

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0104

李照会, 郭良, 翟晓燕, 等. 基于中国山洪水文模型的动态临界雨量研究及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 11-19.
LI Z H, GUO L, ZHAI X Y, et al. Research and application of dynamic rainfall threshold based on China flash flood hydrological model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 11-19. (in Chinese)

基于中国山洪水文模型的动态临界雨量研究及应用

李照会^{1,2}, 郭良^{1,2}, 翟晓燕^{1,2}, 刘荣华^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要:以中国山洪水文模型为基础, 综合考虑前期影响雨量、累积雨量、降雨强度及雨型分布、地形地貌等因素的影响, 提出了基于分布式水文模型的小流域动态临界雨量预警指标分析方法。以四川省不同水文分区 3 个典型小流域(赶场、西宁和新生流域)为例, 评估了该指标用于小流域山洪预警的精度。研究表明: 中国山洪水文模型在研究区内具有较好的适用性, 3 个小流域率定期和验证期的山洪模拟合格率均在 90% 以上; 以 1 h、3 h 和 6 h 为预警时段, 赶场、西宁和新生流域的临界雨量分别为 20~250、12~160、6~140 mm; 不同预警时段下, 3 个小流域山洪预警的合格率达到 80% 以上。研究成果可为小流域山洪预警提供理论支持和技术支撑。

关键词:中国山洪水文模型; 动态临界雨量; 山洪预警; 四川省

中图分类号: P333.2 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and application of dynamic rainfall threshold based on China flash flood hydrological model

LI Zhaohui^{1,2}, GUO Liang^{1,2}, ZHAI Xiaoyan^{1,2}, LIU Ronghua^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Flash flood warning at catchment scale was determined by dynamic rainfall threshold using China flash flood hydrological model (CNFF), considering antecedent soil moistures, accumulated rainfall depths, rainfall intensities, rainfall temporal patterns, and topographies. Three typical catchments of different hydrological characteristics were selected in the Sichuan province as study area to assess the accuracy of CNFF for early warning flash floods. Results show that: (1) CNFF was suitable for flash flood simulation in the study area, and the qualifying ratios were over 90% in the selected catchments; (2) With rainfall durations of 1 h, 3 h, and 6 h, the critical rainfall thresholds were obtained as 20~250 mm, 12~160 mm, 6~140 mm for Ganchang catchment, Xining catchment, and Xinsheng catchment, respectively; (3) The qualifying ratios for flash flood warning were over 80% under different rainfall durations for all catchments. This study may provide technical support for early warning flash floods at catchment scales.

Key words: CNFF; dynamic rainfall threshold; flash flood warning; Sichuan Province

山洪灾害被公认为是世界上危害最大的自然灾害之一, 由于具有突发性强、成灾快、破坏力大、人员

伤亡多等特点, 往往会造成严重的人员伤亡、公共设施损坏及环境灾难^[1-2]。受特殊的自然地理环境、极

收稿日期: 2019-01-22 修回日期: 2019-06-14 网络出版时间: 2019-06-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190625.1133.010.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41807171; 51579131); 国家重点研发计划(2017YFB0203104)

作者简介: 李照会(1992—), 女, 山东菏泽人, 主要从事小流域山洪预警方面研究。E-mail: lizhaohui2030@126.com

通信作者: 翟晓燕(1989—), 女, 河南漯河人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: zhaixy@iwhr.com

端灾害性天气以及经济社会活动等多种因素的共同影响,我国山洪灾害呈频发、多发态势^[3-4]。1950—2016 年,我国山洪灾害造成的直接经济损失高达 1.72×10^5 亿元^[5]。山洪灾害防御已成为我国防汛减灾工作的重点和难点问题,及时准确地进行山洪灾害预警预报是目前最为有效可行的防灾减灾非工程措施,有利于指导受灾群众快速撤离、减少灾害损失、保障人民的生命财产安全^[6]。临界雨量是国内外广泛采用的山洪预警指标之一^[7-10]。目前,许多学者对临界雨量进行了研究,提出了一系列行之有效的方法^[11-16]。陈桂亚等^[17]基于统计归纳法提出了单站、区域以及资料匮乏地区临界雨量的确定方法;张玉龙等^[18]采用克里金空间插值法推求无资料地区的临界雨量;樊建勇等^[19]构建了流域参数与临界雨量的统计模型,确定了江西省小流域山洪灾害临界雨量;施征等^[20]基于 HEC-HMS 运用水位流量反推法确定临界雨量;贺拿等^[21]运用实例调查法和频率法对临界雨量进行了实验探究;林志强等^[22]采用水动力模式 Floodarea 模型对西藏东南部的山洪过程进行模拟研究,并计算当地山洪致灾的临界雨量。

上述研究多为针对静态临界雨量的确定及应用,大多未考虑前期影响雨量、雨强等实时动态因子的影响,对流域下垫面空间分布异质性的考虑不足,所求临界雨量为一个定值,在山洪监测预警中仍存在过度预警和无效预警等现象,亟需进一步提高预警精度^[5,8]。近年来,综合考虑前期影响雨量、累积雨量、雨强和地形地貌等因素的影响,逐渐出现了动

态临界预警技术,在山洪灾害实时预警预报中,动态临界雨量的预报效果往往优于传统静态预警指标^[7,11-13]。目前,关于动态临界雨量的研究仍相对较少,已有方法多直接基于历史雨洪资料确定动态临界雨量指标,且未考虑雨型分布的影响。为进一步探索基于动态临界雨量指标的山洪预警方法,本文提出了一种基于中国山洪水文模型的山洪动态临界雨量指标确定方法,并在四川省不同水文分区的典型小流域进行了应用检验。

1 研究区及数据来源

四川省位于我国内陆西部腹地,地处青藏高原与长江中下游平原之间的过渡带($97^{\circ}21'E \sim 108^{\circ}3'E$, $26^{\circ}3'N \sim 34^{\circ}19'N$)。四川省是我国发生山洪灾害最多的省份之一,山洪灾害防治区面积达 38 万 km^2 ,每年因山洪泥石流造成的人员伤亡及财产损失占洪灾总损失的 70% 以上。省内气候复杂,地带性和垂直变化十分明显,共划分了 13 个水文分区^[23],各分区内具有基本相似的暴雨分布和自然地理特征。

以川东地区的 3 个流域为研究区进行山洪预警分析,分别为位于 B1 区的赶场流域($106^{\circ}57'E \sim 107^{\circ}02'E$, $32^{\circ}23'N \sim 32^{\circ}38'N$),位于 C2 区的新生流域($30^{\circ}37'N \sim 30^{\circ}46'N$, $107^{\circ}19'E \sim 107^{\circ}26'E$)和位于 E2 区的西宁流域($28^{\circ}18'N \sim 28^{\circ}34'N$, $103^{\circ}21'E \sim 103^{\circ}49'E$),见图 1。3 个典型水文分区的基本信息见表 1,各分区暴雨特性差异性较大,所选研究区在省内具有较好的代表性。3 个研究区的基本概况见表 2 和图 2。

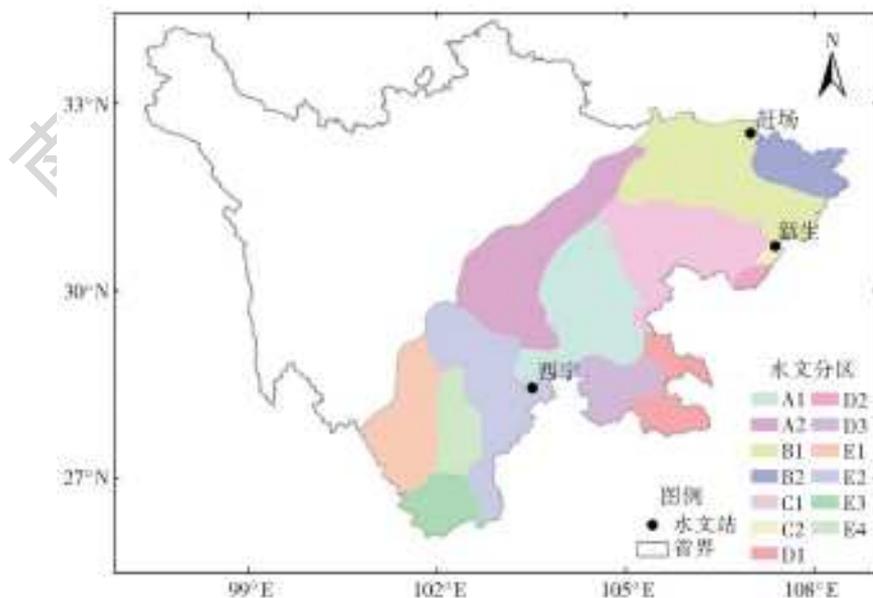


图 1 四川省水文分区及研究区位置

Fig. 1 The location map of study area with differnt hydrological zones in Sichuan Province

表 1 3 个水文分区雨洪特性

Tab. 1 The characteristics of rainfall and flood in three hydrological zones of the study area

分区	位置	特性
B1 区	四川东北部米仓山和大巴山南坡	处于暖湿气流输送的迎风面,高山屏障,降水丰沛,易呈暴雨天气,为洪灾重点防治区
C2 区	川东河谷峡谷地带	地势较为平坦,属于水汽通道,又处于鄂西山背风坡,为雨量低值区
E2 区	四川盆地西部边缘的平行岭谷区	地势相对较高,地形起伏较大,干湿季节明显,多局部短时强降雨,洪峰较大,为洪水灾害多发区

表 2 研究流域概况

Tab. 2 The general characteristics of the selected study area

流域	面积/km ²	高程/m	坡度/°	雨量站/个	主要土地利用类型	主要土壤质地类型
赶场	260.42	657~1 470	29.94	6	林地、草地	黄壤性土、黄褐土、黄棕壤土
西宁	503.84	860~2 320	30.67	2	耕地、林地	黄壤土、黄棕壤、紫色土
新生	186.97	442~577	15.22	2	耕地、林地	紫色土、黄壤土、水稻土

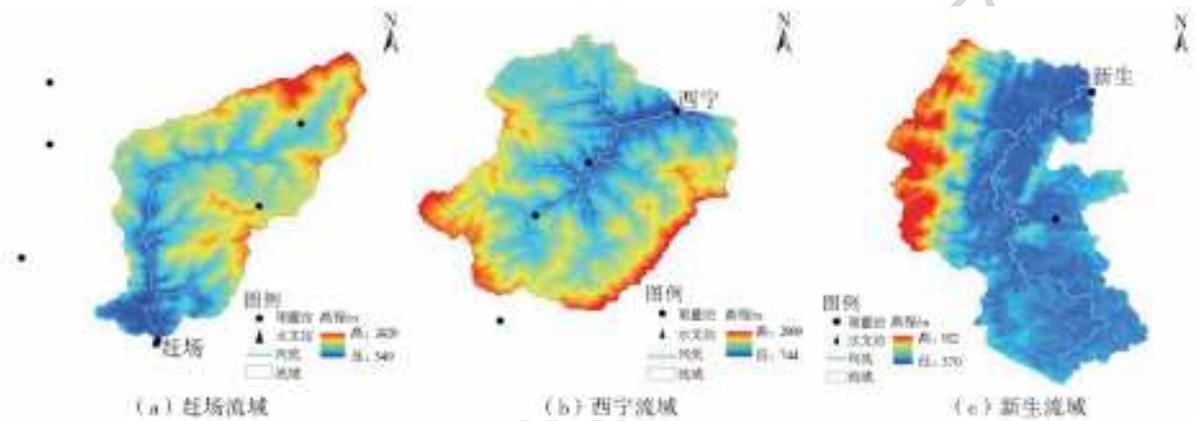


图 2 研究区地形及站点空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of terrains and location of monitoring stations in the three catchments of the study area

收集研究区基础数据包括:数字高程模型(25 m×25 m)、水系(1 : 10 000)、土地利用类型(1 : 250 000)和土壤质地类型(1 : 500 000)等空间数据。收集雨量站、水文站的降雨、径流过程等小时监测资料,分别收集了赶场(1965—2007 年)、西宁(1966—2012 年)和新生(1977—1995 年)流域各 15 场次雨洪过程。

2 研究方法

2.1 分布式水文模型

2.1.1 中国山洪水文模型构建

中国山洪水文模型(China flash flood hydrological model, CNFF)是由中国水利水电科学研究院自主研发的具有物理机制的分布式水文模型,已用于全国山洪水文模拟及预警预报^[5,24-25]。采用小流域、河段、节点、分水、水源、洼地和水库等 7 类水文元素概化流域,构建流域分布式水文模型,进行产汇流、河道演进和水库调蓄计算。以小流域(10~50 km²)为基本计算单元,各小流域内的气象条件和下垫面分布基本一致。CNFF 模型框架见图 3。

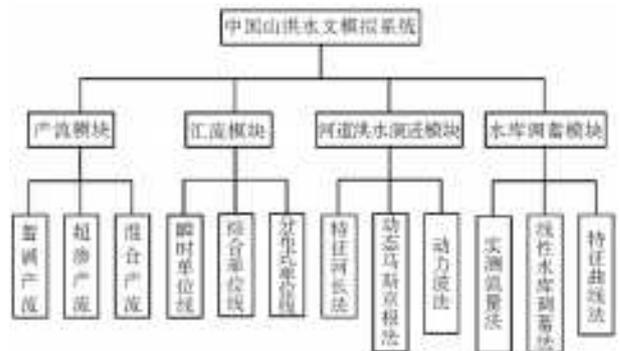


图 3 中国山洪水文模型框架

Fig. 3 The model structure of CNFF

本研究选取适于湿润、半湿润地区的蓄满产流方法进行产流计算,分别采用流域蓄水容量曲线和自由水蓄水容量曲线描述张力水和自由水分布的空间异质性。小流域出口断面的总径流深为地表径流深、壤中流和地下径流深之和。分别采用改进的分布式单位线法和线性水库调蓄法进行小流域地表径流和壤中流、地下径流汇流计算。考虑到降雨空间分布的异质性,采用泰森多边形进行面雨量插值,得到降雨空间分布。

分布式单位线法充分考虑了雨强和流域下垫面的空间异质性,理论依据为流域中水质点汇流时间

的概率密度分布函数等价于单位线。根据小流域内 1:50 000 DEM 栅格数据及 2.5 m 土地利用与植被类型数据确定不同下垫面条件下的流速系数和不同雨强下的坡面流速,进而确定坡面汇流时间,根据小流域汇流距离与累积集水面积曲线,得到小流域汇流时间概率密度分布,并转化为不同雨强($i = 5 \sim 100 \text{ mm/h}$)和不同时段($T = 10 \text{ min}, 30 \text{ min}, 1 \text{ h}$)的分布式单位线。

$$V = KS^{0.5} i^{0.4} \quad (1)$$

$$\Delta\tau = L/V \text{ 或 } \Delta\tau = \sqrt{2}L/V \quad (2)$$

$$\tau = \sum_{n=1}^m \Delta\tau_i \quad (3)$$

式中: V 为水流速度(m/s); K 为流速系数(m/s); S 为流域某点处沿水流方向的坡降; i 为无因次雨强因子; $\Delta\tau$ 为雨滴在栅格内的汇流时间(s); L 为栅格边长(m); τ 为雨滴沿着汇流路径从某栅格到达流域出口的汇流时间(s); m 为汇流路径的网格数。

由于山区河道大多缺乏实测断面资料,本研究采用适于无资料地区的动态马斯京根法进行河道洪水演进计算。将河道断面概化为抛物线、矩形和三角形,结合上游河道洪水入流过程,实时滚动计算演进参数。

$$K = aL_i N^{0.6} S_i^{-0.3} Q_0^{-0.2} \quad (4)$$

$$V_w = bN^{-0.6} S_i^{0.3} Q_0^{0.2} \quad (5)$$

$$X = 0.5 - 0.11 \frac{\sqrt{Q_0}}{S_i V_w L_i} \quad (6)$$

式中: K 为河段槽蓄曲线的坡度(h); X 为流量比重系数; L_i 为河段长度(m); N 为河段糙率; V_w 为洪水波速(m/s); Q_0 为河段参考流量(m^3/s); a, b 为经验系数,与概化的断面形状有关; S_i 为河段比降。

2.1.2 模型评估

采用径流深相对误差(R_{RE})、洪峰相对误差(R_{PE})、峰现时差(R_{TE})及 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)四个指标评估山洪模拟精度。 R_{RE} 、 R_{PE} 及 R_{TE} 的许可误差分别取为 $\pm 20\%$ 、 $\pm 20\%$ 和 $\pm 2 \text{ h}$,若模拟场次的相关指标在许可误差内,则视为合格^[26]。NSE 的最优值为 1,若 NSE 小于 0,说明模拟精度不如实测值的平均值。

$$R_{RE} = \frac{|R_c - R_o|}{R_o} \quad (7)$$

$$R_{PE} = \frac{|Q_c - Q_o|}{Q_o} \quad (8)$$

$$R_{TE} = T_c - T_o \quad (9)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_c(i) - Q_o(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_o(i) - \bar{Q}_o]^2} \quad (10)$$

式中: R_c 为模拟径流深(mm); R_o 为实测径流深

(mm); Q_c 为模拟洪峰流量(m^3/s); Q_o 为实测洪峰流量(m^3/s); T_c 为模拟峰现时间(h); T_o 为实测峰现时间(h); $Q_c(i)$ 为 i 时刻的模拟流量(m^3/s); $Q_o(i)$ 为 i 时刻的实测流量(m^3/s); \bar{Q}_o 为实测流量均值(m^3/s); n 为洪水序列长度。

2.2 动态临界雨量指标的确定

2.2.1 预警时段及成灾流量确定

四川山丘区洪水暴涨暴落,大多发生在 6 h 以内,因此,本研究将预警时段定为 1、3、6 h^[27-28]。依据山洪灾害调查评价结果,分析确定赶场、西宁和新生流域的成灾水位分别为 517.7、855.2 和 364.5 m。结合研究区野外调查和水位—流量关系曲线,可得 3 个流域的成灾水位对应的成灾流量分别为 1 287、1 033 和 154 m^3/s 。

2.2.2 设计雨型

基于《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》确定各流域 24 h 设计暴雨雨型分布见图 4。可以看出,西宁流域和赶场流域降雨较为集中,最大 1 h 暴雨分别占降雨总量的 28% 和 19%,西宁流域主雨峰居中,而赶场流域主雨峰靠后;新生流域具有两个暴雨峰值。进行临界雨量试算时,按照 24 h 的雨型分配比例,确定各流域不同预警时段的降雨过程序列。

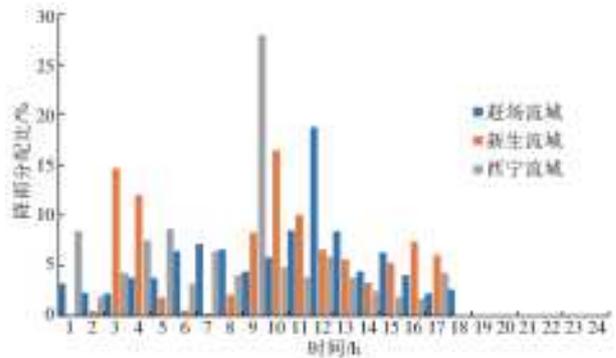


图 4 研究区设计暴雨雨型分配

Fig. 4 The temporal distribution of designed storms in the selected catchments

2.2.3 临界雨量确定

采用试算法计算不同预警时段的动态临界雨量 $P_{临}$,其中 P_a 为前期影响雨量; P 为降雨开始到预警前一时刻的降雨总量; $P_{强}$ 为预警前一时刻雨强。具体试算流程如下。

步骤 1 从场次降雨开始,截取任意历时 t 的降雨过程,驱动 CNFF 模拟其产生的洪水过程。

步骤 2 若模拟洪水过程的洪峰流量大于成灾流量,则缩短降雨历时重新截取降雨过程进行计算,直至模拟洪峰流量小于成灾流量。

步骤3 参照设计雨型,给 $t+1$ 时刻的降雨量 P_{t+1} 赋值,得到降雨历时为 $t+1$ 的降雨序列,驱动 CNFF 模拟该降雨序列所产生的洪水过程,若模拟洪水过程的洪峰流量接近成灾流量,则此时 P_{t+1} 即为该场次降雨历时 t 降雨后所对应的临界雨量 $P_{\text{临}}^{[12]}$ 。

步骤4 改变时间 t 的值,重复步骤1至3可得不同降雨历时、降雨量和前期影响雨量等条件下的 $(P_a + P + P_{\text{强}}, P_{\text{临}})$ 散点图。

步骤5 以均方根误差最小为原则,基于最小二乘法由散点分布拟合得到流域不同预警时段的动态临界雨量曲线。

3 结果与分析

3.1 模型率定及验证

赶场流域划分了 18 个小流域,小流域面积为

3.8~32.3 km²;西宁流域划分了 34 个小流域,小流域面积为 3.1~38.3 km²;新生流域划分了 10 个小流域,小流域面积为 4.5~17.7 km²。以各流域的前 10 场雨洪过程进行模型参数率定,后 5 场雨洪过程进行模型检验。

表3为研究区率定期和验证期的评价指标,各流域率定期及验证期平均径流深相对误差绝对值小于 12%,平均洪峰相对误差绝对值小于 10%,平均峰现时间误差绝对值小于 1 h,平均NSE均大于 0.85,各流域次洪模拟结果合格率均在 90%以上,CNFF在各流域进行洪水模拟的效果均较好,具有较好的适用性。图5为各流域在率定期和验证期的部分场次洪水过程,可以看出,CNFF在率定期和验证期均能准确模拟各流域的次洪过程。

表3 研究区山洪模拟精度评估

Tab.3 The performance evaluation of flash flood simulations in the study area

流域	时期	相对误差均值				模拟结果合格率/%		
		RER/%	RPE/%	RTE/h	NSE	RER	RPE	RTE
赶场	率定期	-2.6	-5.9	0.3	0.86	90	90	100
	验证期	-5.9	-5.2	0.4	0.89	100	100	100
西宁	率定期	10.4	-9.8	0.7	0.86	90	90	100
	验证期	-3.0	-9.0	0.3	0.88	100	90	100
新生	率定期	6.7	0.6	-0.1	0.88	90	100	100
	验证期	3.3	-0.6	-0.1	0.90	100	100	100

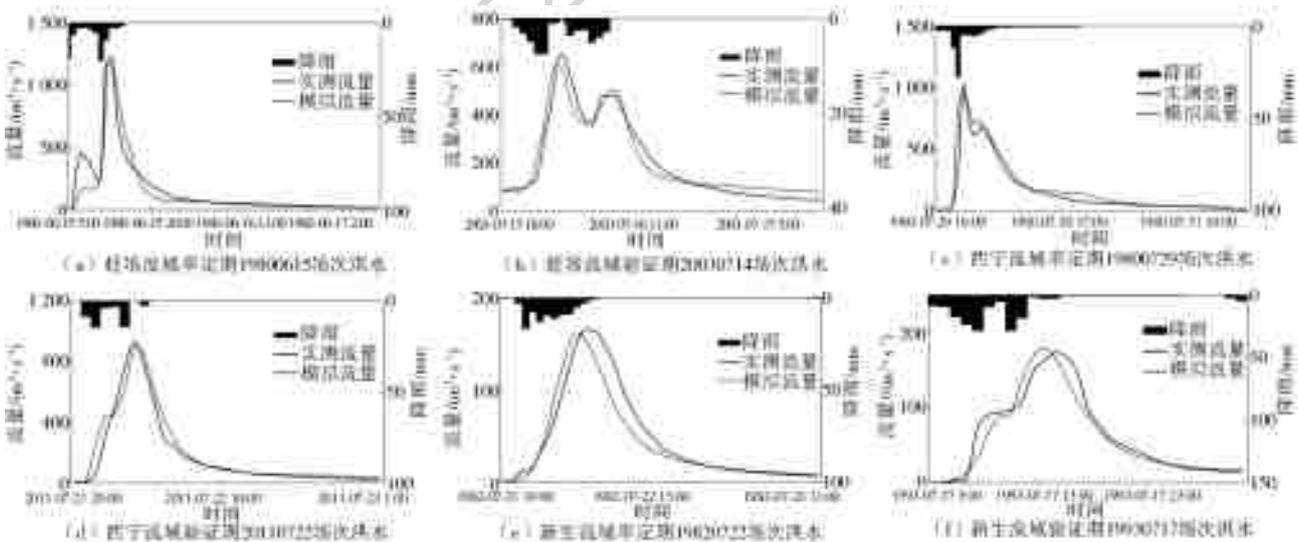


图5 研究区率定期与验证期实测与模拟山洪过程

Fig.5 Observed and simulated flash flood processes during calibration and validation periods in the study area

3.2 动态临界雨量曲线

以1、3和6h为预警时段,基于中国山洪水文模型,确定赶场流域1、3和6h的临界雨量分别为20~200、20~245和20~250mm;西宁流域1、3和6h的临界雨量分别为12~96、12~151和20~

160mm;新生流域1、3和6h的临界雨量分别为6~80、8~100和10~140mm。图6为研究区不同预警时段的临界雨量动态变化曲线,由于该曲线是基于设计暴雨雨型分析得到的,因此,各流域不同降雨历时、降雨量和前期影响雨量等条件下,统

计的($P_a + P + P_{强}$, $P_{临}$)分布存在离散点,尤其是在主雨峰时段附近的临界雨量分布差别较大,基于最小二乘法得到的动态临界雨量曲线较好地反映了散点分布,赶场、西宁和新生流域动态临界雨量曲线拟合的调整确定性系数^[29]分别为 0.91、0.89 和 0.92。随着 $P_a + P + P_{强}$ 的增加,不同研究区、不同时段临界雨量的变幅均呈减小的趋势,且趋于线性。这是由于研究区前期土壤湿度较小,临界雨量敏感性较强,时段临界雨量较大;随着降雨推进,土壤湿度变大及至土壤饱和后,临界雨量敏感性较弱,时段临界雨量较小且接近平衡。对于同一样本区域,时间尺度越

大,相应的临界雨量也会增大,说明累计雨量及降雨强度与临界雨量密切相关。不同样本区域,同一时间尺度下,赶场流域临界雨量动态变化曲线位于最上方,且与其他两个流域相差较大,西宁与新生流域的临界雨量动态曲线差别较小,新生流域位于最下方,如 $P_a + P + P_{强}$ 为 100 mm 时,赶场流域 1 h 临界雨量为 195 mm,西宁流域 1 h 临界雨量为 88 mm,新生流域 1 h 临界雨量为 64 mm,说明临界雨量地区差异性较大,不同样本区域的成灾流量、雨量丰沛度、坡度、起伏度等区域地形及暴雨特征对临界雨量的影响较大。

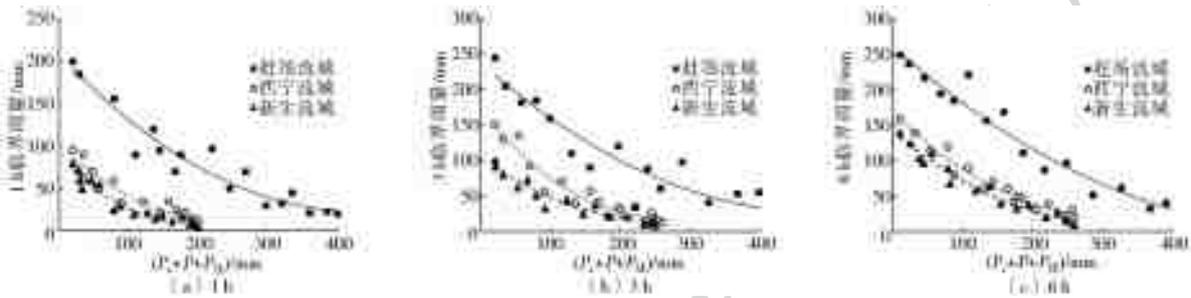


图 6 研究区临界雨量动态变化曲线

Fig. 6 The dynamic rainfall threshold curves of the study area

3.3 基于临界雨量的山洪预警应用

根据临界雨量曲线对各流域的场次洪水进行预警,预警准确率见图 7。新生流域预警的准确率最高,1、3 和 6 h 山洪预警的准确率分别为 93%、100% 和 100%;西宁流域(80%~100%)和赶场流域(87%~93%)次之。预警时段为 1 h 时,新生流域场次洪水 19820722 存在预警误判,预警时段长为 3 h 和 6 h 时,该场洪水预警正确,这主要是由于该场洪水 1 h 临界雨量较小(仅 6 mm),极易受临界雨量动态变化曲线拟合误差的影响,应进一步增加样本容量,提高曲线拟合的精度,减小山洪预警的不确定性。总体而言,随着预警时段

的增加,研究区山洪预警准确率有所降低,但总体精度仍高于 80%,CNFF 适用于研究区山洪预警预报。

以山洪预警准确率最低的赶场流域为例,15 场洪水预警结果见表 4。预警时段为 1 h 的山洪预警准确率最高,14 场不同等级洪水[洪峰模数为 $0.82 \sim 4.55 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{km}^2)$]的预警结果均正确,有效发挥了山洪预警预报的防灾效益;场次 19650712 存在预警误判,这是由于场次降雨时程分布较为均匀,与设计暴雨雨型差异较大,基于设计雨型的动态临界雨量曲线不适于该场次雨洪的山洪预警,因此,在山洪实时预警分析中,应进一步分析减弱雨型、中间雨型和增强雨型等不同雨型下的动态临界雨量曲线^[24],结合流域实际雨洪特征选取适宜的动态临界雨量曲线进行山洪预警,以进一步提高预警精度。随着预警时段增加至 3 h 和 6 h,山洪预警结果的不确定性随之增加,如场次 19800615 同样存在预警误判,该场降雨总量较小,但时程分配较集中,虽然实际流量未达到成灾流量,但累计雨量超过了临界雨量,考虑发布山洪预警。此外,降雨资料偏差及水文模型系统误差等因素亦可导致预警误判,今后应进一步加强模型检验和不确定性分析,以提高山洪预警的准确度。

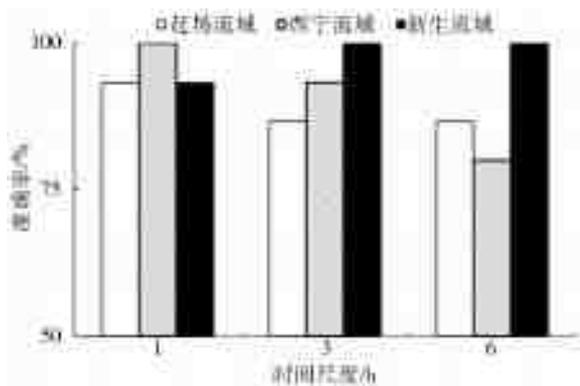


图 7 不同预警时段下的山洪预警准确率

Fig. 7 The qualifying ratios of flash flood warning under various time spans

表4 赶场流域动态临界雨量指标检验

Tab. 4 The validation of dynamic rainfall threshold in Ganchang catchment

时间尺度	预警时间	洪峰流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$(P_a + P + P_{\text{强}})/\text{mm}$	P_{t+1}/mm	$P_{\text{临}}/\text{mm}$	是否预警	是否正确
1 h	2007-07-05 7:00	861	399.5	15.8	23.3	否	√
	2004-09-30 7:00	493	99.9	28.5	142.5	否	√
	2003-07-14 13:00	701	140.2	34.0	106.0	否	√
	2002-06-09 8:00	520	128.1	14.0	148.0	否	√
	1997-07-18 7:00	263	75.7	22.7	158.1	否	√
	1993-06-28 12:00	306	67.3	5.8	165.0	否	√
	1990-07-22 6:00	370	130.7	10.4	109.4	否	√
	1989-09-24 17:00	215	66.6	25.4	160.1	否	√
	1986-06-26 13:00	711	304.7	10.4	19.4	否	√
	1985-09-12 18:00	322	109.8	27.2	148.4	否	√
	1980-06-15 12:00	1184	248.4	74.8	70.0	否	√
	1979-07-15 2:00	756	111.1	22.6	106.4	否	√
	1976-08-24 13:00	278	83.4	11.8	153.5	否	√
	1969-09-26 14:00	622	150.0	32.0	102.2	否	√
	1965-07-12 12:00	1291	187.3	25.0	96.0	否	×
3 h	2007-07-05 8:00	894	388.0	32.1	37.2	否	√
	2004-09-30 8:00	581	92.9	82.6	105.4	否	√
	2003-07-14 14:00	701	134.8	100.9	143.4	否	√
	2002-06-09 9:00	577	125.1	94.2	300.1	否	√
	1993-06-28 13:00	309	135.1	172.5	259.5	否	√
	1997-07-18 8:00	266	63.5	62.9	390.2	否	√
	1990-07-22 7:00	424	102.6	38.4	105.6	否	√
	1989-09-24 17:00	356	56.9	92.9	127.7	否	√
	1986-06-26 14:00	711	283.4	35.4	45.1	否	√
	1985-09-12 19:00	420	96.4	57.8	158.3	否	√
	1980-06-15 12:00	1184	214.3	160.9	59.6	是	×
	1979-07-15 3:00	756	92.3	108.1	115.7	否	√
	1976-08-24 14:00	289	66.7	38.7	188.4	否	√
	1969-09-26 15:00	622	147.4	66.7	145.4	否	√
	1965-07-12 12:00	1300	107.3	56.2	109.0	否	×
6 h	2007-07-05 11:00	894	363.5	13.4	23.2	否	√
	2004-09-30 11:00	602	83.2	123.5	179.1	否	√
	2003-07-14 17:00	701	116.1	108.3	165.8	否	√
	2002-06-09 12:00	577	109.6	95.0	205.7	否	√
	1993-06-28 16:00	325	115.1	103.1	175.4	否	√
	1997-07-18 11:00	266	38.4	78.0	210.0	否	√
	1990-07-22 10:00	429	97.8	41.5	193.2	否	√
	1989-09-24 20:00	591	36.8	149.18	215.8	否	√
	1986-06-26 14:00	711	284.7	40.3	49.6	否	√
	1985-09-12 22:00	420	89.3	62.8	174.8	否	√
	1980-06-15 12:00	1184	135.1	258.0	175.2	是	×
	1979-07-15 6:00	756	91.3	127.8	165.5	否	√
	1976-08-24 17:00	291	63.7	41.6	182.2	否	√
	1969-09-26 18:00	622	49.4	74.7	203.4	否	√
	1965-07-12 12:00	1340	64.5	82.3	190.8	否	×

注:表中“洪峰流量”指从降雨开始时刻到预警时刻所产生的最大流量; P_a 为前期影响雨量; P 为降雨开始到预警前一时刻的降雨总量; $P_{\text{强}}$ 为预警前一时刻雨强; P_{t+1} 为预警时刻的降雨量。

4 结 论

本文基于中国山洪水文模型进行了小流域动态临界雨量预警指标分析方法和应用,以四川省不同水文分区的 3 个典型流域为例,评估了该方法用于小流域山洪预警的精度,研究结论如下。

(1)综合考虑前期影响雨量、累积雨量、降雨强度及雨型分布、地形地貌等因素的影响,提出了基于中国山洪水文模型的小流域动态临界雨量预警指标分析方法,有助于实现山洪精细化预报预警。

(2)基于中国山洪水文模型模拟了 3 个典型流域的次洪过程,各场次径流深、洪峰流量、峰现时间合格率均在 90%以上,该水文模型可准确模拟流域场次雨洪过程。

(3)以 1、3 和 6 h 为预警时段,赶场、西宁和新生流域的临界雨量分别为 20~250、12~160 和 6~140 mm。

(4)预警时段、前期影响雨量、累积雨量、雨强、雨型和地形地貌等因素对动态预警指标影响较大,在实际预警预报过程中应综合考虑区域地形地貌特征及降雨特性,结合多时段预警指标进行山洪预警。

参考文献(References):

[1] REED S, SCHAAKE J, ZHANG Z Y. A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 337(3/4): 402-420. DOI:10.1016/j.jhydrol.2007.02.015.

[2] HAPUARACHCHI H A P, WANG Q J, PAGANO T C. A review of advances in flash flood forecasting[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(18): 2771-2784. DOI:10.1002/hyp.8040.

[3] 全国山洪灾害防治规划领导小组办公室. 全国山洪灾害防治规划[R]. 2006. (Office of National Flash Flood Prevention and Control. Planning of national flash flood prevention and control[R]. 2006. (in Chinese))

[4] 赵士鹏. 中国山洪灾害系统的整体特征及其危险度区划的初步研究[J]. *自然灾害学报*, 1996, 5(3): 93-99. (ZHAO S P. An elementary study on whole characteristics of mountain torrents disaster system in China and its hazard regionalization[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(3): 93-99. (in Chinese)) DOI:10.13577/j.jnd.1996.0315.

[5] 郭良, 丁留谦, 孙东亚, 等. 中国山洪灾害防御关键技术[J]. *水利学报*, 2018, 49(9): 1123-1136. (GUO L, DING L Q, SUN D Y, et al. Key techniques of flash flood disaster prevention in China [J]. *Journal of*

Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1123-1136. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20180728.

[6] 刘志雨. 山洪预警预报技术研究与应用[J]. *中国防汛抗旱*, 2012, 22(2): 41-45, 50. (LIU Z Y. Research and application of flash flood warning and forecasting techniques[J]. *China Flood & Drought Management*, 2012, 22(2): 41-45, 50. (in Chinese)) DOI:10.16867/j.cnki.cfdm.2012.02.014.

[7] 叶金印, 李致家, 常露. 基于动态临界雨量的山洪预警方法研究与应用[J]. *气象*, 2014, 40(1): 101-107. (YE J Y, LI Z J, CHANG L. Research and application of flash flood early warning method based on dynamic critical precipitation [J]. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(1): 101-107. (in Chinese))

[8] 于艳梅. 山洪灾害动态临界雨量确定方法研究[J]. *水资源开发与管理*, 2018(2): 23-25. (YU Y M. Study on determination method of dynamic critical rainfall of mountain flood disaster[J]. *Water Resources Development and Management*, 2018(2): 23-25. (in Chinese)) DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2018.02.06.

[9] 练继建, 杨伟超, 徐奎, 等. 山洪灾害预警研究进展与展望[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(11): 1-14. (LIAN J Y, YANG W C, XU K, et al. Advances and prospect of flash flood forecasting [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(11): 1-14. (in Chinese)) DOI:10.11660/slfdx.20181101.

[10] CARPENTER T M, SPERFLAGE J A, GEORGAKAKOS K P, et al. National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 224(1-2): 21-44. DOI:10.1016/S0022-1694(99)00115-8.

[11] 刘志雨, 杨大文, 胡建伟. 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*, 2010, 46(3): 317-321. (LIU Z Y, YANG D W, HU J W. Dynamic critical rainfall-based torrential flood early warning for medium-small rivers[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2010, 46(3): 317-321. (in Chinese))

[12] 郭克伦, 梁国华, 何斌. 基于 API 水文模型的动态临界雨量山洪预警方法及应用[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(12): 74-77. (GUO K L, LIANG G H, HE B. Dynamic critical precipitation flash flood warning method and its application based on API hydrologic model[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(12): 74-77. (in Chinese))

[13] 陈瑜杉, 杨文发, 许银山. 不同土壤含水量的动态临界雨量拟定方法研究[J]. *人民长江*, 2015, 46(12): 21-26. (CHEN Y S, YANG W F, XU Y S. Study of dynamic critical precipitation drafted method under

- different soil moisture content level [J]. Yangtze River, 2015, 46 (12): 21-26. (in Chinese) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.12.006.
- [14] 江锦红, 邵利萍. 基于降雨观测资料的山洪预警标准[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 458-463. (JIANG J H, SHAO L P. Standard of mountain flood warning based on the precipitation observation data[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 458-463. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.04.003.
- [15] 程卫帅. 山洪灾害临界雨量研究综述[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 901-908. (CHENG W S. A review of rainfall thresholds for triggering flash floods [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(6): 901-908. (in Chinese) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2013.06.012.
- [16] 赵然杭, 王敏, 陆小蕾. 山洪灾害雨量预警指标确定方法研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(9): 49-53. (ZHAO R H, WANG M, LU X L. Research on determination method for rainfall warning indexes of torrential flood disaster [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(9): 49-53. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2011.09.014.
- [17] 陈桂亚, 袁雅鸣. 山洪灾害临界雨量分析计算方法研究[J]. 人民长江, 2005, 36(12): 40-43, 54. (CHEN G Y, YUAN Y M. Research on critical precipitation amount computation method of mountain torrential flood disaster [J]. Yangtze River, 2005, 36(12): 40-43, 54. (in Chinese) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2005.12.018.
- [18] 张玉龙, 王龙, 李靖, 等. 云南省山洪灾害临界雨量空间插值分析方法研究[J]. 云南农业大学学报, 2007, 22(4): 570-573, 581. (ZHANG Y L, WANG L, LI J, et al. Research into special gridding analysis methods on critical rainfall of mountain disasters in Yunnan province [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2007, 22(4): 570-573, 581. (in Chinese) DOI: 10.16211/j.issn.1004-390x(n).2007.04.005.
- [19] 樊建勇, 单九生, 管珉, 等. 江西省小流域山洪灾害临界雨量计算分析[J]. 气象, 2012, 38(9): 1110-1114. (FAN J Y, SHAN J S, GUAN M, et al. Research on analysis and calculation method of critical precipitation of mountain torrents in Jiangxi province [J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(9): 1110-1114. (in Chinese))
- [20] 施征, 陈焕宝. 分布式水文模型在山洪雨量预警指标确定中的应用[J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 79-81. (SHI Z, CHEN H B. Application of distributed hydrologic model in determination of mountain torrent warning index [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(2): 79-81. (in Chinese))
- [21] 贺拿, 陈宁生, 曾梅, 等. 白鹤滩水电站坝址近场区泥石流临界雨量研究[J]. 水利学报, 2015, 46(2): 239-247. (HE N, CHEN N S, ZENG M, et al. Study on debris flow rainfall threshold of Baihetan hydropower station near-zone area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(2): 239-247. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2015.02.014.
- [22] 林志强, 尼玛吉, 黄志诚. 西藏东南部山洪灾害过程水文动力模拟和临界雨量[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 183-187, 195. (LIN Z Q, NIMAJI, HUANG Z C. Hydrological dynamics simulation and critical rainfall for flash flood in Southeastern Tibet [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 183-187, 195. (in Chinese) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.033.
- [23] 四川省水利电力厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册[M]. 成都: 四川省水利电力厅. 1984. (Department of Water Resources and Electricity of Sichuan Province. Handbook for storm and flood calculation in small-medium sized catchments of Sichuan province [M]. Chengdu: Department of Water Resources and Electricity of Sichuan Province. 1984. (in Chinese))
- [24] ZHAI X Y, GUO L, LIU R H, et al. Rainfall threshold determination for flash flood warning in mountainous catchments with consideration of antecedent soil moisture and rainfall pattern [J]. Natural Hazards, 2018, 94(2): 606-625. DOI: 10.1007/s11069-018-3404-y.
- [25] WANG Y L, LIU R H, GUO L, et al. Forecasting and providing warnings of flash floods for ungauged mountainous areas based on a distributed hydrological model [J]. Water, 2017, 9(10), 776. DOI: 10.3390/w9100776.
- [26] GB/T22482—2008, 水文情报预报规范[S]. (GB/T22482—2008, Standard for hydrological information and hydrological forecasting[S]. (in Chinese))
- [27] 全国山洪灾害防治项目组. 山洪灾害分析评价方法指南[R]. 北京: 2015. (National Flash Flood Disaster Prevention and Control Project Team. Guidelines for flash flood disaster investigation and evaluation[R]. Beijing: 2015. (in Chinese))
- [28] 四川省水利电力局水文总站. 四川省水文手册[M]. 成都: 1979. (General Hydrological Station of Sichuan Provincial Bureau of Water Conservancy and Electric Power. Sichuan Hydrological Manual[M]. Chengdu: 1979. (in Chinese))
- [29] WHERRY R J. A new formula for predicting the shrinkage of the coefficient of multiple correlation [J]. Annals of Mathematical Statistics, 1931, 2(4): 440-457.