

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.05.002

海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟

李致家¹,张心愿¹,白云鹏²,黄鹏年^{3,4}

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 河北省水文勘测研究中心,河北 石家庄 050031;
3. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院,江苏 南京 210044;
4. 水利部水文气象灾害机理与预警重点实验室,江苏 南京 210044)

摘要: 为支撑海河流域特大洪水的决策及预报预警工作,基于实测降水与流量资料,采用新安江-海河模型对海河流域 2023 年 7 月发生特大洪水的大清河 2 个典型小流域——紫荆关流域和漫水河流域进行了洪水模拟,并选取紫荆关流域 1996—2020 年 5 场洪水、漫水河流域 1953—2016 年 8 场洪水进行了参数率定,选取海河“23·7”流域性特大洪水进行了验证。结果表明:新安江-海河模型对“23·7”流域性特大洪水的模拟精度较高,可反映实际洪水过程,两个小流域洪峰、洪量模拟的相对误差均在 20% 以内,峰现时间误差均为 0 h;相较于受人类活动影响小的紫荆关流域,在受人类活动影响更大的漫水河流域,新安江-海河模型的模拟效果较新安江模型的模拟效果提升更为明显。

关键词: 海河“23·7”流域性特大洪水;极端降水;洪水预报;新安江-海河模型;水文模型

中图分类号:P338

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2024)05-0013-07

Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood

LI Zhijia¹, ZHANG Xinyuan¹, BAI Yunpeng², HUANG Pengnian^{3,4}

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

2. Research Center of Hydrological Survey of Hebei, Shijiazhuang 050031, China;

3. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

4. Key Laboratory of Hydrometeorological Disaster Mechanism and Warning of Ministry of Water Resources,

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To support the decision-making and forecasting work for the catastrophic flood in the Haihe River Basin, the Zijingguan and Manshuihe sub-basins, located in the Daqing River where a catastrophic flood occurred in July 2023, were selected for the flood simulation and prediction with the Xin'anjiang-Haihe model based on measured rainfall and discharge data. For the Zijingguan sub-basin, 5 floods from 1996 to 2020 were chosen for the parameter calibration, while for the Manshuihe sub-basin, 8 floods from 1953 to 2016 were used. The simulation was validated against the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood event. The results showed that the relative errors of peak discharge and flood volume in both sub-basins were within 20%, with a peak timing error of 0 hours. The high accuracy of the hydrological model constructed in this study, along with the good agreement between simulation and measured results, demonstrates its ability to reflect the actual flood process. A comparison between different models revealed that the Xin'anjiang-Haihe model performed better in the Manshuihe sub-basin, which is more affected by human activities, compared to the Zijingguan sub-basin with lesser human influence.

Key words: Haihe “23·7” basin-wide extreme flood; extreme precipitation; flood forecasting; Xin'anjiang-Haihe model; hydrological model

受全球气候变暖影响,近年来极端降水事件在我国频繁发生^[1],如 2012 年北京“7·21”特大暴雨^[2]、2016 年 7 月 19—20 日华北极端强降水^[3]、2021 年郑州“7·20”特大暴雨^[4],造成了严重的洪涝、山体滑坡、城市内涝等次生灾害^[5-6],严重威胁城市交通安全和人民生命财产安全。国内外学者围绕极端天气引发洪涝

基金项目:国家自然科学基金项目(52079035);河北省水利厅科技项目(2022-40)

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

通信作者:张心愿(2000—),女,硕士研究生,主要从事流域水文模拟与洪水预报研究。E-mail:xinyuan@hhu.edu.cn

引用本文: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.

灾害模拟复盘和致灾机理开展了大量研究^[7-10],主要采用水文模型计算洪峰流量或采用水动力模型计算淹没水深^[11]进行灾害复盘模拟。

学者们在半湿润半干旱地区进行了大量的水文模拟研究^[12-14],提出了基于网格的蓄满超渗空间组合模型(Grid-XAJ-SATIN)^[15-16]、新安江-海河模型^[17]、河北雨洪模型^[18]等。刘玉环等^[19]对半湿润半干旱流域进行空间组合模型研究,利用CN-地形指数法将流域划分为超渗主导子流域和蓄满主导子流域,将新安江模型、新安江-Green-Ampt模型和Green-Ampt模型相结合,基于子流域分类,构建空间组合模型;除空间组合模型外,学者们还提出了空间灵活架构的建模方法,构建了FUSE^[20]、SCCM^[21]、FARM^[22]等灵活架构模型,并围绕半湿润半干旱地区WRF-Hydro模型的应用^[23-24]、HEC-HMS模型的改进^[25]等方面进行了大量研究,其中新安江-海河模型被广泛应用于海河流域的水文模拟研究中,并取得了很好的效果^[26]。

2023年7月28日至8月2日,在台风“杜苏芮”残涡北上受阻停滞的环流背景下,台风“杜苏芮”和台风“卡努”提供持续充沛的水汽和能量,高空辐散与低层辐合提供稳定而强大的天气尺度动力条件^[27],使得海河流域出现极端暴雨事件,累计降水量大,累计面降水量155.3mm,单站过程累计降水量超过1000mm;特大暴雨覆盖范围广,北京西部、河北中部和西南部等多地出现特大暴雨;降水持续时间长,极端性突出,京津冀地区降水时间、单站累计降水量等均为“63·8”特大暴雨以来最大值^[28]。该场特大暴雨导致海河流域发生1963年以来最大场次洪水,22条河流发生超警以上洪水,8条河流发生有实测记录以来最大洪水,其中,大石河、拒马河两河断面洪量分别相当于2012年“7·21”强降雨的9倍和4倍^[29]。海河流域多地出现公路受损、断电、通信中断、房屋倒塌等情况,超过100万人受灾,造成了重大的人员伤亡和财产损失,经水利部综合分析研判,2023年海河流域子牙河发生大洪水,大清河、永定河发生特大洪水。依据中华人民共和国水利部印发的《全国流域洪水划分规定(试行)》,本次洪水为流域性特大洪水,并命名为海河“23·7”流域性特大洪水。

关于本次流域性特大洪水,已有研究主要围绕蓄滞洪区运用^[30]开展,如基于水动力模型进行东淀蓄滞洪区^[31]和共渠西蓄滞洪区^[32]的洪水演进模拟工作、运用卫星遥感监测蓄滞洪区洪水淹没全过程^[33]以及基于洪水动态风险分析模拟兰沟洼蓄滞洪区的运用过程^[34]等。本文基于新安江-海河模型对海河“23·7”流域性特大洪水进行复盘模拟,利用实测水文气象资料,选取位于大清河流域的2个典型流域——紫荆关流域和漫水河流域开展洪水模拟工作,以期为极端降水引发洪涝灾害的预报预警工作提供重要技术和决策支撑。

1 新安江-海河模型

1.1 模型介绍

新安江-海河模型是针对海河流域山丘区产汇流特点,在新安江模型的基础上,构建起来的具有较强物理意义、能够反映人类活动影响的概念性水文模型^[17]。新安江-海河模型考虑了下垫面变化如流域内地表水利工程建设与地下水开采等人类活动的影响,增加了描述地表水利工程的拦蓄模块和描述地下水开采对径流削减作用的地下拦蓄模块。地表拦蓄水库与地表径流为串联关系;地下拦蓄水库与地表径流、壤中流及地下径流为并联关系,分水源后地表、壤中与地下径流以一个比例因子进入地下拦蓄水库。新安江-海河模型结构如图1所示,图中 E 为流域地面蒸散发量; E_U 、 E_L 、 E_D 分别为上层、下层、深层地面蒸散发量; P 为流域实测降水量; E_M 为流域实测水面蒸发量; B 为张力水蓄水容量分布曲线指数; W_M 为流域平均张力水蓄水容量; I_M 为不透水面积比例; R 为透水面积产流; R_B 为不透水面积产流; F_R 为产流面积比例; W 为张力水含水量; W_U 、 W_L 、 W_D 分别为上层、下层、深层土壤张力水含水量; S 为表层自由水量; S_M 为自由水蓄水容量; E_X 为自由水蓄水容量分布曲线指数; R_S 、 R_1 、 R_C 分别为地表径流、壤中流、地下径流; R_{VM} 为地表水库拦蓄库容; K_1 、 K_C 为壤中流出流系数和地下水出流系数; S_0 为自由水蓄水深; E_F 为地下水库补给比例系数; R_{RD0} 为地下水库拦蓄库容; C_1 、 C_C 分别为壤中流消退系数和地下水消退系数; Q_S 、 Q_1 、 Q_C 分别为地面总入流、壤中总入流、地下总入流; C_S 为河网水流消退系数; L 为河网汇流滞时; X 、 k 、 n 为马斯京根法参数; T_Q 为流域总出流。

1.2 参数率定方法

采用SCE-UA自动优化算法与人工优选法相结合进行新安江-海河模型的参数率定。根据已有的应用经验,一般认为上层张力水蓄水容量 W_{UM} 、下层张力水蓄水容量 W_{LM} 、深层散发系数 C 、 I_M 、 C_1 为不敏感参数,根据流域实际情况确定 I_M 等参数; W_M 与 B 有关,根据其物理概念, W_M 为100~200mm,则 B 为0.1~0.4,都

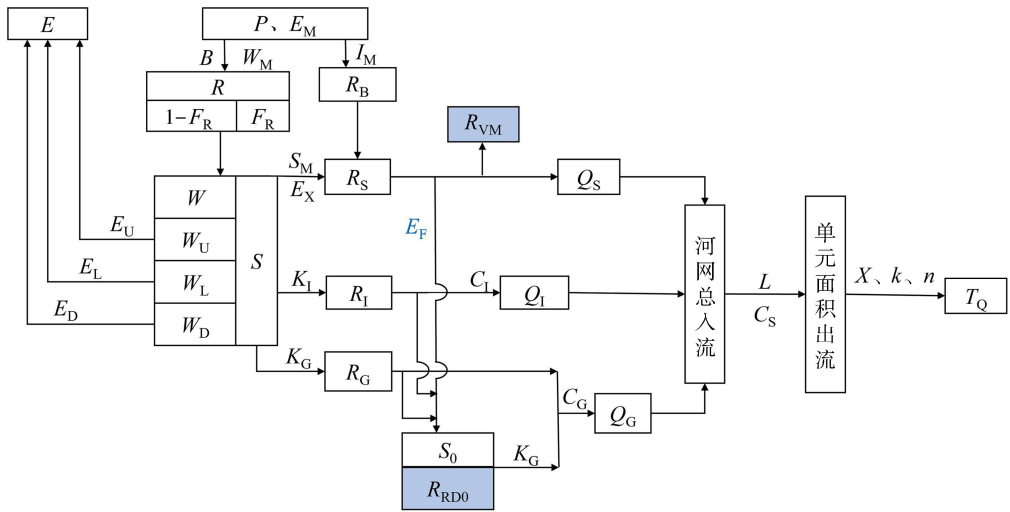


图 1 新安江-海河模型结构

Fig. 1 Structure of the Xin'anjiang-Haihe model

不敏感; S_M 与 E_X 有关, E_X 变化不大,可取定值 1.5; C_G 可根据枯季退水资料直接求得。由于采用了蓄满产流概念,剩余参数率定可按照蒸发、产流、分水源、汇流的顺序进行率定,各类参数间基本相互独立。

新安江-海河模型参数的率定步骤如下:①确定各参数的初值;②采用日模型优化蒸发折算系数 K 、 W_M ;③采用日模型优化 S_M 与 K_G ,采用结构性约束 $K_C+K_I=0.7$;④采用次洪模型优化 L 、 C_S 、 E_F 。

1.3 精度评定

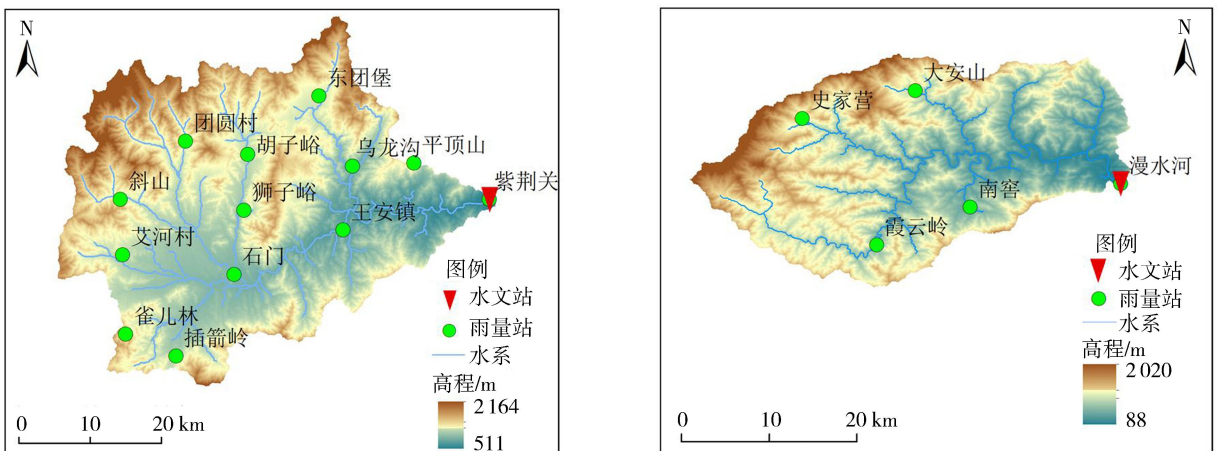
参考 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,选择 4 种评价指标:径流深相对误差,以实测值的 20% 作为许可误差,当该值大于 20 mm 时取 20 mm,当小于 3 mm 时取 3 mm;洪峰相对误差,以实测洪峰的 20% 作为许可误差判定预报洪峰是否合格;峰现时间误差,以 3 h 作为许可误差;确定性系数,用来评价洪水实测过程与预报过程之间的拟合程度,越接近 1,说明模拟的效果越好。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

海河流域位于 $35^{\circ}\text{N} \sim 43^{\circ}\text{N}$ 、 $112^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$,流域总面积为 32 万 km^2 ,属于半湿润半干旱的温带东亚季风气候区,流域年平均气温 $1.5 \sim 14^{\circ}\text{C}$,年平均相对湿度 50% ~ 70%;年平均降水量 539 mm。

紫荆关位于大清河流域北支拒马河上游,流域控制面积为 1 760 km^2 ,主河道长 81.5 km,流域多年平均降水量约 650 mm,属于半湿润区,土壤类型主要为砂砾土和砂壤土,流域内有 13 个雨量站,1 个水文站(图 2(a))。



(a) 紫荆关流域

(b) 漫水河流域

图 2 研究区概况

Fig. 2 Overview of study basin

漫水河位于大清河流域北支拒马河支流大石河上游,流域控制面积约 653 km²,主河道长 77 km,流域多年平均降水量约 650 mm,属于半湿润区,土壤类型主要为壤土,流域内有 5 个雨量站,1 个水文站(图 2(b))。

2.2 研究数据

本文所需下垫面数据为数字高程地图(DEM)和土地利用类型数据。DEM 数据从地理空间数据云网站下载,选择 GDEM V2 DEM 数字高程数据产品,分辨率为 30 m,土地利用类型数据从美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)网站下载。

研究流域日雨量资料来源于艾河村、雀儿林等 18 个雨量站逐日降水量表,时段雨量资料来源于 18 个雨量站降水量摘录表;蒸发资料来源于安各庄站和漫水河站逐日水面蒸发量表;实测日流量资料来源于紫荆关、漫水河水文站逐日平均流量表,时段流量资料采用紫荆关、漫水河水文站洪水水文要素摘录表。

3 结果与分析

3.1 历史洪水率定

依据实测降雨过程及实测径流序列,分别选取紫荆关流域 1996—2020 年 5 场洪水、漫水河流域 1953—2016 年 8 场洪水进行参数率定。洪水场次选取包括大、中、小洪水,选取具有合理性和代表性,具体情况见表 1。

表 1 洪水场次选取情况
Table 1 Floods selection table

流域	序号	洪号	开始时间	结束时间	洪峰流量/(m ³ /s)
紫荆关	1	19960731	1996-07-31T23:00	1996-08-17T01:00	739.3
	2	20000704	2000-07-04T08:00	2000-07-09T03:00	265.6
	3	20040810	2004-08-10T20:00	2004-08-21T07:00	162.6
	4	20120721	2012-07-21T05:00	2012-08-11T08:00	2156.3
	5	20200717	2020-07-17T15:00	2020-07-25T20:00	161.3
漫水河	1	19530823	1953-08-23T20:00	1953-08-31T01:00	385.00
	2	19540803	1954-08-03T08:00	1954-08-07T12:00	738.00
	3	19580709	1958-07-09T12:00	1958-07-20T01:00	421.00
	4	19580806	1958-08-06T20:00	1958-08-12T16:00	363.00
	5	19640812	1964-08-12T02:00	1964-08-14T20:00	426.00
	6	19730813	1973-08-13T20:00	1973-08-17T01:00	157.83
	7	20120721	2012-07-21T06:00	2012-07-22T20:00	1090.00
	8	20160718	2016-07-18T22:00	2016-07-22T01:00	1450.00

参数率定结果见表 2,漫水河流域的 I_M 、 R_{VM} 和 E_F 明显高于紫荆关流域。不透水面积比例反映流域的城市化程度,地表水库拦蓄库容和地下水库补给比例系数等反映流域内水利工程的拦蓄作用和地下水开采对径流的削减作用,这几个参数综合反映了人类活动的影响,因此漫水河流域受人类活动影响的程度明显高于紫荆关流域,这与实际情况相符。

表 2 参数率定结果
Table 2 Parameter calibration results

流域	K	B	C	W_M /mm	W_{UM} /mm	W_{LM} /mm	I_M	S_M /mm	E_X	K_C
紫荆关	1	0.3	0.08	180	20	90	0.01	30	1.3	0.45
漫水河	1	0.3	0.12	180	20	90	0.53	20.4	1.2	0.42
流域	K_I	C_C	C_I	C_S	L/h	X	R_{VM} /mm	E_F	R_{RDO} /mm	
紫荆关	0.25	0.99	0.96	0.02	0	0.35	10	0.01	10	
漫水河	0.28	0.96	0.55	0.12	0	0.35	34.4	0.38	10	

率定期模拟结果见表 3。紫荆关流域率定期的洪量和洪峰模拟相对误差均在 20% 以内;漫水河流域仅有一场洪水的洪量模拟相对误差超过 20%,其余场次的洪量和全部场次的洪峰相对误差均在 20% 以内。从确定性系数来看,紫荆关流域率定期整体上高于漫水河流域。

3.2 分析与讨论

在海河“23·7”流域性特大洪水中,紫荆关流域累计面平均雨量 379 mm,降雨历时 72 h,单站雨强最大值 86.8 mm/h;漫水河流域累计面平均雨量 773.4 mm,降雨历时 60 h,单站雨强最大值 69.8 mm/h。采用率定

好的参数对各小流域 20230729 号洪水进行模拟,模拟结果见表 4。

由表 4 可知,对海河“23·7”流域性特大洪水的模拟,新安江-海河模型对 2 个小流域的洪量、洪峰模拟的相对误差均在 20% 以内,峰现时间误差均为 0 h,紫荆关流域确定性系数达 0.89,漫水河流域确定性系数达 0.65,模拟效果较好。

结合表 4 和图 3 可知,在受人类活动影响小的紫荆关流域,新安江-海河模型的模拟效果与新安江模型相比,没有显著提升,两个模型在紫荆关流域的模拟效果均很好;而在受人类活动影响大的漫水河流域,相较于新安江模型,新安江-海河模型模拟的结果无论是在洪峰、洪量还是确定性系数上都有较大提升。

表 3 研究流域率定期模拟结果

Table 3 Flood simulation results of study basins in calibration period

流域	洪号	洪量相对误差/%	洪峰相对误差/%	确定性系数
紫荆关	19960731	-2.89	3.10	0.93
	20000704	3.54	-19.00	0.36
	20040810	-9.28	18.30	0.45
	20120721	1.25	-2.60	0.82
	20200717	-5.61	-18.10	0.62
漫水河	19530823	10.08	-14.12	0.85
	19540803	16.70	-16.98	0.82
	19580709	45.57	13.12	-0.94
	19580806	-19.16	-13.88	0.34
	19640812	16.92	-11.14	0.91
	19730813	12.37	13.05	-0.45
	20120721	19.48	3.37	-0.64
20160718	-8.64	-19.06	0.56	

表 4 海河流域 20230729 号洪水模拟结果

Table 4 Simulation results of No. 20230729 flood in Haihe River Basin

流域	模型	径流深			洪峰流量			峰现时间误差/h	确定性系数
		实测值/mm	模拟值/mm	相对误差/%	实测值/(m ³ /s)	模拟值/(m ³ /s)	相对误差/%		
紫荆关	新安江-海河	131.3	125.8	-4.18	1993.7	2075.3	4.09	0	0.89
	新安江	131.3	140.5	7.01	1993.7	2104.2	5.54	0	0.80
漫水河	新安江-海河	489.1	526.4	7.63	5200	4461.3	-14.21	0	0.65
	新安江	489.1	703.6	43.86	5200	4787.15	-7.94	1	0.20

■ 降水量 — 实测流量 — 新安江-海河模型模拟结果 - - - 新安江模型模拟结果

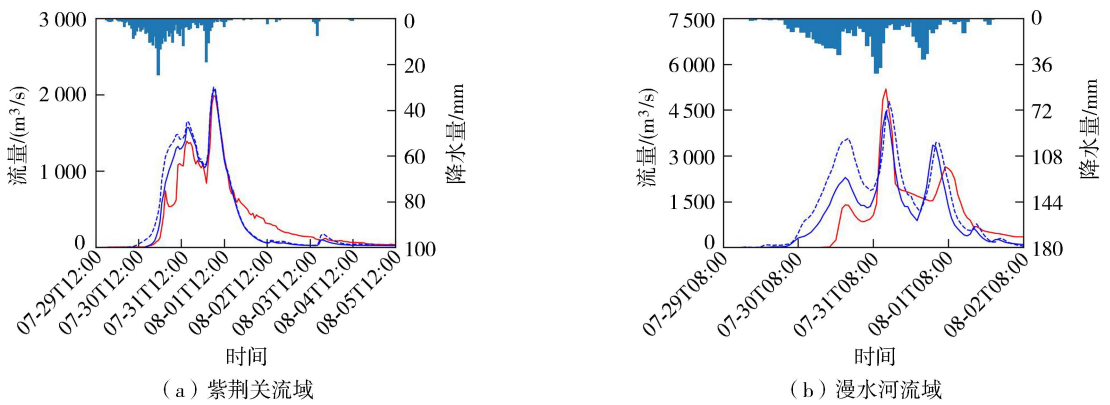


图 3 海河流域 20230729 号洪水降雨径流过程线

Fig. 3 Rainfall-runoff hydrograph of No. 20230729 flood in Haihe River Basin

由图 3 可知,在紫荆关和漫水河 2 个小流域,20230729 号洪水均为复式洪水,有多个峰,新安江模型模拟的结果整体偏大,在第一次起涨阶段表现尤其明显,而新安江-海河模型模拟的过程更为准确,这是因为新安江-海河模型中增加的参数如地表水库拦蓄库容、地下水库补给比例系数等考虑了流域内水利工程对地表径流的拦蓄作用和地下水开采对径流的削减作用,因此更能准确地模拟洪水过程。

4 结 论

a. 新安江-海河模型对紫荆关、漫水河 2 个小流域的洪量、洪峰模拟的相对误差均在 20% 以内,峰现时间误差均为 0 h,紫荆关流域确定性系数达 0.89,漫水河流域确定性系数达 0.65,说明新安江-海河模型在海河流域可以取得较高的模拟精度。

b. 在受人类活动影响较大的漫水河流域,新安江-海河模型的模拟效果比新安江模型的模拟效果提升较为明显,尤其是在对复式洪水第一个峰的模拟上,这是因为新安江-海河模型考虑了下垫面变化,如流域内地表水利工程建设与地下水开采等人类活动的影响。对海河“23·7”流域性特大洪水的精确模拟,说明新安江-海河模型可用于对海河流域特大洪水的预报预警工作,可为海河流域防汛减灾工作服务。

参考文献:

- [1] ABBASS K,QASIM M Z,SONG H M,et al. A review of the global climate change impacts,adaptation,and sustainable mitigation measures[J]. *Environmental Science and Pollution Research*,2022,29(28):42539-42559.
- [2] 湛芸,孙军,徐珺,等. 北京7·21特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J]. *气象*,2012,38(10):1255-1266. (CHEN Yun,SUN Jun,XU Jun,et al. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing(part I):observation and thinking[J]. *Meteorological Monthly*,2012,38(10):1255-1266. (in Chinese))
- [3] 符娇兰,马学款,陈涛,等. “16·7”华北极端强降水特征及天气学成因分析[J]. *气象*,2017,43(5):528-539. (FU Jiaolan,MA Xuekuan,CHEN Tao,et al. Characteristics and synoptic mechanism of the July 2016 extreme precipitation event in north China[J]. *Meteorological Monthly*,2017,43(5):528-539. (in Chinese))
- [4] 王振亚,姚成,董俊玲,等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2022,50(3):17-22. (WANG Zhenya,YAO Cheng,DONG Junling,et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2022,50(3):17-22. (in Chinese))
- [5] 刘颖颖,李经纬,陈睿山,等. 基于复杂网络的郑州市特大暴雨洪涝灾害链研究[J]. *灾害学*,2024,39(2):227-234. (LIU Yingying,LI Jingwei,CHEN Ruishan,et al. Analyzing the flood disaster chain in Zhengzhou City based on complex network[J]. *Journal of Catastrophology*,2024,39(2):227-234. (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] CEA L,ÁLVAREZ M,PUERTAS J. Estimation of flood-exposed population in data-scarce regions combining satellite imagery and high resolution hydrological-hydraulic modelling:a case study in the Licungo basin (Mozambique)[J]. *Journal of Hydrology:Regional Studies*,2022,44:101247.
- [8] OUYANG M,KOTSUKI S,ITO Y,et al. Employment of hydraulic model and social media data for flood hazard assessment in an urban city[J]. *Journal of Hydrology:Regional Studies*,2022,44:101261.
- [9] 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(中英文)*,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))
- [10] 邹磊,夏军,张印,等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. *水资源保护*,2021,37(1):53-60. (ZOU Lei,XIA Jun,ZHANG Yin,et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin[J]. *Water Resources Protection*,2021,37(1):53-60. (in Chinese))
- [11] 舒心怡,徐宗学,叶陈雷,等. 晋城市片区洪涝过程响应分析与马路行洪模拟[J]. *水资源保护*,2023,39(4):176-186. (SHU Xinyi,XU Zongxue,YE Chenlei,et al. Flooding/waterlogging process response analysis and road flooding simulation in urban area of Jincheng City[J]. *Water Resources Protection*,2023,39(4):176-186. (in Chinese))
- [12] 吴勇拓,李致家,戚振亚,等. 基于水文模型的缺资料流域设计洪水计算[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2023,51(6):1-8. (WU Yongtuo,LI Zhijia,QI Zhenya,et al. Design flood calculation of watershed with lack of data based on hydrological model[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2023,51(6):1-8. (in Chinese))
- [13] 罗玉玲,秦洪亮,姚成,等. 基于网格水滴的汇流模拟计算方法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2023,51(6):9-17. (LUO Yuling,QIN Hongliang,YAO Cheng,et al. Confluence calculation method based on grid water drop[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2023,51(6):9-17. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 李致家,姚成,张珂,等. 基于网格的精细化降雨径流水文模型及其在洪水预报中的应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*

- 版),2017,45(6):471-480. (LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG Ke, et al. Research and application of the high-resolution rainfall runoff hydrological model in flood forecasting[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(6):471-480. (in Chinese))
- [16] 何涯舟,张珂,晁丽君,等. 基于多源遥感土壤湿度与模型数据同化的流域径流模拟[J]. 水资源保护,2023,39(2):145-151. (HE Yazhou, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Watershed runoff simulation based on multi-source remotely sensed soil moisture and data assimilation[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2):145-151. (in Chinese))
- [17] 李致家,黄鹏年,张建新,等. 新安江-海河模型的构建与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(3):189-195. (LI Zhijia, HUANG Pengnian, ZHANG Jianzhong, et al. Construction and application of Xin'anjiang-Haihe model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(3):189-195. (in Chinese))
- [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] 刘玉环,李致家,刘志雨,等. 半湿润半干旱流域空间组合模型研究[J]. 湖泊科学,2020,32(3):826-839. (LIU Yuhuan, LI Zhijia, LIU Zhiyu, et al. Spatial combination model for semi-humid and semi-arid watersheds[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(3):826-839. (in Chinese))
- [20] KIRAZ M, COXON G, WAGENER T. A priori selection of hydrological model structures in modular modelling frameworks: application to Great Britain[J]. Hydrological Sciences Journal, 2023, 68(14):2042-2056.
- [21] 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.
- [22] EUSER T, WINSEMIUS H C, HRACHOWITZ M, et al. A framework to assess the realism of model structures using hydrological signatures[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(5):1893-1912.
- [23] 晁丽君,张珂,陈新宇,等. 基于多源降水融合驱动的 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):55-64. (CHAO Lijun, ZHANG Ke, CHEN Xinyu, et al. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small and medium-sized watersheds[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3):55-64. (in Chinese))
- [24] 李致家,龚俊超,孙明坤. 中国半湿润流域 WRF-Hydro 模型参数敏感性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):1-8. (LI Zhijia, GONG Junchao, SUN Mingkun. Parametric sensitivity analysis of WRF-Hydro model in a semi-humid watershed of China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5):1-8. (in Chinese))
- [25] 杨子菁,刘攀,王起峰,等. HEC-HMS 模型在不同水文气象分区中的改进[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):26-34. (YANG Zijing, LIU Pan, WANG Qifeng, et al. Application of HEC-HMS model in different hydrometeorological regions [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2):26-34. (in Chinese))
- [26] 魏玉涛,徐宁,孔珂. 新安江-海河模型在清漳河地区的应用分析[J]. 人民黄河,2021,43(增刊2):14-16. (WEI Yutao, XU Ning, KONG Ke. Application analysis of the Xin'anjiang-Haihe model in the Qingzhang River region[J]. Yellow River, 2021, 43(Sup2):14-16. (in Chinese))
- [27] 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 Shu'nan, 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))
- [28] 张江涛,何丽华,李江波,等. 河北“23·7”极端暴雨过程特征及成因初探[J]. 大气科学学报,2023,46(6):884-903. (ZHANG Jiangtao, HE Lihua, LI Jiangbo, et al. Preliminary study on the characteristics and causes of the “23·7” extreme rainstorm in Hebei[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(6):884-903. (in Chinese))
- [29] 李海川,范丹丹,燕乃一. 水利部新闻发布会聚焦海河“23·7”流域性特大洪水防御情况[N]. 中国水利报,2023-08-22(02).
- [30] 杜晓鹤,何秉顺,徐卫红,等. 海河“23·7”流域性特大洪水蓄滞洪区运用复盘及系统治理绿色发展的思考[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(9):31-38. (DU Xiaohuo, HE Bingshun, XU Weihong, et al. Retrospective operation in the “23·7” extreme flood storage and detention area of the Haihe River Basin and reflection on systematic governance and green development[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(9):31-38. (in Chinese))
- [31] 吴滨滨,于汪洋,马奉泉,等. 海河“23·7”流域性特大洪水东淀蓄滞洪区洪水演进模拟与预报[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(10):37-42. (WU Binbin, YU Wangyang, MA Fengquan, et al. Simulation and forecasting of flood evolution in Dongdian storage-detention area during Haihe “23·7” basin-wide extreme flood[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(10):37-42. (in Chinese))

nowcasting[C]//Proceedings of the 29th International Conference on Neural Information Processing Systems. Montreal: Neural Information Processing Systems Foundation, 2015:802-810.

- [19] 姜婷玉,鞠平,王冲.考虑用户调节行为随机性的空调负荷聚合功率模型[J].电力系统自动化,2020,44(3):105-113. (JIANG Tingyu, JU Ping, WANG Chong. Aggregated power model of air-conditioning load considering stochastic adjustment behaviors of consumers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3):105-113. (in Chinese))
- [20] 李亚平,姚建国,雍太有,等.居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J].中国电机工程学报,2017,37(19):5519-5528. (LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Estimation approach to aggregated power and response potential of residential thermostatically controlled loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19):5519-5528. (in Chinese))
- [21] 马晓伟,魏平,王吉利,等.抑制超低频振荡的水电多级频率控制参数优化[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):126-132. (MA Xiaowei, WEI Ping, WANG Jili, et al. Optimization of multi-stage frequency control parameters of hydro power unit for ultra-low frequency oscillation suppression[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5):126-132. (in Chinese))
- [22] 杨秀,傅广努,刘方,等.考虑多重因素的空调负荷聚合响应潜力评估及控制策略研究[J].电网技术,2022,46(2):699-708. (YANG Xiu, FU Guangnu, LIU Fang, et al. Potential evaluation and control strategy of air conditioning load aggregation response considering multiple factors[J]. Power System Technology, 2022, 46(2):699-708. (in Chinese))
- [23] 孙毅,张辰,李泽坤,等.计及多区域用户差异化PMV的柔性负荷多功率级调控策略[J].中国电机工程学报,2021,41(22):7574-7585. (SUN Yi, ZHANG Chen, LI Zekun, et al. Flexible load multi-power level control strategy taking into account the differentiated PMV of multi-region users[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22):7574-7585. (in Chinese))
- [24] LU Qiuyu, CAI Qiuna, LIU Sijie, et al. Short-term load forecasting based on load decomposition and numerical weather forecast [C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing:IEEE, 2017:1-5.
- [25] 国家统计局.2018中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018.

(收稿日期:2023-10-30 编辑:刘晓艳)

(上接第19页)

- [32] 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. (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. (in Chinese))
- [33] 宋文龙,马建威,孙亚勇,等.海河“23·7”流域性特大洪水启用蓄滞洪区洪水淹没全过程卫星遥感监测分析[J].中国防汛抗旱,2023,33(10):31-36. (SONG Wenlong, MA Jianwei, SUN Yayong, et al. Satellite remote sensing monitoring and analysis of the entire process of flood inundation in the activated flood storage areas of Haihe “23·7” basin-wide extreme flood[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(10):31-36. (in Chinese))
- [34] 张念强,王静,李娜.洪水动态风险分析技术对防汛应急工作的支撑:以海河“23·7”流域性特大洪水期间兰沟洼蓄滞洪区运用为例[J].中国防汛抗旱,2023,33(9):39-44. (ZHANG Nianqiang, WANG Jing, LI Na. The Support of dynamic flood risk analysis technology for flood emergency work: taking the application of Langouwa Storage and Detention Area during the “23·7” extreme flood in the Haihe River Basin as an example[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(9):39-44. (in Chinese))

(收稿日期:2024-01-08 编辑:刘晓艳)