

基于分布式水文模型的潮白河流域“25·7”洪水模拟

包红军^{1,2,3,4,5,6} 曾思海⁵ 王建文⁶ 运晓博^{1,3,4} 林建^{1,3} 张博^{1,3} 李致家⁵ 栾承梅⁷ 王蒙^{1,3,4} 许凤雯^{1,3,4}

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国气象局武汉暴雨研究所全国暴雨研究中心, 武汉, 430205

3 国家气象中心 中国气象局水文气象重点开放实验室, 北京 100081

4 国家气象中心 洪涝灾害风险预警与防控应急管理部重点实验室, 北京 100081

5 河海大学水文水资源学院, 南京 210098

6 南京信息工程大学水文水资源工程学院, 南京 210044

7 江苏省水文水资源勘测局, 南京, 210029

摘要: 2025年7月下旬, 潮白河流域发生1959年以来最大洪水。文章基于分布式水文模型构建潮白河流域洪水模拟模型, 复盘分析流域“25·7”区域性大洪水特征。分别选取白河张家坟水文断面、潮河下会水文断面、清水河葡萄园水文断面, 建立基于GMKHM分布式水文模型的流域洪水模拟模型。模型采用中国气象局区域气象站逐小时降水观测产品作为强迫输入, 引入径流曲线数和地形指数发展基于DEM栅格的蓄超产流模型, 并在分水源计算中增加补给深层地下水模块。结果表明, GMKHM分布式水文模型在白河张家坟断面和潮河下会断面, 洪峰流量误差分别为-1.8%和-4.0%, 确定性系数分别达到0.87和0.89; 在清水河葡萄园断面, 洪峰流量误差为0.9%, 确定性系数达到0.92; 潮白河流域“25·7”大洪水模拟精度优良。

关键词: “25·7”洪水, 洪水模拟、GMKHM分布式水文模型、潮白河流域

"25 7" Flood Simulation based on Distributed Hydrological Modeling in the Chaobai River Basin

Bao Hongjun^{1,2,3,4,5,6}, Zeng Sihai⁵, Wang Jianwen⁶, Yun Xiaobo^{1,3,4}, Lin Jian^{1,3}, Zhang Bo^{1,3}, Li Zhijia⁵, Luan Chengmei⁷, Wang Meng^{1,3,4}, Xu Fengwen^{1,3,4}

全国暴雨研究开放基金 (BYKJ2024Z11)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2025J015)、青海省重大科技专项 (2024-SF-A1)、中国气象局水文气象重点开放实验室开放课题 (23SWQXM040、23SWQXZ012)、国家重点研发计划 (2018YFC1508102)、国家自然科学基金 (41775111)、新疆维吾尔自治区重点研发任务专项 (2022B03027-3)、洪涝灾害风险预警与防控应急管理部重点实验室项目 (2024-2) 和中国气象局流域水文气象预报青年创新团队 (CMA2023QN09) 共同资助

2025年10月15日收稿; 2026年1月13日收修定稿

第一作者: 包红军, 主要从事水文气象预报与气象灾害风险业务与科研. Email: baohongjun@cma.gov.cn

-
- 1 National Meteorological Center, Beijing 100081
 - 2 Heavy Rainfall Research Center of China, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205
 - 3 China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081
 - 4 Key Laboratory of Flood Disaster Risk Warning, Prevention and Mitigation, Ministry of Emergency Management, Beijing 100081
 - 5 College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098
 - 6 School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044
 - 7 Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029

Abstract: In late July 2025, Chaobai River Basin experienced the largest flood since 1959. A flood simulation and forecasting model is developed for Chaobai River Basin based on a distributed hydrological model, aiming to retrospectively analyze the characteristics of the basin's "25·7" regional flood in this paper. The Zhangjiafen cross section of the Bai River, the Xiahui cross section of the Chao River, and the Putaoyuan cross section of the Qingshui River were taken for test hydrological sections. Flood simulation and forecasting model based on the GMKHM distributed hydrological model was developed with taking hourly precipitation observation data from CMA regional meteorological stations as model forcing input, incorporating terrain curve numbers and terrain indices to develop a DEM-based runoff and production model, adding a deep groundwater module in the water source separation module. Results show that the peak discharge simulation errors is -1.8% for the Zhangjiafen hydrological section, 3.6% for the Xiahui hydrological section. The model determination coefficient is 0.87 for the Zhangjiafen hydrological section, and 0.89 for the Xiahui hydrological section. for the Putaoyuan section of the Qingshui River, the peak discharge error was 0.9%, and the determination coefficient reached 0.92. GMKHM distributed hydrological model perform well for simulation of '25·7' Flood events in the Chaobai River Basin.

Key Words: '25·7' flood events, flood simulation, GMKHM distributed hydrological model, Chaobai River Basin

引言

全球变暖使得地球气候系统不稳定性加大, 极端天气气候事件更加频发、重发, 我国是全球极端天气气候事件发生频次与强度较高的国家之一(唐红玉等, 2025)。自二十世纪 60 年代开始, 我国极端降水发生频次和强度显著增加(中国气象局气候变化中心, 2025; 罗连升等, 2025; 王

乙竹等, 2025)。2011 年以来, 我国多雨带北扩, 年降雨量 400~800mm 区域(半湿润区)面积明显增加(张元春等, 2023; 马强等, 2024; 李娟等, 2025; 陈瑾, 2025)。北方地区汛期暴雨发生次数增多、强度显著增强, 近 5 年暴雨发生次数较 20 世纪 90 年代增加 5 成, 暴雨过程综合强度较常年同期偏高 5 成。北方地区局地强降水致灾强度趋强, 城市化建设与流域下垫面水文条件变化, 对暴雨洪水灾害, 特别是对大洪水灾害防控与应急管理提出了新的挑战(李致家等, 2025)。

2025 年 7 月 23-29 日, 受强降水影响, 海河流域潮白河、滦河、大清河等多条河流发生暴雨洪水, 其中潮白河发生 1959 年以来最大洪水(刘伟和翟宝辉, 2025)。洪水主要影响北京市密云、怀柔、延庆等区及其上游地区, 洪水特点主要包括(北京市水务局, 2025): (1) 洪峰流量超历史。支流琉璃河、白马关河、牯牛河、清水河、红门川河的洪峰流量分别达到 2180、1280、925、3160、798 m^3/s , 分别为历史调查最大洪峰的 1.2 倍、1.3 倍、1.2 倍、2.6 倍、1.2 倍; 入库主要河流白河洪峰流量为 4380 m^3/s , 是自 1951 年建站以来最大洪水(1998 年)的 1.7 倍; 多河流汇流累加, 导致密云水库入库洪峰流量最高达 6550 m^3/s , 是建库以来最大入库流量(1994 年)的 1.8 倍, 也是多年平均入库流量(27.1 m^3/s)的 242 倍。(2) 洪水过程洪量大。密云水库最大 7d(7 月 26 日至 8 月 2 日)入库水量达 9.8 亿 m^3 , 为历史最大 7d 入库水量(1974 年)的 1.4 倍; 入库流量高于 4000 m^3/s 的持续时间达到 10h, 其入库水量达到 1.87 亿 m^3 。(3) 洪水汇流速度快。白河洪水流量从 7 月 26 日 23:30 的 594 m^3/s 涨至 4380 m^3/s , 仅用 3.5h; 密云水库入库流量 6 小时内从 569 m^3/s 涨至 6550 m^3/s ; 3 小时内从 2400 m^3/s 涨至 4550 m^3/s 。

潮白河流域内含有数量众多无资料或者缺资料的山洪沟溪小流域, 且多处于上游山区。本次区域性大洪水中, 上游山洪沟溪小流域洪水汇流叠加向下游演进, 是造成洪水的主要因素之一, 传统的洪水预报预警方法难以准确刻画上游众多山洪沟溪小流域洪水过程及对整个流域洪水演进的影响, 亟需借助精细化分布式水文模型对流域进行深度分析与研究, 以提高对山洪叠加引发的河流洪水预报预警能力。

21 世纪以来, 分布式水文模型能够精细刻画流域降雨径流物理过程, 更精准模拟出水文要素在流域空间上的时空动态变化, 已经成为国内外解决无资料和缺资料河流洪水、山洪预报预警中的主要技术之一(Astagneau et al, 2021, 2024; Dang and Anh, 2024; Huynh et al, 2023; 2024; Piazzzi et al, 2021; Akter and Sawon, 2025; Georgakakos and Barrett, 2025; Bao et al, 2011; 刘志雨等, 2010; 2021; 彭涛等, 2014; 叶金印等, 2014; 包红军等, 2016a; 2016b; 2016c; 2017; 2020a; 2020b; 2021b)。面向洪水预报, 结合概念性产流模型与具有物理机制汇流模型的分布式水文模型是提升河流洪水、山洪预报预警精度重要手段(包红军等, 2016a)。国内外水文模型架构中产流模式主要包括两种, 即蓄满和超渗。潮白河流域属于半湿润半干旱地区, 由于流域水文

气象件以及下垫面变化，两种产流模式常常交替混合出现（李致家等，2025）。Bao et al（2017）基于流域 DEM 高程、植被和土壤类型等下垫面资料，发展了基于 DEM 栅格的蓄超混合产流模型，结合运动波汇流模型，构建了基于混合产流和运动波汇流的分布式水文模型（Grid-and-Mixed-runoff-generation-and-Kinematic-wave-based Hydrological Model 以下简称 GMKHM 模型），并在嘉陵江支流与黄河沁河等流域洪水预报中获得良好结果（包红军等，2017；Bao et al，2017）。

本次研究拟面向潮白河流域水文特性，在 GMKHM 分布式水文模型中引入径流曲线数和地形指数来改进基于 DEM 栅格的蓄超产流计算精度，并在分水源计算中增加补给深层地下水计算模块。采用 GMKHM 分布式水文模型实现潮白河流域洪水模拟：分别选取白河张家坟水文断面、潮河下会水文断面、清水河葡萄园水文断面，建立基于 GMKHM 分布式水文模型的潮白河流域洪水模拟模型，重现潮白河流域洪水的过程特征，并评估模型的适用性与精度，为提高北方流域暴雨洪水防控与应急管理提供科学支撑。

1 潮白河流域与数据

1.1 研究流域

潮白河是海河流域五大水系之一，位于蓟运河以西、北运河以东，上游主要有白河、潮河两支。潮河发源于河北省丰宁满族自治县槽碾沟南山，白河源自河北省坝上高原沽源县丹花岭，均于北京市密云区境内注入密云水库，在水库下游河槽村处汇合后称潮白河。潮白河贯穿河北省、北京市、天津市三省市，至宁车沽闸入永定新河入海。全长 467 km，流域总面积 19354 km²，其中山区面积占 86.9%，丘陵平原占 13.1%。主要支流包括安达木河、小汤河、红河、清水河、黑河以及天河等河流，和云州、密云、怀柔共三座大型水库。流域多年平均降雨量为 600 mm 左右，集中在 7-8 月。

本次研究选取潮河下会以上流域（简称潮河流域）、白河张家坟以上流域（简称白河流域）、潮白河支流清水河葡萄园以上流域（简称清水河流域）为研究区域，控制断面分别为下会、张家坟、葡萄园，集水面积分别为 5340 km²、8506 km²、541 km²。白河流域有云州、白河堡、汤泉等水库，潮河流域和清水河流域均无大中型水库。本次暴雨洪水过程暴雨中心均不在流域水库控制范围，水库调节对洪水过程特别是洪峰影响不大。三个流域水系分布如图 1 所示。

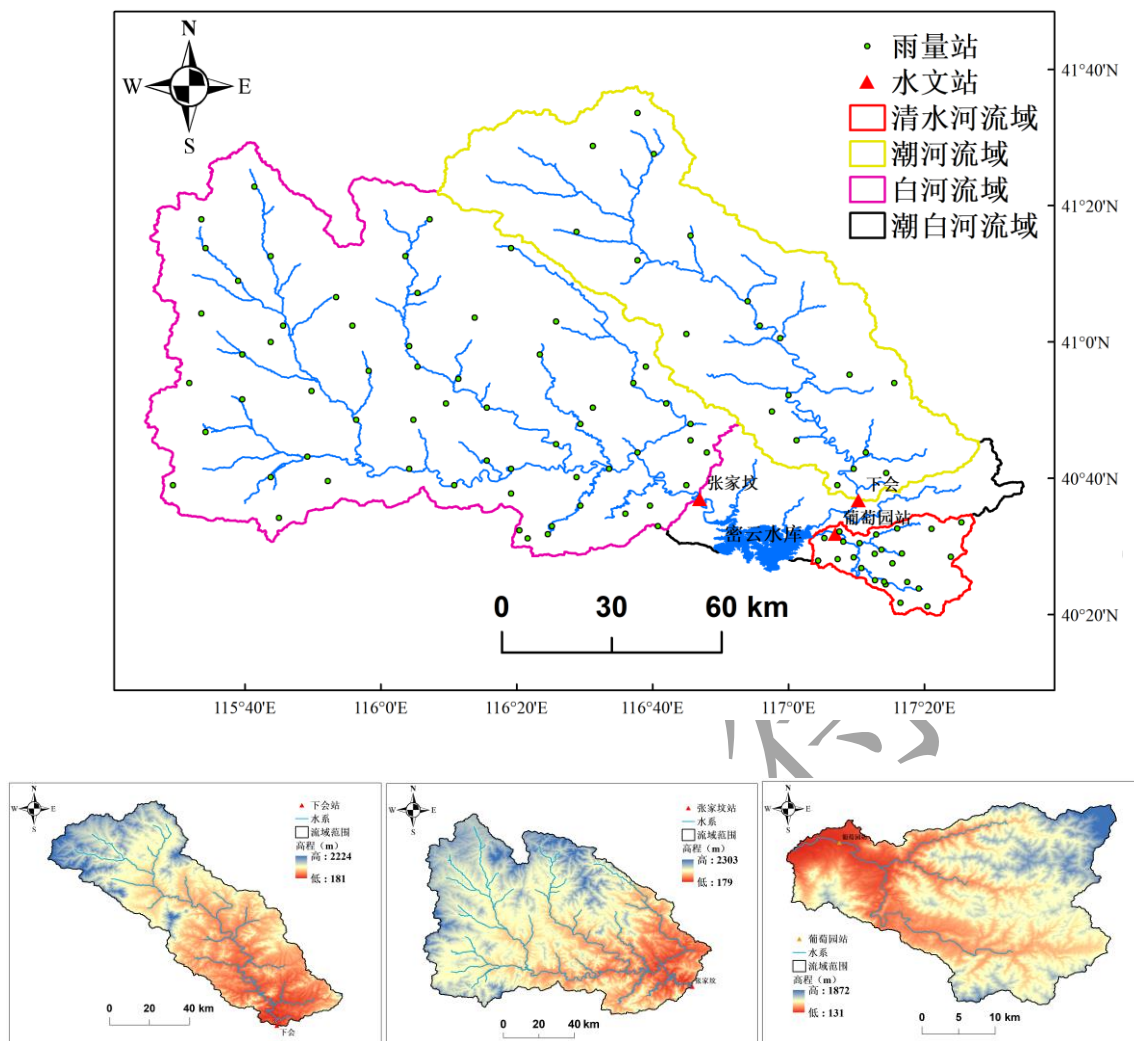


图 1 三个流域水系分布示意图

(a) 潮白河流域整体概貌及测站分布, (b) 潮河流域地形分布, (c) 白河流域地形分布, (d) 清水河流域地形分布

Fig.1 Distribution sketch of three basins

Chaobai River Basin, (b) topography of Chaohe River Basin, (c) topography of Baihe River Basin, (d) topography of Qingshui River Basin

1.2 流域地形地貌与水文气象数据

本次研究中使用的 30"×30" 分辨率的 DEM (Digital Elevation Model) 数据来源于美国国家地质调查局(USGS, GTOPO30) (<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/gtopo30.html>), 30"×30" 分辨率的土地利用数据、土壤类型数据来源于世界土壤数据库 (HWSD) (<http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home>)。三个流域土地利用、土壤类型分布如图 2、图 3 所示。

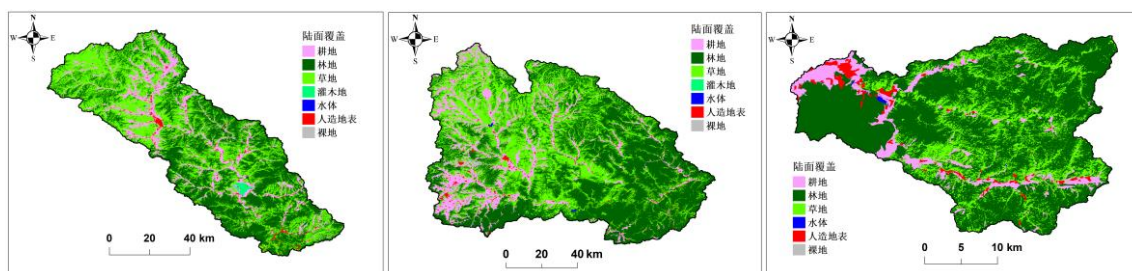


图 2 三个流域土地利用分布示意图
(a) 潮河流域, (b) 白河流域, (c) 清水河流域

Fig.2 Landuse sketch of three basins

(a)Chaohe River Basin, (b) Baihe River Basin,(c) Qingshui River Basin

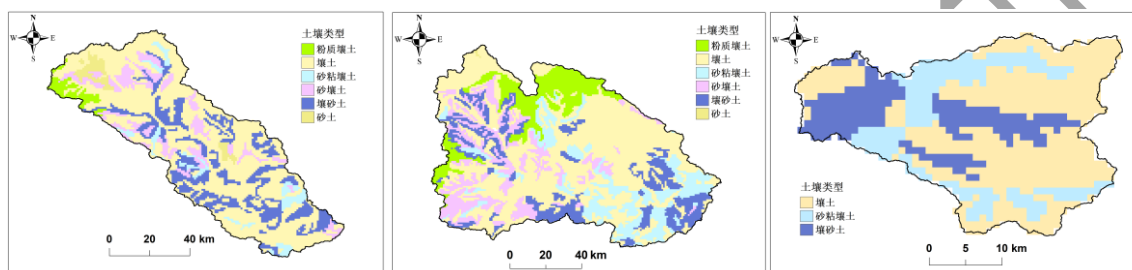


图 3 三个流域土壤类型分布示意图
(a) 潮河流域, (b) 白河流域, (c) 清水河流域

Fig.3 Soil type distribution sketch of three basins

(a)Chaohe River Basin, (b) Baihe River Basin,(c) Qingshui River Basin

流域水文气象资料来自于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 与水利部全国水雨情信息网 (<http://xxfb.mwr.cn/>), 收集了潮河、白河、清水河流域 2025 年日尺度水文气象资料和典型洪水的小时尺度水文气象资料。考虑到大洪水条件下易造成气象站点数据传输中断, 导致卫星、雷达、地面自动站多源融合降水数据质量下降, 本次研究降水资料采用恢复后的气象站点数据, 并采用反距离权重法 (芮孝芳, 2004) 将其插值为 $30'' \times 30''$ 空间分辨率网格点降水, 作为 GMKHM 分布式水文模型的输入大气强迫, 三个流域的降水与水文站信息如表 1 所示。

表 1 三个流域的测站信息

Table 1 rainfall stations and hydrologic stations number information in three basins

序号	流域	水文站数	站名	雨量站数
1	潮河	1	下会	19
2	白河	1	张家坟	61
3	清水河	1	葡萄园	24

2 流域降水与面雨量特征

2.1 流域强降水成因简析

2025 年潮白河流域本次致洪降水过程主要在 7 月 23 日 08 时至 28 日 14 时。2025 年 7 月初西北太平洋副热带高压北跳并稳定维持在 30°N 以北，20 日之后一直维持在 $30\sim 38^{\circ}\text{N}$ 范围，外围强盛的暖湿气流长时间控制华北地区，同时台风“范斯高”“竹节草”外围的东南气流向华北地区远距离输送水汽，整层可降水量 $60\sim 70\text{ mm}$ ，潮白河流域暖湿气流充沛；强盛的低空急流以及冷暖空气交汇产生的低层切变线在华北地区稳定维持，有利于水汽辐合抬升及触发不稳定能量释放，中尺度对流系统也存在明显的后向传播和列车效应的特征；再加上潮白河流域位于燕山山脉，主峰雾灵山（海拔 2116 m ）位于密云水库上游的潮白河源头区域，流域所属山脉的复杂地形对强降水落区和量级有明显的增幅作用，导致了潮白河流域强降水过程的发生（图 4）。

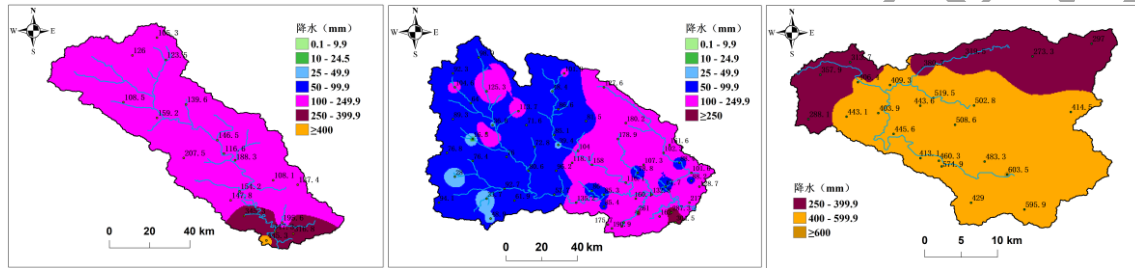


图 4 2025 年 7 月 23 日 08 时至 28 日 14 时三个流域累计降水量
(a) 潮河流域, (b) 白河流域, (c) 清水河流域

Fig.4 Cumulative precipitation of three basins from 08:00 BT 23 to 14:00 BT 28 July
(a)Chaohe River Basin, (b) Baihe River Basin, (c) Qingshui River Basin

2.2 流域降水与面雨量分析

潮河流域分析。7 月 23 日 08 时至 28 日 14 时，流域面雨量为 163.2 mm （图 5）；流域内 19 个站中有 4 个站累计降水量超过 250 mm ，最大为 445.3 mm ，降水中心位于流域下游。流域最强降水出现在 26 日 16 时至 27 日 04 时，流域面雨量为 103.9 mm ，达到特大暴雨级别。站点最大 1h、3h、6h、12h、24h 降水量分别为 59.4 mm 、 133.6 mm 、 153.8 mm 、 178.2 mm 、 201.8 mm 。

白河流域分析。7 月 23 日 08 时至 28 日 14 时，流域面雨量为 104.5 mm （图 6）；流域内 61 个站中有 29 个站累计降水量超过 100 mm ，最大为 304.5 mm ，降水中心位于流域下游。流域最强降水出现在 26 日 14 时至 27 日 02 时，流域面雨量为 36.8 mm ，达到暴雨级别。站点最大 1h、3h、6h、12h、24h 降水量分别为 83.0 mm 、 169.0 mm 、 202.9 mm 、 215.4 mm 、 228.3 mm 。

清水河流域分析。23 日 08 时至 28 日 14 时，流域面雨量为 428.7 mm （图 7）；流域内 24 个站中有 17 个站累计降水量超过 400 mm ，最大为 603.5 mm ，降水中心位于流域上游。流域最强降水出现在 27 日 21 时至 28 日 09 时，流域面雨量为 237.4 mm ，达到特大暴雨级别。站点最大 1h、3h、

6h、12h、24h 降水量分别为 86.0 mm、187.0 mm、325.9 mm、379.4mm、400.3 mm。

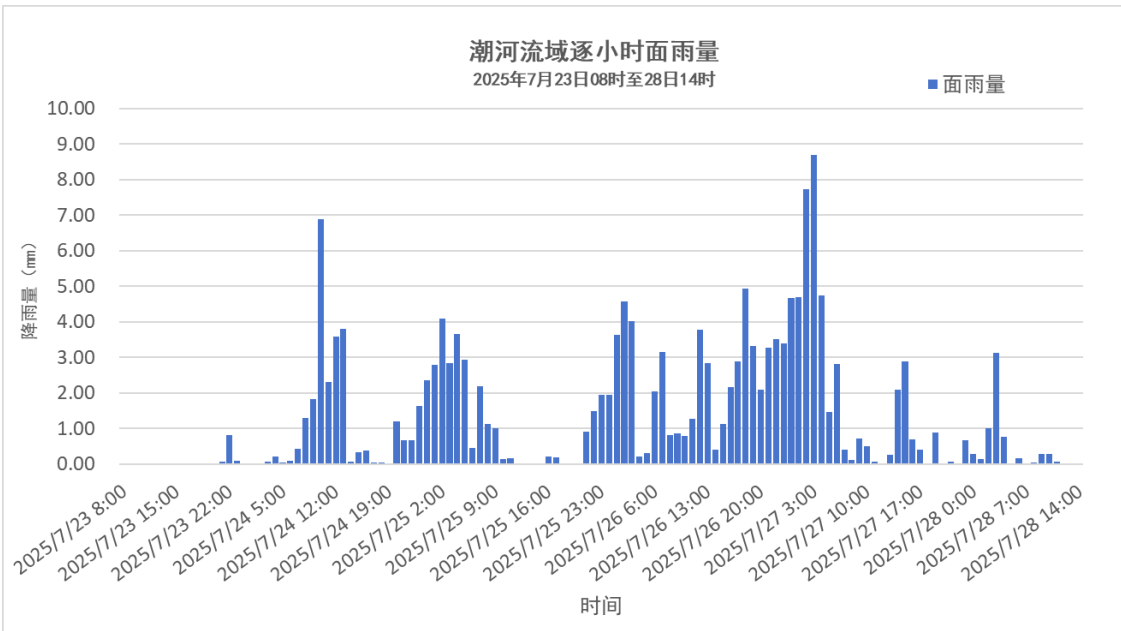


图 5 2025 年 7 月 23 日 08 时至 28 日 14 时潮河流域逐小时面雨量时序图
Fig.5 Hourly area rainfall of Chaohe basin from 08:00 BT 23 to 14:00 BT 28 July

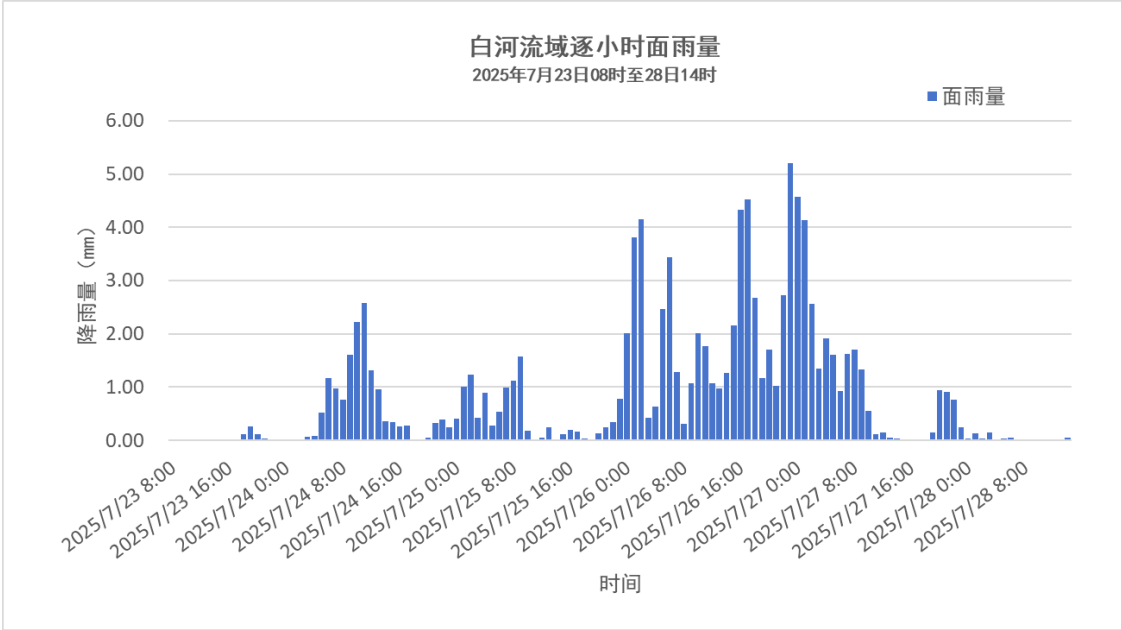


图 6 2025 年 7 月 23 日 08 时至 28 日 14 时白河流域逐小时面雨量时序图
Fig.6 Hourly area rainfall of Baihe basin from 08:00 BT 23 to 14:00 BT 28 July

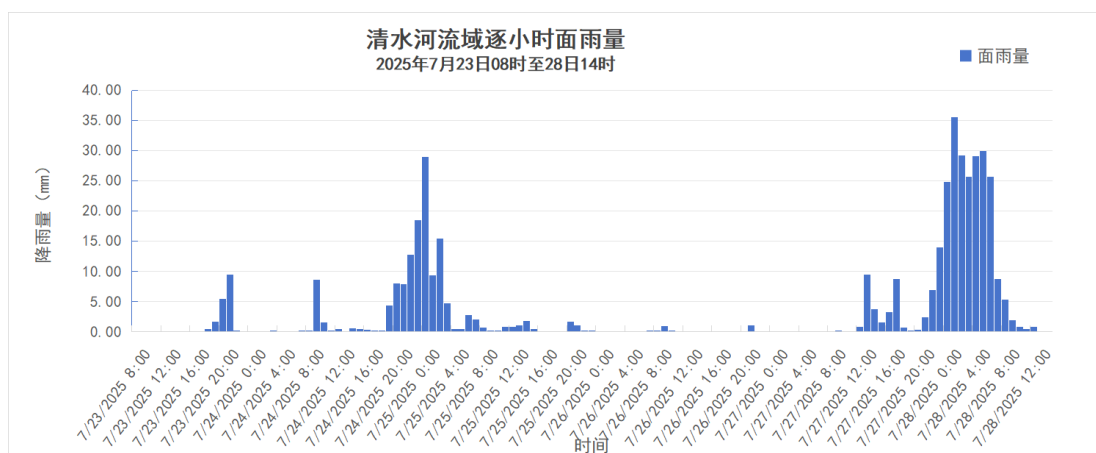


图 7 2025 年 7 月 23 日 08 时至 28 日 14 时清水河流域逐小时面雨量时序图

Fig.7 Hourly area rainfall of Qingshui River Basin from 08:00 BT 23 to 14:00 BT 28 July

3 流域洪水分析

3.1 潮白河流域分布式水文模型构建

潮白河流域地处温带季风型大陆性气候带，流域降水主要集中在 6—8 月，多年平均降水量约为 640 mm，属于半湿润半干旱流域，流域兼有蓄满产流与超渗产流两种产流机制。本次研究采用包红军等（2017；2021a）、Bao et al（2017）提出的 GMKHM 分布式水文模型构建潮白河流域水文模拟模型，可以很好地反映流域复杂的产流机制，具有较好的模型适用性。模型共有 12 个参数，包括：蒸散发折算系数、张力水容量、张力水容量曲线指数、不透水面积比例、自由水蓄水容量、自由水容量曲线系数、地下水出流系数、壤中流出流系数、地下水消退系数、壤中流消退系数、稳定下渗率、河道曼宁糙率系数。参数取值采用先验估计方法建立 GMKHM 分布式水文模型与潮河、白河和清水河等三个流域地貌、土壤与陆面覆盖信息之间定量关系，直接获取（包红军等，2017）。

产流模型的改进。本次研究中，构建基于 DEM 栅格的时空动态组合蓄超混合产流模型。具体计算按以下步骤：（1）流域初始产流单元类别根据径流曲线数来初判。该产流单元的径流曲线数阈值如大于其实际的径流曲线数 N ，划归为蓄满产流单元；如小于等于 N ，则划归为超渗产流单元。（2）根据流域产流单元的地形指数值对（1）的结果进行修正。针对蓄满产流单元，当其地形指数阈值 M 高于实际地形指数值时，划归为超渗产流单元；针对超渗产流单元，当其地形指数阈值 L 低于实际地形指数值时，划归为蓄满产流单元。根据李致家等（2015）；刘玉环等（2020）的研究成果，本研究中 N 取 60， M 取 7， L 取 25。模型逐时间步长运行计算产流时，根据实时计算出来的该时间步长的流域每个产流单元的雨强、下渗能力和土壤含水量要素值，实现时空动态识别流域产流单元属性。

增加基于 DEM 栅格的补给深层地下水模块。本次研究中，借鉴李致家等（2012）的思想，在 GKMHM 分布式水文模型的栅格分水源计算时，增加一个“虚拟水库”，即自由水首先要补给“虚拟水库”，蓄满后才能形成产生地下径流及壤中流。这样能够模拟出海河流域地下水超采形成的流域地下水漏斗对降雨产流的影响。

3.2 白河流域洪水模拟与分析

图 8 是 GKMHM 水文模型对 2025 年 7 月 23 日 08 时至 28 日 14 时白河流域洪水过程的逐小时模拟图。表 4 是本次洪水模拟的特征值表。由模拟结果可见，GKMHM 分布式水文模型可以较好地模拟白河流域的这次洪水过程：径流深误差为 13.7%，洪峰流量误差为-1.8%，洪峰出现时间误差为 0h。根据《水文情报预报规范》（中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会，2009）中的相关指标，确定性系数达到 0.89，达到乙等预报精度（ $0.9 > \text{确定性系数} \geq 0.7$ ），接近甲等预报精度（ $\text{确定性系数} \geq 0.9$ ，下同）。

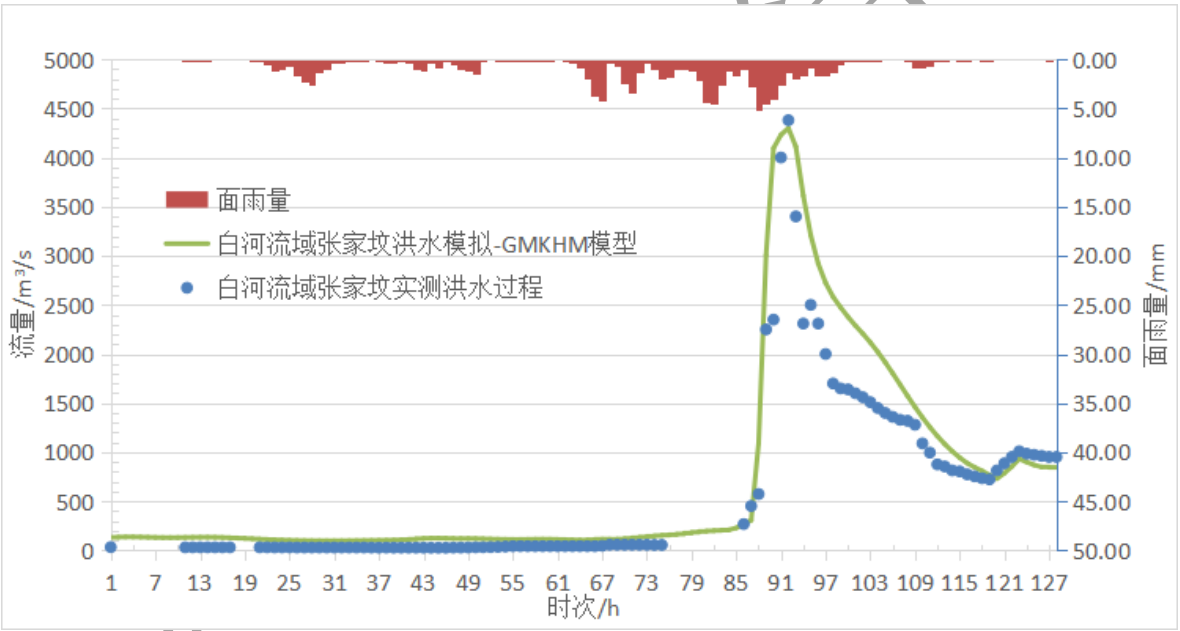


图 8 2025 年 7 月 23 日 08 时至 28 日 14 时白河流域逐小时流量模拟

Fig 8 Hourly discharge simulation hydrograph of Zhangjiafen cross section in Baihe basin from 08:00 BT 23 to 14:00 BT 28 July

表 2 GKMHM 分布式水文模型在白河流域模拟特征值表

Table 2 Flood simulation characteristics of GKMHM distributed hydrological model in Baihe basin

模型	径流深误差 /%	实测洪峰流 量/ m^3/s	模拟洪峰 流量/ m^3/s	相对误差 /%	峰现时间误差 /h	确定性系数
GKMHM	13.7	4380	4299.6	-1.8	0	0.89

3.3 潮河流域洪水模拟与分析

图9是GMKHM水文模型对7月23日08时至28日14时潮河流域洪水过程的逐小时模拟图。表4是本次洪水模拟的特征值表。本次洪水属于双峰型，由模拟结果可见，GMKHM分布式水文模型可以较好地模拟潮河流域的这次洪水过程：径流深误差为7.1%；，最大洪峰为 $940\text{m}^3/\text{s}$ ，流量误差为-4.0%、出现时间误差为0h；第二个洪峰为 $850\text{m}^3/\text{s}$ ，流量误差为-4.4%，洪峰出现时间误差为-1h。确定性系数达到0.87，达到乙等预报精度，接近甲等预报精度。

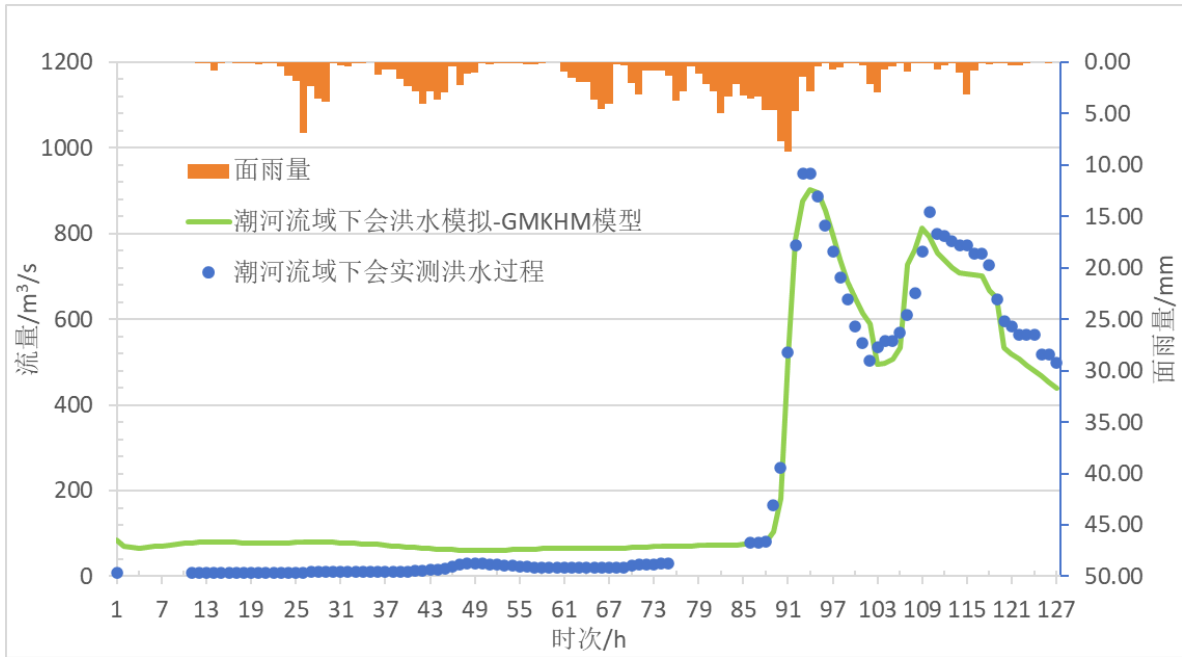


图9 2025年7月23日08时至28日14时潮河流域逐小时流量模拟

Fig 9 Hourly discharge simulation hydrograph of Xiahui cross section in Chaohe basin from 08:00 BT 23 to 14:00 BT 28 July

表3 GMKHM 分布式水文模型在潮河流域模拟特征值表

Table 3 Flood simulation characteristics of GMKHM distributed hydrological model in Chaohe basin

模型	径流深误差 /%	实测洪峰流量（最大，第二）/ m^3/s	模拟洪流量峰（最大，第二）/ m^3/s	相对误差（最大，第二）/%	峰现时间误差（最大，第二）/h	确定性系数
GMKHM	7.1	940, 850	902.4, 812.6	-4.0, -4.4	0, -1	0.87

3.4 清水河流域洪水模拟与分析

图10是GMKHM水文模型对7月23日08时至28日14时清水河流域洪水过程的模拟图。表4是本次洪水模拟的特征值表。由模拟结果可见，GMKHM分布式水文模型可以较好地模拟清水河流域的这次洪水过程：径流深误差为10.2%，洪峰流量误差为0.9%，洪峰出现时间误差为1h。确定性系数达到0.92，达到甲等预报精度。

不确定性分析。洪峰出现时间出现 1h 误差，主要是由于在葡萄园断面的上游约 900m 处的佛山东路跨河桥（葡太路 3#桥）处，7 月 28 日 5 时起，右侧堤防发生漫溢，洪水漫过堤防穿佛山东路跨河桥引桥后，向北和西北方向的村庄漫溢，分流了河道洪水。本次研究中，模型没有考虑到洪水漫溢情况，导致河道洪水向下游继续演进，洪峰偏大且滞后 1h。另外，由于本次研究中对清水河流域历史典型洪水的水文气象资料缺乏，导致模型参数与模拟结果存在一定的不确定性。

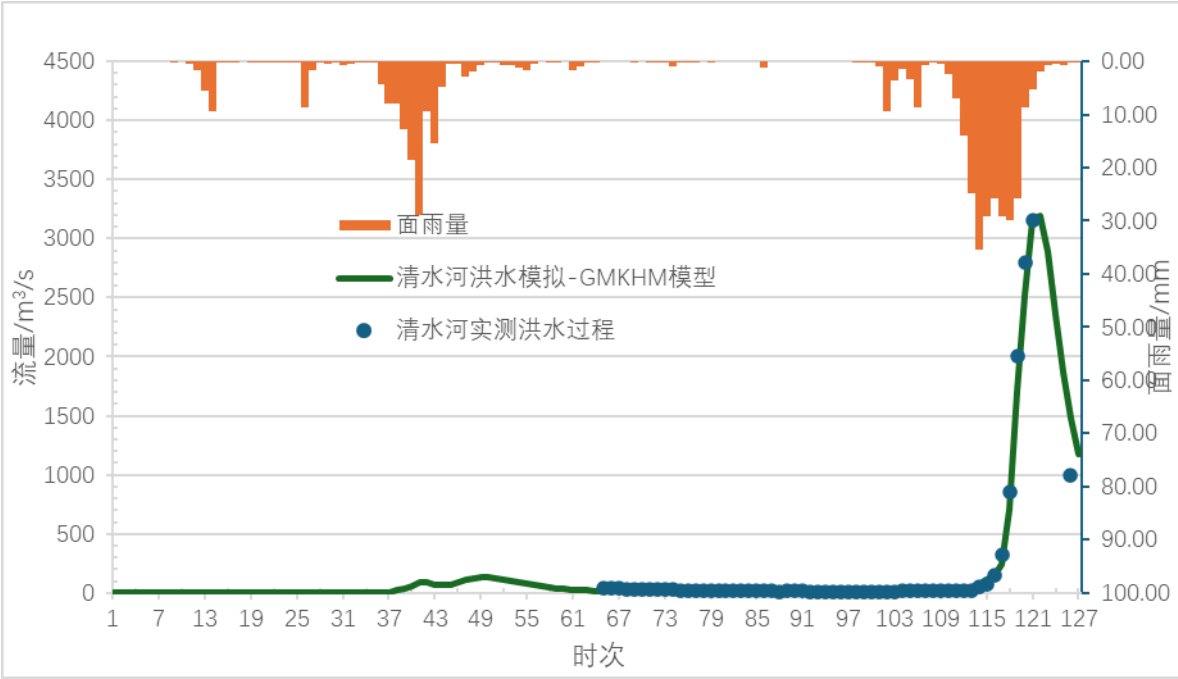


图 10 2025 年 7 月 23 日 08 时至 28 日 14 时清水河流域逐小时流量模拟

Fig 10 Hourly discharge simulation hydrograph of Putaoyuan cross section in Qingshui River Basin from 08:00 BT 23 to 14:00 BT 28 July

表 4 GMKHM 分布式水文模型在清水河流域模拟特征值表

Table 4 Flood simulation characteristics of GMKHM distributed hydrological model in Qingshui River

模型	Basin					
	径流深误差 /%	实测洪峰流 量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	模拟洪峰 流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	相对误差 /%	峰现时间误差 /h	确定性系数
GMKHM	5.2	3160	3188.4	0.9	1	0.92

4 结论与讨论

本次研究基于 GMKHM 分布式水文模型模拟复盘潮白河流域“25•7”区域大洪水，针对潮白河流域产汇流机制与洪水形成特点，采用中国气象局区域气象站逐小时降水观测产品作为模型降水输入，引入径流曲线数和地形指数发展基于流域 DEM 栅格产流单元的时空动态组合的蓄超产流模型，并在分水源计算中增加补给深层地下水模块，分别建立了潮河、白河和清水河流域洪

水模拟的分布式水文模型。结果显示,模型改进与适配性验证成效显著,结合潮白河流域半湿润半干旱的水文特征,引入径流曲线数与地形指数构建时空动态组合蓄超产流模型,能够精准识别流域栅格尺度蓄满/超渗产流单元;新增深层地下水补给“虚拟水库”模块,有效刻画了海河流域地下水漏斗对降雨产流的影响机制。改进后的 GMKHM 模型对 2025 年 7 月 23 日 08 时至 28 日 14 时洪水过程模拟良好,成功复现了“25·7”洪水“峰高、量大、汇流快”的核心特征,在潮河和白河流域达到了乙等精度,清水河流域达到了甲等精度,对我国北方流域,特别是无资料/缺资料河流洪水预报预警与山洪灾害预警有一定的借鉴意义。

实时洪水预报预警业务中,需要引入降水预报强迫场,提升洪水预报的提前量与精准度,为洪水防控与应急救援赢得更多有效的响应时间。我国已经建立自主可控的完整数值预报体系和 0~60d 智能数字气象预报体系(金荣花等,2019),但目前面向洪水预报预警的流域定量降水预报呈现“两头难”的情况,即短时临近和延伸期至气候预测尺度精度相对不高。针对洪水临灾预警,包红军等(2021a)发展了短时临近降水集合预报技术,有效提升了短临降水预警能力。然而,如何进一步融合气象人工智能短临模型(Zhang et al, 2023; 盛杰等, 2025)的先进算法,提升短时临近降水预报精准度与更新效率,已成为当前提高洪水预报预警精度的“卡脖子”关键研究方向之一。

参考文献

- 包红军,王莉莉,沈学顺,等,2016a. 气象水文耦合的洪水预报研究进展[J]. 气象, 2016, 42(9): 1045-1057. Bao H J, Wang L L, Shen X S, et al, 2016a. A review: advances of flood forecasting of hydro-meteorological forecast technology[J]. Meteor Mon, 42(9): 1045-1057 (in Chinese).
- 包红军,王莉莉,李致家,等,2016b. 基于混合产流与二维运动波汇流分布式水文模型[J]. 水电能源科学, 34(11): 1-4, 21. Bao H J, Wang L L, Li Z J, et al, 2016b. Grid-based distributed hydrological model with mixed runoff model and two-dimensional kinematic wave flow model[J]. Water Resour Power, 34(11): 1-4, 21 (in Chinese).
- 包红军,王莉莉,李致家,等,2016c. 基于 Holtan 产流的分布式水文模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 44(4): 340-346. Bao H J, Wang L L, Li Z J, et al, 2016c. A distributed hydrological model based on Holtan runoff generation theory[J]. J Hohai Univ (Nat Sci), 44(4): 340-346 (in Chinese).
- 包红军,李致家,王莉莉,等,2017. 基于分布式水文模型的小流域山洪预报方法与应用[J]. 暴雨灾害, 36(2): 156-163. Bao H J, Li Z J, Wang L L, et al, 2017. Flash flood forecasting method based on Distributed Hydrological Models in a small basin and its application[J]. Torr Rain Dis, 36(2): 156-163 (in Chinese).
- 包红军,曹勇,林建,等,2020a. 山洪灾害气象预警业务技术进展[J]. 中国防汛抗旱, 30(9-10): 40-47. Bao H J, Cao Y, Lin J, et al, 2020a. Operational technology advances in meteorological early warning for flash flood disasters[J]. China Flood Drought Manage, 30(9-10): 40-47 (in

- Chinese).
- 包红军, 林建, 曹爽, 等, 2020b. 基于流域地貌的中小河流致洪动态临界面雨量阈值研究[J]. 气象, 46(11): 1495-1507. Bao H J, Lin J, Cao S, et al, 2020b. Topography-based dynamic critical arearainfall threshold for small to middle-sized river flood warning[J]. Meteor Mon, 46(11): 1495-1507 (in Chinese).
- 包红军, 曹勇, 曹爽, 等, 2021a. 基于短时临近降水集合预报的中小河流洪水预报研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 49(3): 197-203. Bao H J, Cao Y, Cao S, et al, 2021a. Flood forecasting of small and medium-sized rivers based on short-term nowcasting and ensemble precipitation forecasts[J]. J Hohai Univ (Nat Sci), 49(3): 197-203 (in Chinese).
- 包红军, 张恒德, 许凤雯, 等, 2021b. 国家级水文气象预报业务技术进展与挑战[J]. 气象, 47(6): 671-684. Bao H J, Zhang H D, Xu F W, et al, 2021b. Progress and challenge of national level operational technology for hydrometeorological forecasting[J]. Meteor Mon, 47(6): 671-684 (in Chinese).
- 北京市水务局. 2025. 水利部 海河 “25·7” 洪水判定为区域性大洪水 [OL]. 北京市水务局网站, [2025-08-19]. https://swj.beijing.gov.cn/swdt/swyw/202508/t20250819_4176041.html. Beijing Water Authority. 2025. Ministry of Water Resources identifies the "25·7" flood in the Haihe River Basin as a regional major flood[OL]. Beijing Water Authority Website, 2025-08-19. https://swj.beijing.gov.cn/swdt/swyw/202508/t20250819_4176041.html. [2025-10-9].
- 陈瑾, 2025. 我国暴雨时空分布变化特征及防御[J]. 中国减灾, (14): 20-23. Chen J, 2025. The spatio-temporal distribution characteristics and defense of heavy rain in China[J]. Dis Reduct China, (14): 20-23 (in Chinese).
- 金荣花, 代刊, 赵瑞霞, 等, 2019. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. 气象, 45(4): 445-457. Jin R H, Dai K, Zhao R X, et al, 2019. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China[J]. Meteor Mon, 45(4): 445-457 (in Chinese).
- 李娟, 王诚, 徐邦琪, 等, 2025. 中国东部夏季季节内降水异常的经向移动分类及可能机理[J]. 大气科学, 49(4): 1046-1065. Li J, Wang C, Xu B Q, et al, 2025. Classification of the subseasonal meridional march of summer precipitation anomalies over Eastern China and possible mechanisms[J]. Chin J Atmos Sci, 49(4): 1046-1065 (in Chinese).
- 李致家, 于莎莎, 戴健男, 等, 2012. 利用水文模型研究下垫面变化对洪水的影响[J]. 人民黄河, 34(7): 17-19. Li Z J, Yu S S, Dai J N, et al, 2012. Research on influences of underlaying surface changes to the floods based on hydrological model[J]. Yellow River, 34(7): 17-19 (in Chinese).
- 李致家, 黄鹏年, 张永平, 等, 2015. 半湿润流域蓄满超渗空间组合模型研究[J]. 人民黄河, 37(10): 1-6, 34. Li Z J, Huang P N, Zhang Y P, et al, 2015. Study on spatial combination model of infiltration-excess and saturation-excess runoff in semi-humid watersheds[J]. Yellow River, 37(10): 1-6, 34 (in Chinese).
- 李致家, 李安琪, 姚成, 等, 2025. 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), 53(5): 10-17, 57. Li Z J, Li A Q, Yao C, et al, 2025. Simulation of “23·7” catastrophic flood in the Yongding River Basin based on distributed models[J]. J Hohai Univ (Nat Sci), 53(5): 10-17, 57 (in Chinese).
- 刘伟, 翟宝辉, 2025. 天津市: 成功应对海河“25·7”区域性大洪水[J]. 中国防汛抗旱, 35(9): 90-91, 93. Liu W, Zhai B H, 2025. Tianjin city: successfully coping with the “25·7” regional flood in Haihe River[J]. China Flood Drought Manage, 35(9): 90-91, 93 (in Chinese).
- 刘玉环, 李致家, 刘志雨, 等, 2020. 半湿润半干旱流域空间组合模型研究[J]. 湖泊科学, 32(3):

- 826-839. Liu Y H, Li Z J, Liu Z Y, et al, 2020. Spatial combination model for semi humid and semi arid watersheds[J]. *J Lake Sci*, 32(3): 826-839 (in Chinese).
- 刘志雨, 杨大文, 胡健伟, 2010. 基于动态临界雨量的中小河流山洪预警方法及其应用[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 46(3): 317-321. Liu Z Y, Yang D W, Hu J W, 2010. Dynamic critical rainfall-based torrential flood early warning for Medium-small rivers[J]. *J Beijing Normal Univ (Nat Sci)*, 46(3): 317-321 (in Chinese).
- 刘志雨, 孔祥意, 李致家, 2021. TOKASIDE 模型及其在洪水预报中的应用[J]. *水文*, 41(3): 49-56, 24. Liu Z Y, Kong X Y, Li Z J, 2021. TOKASIDE model and its application in flood forecasting[J]. *J China Hydrol*, 41(3): 49-56, 24 (in Chinese).
- 罗连升, 汪栩加, 程智, 等, 2025. 厄尔尼诺开始早晚对中国夏季降水的影响[J]. *气象*, 51(10): 1182-1192. Luo L S, Wang X J, Cheng Z, et al, 2025. Impact of early and late onset of El Niño on summer precipitation in China[J]. *Meteor Mon*, 51(10): 1182-1192 (in Chinese).
- 马强, 赵治尚, 李郑淼, 等, 2024. 雨带北移影响下永定河泛区防洪情势[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 22(5): 875-883. Ma Q, Zhao Z S, Li Z M, et al, 2024. Flood scenario in the Yongding River flood detention area with impacts of rain belt northward-moving[J]. *South-to-North Water Transfers Water Sci Technol*, 22(5): 875-883 (in Chinese).
- 彭涛, 殷志远, 李兰, 2014. 水文模型在计算中小流域致汛临界面雨量中的应用[J]. *气象*, 40(11): 1354-1362. Peng T, Yin Z Y, Li L, 2014. Application of hydrological model to calculating flood critical area rainfall in small and medium river valleys[J]. *Meteor Mon*, 40(11): 1354-1362 (in Chinese).
- 芮孝芳, 2004. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社. Rui X F, 2004. Principles of hydrology[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press (in Chinese).
- 盛杰, 金荣花, 张小雯, 等, 2025. 临近气象预报大模型“风雷”V1 版本检验及个例评估[J]. *气象*, 51(4): 389-399. Sheng J, Jin R H, Zhang X W, et al, 2025. Verification and case evaluation of the “Fenglei” V1 meteorological nowcasting model[J]. *Meteor Mon*, 51(4): 389-399 (in Chinese).
- 唐红玉, 吴遥, 董新宁, 等, 2025. 华西秋雨期极端降水事件及其环流特征[J]. *气象*, 51(6): 711-723. Tang H Y, Wu Y, Dong X N, et al, 2025. Extreme precipitation events and their circulation characteristics during the autumn rain period in West China[J]. *Meteor Mon*, 51(6): 711-723 (in Chinese).
- 王乙竹, 梁静舒, 曹云昌, 等, 2025. 近 40 年华南地区水汽收支变化特征及与降水的相关分析[J]. *气象*, 51(7): 789-802. Wang Y Z, Liang J S, Cao Y C, et al, 2025. Variation characteristics of water vapor budget and its correlation with precipitation in South China during recent 40 years[J]. *Meteor Mon*, 51(7): 789-802 (in Chinese).
- 叶金印, 李致家, 常露, 2014. 基于动态临界雨量的山洪预警方法研究与应用[J]. *气象*, 40(1): 101-107. Ye J Y, Li Z J, Chang L, 2014. Research and application of flash flood early warning method based on dynamic critical precipitation[J]. *Meteor Mon*, 40(1): 101-107 (in Chinese).
- 张元春, 孙建华, 傅慎明, 等, 2023. “21·7”河南特大暴雨的中尺度系统活动特征[J]. *大气科学*, 47(4): 1196-1216. Zhang Y C, Sun J H, Fu S M, et al, 2023. Active characteristics of mesoscale systems during the heavy rainfall in Henan Province in July 2021[J]. *Chin J Atmos Sci*, 47(4): 1196-1216 (in Chinese).
- 中国气象局气候变化中心, 2025. 中国气候变化蓝皮书(2025)[R]. 北京: 科学出版社: 1-60. Climate Change Center of China Meteorological Administration, 2025. Blue book on climate change in China 2025[R]. Beijing: Science Press: 1-60 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2009. GB/T

-
- 22482-2008 水文情报预报规范[S]. 北京: 中国标准出版社: 1-11. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2009. GB/T 22482-2008 Standard for hydrological information and hydrological forecasting[S]. Beijing: China Standard Press: 1-11 (in Chinese).
- Akter A, Sawon F S, 2025. Hydrological modeling of the selected flash flood-prone rivers[J]. *Nat Hazards*, 121(4): 3997-4021.
- Astagneau P C, Bourgin F, Andréassian V, et al, 2021. When does a parsimonious model fail to simulate floods? Learning from the seasonality of model bias[J]. *Hydrol Sci J*, 66(8): 1288-1305.
- Astagneau P C, Bourgin F, Andréassian V, et al, 2024. Lead-time-dependent calibration of a flood forecasting model[J]. *J Hydrol*, 644: 132119.
- Bao H J, Zhao L N, He Y, et al, 2011. Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinjiang model for flood forecast[J]. *Adv Geosci*, 29: 61-67.
- Bao H J, Wang L L, Zhang K, et al, 2017. Application of a developed distributed hydrological model based on the mixed runoff generation model and 2D kinematic wave flow routing model for better flood forecasting[J]. *Atmos Sci Lett*, 18(7): 284-293.
- Dang D D, Anh T N, 2024. Coupling duo-assimilation to hydrological model to enhance flood forecasting[J]. *J Appl Water Eng Res*, 12(1): 50-62.
- Georgakakos K P, Barrett C B, 2025. The flash flood guidance system with global coverage[M]//Adams III T E, Gangodagamage C, Pagano T C. *Flood Forecasting*. London: Academic Press: 351-359.
- Huynh N N T, Garambois P A, Colleoni F, et al, 2023. Signatures-and-sensitivity-based multi-criteria variational calibration for distributed hydrological modeling applied to Mediterranean floods[J]. *J Hydrol*, 625: 129992.
- Huynh N N T, Garambois P A, Colleoni F, et al, 2024. Learning regionalization using accurate spatial cost gradients within a differentiable high-resolution hydrological model: application to the French Mediterranean region[J]. *Water Resour Res*, 60(11): e2024WR037544.
- Piazzì G, Thirel G, Perrin C, et al, 2021. Sequential data assimilation for streamflow forecasting: assessing the sensitivity to uncertainties and updated variables of a conceptual hydrological model at basin scale[J]. *Water Resour Res*, 57(4): e2020WR028390.
- Zhang Y C, Long M S, Chen K Y, et al, 2023. Skilful nowcasting of extreme precipitation with NowcastNet[J]. *Nature*, 619(7970): 526-532.