DOI:10.14188/j.1671-8844.2025.0320 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-10

平陆运河施工期洪水实时预报

周谧[1],程耀飞[2],朱冰[3],徐炜[1]

(1. 重庆交通大学河海学院,重庆 400074; 2. 广西平陆运河建设有限公司,广西南宁 530022; 3. 水利部信息中心,北京,邮编 100053)

摘要: 平陆运河当前施工段受钦江流域上游自然河道洪水威胁,为保障施工期人员及设备安全,提出构建融合栅格型分布式水文模型与实时滚动修正机制的洪水预报模型,通过提升预报精度与时效性支撑精准撤离决策。模型基于D8流向算法划分流域栅格结构,依据栅格土地利用类型配置产流参数,耦合新安江产流模型与马斯京根-康吉汇流算法,实现洪水过程全链条模拟。采用钦州(闸上)和陆屋两个水文站的长系列实测数据率定模型产汇流参数,验证期结果显示纳什效率系数(*NSE*)超过0.8,径流总量相对误差(*RE*)趋近于0。对2024年的三场典型洪水进行预报分析,模型均提前24小时发布预警,且预报精度满足施工安全管控需求(*NSE*>0.8,*RE*<±10%),为平陆运河施工期及运行期防洪提供了技术参考。

关键词: 平陆运河;洪水预报;栅格型分布式水文模型;参数率定;实时滚动预报;施工期

中图分类号: TV124 **文献标志码:** A

flood forecasting during the construction period of the Pinglu Canal

ZHOU Mi[1], CHENG Yaofei[2], ZHU Bing[3], XU Wei[1]

(1. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Guangxi Pinglu Canal Construction Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530022, China;
3. Information Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: The construction section of the Pinglu Canal is currently threatened by floods from the natural river course in the upper reaches of the Qinjiang River Basin. To ensure the safety of personnel and equipment during the construction period, a flood forecasting model integrating a grid-based distributed hydrological model and a real-time rolling correction mechanism is proposed. It supports accurate evacuation decisions by improving forecast accuracy and timeliness. The model divides the watershed grid structure based on the D8 flow direction algorithm, configures runoff generation parameters according to the grid land use type, and couples the Xinanjiang runoff generation model with the Muskingum-Cunge routing algorithm to realize the full-chain simulation of the flood process. Long-series measured data from two hydrological stations, Qinzhou (upstream of the gate) and Luwu, are used to calibrate the model's runoff generation and routing parameters. Results during the validation period show that the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (*NSE*) exceeds 0.8, and the relative error of total runoff (*RE*) approaches 0. Forecast and analysis of three typical floods in 2024 indicate that

收稿日期: XXXX-XX-XX

作者简介: 周谧(2001-),女,硕士,主要从事水文水资源研究。E-mail:2937808775@qq.com。

通信作者: 徐炜(1985-),男,教授,博士生导师,主要从事水文水资源研究。E-mail:xuwei19850711@163.com。

基金项目: 广西科技计划项目资助(编号:桂科AA23062023);国家重点研发计划(编号:2023YFC3006605)。



本文引用格式: 周谧,程耀飞,朱冰,等.平陆运河施工期洪水实时预报[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-10.

Citation: ZHOU Mi, CHENG Yaofei, ZHU Bing, et al. flood forecasting during the construction period of the Pinglu Canal[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-10.

the model issued early warnings 24 hours in advance for all cases. The forecast accuracy meets the requirements of construction safety management($NSE>0.8$, $RE<\pm10\%$), providing technical reference for flood control during the construction and operation periods of the Pinglu Canal.

Key words: Pinglu Canal; flood forecasting; grid-based distributed hydrological model; parameter calibration; real-time rolling forecast; construction period

在平陆运河工程施工中,汛期洪水对河道内大量机械及相关人员构成严重威胁,施工期洪水预报是水利工程安全管理的关键环节,通过提前预警与科学应对降低灾害损失、保障工程效益,其精准性直接影响人员设备撤离和灾害防控效率。国内外学者针对施工期内的不同水利工程开发了多样化的洪水预报。例如,张滨[1]、丁勇[2]等为水库防汛及施工安全编制了洪水预报方案;陆玉忠[3]、李匡[4]等预报了施工流域中水电站的流量及施工水尺;潘海军[5]、景建中[6]、杨海燕[7]等对航电、水利枢纽及航运工程开展了不同施工阶段洪水预报工作;刘刚[8]、付贵[9]、陆玉忠[10]等对处于施工期的流域进行了洪水预报;Yiru Chen[11]、Hussein[12]等对极端降雨事件下的流域工程防洪防灾提供了决策支持。

随着水文大数据的快速积累与技术进步,多元化的技术体系对洪水预报精细化程度提出了更高要求,不但要求精准描述产汇流过程、考虑人类活动影响,同时还要求提供高分辨率、多要素预报产品。当前,分布式水文模型凭借其物理机制明确、空间异质性表征能力强的优势,已成为突破洪水精细化预报瓶颈的关键技术路径[13-17]。其中,栅格型分布式水文模型通过规则网格对流域进行空间离散化,能提升流域洪水过程模拟的时空精度。例如,李占华等[18]利用测雨雷达和基于GBHM的分布式水文模型构造了高精度和强实时性的洪水预报体系;王莉莉[19-20]构建的Grid-GA模型及Grid-GA-2D模型在不同流域及不同水文条件下都展现出极高的适配度。在物理过程模拟优化中,学者们通过分过程解构与多方法融合,显著增强了模型的精度与环境适应性。例如,罗清元等[21]在山区小流域研究中应用了HEC-HMS模型,基流、产流、坡面汇流、河道汇流计算方面根据模型特点和流域实际情况分别选用指数衰退法、SCS曲线法、SCS单位线法、马斯京根法进行模拟;司伟等[22]以受梯级船闸影响的富春江水库流域主河道为例,选择新安江模型、线性水库法、引入系统微分响应误差修正技术的分段连续演算的马斯京根法模拟洪水过程;李致家等[23]引入Preissmann隐式差分方法、蓄满产流模式等,丰富、完善和改进了分布式水文模型CASC2D的模型结构,提高了模型在湿润地区的模拟精度。

基于以上研究,该文章紧密围绕平陆运河工程的流域、气象特点,提出一种融合栅格型分布式水文模型与实时滚动修正的预警方法,通过新安江产流模型解析钦江上游不同下垫面类型的产流差异,耦合马斯京根-康吉算法动态追踪洪水在自然河道的演进过程,从而解决下游施工缩窄(临时围堰、堆土占压河道)带来的洪水壅高与演进延迟效应,避免造成人员及设备损失。在模拟过程中,充分利用栅格型分布式水文模型对流域空间异质性的刻画能力,同时根据最新的水文监测数据及多源气象数据调整预报结果,通过数据监测、模型预测和预警发布为平陆运河工程施工期机械和人员撤离现场争取时间。

1 模型与方法

1.1 栅格型分布式水文模型

模型技术体系由分布式产流计算、汇流计算和滚动修正机制三大模块构成(图1)。在产流计算模块中,首先将流域下垫面离散成空间分辨率为10m×10m的栅格系统,每个栅格单元作为独立的水文响应单元进行分布式计算,并依据土地利用类型构建差异化的栅格单元产流模型,其中主要选择新安江模型,不同土地利用类型栅格选用不同的新安江产流参数,以此实现对下垫面特征的精细化解析,从而强化模型对空间异质性的表征能力。

在汇流计算模块中,平面汇流采用D8单流向算法构建高精度三维数字流域模型,应用3×3邻域分析窗口逐像元推算流向矩阵,运用最陡坡度法则解析地表径流空间输移路径。针对河道汇流过程,引入马斯京根-康吉二阶扩散波方程,构建坡面-河道耦合水动力模型,有效协调坡面流非线性演进与河道调蓄作用的耦合模拟。

经产汇流计算后,通过滚动修正机制,集成ECMWF、GFS、CMA三大气象数值预报系统的多时空尺度数据,每天滚动同步获取实测气象信息和未来1-7天预报气象信息。利用过去24小时实测降水

与径流数据,系统通过对比模拟值与实测值的偏差,动态微调产流参数(例如土壤蓄水容量),以提升后续1-7天预报的准确性。基于此,系统每日滚动预报未来1-7天各支流断面的径流过程,并实时发布预警信息。该机制成功实现了流域内所有干支流断面(包括无资料区域)的实时径流过程模拟与洪水预警,预报结果支持每6小时滚动更新。



图1 模型流程图

Fig.1 Flow Diagram of the Model

1.2 产流计算

新安江模型[24]基于蓄满产流理论,适用于湿润及半湿润地区。本研究将每个栅格视为一个计算单元,主要采用新安江产流机制,不同土地利用类型的栅格采用不同的参数,提高流域下垫面适配度的同时实现模型对不同流域的匹配。

蓄满前产流量:

$$R = PE + W - WM + WM\left(1 - \frac{PE + a}{WMM}\right)^{b+1} \left(a + PE \leqslant WMM\right) \quad (1)$$

式中:R是降雨过程中实际产生的径流量(mm);PE是扣除蒸发、截留等损失后实际参与产流的降雨量(mm);W是计算时段开始时土壤的实际蓄水容量(mm),反映前期土壤湿度状态;WM是流域平均蓄水容量(mm),是流域下垫面特征(如土壤类型、植被覆盖)的综合体现;WMM是最大蓄水容量阈值(mm),修正后的蓄水容量上限值,可考虑地形、局部蓄水能力异质性或人类活动的影响。a为蓄水容量调整系数,用于修正土壤蓄水容量的动态变化;b为蓄水容量曲线形状系数,是控制流域蓄水容量空间分布的参数,b值越大,蓄水容量空间差异越小(趋于均质化)。

蓄满后产流量:

$$R = PE - (WM - W)\left(a + PE > WMM\right) \quad (2)$$

1.3 汇流计算

采用马斯京根-康吉算法[25]进行汇流计算,通过引入运动波近似解描述洪水波传播过程,同时耦合扩散波方程表征河道蓄量动态平衡与水流惯性效应,其控制方程为:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c\frac{\partial Q}{\partial x} = D\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (3)$$

式中:Q为河道流量(m^3/s);c为水流波速(m/s);D为水力扩散度(m^2/s);x为水流流程(m);t为时间(s)。

简化为运动波方程时：

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+c\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \tag{4}$$

接着运用四点偏心加权差分格式对运动波方程离散并求解，得到马斯京根-康吉汇流方程：

$$Q_i^{j+1}=a_1Q_{i-1}^{j}+a_2Q_{i-1}^{j+1}+a_3Q_i^{j} \tag{5}$$

式中：$a_1=\dfrac{\theta-C_r(1-\omega)}{1-\theta+\omega C}$；$a_2=\dfrac{\theta C_r-\omega}{1-\theta+\omega C}$；$a_3=\dfrac{1-\theta-C_r(1-\omega)}{1-\theta+\omega C}$；$i$为空间离散节点；$j$为时间离散节点；$C_r=c\dfrac{\triangle t}{\triangle x}$，为库朗数；$\theta$为空间差分权重系数；$\omega=0.5$，为时间差分权重系数；$\triangle x$为空间步长；$\triangle t$为时间步长。

根据水流波速c和水力扩散度D先确定空间步长$\triangle x$，再确定时间步长$\triangle t$以及空间差分权重系数θ，为保证数值解收敛，空间步长需满足：

$$\begin{cases}\triangle x\geqslant\dfrac{2D}{c}\\ \triangle t=\dfrac{\triangle x}{c}-\dfrac{2D}{c^2}\\ \theta=\dfrac{1}{2}-\dfrac{D}{c\triangle x}\end{cases} \tag{6}$$

关键参数水流波速c和水力扩散度D由下式确定：

$$c=\frac{5}{3}\frac{q_0^{\frac{2}{3}}S_0^{\frac{1}{3}}}{n^{\frac{2}{3}}} \tag{7}$$

$$D=\frac{q_0}{2S_0} \tag{8}$$

式中：S_0为河底坡度，可借助栅格DEM的坡度来确定，在一定程度上体现地形对汇流的影响；q_0为单宽参考流量，其值通常较难给定，本研究采用该栅格上游汇流面积和参考降雨来计算，参考降雨作为整个汇流模型中需外部人为确定的参数，可视作速度因子，其值越大，汇流速度越快。

1.4 评价方法

为全面评估径流模拟性能，采用纳什效率系数(*NSE*)和径流总量相对误差(*RE*)作为核心指标。*NSE*通过对比模拟与实测流量过程线的动态形态，量化模型对洪峰传播、退水时序等关键特征的捕捉能力。*RE*通过计算径流总量偏差百分比，验证模型水量平衡可靠性。施工前期需基于历史数据率定模型，要求$NSE>0.7$且$|RE|<10\%$，以保障模型的预报精度与决策可靠性。

*NSE*通过对比模型预测值与实际观测值的方差，衡量模型对水文过程的动态拟合能力，对洪峰流量、时间序列变化等关键动态特征敏感，能有效评估模型在洪水过程的准确性，尤其适用于洪水预警中对峰现时间和洪峰流量的捕捉，公式如下：

$$NSE=1-\frac{\sum_{t=1}^{T}(Q_0^t-Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^{T}(Q_0^t-\bar{Q}_0)^2} \tag{9}$$

式中：*NSE*为纳什效率系数；Q_m为模拟值(m^3/s)；Q_0为实测值(m^3/s)；$\bar{Q}_0$为实测值的均值(m^3/s)；Q^t表示第t时刻的某个值(m^3/s)；T为时间序列总长度。$NSE\in(-\infty,1)$，当$NSE=1$时，模拟流量过程线与实测过程线完全重合，模拟效果最优；$NSE=0$时，模拟结果与实测均值的拟合程度相当，模型未能捕捉流量动态变化；$NSE<0$时，模型预测效果差于直接使用实测均值；*NSE*值越小，表示拟合效果越差。

径流总量相对误差(*RE*)能直接评估总量平衡，通过计算模拟径流总量与观测总量的相对偏差，反映模型的水量守恒性。径流总量相对误差是工程应用的关键需求，在水资源管理、水库调度和防洪规划中，径流总量误差直接影响库容设计、泄洪策略等决策。除此之外*RE*还能弥补*NSE*的不足，因*NSE*对时间序列的动态拟合敏感，但对总量偏差可能不敏感。径流总量相对误差(*RE*)的公式如下：

$$RE=1-\frac{\sum_{t=1}^{T}Q_m^t}{\sum_{t=1}^{T}Q_0^t} \tag{10}$$

式中：*RE*为径流总量相对误差；*RE*越接近0代表实测径流总量与模拟径流总量越接近，$RE=0$代表模拟径流总量与实测值完全一致；$RE<10\%$时达到国际公认的高精度水文模型标准；$RE>10\%$时则需重新评估模型结构或输入数据可靠性。

*NSE*与*RE*联合使用能避免片面评价：*NSE*高但*RE*大时可能模型动态拟合良好，但存在系统性偏差；*RE*小但*NSE*低时可能总量平衡较好，但洪峰滞后或峰型失真。还能区分模型误差来源：*NSE*偏低时就表示模型在流量过程线动态模拟存在缺陷；*RE*偏高则是在提示模型在水量平衡存在系统性误差。

2 研究区域与数据

2.1 研究区域

平陆运河全长约135km，施工区域主要涉及集

雨面积约2230.8km²的钦江流域，该流域4-9月降水集中，年降雨量达1800mm，年均径流量20.3亿m³，受南亚热带季风气候的影响，暴雨频发，洪水风险突出。

由于沙坪河引水段尚未贯通，因此现阶段工程聚焦于钦江下游与平陆运河重合河道段（见图2），因此，陆屋站控制着输入运河重合段的全部水量，其预报精度直接决定施工人员能否在钦江天然洪水抵达高风险区域前完成安全转移。

目前，钦江流域仅有钦州（闸上）和陆屋两个水文站，其他支流处于无资料地区。但这两个水文站长期积累了不同降水条件下的流量、水位等监测数据，能够反映该流域一定的水文特征和变化规律。而陆屋水文站作为重合段上游的唯一控制站，其监测的洪水来源于钦江上游自然河道的天然径流，由于下游河道偏窄、临时堆土及设备阻水等因素，该站点观测到的水文数据为量化施工期行洪阻滞效应提供了关键证据，当预报流量超过6标段临时设施的安全流量250m³/s时，标志天然洪水将对下游堆土区、设备及作业面构成直接威胁，需立即组织施工人员撤离。

因此将聚焦于陆屋站的实时洪水预报，以验证模型在天然洪水预警及施工阻滞效应解析中的双重效能。支流无资料问题则通过栅格型分布式水文模型的空间化算法解决。

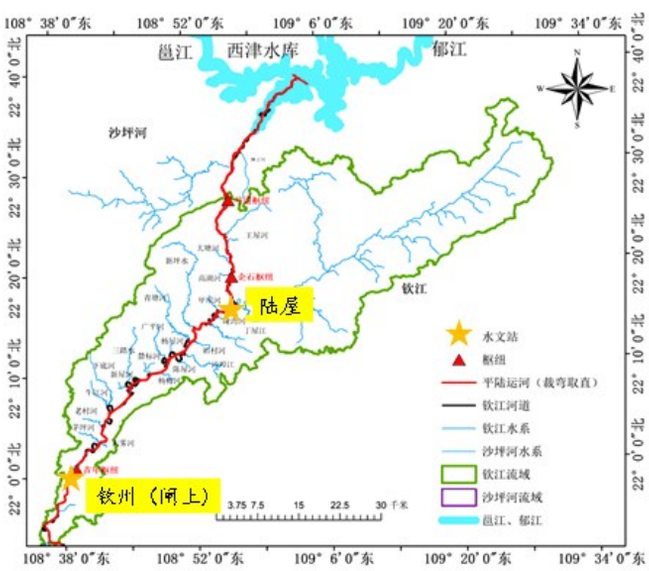


图2 平陆运河、钦江流域关系图

Fig.2 Schematic Diagram of the Hydrological Relationship between the Pinglu Canal and the Qin River Basin

2.2 数据收集

收集钦江流域的气象水文数据及地理矢量数据。包括：7个气象基本站点（横县、灵山、浦北、合浦、邕宁、防城、钦州）的地理坐标，降雨、气温等7个气象因子，时间跨度为1965-2021年。

收集陆屋水文站（1953-2020年）和钦江（闸上）水文站（2014-2020年）的逐日平均流量及洪水水文要素，历史洪水参考1893年、1971年等特大洪水调查资料。

收集钦江流域的数字高程DEM、土地利用和土壤数据，精度均为10m×10m。

在模型应用时，根据相应的洪水场次日期，集成ECMWF、GFS、CMA三大气象数值预报系统的多时空尺度数据，每天滚动获取实测气象信息和未来1-7天预报气象信息。

3 洪水模拟

3.1 参数率定与模型验证

为了率定各土地利用类型对应的参数，将1971-1977年确定为陆屋站的模型率定期，该时段完整涵盖多场暴雨事件且土地利用变更率低于8%；钦州（闸上）站则把2014-2017年作为模型率定期，该时期不仅包含超强台风等极端降雨事件，还完整记录了运河施工前期河床清淤工程对河道糙率的阶段性影响。在模型验证期的选择上遵循水文年连续性与极端事件独立性原则，陆屋站采用1978-1980年的数据，包含典型春汛与秋台风复合型洪水；钦州（闸上）站采用2018-2020年的数据，涵

盖运河导流明渠试运行阶段的水力扰动数据。

模型验证结果显示(表1),陆屋站率定期*NSE*达0.81(*RE*=−0.01),验证期*NSE*保持0.81(*RE*=0.01),其1980年9月洪水过程洪峰误差仅3.1%(图3b);钦州(闸上)站率定期*NSE*为0.85(*RE*=0.03),验证期*NSE*提升至0.89(*RE*=−0.07),对洪水峰值模拟较好(图3d)。除此之外,两站累计径流深相对误差均控制在±10%以内,径流模拟结果较为稳定。综合来看,模型在率定期和验证期均表现出较好的性能,这种跨时空尺度的稳定表现,证实了模型参数在应对季风区骤发暴雨与人类活动干扰双重挑战时的鲁棒性,为后续开展施工期洪水风险情景模拟提供了可靠的数字孪生基础。

表1 陆屋与钦州(闸上)站率定期和验证期统计结果表

Table 1 Calibration and Validation Periods Statistical Results Table for Luwu and Qinzhou (Upstream Sluice) Stations

站名	率定期		验证期	
	NSE	RE	NSE	RE
陆屋	0.81	−0.01	0.81	0.01
钦州(闸上)	0.85	0.03	0.89	−0.07

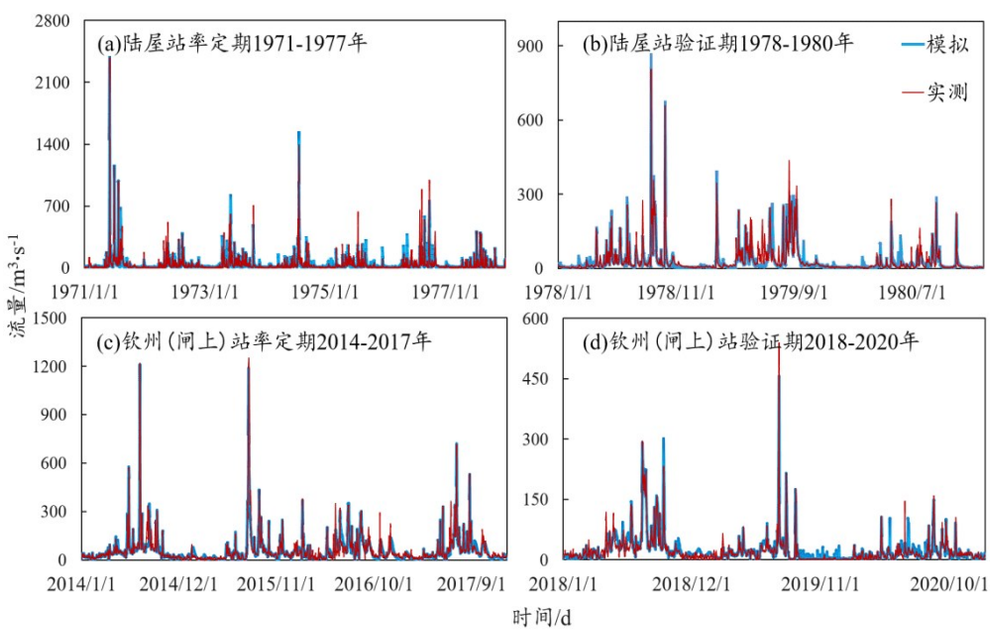


图3 陆屋与钦州(闸上)站率定期和验证期的流量过程线

Fig.3 Hydrographs of the Luwu and Qinzhou (Upstream Sluice) Stations during Model Calibration and Validation Periods

3.2 模拟结果

在2024年汛期实际洪水预报中,模型展现出了较高的准确性。图4为20240420号洪水,由钦江流域春季季风持续降雨引发,过程降雨量集中在20-22日,图4(a)是4月20日的洪水预报过程,时间间隔3小时。提前2天报出洪水,即20日预报22号陆屋上游平均降雨24mm,预报洪峰流量238m³/s。图4(b)为4月21日继续跟进预报,预报22号陆屋上游平均降雨23mm,陆屋站的洪峰预报值为252m³/s。4月22日实测洪水流量最大值为278m³/s,预报误差为9.4%。尽管存在一定误差,但模型在关键指标上(如洪峰量级和发生时间)的预测与实测趋势一致,且预报值高于250m³/s的预警阈值,符合施工安全管控要求。

此次预报案例体现了模型通过动态修正提升精度的能力,尤其在降雨输入不确定性较大的季风条件下,仍能通过滚动更新有效缩小误差范围。后续分析表明,误差主要源于局部强对流天气导致的降雨空间分布偏差,但模型结构对新安江产流与马斯京根-康吉汇流算法的耦合设计,确保了洪水过程模拟的整体可靠性。该成果为类似气候背景下的洪水预警提供了可复用的技术路径。

图5为20240519号洪水,该场洪水由大范围暴雨天气引发,钦江作为中小河流,在极端降雨影响下,水位快速上涨。图5(a)中,5月17日14时发布的初期预报显示,18日起将出现涨水过程,陆屋站洪峰流量预测值为320m³/s。随着暴雨持续升级,钦州市气象台连续发布暴雨红色预警,模型通过滚

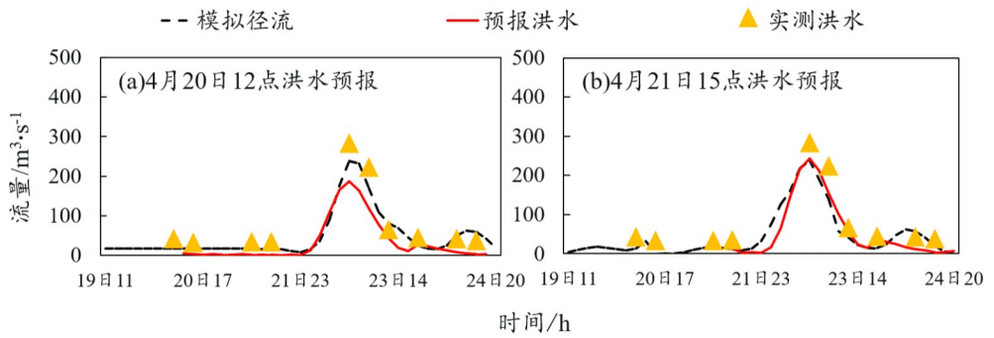


图4 陆屋站20240420号洪水过程预报

Fig.4 No.20240420 Flood Hydrograph Forecast at Luwu Station

动修正，于18日、19日两次更新洪水过程线，最终将陆屋站洪峰预报值调整为478m³/s，与20日实测峰值514m³/s的误差为7.0%。

尽管此次洪水初期预报值偏低，但基于实时跟踪修正机制，有效减轻了施工段灾害损失。预报过程中，模型对暴雨中心强度与范围的动态捕捉能力，为应急决策提供了关键支撑。

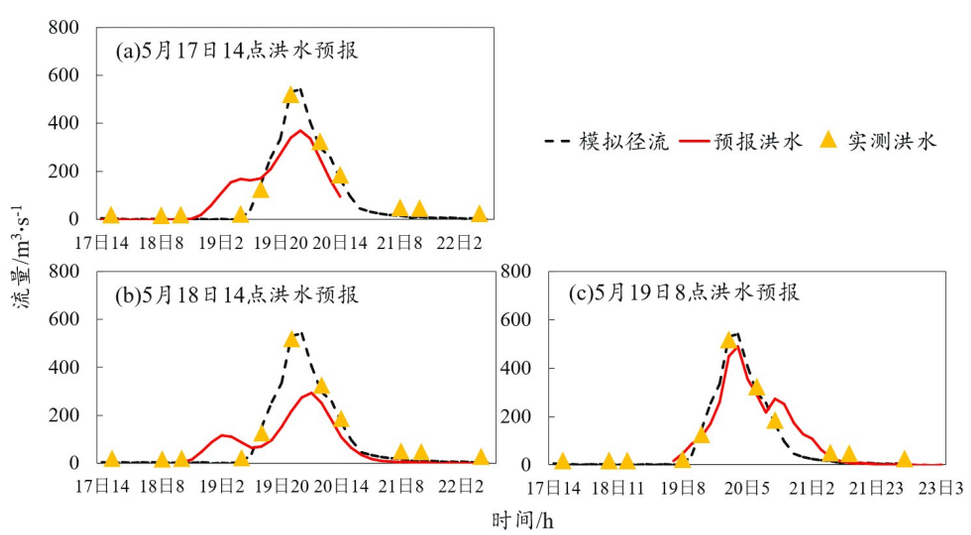


图5 陆屋站20240519号洪水过程预报

Fig.5 No.20240519 Flood Hydrograph Forecast at Luwu Station

图6为20240906号洪水，受台风“摩羯”影响，钦江流域于9月6日至7日经历强降雨过程。台风中心于7日0-5时登陆海南，其眼墙区强风雨直接冲击沿海，导致钦江流域进入暴雨区。预报系统自6日18时启动，基于台风外围旋转气流引发的持续暴雨，采用6小时滚动修正机制，通过实时跟踪与参数迭代优化，逐步修正洪峰预报值，此期间各预报时段的洪峰预报值如表2所示，各时段预报的洪水过程线见图6。7日18点时，台风“摩羯”登陆后路径偏离早期预测，其中心逐渐远离平陆运河流域，流域降雨强度随之减弱，后期伴随台风外围气旋影响，会有部分降雨，但该次台风基本结束。在此预报过程中，滚动修正机制通过同化实时降雨和河道水位数据，洪峰预报值从最初的850m³/s不断降低到与实测值相接近的130m³/s，显著降低了预报误差。

表2 陆屋站20240906号洪水在各预报时段的洪峰值

Table 2 No. 20240906 Flood Peak Values at Different Forecast Periods at Luwu Station

预报时间	陆屋站洪峰预报值	预报时间	陆屋站洪峰预报值
9月6日18点	850 m³/s	9月7日12点	450 m³/s
9月7日0点	700—800 m³/s	9月7日18点	130 m³/s
9月7日6点	650 m³/s		

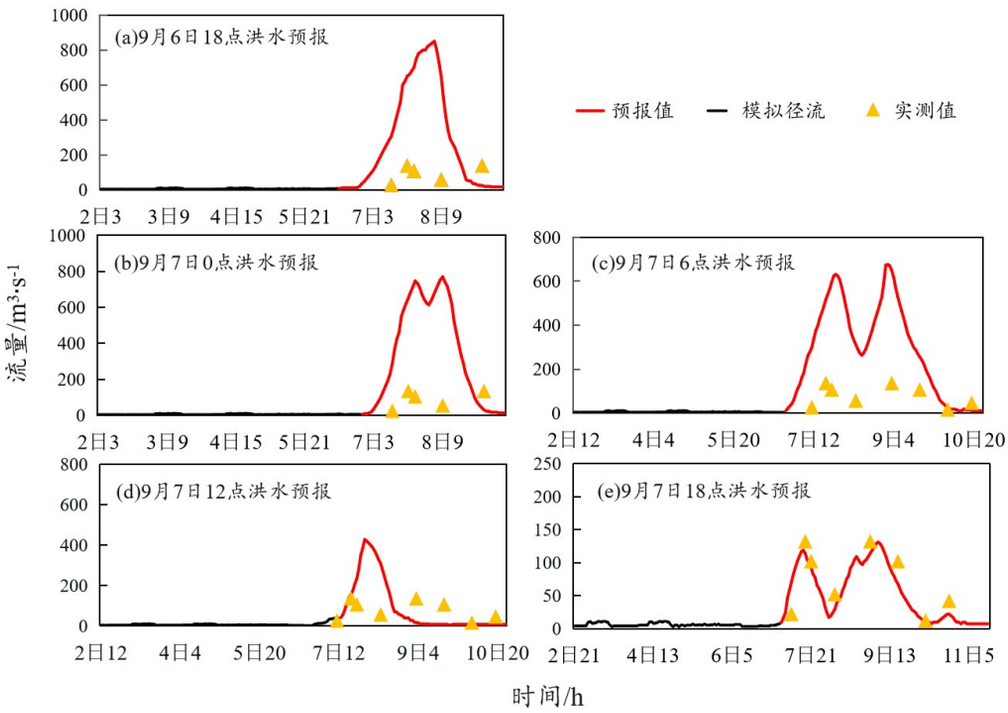


图6 陆屋站20240906号洪水过程预报

Fig.6 No.20240906 Flood Hydrograph Forecast at Luwu Station

4 结论

该文章基于栅格型分布式水文模型开展平陆运河洪水预报,保障平陆运河施工期洪水安全。在2024年的汛期防洪预报中,研究模型预报成果为平陆运河施工期安全度汛提供了坚实的技术和信息支撑。主要结论如下:

(1)模型采用高分辨率数据,根据土地利用类型配置栅格单元产流模型参数,提升了流域施工期内的水文过程模拟精度。通过融合10m×10m网格化地理信息数据与栅格参数差异化化方法,实现了对流域下垫面的精细描绘,相较传统模型,洪峰流量模拟误差降低,峰现时间偏差缩短。

(2)实时滚动修正机制具备高效响应能力,不但提前24小时发布预警,并且通过"实时跟踪-实时修正"提高预报精度。在台风"摩羯"引发的洪水事件中,模型通过6小时滚动修正,洪峰预报值从850m³/s逐步修正至130m³/s,体现了对复杂气象条件与水文变化的响应能力。

(3)模型在不同成因引起的典型气象条件下的实际洪水预报中展现了较强的稳定性能。模型提前24小时发布预警,洪峰流量预报误差均小于10%,且模型在关键指标上(如洪峰量级和发生时间)的预测与实测趋势基本保持一致,能够为工程安全度汛提供较准确的预报信息。

参考文献:

[1] 张滨,刘玉涛,狄方洪.拉林河磨盘山水库施工期洪水预报[J].水利科技与经济,2008,(10):826-827.
ZHANG Bin, LIU Yutao, DI Fanghong. Flood Forecasting During the Construction Period of the Mopanshan Reservoir on the Lalin River[J]. Water Resources Science and Technology and Economy, 2008, (10): 826-827.

[2] 丁勇,陆玉忠,徐海卿,等.李家岩水库施工期洪水预报方案编制[J].中国防汛抗旱,2024,34(08):47-54.
DING Yong, LU Yuzhong, XU Haiqing, et al. Development of a Flood Forecasting Scheme for the Construction Period of the Lijiayan Reservoir[J]. China Flood and Drought Management, 2024, 34(08): 47-54.

[3] 陆玉忠,胡宇丰,李匡,等.水电站施工期洪水预报系统设计与开发[J].水利水电技术,2017,48(04):30-34.
LU Yuzhong, HU Yufeng, LI Kuang, et al. Design and Development of a Flood Forecasting System for Hydropower Station Construction Periods[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(04): 30-34.

[4] 李匡,何朝晖,梁犁丽.雅砻江流域水情预报方案[J].人民珠江,2017,38(08):33-38.
LI Kuang, HE Zhaohui, LIANG Lili. Hydrological Forecasting Scheme for the Yalong River Basin[J].

Pearl River, 2017, 38(08): 33 - 38.

[5] 潘海军.赣江石虎塘航电枢纽施工期洪水预报探讨[J].人民长江,2012,43(S2):81-83.
PAN Haijun. Discussion on Flood Forecasting During Construction of Shihutang Navigation-Power Junction on Ganjiang River[J]. People's Yangtze River, 2012, 43(S2): 81-83.

[6] 景建中,翁拥军.亭子口水利枢纽施工期水情自动测报系统[J].水力发电,2009,35(10):55-57.
JING Jianzhong, WENG Yongjun. Automatic Hydrological Monitoring System During Construction of Tingzikou Hydropower Project[J]. Water Power, 2009, 35(10): 55-57.

[7] 杨海燕.渠江风洞子航运工程施工期洪水预报研究[J].四川水利,2023,44(02):114-117.
YANG Haiyan. Research on Flood Forecasting During the Construction Period of the Fengdongzi Navigation Project on the Qujiang River[J]. Sichuan Water Resources, 2023, 44(02): 114 - 117.

[8] 刘刚.秦巴山区中小河流洪水预警预报系统研究[D].西安理工大学,2021.
LIU Gang. Research on Flood Warning and Forecasting System for Small and Medium Rivers in Qinba Mountain Area[D]. Xi'an University of Technology, 2021.

[9] 付贵.基于遥感数据水雨情测报系统设计[J].黑龙江水利科技,2024,52(10):83-86.
FU Gui. Design of Hydrological Rainfall Monitoring System Based on Remote Sensing Data[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2024, 52(10): 83-86.

[10] 陆玉忠,方根,曹跃华.文得根水利枢纽施工期洪水预报方案构建与应用[J].吉林水利,2023,(10):24-29.
LU Yuzhong, FANG Gen, CAO Yuehua. Construction and Application of Flood Forecasting Scheme During Construction of Wendegen Hydropower Project[J]. Jilin Water Resources, 2023, (10): 24-29.

[11] Yiru Chen , Nan Zhang , Xiaolei Zhang , Guangpeng Wang , Yun Wang, Ronghua Liu , Meihong Ma , A novel dynamic flash flood early warning framework based on distributed hydrologic modeling, Ecological Indicators , 2025, 172.

[12] Hussein K., Alhosani N., Al-Areeq A. M. et al. Unprecedented rainfall in the United Arab Emirates: hydrologic and flood impact analysis of the April 2024 event. Nat Hazards (2025).

[13] BEVEN K. Rainfall-runoff modelling: the primer, 2nd ed[M]. Chichester: Wiley-Blackwell,2012.

[14] FATICHI S, VIVONI E, OGDEN F, et al. An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology [J]. Journal of Hydrology,2016,537: 45-60.

[15] FENICIA F, KAVETSKI D, SAVENIJE H H G, et al. From spatially variable streamflow to distributed hydrological models: analysis of key modeling decisions [J]. Water Resources Research,2016,52: 954-989.

[16] 芮孝芳. 水文学现状及未来[M].南京:河海大学出版社,2019.
RUI Xiaofang. Current Status and Future of Hydrology [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2019.

[17] 郑丽媛,杨殿亮,廖卫红,等.基于分布式EasyDHM模型的沭河流域洪水预报研究[J].人民长江,2023,54(S1):7-10+34.
ZHENG Liyuan, YANG Dianliang, Liao Weihong, et al. Flood Forecasting in Shuhe River Basin Based on Distributed EasyDHM Model[J]. People's Yangtze River, 2023, 54(S1): 7-10+34.

[18] 李占华,程元庚,赵红兵,等.基于测雨雷达与分布式水文模型的小流域汛期短期洪水预报[J/OL].水电能源科学,2025,(06):19-23+52.
LI Zhanhua, CHENG Yuangeng, ZHAO Hongbing, et al. Short-Term Flood Forecasting in Small Watersheds During Flood Season Based on Rain Radar and Distributed Hydrological Model[J/OL]. Water Resources and Power, 2025, (06): 19-23+52.

[19] 王莉莉,陈德辉.基于栅格的二维分布式超渗产流水文模型[J].水电能源科学,2011,29(11):6-10+54.
WANG Lili, CHEN Dehui. A Grid-Based Two-Dimensional Distributed Hyper-Infiltration Runoff Hydrological Model[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 6 - 10+54.

[20] 王莉莉,李致家,包红军.基于栅格的分布式超渗产流水文模型构建及比较[J].河海大学学报(自然科学版),2010,38(02):123-128.
WANG Lili, LI Zhijia, BAO Hongjun. Construction and Comparison of a Grid-Based Distributed Hyper-Infiltration Runoff Hydrological Model[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2010, 38(02): 123 - 128.

[21] 罗清元,侯东儒,刘丽娜,等.HEC-HMS模型与MFPM模型在暴雨洪水预报中的应用比较[J].水电能源科学,2022,40(08):70-73+87.
LUO Qingyuan, HOU Dongru, LIU Lina, et al. Comparative Study on Application of HEC-HMS Model and MFPM Model in Storm Flood Forecasting[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(08): 70-73+87.

[22] 司伟,黄思琦,瞿思敏,等.基于马斯京根连续演算误差修正方法的新安江模型流域洪水预报研究[J/OL].水

资源保护,1-11[2025-05-22].
SI Wei, HUANG Siqi, QU Simin, et al. Flood Forecasting in Xin'anjiang Model Basin Based on Error Correction Method of Muskingum Continuous Routing[J/OL]. Water Resources Protection, 1-11 [2025-05-22].

[23] 李致家,胡伟升,丁杰,等.基于物理基础与基于栅格的分布式水文模型研究[J].水力发电学报,2012,31(02):5-13+32.
LI Zhijia, HU Weisheng, DING Jie, et al. Research on Physically-Based and Grid-Based Distributed Hydrological Models[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(02): 5 - 13+32.

[24] Li Z J, Yao C, The Improved Xinanjiang Model [J], Journal of hydrodynamics, China ocean press, 2005, 17(6): 746-751

[25] Salvati Aryan ; Moghaddam Nia Alireza; Salajegheh Ali ; Shirzadi Ataollah ; Shahabi Himan ; Ahmadisharaf Ebrahim ; Han Dawei; Clague John J. A systematic review of Muskingum flood routing techniques [J]. Hydrological Sciences Journal, 2024, 69(6): 810 - 831.