

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201801031

山区流域强降雨情况产流模式研究——以涪江平通河流域为例

彭清娥, 刘兴年, 黄 尔*, 杨克君

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要:山区流域极端强降雨导致的山洪灾害频发, 造成生命损失和经济活动的巨大破坏。科学的认识这类极端天气下灾害的发生、发展过程, 对实现灾害监测和风险管理十分重要。山洪过程的模拟是认识这一灾害的重要科学手段, 而模型计算精度是山洪模拟的关键。将超渗、蓄满产流模型与运动波地貌瞬时单位线水文模型(简称 KW-GIUH 模型)进行融合, 优选出适合山区流域强降雨情况下的产流模式, 从而提高山洪过程的模拟精度。以典型山区流域涪江一级支流平通河为研究对象, 选取了两场次历史强降雨过程进行模拟。研究表明: 无论超渗或蓄满产流模型与 KW-GIUH 模型进行融合后, 其模拟精度比 KW-GIUH 模型所模拟的径流过程更接近实际情况; 而先超渗后蓄满的混合产流模式较单一的超渗或蓄满产流模式模拟效果更优。适合山区流域强降雨情况下的产流模式为先超渗后蓄满的混合产流模式, 其中产流模式的转变出现在第一次连续降雨基本结束之时, 即在第一次洪峰之前基本以超渗产流为主, 随后的产流方式以蓄满产流为主。

关键词:山区流域; 强降雨; 产流模式; KW-GIUH 模型

中图分类号:TV124

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)03-0123-07

Study on Runoff Generation Mode Under Heavy Rainfall in Mountain Basin— A Case on Pingtong River Basin of Fujiang River

PENG Qing'e, LIU Xingnian, HUANG Er*, YANG Kejun

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: Mountain torrents caused by extremely strong rainfall in mountain basins are frequently occurred, resulting in loss of life and great destruction of economic activities. It is very important to realize the goal of disaster monitoring and risk management to understand scientifically the occurrence and development process of disasters in such extreme weather. The simulation of mountain torrent process is an important scientific means to recognize the disaster, and the accuracy of model calculation is the key to the simulation of mountain torrents. In this paper, the model of infiltration-excess and saturation-excess were combined with the instantaneous unit line hydrological model of motion wave geomorphology (KW-GIUH model), the runoff model which was suitable for heavy rainfall in mountain basin was selected, and the simulation accuracy of mountain flood process was improved. Based on the study of the Pingtong River, the first tributary of Fujiang River in a typical mountain basin, two historical heavy rainfall processes were simulated. The results showed that the simulation accuracy of KW-GIUH model was more accurate than that of kw-giuh model. The mixed runoff production model with first infiltration-excess and then saturation-excess was more effective than the single one, and the model suitable for heavy rainfall in mountainous area was the mixed runoff production model which was first infiltration-excess and then saturation-excess.

Key words: mountainous watershed; heavy rainfall; runoff pattern; KW-GIUH model

产流机制对产流过程的发生和发展有很大的影响, 不同的降雨过程及下垫面又呈现出不同的产流机制, 从而形成不同的径流特征^[1-6]。蓄满产流模型

与超渗产流模型是目前常用的流域产流模型, 这两种模型就其产流方式来讲都是单一性的, 而在一个流域中就某一个点来说, 当降雨超过入渗时就会因

收稿日期:2018-09-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC150250303);国家自然科学基金项目(51539007)

作者简介:彭清娥(1971—), 女, 副研究员, 博士。研究方向: 河流工程及都市水力学。E-mail: Pengqinge@126.com

* 通信联系人 E-mail: huang_er@scu.edu.cn

网络出版时间:2019-04-22 10:24:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20190420.1439.004.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

超渗而产流,随着入渗量的累积,直到田间持水量得到满足以后又将转化为蓄满产流,因此,在一个自然条件复杂的流域上,两种产流方式将可能产生并共存。目前,有关产流方面的研究较多,如:芮孝芳^[7-8]讨论了降雨产流机制、产流理论与计算方法的若干进展及评述,以及关于回顾与总结产流模式的发现与发展;李致家等^[9]在新安江模型的结构中引入超渗产流模型,对新安江模型进行改进,使得该模型的产流理论更加完善,可以用于湿润地区、半干旱半湿润地区及干旱地区,同时还进行了半湿润流域蓄满超渗空间组合模型研究;瞿思敏等^[10]进行了新安江模型与垂向混合产流模型的比较研究;王贵作等^[11]基于栅格垂向混合产流机制的分布式水文模型进行研究;包红军等^[12]基于Holtan产流的分布式水文模型进行研究;程银才等^[13]基于霍顿下渗公式超渗产流计算几个问题进行探讨;黄膺翰等^[14]基于霍顿下渗能力曲线的流域产流计算进行研究;周玲微等^[15]进行了岔巴沟流域次暴雨产流无量纲模型研究;焦平金等^[16]进行了递推关系概化前期产流条件改进SCS模型研究;张俊娥等^[17]研究了基于MODCYCLE分布式水文模型的区域产流规律;吴志宜等^[18]对SCS模型在不同土地类型地表产流计算中的应用进行研究;孔凡哲等^[19]进行了河北雨洪模型中下渗公式的一种改进方法的研究。这些研究主要围绕以下几方面进行,一是基于霍顿下渗的超渗产流研究,二是引入产流模型对SCS模型、新安江模型等进行改进及其应用,三是混合产流模型的研究等。有关产流模式的选择一般根据流域气候特征而定,如干旱地区一般采用超渗产流模式,湿润地区一般采用蓄满产流模式,半干旱半湿润地区采用超渗、蓄满混合模式,而混合产流模式也是目前研究较为广泛的一种,通常根据流域蓄满、超渗的面积比例来分别计算。目前,针对西南山区流域强降雨情况下的产流模式研究甚少。

山区流域山洪灾害频发,其中极端强降雨往往是导致山洪灾害的直接诱因。科学认识山区流域极端强降雨情况下的产流模式,对提高山洪模拟精度

起到关键作用。以涪江平通河流域为例,选取典型的两场次强降雨过程,在运动波地貌瞬时单位线水文模型基础上,引入超渗、蓄满产流模型进行流域降雨—径流过程模拟分析,探索山区流域产流模式。

1 平通河流域概况

平通河流域位于四川盆地西北边缘,北川和平武县境内,为涪江流域一级支流。该流域范围在东经104°14′~104°43′,北纬31°56′~32°21′。平通河发源于四川省平武、松潘、北川3县交界的六角顶东坡,自北川县甘溪乡长滩子海拔575 m流入江油县境,控制面积1 065 km²左右。流域内共有堡子场、同兴、徐塘、豆叩、桥头5个雨量站以及甘溪1个水文站,雨量站分布情况见图1及表1所示。

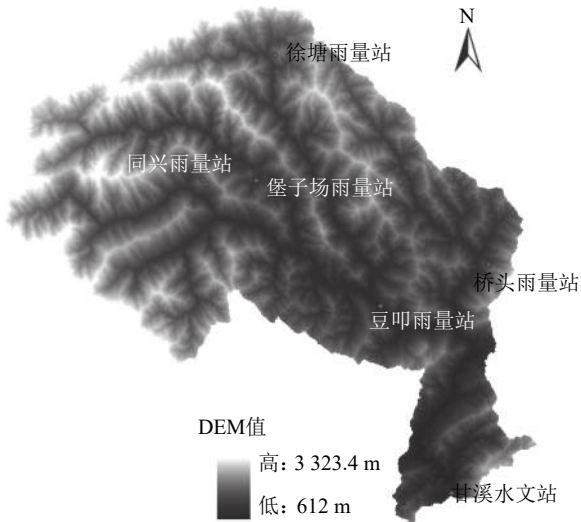


图 1 平通河流域DEM及各测站分布
Fig. 1 DEM of Pingtong River basin and hydrological stations

2 流域平均降雨量的获取

查阅相关研究流域降雨过程资料发现,现有公开资料只有1983年以前的部分资料可利用,因此本研究选取平通河流域两场特大历时洪水的降雨过程(1978年9月及1981年7月)作为模拟对象,水

表 1 平通河雨量站

Tab. 1 Hydrological stations of the Pingtong River basin

雨量站	站别	观察场地点	坐标		测雨仪器
			东经	北纬	
堡子场	雨量站	平武县马家公社	104°29′	32°12′	20 cm口径雨量计
同兴	雨量站	平武县同兴公社	104°26′	32°12′	20 cm口径雨量计
徐塘	雨量站	平武县徐塘公社	104°30′	32°18′	20 cm口径雨量计
豆叩	雨量站	平武县豆叩公社	104°36′	32°06′	20 cm口径雨量计
桥头	雨量站	平武县桥头公社	104°42′	32°08′	20 cm口径雨量计
甘溪	水文站	北川县甘溪公社	104°40′	31°57′	20 cm口径雨量计

文资料查阅中华人民共和国水文年鉴第6卷第9册《长江流域水文资料——嘉陵江区》。

由于流域内的6个测站分布不均,故采用泰森多边形法(面积加权平均法)通过各站的实测降雨资料来计算流域平均降雨量,具体计算参照叶守泽等^[20]编著的工程水文学。流域平均降雨量计算公式为:

$$\overline{P}=\frac{A_1}{A}P_1+\frac{A_2}{A}P_2+\cdots+\frac{A_n}{A}P_n=\alpha_1P_1+\alpha_2P_2+\cdots+\alpha_nP_n$$

(1)

式中: A_n 为流域内第 n 个雨量站的控制面积, km^2 ; A 为流域总面积, km^2 , 本文 $A=1\,065.38\,\text{km}^2$; P_n 为流域内第 n 个雨量站的实测雨量, mm ; α_n 为第 n 个雨量站所

占的面积权重, 见表2。平通河流域平均降雨量计算如表3、4所示。

表2 平通河流域泰森多边形法各雨量站所占权重

Tab. 2 Weight of rainfall stations of the Pingtong River basin		
雨量站	雨量站控制面积 A_n/km^2	权重 α_n
堡子场	153.75	0.144
同兴	370.56	0.348
徐塘	145.02	0.136
豆叩	178.52	0.168
桥头	124.04	0.116
甘溪	93.49	0.088

表3 1978年降雨实测资料及流域平均降雨量

Tab. 3 Rainfall measured data and mean rainfall in the watershed in 1978								
时间		各雨量站实测降雨量/mm						流域平均降雨量/mm
		堡子场	同兴	徐塘	豆叩	桥头	甘溪	
08-30	08:00—14:00	1.5	0	0	4.2	0	5.0	1.36
	14:00—20:00	0	0.6	0.3	5.3	1.5	5.4	1.79
	20:00—02:00	3.3	9.6	10.8	3.3	6.8	1.1	6.72
08-31	02:00—08:00	28.5	20.1	29.4	17.7	6.0	4.1	19.13
	08:00—14:00	1.8	5.4	5.1	4.8	6.4	2.9	4.64
	14:00—20:00	23.0	8.9	10.5	11.7	10.3	9.6	11.84
	20:00—02:00	14.0	49.2	38.6	5.1	11.2	9.5	27.38
09-01	02:00—08:00	68.5	21.7	32.7	22.7	37.0	15.4	31.32
	08:00—14:00	9.4	1.1	7.1	2.3	0	6.1	3.63
	14:00—20:00	1.8	7.4	2.8	5.4	0	0.5	4.17
	20:00—02:00	43.2	56.1	61.3	15.3	0	0.7	36.71
09-02	02:00—08:00	49.5	20.6	16.7	52.9	71.5	90.4	41.70
	08:00—14:00	42.6	34.4	36.1	37.8	35.0	74.1	39.95
	14:00—20:00	1.8	1.3	1.6	2.4	0	4.3	1.71
	20:00—02:00	10.8	10.6	0	10.5	15.8	2.9	9.10
09-03	02:00—08:00	18.8	26.9	26.8	26.6	27.5	25.7	25.63
	08:00—14:00	4.7	0.2	1.2	0	0	0	0.91
	14:00—20:00	0.1	0	0	0	0	0	0.01
	20:00—02:00	0	0	1.1	0	0	0.6	0.20
09-04	02:00—08:00	9.2	17.8	14.0	9.4	9.5	9.4	12.93
	08:00—14:00	0	9.1	0	0	0	0	3.49
	14:00—20:00	0	0.2	0	0	2.8	0	0.13
	20:00—02:00	0	0	0	0	0.5	0	0
09-05	02:00—08:00	4.9	5.1	9.5	0.2	11.6	0	5.15
	08:00—14:00	0	0	0	0	1.2	0	0.14
	14:00—20:00	0.9	0	3.4	10.8	1.5	3.7	2.91
	20:00—02:00	0	0	4.5	2.6	63.5	0	8.41
09-06	02:00—08:00	6.2	5.0	3.4	1.8	53.0	0	9.55
	08:00—14:00	8.7	3.0	5.1	0.2	2.0	0.6	3.31
	14:00—20:00	7.8	13.7	5.6	5.4	1.5	1.4	7.86
	20:00—02:00	5.6	37.8	23.4	23.5	0	53.0	25.76
09-07	02:00—08:00	21.9	37.8	29.6	45.9	0	49.9	32.44
	08:00—14:00	0	1.9	3.6	1.4	2.0	1.9	1.79
	14:00—20:00	0	0	0	0	1.2	0	0.14
	20:00—02:00	0	0	0	0	0	0.1	0.01
09-08	02:00—08:00	2.1	0.8	0	1.5	0	1.0	0.92

表 4 1981年降雨实测资料及流域平均降雨量

Tab. 4 Rainfall measured data and mean rainfall in the watershed in 1981

时间	各雨量站实测降雨量/mm						流域平均降雨量/mm
	堡子场	同兴	徐塘	豆叩	桥头	甘溪	
07-11	02:00—08:00	0	0	0	0	0	0
	08:00—14:00	0	0	0	0	0	0
	14:00—20:00	0	0	0.7	0	0.7	0.10
	20:00—02:00	0	0	8.4	0	7.0	1.76
07-12	02:00—08:00	13.9	1.6	16.2	37.6	78.4	21.58
	08:00—14:00	11.0	3.4	3.8	60.4	23.0	17.38
	14:00—20:00	7.6	6.0	6.2	22.3	16.4	12.94
	20:00—02:00	30.0	47.2	21.3	66.2	58.5	48.98
07-13	02:00—08:00	41.1	42.1	36.1	58.7	66.4	53.57
	08:00—14:00	26.0	26.6	33.1	31.6	38.3	29.67
	14:00—20:00	3.5	6.0	2.4	3.5	3.8	4.21
	20:00—02:00	0	0	0	0	0	0

3 流域地形地貌参数的获取

基于DEM数据分析处理获得。文献[21–26]研究了基于DEM的流域特征提取。各参数分析结果如表5所示。

平通河流域相关地形地貌参数通过ArcGIS软件

表 5 平通河流域地形地貌参数

Tab. 5 Topographic and geomorphologic parameters in Pingtong River basin

河流级别 Ω	河流数目 i	集水区平均面积 A_i/km^2	河槽平均长度 L_{c_j}/km	该级别河流流域面积占总面积概率 $P_{\Omega A_i}$	坡地平均坡度 S_{Ω_i}	河槽平均坡度 S_{c_i}
1	5	161.76	19.12	0.759 1	0.625 1	0.022 4
2	1	1 065.38	52.31	0.240 9	0.628 5	0.016 9

4 不同产流模式对径流模拟结果的影响

根据前述处理的平通河流域平均降雨过程分别进行超渗、蓄满产流计算,再将产流计算结果作为KW-GIUH模型的净降雨资料,结合地形地貌参数输入径流模拟计算程序,计算出平通河流域不同产流模式

下的降雨径流模拟结果,见图2、3。

由图2、3可以看出,KW-GIUH模型能够较准确地模拟整个径流过程,包括洪峰的涨落趋势及峰现时间等。总体来说,考虑了产流过程的模拟效果较未考虑产流的情况(原KW-GIUH模型)更接近实测径流过程。

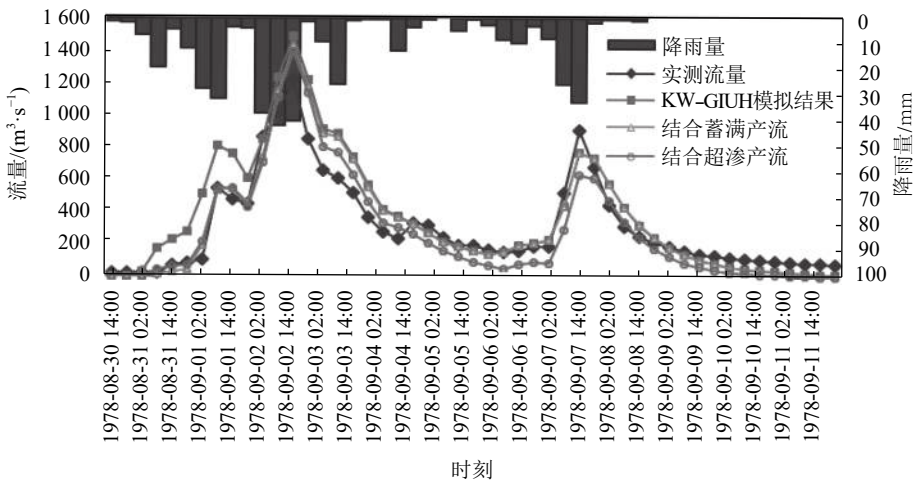


图 2 1978年径流模拟结果

Fig. 2 Runoff simulation results in 1978

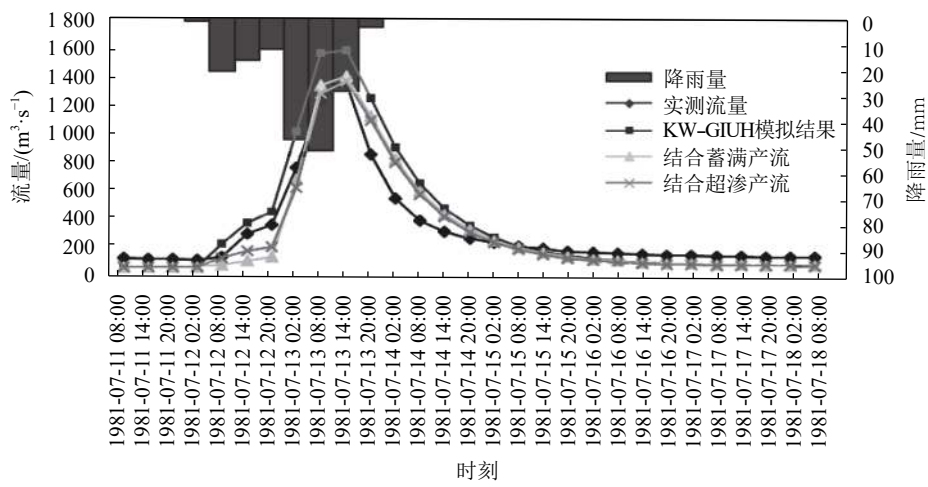


图 3 1981年径流模拟结果

Fig. 3 Runoff simulation results in 1981

分析1978年9月份降雨的径流模拟结果可以看出,在9月4日14:00之前结合产流模型的径流模拟值较实测值偏大,而在9月4日14:00以后,模拟值较实测值偏小;同时前半部分超渗产流模型的模拟结果优于蓄满产流模型,而后半部分则与之相反;同样的,分析1981年7月份的径流模拟结果可以看出,以7月15日08:00为分界,可以得出与1978年9月份的模拟结果相同的结论,即降雨径流过程的前半部分超渗产流模型的模拟结果优于蓄满产流模型,而后半部分则与之相反。分析平通河流域这两场次降雨的径流特征,在前半段降雨历时中,超渗产流模式为最主要的产流机制,而后半段降雨历时中,蓄满产流则是主要的产流方式。因此,在对于同一场降雨的径流模拟中,考虑两模型的结合使用,即一定降雨历时后,产流模型由超渗产流模式转变为蓄满产流模式。同样以1978年9月份(以下简称“第1场洪水”)和1981年

7月份(以下简称“第2场洪水”)这两场洪水作为径流模拟对象。对于第1场洪水,考虑9月4日14:00之后的径流模式为蓄满产流,径流计算结果如图4所示;对于第2场洪水,考虑7月15日08:00之后的径流模式为蓄满产流,径流计算结果如图5所示。分析可见,采用超渗产流与蓄满产流相结合的混合产流模式,其径流模拟结果更接近实测流量过程。从这两场降雨过程可以看出,产流模式的转变时刻均是在第1次连续降雨基本结束之后出现,即在第1次洪峰过后,土壤含水量已达到蓄满状态,其后的产流方式以蓄满产流为主。

分析图4、5发现,考虑何种产流方式似乎对洪峰模拟值并无太大影响。由于1978年9月份的洪水并非单峰洪水,并且平通河流域土壤常年湿润,其含水量较高,因此,前期的降水使土壤含水量得到充分的补给,而到达洪峰时,土壤含水量可能已接近

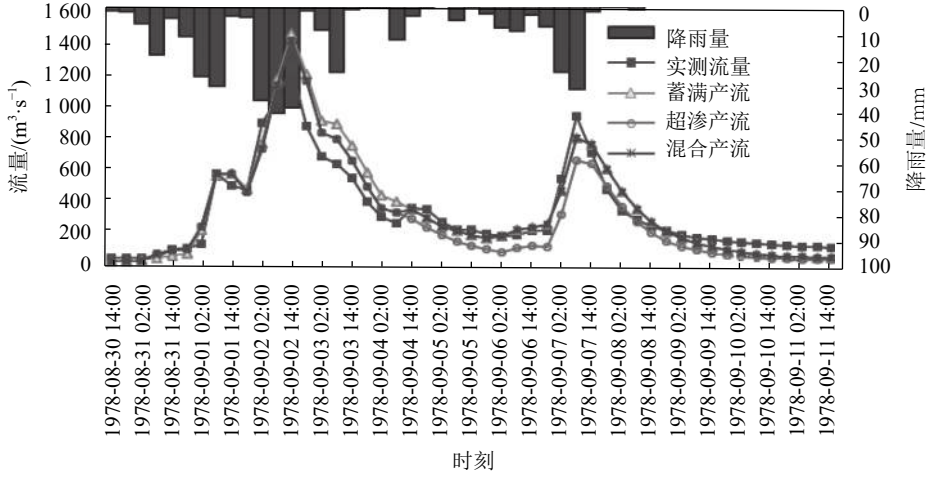


图 4 1978年9月份(第1场洪水)径流模拟结果

Fig. 4 Runoff simulation results in September 1978 (first flood)

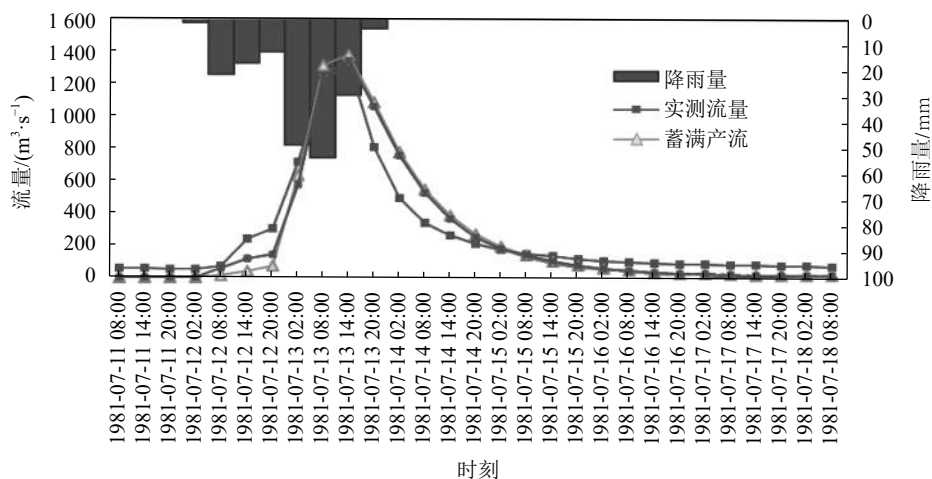


图 5 1981年(第2场洪水)径流模拟结果

Fig. 5 Runoff simulation results in 1981 (second flood)

田间持水量,蓄满产流中,可将此时的降雨视为净雨直接汇流到流域出口;超渗产流中,下渗率也趋于稳定,且数值较小,几乎可将降雨视为净雨,因此,此时无论是否考虑产流过程,该洪峰值不会有太大的变化。

综上所述,山区流域强降雨情况下产流模式对径流过程及峰现时间的影响十分显著,对洪峰的影响不大;同时,山区流域的产流模式为先超渗后蓄满的混合产流模式,产流模式的转变时刻在第1次强降雨基本结束之后出现,此时,土壤含水量已达到蓄满状态,其后的产流方式以蓄满产流为主。

5 结 论

作者以涪江一级支流平通河流域为例,对KW-GIUH水文模型在中国西部山区河流径流分析其适用性,以及山区流域产流模式进行探讨。具体研究结果如下:

- 1) 结合产流模型后的KW-GIUH模型比原KW-GIUH模型所模拟的径流过程更接近实际情况。
- 2) 超渗产流与蓄满产流相结合的混合产流模式较单一的超渗或蓄满产流模式模拟效果更优。
- 3) 适合山区流域的产流模式为先超渗后蓄满的混合产流模式,其中产流模式的转变出现在第1次连续降雨基本结束之时,即在第1次洪峰之前基本以超渗产流为主,随后的产流方式以蓄满产流为主。
- 4) 融合产流的KW-GIUH水文模型在山区河流径流分析中是可行的。

5) 山区流域产流模式的研究对径流过程及峰现时间的影响十分显著,正确的产流模式直接影响山洪预报的精度,尤其是峰现时间对洪水灾害防治中灾民的转移时间有直接的指导意义。

参考文献:

[1] Cui Taichang, Lu Jianhua. Discussing into two runoff yield-

ing models[J]. Shanxi Hydraulics, 2000, 8(3): 13-15. [崔泰昌, 陆建华. 试论蓄满产流模型与超渗产流模型[J]. 山西水利科技, 2000, 8(3): 13-15.]

- [2] Ding Xiaohong, Lu Jianlin, Cheng Jianlin, et al. The improvement and application of the reservoir-filled flow model—A case study in Yancheng district[J]. Water Saving Irrigation, 2007(5): 35-37. [丁晓红, 陆建林, 程吉林, 等. 蓄满产流模型的改进及应用—以盐城地区为例[J]. 节水灌溉, 2007(5): 35-37.]
- [3] Lee K T, Chen N C, Chung Y R. Derivation of variable IUH corresponding to time-varying rainfall intensity during storms[J]. Hydrological Sciences, 2008, 53(2): 323-337.
- [4] 赵人俊. 流域水文模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [5] 包为民. 水文预报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [6] Rui Xiaofang, Huang Guoru. The status and future of distributed hydrological models[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(2): 55-58. [芮孝芳, 黄国如. 分布式水文模型的现状与未来[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(2): 55-58.]
- [7] Rui Xiaofang. Discussion of some problems on mechanism of runoff yield[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(9): 22-26. [芮孝芳. 关于降雨产流机制的几个问题的讨论[J]. 水利学报, 1996(9): 22-26.]
- [8] Rui Xiaofang. The discovery and development of runoff formation models[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1): 1-6. [芮孝芳. 产流模式的发现与发展[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 1-6.]
- [9] Li Zhijia, Huang Pengnian, Zhang Yongping, et al. Study on spatial combination model of infiltration-excess and saturation-excess runoff in semi-humid watersheds[J]. Yellow River, 2015, 37(10): 1-6. [李致家, 黄鹏年, 张永平, 等. 半湿润流域蓄满超渗空间组合模型研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(10): 1-6.]
- [10] Qu Simin, Bao Weimin, Zhang Mingxin, et al. Comparison

- of Xin'anjiang model with vertically-mixed runoff model[J]. *Journal of Hohai University(Natural Science)*,2003,3(4):374-377.[瞿思敏,包为民,张明新,等.新安江模型与垂向混合产流模型的比较[J].*河海大学学报(自然科学版)*,2003,3(4):374-377.]
- [11] Wang Guizuo, Ren Liliang. Distributed hydrological model based on grid vertically-mixed runoff generation[J]. *Journal of Hohai University(Natural Science)*,2009,37(4):386-390.[王贵作,任立良.基于栅格垂向混合产流机制的分布式水文模型[J].*河海大学学报(自然科学版)*,2009,37(4):386-390.]
- [12] Bao Hongjun, Wang Lili, Li Zhijia. A distributed hydrological model based on Holtan runoff generation theory[J]. *Journal of Hohai University(Natural Science)*,2016,44(4):340-346.[包红军,王莉莉,李致家.基于Holtan产流的分布式水文模型[J].*河海大学学报(自然科学版)*,2016,44(4):340-346.]
- [13] Cheng Yincui, Wang Jun, Li Minghua. Some problems in runoff yield excess calculation based on Horton infiltration formula[J]. *Journal of China Hydrology*,2016,36(5):14-16.[程银才,王军,李明华.基于霍顿下渗公式超渗产流计算几个问题的探讨[J].*水文*,2016,36(5):14-16.]
- [14] Huang Yinghan, Zhou Qing. Calculation of basin runoff yield based on Horton infiltration capacity curve[J]. *Yangtze River*,2014,45(5):16-18.[黄膺翰,周青.基于霍顿下渗能力曲线的流域产流计算研究[J].*人民长江*,2014,45(5):16-18.]
- [15] Zhou Lingwei, Lei Tingwu, Wu Yang, et al. Event-based dimensionless models for runoff of Chabagou watersheds[J]. *Transactions of the CSAE*,2010,26(11):54-60.[周玲微,雷廷武,等.岔巴沟流域次暴雨产流无量纲模型[J].*农业工程学报*,2010,26(11):54-60.]
- [16] Jiao Pingjin, Xu Di, Yu Yingduo, et al. Conceptualizing antecedent runoff condition using recurrence relation to modify SCS model[J]. *Transactions of the CSAE*,2015,31(12):132-137.[焦平金,许迪,于颖多,等.递推关系概化前期产流条件改进SCS模型[J].*农业工程学报*,2015,31(12):132-137.]
- [17] Zhang Jun'e, Lu Chuiyu, Qin Dayong. Regional runoff study based on MODCYCLE distributed hydrology model[J]. *Transactions of the CSAE*,2011,27(4):65-71.[张俊娥,陆垂裕,秦大庸.基于MODCYCLE分布式水文模型的区域产流规律[J].*农业工程学报*,2011,27(4):65-71.]
- [18] Wu Zhiyi, Yu Zhiqiang, Zhu Xuejian, et al. Application of SCS model on computing the surface runoff of different land use types[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*,2016,42(2):226-230.[吴志宜,俞志强,朱雪坚,等.SCS模型在不同土地类型地表产流计算中的应用——以余姚地区为例[J].*浙江大学学报(理学版)*,2016,42(2):226-230.]
- [19] Kong Fanzhe, Cheng Shuanghu, Hu Chunqi. A method for modifying infiltration equation used in Hebei model[J]. *Journal of China Hydrology*,2016,36(3):11-16.[孔凡哲,程双虎,胡春歧.河北雨洪模型中下渗公式的一种改进方法[J].*水文*,2016,36(3):11-16.]
- [20] 叶守泽,詹道江.工程水文学[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [21] Li Li, Hao Zhenchun. The automated extraction of catchment properties from digital elevation models[J]. *Advance in Earth Sciences*,2003,18(2):251-255.[李丽,郝振纯.基于DEM的流域特征提取综述[J].*地球科学进展*,2003,18(2):251-255.]
- [22] 郝振纯,李丽,王加虎,等.分布式水文模型理论与方法[M].北京:科学出版社,2010.
- [23] Kong Fanzhe, Li Lili. Determination of river drainage area threshold for extraction of drainage network by DEM[J]. *Water Resources and Power*,2005,23(4):65-67.[孔凡哲,李莉莉.利用DEM提取河网时集水面积阈值的确定[J].*水电能源科学*,2005,23(4):65-67.]
- [24] Yang Bang. Determination of watershed area threshold and its hydrological response[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.[杨邦.集水面积阈值确定及其水文响应研究[D].南京:河海大学,2007.]
- [25] Gao Xinlei. DEM-based watershed automatic extraction method in GIS environment[J]. *Water Automation*,2009(2):46-48.[高鑫磊.GIS环境下基于DEM的流域自动提取方法[J].*水务自动化*,2009(2):46-48.]
- [26] Zhu Zhifang, Gong Gutang, Xu Xihui, et al. Land use pattern changes and fractal analysis in Pingtong river basin based on RS/GIS[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*,2009,30(1):24-28.[朱志芳,龚固堂,许熙辉,等.基于RS/GIS的平通河流域土地利用格局变化及其分形分析[J].*四川林业科技*,2009,30(1):24-28.]

(编辑 张凌之)

引用格式: Peng Qing'e, Liu Xingnian, Huang Er, et al. Study on runoff generation mode under heavy rainfall in mountain basin —A case on Pingtong River basin of Fujiang River[J]. *Advanced Engineering Sciences*,2019,51(3):123-129.[彭清娥,刘兴年,黄尔,等.山区流域强降雨情况产流模式研究——以涪江平通河流域为例[J].*工程科学与技术*,2019,51(3):123-129.]