DOI:10.14188/j.1671-8844.2023.0436
文章编号:1671-8844(2026)09-1421-10

耦合水文水动力模型的小流域洪水演进及预警研究

傅春,黄慧敏,刘业忠

(南昌大学工程建设学院,江西 南昌 330031)

摘要: 为探究洪水淹没规律、提高预报预警精度,以江西省濂江流域作为研究区域,利用HEC(Hydrologic Engineering Center)-HMS(hydrologic modeling system)水文模型获得控制节点的径流时间曲线,并将其作为边界条件接入HEC-RAS(river analysis system)水动力模型,结合场次降雨事件,对洪水进行快速、稳定、高精度的可视化淹没分析。通过降雨与流域泛洪的同步叠加,实现了水文水动力模型的串联耦合。结果表明,水文模型模拟的6场洪水均达到乙级预测精度标准,水动力模型获得的最大淹没水深、最大流速与水面高程等结果与实测数据的变化趋势基本一致,说明耦合模型在濂江流域具有良好的可靠性及适用性。同时,在考虑降雨前期土壤湿度的前提下,计算引发洪水的动态临界雨量,结果表明,当流域土壤趋于饱和状态时,少量降水即可产生超流域承载力的径流量。研究结果可为濂江流域洪水预报预警提供技术支撑。

关键词: HEC-HMS;HEC-RAS;山区小流域;动态临界雨量;洪水预警

中图分类号: TV 124　**文献标志码:** A

Research on flood evolution and early warning in small watersheds using a coupled hydrological-hydrodynamic model

FU Chun, HUANG Huimin, LIU Yezhong

(School of Engineering Construction, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: To explore the patterns of flood inundation and enhance the accuracy of flood forecasting and early warning, the Lianjiang River Basin in Jiangxi Province was selected as the research area. Using the HEC (Hydrologic Engineering Center) - HMS (hydrologic modeling system) hydrological model, the runoff hydrographs at the control nodes were obtained and used as boundary conditions for the HEC - RAS (river analysis system) hydrodynamic model. Combined with storm events, rapid, stable and high-precision visual inundation analysis of floods was conducted. Through synchronous superposition rainfall and watershed flooding, the hydrological and hydrodynamic models were coupled in series. The results showed that the simulation of six floods by the hydrological model all reached the grade B prediction accuracy standard. The maximum inundation water depth, maximum flow velocity, and water surface elevation obtained by the hydrodynamic model were basically consistent with the changing trends of the observed data, indicating that the coupled model has good reliability and applicability in the Lianjiang River Basin. Concurrently, considering antecedent soil moisture, the dynamic critical rainfall amount that triggers floods was calculated. The results showed that when the soil in the watershed approaches saturation, a small amount of precipitation can generate

收稿日期: 2023-10-11

作者简介: 傅春(1966-),女,博士,教授,主要从事水资源与水环境管理研究,E-mail:ccfu@ncu.edu.cn。

通信作者: 黄慧敏(2000-),女,硕士,主要从事水文与水资源研究,E-mail:huimin.hhm@foxmail.com。

基金项目: 国家社科基金年度项目(编号:18BGL187)。

本文引用格式: 傅春,黄慧敏,刘业忠.耦合水文水动力模型的小流域洪水演进及预警研究[J].武汉大学学报(工学版),2026,59(9):1421-1430.

Citation: FU Chun, HUANG Huimin, LIU Yezhong. Research on flood evolution and early warning in small watersheds using a coupled hydrological-hydrodynamic model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2026, 59(9):1421-1430.

runoff exceeding the watershed's carrying capacity. The research results can provide technical support for flood forecasting and early warning in the Lianjiang River Basin.

Key words: HEC-HMS; HEC-RAS; mountainous small watershed; dynamic critical rainfall threshold; flood early warning

受全球气候变化和人类活动的影响,极端暴雨事件的强度及发生频次持续上升,洪涝灾害频发,洪涝灾害已成为造成人民生命财产损失的主要自然灾害之一[1]。洪水预警工作是防灾减灾工作的重点。

实际研究中往往借助流域历史水文数据等资料对洪水进行预警,预警方法主要有两种[2]:一种是基于动态临界雨量对流域进行洪水预警,如由美国国家气象局开发的山洪预警(flash flood guidance, FFG)系统[3]与刘志雨等[4]基于前期降雨指数提出的动态临界雨量法等,该类方法在考虑流域前期土壤湿润状况的基础上对洪水进行预警[5],通过水文模型模拟降雨径流情况,从而反推得到动态临界雨量;另一种是构建洪水预警模型,其发展经历了由最初的集总式模型到分布式模型、由单一模型判断到多模型耦合技术的演进[6]。流域洪水预警模型包括水文模型、水动力模型等[7]。水文模型可有效模拟洪水预警系统中流域的产汇流等过程,但无法体现洪水发生时的水流动力特征[8];水动力模型考虑了洪水产生的物理机制,能够模拟降雨时水流在河道及河漫滩的演进和淹没过程,但忽略了河流与流域间的天然水力联系[9]。

由此可见,采用单一的水文或水动力模型对洪水进行预警建模存在明显局限性[10],难以同时对径流及洪水淹没进行精准分析。通过水文水动力耦合模型模拟流域极端暴雨径流和洪水淹没情况[11],能弥补单一模型各自的缺点,这是当前洪水灾害预警工作发展的必然趋势[12]。目前,具有代表性的水文与水动力模型平台有丹麦水利研究所开发的MIKE[13]软件、美国陆军工程兵团的水文工程中心(Hydrologic Engineering Center, HEC)开发的HEC软件[14]等。近年来,水文水动力耦合模型已被逐步应用于国内外洪水预警研究中[15-16],如申言霞等[17]基于多重网格技术构建了地表水文与二维水动力的动态双向耦合模型。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域概况

濂江为赣江上游支流,发源于江西省安远县濂江乡雅鹰排,集水面积2 332 km^2,主河道长145.6 km,主河道纵比降1.09‰,平均高程385 m。濂江流域主要地貌为中低山丘陵,主河床弯曲延伸,流域主要自然灾害为洪涝与干旱灾害,洪水与暴雨发生季节一致。

流域内的主要监测站点为羊信江水文站(25°18′21″N,115°23′15″E),该站位于安远县版石镇羊信江村,控制流域面积569 km^2,控制范围全部位于安远县境内。本研究选取该水文站的控制范围作为研究区域,流域概况及水文站、雨量站点分布如图1所示。

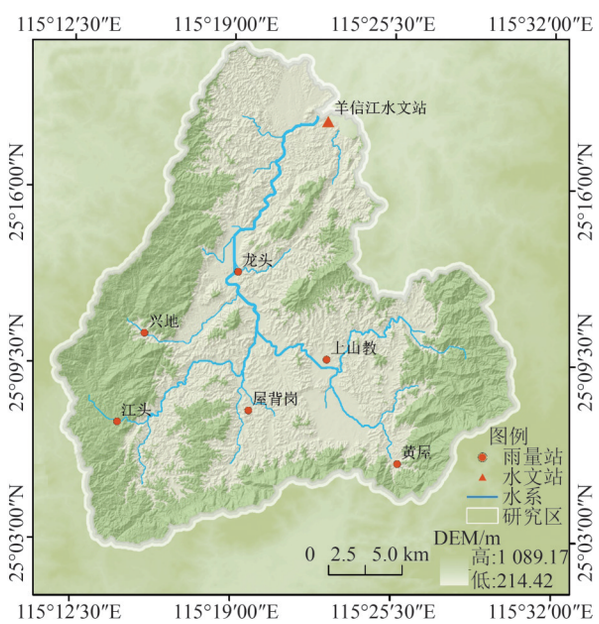


图1 研究区域概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源及预处理

本研究采用的水文气象资料包括羊信江水文站2000—2020年逐日径流数据,从中选取6场洪水事件;降雨气象数据来源于流域内兴地、江头、屋背岗、黄屋和上山教等配套雨量站,再通过泰森多边形法求得流域面平均雨量[18]。洪水事件摘录于羊信江水文站的逐小时实测数据。DEM(digital elevation model)数据源于地理空间数据云平台分辨率30 m×30 m的高程数据;土壤质地数据来源于联合国粮食及农业组织的世界土壤数据库;土地利用数据来自中国科学院资源环境数据与资源中心,空间

分辨率为30 m×30 m。

由于原始空间分辨率30 m×30 m的DEM数据无法满足HEC-RAS（river analysis system）模型二维模拟的精度需求，将其重采样为5 m，采用平滑算法[19]修正河底高程点，完成河道高程的重构。

2　研究方法

2.1　HEC-HMS水文模型

HEC-HMS（hydrologic modeling system）是被广泛应用于我国洪水预报工作中的半分布式水文模型[20-21]。该模型中，产流计算采用SCS（Soil Conservation Service）曲线法，通过计算降雨损失获得净雨量；直接径流计算采用斯奈德单位线法模拟地面汇流；流域基流情况采用衰退法描述；河道水流演算采用考虑河段特征的马斯京根法。

本研究涉及的模型参数包括径流曲线数CN、洪峰延时t、峰值系数C_p、衰减系数k、峰值比、河道传播时间K和流量比重因子X等。采用修正后的Morris筛选法[22]对模型全局敏感性进行分析，结果表明，对洪峰流量和径流深影响最为显著的是CN，该参数由流域前期土壤湿度等下垫面条件决定。考虑流域前5 d的降雨量，将土壤湿度分为AMC（antecedent moisture condition）Ⅰ（较干）、AMC Ⅱ（一般）或AMC Ⅲ（湿润）3种状态，具体如表1所示。

表 1　土壤前期湿度划分

Table 1　Division of antecedent soil moisture

前期土壤湿度等级	前期降雨指数/mm	
	生长期	休眠期
AMC Ⅰ（较干）	＜35.36	＜12.70
AMC Ⅱ（一般）	[35.36，53.34)	[12.70，27.94)
AMC Ⅲ（湿润）	≥53.34	≥27.94

根据《水文情报预报规范》GB/T 22482—2008，洪水的峰值流量和洪量预报的许可误差均应在实际观测值的20％范围内，峰现时间的许可误差应在±3 h范围内。洪水预报过程与实测过程之间的吻合程度采用纳什效率系数（Nash-Sutcliffe efficiency，NSE）来评定，取值范围为0～1，越接近于1，表示预报过程与实测过程的吻合程度越高。

本文选择最大洪峰流量相对误差、当次洪水峰现时间误差和NSE 3个传统指标对模拟结果进行综合评价，最终根据确定性系数（deterministic coefficient，DC）及预报合格率（qualified rate，QR）将洪水预报精度分成甲、乙、丙3个等级，等级划分标准如表2所示。DC、QR的具体计算公式如下：

$$\mathrm{DC}=1-\frac{\sum_{a=1}^{N}(y_{sa}-y_{0a})^2}{\sum_{a=1}^{N}(y_{0a}-\bar{y}_0)^2} \tag{1}$$

$$\mathrm{QR}=\frac{n}{m}\times 100\% \tag{2}$$

式中：y_{sa}为模型模拟值；y_{0a}为实测值；$\bar{y}_0$为实测值的均值；N为资料系列长度；n为所选指标预报合格的次数；m为模拟预报总次数。

表 2　洪水预报精度等级划分

Table 2　Division of flood forecasting accuracy levels

预报精度等级	DC	QR/％
甲	＞0.9	≥85
乙	[0.7，0.9)	[70～85)
丙	[0.5，0.7)	[50，70)

2.2　HEC-RAS水动力模型

HEC-RAS被广泛应用于河流非恒定流模拟、水质分析、河道泥沙迁移等领域[23-24]。其洪水流量模拟模块基于一维能量方程，通过标准步推法推求水面线，公式如下：

$$Y_2+Z_2+\frac{a_2v_2^2}{2g}=Y_1+Z_1+\frac{a_1v_1^2}{2g}+h_e \tag{3}$$

式中：Y_1、Y_2分别为断面1、2的水深；Z_1、Z_2分别为对应断面的河道高程；v_1、v_2分别为通过对应断面的平均水流速度；a_1、a_2分别为对应断面的流速水头系数；g为重力加速度；h_e为水头损失。

二维非恒定流模拟的原理基于连续方程和动量方程，公式如下：

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=q_t \tag{4}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial(VQ)}{\partial x}+gA\left(\frac{\partial z}{\partial x}+e_s\right)=0 \tag{5}$$

式中：Q为流量；A为过水断面面积；q_t为侧向流量；x为沿流程坐标；t为时间；V为流速；z为水位；e_s为摩阻坡度。

2.3　洪水预警指标确定

通过HEC-HMS模型得到降雨径流关系，反推引发流域洪水的临界流量，对应的最小雨量即为动态临界警戒雨量[4]。前期土壤湿度不同，达到预警所需的降雨量也不同[25]，因此综合动态临界预警雨量P'由不同时段临界产流量Q_t及土壤最大蓄水能力S推断，计算公式如下：

$$P'=\frac{1}{2}\left(0.4S+Q_t+\sqrt{4Q_tS+Q_t^2}\right) \tag{6}$$

临界流量可根据流域出口断面的水位-流量关系来确定,公式如下:

$$Q = A \cdot v = A \cdot \frac{1}{n_r} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \tag{7}$$

式中:v为过流断面平均流速;n_r为糙率;R为水力半径;J为水面线比降。

3 结果及分析

3.1 水文模型结果及验证

基于流域特征,本研究采用HEC-HMS模型将濂江流域划分为6个子流域,分别标记为W10~W60,子流域水文节点分别标记为J1~J6,流域出口为J1,构建的水文模型概化情况如图2所示。基于羊信江水文站的实测数据对模型进行验证与参数优化,采用6场摘录洪水事件的逐小时降雨、流量数据模拟流域降雨径流过程,洪号分别为20030413、20060608、20060715、20110516、20160321、20190610,其中,将洪号为20030413、20060608、20060715与20110516的4场洪水作为模型率定期、洪号为20160321与20190610的2场洪水作为验证期。模型参数率定使用HEC-HMS内嵌的内尔米德(Nelder-Mead)算法作为优化算法,选取残差权重均方根误差(weighted root mean square error, weighted RMSE)作为目标函数,通过优化算法与人工试算率定出合适的流域水文参数,率定期与验证期场次洪水的模拟与实测结果对比如表3所示。

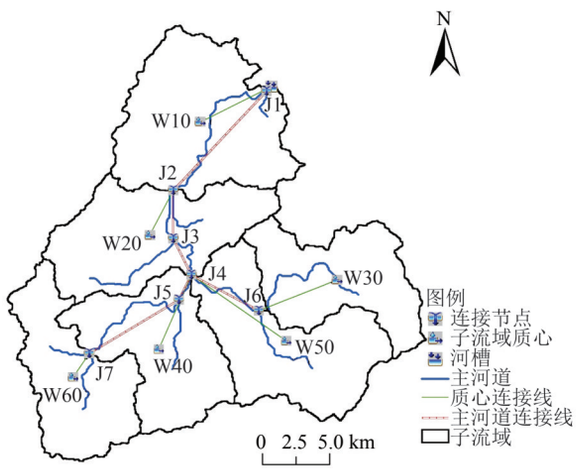


图2 濂江流域HEC-HMS模型概化图

Fig.2 Generalized diagram of the HEC-HMS model in the Lianjiang River Basin

表3 濂江流域水文模型模拟结果分析

Table 3 Analysis of simulation results of the hydrological model in the Lianjiang River Basin

模拟阶段	洪水场次	实测洪峰流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	模拟洪峰流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	洪峰流量相对误差/%	实际峰现时刻	模拟峰现时刻	峰现时差/h	NSE	是否合格
率定期	20030413	482.7	501.7	3.9	17:00	17:00	0	0.879	是
	20060608	404.4	420.2	3.9	21:00	22:00	−1	0.911	是
	20060715	365.0	400.5	10.0	19:00	19:00	0	0.862	是
	20110516	267.0	291.6	9.2	11:00	13:00	−2	0.780	是
验证期	20160321	595.0	622.7	4.5	01:00	23:00	2	0.885	是
	20190610	342.0	353.4	3.3	13:00	13:00	0	0.799	是

由表3的模拟结果可知,率定期4场洪水的NSE在0.780~0.920范围内,洪峰流量相对误差在3%~10%之间,峰现时差的绝对值为0~2 h,平均NSE为0.858;验证期2场洪水的NSE在0.790~0.890范围内,洪峰流量相对误差在3%~5%之间,峰现时差的绝对值为0~2 h,平均NSE为0.842。依照式(2)对指标合格率进行验算,各场次模拟指标的误差均处于许可范围之内,6场洪水的预报结果全部合格,合格率达100%,平均NSE达0.853,洪水预报精度等级达乙级。其中,径流洪峰流量模拟效果较好,与实测洪峰流量的相对误差均在10%以内,平均误差为5.8%,说明模型能较好地模拟流域出口洪水峰值流量;峰现时差较大,在0~2 h之间,平均峰现时差为0.83 h,模拟效果良好。

如图3所示,在降雨径流模拟过程中,模拟洪水过程线与实测流量过程线拟合情况较好。其中,拟合效果最佳的是200060608场次洪水,NSE为0.911,达到甲级预报精度;拟合效果最差的是20110516场次洪水,NSE为0.780,达乙级预报精度。在多场洪水到达前期,模拟得到的流量均比实测流量大,主要原因是流域汇流时间较短,洪水涨幅大、涨速快,且这几场洪水均发生在流域汛期,因此在模型参数率定过程中,本研究将河道基流量设定为50 m^3/s。另外,20110516场次洪水为多峰型洪水,不确定性较大,流量涨落幅度大,洪水过程线较为复杂,且洪峰流量为6场洪水中最小,而模型在

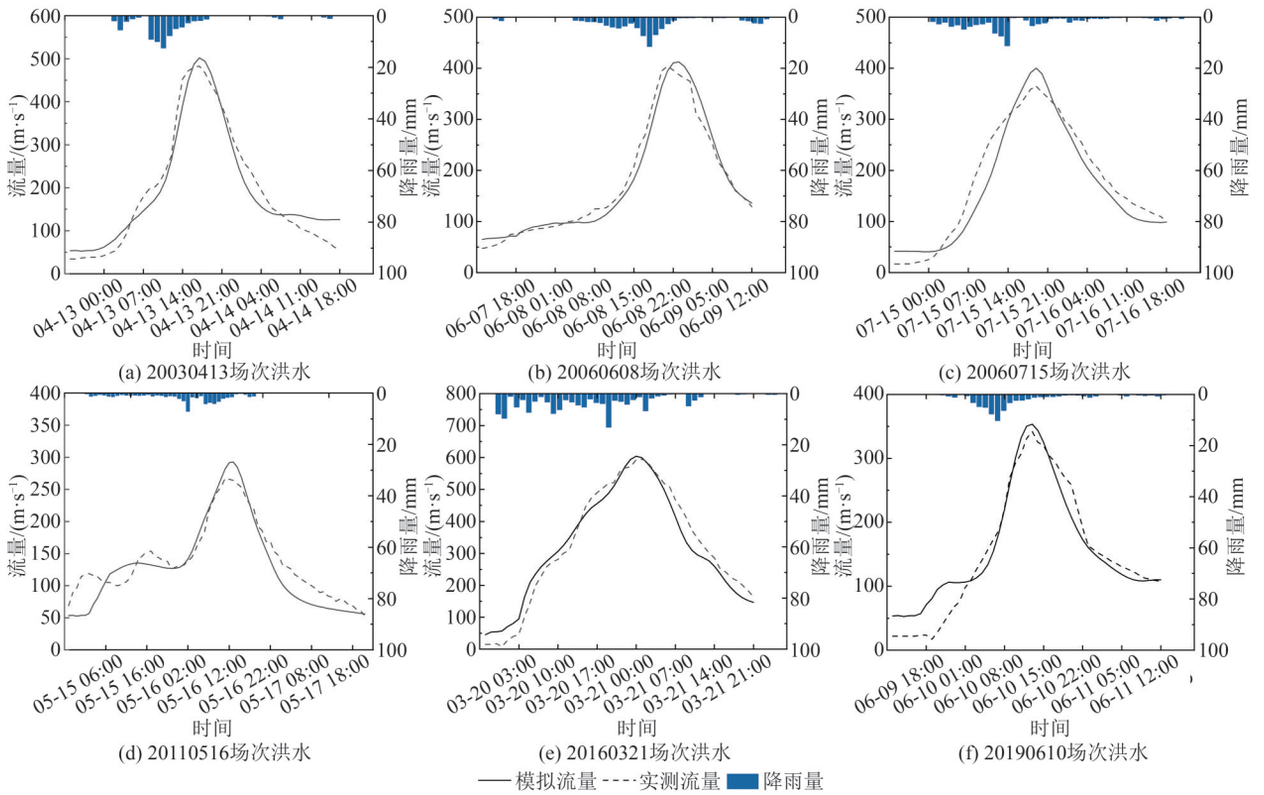


图 3　濂江流域场次洪水降雨径流过程模拟

Fig.3　Simulation of rainfall-runoff processes for event floods in the Lianjiang River Basin

参数率定时会更偏向于拟合流域中的较大洪水，因此该场次的模拟精度较低。

总体而言，HEC-HMS模型在濂江流域有较好的适用性，模拟结果在许可误差范围内，满足预报精度要求，能较好地反映流域的洪水过程，可为后续HEC-RAS水动力模型提供稳定的水文节点输入条件，也为流域的洪水预警临界雨量提供了技术支撑。

3.2　水动力模型洪水演进结果

本研究从6场洪水中选取NSE最高的两场（率定期及验证期各1场，洪号分别为20060608和20160321），提取HEC-HMS水文模型输出断面节点J5、J6的径流时间序列，其中，节点J5对应河道Up2，节点J6对应河道Up1，叠加2场洪水发生时的降雨情况，重现羊信江水文站控制流域上游行洪叠加降雨的情况下W10、W20两个子流域主河道的洪水淹没状况。HEC-RAS的模拟时间与HEC-HMS相同，模拟时长48 h，时间步长为15 min。

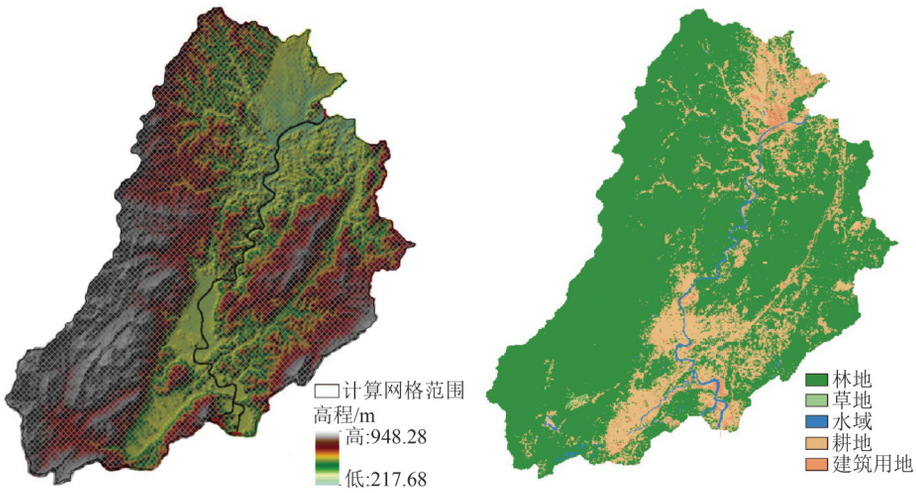
考虑到二维网格绘制越精细，模拟结果越准确，计算时长也越长。本研究将水域河道处的网格设置为10 m×10 m，水域以外区域的网格设置为50 m×50 m，以精准提高子流域泛洪的计算效率。模型共划分141 565个网格，子流域网格划分情况如图4(a)所示。在收集濂江流域土地利用状况的前提下，对子流域实地情况进行调查，主要考虑林地、草地、耕地、建筑用地及水域5类土地利用情况，如图4(b)所示。

开展水力模拟时，本研究对河道、河漫滩及各类土地覆被类型分别赋予曼宁系数n，以表示地貌变化对水流阻力的影响，各土地利用类型的曼宁系数取值情况如表4所示。

20060608场次洪水演进过程如图5所示。2006年6月8日00:00—12:00，流域内降雨经历了短时间的突增，随着上游边界流量加大，河道内水深逐渐增大，洪水流逐步向下游推进。本场洪水最大降雨情况发生于6月8日下午16:00之后，洪峰时刻为当日21:00，主流洪水到达濂江W10和W20子流域经历了约6 h，在6月9日00:00前产生最大溢流，洪水自发生后第9 h后开始消退。

20160321场次洪水演进过程如图6所示。2016年3月20日09:00—21:00，流域发生持续强降雨，最大降雨量出现在3月20日19:00前，高地形地区的雨水向河道、平原汇集，洪峰出现在3月21日00:00，最大溢流产生于3月21日09:00之前。

由2场洪水的水动力模型二维非恒定流模拟演进过程可知，模型可在宏观程度上刻画流域洪水演



(a) 子流域网格划分情况 (b) 子流域土地利用现状

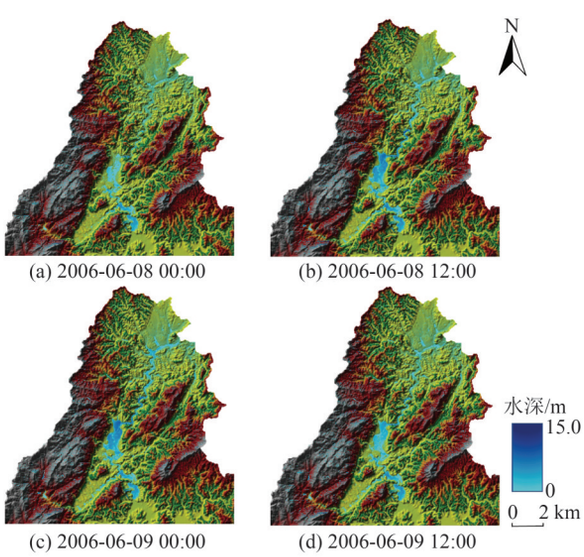
图 4 耦合 HEC-RAS 的 W10 与 W20 子流域模型

Fig.4 W10 and W20 sub-basin models coupled with HEC-RAS

表 4 不同土地利用类型的曼宁系数取值情况

Table 4 Values of Manning coefficient for different land uses

土地利用类型	相关描述	n
林地	杂草丛生的灌木丛	0.060
草地	矮草丛生	0.035
耕地	水田、旱地成熟作物	0.045
建筑用地	村庄、城镇住房	0.070
水域	河床卵石多	0.035



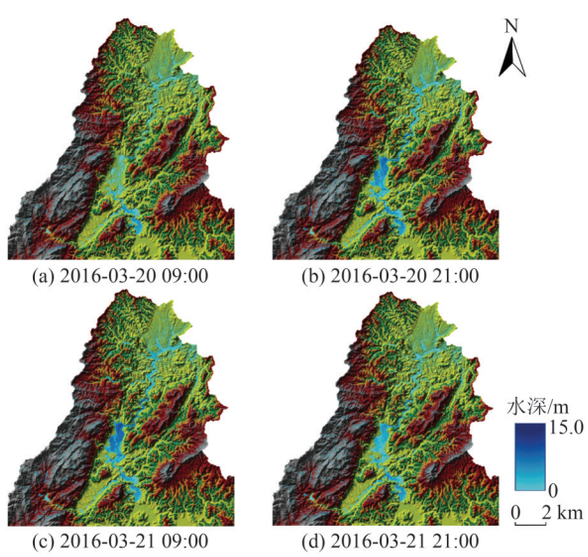
(a) 2006-06-08 00:00 (b) 2006-06-08 12:00

(c) 2006-06-09 00:00 (d) 2006-06-09 12:00

图 5 20060608 场次洪水演进过程

Fig.5 Evolution process of flood 20060608

进过程。洪水对河岸的威胁程度与洪峰流量的大小直接相关,最大溢流产生时,河流两侧平原地区基本被淹没,对周边的农田耕地及居民点产生威胁。2 场洪水事件的易淹区域相似,主要集中于子



(a) 2016-03-20 09:00 (b) 2016-03-20 21:00

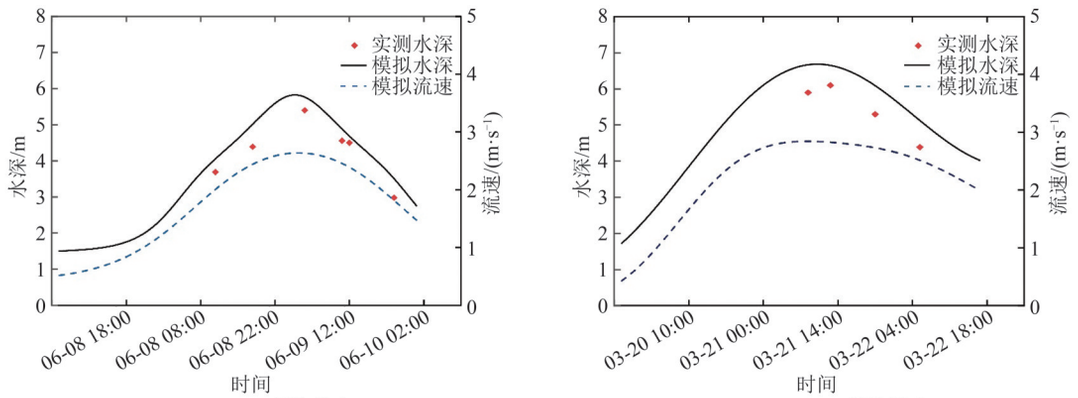
(c) 2016-03-21 09:00 (d) 2016-03-21 21:00

图 6 20160321 场次洪水演进过程

Fig.6 Evolution process of flood 20160321

流域中部地势低洼、坡度平坦的车头镇沿岸耕作区。不同淹没情况主要体现在淹没水深的不同,相比 20060608 场次洪水,20160321 场次洪水降雨历时更长、洪峰流量更大,最大洪峰流量达 595 m^3/s,已超过成灾流量(563 m^3/s),致使濂江流域发生了较为严重的淹没,对车头镇等平原、洼地地区的整体淹没水深更大,局部地区已达 5 m,对流域下游地区产生的威胁更大。

提取羊信江水文站控制断面的河道水位及流速变化信息,从图 7 中控制断面水深与流速的模拟结果可以看出,HEC-RAS 模拟得到的水深与实测水深的变化趋势基本一致,模拟的最大水深均出现在实测最大水深之前。在 20060608 场次洪水中,该



(a) 20060608场次洪水　　(b) 20160321场次洪水

图 7　水文站控制断面两场洪水水位及流速信息

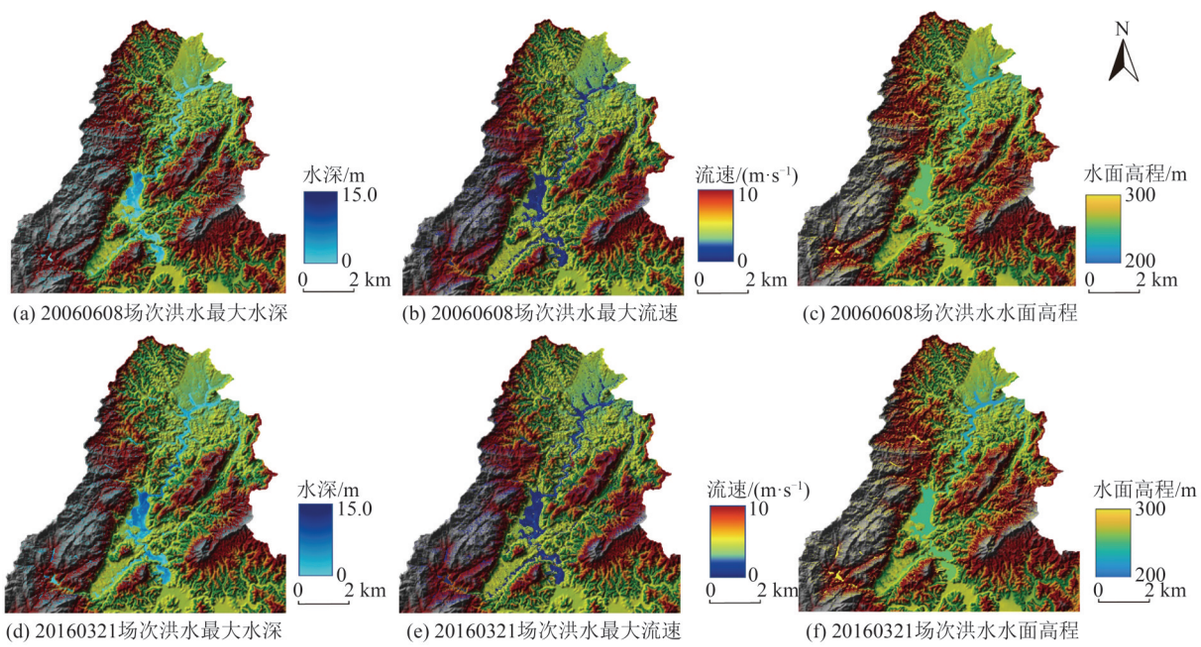
Fig.7　Water level and flow velocity information of two flood events at the hydrological station control section

断面模拟得到的最大水深为 5.97 m，实际最大水深为 5.40 m，两者相对误差为－9.55%；20160321 场次洪水中，模拟得到的最大水深为 6.82 m，实际最大水深为 6.10 m，两者相对误差为－10.56%，两场洪水的模拟水深与实测水深误差均在 10% 左右，与实际情况基本吻合。

从图 8 中 2 场洪水事件的最大淹没模拟结果可知，控制断面以上淹没范围最广的区域是车头镇岗下、龙头等村。2 场洪水的受淹区域相同，居民点分布密集，河道两岸农田耕地大量被淹，淹没水深主要在 0.5～1.0 m，部分低洼地区达 2.0～3.0 m。20160321 场次洪水整体的淹没水深大于 20060608 场次洪水。河岸农田耕地等受淹区域流速不高，基本在 1 m/s 以下，但河道中洪水流速较大，基本在 4～6 m/s 之间，最大流速达 10 m/s。

2 场洪水事件的最大水深及最大流速均产生于子流域内版石镇湘州村，该村落河道蜿蜒曲折，河槽狭窄，突变处较多。版石镇河岸两侧堤防的防洪能力为 10 a 一遇，设计洪峰流量为 821 m^3/s，设计洪水位为 226 m，2 场洪水均未达到堤防的防洪阈值，因此洪水主要集中于河道中，未能漫过堤岸。但是叠加降雨工况时，部分雨水汇入地势较低的地区，造成局部地区淹没水深存在差异。

总体而言，濂江流域在 2 场暴雨洪水过程中表现为洪水历时长、消退慢、淹没范围广。威胁最大处位于车头镇龙头村与岗下村，同时，版石镇湘州



(a) 20060608场次洪水最大水深　(b) 20060608场次洪水最大流速　(c) 20060608场次洪水水面高程

(d) 20160321场次洪水最大水深　(e) 20160321场次洪水最大流速　(f) 20160321场次洪水水面高程

图 8　洪水事件的最大淹没情况

Fig.8　Maximum inundation situation of the flood events

村也为重点防范区域,此处为流域洪水流速与水深最大值的产生位置。需注意防范洪水对河岸堤脚的冲刷作用,这可能造成堤防失稳和坍塌,应采取有效措施加固河岸堤脚,同时,对于易灾地区还要做好预警和疏散工作。

3.3 洪水预警研究

考虑流域实测断面及前期下垫面情况,羊信江水文站控制断面记录的警戒水位为197.5 m,由水位-流量关系曲线可得断面预警流量为470 m^3/s。羊信江水文站所处的版石镇设有防洪标准10 a一遇的堤防,洪水漫堤时会对周边村落造成灾害。本研究中水文站控制断面成灾水位为198.0 m,危险流量采用成灾水位对应的控制断面流量563 m^3/s。对于该流域,超警戒水位以上的不同水位会对子流域产生不同程度的洪水淹没,其警戒水位对应的流量为临界流量,对应雨量即为引发流域洪水的临界雨量。本研究以危险流量对应的临界流量为洪水预警的立即转移指标、以临界流量对应的临界雨量为洪水预警的准备转移指标。

濂江流域的汇流时间较短,自降雨至出现洪峰一般为4~8 h,本研究在分析降雨洪水过程的基础上确定1、3、6、24 h 4个预警时段。由于流域前期不同含水量的土壤经历不同程度的降雨量时产生的径流量不同[26],本研究将流域土壤含水状况分为3种状态,对应SCS曲线径流法计算流域产流的3种CN值,如表5所示。以《江西省暴雨洪水查算手册》中的24 h雨型分配结果为降雨过程,代入HEC-HMS水文模型中,最终得到不同流域状态下不同预警时段的临界雨量,如表6所示。流域前期土壤湿度条件是影响濂江流域动态临界雨量的重要因素。土壤处于湿润状态时,临界雨量最小,更易发生超临界的洪水事件;土壤处于较干状态时,临界雨量较大,即在降雨发生时流域内土壤的可持水量更大,可以延缓洪水的到来。不同预警时段对应的临界雨量随着土壤前期饱和度的增加而减少,这是因为流域产流机制对前期土壤饱和度和临界雨量的关系有影响,当土壤趋于饱和时,少量且集中的降水即可产生超风险承载力的径流量,进而产生不同程度的洪水。

表5 濂江流域不同土壤湿润状态下的CN值

Table 5 CN values under different antecedent soil moisture conditions in the Lianjiang River Basin

子流域编号	CN Ⅰ	CN Ⅱ	CN Ⅲ
W10	68.36	85.66	93.33
W20	68.01	85.42	93.21
W30	68.11	85.49	93.24
W40	67.65	85.17	93.08
W50	67.03	84.74	92.86
W60	68.29	85.61	93.30

表6 不同土壤含水状态对应的临界雨量

Table 6 Critical rainfall corresponding to different antecedent soil moisture conditions

预警时段/h	准备转移临界雨量/mm			立即转移临界雨量/mm		
	AMC Ⅰ较干	AMC Ⅱ一般	AMC Ⅲ湿润	AMC Ⅰ较干	AMC Ⅱ一般	AMC Ⅲ湿润
1	26	22	20	32	29	24
3	32	28	25	39	33	31
6	41	39	33	49	43	40
24	72	63	60	80	71	64

4 讨论

在水文水动力模型耦合的过程中,从产流到汇流再到河道演算是单向过程,因此,水文参数的确定对水动力模型结果的精度有直接影响。参数率定和验证是评判模型精度的重要环节。在众多水文模型中,HEC-HMS模型物理机制明确,在参数率定方面具有较为突出的优势,而水动力模型通常是对河道水流演进、淹没等突发事件进行研究,蒸发、渗水等影响在这些突发过程中可忽略,因而HEC-RAS模型对参数的考虑比HEC-HMS模型少[8]。

HEC-HMS模型在濂江流域的适用性较高,将其提供的水文曲线作为HEC-RAS的上游边界条件,可对淹没过程进行可视化处理,得到流域洪水淹没范围、河道水深、流速及洪水水面线分布情况,从而加强对下垫面条件的研究,为后续洪涝灾害预警研究提供技术支撑。

然而,本研究对基础数据的考虑还不够充分,雨量站分布不能充分反映实际降雨情况,也未考虑河段周边低洼地带的阻蓄作用等,这些原因综合导致了模拟结果存在不确定性。因此,在今后研究中,要进一步优化模型参数,加强降雨监测,综合考虑水文及水动力模型的优缺点,例如将HEC-HMS模型成熟的降雨径流理论融入HEC-RAS二维模型中,实现模型内部的主动、双向耦合,推动中小河流由水文要素预报向洪水淹没影响情况预报转变,最终实现洪水演进及精准预警同步进行。

5 结论

本研究分析了子流域尺度场次洪水事件的水文、水动力过程,构建了水文水动力耦合模型,以采

集到的成灾水位、流量信息为基础，推求濂江流域不同状态下的动态临界雨量。主要结论如下：

1）HEC-HMS模型模拟濂江流域6场洪水事件结果理想，模拟过程与实测过程拟合程度高，洪峰流量平均误差为5.8%，峰现时间平均误差为0.83 h，平均NSE为0.853，达到乙级洪水预报精度等级。

2）以水文曲线作为泛洪模拟的边界条件，准确划分HEC-RAS模型的研究区域，综合叠加场次降雨模拟流域泛洪结果，获得最大淹没水深、最大流速和水面高程分布情况。2场洪水的模拟水深较实测结果相差不大，误差分别为－9.55%和－10.56%，说明该水文水动力耦合模型对于濂江流域降雨径流模拟及洪水演进具有可靠性。

3）基于已率定的水文模型反推出洪水灾害预警的动态临界雨量，不同预警时段对应的动态临界雨量随着土壤前期饱和度的增加而减少。

参考文献：

[1] 任智慧，桑燕芳，杨默远，等. 暴雨山洪灾害预警方法研究进展[J]. 地理科学进展，2023，42(1)：185-196.
REN Zhihui，SANG Yanfang，YANG Moyuan，et al. Progress of research on the methods for the early warning of mountain flash flood disasters[J]. Progress in Geography，2023，42(1)：185-196.

[2] 刘志雨，刘玉环，孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J]. 河海大学学报(自然科学版)，2021，49(1)：1-6.
LIU Zhiyu，LIU Yuhuan，KONG Xiangyi. Problems，strategies and key technology research of flood forecasting and early warning for small and medium-sized rivers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences)，2021，49(1)：1-6.

[3] MOGIL H M，MONRO J C，GROPER H S. NWS's flash flood warning and disaster preparedness programs [J]. Bulletin of the American Meteorological Society，1978，59(6)：690-699.

[4] 刘志雨，杨大文，胡健伟. 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)，2010，46(3)：317-321.
LIU Zhiyu，YANG Dawen，HU Jianwei. Dynamic critical rainfall-based torrential flood early warning for medium-small rivers[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science)，2010，46(3)：317-321.

[5] 练继建，杨伟超，徐奎，等. 山洪灾害预警研究进展与展望[J]. 水力发电学报，2018，37(11)：1-14.
LIAN Jijian，YANG Weichao，XU Kui，et al. Advances and prospect of flash flood forecasting[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2018，37(11)：1-14.

[6] 黄国如，陈文杰，喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展，2021，32(3)：334-344.
HUANG Guoru，CHEN Wenjie，YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model[J]. Advances in Water Science，2021，32(3)：334-344.

[7] 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.

[8] 沈泽宇，丁永生，孔乔. 降雨径流与洪水淹没模型耦合的应用研究[J]. 地球信息科学学报，2021，23(8)：1473-1483.
SHEN Zeyu，DING Yongsheng，KONG Qiao. Application study of coupling rainfall-runoff modeling and floodplain inundation mapping[J]. Journal of Geo-Information Science，2021，23(8)：1473-1483.

[9] 曾志强，杨明祥，雷晓辉，等. 流域河流系统水文-水动力耦合模型研究综述[J]. 中国农村水利水电，2017(9)：72-76.
ZENG Zhiqiang，YANG Mingxiang，LEI Xiaohui，et al. A review of hydrological-hydrodynamic coupling models for river-basin systems[J]. China Rural Water and Hydropower，2017(9)：72-76.

[10] 徐宗学，叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟：原理、模型与展望[J]. 水利学报，2021，52(4)：381-392.
XU Zongxue，YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes：principle，models and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2021，52(4)：381-392.

[11] ZHAO L，SANG G Q. Flood inundation analysis of Xun River based on 1D and 2D hydrodynamic coupling model[J]. Journal of Physics：Conference Series，2022，2271(1)：012005.

[12] 宋利祥，徐宗学. 城市暴雨内涝水文水动力耦合模型研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版)，2019，55(5)：581-587.
SONG Lixiang，XU Zongxue. Coupled hydrologic-hydrodynamic model for urban rainstorm water logging simulation：recent advances[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science)，2019，55(5)：581-587.

[13] MORIANOU G G, KOURGIALAS N N, KARATZAS G P, et al. Hydraulic and sediment transport simulation of koiliaris river using the MIKE 21C model[J]. Procedia Engineering, 2016, 162: 463-470.

[14] TINGSANCHALI T, SUPHARATID S. Experimental investigation and analysis of HEC-6 river morphological model[J]. Hydrological Processes, 1996, 10(5): 747-761.

[15] MCMILLAN H K, BRASINGTON J. End-to-end flood risk assessment: a coupled model cascade with uncertainty estimation[J]. Water Resources Research, 2008, 44(3): 2007WR005995.

[16] HOANG L P, BIESBROEK R, TRI V P D, et al. Managing flood risks in the Mekong Delta: how to address emerging challenges under climate change and socioeconomic developments[J]. Ambio, 2018, 47(6): 635-649.

[17] 申言霞, 周琦, 段艳华, 等. 基于多重网格的地表水文与二维水动力动态双向耦合模型研究[J]. 水利学报, 2023, 54(3): 302-310.
SHEN Yanxia, ZHOU Qi, DUAN Yanhua, et al. Dynamic bidirectional coupling of surface hydrological and 2D hydrodynamic models based on multi-grid technique [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(3): 302-310.

[18] 王政荣, 韩俊太, 杨雨亭. 耦合不确定性的山洪灾害风险预警方法及应用[J]. 水力发电学报, 2023, 42(6): 30-39.
WANG Zhengrong, HAN Juntai, YANG Yuting. Coupled uncertainty of flash flood forecasting method and its application[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(6): 30-39.

[19] CLEVELAND W S, DEVLIN S J. Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting[J]. Journal of the American Statistical Association, 1988, 83(403): 596-610.

[20] 刘兴智. 基于HEC-HMS的小流域洪水预报模型研究[J]. 水电与新能源, 2019, 33(8): 70-74.
LIU Xingzhi. Flood forecasting model for small watersheds based on HEC-HMS[J]. Hydropower and New Energy, 2019, 33(8): 70-74.

[21] 袁玉, 方国华, 陆承璇, 等. 基于景观生态学的城市化背景下洪灾风险评估[J]. 地理学报, 2020, 75(9): 1921-1933.
YUAN Yu, FANG Guohua, LU Chengxuan, et al. Flood risk assessment under the background of urbanization based on landscape ecology[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(9): 1921-1933.

[22] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161-174.

[23] SHABANI A, WOZNICKI S A, MEHAFFEY M, et al. A coupled hydrodynamic (HEC-RAS 2D) and water quality model (WASP) for simulating flood-induced soil, sediment, and contaminant transport[J]. Journal of Flood Risk Management, 2021, 14(4): e12747.

[24] MARCINKOWSKI P, MIROSŁAW-ŚWIĄTEK D. Modelling of climate change impact on flow conditions in the lowland anastomosing river[J]. PeerJ, 2020, 8: e9275.

[25] 韩俊太, 王政荣, 杨雨亭. 基于动态临界雨量的小流域山洪灾害分级预警[J]. 水力发电学报, 2022, 41(9): 67-76.
HAN Juntai, WANG Zhengrong, YANG Yuting. Flash flood grading and warning based on dynamic rainfall thresholds[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(9): 67-76.

[26] 马天航, 丁锐, 黄尔, 等. 基于HEC-HMS模型的通口河流域洪水预警研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(12): 80-89.
MA Tianhang, DING Rui, HUANG Er, et al. Research on flood warning of Tongkou River basin based on HEC-HMS model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(12): 80-89.

(贾丽娜)