

马昊然, 张海荣, 李晓阳, 等. 基于 VIC 模型的三峡库区流域小时尺度实时洪水预报[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 309-318. MA H R, ZHANG H R, LI X Y, et al. Hourly scale real-time flood forecasting in the Three Gorges Reservoir basin based on the VIC model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 309-318. (in Chinese)

基于 VIC 模型的 三峡库区流域小时尺度实时洪水预报

马昊然^{1,2}, 张海荣¹, 李晓阳², 顾学志², 曹辉¹, 鲍正风¹, 叶磊², 怀晓伟^{3,4}

(1. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002; 2. 大连理工大学建设工程学院, 辽宁 大连 116024;
3. 湖南防灾科技有限公司, 长沙 410129; 4. 电网防灾减灾全国重点实验室, 长沙 410129)

摘要: VIC 模型在流域面积大于 3 000 km² 的大型流域日或月尺度洪水模拟中表现出良好的适用性, 而在大型流域小时尺度实时洪水预报过程中的适用性尚未得到验证。以三峡库区大型流域为例, 通过建立小时尺度 VIC 分布式洪水预报模型, 构建三峡库区流域实时滚动洪水预报方案, 将 VIC 分布式洪水预报模型实地化部署并应用于 2022 及 2023 年三峡库区实时洪水预报。结果表明: VIC 模型应用于 2014—2021 年三峡库区各子流域历史洪水模拟, 率定期和验证期的洪量、洪峰平均合格率均在 80% 以上, 确定性系数均值在 0.70 以上, 构建的 VIC 分布式洪水预报模型在三峡库区及其子流域洪水模拟中表现出良好的适用性; 在 2022 及 2023 年三峡库区 4 场典型洪水的实时洪水预报中, 径流深和洪峰的平均相对误差达到 16.3% 和 5.0%, 重点产流区产流量平均相对误差为 7.8%, 能够准确把握库区重点产流区的洪量及来水过程, 因此 VIC 模型在大型流域小时尺度实时洪水预报中具有较大的应用潜力。

关键词: VIC 模型; 实时洪水预报; 小时尺度; 三峡库区

中图分类号: TV124 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0033

流域防洪作为智慧水利体系业务应用的核心组成部分, 通过构建具有预报、预警、预演、预案(“四预”)功能的流域防洪预报系统, 能够有效提高洪水灾害防御能力。其中预报是“四预”的基础, 建立以流域为单元的实时洪水预报系统能为防洪预警与水工程调度赢得先机, 对于提升流域防洪水平具有重要意义^[1]。水文模型是流域实时洪水预报系统的核心, 根据对流域的离散程度将水文模型分为集总式模型与分布式模型。集总式模型将流域作为一个整体来模拟降雨径流过程^[2], 特点是模型结构简单、参数数量少, 因此在实时洪水预报中得到广泛应用。目前常用的集总式模型包括新安江模型^[3]、水箱模型^[4]、大伙房模型^[5]等。近年来, 大型流域防洪对洪水预报时空精细化水平的需求不断提高, 集总式模型无法充分考虑降雨及下垫面时空分布的

不均匀性, 难以适用当前的大型流域实时洪水预报^[6], 随着遥感及地理信息技术在水文领域的广泛应用, 降雨及下垫面资料获取的来源与数据精度有了较大的改善, 因此分布式水文模型逐渐发展为水文模型领域的研究热点^[7], 目前国内外常用的分布式水文模型包括 SWAT 模型^[8]、VIC 模型^[9]、HEC-HMS 模型^[10]、分布式新安江模型^[11]、GBHM 模型^[12]等, 以上模型在日或月尺度的水资源评估^[13]、水质模拟^[14]、非点源污染模拟^[15]等领域取得较好的径流模拟精度。

受益于卫星遥测信息、流域地面观测站点等资料的丰富及累积, 水文及下垫面资料情况能够满足分布式水文模型的小时洪水预报建模需求。目前已有众多学者尝试采用分布式水文模型开展洪水预报研究: 邢丽雪等^[16]采用分布式流溪河模型进行

收稿日期: 2023-06-29 修回日期: 2024-01-19 网络出版时间: 2024-03-21

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240319.1045.002>

基金项目: 水利部重大科技项目(SKS-2022004)

作者简介: 马昊然(1999—), 男, 山东滨州人, 主要从事水文预报研究。E-mail: 965297063@mail.dlut.edu.cn

通信作者: 张海荣(1990—), 男, 湖北宜昌人, 工程师, 博士, 主要从事水文智慧预报预测研究。E-mail: zhang_hairong@ctg.com

新丰江水库入库洪水预报研究,并且量化了不同空间尺度建模对预报精度及计算效率的影响,模拟效果基本满足实时洪水预报的精度要求;范火生^[17]建立基于栅格的分布式新安江模型并应用于三岔河流域的洪水预报,验证了分布式新安江模型在洪水预报中的适用性;吴天蛟^[18]采用 GBHM 模型开展三峡库区洪水预报,并量化了库区来水对三峡水库入库流量的影响。已有研究^[6]表明,分布式水文模型在流域洪水模拟中表现出良好的模型性能,在实时洪水预报中具有较大的应用潜力

VIC 模型作为在气候变化及水资源管理领域广泛应用的分布式水文模型,在国内柳江流域^[19]、涪江流域^[20]、嘉陵江流域^[21]等湿润地区大型流域日或月尺度的径流模拟中表现出较好的模型性能,然而 VIC 模型原有单位线汇流方法的时间尺度为日尺度^[22],限制了其在小时尺度洪水预报中的发展与应用。为了满足小时尺度汇流计算的需求,本文基于李晓阳等^[23]提出的 VIC 小时尺度汇流模型,构建实时滚动洪水预报方案,实现 VIC 小时尺度模型在大尺度流域实时洪水预报中的应用。

三峡水利枢纽工程在长江流域防洪工作中占据重要地位,其中三峡库区区间来水是入库洪水的重要组成部分,由于近年来三峡库区极端降水频发且强度较大^[24],对三峡库区区间洪水预报提出高精度、精细化的需求。目前,三峡水利枢纽梯级调度通信中心(以下简称“三峡梯调中心”)部署了基于新安江模型的长江上游流域水文预报系统^[25],为进一步丰富预报手段,完善预报体系,本研究针对三峡库区典型的地形地貌及气候特征,构建 VIC 小时尺度洪水预报模型,充分反映三峡库区降雨及下垫面的时空分布特征,并实地化部署三峡库区实时洪水预报系统,接入三峡梯级调度中心的网格降雨产品,以 2022 年及 2023 年 4 场典型洪水过程为例,验证 VIC 模型在三峡库区实时洪水预报中的适用性。

1 研究方法

1.1 VIC 模型简介

VIC 模型是 Wood 等在 1992 年提出的一种基于网格划分的大尺度水文模型,由最初的 VIC-2L 发展为 VIC-3L 模型^[19]。VIC 模型将土壤划分为顶薄层、上层和下层,并采用土壤含水能力空间概率分布函数描述次网格内土壤的不均匀性对产流的影响,计算公式为

$$i = i_m [1 - (1 - A)^{1/b}] \quad (1)$$

式中: i 为点土壤蓄水能力; i_m 为最大土壤蓄水能力; A 为土壤蓄水能力小于等于 i 部分的面积; b 为土壤蓄水能力形状参数,表示土壤特性的空间变异性。

VIC 产流模型独立计算各网格的冠层截留、土壤入渗、蒸散发等过程,各网格间的产流计算过程互不干扰。VIC 汇流模型分别采用基于 Gamma 分布的坡面单位线和 IRF-UH 方法进行坡面汇流和河网汇流,得到流域内所有网格及流域出口处的流量过程^[22,26],然而其坡面经验单位线时间尺度为日,无法模拟小时尺度洪水过程。本研究采取基于二参数 Gamma 分布的概率单位线模拟坡面汇流过程,时间尺度为 1 ~ 24 h,与 VIC 模型的产流模块设置保持一致,实现 VIC 模型在小时尺度洪水预报中的应用。

1.2 VIC 模型实时洪水预报流程

VIC 模型实时滚动预报所需资料种类多、数据量较大,因此基于 VIC 模型进行实时滚动预报过程复杂,本研究设计了 VIC 模型实时洪水预报的流程,见图 1。实时滚动洪水预报过程主要包括数据接入、模型运算及结果输出。首先,数据接入包括实时滚动更新数据与静态参数文件两部分。实时滚动更新数据包括网格预报降雨产品及网格前期土壤含水量,其中网格预报降雨产品需读取降雨、气温及风速数据并进行网格降尺度处理,与 VIC 模型网格尺度保持一致;网格前期土壤含水量数据实时更新,每次预报前选取邻近一次预报的土壤含水量作为本次预报的前期土壤含水量,其目的是减少模型预热时间。静态输入的参数文件反映流域下垫面特征,包括地形参数、土壤参数、植被覆盖等下垫面参数文件。其次,模型运算部分根据前期建立的 VIC 模型参数组合进行模型的产汇流计算,产流主要分为直接径流计算与基流计算两部分,汇流可一次输出流域内所有网格单元及流域出口的洪水过程。

2 应用实例

2.1 三峡库区流域概况

三峡库区位于长江上游重庆至宜昌之间,东经 106°36' ~ 111°14',北纬 29°37' ~ 31°39',库区面积约 6.9 万 km²,见图 2。三峡水库入库流量主要由 4 部分组成,一是长江上游朱沱水文站来水,二是嘉陵江干流北碚水文站来水,三是乌江干流武隆水文站来水,四是三峡库区来水。其中朱沱、北碚、武隆水文站具有长系列实测水文资料,而区间来水却缺

乏实测资料。三峡库区呈狭长流域形状,气候受峡谷地形影响十分显著,常年雨量充沛,多年平均降雨量 1 150 mm,在大巴山附近易形成暴雨区,导致

库区下垫面及降雨具有明显的时空变异性,加之库区内江河纵横、水系发育,使得库区暴雨洪水规律十分复杂。

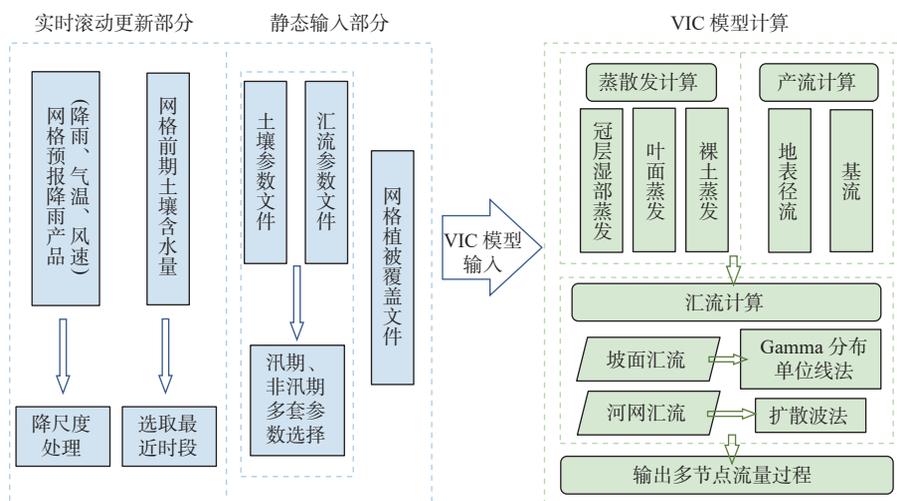


图 1 VIC 模型实时洪水预报系统流程

Fig. 1 Flow chart of VIC model real-time flood forecasting system

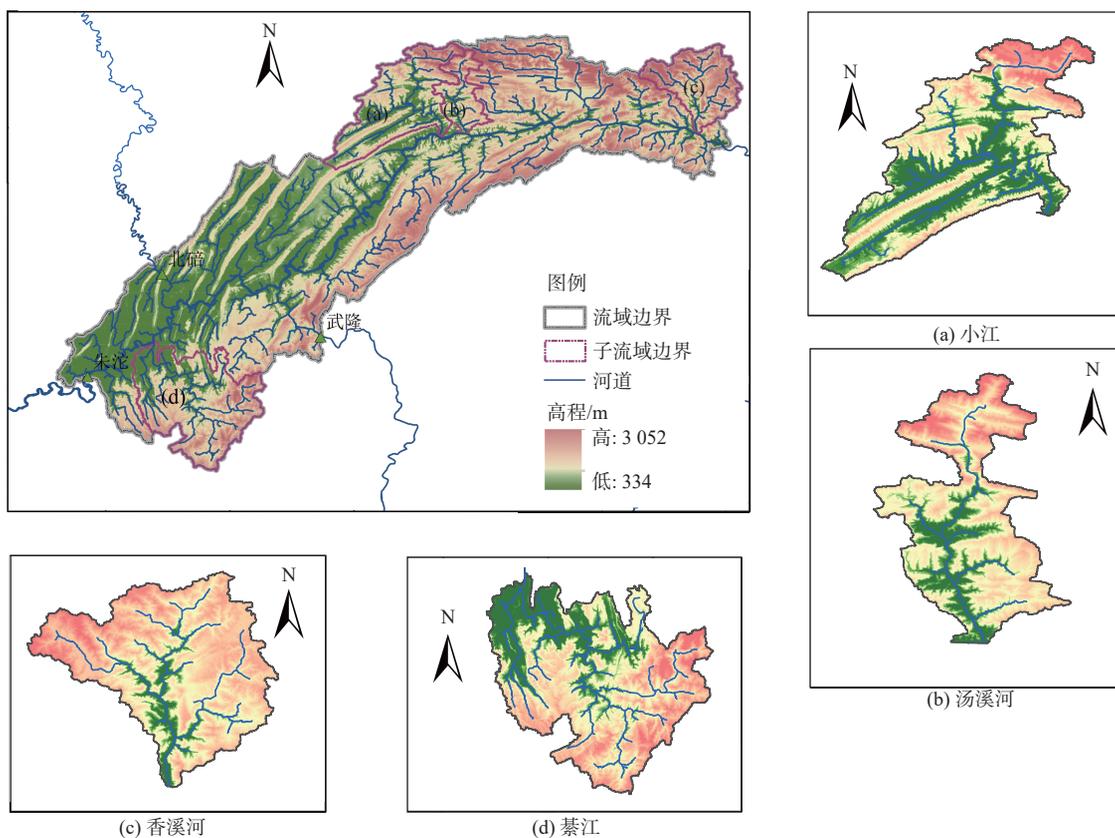


图 2 三峡库区流域

Fig. 2 Drainage basin of the Three Gorges Reservoir area basin

2.2 数据准备及模型构建

VIC 模型构建所需数据资料主要包括下垫面资料及水文气象资料。下垫面资料主要包括 DEM 数据、植被覆盖数据以及土壤类型数据。DEM 数据采取 STRM 发布的 30 m 分辨率的 DEM 高程数据;

土壤类型数据采用世界粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations)发布的全球 10 km 分辨率土壤类型数据^[27];植被覆盖选用马里兰大学(University of Maryland)发布的全球 1 km 分辨率植被覆盖数据^[28]。水文气象资料包括降雨、径

流及气象资料。降雨资料,本次研究搜集到库区内及附近 171 个雨量站 2014—2021 年逐小时降雨资料;径流资料,本次研究搜集到三峡库区内 4 个子流域控制水文站包括香溪河流域兴山站、汤溪河流域金子站、小江流域温泉站以及綦江流域五岔站的 2014—2021 年小时尺度实测流量资料(各子流域在三峡库区中的位置见图 2),以 2014—2018 年为率定期,2019—2021 年为验证期进行场次洪水划分,划分结果见表 1;气象资料选取流域内及附近 44 个气象站 2014—2021 年逐小时气温及风速资料。

表 1 各子流域场次洪水信息
Tab. 1 Flood information for each sub-basin field

子流域名称	总计场次	率定期场次 (2014—2018年)	验证期场次 (2019—2021年)
香溪河	17	8	9
汤溪河	21	19	2
小江	35	17	18
綦江	33	18	15

首先,基于三峡库区的 DEM 数据进行流域提取,将三峡库区划分为 2 854 个 5 km×5 km 分辨率的正交网格,作为 VIC 模型的产汇流单元。其次,基于 ArcGIS 提取各个网格单元的植被覆盖参数及土壤类型参数,并计算每个网格的土壤、植被参数。最后,制作气象驱动数据,采用反距离权重(IDW)法将收集到的降雨站点数据和气象站点数据插值为 5 km 分辨率的网格数据。

在 VIC 分布式洪水预报模型构建完成后,接入三峡梯调中心开发的网格降雨预报产品,实现 VIC 洪水预报模型在三峡梯调中心的每日实时滚动洪水预报。网格降雨预报产品由三峡梯调中心的三峡梯调气象业务系统提供,该系统于 2020 年汛期在三峡梯调中心开始试运行,预报业务范围覆盖整个长江流域,包括 0~12 h、12 h~10 d 及 11~30 d 这 3 种预报时效,空间分辨率为 5 km。本研究采用的梯调网格产品即为三峡梯调气象业务系统中,0~12 h 以及 12 h~10 d 共计 10 d 预见期的网格降雨预报产品(以下简称“梯调网格产品”),驱动三峡库区 VIC 分布式洪水预报模型。

2.3 参数率定

VIC 模型需进行率定的参数分为产流参数及汇流参数 2 个部分。VIC 产流模型中的大多数参数可直接通过土壤类型土壤属性等计算确定,具有明确的物理意义,如土壤饱和导水率、临界含水量等。

因此 VIC 产流仅需要对 6 个参数进行率定,其中包括与基流有关的 3 个参数(D_s 、 D_m 、 W_s),第二、三层土壤厚度(d_2 、 d_3)及土壤蓄水能力形状特征参数 b 。VIC 模型的产流模块参数反映土壤的理化性质,不受模型时间尺度的影响,在 VIC 产流模型应用于小时尺度洪水模拟过程中,产流模型参数取值与日尺度模型基本一致。汇流模型参数可分为坡面汇流参数及河道汇流参数两部分,坡面汇流采取基于二参数 Gamma 分布的坡面汇流单位线法,需对单位线形状参数 α 及单位线时间参数 θ 进行率定;河道汇流采取扩散波法,需对流速 C 及扩散系数 D 进行率定。为兼顾运行速度与解集的收敛性,采取常用的 NSGA-II 多目标遗传算法,以洪峰合格率、洪量合格率以及纳什效率系数(NSE)为目标函数,以 2014—2018 年为率定期,2019—2021 年为验证期选取典型洪水过程进行参数率定。最终采用 SOM 参数移植方法,将 4 个子流域参数率定结果移植到整个三峡库区。

3 结果分析

3.1 参数率定结果分析

参数率定结果评定按照《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008)^[29]:降雨径流预报以实测洪峰流量的±20% 作为许可误差,径流深预报以实测值的±20% 作为许可误差,当许可误差的绝对值大于 20 mm 时,取 20 mm。各子流域参数率定结果见表 2,误差评定结果见表 3。

三峡库区内 4 个子流域的参数取值均在合理取值范围内^[23]:率定期各子流域的产流平均合格率达到 82.7%,验证期平均合格率达到 91.3%;率定期洪峰平均合格率达到 84.2%,验证期洪峰平均合格率达到 90.6%。从产汇流模拟结果来看,VIC 模型对三峡库区内 4 个子流域小时尺度的洪水模拟取得了较好的模拟效果,在三峡库区内各子流域表现出良好的适用性。

3.2 2022 年及 2023 年典型洪水预报结果分析与讨论

基于 VIC 模型的三峡库区实时洪水预报系统已部署在三峡梯调中心,用于实时洪水预报工作。2022 年及 2023 年汛期,选取三峡库区 20220622 号洪水、20221003 号洪水、20230616 号洪水以及 20230702 号洪水共计 4 场库区降雨量级相对较大的洪水过程,从产流及汇流过程两方面,对三峡库区实时洪水预报系统计算结果进行分析与评价。

表2 各子流域参数率定结果

Tab. 2 Results of parameter calibration for each sub-basin

参数类型	参数意义	参数符号	参数取值范围		参数取值			
			最小值	最大值	香溪河	汤溪河	小江	綦江
产流参数	土壤蓄水能力形状特征参数	b	0.01	0.50	0.25	0.42	0.37	0.47
	非线性基流发生时占 D_m 的比例	D_s	0.01	1.00	0.21	0.39	0.36	0.34
	基流日最大出流/($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	D_m	5.0	40.0	33.26	25.3	39.3	25.5
	非线性基流发生时占最大含水量的比例	W_s	0.01	1.00	0.39	0.64	0.70	0.77
	第二层土壤厚度/m	d_2	0.10	1.00	0.38	0.13	0.24	0.21
	第三层土壤厚度/m	d_3	0.10	1.00	0.88	0.59	1.33	0.81
汇流参数	单位线形状参数	α	0.1	3.0	0.6	1.4	1.3	0.8
	单位线时间尺度参数/s	θ	1 000	7 200	6 904	6 659	7 000	5 931
	流速/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	C	1.00	2.50	1.20	1.19	1.56	2.12
	扩散系数	D	400	2 000	1 471	1 840	1 200	1 034

表3 各子流域率定误差评定结果

Tab. 3 Evaluation results of calibration error in each sub-basin

流域名称	洪量相对误差均值/%		洪峰相对误差均值/%		洪量合格率/%		洪峰合格率/%		NSE均值	
	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
香溪河	7.8	14.7	9.8	12.5	75.0	88.9	100.0	88.9	0.65	0.65
汤溪河	10.9	13.6	14.9	13.6	85.7	100.0	76.2	100.0	0.77	0.91
小江	10.1	13.2	12.1	11.9	88.2	94.4	88.2	83.3	0.76	0.67
綦江	10.6	10.9	13.9	10.8	81.8	81.8	72.2	90.1	0.55	0.56
平均值	9.9	13.1	12.7	12.2	82.7	91.3	84.2	90.6	0.68	0.70

由于三峡库区为非闭合流域,上游包括朱沱、北碚、武隆来水,而库区来水过程难以监测,因此三峡梯调中心在实际生产过程中,考虑上游洪水传播时间,将三峡水库的八段法反推入库流量过程错6 h时段减去上游朱沱、北碚与武隆来水过程,作为三峡水库区间实测流量过程^[30]。

3.2.1 三峡库区产流结果分析

三峡库区2022年及2023年4场洪水的产流模拟结果见表4,表中新安江模型的模拟结果是长江上游流域水文预报系统^[25]计算的结果,该新安江模型为半分布式的三水源新安江模型(XAJ)。由表4可知,20220622号洪水、20230616号洪水以及20230702号洪水实测库区面平均雨量均在60 mm以上,区间实测径流深均在20 mm左右,属于库区来水量级较大的洪水过程,VIC模型模拟结果的径流深相对误差均在合理范围内,其中:20230702号洪水,径流深相对误差仅为-0.7%,表明VIC模型在三峡库区对量级较大洪水的产流量有较好的模拟性能;但20221003号洪水,实测库区面平均雨量

为55.5 mm,区间实测径流深仅为8.3 mm,属于库区来水量级较小的洪水过程,VIC模型与XAJ模型模拟结果均偏高,原因在于目前三峡梯调中心在工程实际中采取的库区来水反推方法,当库区面平均降雨量较小时,会存在一定的波动而出现部分负值,无法进行模拟产流量的结果评定。

由上述分析可知,VIC模型在三峡库区取得较好的产流模拟效果,在产流量模拟方面表现出良好的适用性,同时将精细化划分网格的分布式建模方法有助于分析库区的产流规律。以20221003号洪水为例,由图3(a)可知,本次降雨过程的暴雨中心位于小江流域,小江流域平均降雨150.7 mm,降雨总量占全流域降雨总量的21.1%。由图3(b)可知,小江流域为本场洪水的重点产流区,全流域平均径流深11.5 mm,小江流域平均径流深42.5 mm,产流占比达37.1%。因此,重点产流区小江流域在三峡库区产流过程中占据重要地位,郭家水文站为目前小江流域内的实测站点,郭家站4场洪水产流模拟结果见表5。由表可知,郭家站以上径流深模拟误

差均小于 15%，在合理范围之内。因此，VIC 模型能较好把握三峡库区重点产流区域的产流情况，在三峡库区产流模拟中表现出了良好的适用性。

表 4 4 场洪水产流模拟结果
Tab. 4 Runoff simulation and forecast results of four floods

洪号	实测降雨/mm	实测径流深/mm	模拟径流深/mm		径流深相对误差/%		是否合格	
			VIC	XAJ	VIC	XAJ	VIC	XAJ
20220622	97.5	22.0	19.0	18.2	-13.9	-17.2	√	√
20221003	55.5	8.3	11.5	12.8	38.7	53.4	×	×
20230616	82.5	20.1	22.6	25.4	12.1	26.1	√	×
20230702	65.6	20.5	20.4	26.8	-0.7	30.4	√	×

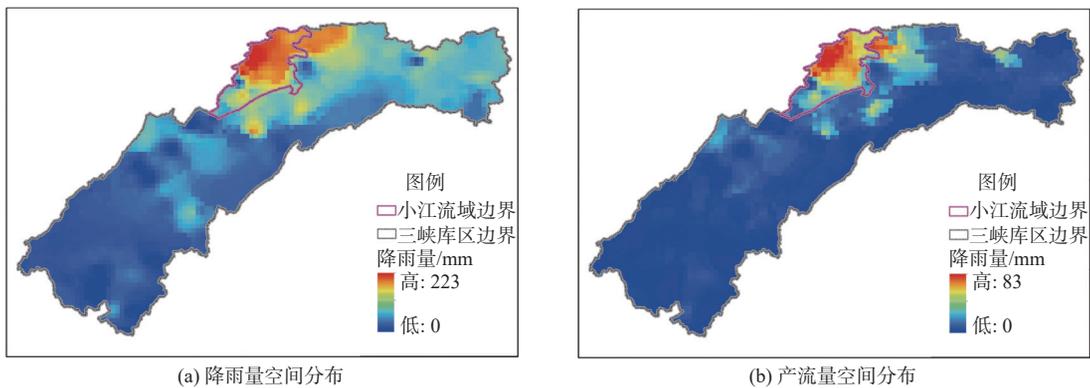


图 3 20221003 号洪水降雨及产流量空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of rainfall and discharge in flood 20221003

表 5 郭家站 4 场洪水产流模拟及预报结果
Tab. 5 Runoff simulation and forecast results of four floods at Guojia station

洪号	实测降雨/mm	实测径流深/mm	模拟径流深/mm	径流深相对误差/%	是否合格
20220622	167.9	98.9	86.0	-13.1	√
20221003	184.8	155.2	133.5	-13.9	√
20230616	141.1	135.4	135.5	0.1	√
20230702	82.4	76.0	72.8	-4.2	√

3.2.2 三峡库区汇流过程结果分析

三峡库区 2022 年 4 场洪水的流量过程模拟及预报结果见图 4 和表 6，“模拟结果”为由实测降雨数据驱动模型计算的结果，“预报结果”为采用梯调网格产品驱动模型计算的结果，峰现时间误差一栏中正值代表较实测峰现时间滞后，负值则反之。

对汇流过程结果进行分析，4 场洪水分布式 VIC 模型的洪峰模拟相对误差均在 10% 以内，峰现时间误差均在 2 h 及以内，这表明小时尺度分布式 VIC 模型对汇流过程的模拟效果整体较好，部分场次与三峡梯调中心已有的 XAJ 模型模拟效果相当。对于 20220622 号洪水，XAJ 模型模拟结果出现洪峰

滞后的问题，滞后时长为 10 h，而 VIC 模型的峰现时间误差为滞后 2 h，峰现时间模拟结果要优于 XAJ 模型；对于 20230619 号洪水，XAJ 模型模拟结果出现洪峰偏高的问题，偏高 44.8%，而 VIC 模型的洪峰相对误差为 4.9%，洪峰模拟结果要优于 XAJ 模型。针对实时洪水预报结果，20220620 号洪水实时预报洪峰误差仅为 5.4%，峰现时间滞后 4 h，取得较好的预报效果，而其余 3 场洪水均出现了不同程度的预报洪峰偏低、预报峰现时间误差过大的问题，以 20221003 号洪水为例，20221003 号洪水预报洪峰误差高达-30.8%，且预报洪水峰型与区间实测峰型不匹配，原因在于本场洪水预报采用的三峡

梯调预报网格降雨数据不确定性大,在10月3日09:00—10月10日09:00,三峡库区实测累计面平均降雨为55.5 mm,而梯调网格产品面平均降雨为40.0 mm,相对误差为-28.0%,与洪峰预报误差基本一致,且预报雨峰相比于实测雨峰滞后17 h。可见实时洪水预报结果受限于降雨产品的预报精度,当梯调网格降雨产品预报精度高时,库区精细化VIC

模型能提供准确的产流及汇流过程预报结果。通过对4场洪水的产流及汇流过程分析可知,对于部分场次洪水,分布式VIC模型的模拟结果优于三峡梯调中心已有的基于新安江的实时洪水预报系统模拟结果,并且基于VIC模型精细化建模方案,可深入分析与研究库区产流规律。

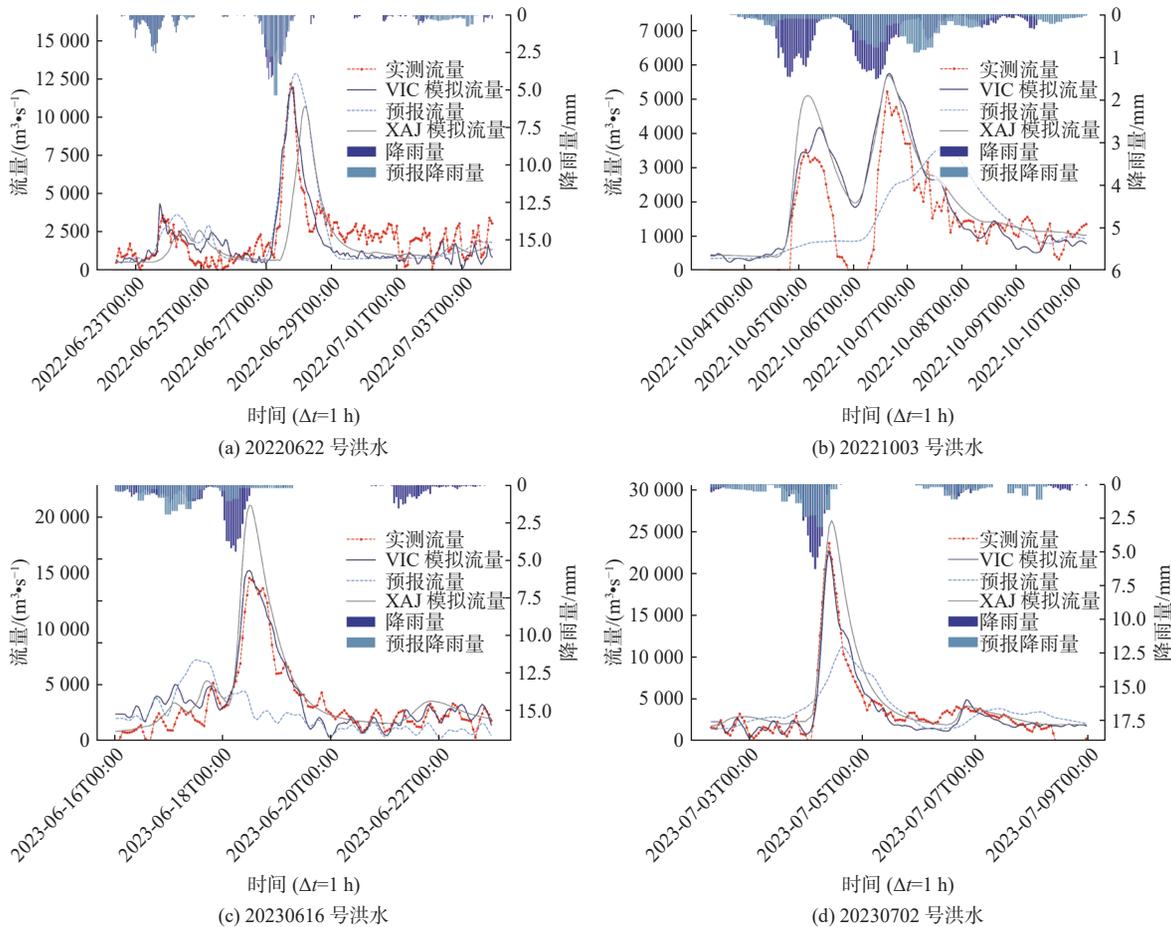


图4 4场洪水汇流模拟及预报结果

Fig. 4 Routing simulation and forecast results of four floods

表6 4场洪水产流模拟及预报结果

Tab. 6 Routing simulation and forecast results of four floods

洪号	实测洪峰/(m ³ ·s ⁻¹)	模拟洪峰/(m ³ ·s ⁻¹)		预报洪峰/(m ³ ·s ⁻¹)	洪峰相对误差/%			峰现时间误差/h		
		VIC	XAJ		模拟		预报	模拟		预报
					VIC	XAJ		VIC	XAJ	
20220622	12 200	12 002	10 700	12 857	-1.6	-12.3	5.5	2	10	4
20221002	5 230	5 744	5 700	3 619	9.8	9.0	-30.8	1	1	26
20230619	14 500	15 203	21 000	7 231	4.9	44.8	-50.1	0	0	-23
20230702	23 600	22 737	26 300	11 285	-3.7	11.4	-52.2	0	1	6

4 结论与展望

本研究构建三峡库区分布式VIC小时尺度洪水预报模型,采用三峡梯调网格降雨产品,实现三

峡库区未来10 d的小时尺度实时洪水预报,且模型已经实地化部署,应用于2022年及2023年汛期实时洪水预报工作,对汛期4场洪水的预报及模拟结果进行讨论,主要结论如下:

利用 VIC 模型, 基于三峡库区 4 个子流域的历史洪水进行参数率定, 各子流域率定期和验证期的洪量、洪峰平均合格率均在 80% 以上, 确定性系数平均值在 0.70 左右, 结果表明 VIC 模型在三峡库区内各子流域小时尺度洪水模拟中表现出较好的适用性。

基于 VIC 模型的实时洪水预报系统, 在 2022 年及 2023 年汛期预报工作中, 产流量平均相对误差为 16.3%, 洪峰平均相对误差为 5.0%, 重点产流区产流量平均相对误差为 7.8%, 能够把握库区来水及重点产流区的洪水过程, 且对于部分场次洪水, 分布式 VIC 模型的模拟结果优于三峡梯调中心已有的基于新安江的实时洪水预报系统模拟结果。

VIC 分布式实时洪水预报模型在 2022 年及 2023 年库区洪水预报中取得良好的预报精度, 后期获取更多库区洪水资料, 开展库区实时滚动预报, 进一步优化模型参数, 提高模型适用性。

参考文献:

- [1] 李国英. 建设数字孪生流域 推动新阶段水利高质量发展[N]. 学习时报, 2022: 001. DOI: 10.38216/n.cnki.nxxsb.2022.001185.
- [2] 杨文发, 王乐, 张俊. 流域多尺度水文预报应用进展及适用性探讨[J]. 人民长江, 2021, 52(10): 84-94. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.10.013.
- [3] 石彬, 李巧玲, 王越, 等. 考虑暴雨中心的子流域划分在洪水预报中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 944-952, 965. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0094.
- [4] 旷兰, 田茂举, 肖蕾, 等. Tank模型在中小河流洪水气象风险预警中的应用[J]. 水电能源科学, 2023, 41(2): 74-78. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221110.
- [5] 刘恒. 基于元胞自动机和大伙房模型的洪水演进研究[J]. 人民长江, 2020, 51(5): 7-16. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.05.002.
- [6] 芮孝芳, 黄国如. 分布式水文模型现状与未来[J]. 水利水电科技进展, 2004(2): 55-58. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2004.02.019.
- [7] 叶翔宇, 李强, 郭禹含, 等. 高性能并行分布式水文模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2022, 41(4): 731-740. DOI: 10.18306/dlkxjz.2022.04.016.
- [8] 毛西耶子, 孙若辰, 段青云. 单目标和多目标优化在 SWAT模型率定中的对比[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 289-300. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0029.
- [9] 孙晓露, 任政, 龚家国, 等. 基于CMIP5模式与VIC模型耦合的滦河流域未来气候及径流变化研究[J]. 中国农村水利水电, 2023, 485(3): 39-46, 52. DOI: 10.12396/znsd.220881.
- [10] 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. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.004.
- [11] 童冰星, 李致家, 姚成. 基于SoilGrids的栅格新安江模型参数空间分布估算[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 219-226. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.02.006.
- [12] 缪清华. 基于分布式模型和多源降水的中小河流洪水预警预报方法[D]. 北京: 清华大学, 2019. DOI: 10.27266/d.cnki.gqhau.2019.000128.
- [13] 胡倩, 王军霞, 刘世强, 等. 基于SWAT模型的洞庭湖平原水资源量计算[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(3): 244-252. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20210444.
- [14] TONG X, LAI X, LIANG Q. An improved non-point source pollution model for catchment-scale hydrological processes and phosphorus loads[J]. Journal of Hydrology, 2023, 621: 129588. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129588.
- [15] 王佳, 张新华, 雷晓辉, 等. 分布式水文模型对水质监测数据的补充及污染源分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 92-97. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0013.
- [16] 邢丽雪, 陈洋波, 冯永修, 等. 基于流溪河模型的新丰江水库入库洪水预报模型研究[J]. 水文, 2022, 42(1): 47-53. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200536.
- [17] 范火生. 基于栅格的分布式新安江模型在三岔河流域的洪水预报研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(2): 113-118. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2019.02.023.
- [18] 吴天蛟. 三峡区间入流对库区洪水影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [19] 汪伟, 方秀琴, 杜晓彤, 等. 基于VIC模型的柳江流域分布式水文模拟与应用[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 328-335. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2020.03.047.

- [20] 韩潇,张亚萍,周国兵,等. 基于VIC模型的涪江流域径流模拟[J]. *水文*, 2022, 42(5): 76-81. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210112.
- [21] ZHONG W, GUO J, CHEN L, et al. Future hydropower generation prediction of large-scale reservoirs in the upper Yangtze River basin under climate change[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 588: 125013. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125013.
- [22] LOHMANN D, NOLTEHOLUBE R, RASCHKE E. A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes[J]. *Tellus Series a - Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1996, 48(5): 708-721. DOI: 10.3402/tellusa.v48i5.12200.
- [23] 李晓阳,叶磊,吴剑,等. VIC模型汇流改进及在流域洪水预报中的应用研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(7): 18-26. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.07.002.
- [24] 张天宇,王雨潇,孙营营,等. 1998—2020年三峡库区小时极端降水时空变化特征分析[J]. *高原气象*, 2023, 42(1): 108-115. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00019.
- [25] 曾志强,汤正阳,曹辉,等. 长江上游流域水文预报系统及典型洪水反演分析[J]. *水利水电快报*, 2022, 43(10): 6-12. DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2022.10.002.
- [26] VANDERKELEN I, GHARARI S, MIZUKAMI N, et al. Evaluating a reservoir parametrization in the vector-based global routing model mizuRoute (v 2.0.1) for earth system model coupling[J]. *Geoscientific Model Development*, 2022, 15(10): 4163-4192. DOI: 10.5194/gmd-15-4163-2022.
- [27] WIEDER W. RegridDED Harmonized World Soil Database v 1.2[R]. ORNL Distributed Active Archive Center, 2014.
- [28] HANSEN M R, DEFRIES J R G, TOWNSHEND. UMD Global Land Cover Classification, 1 Kilometer, 1.0[R]. Maryland: Department of Geography, University of Maryland, College Park: 1998.
- [29] 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: 水文情报预报规范 GB/T 22482—2008[S].北京: 中国标准出版社.
- [30] 肖舸,陈森林,唐海华. 三峡水库动库容及其在入库流量计算中的应用研究[C]//中国水利水电勘测设计协会, 中国水利学会水资源专业委员会, 中国水力发电工程学会水电站运行管理专业委员会. 水利水电工程风险分析及可靠度设计技术进展.北京: 中国水利水电出版社, 2010: 61-66.

Hourly scale real-time flood forecasting in the Three Gorges Reservoir basin based on the VIC model

MA Haoran^{1,2}, ZHANG Hairong¹, LI Xiaoyang², GU Xuezhong²,
CAO Hui¹, BAO Zhengfeng¹, YE Lei², HUAI Xiaowei^{3,4}

(1. China Yangtze Power Co., Ltd, Yichang 443002, China; 2. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Hunan Disaster Prevention Technology Co., Ltd, Changsha 410129, China; 4. National Key Laboratory of Power Grid Disaster Prevention and Reduction, Changsha 410129, China)

Abstract: The existing basin real-time flood forecasting system is based on the lumped model. With the increasing demand for spatial and temporal refinement of flood forecasting in large-scale basin flood control, the lumped model cannot adequately consider the unevenness of rainfall and spatial and temporal distribution of subsurface, and it is difficult to apply it to the current large-scale basin real-time flood forecasting. With the wide application of remote sensing and geographic information technology in the field of hydrology, the source of rainfall and subsurface data acquisition and data accuracy has been greatly improved, so the distributed hydrological model has gradually developed into a research hotspot in the field of hydrological modeling. However, due to the limitation of the accuracy of rainfall, runoff, and subsurface data, the application of distributed hydrological models in the field of real-time flood forecasting, especially in hourly scale forecasting, is still relatively small, and the forecast accuracy needs to be improved. With the abundant and accumulated information from satellite telemetry and ground observation sites in the basin, the hydrological and subsurface information can meet the demand for hourly flood forecast modeling by distributed hydrological models.

Taken the Three Gorges Reservoir basin as an example, the process of real-time flood forecasting by the VIC model is carried out. The process of real-time rolling flood forecasting by the VIC model is divided into three parts: data access, model operation, and result output. To address the problem the original unit line routing method of the VIC model has a daily time scale and can not be used for hourly scale real-time flood forecasting. The slope routing is carried out using the slope unit line based on Gamma distribution, the river network routing is carried out using the IRF-UH method, and the hourly-scale VIC distributed flood forecasting model is established. The real-time rolling flood forecasting scheme is constructed, and the VIC distributed flood forecasting model is deployed, and applied to the reservoir area in 2022 for real-time flood forecasting.

The results show that the average passing rate of flood volume and flood peak in the four sub-basins of the Three Gorges Reservoir area during the regular and validation periods is above 80%, and the average value of the coefficient of certainty is above 0.70. The VIC model shows good applicability in hourly-scale flood forecasting. It achieves good results in the real-time flood forecasting of four typical floods in the Three Gorges Reservoir area in 2022 and 2023, and can accurately grasp the flood volume and incoming water process in the key flow-producing areas of the reservoir area. The VIC hourly scale model is therefore a useful tool in the Three Gorges Reservoir area.

Therefore, the VIC hourly scale model shows good performance in real-time flood forecasting in the Three Gorges Reservoir area and has great potential to be applied in real-time flood forecasting in large-scale basins. Since there are many small and medium-sized reservoirs in the Three Gorges Reservoir area, the model structure can be further improved and enriched at a later stage to further enhance the accuracy of the real-time flood forecasting system by considering the influence of human activities.

Key words: VIC model; real-time flood forecasting; hourly scale; Three Gorges Reservoir area

