

Comparison and Application of Hydrological Models in Mountain Flood Simulation

Yan Huang¹, Yanjun Zhang^{1*}, Zhengying Yuan², Jinjin Wu¹, Wenxun Dong¹, Peirong Lin¹

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

²Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Wuhan Hubei

Email: *zhangyj1015@hotmail.com

Received: Feb. 2nd, 2019; accepted: Feb. 17th, 2019; published: Feb. 25th, 2019

Abstract

Mountain flood disasters occur frequently, causing major economic losses to society. Therefore, hydrological simulation has important practical significance for the prevention and control of mountain flood disasters. In order to study the simulation consequence of different hydrological models in mountain flood forecasting, taking the Guanshan river basin as an example, Xin'anjiang model, TOPMODEL model and improved SCS model were used to simulate multi-field floods. The model parameters were determined using the time by day rainfall runoff data from 1973 to 1987, and 15 typical floods were used for model verification. From the simulation results of the three models, the simulation effects are general. The TOPMODEL model fitted the peak flow better. The average relative error is 23.14%, and the pass rate is 40%. The improved SCS model and the TOPMODEL model have better peak-to-peak time simulation, and the pass rate is 93%; the improved SCS model's simulation effect on the flood amount is the best, the relative error is 20.73%, and the pass rate is 67%. The TOPMODEL semi-distributed hydrological model can describe the flood peak flow response process in the natural world from the physical level more realistically. The improved SCS model improves the contribution of underground runoff and makes the flood simulation effect relatively better.

Keywords

TOPMODEL Model, Xin'anjiang Model, Improved SCS Model, Flood Simulation, Flash Flood Warning

水文模型在山洪模拟中的比较应用

黄艳¹, 张艳军^{1*}, 袁正颖², 吴金津¹, 董文逊¹, 林沛榕¹

¹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

²长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

Email: *zhangyj1015@hotmail.com

作者简介: 黄艳, 女, 广西河池人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。

*通讯作者。

收稿日期：2019年2月2日；录用日期：2019年2月17日；发布日期：2019年2月25日

摘要

山洪灾害频繁发生，给社会造成了重大经济损失，因此水文模拟对山洪灾害防治具有重要现实意义。为研究不同水文模型在山洪预报中的模拟效果，以官山河流域为例，使用新安江模型、TOPMODEL模型和改进的SCS模型等三种模型对多场次洪水进行模拟研究。使用1973~1987年的逐日逐时降雨径流资料对模型参数率定，取其中15场典型洪水进行模型验证。从三种模型模拟效果来看，模拟效果一般。TOPMODEL模型对洪峰流量拟合得较好，平均相对误差为23.14%，合格率为40%；改进的SCS模型与TOPMODEL模型对峰现时间模拟较好，合格率均为93%；改进的SCS模型对洪量模拟效果最佳，相对误差为20.73%，合格率为67%。TOPMODEL半分布式水文模型能从物理层面更为真实地描述自然界的洪峰流量响应过程，改进的SCS模型提高了地下径流的贡献而使得洪量模拟效果相对较好。

关键词

TOPMODEL模型，新安江模型，改进的SCS模型，洪水模拟，山洪预警

Copyright © 2019 by authors 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

山洪灾害是由突发性暴雨造成的山区洪水灾害，具有短历时、高强度特点。我国山区面积占全国土地面积69%，且山洪灾害频发。我国有超过一半的人口分布在山区，山洪灾害给国民经济带来的损失严重[1]。

大约40年前就开始有研究者在降雨及山洪方面进行研究[2]，国外开展的山洪预警预报研究比我国开展得要早。如以美国为代表的发达国家，已经构建较为成熟的山洪预警预报系统如山洪预警指南系统(FFG)，基于水文模型的动态临界雨量法已广泛使用，而我国刚初步采用临界雨量的计算方法，正在推广使用分布式水文模型和动态临界雨量法[3]。在山区流域洪水预报实际工作中，在国外，Gunter Bloschl等在奥地利北部山区应用分布式水文模型模拟山洪过程，使得模拟精度提高10%~30% [4]，Isabelle Braud等应用分布式水文模型模拟法国东南部流域2002年山洪过程，模拟效果也较好[5]。

国内沿用传统大江大河建模思路从淹没角度建立了以经验归纳统计法和水文水力学方法为手段的洪水预报模型，初步提出了“一维简化水动力学模型”、“分布式水文模型”和“多维完整水动力学模型”等模型。如王璐等将5种常用的水文模型应用于湿润、半干旱半湿润地区的14个典型山区小流域，在山区开展模型适用性研究，得出在湿润地区，API、新安江、TOPMODEL模型模拟效果较好而不管在湿润地区还是半湿润半干旱地区，HEC-HMS模型适用性最强的结论[6]；包红军将基于新安江模型建立的分布式混合产流GMKHM水文模型和分布式新安江模型应用于2009年汛期嘉陵江乔庄河支流大沟小流域山洪预报试验，得出两个分布式模型均适用于所研究小流域[7]；刘志雨等以动态临界雨量为指标，在江西遂川江流域应用了GBHM分布式水文模型[8]；郭良等提出构建以分布式水文模型为基础的山洪预警系统建设思路[9]；潘佳佳等比较了暴雨山洪动力学、运动波模型、扩散波模型的应用效果等等[10]。

但是我国山区环境复杂，山洪灾害突发性和局地性强，对山区暴雨洪水形成时空特征、致灾机理认识不够深入，监测预报预警的准确性和及时性不高，与国外发达国家普遍采用的实时动态预警方式相比，存在较大差距[11]。国家

科技部“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项 2017 年度项目申报指南中明确提出，山洪洪峰流量预报精度要由 40% 提高到 50%，说明了我国山洪预报精度依旧普遍偏低的现状。针对目前我国山洪灾害突发性和区域性、山洪灾害预警技术还未成型，预警系统尚未建立完善等现状，充分利用历史山洪灾害资料和实验资料，开展山区暴雨洪水时空演变特征、山洪灾害发生预警阈值、山洪形成机理和致灾机制、山洪模拟预报等基础性研究成为迫切需求[12]。

无资料小流域洪水模拟是山洪灾害预警预报的基础，本文旨在通过选取几种不同的典型水文模型模拟研究区暴雨洪水过程，对比分析不同模型模拟结果，总结不同模型适用条件，学习各个模型在机理分析中的建模思路，对研究区洪水预报做出初步尝试，以期后续构建适用于研究区的水文模型，提高山洪预警预报精度，减少山洪灾害造成的损失。

2. 模型概述

2.1. 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特别是径流运动的分布规律[13]。

TOPMODEL 模型在流域中将任意一点沿垂向可分为三层：分别是植被根系层(S_{rz})、土壤非饱和层(S_{uz})、饱和地下水区，用饱和和地下水到流域土壤表面的距离 z_i 表示。将研究流域划分成若干单元网格，降雨首先按一定速率下渗进入植被根系层，补给该层土壤含水量，该层水分会有一部分蒸发，满足该层土壤贮藏容量和蒸发消耗后的水量能够进一步下渗进入非饱和层土壤。在非饱和层中，水份按一定重力排水速率 Q_v 下渗进入饱和地下水层，接着经由侧向流动形成基流 Q_b 。随着饱和地下水位逐渐抬高，在流域的下游河道等处便有水分冒出，形成饱和坡面流 Q_s 。流域总径流 Q 就是由基流和饱和坡面流组成，即 $Q = Q_s + Q_b$ [13] [14]。

2.2. 新安江模型

新安江模型是在我国南方湿润地区有着广泛应用的集总式模型。模型的核心是流域蓄水容量曲线[15]，新安江模型首先对蓄满单元流域进行产汇流计算，得出单元流域的出口流量过程，再进行出口以下的河道洪水演算，把各个单元流域的出流过程叠加，求得流域的总出流过程[16]。蒸散发计算采用三层蒸散发模型；产流计算采用蓄满产流模型；用自由水蓄水库结构将总径流划分为地表径流、壤中流和地下径流 3 种；地表汇流计算采用单位线法；壤中流和地下径流汇流计算采用线性水库法。

2.3. 改进的 SCS 模型

SCS 模型是美国农业部水土保持局(Soil Conservation Service, SCS)于 1958 年研发并应用于小流域的设计洪水模型，Mishra 等提出的改进的 SCS 模型的产流机制为超渗产流机制，并假设下渗速率 fc 和接近无穷大时的最小渗透速率相等[17] [18] [19]。改进的 SCS 模型根据水量平衡原理及比例相等假设计算地面径流，降雨扣掉初损后下渗的部分分为下渗的静态部分(F_c)和动态部分(F_d)，动态下渗部分补充土壤含水量，静态下渗部分渗透到地下水位，最终在流域出口流出。不管土壤毛细管含水量是否得到满足，静态下渗部分(F_c)都会形成地下径流。本文地表产流汇流采用瞬时单位线法，地下径流汇流采用线性水库法，流域出口断面总径流包括地表径流和地下径流，即总径流 $Q = Q_s + Q_g$ 。

2.4. 模拟误差评定标准

1) 洪峰流量相对误差

$$Q_e = \frac{|Q_{p, sim} - Q_{p, obs}|}{Q_{p, obs}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $Q_{p, sim}$ 、 $Q_{p, obs}$ 分别为场次洪峰流量的模拟值与实测值， m^3/s ； Q_e 为场次洪峰流量相对误差，%，所有场次取其平均值即为流域洪峰流量平均相对误差，取实测洪峰流量的 $\pm 20\%$ 作为许可误差。

2) 峰现时间误差

$$T_e = T_{sim} - T_{obs} \quad (2)$$

式中： T_{sim} 、 T_{obs} 分别为峰现时间的模拟值与实测值； T_e 为峰现时间误差，h，3 h 内视为合格。

3) 洪量相对误差

$$V_e = \frac{|V_{sim} - V_{obs}|}{V_{obs}} \times 100\% \quad (3)$$

式中： V_{sim} 、 V_{obs} 分别为场次洪水流量的模拟值与实测值， m^3/s ； V_e 为场次洪水流量相对误差，%，所有场次取其平均值即为流域洪水流量平均相对误差，以实测值的 $\pm 20\%$ 作为许可误差。

4) 合格率

$$QR = \frac{n}{m} \times 100\% \quad (4)$$

式中： QR 为合格率； n 为合格模拟次数； m 为模拟的总次数。

3. 模型应用与结果分析

3.1. 研究区概况

本文以官山河流域作为研究区，官山河流域位于湖北省汉江中上游、丹江口市西南部，地处东经 $110^{\circ}48' \sim 111^{\circ}34'59''$ ，北纬 $32^{\circ}13'16'' \sim 32^{\circ}58'20''$ (如图 1)，总人口为 14,619 人，户数为 3854 户，人口密度为 241 人/ km^2 。流域面积 465 km^2 ，孤山水文站控制流域面积为 322 km^2 ，河道平均坡降 5.7‰，多年平均流量 7.78 m^3/s 。流域地形以中小起伏山地、丘陵为主，海拔为 240~1606 m，平均高程 690 m，大部分地区坡度在 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ，流域地势中间低，边缘高；最高点在流域西部与房县交接处(房县大湾沟村)。流域属于局地性暴雨和连阴雨高发区，年降水量 1100 mm，经常发生溪河洪水、泥石流以及滑坡灾害，其中 2012 年 8 月 4 日至 5 日，28 个小时内官山镇普降暴雨达 340 毫米，造成百年一遇的洪涝灾害。

流域主要有官山河、袁家河、吕家河、西河 4 条河流，最长河流长度约 14.2 km，河流总长度 268.5 km，河网密度约 0.84 km/km^2 。流域内有大马站、袁家河站和西河站三个气象站，孤山站一个水文站(如图 2)。站点权重如表 1 所示。

3.2. 模型应用与结果比较分析

利用流域 1973~1987 年逐日逐时水文资料以纳什效率系数作为目标函数对三个模型参数进行率定，资料来源于《长江流域水文资料》。并选取 15 场洪水用已优选参数进行模拟，模拟结果见表 2，选取部分场次洪水模拟过程作图，结果见图 3~图 8。

对于洪峰流量模拟平均相对误差，新安江模型、TOPMODEL 模型和改进的 SCS 模型相对误差分别为 38.33%、23.14%、37.26%，TOPMODEL 模型 > 新安江模型 > 改进的 SCS 模型，TOPMODEL 模型对洪峰流量模拟结果较好，新安江模型次之；对于峰现时间合格率，新安江模型、TOPMODEL 模型和改进的 SCS 模型合格率分别为 73%、93%、93%，改进的 SCS 模型 = TOPMODEL 模型 > 新安江模型，改进的 SCS 模型和 TOPMODEL 模型对于峰现时间模拟较好；对于洪水洪量平均相对误差，新安江模型、TOPMODEL 模型和改进的 SCS 模型相对误差分别为 37.33%、38.28%、20.73%，改进的 SCS 模型 > 新安江模型 > TOPMODEL 模型，改进的 SCS 模型对洪量模拟较好，新安江模型次之。从图 4 中可以看出，实测洪水洪峰与降雨过程存在不一致性，持续有降雨发生，实测流量出现第一个洪峰后陡落，与实际情况不符；而且从 19790912 场次与其它场次洪水图对比可以看出模

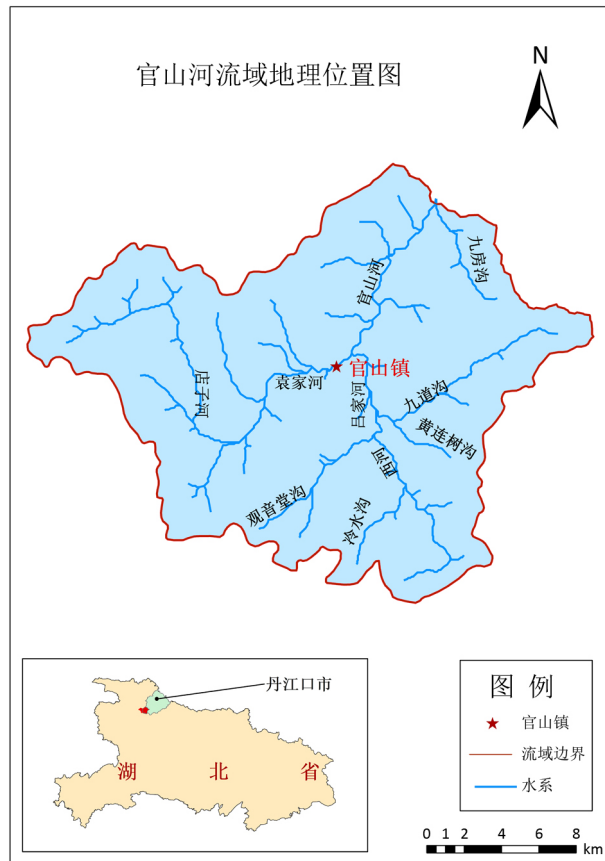


Figure 1. Administrative division map of Guanshan river basin
 图 1. 官山河流域地理位置图

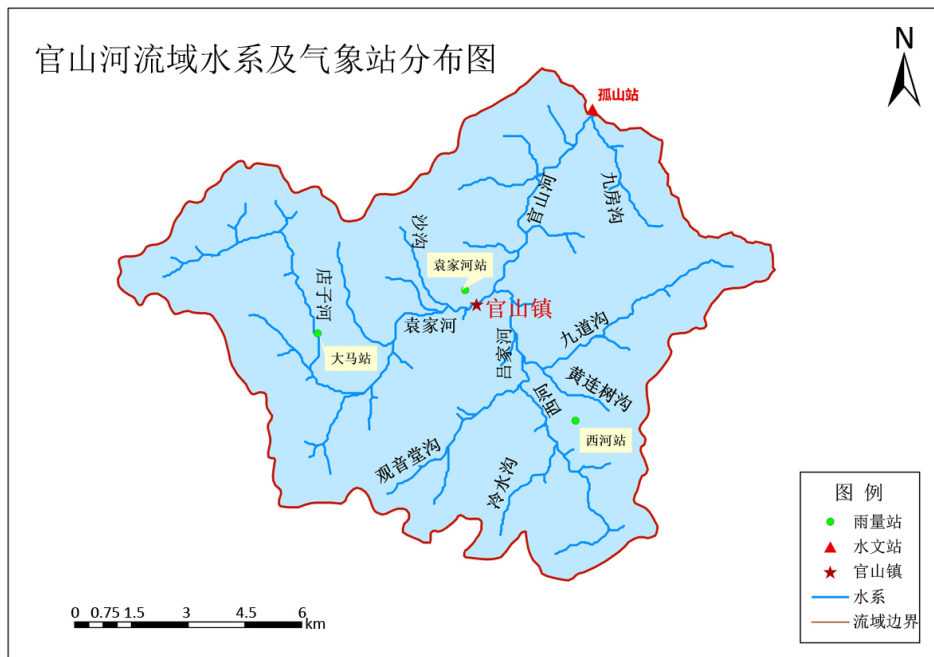


Figure 2. Sketch map of water system and meteorological station at Guanshan river basin
 图 2. 官山河流域水系及气象站分布图

Table 1. Control area and weight table of each station in Guanshan river basin
表 1. 官山河流域各站控制面积及权重表

站点	面积(km ²)	权重
袁家河站	71.29	0.22
大马站	106.79	0.33
西河站	88.69	0.28
孤山站	52.78	0.17

型对“单峰型”洪水模拟结果较好，而对“多峰型”洪水模拟结果较差。下面将简单分析一下各模型的适用性。

1) 改进的 SCS 模型。首先改进的 SCS 模型结构简单，参数少，对数据要求不太高，较适用于这种水文资料不够精准的小流域。许多研究者指出在暴雨径流中地下径流的重要性，如 Hewlett 等由试验发现了非饱和流也能形成壤中径流或地下径流，并且由 Dunne 等证实了非均质包气带确实具备产生壤中径流的条件[20]。改进的 SCS 模型为超渗产流机制，在土壤毛细管含水量未达到饱和时下渗的静态部分依旧能形成地下径流，从而对洪量模拟较好，也说明研究区场次洪水中地下径流贡献较大，存在突发暴雨时土壤含水量未饱和而形成地下径流的可能。

2) TOPMODEL 模型。首先 TOPMODEL 模型为蓄满产流，当研究区降雨强度不大时，也会产生地表径流；其次 TOPMODEL 模型利用空间地形指数来反映流域地形的变化，将流域地形、地貌等纳入模型考虑范围内，在地形起伏较大的山区洪水汇流中有一定优势。TOPMODEL 对洪峰流量模拟较好可能有这方面的原因。

3) 新安江模型。新安江模型模拟效果没有那么好是因为其是集总式模型，用在大流域模拟较多，对资料精度要求较高，当雨量站在空间分布不均匀或降雨具有空间不均匀性时，模型模拟就存在局限性，而且这种短时临近暴雨洪水具有极强的非线性性，新安江模型汇流采用的是线性汇流关系，因此模拟效果相对较差。

Table 2. Simulation results of the three hydrological models in Guanshan river basin
表 2. 三种水文模型在官山河流域模拟结果

序号	洪号	峰值相对误差/%			峰现时间相对误差/h			洪量相对误差/%		
		新安江	TOPMODEL	改进的 SCS	新安江	TOPMODEL	改进的 SCS	新安江	TOPMODEL	改进的 SCS
1	19750809	61.25	45.36	74.27	6	-1	-3	8.89	21.32	11.71
2	19770718	50.26	13.15	29.71	-1	-1	0	41.93	52.67	7.13
3	19790912	26.26	27.01	13.97	0	0	1	38.32	56.29	10.63
4	19800624	14.7	38.85	14.17	-7	1	-4	23.88	48.56	12.65
5	19800908	45.47	12.65	38.35	0	-2	1	39.49	41.4	14.9
6	19811006	58.77	0.67	47.75	-2	-2	-1	51.62	60.82	25.71
7	19820730	26.73	38.47	61.48	-3	-2	-1	22.65	4.62	26.75
8	19820824	15.77	7.59	36.17	-4	0	0	17.57	22.52	17.82
9	19830916	2.99	6.76	10.54	0	0	3	20.44	60.5	8.36
10	19831005	2.32	21.38	27.78	-2	1	0	4.26	19.05	11.72
11	19840613	80.51	49.87	63.88	0	-5	1	82.58	4.55	62.72
12	19831019	59.96	36.38	55.62	-4	-2	-1	59.9	0.38	41.14
13	19840726	42.34	20.49	21.68	0	-2	2	39.53	86.96	16.96
14	19840928	56.4	11.8	39.2	-1	-1	2	67.01	23.69	40.5
15	19870512	31.17	16.74	24.3	-1	-1	2	41.94	70.89	2.28
平均误差		38.33	23.14	37.26		—		37.33	38.28	20.73
合格率		27%	40%	20%	73%	93%	93%	20%	27%	67%

注：表中峰现时间为正值表示提前，负值表示滞后。

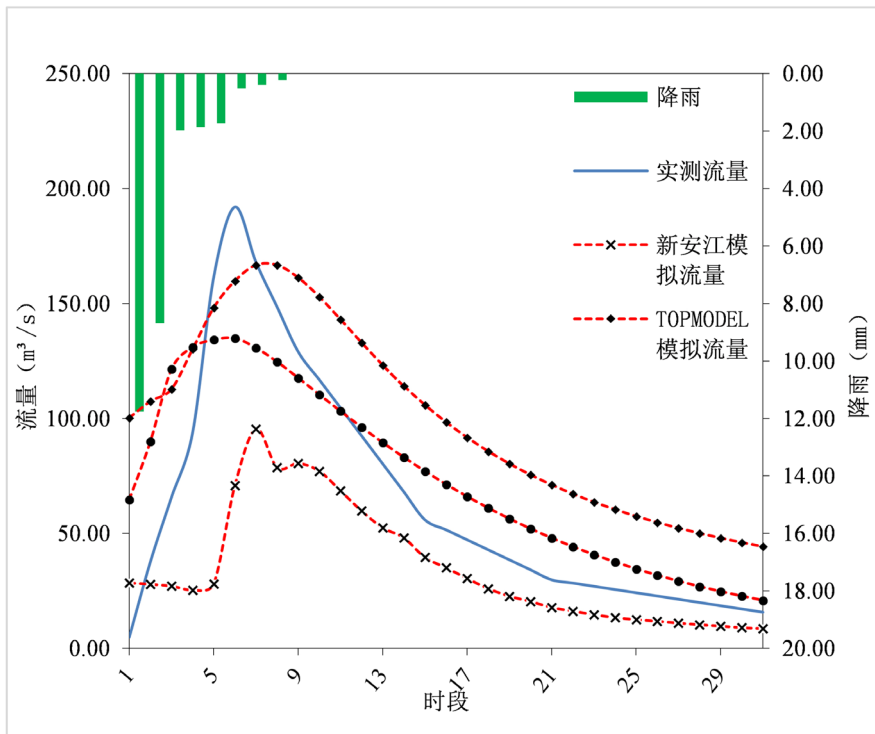


Figure 3. 19770718 simulation process hydrographs
 图 3. 19770718 场次洪水模拟过程线

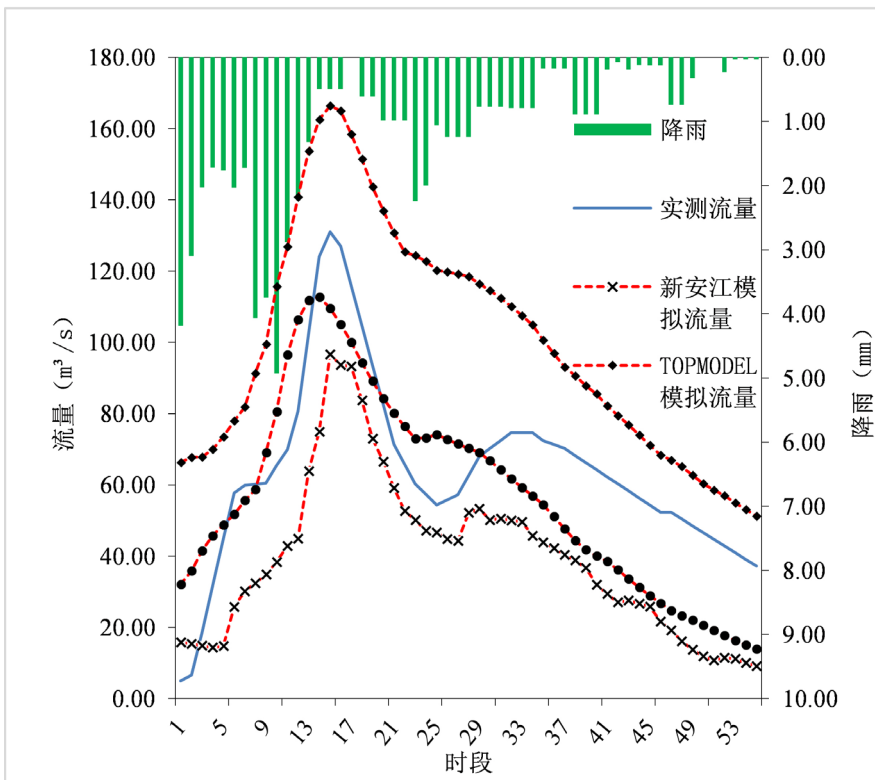


Figure 4. 19790912 simulation process hydrographs
 图 4. 19790912 场次洪水模拟过程线

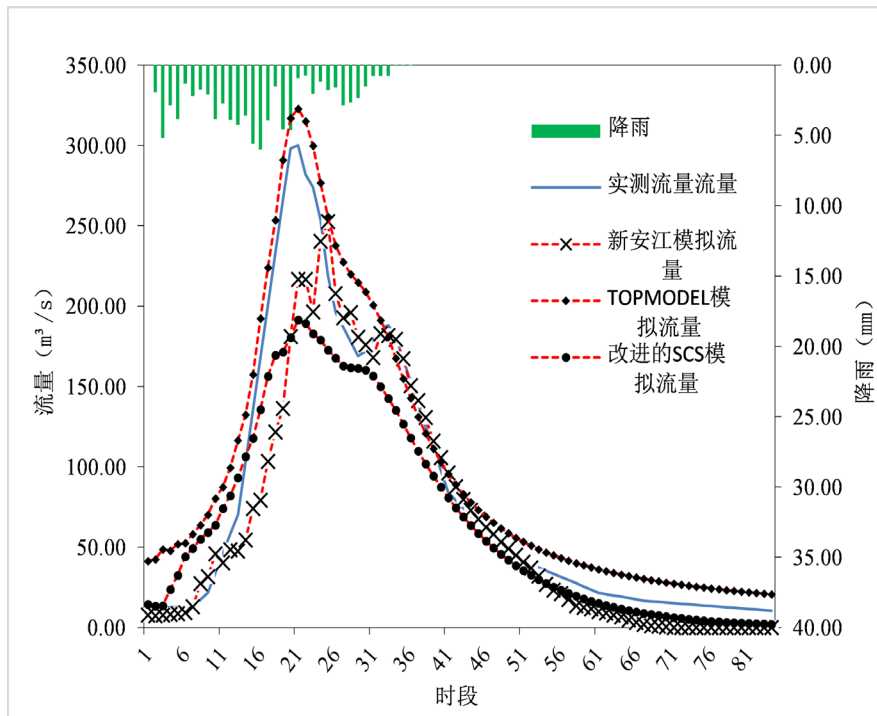


Figure 5. 19820824 simulation process hydrographs
 图 5. 19820824 场次洪水模拟过程线

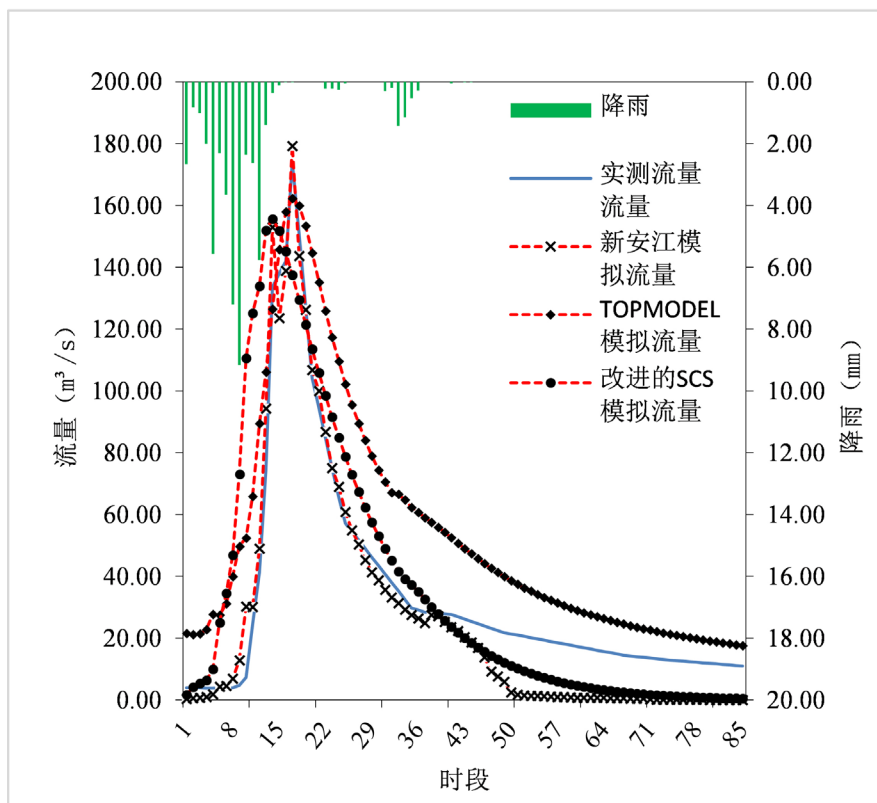


Figure 6. 19830916 simulation process hydrographs
 图 6. 19830916 场次洪水模拟过程线

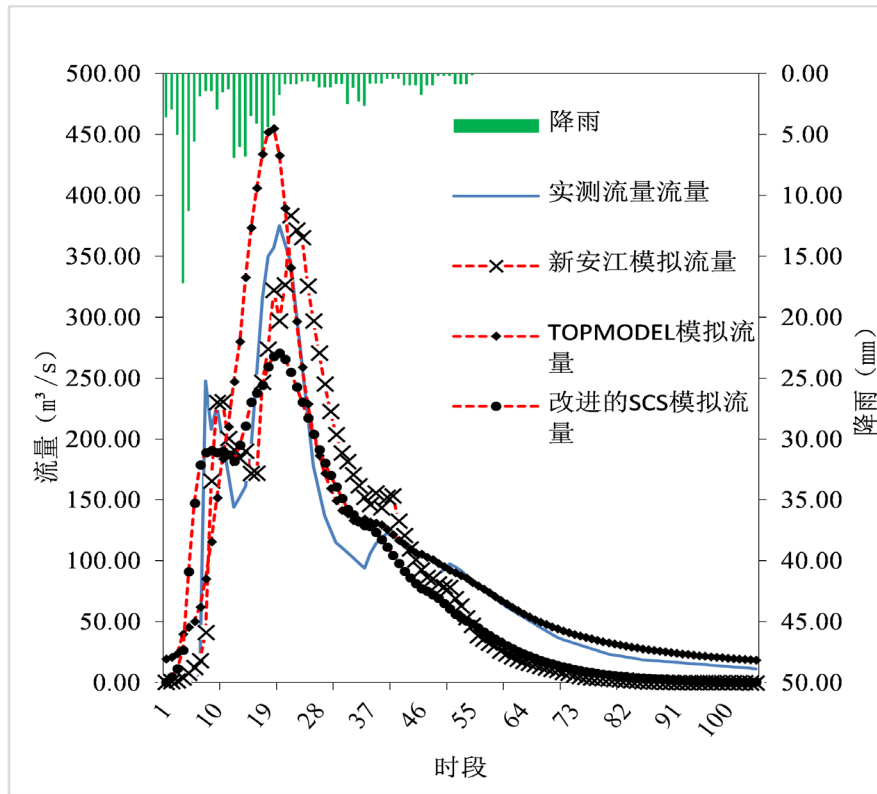


Figure 7. 19831005 simulation process hydrographs

图 7. 19831005 场次洪水模拟过程线

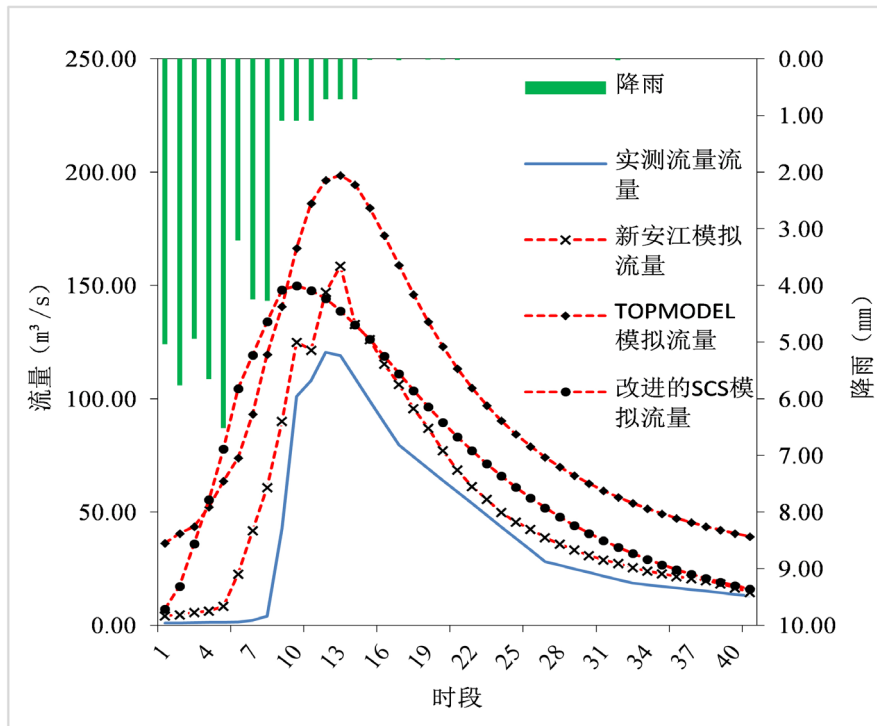


Figure 8. 19850621 simulation process hydrographs

图 8. 19850621 场次洪水模拟过程线

4. 结论及展望

1) 官山河流域有大马站、袁家河站、西河站、孤山站四个雨量站, 各站控制面积分别为 106.79 km²、71.29 km²、88.69 km²、52.78 km²。据《水文站网规划技术导则》, 布站时, 要求雨量站控制流域面积不能超过 60 km², 山洪频发区不大于 30 km² [21]。由于地形、经济、技术等各方面的原因, 目前流域雨量站分布密度较低, 现利用降雨资料代表性较低。山区小流域的降雨具有极强的空间变异性, 有限的雨量站无法较为准确地记录降雨量, 而降雨的时空不均匀性对产流影响较大。而且利用的逐时刻降雨径流数据是从非连续时间记录的洪水要素资料中插值而得, 也会影响水文模型模拟精度。降雨资料不精准使得从模型输入端便开始引入误差, 因此必须综合运用遥感、雷达测雨和地面监测等技术, 研究多源数据的同化、融合方法, 重点构建点面结合的山洪多要素立体精准监测技术与体系, 使得降雨资料具有代表性, 从而提高模型模拟精度。

2) 官山河流域高程在 240~1606 m 间变化, 有深沟陡坡, 有暴雨发生时, 在汇流过程中会利于产流迅速汇集, 汇流时间短, 从而形成山洪灾害危及中下游平缓地带。因此在今后的研究中不可忽视流域地形的影响。

3) 在模型模拟实测流量过程中发现, 模型对流域前期土壤含水量较为敏感, 但前期土壤含水量规律比较复杂。流域主要土壤类型为砂土, 透水性能较好, 储水能力较大, 在场次洪水退水阶段地下水对径流补给量大, 使得场次洪水出现陡涨缓落情况, 在连续场次洪水综合作用下, 便会造成山洪灾害。因此必须探清该流域的地质地貌, 为构建适用于该流域的水文模型提供基础资料。

4) 所用的几个典型水文模型汇流采用的是线性汇流模型, 瞬时单位线是从大中流域中总结出的方法, 而山洪汇流过程具有极强的非线性性, 汇流所用的单峰单位线也会对多峰洪水模拟效果欠佳。因此必须考虑不同的汇流方式对洪水预报精度的影响。

5) 半分布式模型相对于集总式模型有较大优势。TOPMODEL 半分布式模型考虑了流域的地理信息, 但是其假设降雨在空间是均匀分布的, 这与实际不符。在今后的研究中应当构建更为合理的分布式水文模型来研究山洪模拟。

6) 流域的产汇流机制复杂。官山河流域可能不是单一的蓄满产流机制或者超渗产流机制, 或者是保持一种产流模式不变, 可能是各种产流机制相互转化相互补充。因此必须弄清流域复杂的产流机制, 才能提高山洪预报精度。

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] 张平仓, 任洪玉, 等. 中国山洪灾害防治区划初探[J]. 水土保持学报, 2006(12): 196-200.
ZHANG Pingcang, REN Hongyu, et al. An elementary study on Chinese mountain torrents disaster prevention regionalization. Journal of Soil and Water Conservation, 2006(12): 196-200. (in Chinese)
- [2] 钱群. 中国西部湿润山区小流域水文响应过程——以四川龙溪河流域为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
QIAN Qun. Hydrologic response in a humid steep mountains watershed in the west of China—A case study of Longxihe watershed in Sichuan. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [3] 李红霞, 覃光华, 等. 山洪预报预警技术研究进展[J]. 水文, 2014, 34(5): 12-16.
LI Hongxia, QIN Guanghua, et al. Advances in study on flash flood forecast and warning. Journal of China Hydrology, 2014, 34(5): 12-16. (in Chinese)
- [4] BLOSCHL, G., RESZLER, C., et al. A spatially distributed flash flood forecasting model. Environmental Modeling & Software, 2008, 23(4): 464-478. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.06.010>
- [5] BRAUD, I., ROUX, H., ANQUETIN, S., et al. The use of distributed hydrological models for the Gard 2002 flash flood event: Analysis of associated hydrological processes. Journal of Hydrology, 2010, 394(1-2): 162-181.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.033>

- [6] 王璐, 叶磊, 等. 山丘区小流域水文模型适用性研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(2): 78-84.
WANG Lu, YE Lei, et al. Research on multi-hydrological models applicability of flash flood simulation in hilly areas. China Rural Water and Hydropower, 2018(2): 78-84. (in Chinese)
- [7] 包红军, 李致家, 等. 基于分布式水文模型的小流域山洪预报方法与应用[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(2): 156-163.
BAO Hongjun, LI Zhijia, et al. Flash flood forecasting method based on distributed hydrological models in a small basin and its application. Torrential Rain and Disaster, 2017, 36(2): 156-163. (in Chinese)
- [8] 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, 43(3): 317-321.
LIU Zhiyu, YANG Dawen and HU Jianwei. Dynamic critical rainfall-based torrential flood early warning for medium-small rivers. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2011, 43(3): 317-321. (in Chinese)
- [9] 郭良, 唐学哲, 孔凡哲. 基于分布式水文模型的山洪灾害预警预报系统研究及应用[J]. 中国水利, 2007(14): 38-41.
GUO Liang, TANG Xuezhe and KONG Fanzhe. Studies on mountain flood warning system based on distributed hydrological model and its application. China Water Resources, 2007(14): 38-41. (in Chinese)
- [10] 潘佳佳, 曹志先, 王协康, 等. 暴雨山洪水动力学模型及其简化模型比较研究[J]. 四川大学大学学报(工学版), 2012, 44(1): 77-82.
PAN Jiajia, CAO Zhixian, WANG Xiekang, et al. Comparative study of simplified and full hydrodynamic models for flash floods. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(1): 77-82. (in Chinese)
- [11] 练继建, 杨伟超, 等. 山洪灾害预警研究进展与展望[J]. 水力发电学报, 2018(11): 1-14.
LIAN Jijian, YANG Weichao, et al. Advances and prospect of flash flood forecasting. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018(11): 1-14. (in Chinese)
- [12] 叶金印, 李致家, 吴勇拓. 一种用于缺资料地区山洪预警方法研究与应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 15-19.
YE Jinyin, LI Zhijia and WU Yongtuo. Study and application of flash flood warning method for ungauged basins. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(3): 15-19. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 贾仰文, 王浩, 等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
JIA Yangwen, WANG Hao, et al. Principle and practice of distributed watershed hydrological model. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2005. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 冻芳芳. 新安江模型与 TOPMODEL 的比较及洪水预报系统的基本框架[D]. 南京: 河海大学, 2007.
DONG Fangfang. Comparison between Xin'anjiang Model and TOPMODEL and basic framework of flood forecasting system. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese)
- [17] DURBUDE, D. G., JAIN, M. K. and MISHRA, S. K. Long-term hydrologic simulation using SCS-CN-based improved soil moisture accounting procedure. Hydrological Processes, 2011, 25(4): 561-579. <https://doi.org/10.1002/hyp.7789>
- [18] 彭定志, 游进军. 改进的 SCS 模型在流域径流模拟中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(1): 20-24.
PENG Dingzhi, YOU Jinjun. Application of modified SCS model into runoff simulation. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2006, 17(1): 20-24. (in Chinese)
- [19] 杜洋, 张传霞, 等. HYMOD 与改进 SCS 模型的应用比较研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 358-360.
DU Yang, ZHANG Chuanxia, et al. Comparative study on the application of HYMOD and improved SCS model. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(3): 358-360. (in Chinese)
- [20] HEWLETT, J. D., HIBBERT, A. R. Moisture and energy condition within a sloping soil mass during drainage. Journal of Geophysical Research, 1963, 68(4): 1081-1087. <https://doi.org/10.1029/JZ068i004p01081>
- [21] SL34-92. 水文站网规划技术导则[S].
SL34-92. Technical guidelines for hydrological station network planning. (in Chinese)