

Flash Flood Simulation in the Baishahe Basin Using Hydrological Models

Jinjin Wu, Yanjun Zhang*, Xiuhuang Chen, Ningyue Chen, Jianhua Zhao, Sida Chen

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: *zhangyj1015@hotmail.com

Received: Jan. 13th, 2020; accepted: Feb. 26th, 2020; published: Mar. 3rd, 2020

Abstract

In order to improve the accuracy of flood forecasting and reduce the economic loss caused by flash flood, the distributed time variant gain (DTVGM) model, Xin'anjiang and TOPMODEL models were applied to the Baishahe basin. Observed data from 2009 to 2013 were selected for calibration and validation of different models. The simulation results in both calibration and validation periods were compared and analyzed, and the applicability of the different models in the Baishahe basin was discussed. The simulation results of the average flood peak errors of the DTVGM model, Xin'anjiang model, TOPMODEL model are 16.93%, 54.00%, 23.20%, and the runoff depth errors are 21.28%, 36.69%, 12.68% in turn. The Xin'anjiang model has poor simulation results and the worst applicability in the basin. The TOPMODEL model has better simulation results than the Xin'anjiang model, but the flood peak error is still relatively large. The DTVGM model has the best simulation effect and the best applicability. It can meet the basic requirements of flood forecasting and could be used for flash flood forecasting in this area.

Keywords

Flash Flood Simulation, DTVGM Model, Xin'anjiang Model, TOPMODEL Model, Bashahe Basin

水文模型在白沙河流域山洪模拟中的适用性研究

吴金津, 张艳军*, 陈秀篁, 陈宁玥, 赵建华, 陈斯达

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉
Email: *zhangyj1015@hotmail.com

收稿日期: 2020年1月23日; 录用日期: 2020年2月26日; 发布日期: 2020年3月3日

摘要

为提高白沙河流域山洪预警预报精度, 减少山洪灾害在该区域造成的经济损失, 本文将分布式时变增益模型、

作者简介: 吴金津, 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。

*通讯作者。

文章引用: 吴金津, 张艳军, 陈秀篁, 陈宁玥, 赵建华, 陈斯达. 水文模型在白沙河流域山洪模拟中的适用性研究[J]. 水资源研究, 2020, 9(2): 131-139. DOI: 10.12677/jwrr.2020.92014

新安江模型、TOPMODEL模型应用于山洪模拟中,选取该流域2009~2013年的实测洪水资料进行模型的率定和验证,比较分析场次洪水在率定期和验证期的模拟结果,探究三种模型在白沙河流域的适用性。结果表明:分布式时变增益模型、新安江模型以及TOPMODEL模型模拟结果的平均洪峰误差分别为16.93%、54.00%、23.20%,径流深误差分别为21.28%、36.69%、12.68%。新安江模型模拟效果不佳,适用性最差;TOPMODEL模型模拟结果比新安江模型模拟结果要好,但洪峰误差依然相对偏大;分布式时变增益模型的模拟效果最好,适用性最强,能够满足洪水预报的基本要求,可用于在该区域进行山洪预警预报。

关键词

山洪模拟, 分布式时变增益模型, 新安江模型, TOPMODEL模型, 白沙河流域

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

山洪灾害是指在山区由于降雨、融雪等引起的包括洪水、泥石流和滑坡等灾害[1]。山洪灾害季节性强、来势猛、破坏大,往往集中在小区域,给我国造成巨大的经济损失和人员伤亡。21世纪以来,我国每年有一千左右人因山洪而死亡[2]。因此,山洪灾害是我国在防洪减灾方面必须重点考虑的对象。2016年国家防总第一次全体会议再次强调,山洪灾害防治投资少、见效快,要进一步加大建设力度[3]。因为山洪形成机理复杂,国内在非工程措施上仍然处于探索阶段,特别是在山洪的灾害预测预报方面和应急响应上,无法满足实际的需求,总体上尚不能从救灾转变为预防。寻求能在不同地区灵活适用的山洪模拟模型,是山洪灾害预防的重要目标,更是山洪预警的核心工作。因此一些水文模型也在国内各山区流域被试验或者初步应用于模拟山洪,并取得了一定成果。常用的山洪水文模型包括新安江模型、TOPMODEL模型、分布式时变增益模型(DTVGM)、HEC-HMS模型等;如余文君在黑河山区对SWAT模型进行改进和应用,效率系数由0.60提高至0.86[4];穆艾塔尔·赛地等在乌鲁木齐山区流域应用了HEC-HMS模型,各场次洪水确定性系数在0.67~0.87之间[5];孟天翔在辽宁海阳河流域使用Mike Flood模型进行山洪数值模拟,率定期、检验期的效率系数大于0.77[6];高瑞、穆振侠在天山西部山区建立了VIC模型,模拟的月尺度效率系数达到了0.80,日尺度效率系数达到了0.64[7];崔伟财使用TOPMODEL模型在白沙河流域进行了洪水预报模拟,率定期和检验期的预报合格率均大于60%,平均确定性系数大于0.62[8];夏军等在黄河无定河流域分别建立起了月、日、时尺度的DTVGM模型,除小时模型模拟效果较差效率系数仅为0.53以上之外,无论是月尺度模型还是日尺度模型,最终效果都不错[9]。

除了对单一水文模型的研究外,国内学者也比较了不同模型间结果的差异,因为不同水文模型在水文循环中考虑的侧重点不同,会造成模拟结果间有差异[10][11]。王婕等使用了新安江模型、TOPMODEL模型、人工神经网络模型在沿渡河进行模拟,模拟结果表明新安江模型适用性最好[12];张汉辰等从原理和应用两方面比较了CASC2D模型和新安江模型的差异[13];李娟芳等人探究了HEC-HMS模型和TOPMODEL模型的特征及差异,结果表明HEC-HMS在半干旱区适应性更好[14];王思媛等比较了HBV模型和新安江模型在黄河源区应用效果,发现GA算法率定下的新安江模型模拟效果优于HBV模型[15];刘松等比较了新安江模型、辽宁西部非饱和产流模型和时变增益模型在干旱半干旱地区的模拟效果,发现考虑降雨强度的时变增益模型模拟效果最优[16];黄艳等以官山河为例比较了新安江模型、TOPMODEL模型、改进的SCS模型在山洪模拟中的效果,发现TOPMODEL模型在洪峰模拟上效果好,改进的SCS模型在洪量上模拟效果好[17]。白沙河流域是典型的西南山

区小流域，是岷江上游左岸一级支流，水能资源丰富，供水量足且径流年际变化较稳定，水质也较为清澈，为成都市的水源之一。近年来，白沙河中游河段深溪沟、庙坝区域频繁暴发暴雨山洪灾害，大量泥沙淤堵河道、淹没住房，并中断成都的饮用水源，造成了重大人员伤亡和经济损失。因此，探究能够适用于白沙河流域山洪模拟的水文模型十分关键。

本文将分布式时变增益模型(DTVGM)、新安江模型和 TOPMODEL 模型在白沙河流域进行场次洪水模拟，通过对比分析不同模型模拟结果，探究不同模型的适用性，选取模拟效果最好的模型用于该流域今后的预警预报，为有效提高该流域的山洪预警预报精度提供支持。

2. 流域概况

白沙河位于灌县(即四川省成都市都江堰市)，源头在虹口乡，全长 49.3 km，所在经纬度为 $103^{\circ}33'E\sim 103^{\circ}43'E$ ， $31^{\circ}01'N\sim 31^{\circ}22'N$ ，全流域处于四川盆地。白沙河流域面积为 368.5 km^2 ，流域海拔在 741~4420 m 区间内，高程变化大，相对高差达到了 3983 m，植被垂直带谱明显，植被的覆盖面积占全流域面积的 96.52%。

白沙河流域内共有 3 个雨量站(杨柳坪站、大火地站和虹口站)，其中杨柳坪站也是位于流域出口的水文站，利用泰森多边形权重加权求和作为全流域的降雨量。在 ArcMap 上进行泰森多边形分割，分别确定三个雨量站的权重系数分别为大火地站 73.93%，虹口站 20.65%以及杨柳坪站 5.42%。具体站点位置参见图 1。从水文年鉴中的《长江流域水文资料》获取到白沙河流域 2009~2013 年逐日降雨径流蒸发以及洪水摘录表的场次洪水资料，并从中选取 14 场洪水资料进行场次洪水模拟。

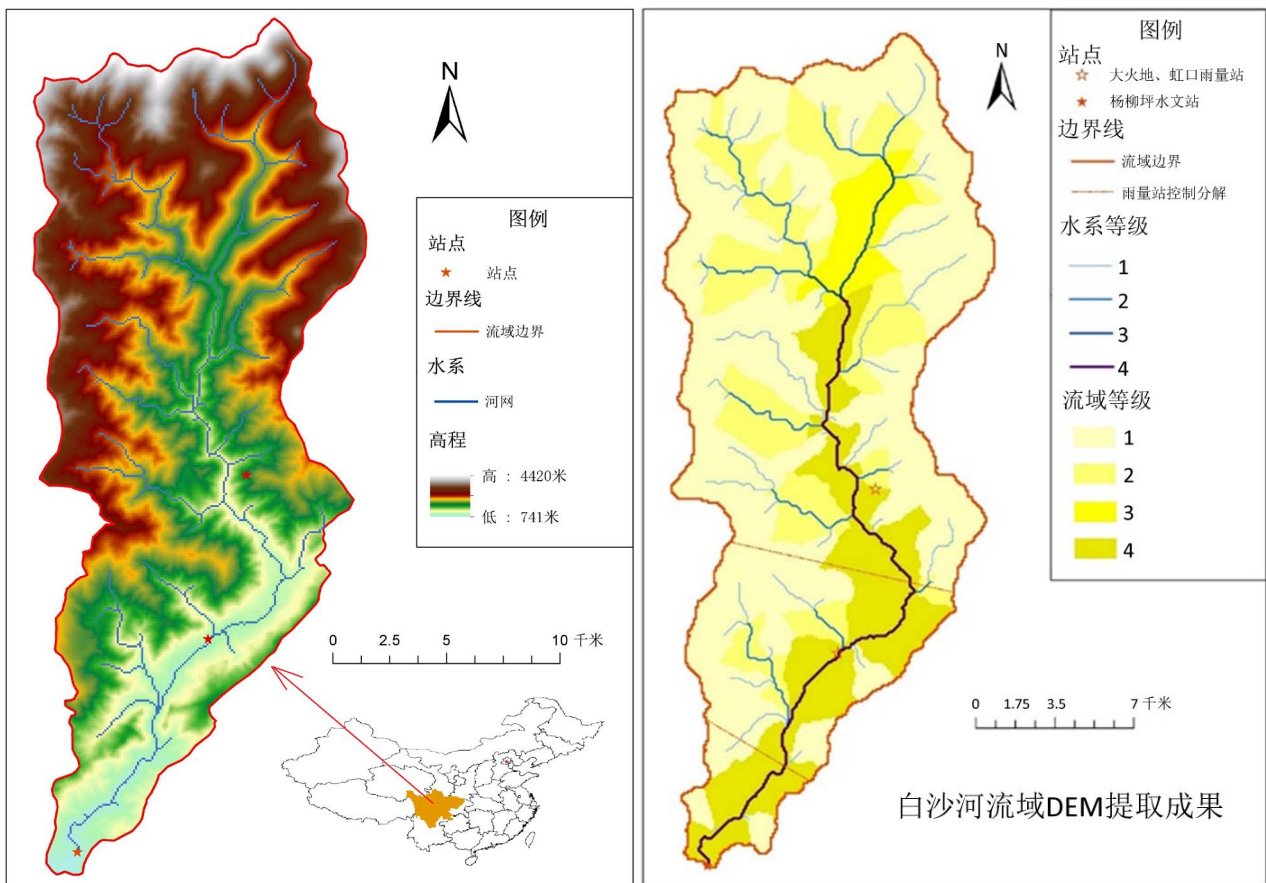


Figure 1. Elevation map and water system map of Baishahe basin
图 1. 白沙河流域高程分布图和水系图

3. 研究方法

3.1. DTVGM 模型

DTVGM 模型是一个将分布式水文模型和非线性系统理论相结合的水文模型，由夏军于 1989-1995 年间提出，并逐渐和遥感信息技术结合，发展为 DTVGM 模型[18] [19]。该模型通过考虑土壤含水量对于产流量的影响，以简单的降雨径流非线性关系等价模拟了 Volterra 泛函数表达的复杂非线性水文过程[20]。每一个子流域的地表径流可以表示为：

$$RS = g_1 \left(\frac{AW}{AWC} \right)^{g_2} \cdot P \quad (1)$$

式中： AW 表示时段初的土壤湿度； AWC 是饱和土壤湿度； g_1 与 g_2 是识别增益因子的有关参数， $(0 < g_1 < 1, 1 < g_2)$ 其中 g_1 为土壤饱和后径流系数， g_2 为土壤水影响系数；具体的时变增益模型介绍可以参考文献[21]和[22]。

3.2. 新安江模型

新安江模型始建于 1973 年，最早由河海大学赵人俊教授提出，并改进发展成为三水源以及其他多水源的模型[23] [24]。该模型多应用于湿润地区与半湿润地区的水文预报和水文设计，主要包括四部分：蒸散发计算、产流计算、水源划分以及汇流计算。新安江模型的核心是蓄水容量曲线[25]，借助蓄水容量曲线，考虑了土壤蓄水量在流域空间分布的不均匀性。

3.3. TOPMODEL 模型

TOPMODEL 模型是一个基于地形的有一定物理机制的半分布式水文模型，其利用地形指数 $\ln(a/\tan\beta)$ 或地形-土壤指数 $\ln(a/T \tan\beta)$ (a = 单位等高线长度的排水面积、 $\tan\beta$ = 地表坡度、 T = 导水系数)来反映流域水文现象，尤其是径流运动的分布规律[26]。

3.4. 误差评定标准

根据《水文情报预报规范》，为评价模型模拟效果，选取洪峰相对误差、峰现时间误差、径流深相对误差等作为评价指标[27]。

4. 模拟结果及对比分析

本文利用 DTVGM 模型、新安江模型以及 TOPMODEL 模型对白沙河流域 2009~2013 年 14 场洪水进行模拟，其中前 8 场作为率定期，后 6 场作为检验期，选取 SCE-UA 算法进行参数率定，模拟结果如表 1 所示。

从洪峰误差来看，DTVGM 模型总体的洪峰模拟平均误差为 16.93%，合格率为 64.29%；新安江模型总体的洪峰模拟平均误差为 54%，合格率仅 42.86%；TOPMODEL 模型总体的洪峰模拟平均误差为 23.20%，合格率为 50.00%。从洪峰误差的角度来看，DTVGM 模型和 TOPMODEL 模型的模拟效果相对较好，新安江模型模拟的效果相对较差。从峰现时差来看，DTVGM 模型总体的峰现时差合格率达到 85.71%；新安江模型总体的峰现时差合格率达到 92.86%；TOPMODEL 模型总体的峰现时差合格率为 78.57%。DTVGM 模型与新安江模型在峰现时间上的模拟效果都较好，合格率都大于 80%，而 TOPMODEL 模型的峰现时差模拟相对较差。从径流深误差来看，DTVGM 模型总体的径流深平均误差为 21.28%，合格率达到 50%；新安江模型总体的径流平均误差为 36.69，合格率仅为 28.57%；TOPMODEL 模型总体的径流深平均误差为 12.68，合格率为 64.29%。TOPMODEL 模型在径流深上的模拟效果要优于 DTVGM 模型和新安江模型在径流深上的模拟效果。

DTVGM 模型、新安江模型、TOPMODEL 模型在白沙河流域进行山洪模拟的典型洪水过程线的结果参见图 2~5。图 2 洪号“20100819”典型洪水模拟过程中，实测流量过程线为双峰洪水，DTVGM 模型、新安江模型、

TOPMODEL 模型模拟的过程也均为双峰洪水,但模拟流量都偏小。图 3 洪号“20110821”典型洪水模拟过程中,新安江模型和 TOPMODEL 模型对降雨产流的反应较为敏感,导致模拟出来的洪水过程为双峰与实测洪水过程线有所偏差;DTVGM 模型模拟的洪水过程线与实测洪水过程线拟合较好,模拟的洪峰流量略有偏大,但仍在许可误差范围内。图 4 洪号“20120818”典型洪水模拟过程中,DTVGM 模型、新安江模型和 TOPMODEL 模型模拟的洪水过程线与实测洪水过程线的线型比较接近,模拟效果较好。图 5 洪号“20130725”典型洪水模拟过程中,DTVGM 模型模拟的洪水过程线与新安江模型模拟和 TOPMODEL 模型模拟的洪水过程线相比,和实测洪水过程线拟合程度更高,洪峰流量最为接近。

综合对比分析 DTVGM 模型、新安江模型、TOPMODEL 模型的模拟结果,当将适用于南方湿润地区的新安江模型应用到山区小流域进行山洪模拟时效果并不是很好,因为新安江模型的产流机制是蓄满产流,而在复杂地形条件的山区小流域中,蓄满产流可能不是主要的产流机制。此外新安江模型是集总式模型,在进行山区小流域山洪模拟应用时,无法反应地形地貌等条件的空间异质性的特点,导致其在白沙河流域的山洪模拟效果不好。分布式时变增益非线性模型(DTVGM)和 TOPMODEL 模型在白沙河流域的山洪模拟结果相对较好,其中 DTVGM 模型在洪峰和峰现时差上的模拟效果要优于 TOPMODEL 模型, TOPMODEL 模型在径流深上的模拟效果要优于 DTVGM 模型。TOPMODEL 模型作为半分布式水文模型,通过地形指数来反映流域的地形变化有利于它在复杂的山区小流域进行模拟。DTVGM 模型作为分布式水文模型,既有分布式水文概念性模拟的特征,同时也具有水文系统分析适应能力强的优点,能够在水文资料信息不完全或者有不确定性的干扰条件下,获得比较好的模拟效果。

Table 1. Flood simulation results in Baishahe basin

表 1. 白沙河流域洪水模拟结果

次洪编号	洪峰误差(%)			峰现时差(h)			径流深误差(%)			
	DTVGM	XAJ	TOPMODEL	DTVGM	XAJ	TOPMODEL	DTVGM	XAJ	TOPMODEL	
20090826	4.62	54.13	-22.99	3	-2	5	23.33	21.06	-31.03	
20100814	29.82	-32.39	99.94	-1	-1	6	-27.22	-21.63	35.61	
20100819	-20.68	-53.45	33.47	-2	-1	-2	-20.48	-35.84	9.86	
率定期	20100909	8.30	-12.56	5.82	2	0	2	-0.18	-22.26	-8.82
20110707	-9.43	40.94	8.10	1	2	1	-4.28	48.39	2.68	
20110704	-47.15	139.86	20.48	-1	-3	-3	-35.60	31.36	-13.73	
20110706	6.39	5.29	7.30	15	11	11	-1.15	0.71	-21.39	
20110821	5.91	10.12	16.99	1	1	1	3.01	58.74	-13.28	
20120727	-43.82	255.22	-21.70	12	1	0	34.13	65.86	-26.47	
20120818	12.87	-25.39	20.69	-1	0	0	-18.81	67.68	5.90	
检验期	20130709	5.64	-12.64	19.38	0	1	1	-16.98	39.31	9.34
20130710	3.98	-39.04	21.79	1	-2	-3	-37.10	27.03	6.93	
20130711	-24.86	-19.88	15.07	-1	0	-1	-56.32	49.95	-17.80	
20130725	-13.51	-55.04	11.08	0	1	0	19.28	23.85	-9.63	
平均值	16.93	54.00	23.20	—	—	—	21.28	36.69	12.68	
合格率	64.29	42.86	50.00	85.71	92.86	78.57	50.00	28.57	64.29	

注:表中 DTVGM 表示分布式时变增益非线性模型, XAJ 表示新安江模型, TOPMODEL 表示 TOPMODEL 模型;洪峰误差和径流深误差大于 0 表示模拟值比实测值大,小于 0 表示模拟值比实测值小;峰现时差大于 0 表示滞后,小于 0 表示提前。

5. 结论与讨论

1) DTVGM 模型、新安江模型、TOPMODEL 模型三种模型在白沙河流域的模拟效果最优的为 DTVGM 模型，其次为 TOPMODEL 模型。DTVGM 模型在白沙河流域的山洪模拟中适用性较好，率定期和检验期的场次洪水平均洪峰误差仅为 16.93%，平均径流深误差仅为 21.28%，峰现时间合格率为 85.71%，可以较好地模拟该流域的洪水过程，可用于该流域的山洪预警预报。

2) 白沙河流域高程为 741~4420 m，高程差变化较大，DTVGM 模型和 TOPMODEL 模型为分布或半分布式模型，在模拟过程中考虑到了地形变化的因素，且模拟结果相对较好，说明在进行山区小流域的模拟过程中，能够将地形因素考虑进去的水文模型能够更好地进行山洪模拟。

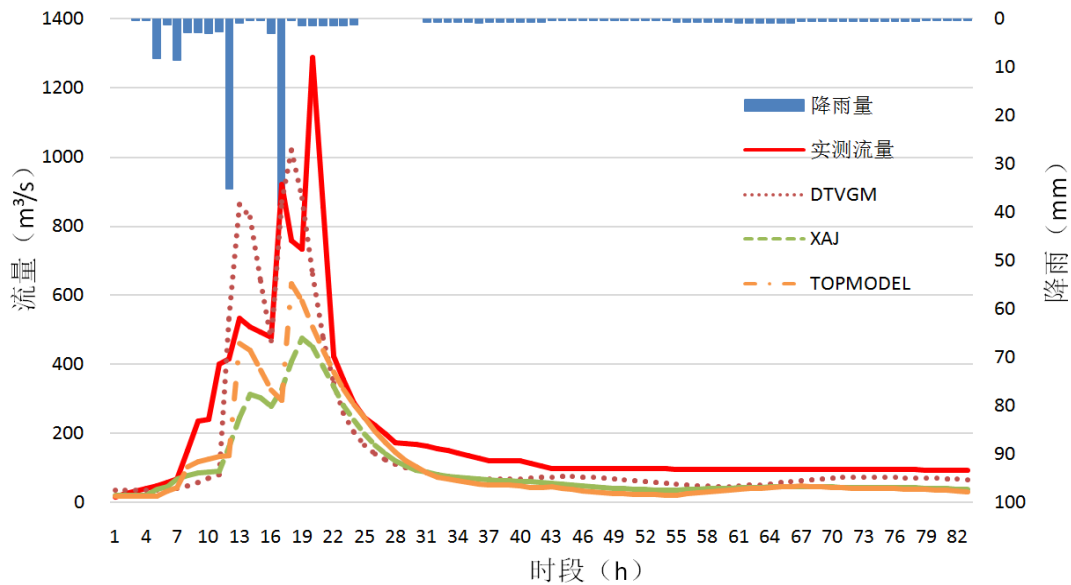


Figure 2. Simulation results of typical flood “20100819”
 图 2. 洪号为“20100819”的典型场次洪水的模拟结果

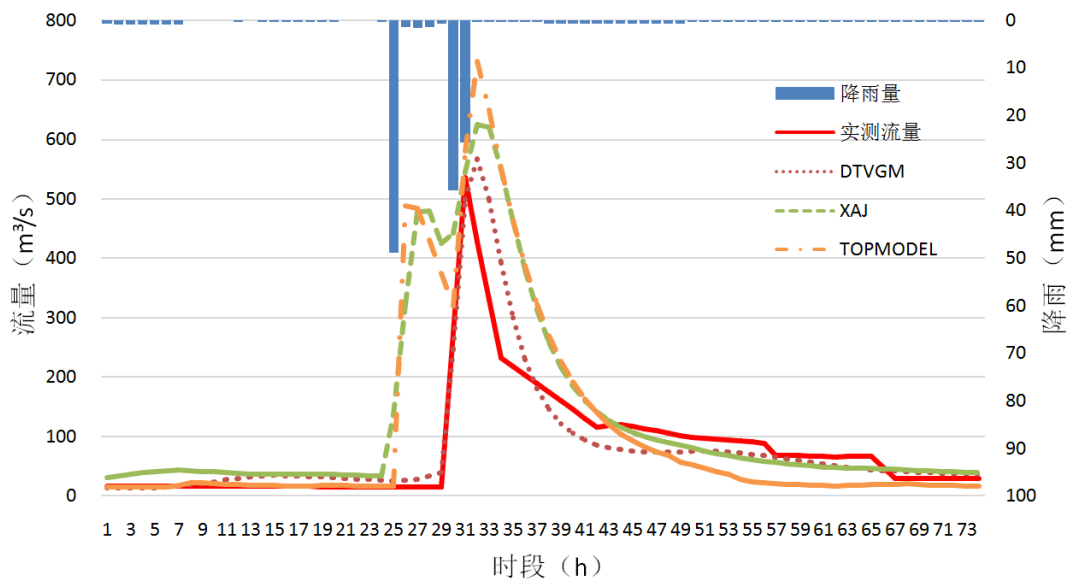


Figure 3. Simulation results of typical flood “20110821”
 图 3. 洪号为“20110821”的典型场次洪水的模拟结果

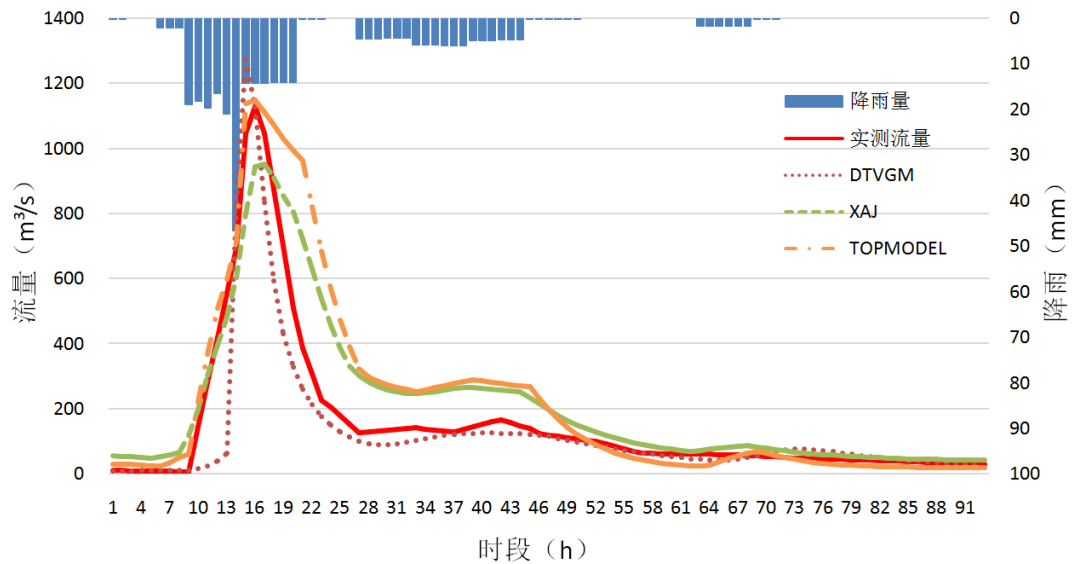


Figure 4. Simulation results of typical flood “20120818”

图 4. 洪号为“20120818”的典型场次洪水的模拟结果

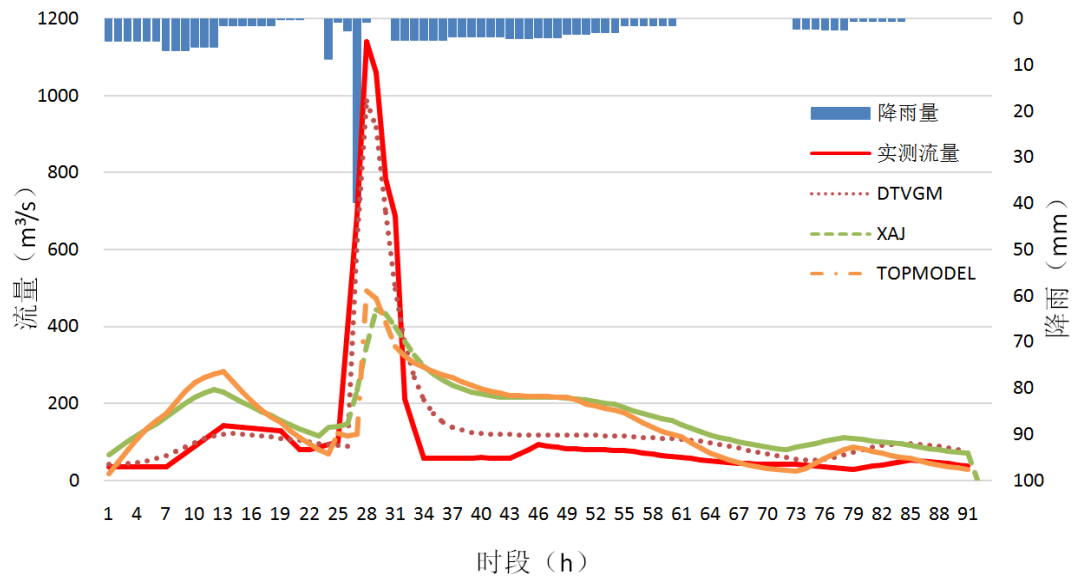


Figure 5. Simulation results of typical flood “20130725”

图 5. 洪号为“20130725”的典型场次洪水的模拟结果

3) 白沙河流域的雨量站布设平均密度为 $120 \text{ km}^2/\text{个}$ ，根据《水文站网规划技术导则》，雨量站控制流域面积不能超过 60 km^2 ，山洪频发区不大于 30 km^2 [28]，同时由于山区小流域降雨的空间变异极强，导致雨量站未能够准确监测到部分场次降雨，使得 DTVGM 模型、新安江模型、TOPMODEL 模型在部分场次洪水的模拟过程中洪峰和径流深误差均较大。若想进一步提高该流域山洪预警预报精度，可适当增设雨量站，以便获得更多降雨资料用于预警预报。同时可以考虑将遥感、雷达测雨等技术手段与地面监测降雨结合起来，使得降雨资料更具有代表性从而来提高模型模拟精度。

4) DTVGM 模型模拟结果较好，新安江模型和 TOPMODEL 模型效果相对一般。这可能是由于山区小流域产汇流机制较为复杂，白沙河流域产流机制可能不是单一的蓄满产流或者超渗产流。而新安江模型和 TOPMODEL 模型的产流机制均为蓄满产流，DTVGM 模型无明确的产流机制，为系统性的黑箱子模型，反而更

加贴合山区小流域的实际情况。因此,若想进一步提高山洪预警预报精度,可通过实验和野外观测的方式弄清楚山区小流域复杂的产汇流机制,以便进一步提高模型模拟精度。

基金项目

本文由国家重点研发计划(No.2017YFC1502503)和国家自然科学基金重大项目(No.41790431)资助。

参考文献

- [1] 国家防汛抗旱总指挥部. 中国水旱灾害公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
National Flood Control and Drought Relief Headquarters. Bulletin of flood and drought disasters in china. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 张平仓, 丁文峰, 王协康. 山洪灾害监测预警关键技术与集成示范研究构想和成果展望[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(5): 1-11.
ZHANG Pingcang, DING Wenfeng and WANG Xiekang. Research framework and anticipated results of the key technology and integrated demonstrations of mountain torrent disaster monitoring and early warning. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(5): 1-11. (in Chinese)
- [3] 水利部印发全国山洪灾害防治项目 2017-2020 年实施方案[J]. 水利信息化, 2017(6): 22.
The ministry of water Resources issued the implementation plan of the national flash flood prevention project for 2017-2020. Water Resources Informatization, 2017(6): 22. (in Chinese)
- [4] 余文君. SWAT 模型在黑河山区流域的改进与应用[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2012.
YU Wenjun. Improvement and application of SWAT hydrologic model in mountainous upper Heihe river basin. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012. (in Chinese)
- [5] 穆艾塔尔赛地, 阿不都沙拉木, 丁建丽, 崔春亮. HEC-HMS 水文模型在数据稀缺山区流域中的应用——以乌鲁木齐河流域为例[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6):140-143 + 148.
MUAITAER Saidi, ABUDOU Shalamu, DING Jianli and CUI Chunliang. Application of HEC-HMS in data-insufficient mountainous watersheds: A case study from Urumqi river basin. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(6): 140-143 + 148. (in Chinese)
- [6] 孟天翔. 基于 Mike Flood 的清原县海阳河小流域山洪数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2017.
MENG Tianxiang. Flood routing numerical of Haiyang river small watershed in village of Qingyuan based on Mike Flood. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [7] 高瑞, 穆振侠. 天山西部山区 VIC 模型的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 44-48.
GAO Rui, MU Zhenxia. Application of VIC model in western Tianshan Mountains. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 44-48. (in Chinese)
- [8] 崔伟财. TOPMODEL 模型在白沙河流域洪水预报中的应用研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(9): 167-169.
CUI Weicai. Application of TOPMODEL model in flood forecasting of Baisha river basin. China Water Transport, 2019, 19(9): 167-169. (in Chinese)
- [9] 夏军, 叶爱中, 乔云峰, 等. 黄河无定河流域分布式时变增益水文模型的应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2007, 15(4): 457-465.
XIA Jun, YE Aizhong, QIAO Yunfeng, et al. An applied research on distributed time variant gain model in Wuding river of yellow river. Journal of Basic Science and Engineering, 2007, 15(4): 457-465. (in Chinese)
- [10] 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(4): 341-348.
WU Xianfeng, LIU Changming. Progress in watershed hydrological models. Progress in Geography, 2002(4): 341-348. (in Chinese)
- [11] 徐宗学. 水文模型: 回顾与展望[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 278-289.
XU Zongxue. Hydrological models: Past, present and future. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(3): 278-289. (in Chinese)
- [12] 王婕, 宋晓猛, 张建云, 等. 中小尺度流域洪水模型模拟比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(7): 72-76.
WANG Jie, SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, et al. Flood simulation of the small and medium-sized river catchment by using multiple hydrological models. China Rural Water and Hydropower, 2019(7): 72-76. (in Chinese)
- [13] 张汉辰, 李致家, 等. CASC2D 模型和新安江模型的应用比较[J]. 水力发电, 2015, 41(8): 23-25 + 61.
ZHANG Hanchen, LI Zhijia, et al. Comparative study on the application of CASC2D model and Xin'anjiang model. Water Power, 2015, 41(8): 23-25 + 61. (in Chinese)

- [14] 李娟芳, 王文川, 车沛沛, 李庆敏. HEC-HMS 模型和 TOPMODEL 模型在东庄流域山洪预报的应用研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(3): 50-53 + 8.
LI Juanfang, WANG Wenchuan, CHE Peipei and LI Qingmin. Application research on HEC-HMS model and TOPMODEL model in mountain flood forecasting of Dongzhuang watershed. *Water Resources and Power*, 2019, 37(3): 50-53 + 8. (in Chinese)
- [15] 王思媛, 孙利敏, 等. HBV 模型与新安江模型在黄河源区的应用比较[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 41-45 + 14.
WANG Siyuan, SUN Limin, et al. Comparison of HBV and Xin'anjiang model's application of source region of Yellow River. *Water Resources and Power*, 2016, 34(12): 41-45 + 14. (in Chinese)
- [16] 刘松, 张利平, 余敦先, 王强, 胡辰, 夏军. 干旱半干旱地区流域水文模型的适用性[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(5): 384-390.
LIU Song, ZHANG Liping, SHE Dunxian, WANG Qiang, HU Chen and XIA Jun. Application of catchment hydrologic models in arid and semi-arid regions. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2019, 52(5): 384-390. (in Chinese)
- [17] 黄艳, 张艳军, 袁正颖, 等. 水文模型在山洪模拟中的比较应用[J]. 水资源研究, 2019(1): 33-43.
HUANG Yan, ZHANG Yanjun, YUAN Zhengyin, et al. Comparison and application of hydrological models in mountain flood simulation. *Journal of Water Resources Research*, 2019(1): 33-43. (in Chinese)
- [18] 夏军, 叶爱中, 王纲胜. 黄河流域时变增益分布式水文模型(I)——模型的原理与结构[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005(6): 10-15.
XIA Jun, YE Aizhong and WANG Gangsheng. A distributed time variant gain model applied to Yellow River (I): Model theories and structures. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2005(6): 10-15. (in Chinese)
- [19] 叶爱中, 夏军, 王纲胜. 黄河流域时变增益分布式水文模型(II)——模型的校检与应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006(4): 29-32.
YE Aizhong, XIA Jun and WANG Gangsheng. A distributed time variant gain model applied to Yellow River (II): Model checking and application. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2006(4): 29-32. (in Chinese)
- [20] 夏军. 水文非线性系统理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
XIA Jun. *Theory & approaches of hydrological non-linear system*. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (in Chinese)
- [21] XIA, J. A system approach to real-time hydrologic forecast in watersheds. *Water International*, 2002, 27(1): 87-97.
<https://doi.org/10.1080/02508060208686981>
- [22] 夏军, 王纲胜, 吕爱锋, 等. 分布式时变增益流域水循环模拟[J]. 地理学报, 2003(5): 789-796.
XIA Jun, WANG Gangsheng, LV Aifeng, et al. A research on distributed time variant gain modeling. *Acta Geographica Sinica*, 2003(5): 789-796. (in Chinese)
- [23] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1984.
ZHAO Renjun. *Catchment hydrologic modeling*. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1984. (in Chinese)
- [24] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6): 4-11.
ZHAO Renjun, WANG Peilan. Analysis of Xin'anjiang model parameters. *Journal of China Hydrology*, 1988(6): 4-11. (in Chinese)
- [25] 包为民. 水文预报[M]. 第4版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
BAO Weimin. *Hydrological forecast (4th Edition)*. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2006. (in Chinese)
- [26] 熊立华, 郭生练. 分布式流域水文模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
XIONG Lihua, GUO Shenglian. *Distributed watershed hydrological model*. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2004. (in Chinese)
- [27] 中华人民共和国水利部. SL2500-2000 水文情报预报规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *Standard for hydrological information and hydrological forecasting*. Beijing: China Water & Power Press, 2000. (in Chinese)
- [28] 水文站网规划技术导则(SL34-92)[S].
Technical guidelines for hydrological station network planning (SL34-92). (in Chinese)