

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190429

基于 WRF-Hydro 模式的清江流域洪水模拟研究

顾天威¹, 陈耀登¹, 高玉芳¹, 彭涛², 胡泊²

(1. 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/
气象灾害预报预警与评估协同创新中心/应用气象学院, 江苏 南京 210044;
2. 中国气象局武汉暴雨研究所/湖北省暴雨监测与预警重点实验室, 湖北 武汉 430205)

摘要:基于 WRF-Hydro 模式构建了洪水预报模型,开展了清江流域的洪水模拟研究。利用 2015~2017 年 9 场典型洪水过程进行了流域内模式的参数率定,并基于 2017~2018 年 4 场典型洪水过程分析探讨了模型对清江流域洪水的模拟效果。结果表明:在率定及验证期的 13 场典型洪水过程的逐小时模拟中,纳什效率系数介于 0.50~0.94 之间,单洪峰过程的模拟效果整体优于多洪峰过程。本研究构建的基于 WRF-Hydro 模式的洪水预报模型能够适用于地形复杂的清江流域,为进一步构建类似区域的大气-水文耦合预报模型奠定了基础。

关键词:洪水模拟;WRF-Hydro 模式;清江流域;适用性

中图分类号:P338

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2021)03-0063-06

0 引言

洪水预报作为防灾减灾的一项重要举措,是流域防洪、供水、发电等计划编制的重要前提^[1]。洪水预报起初基于历史数据进行统计预报,而后依托气象要素进行预报的概念性水文模型相继出现^[2-3]。但概念性水文模型通常将流域视作整体进行计算,无法描述流域内水文要素的空间变化特征^[4]。分布式水文模型以水力学运动偏微分方程约束水分的运动,考虑了下垫面的非均匀性^[5],基于分布式模型的径流预报逐渐成为洪水预报的研究重点^[6-8]。

WRF-Hydro(Weather Research and Forecasting model (WRF) hydrological modeling system)模式是基于网格点的分布式水文模型,可高效耦合 WRF 天气预报模式,进行大气-水文耦合预报。该模式由美国国家大气研究中心(NCAR)于 2013 年研发,2016 年在美国国家水资源中心(NWC)投入业务应用^[9]。同时,该模式也在多个国家进行了应用研究,如意大利的 Crati 流域^[10]、东非的 Tana 流域^[11]、西非的 Tobo 大坝^[12]等。

目前,WRF-Hydro 模式的研究多局限于长时间尺

度的连续水循环模拟,时空分辨率低,对易爆发短时洪涝灾害的复杂山地地区的洪水模拟还鲜有研究。长江中游的清江流域,地形起伏大,河道狭窄调节能力低,易发生洪涝灾害^[13]。为进一步研究高时空分辨率的 WRF-Hydro 模式在复杂地形区对不同类型洪水的模拟能力,分析模式在该类区域主要参数的表征,本文基于 WRF-Hydro 模式构建了清江流域的洪水预报模型,在小时尺度上详细探讨了该模型在不同典型洪水过程中的实际模拟效果,以期推进复杂地形区的大气-水文耦合预报研究。

1 清江流域概况及模型设置

1.1 流域概况

清江发源于湖北省利川市齐岳山龙洞沟,是长江的一级支流,沿河道分布有三级梯级水电站包括水布垭、隔河岩、高坝洲。水布垭水文站为水布垭水电站的入库代表站,本文以水布垭水文站控制流域为研究区域(见图 1)。流域面积 10 860 km²,流域内以混交林为主,覆盖 54%左右,其次为多树草原约占 19%及落叶阔叶林约占 10%(见图 1b)。流域属长江中游亚热带季

收稿日期:2019-12-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41675102);国家重点研发计划资助项目(2017YFC1502102);湖北省气象局科技发展基金资助项目(2020Q03)

作者简介:顾天威(1996—),男,江苏启东人,硕士研究生,主要从事水文气象的数值模拟方面的工作。E-mail:tianweigu@qq.com

通信作者:高玉芳(1979—),女,山东聊城人,副教授,主要从事水文气象研究及相关应用方面的工作。E-mail:gaoyf@nuist.edu.cn

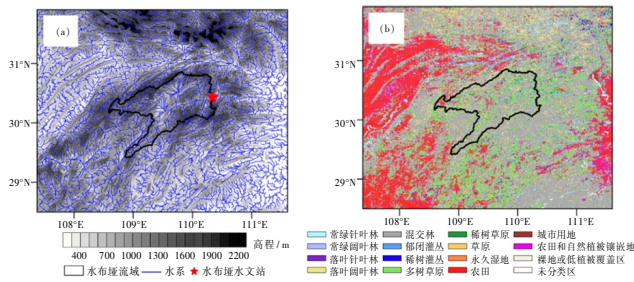


图1 研究区域 (a)高程、流域、水系及水文站分布 (b)植被覆盖类型

Fig.1 Study area (a) distribution of elevation, basin, water system and hydrology station (b) land use types

风区,多年(1951~2009年)平均降雨量约1460mm,降雨年分布极不均匀,主要集中在4~9月份,占全年降雨量的75%~78%,暴雨次数多、强度大,加之海拔在362~2233m之间,流域与河道坡度大,汇流时间短,洪水陡涨陡落。

1.2 WRF-Hydro 模式及设置

WRF-Hydro 模式主要由陆面模型、壤中汇流、地表汇流、地下水模型及河道汇流模块构成。模式运算中的陆面模块和水文模块分别在粗网格和细网格上计算。其中,壤中汇流过程有别于传统陆面模式中水分的计算,传统陆面模式为一维土壤柱的计算模式,水分只在土壤柱内进行垂直向交换,没有水平向交换。而WRF-Hydro 模式中壤中汇流过程为三维过程,除垂直水分交换外,还有水平向的侧向流交换,因而物理意义更明确^[11-12]。

模式驱动数据包括气象数据、地表特征及水文数据,以及陆面状态信息。驱动数据输入WRF-Hydro 模式后,经陆面模型对输入水体进行地面产流和下渗的重新分配;然后将地表径流和土壤含水率等信息网格降尺度进行汇流计算,得到流量等信息,从而完成洪水过程模拟。其中,壤中汇流先于地表汇流进行计算,原因是土壤中侧向汇流过程会使饱和和土壤的水分渗出,渗出水将加入地表水位中。模拟过程中模式计算的细网格水文信息网格聚尺度至粗网格陆面模型对陆面状态信息进行更新^[9]。WRF-Hydro 模式运行流程如图2所示。

研究采用WRF-Hydro 模式5.0.3版本。模式运行区域见图1,其中陆面模型的粗网格水平分辨率为1km,汇流模型的细网格水平分辨率为100m,河道密度为0.01km²。陆面模型选用Noah-MP模式,壤中及地表汇流均选用最大坡降法,地下水模型选用指数型出流模型,河道汇流选用基于网格点的扩散波方法^[9]。参

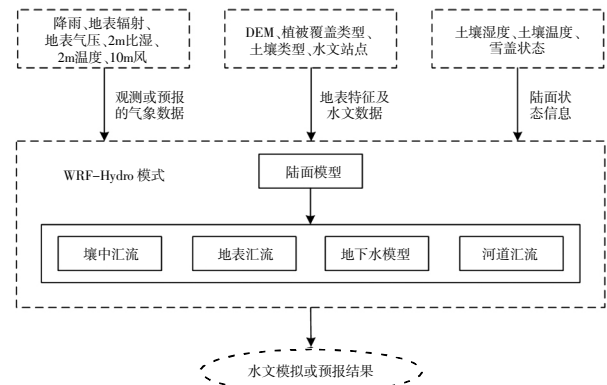


图2 WRF-Hydro 模式运行流程

Fig.2 The operation flow of WRF-Hydro model

考有关学者研究^[10,13],模式的“预热”时间设置为2个月。驱动数据逐小时输入,径流模拟结果逐小时输出。

1.3 数据

水文实测资料为水布垭水文站的逐小时入库径流数据,由中国气象局武汉暴雨研究所提供。实况降雨数据为国家气象信息中心制作的融合降水产品^[14],水平分辨率为0.05°,时间分辨率为1h;地表辐射、地表气压、2m比湿、2m温度和10m风数据取自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA5全球大气再分析资料,水平分辨率为0.25°,时间分辨率为1h。

清江流域的DEM数据,分辨率为90m;植被覆盖类型、土壤类型数据取自MODIS资料集,分辨率为30s,均由WRF-Hydro的GIS前处理工具处理生成输入WRF-Hydro的地表特征及水文数据。

陆面初始状态信息来自美国国家环境预报中心(NECP)的FNL全球大气再分析资料,水平分辨率为0.25°。

2 WRF-Hydro 模式参数率定

收集到的2015~2018年流域内具有完整气象及水文数据的洪水事件共计13场过程,本文将前9场洪水过程用于WRF-Hydro模式在清江流域的参数率定(见表1)。

2.1 参数率定设置

本文对入渗系数、曼宁糙率、地表持水深度及地表糙率这4个主要参数进行率定^[10-12]。考虑计算成本,采用人工逐步逼近的方法对这4个主要参数按序调参^[15],即对某一参数在合理范围内以适当步长分别驱动模型,综合考虑9场过程平均的相关系数、总流量相对误差绝对值、洪峰流量相对误差绝对值、纳什效

表1 率定期2015~2017年的9场洪水

Table1 The nine floods in 2015-2017 during calibration period

洪水编号	洪水过程
20150531	2015年05月31日12时~2015年06月03日12时
20150629	2015年06月29日12时~2015年07月02日00时
20160624	2016年06月24日00时~2016年06月29日12时
20160630	2016年06月30日00时~2016年07月03日00时
20160718	2016年07月18日00时~2016年07月22日00时
20170609	2017年06月09日00时~2017年06月15日00时
20170707	2017年07月07日12时~2017年07月11日00时
20170713	2017年07月13日12时~2017年07月17日12时
20171001	2017年10月01日00时~2017年10月04日12时

率系数、峰现时间误差绝对值这5个评价指标,从而确定最优参数,在此基础上再进行下一个参数的率定。率定参数的取值范围及步长设置见表2。

2.2 参数率定过程分析

图3为4个参数的率定过程。首先率定入渗系数,入渗系数主要影响产流量,因此根据流量相对误差及纳什效率系数进行优选。洪峰流量和总流量相对误差随着入渗系数增加而减小,在入渗系数为0.1时开始趋于稳定,纳什效率系数随着入渗系数增加而减小,因此入渗系数取为0.1;曼宁糙率影响水在河道的汇流速度,因此综合考虑峰现时间误差及纳什效率系数,取峰现时间误差最小和纳什效率系数最大时对应的值0.3;地表持水深度表征地表的蓄水能力,参考纳什效率系数和相关系数,两个指标随地表持水深度的增长变化很小,说明模拟结果对地表持水深度不敏感,这里取两个指标相对最大时对应的值4;地表糙率衡量水分在地表的汇流速度,因此考虑峰现时间误差和纳什效率系数,峰现时间误差基本稳定在3h以内,这里取纳什效率系数最大时对应的值2.5。

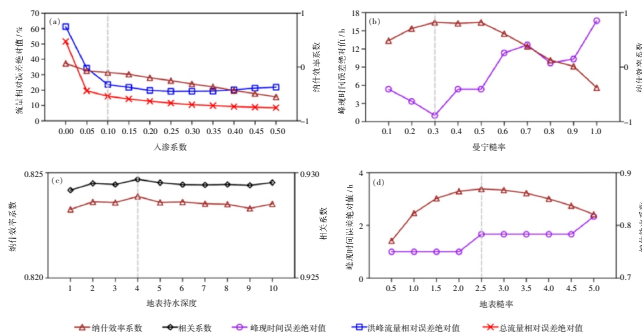


图3 4个主要参数的率定过程(灰色虚线为优选出的参数值)

Fig.3 The calibration process of four main parameters(The gray dashed line represents the optimum values)

表2 WRF-Hydro模式率定参数范围及间隔设置

Table2 The value range and increment settings of calibration parameters of WRF-Hydro model

参数名称	入渗系数	曼宁糙率	地表持水深度	地表糙率
参数符号	REFKDT	MannN	RETDEPRTFAC	OVRROUGHRTFAC
率定范围	0~0.5	0.1~1.0	1~10	0.5~5
率定步长	0.05	0.1	1	0.5

根据参数率定结果,率定得到的入渗系数、曼宁糙率较小,原因可能是流域内地势坡度大,下渗量小,径流流速快。模拟结果对地表持水深度的敏感性相对较小,可能是因为地表持水深度在地势平坦处影响大,而研究区域地势陡峭;同时在洪水过程中土壤偏湿接近饱和,地表持水量处于稳定状态,进一步导致地表持水深度在此地区的影响小。率定得到的地表糙率较大,可能与流域内森林覆盖率高(见图1b),存在较强的截流效应有关。

2.3 率定期洪水模拟结果分析

2015~2017年9场洪水过程径流模拟结果见图4,图中实况降雨为流域的面平均1h累积融合降水,由算数平均法计算(下同)。可以看到,经参数率定后模拟径流过程与实测均吻合较好。其中,20150629、20160624、20170609、20170707及20170713这5场多洪峰过程相对复杂,持续时间长加之流域面积相对较大,模式误差累积使得径流的模拟结果稍差于20150531、20160630、20160718及20171001这4场单洪峰过程,主要表现在对洪峰的模拟偏强。

率定期9场洪水过程逐小时模拟径流的评估结果如表3所示,9场过程模拟径流与实测的相关系数基本在0.9以上;峰值和总流量误差大体在10%,个别过程稍大;纳什效率系数介于0.59~0.94之间;峰现时间误差均在2h以内。结果说明,率定期内9场典型洪水过程的径流模拟效果整体较优。

3 WRF-Hydro 洪水预报模型实例分析

利用清江流域2015~2018年的后4场典型洪水过程开展了该流域内的洪水模拟研究(见表4)。

3.1 降雨实况分析

4场洪水过程的累积降雨量空间分布如图5所示,4场过程的累积降雨量及其分布均存在差异:20171011过程降雨落区主要在流域外,流域内降雨空间分布较均匀,96h累积降雨量基本小于80mm,对应

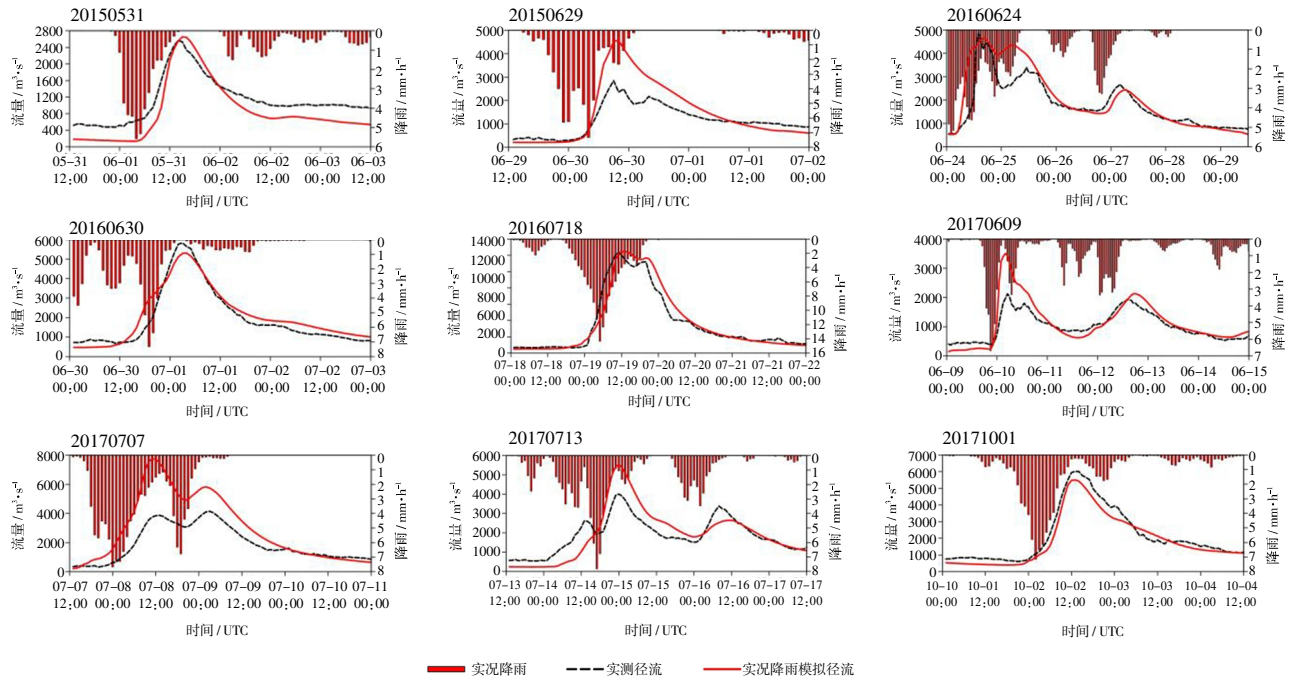


图4 2015~2017年9场洪水逐小时径流的模拟结果

Fig.4 The simulated results of hourly streamflow of 9 floods in 2015-2017

表3 率定期9场洪水逐小时模拟径流的评估结果

Table3 The verification results of the hourly simulated streamflow of 9 floods during the calibration period

洪水过程	相关系数	流量相对误差/%		纳什效率系数	峰现时间误差/h
		峰值	总量		
20150531	0.98	3.41	-24.11	0.79	1
20150629	0.96	60.31	27.30	0.69	1
20160624	0.89	-3.86	12.78	0.75	2
20160630	0.97	-9.04	7.68	0.92	1
20160718	0.97	1.20	2.46	0.94	2
20170609	0.91	64.89	11.55	0.73	-1
20170707	0.94	40.25	54.14	0.59	-1
20170713	0.89	38.10	2.83	0.74	0
20171001	0.99	-8.46	-12.34	0.93	-1

洪水过程可能相对平缓;20180505 过程降雨中心位于流域上游,96h 累积雨量超过 100mm,对应洪水过程可能相对较强;20180530 过程流域内虽然有降雨中心,但 72h 累积降雨量在 60mm 以下,造成的洪水可能也较弱;20180703 过程降雨中心位于流域外西南部,120h 累积降雨量在 220mm 以上,降雨主要分布在流域上游,强度梯度大,空间分布不均,因此洪水过程可能相对复杂。这 4 次降雨事件可考察 WRF-Hydro 洪水预报模型对清江流域内不同降雨过程造成洪水的模

表4 验证期2017~2018年的4场洪水

Table4 The four floods in 2017-2018 during the validation period

洪水编号	洪水过程
20171011	2017年10月11日00时~2017年10月15日00时
20180505	2018年05月05日00时~2018年05月09日00时
20180530	2018年05月30日00时~2018年06月02日00时
20180703	2018年07月03日00时~2018年07月08日00时

拟效果。

3.2 洪水模拟结果分析

2017~2018年4场洪水过程的径流模拟结果如图6所示,模拟径流过程与降雨量及其时间分布吻合较好。20171011 过程为典型单洪峰过程,降雨-径流过程相对简单,洪水的涨落过程模拟较优,模型对流量也把握较准。20180505、20180530 及 20180703 这三次过程的模拟与实测过程线基本吻合,但在起涨、退水期模拟流量偏小,可能是因为对应时段流域内降雨量小,而模型对降雨信息较敏感,因此误差稍大。其中,20180703 过程降雨持续时间长,出现了几个时段的降雨峰值,降雨-径流过程相对复杂。模型基本可以模拟出洪峰且峰现时间误差较小,但模型高估了洪峰流量。

验证期4场洪水过程逐小时模拟径流的评估结

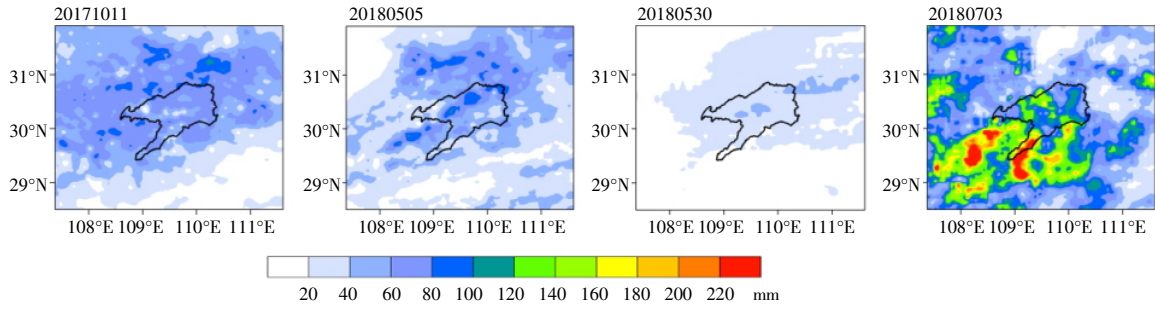


图 5 2017~2018 年 4 场洪水的累积降雨量空间分布

Fig.5 The spatial distribution of accumulated precipitation for the four floods in 2017-2018

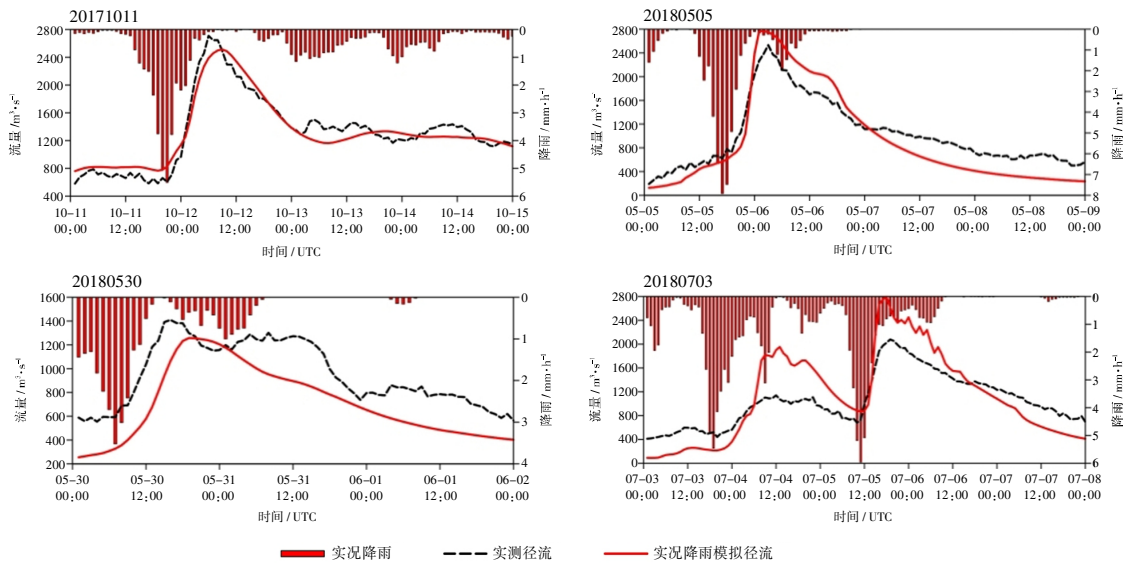


图 6 2017~2018 年 4 场洪水过程逐小时径流模拟结果

Fig.6 The simulated results of hourly streamflow of the four floods in 2017-2018

表5 验证期4场洪水逐小时模拟径流的评估结果

Table5 The estimation results of the hourly simulated streamflow for 4 floods during the validation period

洪水过程	相关系数	流量相对误差/%		纳什效率系数	峰现时间误差/h
		峰值	总量		
20171011	0.96	-7.24	-0.26	0.91	3
20180505	0.98	9.43	-10.93	0.87	-1
20180530	0.91	-10.78	-25.51	0.50	3
20180703	0.91	34.42	6.92	0.71	-1

果如表 5 所示,4 场过程中模拟径流过程与实测的相关系数均在 0.9 以上,相关度较高;峰值和总流量误差基本在 10%,个别过程略大;纳什效率系数介于 0.50~0.91 之间;峰现时间误差稳定在 3h 以内。结果表明构建的 WRF-Hydro 洪水预报模型在清江流域的洪水模拟能力较强。

总体而言,基于 WRF-Hydro 模式构建的洪水预报模型能够适用于地形复杂的清江流域。其中,单洪峰洪水过程的模拟与实测过程线均吻合较好;多洪峰洪水过程略有偏差,主要表现在对洪峰强度的模拟误差上,这可能与降雨的空间分布有关^[16]。

4 结语与讨论

以长江中游的清江流域为研究区域,基于 WRF-Hydro 模式构建了该区域的洪水预报模型。利用 2015~2017 年 9 场典型洪水过程,进行了模式的参数率定,分析了具有复杂地形的清江流域内模式主要参数的表征;在此基础上,开展了清江流域 2017~2018 年 4 场典型洪水过程的洪水模拟研究,并对模拟结果进行了分析探讨。

经参数率定得到的人渗系数、曼宁糙率、地表持

水深度及地表糙率能够表现出清江流域地形起伏大、河道狭窄陡峭、森林覆盖率高的特点。在清江流域,土壤偏湿、流域坡度大,因此入渗系数较小,模拟结果对地表持水深度不敏感;河道狭窄陡峭,曼宁糙率较小;森林覆盖率高,截流效应强导致地表糙率较大。

模拟结果表明模型的径流模拟精度较高:率定期9场过程的纳什效率系数在 0.59~0.94 之间,验证期4场过程在 0.50~0.91 之间。单洪峰过程的模拟效果整体要优于多洪峰过程。此外,WRF-Hydro 模式对输入的降雨信息较敏感,未来需要评估输入数据的质量以更好地利用该模型。

研究表明构建的基于 WRF-Hydro 模式的洪水预报模型能够适用于地形复杂的清江流域,为相似区域下高分辨率的洪水预报提供了参考。值得进一步指出的是,WRF-Hydro 模式不仅可以作为独立的水文模型,也具有高效耦合 WRF 天气预报模式的框架结构,进行大气-水文耦合预报,以延长洪水预报的预见期。

致谢:本论文的数值计算得到了南京信息工程大学高性能计算中心的计算支持和帮助。

参考文献:

- [1] 姜树海,范子武. 水库防洪预报调度的风险分析[J]. 水利学报,2004,35(11):102-107. (JIANG Shuhai,FAN Ziwu. Risk analysis for flood control operation of reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,35(11):102-107. (in Chinese))
- [2] 包红军,赵琳娜. 基于集合预报的淮河流域洪水预报研究[J]. 水利学报,2012,43(2):216-224. (BAO Hongjun,ZHAO Lingna. Flood forecast of Huaihe River based on TIGGE ensemble predictions [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(2):216-224. (in Chinese))
- [3] 何思为,南卓铜,王书功,等. 四个概念性水文模型在黑河流域上游的应用与比较分析[J]. 水文,2012,32(3):13-18. (HE Siwei,NAN Zhuotong,WANG Shugong,et al. Application and comparative analysis of four conceptual hydrological models for upper reach of Heihe River basin [J]. Journal of China Hydrology,2012,32(3):13-18. (in Chinese))
- [4] 芮孝芳. 流域水文模型研究中的若干问题[J]. 水科学进展,1997,8(1):97-101. (RUI Xiaofang. Some problems in research of watershed hydrology model [J]. Advances in Water Science,1997,8(1):97-101. (in Chinese))
- [5] 吴险峰,刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展[J]. 地理科学进展,2002,21(4):341-348. (WU Xianfeng,LIU Changming. Progress in watershed hydrological models [J]. Progress in Geography,2002,21(4):341-348. (in Chinese))
- [6] 宋星原,余海艳,张利平,等. VIC 陆面水文模型在白莲河流域径流模拟中的应用[J]. 水文,2007,27(2):40-44. (SONG Xingyuan, YU Haiyan,ZHANG Liping,et al. Application of VIC land surface hydrological model in flow simulation of Bailian River basin [J]. Journal of China Hydrology,2007,27(2):40-44. (in Chinese))
- [7] 黄小祥,姚成,李致家,等. 栅格新安江模型在天津于桥水库流域上游的应用[J]. 湖泊科学,2016,28(5):1134-1140. (HUANG Xiaoxiang,YAO Cheng,LI Zhijia,et al. Application of grid-Xinjiang model in the upstream of Yuqiao basin, Tianjin [J]. Journal of Lake Science,2016,28(5):1134-1140. (in Chinese))
- [8] Wagner S,Fersch B,Yuan F,et al. Fully coupled atmospheric-hydrological modeling at regional and long-term scales:Development, application,and analysis of WRF-HMS [J]. Water Resources Research,2016,52(4):3187-3211.
- [9] Gochis D J,Barlage M,Dugger A,et al. The WRF-Hydro modeling system technical description,(Version 5.0) [R]. NCAR Technical Note,2018.
- [10] Senatore A,Mendicino G,Gochis D J,et al. Fully coupled atmosphere-hydrology simulations for the central Mediterranean:Impact of enhanced hydrological parameterization for short and long time scales [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems,2015,7(4):1693-1715.
- [11] Kerandi N,Arnault J,Laux P,et al. Joint atmospheric-terrestrial water balances for East Africa;a WRF-Hydro case study for the upper Tana River basin [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017,131(3-4):1337-1355.
- [12] Naabil E,Lampthey B L,Arnault J,et al. Water resources management using the WRF-Hydro modelling system;Case-study of the Tono dam in West Africa [J]. Journal of Hydrology Regional Studies,2017,12(C):196-209.
- [13] Arnault J,Wagner S,Rummler T,et al.Role of runoff-infiltration partitioning and resolved overland flow on land-atmosphere feedbacks:A case-study with the WRF-Hydro coupled modeling system for West Africa [J]. Journal of Hydrometeorology,2015,175:1489-1516.
- [14] Shen Y,Zhao P,Pan Y,et al. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2014,119(6):3063-3075.
- [15] Yucel I,Onen A,Yilmaz K,et al. Calibration and evaluation of a flood forecasting system;Utility of numerical weather prediction model,data assimilation and satellite-based rainfall [J]. Journal of Hydrology,2015,523:49-66.
- [16] 李致家,姜婷婷,黄鹏年,等. 降雨和地形地貌对水文模型模拟结果的影响分析[J]. 水科学进展,2015,26(4):473-480. (LI Zhijia,JIANG Tingting,HUANG Pengnian,et al. Impact and analysis of watershed precipitation and topography characteristics on model simulation results [J]. Advances in Water Science,2015,26(4):473-480. (in Chinese))

(下转第 18 页)