Zhaitang Reservoir

3.2 青白口

表 4 为基于 2000070308 号、2016071808 号、2021071608 号和 2021072108 号 4 场洪水,采用人工优选法率定得到的青白口 2 种模型的参数。

表 4 青白口 2 种模型的参数
Table 4 Parameters of the two models in Qingbaikou

模型	K	C	C_1	C_G	L_{ag}/h	K_{ech}	K_{es}	X_{ech}	X_{es}	α	β	I_0/mm
Grid-XAJ	0.995	0.18	0.9	0.999	0.0	0.000 6	0.01	0.15	0.3	0.00	0.45	
Grid-XAJ-SIDE	0.995	0.18	0.9	0.999	0.0	0.000 6	0.01	0.15	0.3	0.00	0.45	2000

由表 5 可知,在青白口,Grid-XAJ 模型和 Grid-XAJ-SIDE 模型都能够较好地模拟洪水过程,且径流深相对误差、洪峰流量相对误差、峰现时间误差均较小,但 Grid-XAJ-SIDE 模型在洪峰流量的模拟上优于 Grid-XAJ 模型。Grid-XAJ 模型的确定性系数为 0.91,达到甲级精度。Grid-XAJ-SIDE 模型峰现时间误差与 Grid-XAJ 模型一致,表明两者在峰现时间模拟上具有一致性。Grid-XAJ-SIDE 模型的确定性系数为 0.93,略高于

Grid-XAJ 模型,同样达到甲级精度。

表 5 青白口 2023072808 号洪水模拟结果对比

模型	径流深/mm		径流深 相对误差/%	洪峰流量/(m ³ /s)		洪峰流量 相对误差/%	峰现时间 误差/h	确定性系数
	实测值	模拟值		实测值	模拟值			
Grid-XAJ	31 935.99	34 764.88	8.86	1 180.0	1 220.0	3.23	-2.0	0.91
Grid-XAJ-SIDE	31 935.99	34 613.86	8.39	1 180.0	1 170.0	-0.97	-2.0	0.93

由图 3 和表 5 可知,青白口 Grid-XAJ-SIDE 模型与 Grid-XAJ 模型模拟均达甲级精度,且前者在洪峰流量模拟上更优,可能是由于青白口地处山区向平原过渡带,降水分布不均且历时较长,导致产流过程兼具蓄满和超渗特征。

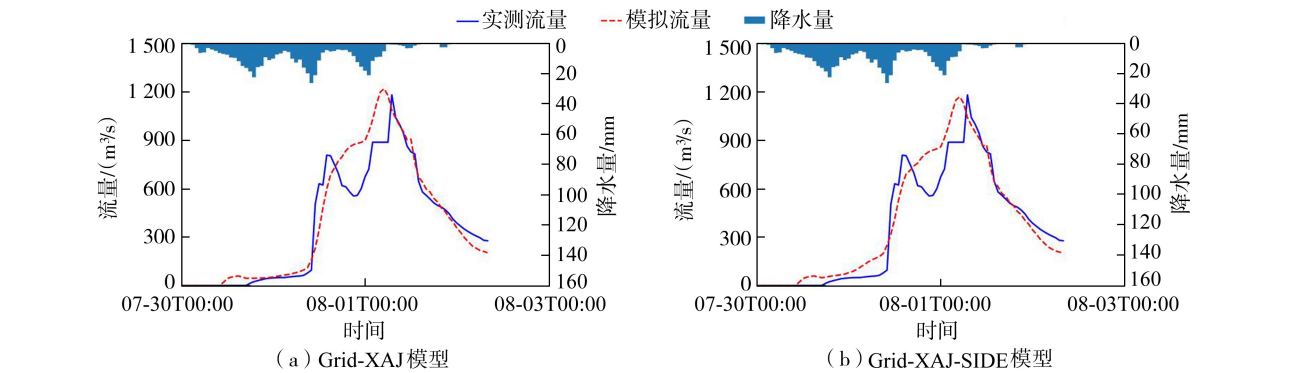


图 3 青白口 2023072808 号洪水过程线

Fig. 3 Hydrograph of No. 2023072808 flood in Qingbaikou

3.3 雁翅

基于 2000070308 号、2016071808 号、2021071608 号和 2021072108 号 4 场洪水,采用人工优选法率定的雁翅 2 种模型参数见表 6。

表 6 雁翅 2 种模型的参数

模型	K	C	C_1	C_G	L_{ag}/h	K_{ech}	K_{es}	X_{ech}	X_{es}	α	β	I_0/mm
Grid-XAJ	0.995	0.18	0.9	0.999	0.0	0.006	0.011	0.15	0.3	0.014	0.6	
Grid-XAJ-SIDE	0.990	0.18	0.9	0.999	0.0	0.006	0.011	0.15	0.3	0.014	0.6	2000

由表 7 可知,Grid-XAJ 模型和 Grid-XAJ-SIDE 模型在雁翅的径流深、洪峰流量、峰现时间的误差均在合理范围内。径流深方面,Grid-XAJ-SIDE 模型表现较好,但 Grid-XAJ 模型的洪峰流量表现更好。此外,两个模型在峰现时间的预测上均表现良好。Grid-XAJ 模型的峰现时间误差小于 Grid-XAJ-SIDE 模型。确定性系数方面,Grid-XAJ 模型的确定性系数为 0.88,优于 Grid-XAJ-SIDE 模型的 0.80,但 2 种模型均达到乙级精度。

表 7 雁翅 2023072808 号洪水模拟结果对比

模型	径流深/mm		径流深 相对误差/%	洪峰流量/(m ³ /s)		洪峰流量 相对误差/%	峰现时间 误差/h	确定性系数
	实测值	模拟值		实测值	模拟值			
Grid-XAJ	23 879.95	21 114.6	-11.58	1 710.0	1 610.0	-5.88	0.0	0.88
Grid-XAJ-SIDE	23 879.95	25 719.96	7.71	1 710.0	1 570.0	-8.45	-1.0	0.80

结合图 4 和表 7,雁翅位于永定河干流中游,地形相对平缓,“23·7”暴雨的长时间持续降雨使流域迅速达到饱和状态,以蓄满产流为主导。Grid-XAJ 模型在洪峰流量、峰现时间以及确定性系数的表现上更贴近实测值,表明干流中游区域产流机制相对单一,基于蓄满产流的 Grid-XAJ 模型已能满足高精度模拟需求。

3.4 三家店

基于 2000070308 号、2016071808 号、2021071608 号和 2021072108 号 4 场洪水,采用人工优选法率定的三家店 2 种模型参数见表 8。

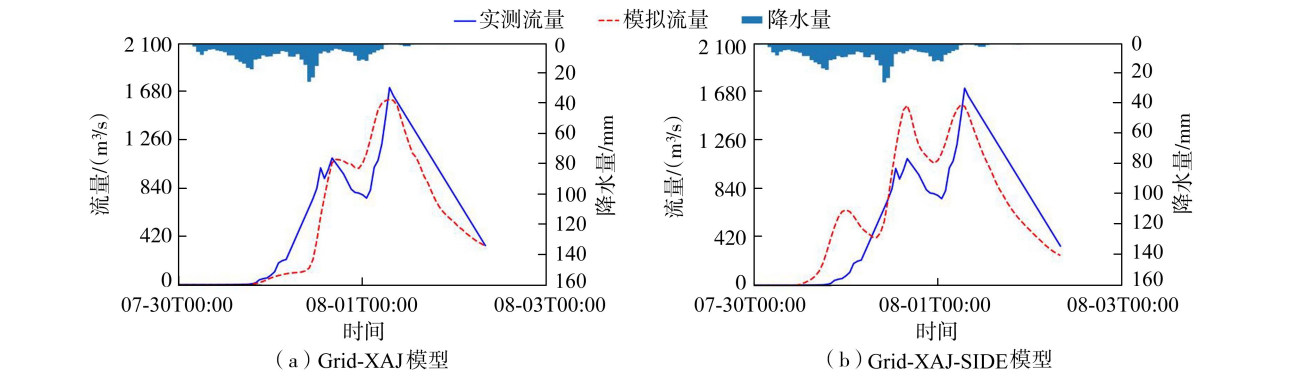


图 4 雁翅 2023072808 号洪水过程线

Fig. 4 Hydrograph of No. 2023072808 flood in Yanchi

表 8 三家店 2 种模型的参数

Table 8 Parameters of the two models in Sanjiadian												
模型	K	C	C_1	C_G	L_{ag}/h	K_{ech}	K_{es}	X_{ech}	X_{es}	α	β	I_0/mm
Grid-XAJ	0.998	0.18	0.9	0.99	0.0	0.006	0.01	0.45	0.4	0.00	0.25	
Grid-XAJ-SIDE	0.998	0.18	0.9	0.99	0.0	0.006	0.01	0.45	0.4	0.00	0.25	2000

由表 9 可知,在三家店,Grid-XAJ 模型和 Grid-XAJ-SIDE 模型模拟的径流深、洪峰流量、峰现时间均表现出较高的精度,其中峰现时间的预测上均表现出较高的准确性,误差均为 0 h。Grid-XAJ 模型的确定性系数为 0.87,略高于 Grid-XAJ-SIDE 模型的 0.82,均达到乙级精度。

表 9 三家店 2023072808 号洪水模拟结果对比

Table 9 Comparison of model simulation results for No. 2023072808 flood in Sanjiadian								
模型	径流深/mm		径流深 相对误差/%	洪峰流量/(m^3/s)		洪峰流量 相对误差/%	峰现时间 误差/h	确定性系数
	实测值	模拟值		实测值	模拟值			
Grid-XAJ	37916.99	44799.75	18.15	2500.0	2420.0	-3.38	0.0	0.87
Grid-XAJ-SIDE	37916.99	44576.47	17.56	2500.0	2730.0	9.03	0.0	0.82

由表 9 和图 5 可知,三家店 Grid-XAJ 模型在洪峰流量模拟和确定性系数上表现更优,表明三家店作为干流重要控制断面,承接上游大量来水,流域调蓄能力强,流域产流过程以蓄满产流为主,与下游河道的水文特征相匹配。

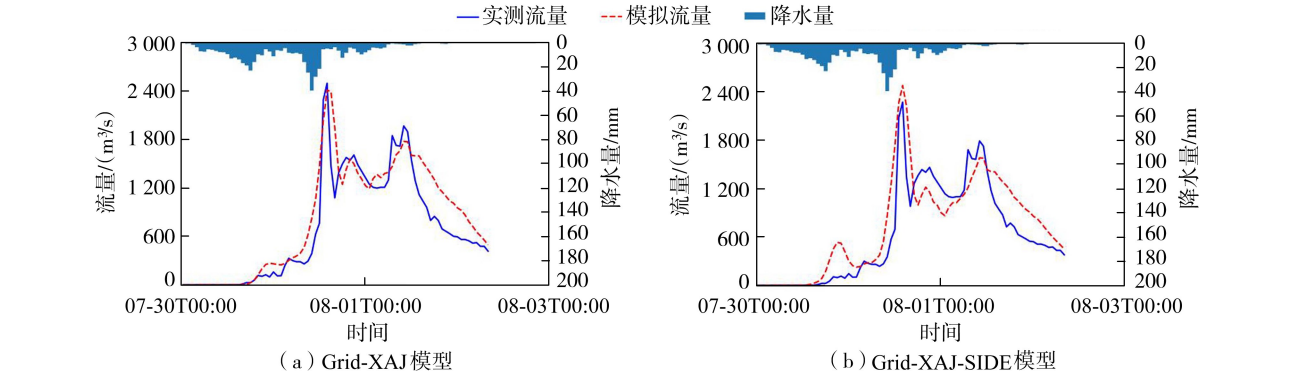


图 5 三家店 2023072808 号洪水过程线

Fig. 5 Hydrograph of No. 2023072808 flood in Sanjiadian

3.5 卢沟桥

基于 2000070308 号、2016071808 号、2021071608 号和 2021072108 号 4 场洪水,经人工优选后的卢沟桥 2 种模型参数见表 10。

由表 11 可知,卢沟桥 Grid-XAJ 模型和 Grid-XAJ-SIDE 模型表现较为良好,在 4 个指标上两模型相差不大,其中峰现时间的预测上均表现出较高的准确性,误差均为 0.0 h,表明两模型对洪水峰值时间的预测非常精确。Grid-XAJ 模型的确定性系数为 0.80,高于 Grid-XAJ-SIDE 模型的 0.73,均达到乙级精度。

表 10 卢沟桥 2 种模型的参数

Table 10 Parameters of the two models in Lugou Bridge

模型	K	C	C_1	C_G	L_{ag}/h	K_{ech}	K_{es}	X_{ech}	X_{es}	α	β	I_0/mm
Grid-XAJ	0.98	0.18	0.9	0.998	2.0	0.000 03	0.000 1	0.45	0.4	0.00	0.00	
Grid-XAJ-SIDE	0.98	0.18	0.9	0.998	2.0	0.000 03	0.000 1	0.45	0.4	0.00	0.00	2000

表 11 卢沟桥 2023072808 号洪水模拟结果对比

Table 11 Comparison of model simulation results for No. 2023072808 flood in Lugou Bridge

模型	径流深/mm		径流深 相对误差/%	洪峰流量/(m^3/s)		洪峰流量 相对误差/%	峰现时间 误差/h	确定性系数
	实测值	模拟值		实测值	模拟值			
Grid-XAJ	119 458.4	143 310.02	19.97	3 710.0	3 010.0	-18.95	0.0	0.80
Grid-XAJ-SIDE	119 458.4	143 344.31	19.99	3 710.0	2 980.0	-19.7	0.0	0.73

由图 6 可知,Grid-XAJ 模型与 Grid-XAJ-SIDE 模型在卢沟桥的模拟均表现优秀,Grid-XAJ 模型的模拟精度更高,这是由于“23·7”特大暴雨期间,三家店至卢沟桥区间承接了长时间的降雨,流域很快达到蓄满状态。

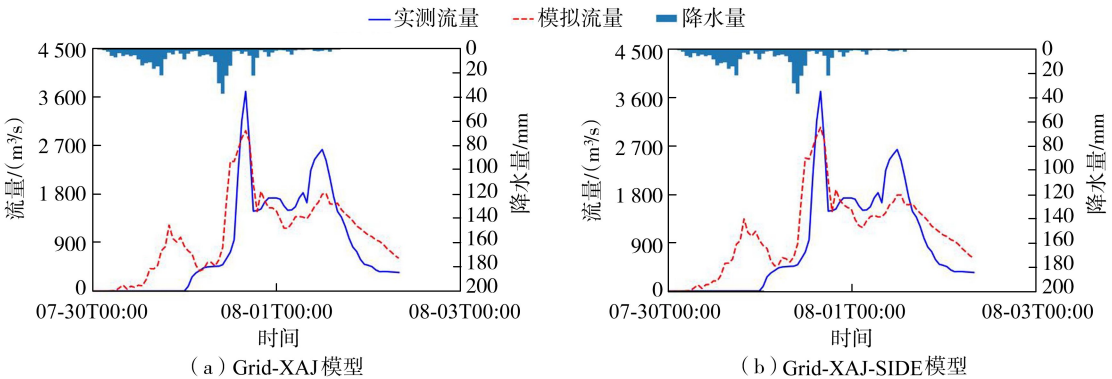


图 6 卢沟桥 2023072808 号洪水过程线

Fig. 6 Hydrograph of No. 2023072808 flood in Lugou Bridge

4 结 论

- a. Grid-XAJ 模型和 Grid-XAJ-SIDE 模型对永定河流域“23·7”特大流域性洪水过程具有较好的模拟能力,两种模型在雁翅、三家店和卢沟桥均达乙级精度,在青白口达到甲级精度,能够准确捕捉洪水过程。
- b. 在永定河流域上游支流的斋堂水库与青白口 Grid-XAJ-SIDE 模型表现得更好,在永定河流域干流下游的雁翅、三家店与卢沟桥 Grid-XAJ 模型表现更好,表明在本次“23·7”特大流域性洪水中干流下游区域很快达到蓄满状态,而上游支流区域的水文过程主要表现为蓄满产流与超渗产流交替出现的特点。

参考文献:

[1] 李致家,张珂,王栋,等. 现代水文模拟与预报技术[M]. 2 版. 南京:河海大学出版社,2021.

[2] 舒章康,李文鑫,张建业,等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势[J]. 中国工程科学,2022,24(5):116-125. (SHU Zhangkang,LI Wenxin,ZHANG Jianyun,et al. Historical changes and future trends of extreme precipitation and high temperature in China[J]. Strategic Study of CAE,2022,24(5):116-125. (in Chinese))

[3] 张力,赵自阳,王红瑞,等. 气候变化下水文模拟不确定性若干问题讨论[J]. 水资源保护,2023,39(1):109-118. (ZHANG Li,ZHAO Ziyang,WANG Hongrui,et al. Discussion on several issues of uncertainty in hydrological simulation under climate change[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):109-118. (in Chinese))

[4] 杨涛,陆桂华,李会会,等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J]. 水科学进展,2011,22(2):279-286. (YANG Tao,LU Guihua,LI Huihui,et al. Advances in the study of projection of climate change impacts on hydrological extremes[J]. Advances in Water Science,2011,22(2):279-286. (in Chinese))

[5] 杨舒楠,张芳华,胡艺,等. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J]. 暴雨灾害,2023,42(5):508-520. (YANG Shunan,ZHANG Fanghua,HU Yi,et al. Analysis on the characteristics and causes of the “23·7” torrential rainfall event in North China[J]. Torrential Rain and Disasters,2023,42(5):508-520. (in Chinese))

[6] 赵小伟,王材源,王亚娟,等. 北京市海河“23·7”流域性特大洪水调查评价[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2024,60(5):632-640. (ZHAO Xiaowei, WANG Caiyuan, WANG Yajuan, et al. Investigation and evaluation of Beijing Haihe Basin “23·7” extraordinary flood[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2024, 60(5): 632-640. (in Chinese))

[7] 李修仓,张颖娴,李威,等. “23·7”京津冀暴雨极端性特征及对我国城市防汛的启示[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(11):13-18. (LI Xiucang, ZHANG Yingxian, LI Wei, et al. Extreme characteristics of “23·7” heavy rain in Beijing-Tianjin-Hebei and its implications for urban flood control in China[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(11): 13-18. (in Chinese))

[8] 符娇兰,权婉晴,麦子,等. “23·7”华北特大暴雨过程雨强精细化特征及动力和热力条件初探[J]. 气象,2023,49(12):1435-1450. (FU Jiaolan, QUAN Wanqing, MAI Zi, et al. Preliminary study on the refined characteristics of rainfall intensity and dynamic and thermodynamic conditions in the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteorological Monthly, 2023, 49(12): 1435-1450. (in Chinese))

[9] 张玉洁,刘军梅,张建涛,等. 永定河流域“23·7”降雨时空分布特征[J]. 北京水务,2025(1):42-48. (ZHANG Yujie, LIU Junmei, ZHANG Jiantao, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rainfall in Yongding River Basin in the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood[J]. Beijing Water, 2025(1): 42-48. (in Chinese))

[10] 刘家宏,梅超,王佳,等. 北京市门头沟流域“23·7”特大暴雨洪水过程分析[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(9):50-55. (LIU Jiahong, MEI Chao, WANG Jia, et al. Flood survey of “23·7” heavy rain in Mentougou Watershed of Beijing[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(9): 50-55. (in Chinese))

[11] 李致家,张心愿,白云鹏,等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):13-19. (LI Zhijia, ZHANG Xinyuan, BAI Yunpeng, et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 13-19. (in Chinese))

[12] 程刚,齐兵,张熠楠. 海河“23·7”洪水期间廊坊地下水位分析[J]. 地下水,2024,46(5):80-84. (CHENG Gang, QI Bing, ZHANG Yinan. Analysis of groundwater level in Langfang during Haihe “23·7” flood[J]. Ground Water, 2024, 46(5): 80-84. (in Chinese))

[13] 刘波,金松,宋占春. 斋堂水库防抗“23·7”洪水的实践与思考[J]. 水利建设与管理,2025,45(3):83-86. (LIU Bo, JIN Song, SONG Zhanchun. Practice and reflection on the defense against the “23·7” flood of Zhaitang Reservoir[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2025, 45(3): 83-86. (in Chinese))

[14] 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))

[15] 崔璨,董增川,罗赞,等. 基于水文水动力模型的洪泽湖汛末蓄水策略智能优化设计[J]. 水资源保护,2023,39(4):143-151. (CUI Can, DONG Zengchuan, LUO Yun, et al. Intelligent optimization design of water storage strategy for post-flood period of Hongze Lake based on hydrological-hydrodynamic model[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 143-151. (in Chinese))

[16] 杜若愚,姚成,刘玉环,等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):25-32. (DU Ruoyu, YAO Cheng, LIU Yuhuan, et al. Grid-Xin’ anjiang model based on spatio-temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(6): 25-32. (in Chinese))

[17] 赵人俊. 流域水文模拟:新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社,1984.

[18] 黄鹏年,李致家,姚成,等. 半干旱半湿润流域水文模型应用与比较[J]. 水力发电学报,2013,32(4):4-9. (HUANG Pengnian, LI Zhijia, YAO Cheng, et al. Application and comparison of hydrological models for semi-arid and semi-humid regions [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4): 4-9. (in Chinese))

[19] 李致家,黄鹏年,姚成,等. 灵活架构水文模型在不同产流区的应用[J]. 水科学进展,2014,25(1):28-35. (LI Zhijia, HUANG Pengnian, YAO Cheng, et al. Application of flexible-structure hydrological models in different runoff generation regions [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 28-35. (in Chinese))

[20] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护,2021,37(1):28-35. (ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China’s semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 28-35. (in Chinese))

[21] PILGRIM D H, CHAPMAN T G, DORAN D G. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions [J]. Hydrological Sciences Journal, 1988, 33(4): 379-400.

2019,34(1):93-102. (CHANG Haiqin, FU Yalong, LIN Xin, et al. Spatial distribution and controlling factors of chemical weathering intensity in drainage basins: a case study in the Yangtze River Basin and Pearl River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(1): 93-102. (in Chinese))

[42] LI Yuting, CLIFT P D, MURRAY R W, et al. Asian summer monsoon influence on chemical weathering and sediment provenance determined by clay mineral analysis from the Indus Submarine Canyon[J]. Quaternary Research, 2020, 93: 23-39.

[43] LIU Zhifei, COLIN C, HUANG Wei, et al. Climatic and tectonic controls on weathering in South China and Indochina Peninsula: clay mineralogical and geochemical investigations from the Pearl, Red, and Mekong drainage basins [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2007, 8(5): Q05005.

[44] SEGALL M P, KUEHL S A. Sedimentary processes on the Bengal continental shelf as revealed by clay-size mineralogy [J]. Continental Shelf Research, 1992, 12(4): 517-541.

[45] 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中黏土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(4): 336-346. (YANG Zuosheng. Mineralogical assemblages and chemical characteristics of clays from sediments of the Huanghe, Changjiang, Zhujiang Rivers and their relationship to the climate environment in their sediment source areas [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1988, 19(4): 336-346. (in Chinese))

[46] HE Mengying, ZHENG Hongbo, HUANG Xiangtong, et al. Yangtze River sediments from source to sink traced with clay mineralogy [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 69: 60-69.

[47] KHAN M H R, LIU Jianguo, LIU Shengfa, et al. Clay mineral compositions in surface sediments of the Ganges-Brahmaputra-Meghna river system of Bengal Basin, Bangladesh [J]. Marine Geology, 2019, 412: 27-36.

[48] HEROY D C, KUEHL S A, GOODBRED JR S L. Mineralogy of the ganges and brahmaputra rivers; implications for river switching and Late Quaternary climate change [J]. Sedimentary Geology, 2003, 155(3/4): 343-359.

[49] LI Chuanshun, SHI Xuefa, KAO S, et al. Clay mineral composition and their sources for the fluvial sediments of Taiwanese rivers [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(6): 673-681.

(收稿日期: 2024 - 11 - 13 编辑: 刘晓艳)

(上接第 17 页)

[22] 徐杰, 李致家, 霍文博, 等. 半湿润流域洪水预报实时校正方法比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 317-322. (XU Jie, LI Zhijia, HUO Wenbo, et al. Comparison of real-time correction methods of flood forecasting in semi-humid watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 317-322. (in Chinese))

[23] 李致家, 孔祥光, 张初旺. 对新安江模型的改进[J]. 水文, 1998(4): 19-23. (LI Zhijia, KONG Xiangguang, ZHANG Chuwang. Improving Xin'anjiang model [J]. Journal of China Hydrology, 1998(4): 19-23. (in Chinese))

[24] 李致家, 黄鹏年, 张永平, 等. 半湿润流域蓄满超渗空间组合模型研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(10): 1-6. (LI Zhijia, HUANG Pengnian, ZHANG Yongping, et al. Study on spatial combination model of infiltration-excess and saturation-excess runoff in semi-humid watersheds [J]. Yellow River, 2015, 37(10): 1-6. (in Chinese))

[25] LIU Yuhuan, ZHANG Ke, LI Zhijia, et al. A hybrid runoff generation modelling framework based on spatial combination of three runoff generation schemes for semi-humid and semi-arid watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125440.

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

[27] 姚成, 纪益秋, 李致家, 等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 42-47. (YAO Cheng, JI Yiqiu, LI Zhijia, et al. Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1): 42-47. (in Chinese))

[28] RAWLS W J, BRAKENSIEK D L, MILLER N. Green-Ampt infiltration parameters from soils data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(1): 62-70.

[29] CARSEL R F, PARRISH R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics [J]. Water Resources Research, 1988, 24(5): 755-769.

[30] ANDERSON R M, KOREN V I, REED S M. Using SSURGO data to improve Sacramento Model a priori parameter estimates [J]. Journal of Hydrology, 2006, 320(1/2): 103-116.

[31] 石朋, 陆美霞, 吴洪石, 等. 不同优化算法在新安江模型参数率定中的效果评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 19-25. (SHI Peng, LU Meixia, WU Hongshi, et al. Evaluation of different optimization algorithms in parameter calibration of Xin'anjiang model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 19-25. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 01 - 21 编辑: 刘晓艳)