

# 基于分布式模型的多维动态临界雨量山洪预警研究

管晓祥, 姚新宇, 沈 婕, 宋耀榕, 楚汉琛

(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 根据国内外山洪预警预报技术的最新进展, 提出了以 HEC-HMS 模型为基础, 考虑土壤含水量和起涨水位的多维动态临界雨量山洪预警方法。结合上流水文站 1993 ~ 2003 年实测资料, 率定 HEC-HMS 模型参数, 确定预警时间、预警流量以及雨型分配等关键因素, 计算多维动态临界雨量, 建立了山洪动态预警方案, 经过历史致灾洪水检验, 结果可靠。

**关键词:** 上流流域; 山洪预警; 多维动态临界雨量; HEC-HMS 模型

**中图分类号:** TV122+1      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1007-7839 (2017) 12-0042-05

## Study on multidimensional dynamic critical rainfall flash flood warning based on distributed model

GUAN Xiaoxiang, YAO Xinyu, SHEN Jie, SONG Yaorong, CHU Hanchen

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu)

**Abstract:** According to the latest progress of mountain flood warning and prediction technology at home and abroad and based on the HEC-HMS model, a multidimensional dynamic critical rainfall flash flood warning method considering soil water content and rising water level was proposed. Combined with the measured data of upstream hydrological station from 1993 to 2003, the HEC-HMS model parameters were calibrated to determine the key factors of warning time, early warning flow and rain flow rate distribution, calculate the multidimensional dynamic critical rainfall, sets up a dynamic early warning scheme. After historical disaster flood test, the results were reliable.

**Key words:** upstream basin; flash flood warning; multidimensional dynamic critical rainfall; HEC-HMS model

## 0 引言

山洪灾害是指因降雨在山丘区引发的溪流洪水等对国民经济和人民生命财产造成的灾害。近年来, 极端天气事件不断增多, 突发性暴雨频发, 山洪灾害已成为造成人民生命财产损失的主要灾害, 严重制约了广大山丘区经济社会的可持续发展, 中小流域山洪的预报与预警是防洪减灾工作突出难点。

山洪灾害具有流速快、预见期短等特点, 且山洪区资料缺乏, 山洪准确预报非常困难, 山洪研究致力于避免或者减少山洪灾害的损失。我国气候、地质条件空间差异较大, 水文气象站网分布不均, 众多地区数据严重匮乏。因此, 现有的山洪灾害临界雨量的确定方法主要包括实测雨量统计法<sup>[1-2]</sup>、水位—流量反推法<sup>[3]</sup>、暴雨临界曲线法<sup>[4]</sup>、比拟法<sup>[5]</sup>、水动力学计算方法<sup>[6]</sup>等。美国常用的预警指标称为 Flash Flood Guidance (FFG)<sup>[7-8]</sup>, 该

收稿日期: 2017-08-28

作者简介: 管晓祥 (1995-), 男, 本科, 研究方向为水文水资源。

方法具有较强的物理基础, 较为全面地考虑了降雨、土层含水量以及下垫面特性三大因素, 覆盖地区类型和气候类型均较广, 能够提供预警指标的动态信息, 故该方法及相关成果在欧洲、非洲等很多国家和地区得到广泛运用<sup>[9-12]</sup>。为了适用于多个小流域, 目前亦有将分布式水文模型应用于临界雨量研究的探索<sup>[13-15]</sup>。从方法上看, 美国的 FFG 方法更接近于用分布式水文模型方法确定的动态临界雨量。刘志雨等<sup>[16]</sup>分析了国内外山洪预警预报技术的最新进展, 提出了以分布式模型为基础, 以动态临界雨量为指标的山洪预警预报法, 并在江西遂川江流域进行了应用。

## 1 研究区概况与数据收集

本研究选取江西省上流水文站控制的玉琊溪流域为研究区。上流水文站位于东经  $118^{\circ} 03'$ 、北纬  $28^{\circ} 48'$ , 属于信江水系, 集水面积  $171 \text{ km}^2$ , 位于玉山县境内西部地区。该流域年均降水量为  $2210.9 \text{ mm}$ , 年均径流深为  $1530.2 \text{ mm}$ , 平均径流系数为  $0.69$ 。年内降水多集中于  $4 \sim 9$  月, 约占年降水量的  $76.8\%$ , 年内径流多集中于  $4 \sim 9$  月, 约占年径流深的  $71.7\%$ , 属典型的湿润区。流域内林地所占的面积比重最大, 部分布有大面积成片的耕地, 还有少量草地和人工地表存在。该流域土壤质地主要为砂黏土, 其次为黏壤土和砂壤土。

## 2 研究方法

一般情况下, 山洪成灾的原因是局地暴雨形成洪水, 导致河水急速上涨, 水位超过河岸高度形成漫滩, 上滩洪水对农田和房屋造成安全威胁。因此, 通常可以将河水漫滩的水位定为警戒水位。根据上滩水位, 结合实测河流断面资料估算出相应的上滩流量, 即为警戒流量。由于径流是由降雨产生的, 从达到上滩流量的时间开始往前推, 在一定时间内的累计降雨量称之为警戒临界雨量<sup>[8]</sup>。刘志雨等<sup>[16]</sup>研究山洪预警时认为山洪的大小除与降雨总量、降雨强度有关外, 还和流域土壤饱和程度密切相关。根据《山洪灾害分析评价技术要求》, 应选择不同情况下的土壤初始含水量进行预警指标分析, 代表土壤湿度较干 ( $P_a \leq 0.5WM$ )、适中 ( $0.5WM \leq P_a \leq 0.8WM$ ) 以及较湿 ( $P_a \geq 0.8WM$ ) 3 种情况 (其中  $WM$  是土壤饱和含水量)。当土壤

较干时, 降水下渗大, 产生地表径流则小; 反之, 若土壤较湿, 降水入渗少时, 就易形成地表径流。随着流域土壤饱和度的变化, 山洪预警临界警戒雨量值也会随之发生变化, 故将考虑土壤含水量变化的临界雨量称之为动态临界雨量。

临界雨量除了与上述因素紧密联系, 还与降雨之前的河道初始水位, 即起涨水位密切相关。若降雨强度、降雨总量、土壤含水量相同, 起涨水位越高, 则易达到警戒水位, 从而引发山洪。因此, 在小流域预警中应显示考虑起涨水位的影响, 考虑不同起涨水位、初始土壤含水量和降雨历时的多维动态临界雨量指标。该临界雨量指标计算步骤如下:

(1) 依据研究区历史雨洪资料, 率定 HEC-HMS 模型的产汇流参数;

(2) 分析山洪防站点水位流量关系, 确定多种情景起涨水位, 依据水位流量关系, 推求起涨流量, 进而建立多种初始土壤含水量、起涨流量的情景组合;

(3) 给定最大  $1 \text{ h}$ 、 $2 \text{ h}$ 、 $3 \text{ h}$ 、 $6 \text{ h}$  临界雨量试算值, 分别按照雨型进行分配, 计算其降雨量过程;

(4) 将设定的降雨过程和模型初值输入 HEC-HMS 模型, 进行产汇流计算推求洪峰流量, 不断调整降雨输入, 直至 HEC-HMS 计算洪峰流量近似等于警戒雨量, 此时输入降雨即为相应历时和初始土壤含水量、起涨流量所对应的临界雨量。

## 3 计算结果及分析

### 3.1 HEC-HMS 参数率定

采用 HEC-HMS 模型模拟上流站 1993 ~ 2003 年日径流过程, 其中率定期为 1993 ~ 2000 年, 验证期为 2001 ~ 2003 年。表 1 中 HEC-HMS 模型模拟上流站率定年径流深相对误差为  $-2.21\%$ , 确定性系数为  $0.80$ ; 验证期年径流深相对误差为  $0.53\%$ , 确定性系数为  $0.79$ 。除个别年份日洪峰流量系统偏小, HEC-HMS 模型模拟的上流站日流量过程与实测日流量基本一致。

表 2 统计了 HEC-HMS 模拟上流站洪水过程的精度。率定期所有 10 场洪水的径流深相对误差和洪峰流量相对误差均在  $\pm 20\%$  以内, 且各场洪水的峰现时差均在  $\pm 2 \text{ h}$  以内, 次洪模拟平均合格率为  $100\%$ , 属甲级精度等级, 确定性系数均值为

0.87, 属乙级精度等级。验证期 5 场洪水中, 有 1 场洪水(20010814 号次洪)的径流深相对误差超过 -20%, 有 2 场洪水(20010814 和 20030627 号次洪)的洪峰流量相对误差超过 20%, 但各场洪水的峰现时差均在  $\pm 2$  h 以内, 次洪模拟平均合格率为 80.0%, 属乙级精度等级, 确定性系数均值为 0.77, 属乙级精度等级。

3.2 多维动态临界雨量计算

3.2.1 试算参数确定

选取的上流流域其暴雨洪水响应时间为在 1 ~ 5 h 范围内。根据《山洪灾害分析评价技术要求》, 最长预警时段应选择流域汇流时间, 本研究

中为了分析不同预警时段预警指标的变化规律, 确定预警时段为 1 h、2 h、3 h、6 h 共 4 个时段。因为上流流域未获取到水文站大断面资料, 无法确定上滩水位和上滩流量。参考周边流域其它站的警戒流量确定结果, 基于实测流量资料推求的 5 年一遇的设计洪水 392 m<sup>3</sup>/s 作为上流流域的警戒流量。同时取前期土壤湿润(土壤初始含水量 Pa=0.9WM)、较湿(Pa=0.9WM)、一般(Pa=0.5WM)、较干(Pa=0.3WM)以及干燥(Pa=0.1WM)5 种情况进行分析, 并参照《江西省暴雨洪水查算手册》2010 版中以 1 h 为时段的雨型分配为依据, 确定 1 h、2 h、3 h 和 6 h 时试算雨型的分配。起涨流量则根据水

表 1 HEC-HMS 模型模拟上流站日径流过程精度统计表

	年均 降水量 (mm)	年均径流深				确定性 系数
		实测 (mm)	模拟 (mm)	绝对误差 (mm)	相对误差 (%)	
率定期 (1993 ~ 2000)	2365.7	1711.3	1673.4	-38	-2.21	0.80
验证期 (2001 ~ 2003)	2056.1	1349.0	1356.1	7	0.53	0.79

表 2 HEC-HMS 模型模拟上流站洪水过程精度统计表

洪号	径流深				洪峰流量			峰现时差			确定性 系数
	实测 (mm)	模拟 (mm)	相对 误差 (%)	是否 合格	实测 (m <sup>3</sup> /s)	模拟 (m <sup>3</sup> /s)	相对误差 (%)	是否 合格	绝对误 差 (h)	是否 合格	
19930624	75.1	75.8	0.93	是	205.0	208.0	1.5	是	0.5	是	0.82
19940517	28.7	27.6	-3.83	是	103.0	106.0	2.9	是	0.5	是	0.94
19950424	72.0	60.1	-16.5	是	167.0	168.0	0.6	是	-0.5	是	0.84
19970508	25.7	27.1	5.45	是	82.0	83.7	2.3	是	1.0	是	0.73
19970515	44.2	44.2	0.00	是	83.0	80.9	-2.8	是	0.5	是	0.91
19970624	32.6	30.9	-5.21	是	99.0	108.0	9.3	是	1.0	是	0.85
19980616	113.2	108.0	-4.59	是	391.0	390.0	-0.3	是	-2.5	是	0.88
19980726	77.3	76.4	-1.16	是	238.0	235.0	-1.3	是	1.5	是	0.87
19990817	51.6	48.3	-6.40	是	203.0	209.0	3.0	是	0.5	是	0.92
20010611	54.3	50.3	-7.37	是	199.0	196.0	-1.5	是	0.5	是	0.91
20010814	43.6	33.8	-22.4	否	200.0	246.0	23.0	否	1.0	是	0.71
20020628	28.4	28.1	-1.06	是	107.0	105.0	-1.9	是	2.0	是	0.73
20020701	41.2	39.5	-4.13	是	129.0	135.0	4.7	是	1.0	是	0.91
20030624	21.0	17.6	-16.1	是	112.0	127.0	13.4	是	0.5	是	0.71
20030627	80.2	87.9	9.60	是	272.0	332.0	22.1	否	1.0	是	0.78

位流量关系划分不同起涨水位而得到。根据上流站洪水资料, 拟定了水位流量关系(图 1), 并建立了水位流量的非线性回归方程, 该方程相关系数为 0.983, 表明拟合的水位流量关系曲线精度较高。

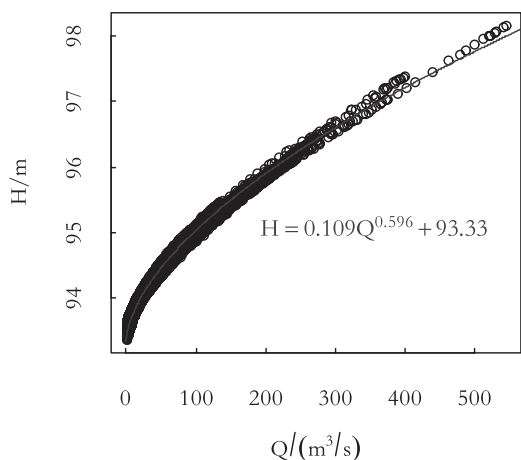


图 1 上流站水位流量关系曲线

### 3.2.2 多维动态临界雨量结果

将设定的降雨过程和模型初值(初始土湿、起涨流量等)输入 HEC-HMS 模型, 试算得到相应临界雨量。图 2 显示了多维动态临界雨量等值线, 在每张不同降雨历时的等值线图(单位: mm)中, 横坐标表示初始土壤含水量(Pa), 纵坐标表示河道的起涨水位(H)。

如图 2 所示, 初始土壤含水量和起涨水位是推算临界雨量的重要参数, 初始土壤含水量越大,

起涨水位越高, 则临界雨量越小, 越易引发山洪。从不同历时的等值线图比较中可以看出, 在初始土壤含水量和起涨水位相同的情况下, 降雨的历时越长, 临界雨量越大。此多维动态临界雨量等值线图可以清晰直观地根据当前初始土壤含水量、起涨水位以及降雨时程, 比较临界雨量和当前实际降雨量, 以快速判断该小流域是否会暴发山洪。

### 3.3 临界雨量合理性检验

通过分析实测暴雨洪水数据, 选取峰值流量与上流地区警戒流量  $392 \text{ m}^3/\text{s}$  相近的相应场次的次洪, 再绘制出他们的降雨—流量过程线, 判断其降雨历时, 与相应的临界雨量值进行比较。为满足检验需要, 需要选取历时  $\leq 6 \text{ h}$  的短时大雨量洪水进行研究检验, 通过筛选选得 1995 年 6 月 24 日、1998 年 6 月 16 日、1998 年 6 月 24 日这 3 场次洪, 并确定其起涨水位、降雨历时和实际雨量(见表 3)。

利用前期已率定的参数, 使用 HEC-HMS 模型对选定的 3 场次洪进行模拟, 确定其准确的土壤含水量值, 随之利用已经制作出来的临界雨量等值线, 利用降雨历时, 起涨水位和土壤含水量值定点确定模拟的临界雨量(见图 3), 并与实际雨量进行比较, 来验证等值线图的精确度。

数据显示满足验证条件的几场洪水的实际雨量与预警临界雨量都较接近, 具有一定的说服力。且 1998 年 6 月 16 日的次洪峰值流量为  $391 \text{ m}^3/\text{s}$ , 与

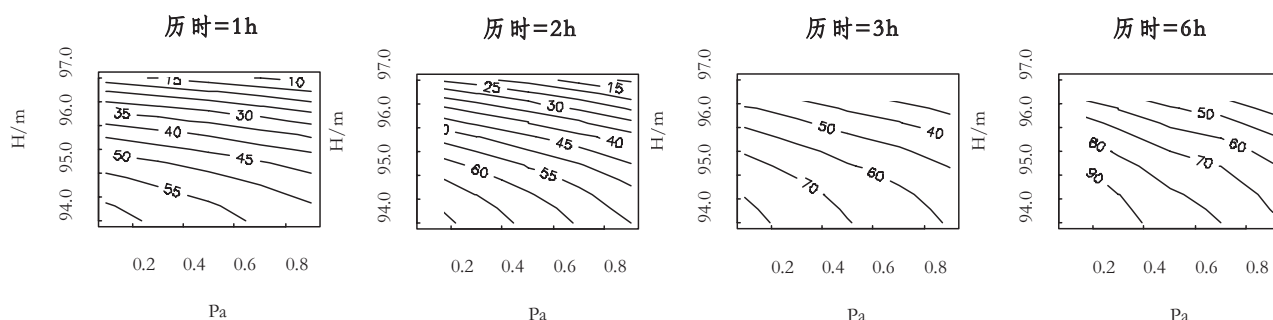


图 2 上流流域多维动态临界雨量等值线图

表 3 实测次洪临界雨量检验成果表

起涨时刻	峰值时刻	起涨水位 (mm)	历时 (h)	峰值流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	初始土壤 含水量 Pa	临界雨量 (mm)	实际临界雨 量 (mm)
1995/06/24 00:00	1995/06/24 08:00	95.16	6	400	80%	52	60
1998/06/16 09:00	1998/06/16 /18:06	94.18	6	391	75%	73.4	73
1998/06/24 09:00	1998/06/24 20:00	94.68	6	374	75%	73.4	69



上流地区警戒流量  $392 \text{ m}^3/\text{s}$  差距极小, 临界雨量的预测也体现了较高的准确性。说明本次研究确定的多维动态临界雨量等值线图能够为上流地区, 及流域面积、气候条件等相近的小流域地区提供预警服务。

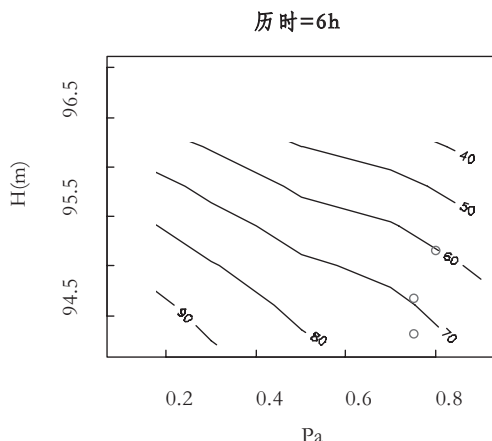


图 3 上流流域 6 h 动态临界雨量等值线图  
(单位: mm)

## 4 结论

根据国内外山洪预警预报技术的最新进展, 以 HEC—HMS 模型为基础, 提出了考虑土壤含水量和起涨水位的多维动态临界雨量山洪预警方法。本方法结合上流水文站 1993 ~ 2003 年日径流过程, 其中率定期为 1993 ~ 2000 年, 验证期为 2001 ~ 2003 年, 率定 HEC—HMS 模型参数。预警时段分为 1 h、2 h、3 h、6 h 这 4 个时段, 基于实测流量资料推求得 5 年一遇的设计洪水  $392 \text{ m}^3/\text{s}$  作为上流流域的警戒流量, 并且将土壤湿度划分为湿润、较湿、一般、较干、干燥 5 个等级, 计算得到多维动态临界雨量数据, 形成多维动态临界雨量等值线图, 给出了山洪的动态预警方案, 经实际观测检验, 结果可靠。

## 参考文献:

[1] 全国山洪灾害防治规划领导小组办公室. 山洪灾害临界雨量分析计算细则 [Z]. 2003.

[2] 叶勇, 王振宇, 范波芹. 浙江省小流域山洪灾害临界雨量确定方法分析 [J]. 水文, 2008 (01): 56-58.

[3] 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 (04): 458-463.

[4] 陈文辉. 山洪灾害防治非工程措施中预警指标的确定——以甘肃省陇南市宕昌县为例 [J]. 广东水利水电, 2011 (03): 65-67.

[5] 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.

[6] 王鑫, 曹志先, 谈广鸣. 暴雨山洪水动力学模型及初步应用 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2009 (04): 413-416.

[7] U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service. Modernized Areal Flash Flood Guidance [R]. 1992.

[8] Carpenter T M, Georgakakos K P. GIS-based procedures in support of flash flood guidance [R]. IIHR Report No. 366, Iowa Institute of Hydraulic Research. Iowa City: The University of Iowa, 1993.

[9] FLOODsite. Realtime Guidance for Flash Flood Risk Management [R]. 2008.

[10] Georgakakos K P. Advances in forecasting flash floods [C]. // The CCNAA-AIT Joint Seminar on Prediction and Damage Mitigation of Meteorologically Induced Natural Disasters. Taiwan: National Taiwan University, 1992.

[11] Sperflage J A, Georgakakos K P, Carpenter T M, et al. Centra America Flash Flood Guidance (CAFFG) User's Guide [R]. San Diego: HRC Limited Distribution Report No. 21. Hydrologic Research Center.

[12] Sweeney T L. Modernized areal flash flood guidance [R]. NOAA Technical Report NWS HYDRO 44, Hydrology Laboratory, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD, 1992.

[13] Liu Z, Martina M, Todini E. Flood forecasting using a fullydistributed model: application to the Upper Xixian Catchment [J]. Hydrology and Earth System Sciences (HESS). 2005, 9 (4): 347.

[14] 河南省防汛抗旱指挥部办公室, 河南省水文水资源局, 中国矿业大学, 北京天智祥信息科技有限公司. 山洪灾害预报预警系统工程 [R]. 2009.

[15] 刘志雨. 基于动态临界雨量的中小河流山洪预警方法及其应用 [C]. 中国水利学会 2010 学术年会论文集 (上册). 2010.

[16] Japan National Institute for Land and Infrastructure Management. Operating methods of Critical Rainfall for Warning and Evacuation from Sediment-Related Disasters [R]. 2001.

(责任编辑: 徐丽娜)