

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190070

# 基于半分布式水文模型的小流域山洪临界雨量指标计算

孙 静<sup>1</sup>, 桑国庆<sup>2</sup>, 王维林<sup>2</sup>, 刘昌军<sup>3</sup>, 郑从奇<sup>4</sup>

(1.山东省海河淮河水清河流域水利管理服务中心, 山东 济南 250000; 2.济南大学水利与环境学院, 山东 济南 250000; 3.中国水利水电科学研究院, 北京 100000; 4.山东省水文局, 山东 济南 250000;)

**摘 要:**基于半分布式水文模型的山丘区小流域防灾对象的雨量预警指标计算方法,首先采用 NAM 建立小流域半分布式水文模型,结合场次暴雨洪水数据分别对模型进行率定;根据沿河居民户与河道的空间分布信息,建立洪水水面线-沿线居民户高程判定模型,定位防洪能力最薄弱的居民户,确定成灾水位,以水位流量反推法推算防灾对象的成灾流量;采用模型试算法计算临界雨量。以南高而、柳埠东两个小流域为应用实例计算其临界雨量,并采用 1995~2014 年的 75 场降雨为验证数据系列,将计算的雨量预警指标与实际灾情对应的雨量记录进行对比验证。结果表明:该方法计算的临界雨量准确率在 80% 以上,能较好地应用于山洪灾害预警。

**关键词:**水文模型;成灾水位;临界雨量;预警指标

**中图分类号:**TV87;X43

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2020)04-0001-06

小流域山洪灾害预警是防御山洪的关键环节和技术难点,而利用临界雨量指标进行山洪灾害预警是国内外应用最为广泛的预警方法。山洪灾害发生与防灾对象上游流域特征时段降雨和初期土壤含水量密切相关,针对山丘区河道沿岸某防灾对象,存在一系列特征时段降雨量及土壤含水量组合,当达到或超过该组合区间时防灾对象受灾,将该组合区间定义为临界雨量预警指标。在临界雨量预警指标计算方法的研究方面,国内外学者做了很多探索。临界雨量推求方法一般分为两类:基于数据驱动的方法和基于水文水力学方法<sup>[1,6,10]</sup>。刘媛媛等利用临界水位(流量)概念,通过水位/流量反推法计算临界雨量,该方法对资料的依赖性不强,为解决资料匮乏地区雨量预警指标的制定提供了一种切实可行的方法<sup>[2]</sup>;李志雨等采用分布式水文模型,考虑前期土壤含水量,提出以动态临界雨量为指标的山洪预警方法<sup>[4]</sup>;在国外,美国的预警指标 Flash Flood Guidance(FFG)考虑了土层含水量变化,基于临界流量,利用分布式水文模型计算预警指标<sup>[9]</sup>。日本则是通过建立降雨强度与有效累积雨量之间的线性关系来确定山洪灾害预警指标<sup>[7]</sup>。

综上,针对山洪灾害雨量预警指标的计算,在降雨资料和下垫面资料较丰富的地区,通常采用水文水力学方法,即采用水位或流量倒推法、基于水文模型的雨量预警指标计算等方法;而缺少下垫面资料地区,则采用暴雨临界曲线法、实测雨量统计法、比拟法<sup>[3]</sup>、灾害与降雨频率分析法等。目前临界雨量计算大多针对某预报断面,较少针对沿河村落。研究中较少利用空间关系确定整个沿河村落的成灾水位,且较少进行应用及验证。

本研究提出了一套比较完整的基于半分布式水文模型的小流域防灾对象临界雨量指标计算方法,首先建立沿河村落以上小流域水文模型,采用历史暴雨洪水资料对模型进行率定;根据沿河居民户与河道的空间分布信息,建立洪水水面线—沿线居民户高程判定模型,确定成灾水位和流量;在此基础上采用模型试算法计算临界雨量。

## 1 基于 NAM 的小流域水文模型

NAM(丹麦语“Nedbør - Afstrømnings - Model”的缩写)模型主要模拟流域范围内由降雨产生的径流过程。

收稿日期:2019-03-17

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2019BEE064);山东省省级水利科研与技术推广项目(SDSLKY201808)

作者简介:孙静(1968-),女,山东海阳人,高工,主要从事流域管理研究工作。E-mail: ppoomn@sohu.com

通讯作者:桑国庆(1981-),男,山东济宁人,副教授,博士,主要从事水文与水资源、水文模型研究。E-mail: sangguoqing@163.com

此模型由丹麦学者 Nielsen 和 Hansen 于 1973 年首次提出,后经丹麦水与环境研究所逐步完善,是利用水文循环中各种陆相特征做简单的定量数学公式表达的一个模型<sup>[9]</sup>。

本文基于南高而与柳埠东村为研究对象,分别提取两村上游的流域特征,基于 NAM 模型,建立小流域水文模型,并结合现场调查的场次洪水对两个小流域模型参数进行率定,率定后的模型参数能较好地模拟流域的产汇流过程。

(1)典型沿河村落及流域划分。选取济南市历城区南高而、柳埠东两个村为研究对象。南高而村属于孔家崖流域,河道弯曲程度较大,村内河道部分进行了整治,左岸有垂直衬砌,居民户依河而建,距河道距离较近。柳埠东村属于大会流域,河道较为顺直宽阔,村内河道左岸有垂直护砌,右岸为土坡,居民户距河道距离较小。基于 1:50000 的 DEM 数据,利用 ArcGIS 软件对南高而、柳埠东进行小流域划分,获取基本流域信息,南高而村、柳埠东流域面积分别为 12.98km<sup>2</sup>、44.94km<sup>2</sup>(见图 1~2)。

(2)数据输入。模型输入降雨、蒸发资料,根据南高而和柳埠东村的地理位置,南高而村选择南高而站作为代表站,柳埠东村选择柳埠站作为代表站。降雨、蒸发资料采用逐时段数据输入,时间步长为 1h。

(3)产汇流计算。根据南高而、柳埠东两个小流域的基本特征,产汇流计算采用 NAM 模型进行计算,通过连续计算地表储水层、土壤或植物根区储水层、地下水储水层之间含水量来模拟产汇流过程<sup>[9]</sup>。

蒸发量计算:

$$E = \begin{cases} E_p & U \geq E_p \\ U + E_a & U < E_p \end{cases} \quad (1)$$

$$E_a = (E_p - U) \frac{L}{L_{\max}} \quad (2)$$

式中: $E_p$  为潜在蒸发量(mm); $E_a$  为根区补给的实际蒸发量; $U$  为地表储水层的含水量。

坡面流 QOF:

$$QOF = \begin{cases} CQOF \frac{L/L_{\max} - TOF}{1 - TOF} P_N & L/L_{\max} > TOF \\ 0 & L/L_{\max} \leq TOF \end{cases} \quad (3)$$

式中:CQOF为坡面流系数,取值范围在 0~1 之间; $L$  为根区含水量; $L_{\max}$  为根区最大含水量(mm);TOF 为生成坡面流的根区临界值,范围在 0~1 之间; $P_N$  为净降雨(mm/day)。

壤中流 QIF:

$$QIF = \begin{cases} (CKIF)^{-1} \frac{L/L_{\max} - TIF}{1 - TIF} U & L/L_{\max} > TIF \\ 0 & L/L_{\max} \leq TIF \end{cases} \quad (4)$$

式中:CKIF 为壤中流排水常数,是一个时间常数(h);TIF 为壤中流根区阈值,范围在 0~1 之间。

(4)模型率定。由于南高而、柳埠东两个小流域出口处均没有水文站,因此无法用实测的流量资料对两个小流域进行精确参数率定,现场调查了两个防灾对象 19850729、19940807、20000809 三场历史洪水的洪痕水位,测量其控制断面,通过曼宁公式计算水位-流量关系曲线,并反推其洪峰值,基于洪峰值与流域概化过程线的峰值比值及流域概化过程线求出近似场次洪水过程线,对模型进行峰值率定。典型场次洪水过程对比见图 3~4,率定参数见表 1。

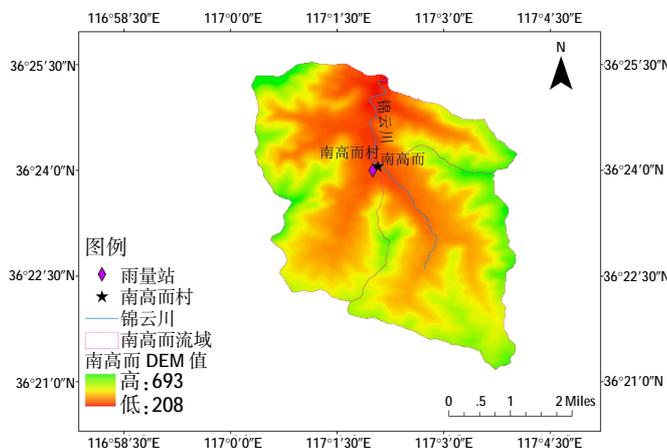


图1 南高而小流域

Fig.1 The Nangaoer small watershed

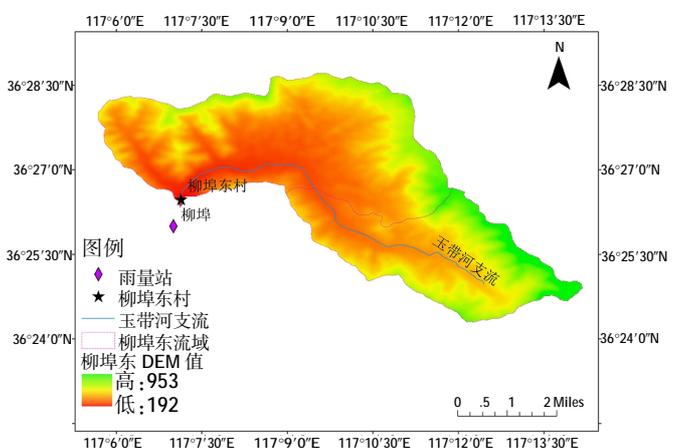


图2 柳埠东小流域

Fig.2 The Liubudong small watershed

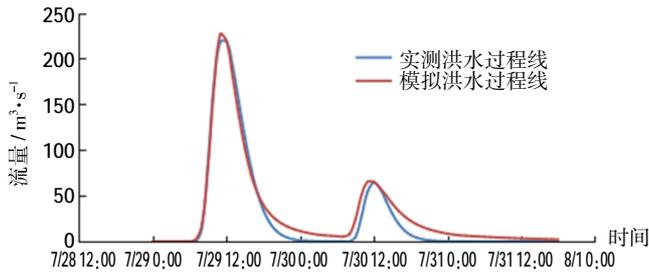


图3 1985年柳埠东 19850729 场次洪水过程对比

Fig.3 The comparison of the typical flood process in Liubudong in 1985

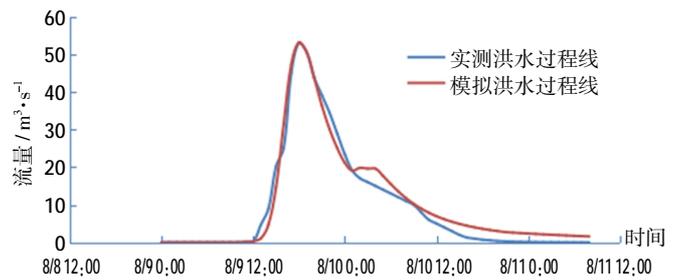


图4 2000年南高而 20000809 场次洪水过程对比

Fig.4 The comparison of the typical flood process in Nangaoer in 2000

表1 模型率定后参数

Table1 The parameters after the model calibration

参数	物理意义	南高而	柳埠东
$U_{max}$	地表蓄土层最大含水量,表示该层包含流域植被截流、洼地蓄水及上层耕作土壤蓄水等水量	10.000	10.015
$L_{max}$	浅层蓄土层最大含水量,表示提供植物蒸散发所需水分的根系层土壤所能达到的最大含水量	100.000	124.732
COOF	地表径流系数,它决定剩余雨量进入地表径流或成为下渗量的分配比例	1.000	0.966
CKIF	壤中流出流时间,决定地表蓄水量 $U$ 中壤中流数量的参数	999.472	998.744
$CK_1, CK_2$	地表径流、壤中流汇流时间常数,地表径流和壤中流汇流模型是采用同一时间常数的两个串联线性水库模型	13.941	10.000
TOF	地表径流计算阈值,仅在浅层蓄水层的相对含水量大于 TOF 时产生	0.950	0.960
TIF	壤中流计算阈值,仅在浅层蓄水层的相对含水量超过 TIF 时产生	0.977	0.634
TG	地下径流计算阈值,植物根区储水层的相对含水量超过 TG 时产生	0.979	0.985
CKBF	地下径流汇流时间,来自地下蓄水层的基流,使用时间常数为 CKBF 的线性水库模型生成	3163.039	3990.576

## 2 沿河村落成灾水位及流量计算

### 2.1 成灾水位计算

山丘区沿河村落山洪灾害成灾水位可定义为:在沿河村落河道范围内选取一控制断面,当上游流域发生洪水,该控制断面水位达到一特征水位时,村落内防洪能力最弱的居民户刚刚开始受灾,该特征水位为成灾水位。成灾水位是沿河村落防洪能力的依据,也是临界雨量指标技术基础。

对于平原区河道或者山区河道下游段,水面比降较小,可认为沿河村落范围内河道水面为水平面。因此,可简化居民户位置与沿河道分布距离两个要素,直接将高程最低的沿河居民户作为最易受灾的居民户,该居民户高程可直接作为控制断面成灾水位。对于山丘区沿河村落,河道比降较大,相应水面比降较大,沿河居民户高程分布和洪水水位都是沿河空间变化的,无法直接由一个断面的水位来判断其他断面上的居民户是否被淹。研究提出了基于水面比降的成灾水位确定方法,根据沿河居民户与河道的空间分布信息,将沿河居民户和水面线统一于同一坐标系下(起点距-高程坐标系),建立洪水水面线-沿线居民户高程判定模

型,综合确定最危险的居民户及其高程值,并将其按照洪水比降转化成控制断面高程,确定成灾水位,原理如图5所示。

(1)洪水水面线-沿线居民户高程判定模型。建立起点距-高程坐标系( $X-Z$ ),其中  $X$  轴定义为起点距离, $Z$  轴定义为高程。将沿河村落纵、横断面以及沿河居民户,不同频率洪水水面线均统一于起点距-高程坐标系( $X-Z$ )内,建立沿河居民户-洪水水面线判定公

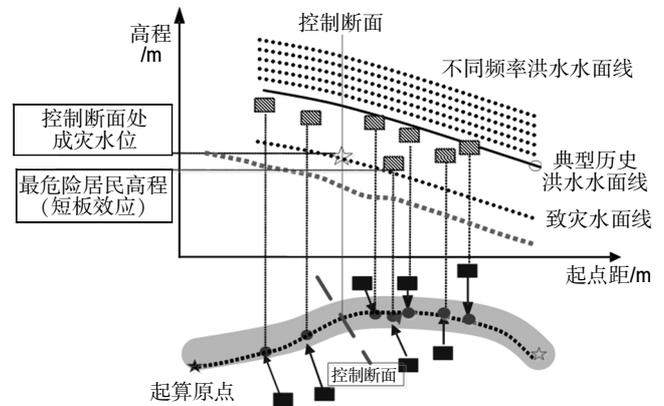


图5 洪水水面线-沿线居民户高程判定模型示意图

Fig.5 The determination model of the flood water surface line and the households elevation along the line

式,判定沿河村落居民户与不同频率洪水水面线关系,确定不同频率洪水水面线下的淹没居民。

已知控制断面的起点距为  $x_{dq}$ ,洪水水面线比降为  $k$ ,过居民户点  $(x_{jq}, Z_j)$  的水面线方程为:

$$Z - Z_j = k_j * (x - x_{jq}) \quad (5)$$

沿河村落居民户与不同频率洪水水面线关系:

$$\Delta Z = Z_j - Z_{(x=x_{dq})} = Z_j - k_j * (x_{jp} - x_{dq}) - Z_{dp} \quad (6)$$

(2)成灾水位反算。根据沿河村落居民户与不同频率洪水水面线关系,筛选出沿河路径上最容易受灾的居民户,转化为控制断面的成灾水位值。

依据洪水水面线比降,将所有居民户高程转化为控制断面处高程,获取所有沿河居民户相对于控制断面的高程,计算原理如下:

将所有居民户高程按水面比降转化为控制断面处的高程:

$$Z_{jk} = k_j * (x_{dq} - x_{jq}) + Z_j \quad (7)$$

选取所有  $Z_{jk}$  的最小值  $\min(Z_{jk})$  作为控制断面处的成灾水位,并将其作为整个村落的成灾水位,相应的居民户则为沿河村落中更容易受灾的居民。

$$Z_{cz} = \min(z_{jk}) \quad (8)$$

$Z_{cz}$  为控制断面处成灾水位,也是整个沿河村落成灾水位。

经计算:南高而成灾水位为 242.016 m,柳埠东村成灾水位为 202.208m。

## 2.2 成灾流量计算

采用曼宁公式,根据比降、糙率等参数计算水位流量关系,将成灾水位转化为成灾流量:

$$Q = A \cdot v = A \cdot \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中: $Q$  为流量 ( $m^3/s$ ); $A$  为断面过流面积 ( $m^2$ ); $v$  为过流断面平均流速 ( $m/s$ ); $n$  为糙率; $R$  为水力半径; $J$  为洪水水面线比降。

其中糙率的选取,根据沟道特征,参考《水工建筑物与堰槽测流规范》(SL537-2011)确定。根据南高而、柳埠东两个沿河村落的现场调查,南高而河槽较为顺直,泥质河槽,河岸两侧有居民户和道路,无明显边滩,主槽糙率取 0.035~0.04,两岸糙率取 0.03~0.05,边滩糙率取 0.05~0.07;柳埠东河槽较为顺直,由混凝土衬砌;河岸为柏油马路;无明显边滩,滩地有较稀杂草,主槽糙率取 0.03~0.034,两岸糙率取 0.026~0.038,边滩糙率取 0.04~0.06。通过计算得到一组水位流量关系曲线,为方便计算,本文选取水位流量关系曲线中的平均

曲线,求得南高而的成灾流量为  $10.9m^3/s$ ,柳埠东村的成灾流量为  $78.5m^3/s$ 。南高而、柳埠东两个沿河村落的控制断面图及水位流量关系见图 6~9。

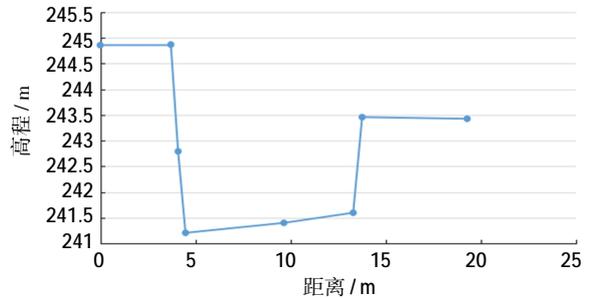


图6 南高而控制断面示意图  
Fig.6 The control section of Nangaoer

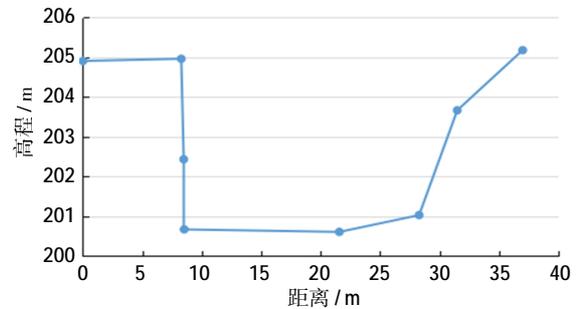


图7 柳埠东控制断面示意图  
Fig.7 The control section of Liubudong

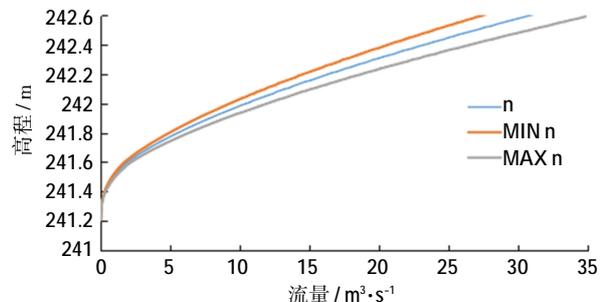


图8 南高而村控制断面水位流量关系曲线  
Fig.8 The relationship curve between the water stage and discharge at the control section of Nangaoer Village

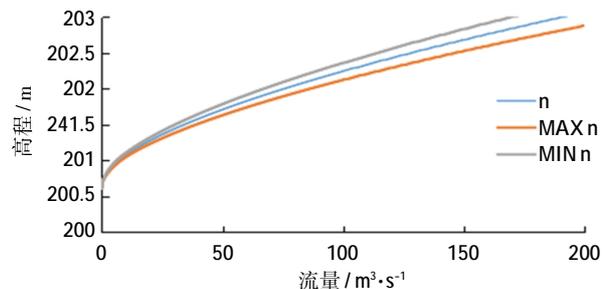


图9 柳埠东村控制断面水位流量关系曲线  
Fig.9 The relationship curve between the water stage and discharge at the control section of Liubudong Village

### 3 预警雨量推求及验证

#### 3.1 推求方法

本研究基于成灾流量,采用模型试算法,设置不同初始土壤含水量,通过不断假定降雨输入,反推达到河道断面临界流量(水位)时的临界雨量。

(1)根据防灾对象的地理位置及流域特征,以汇流时段为计算时段,选取典型降雨过程确定时程分配。(2)针对某一土壤含水量,假定不同降雨量及对应的时程分配,利用半分布式水文模型计算控制断面的洪峰流量。(3)将洪峰流量与临界流量对比,如不相等,则重新假设降雨量,最终获得该土壤含水量的临界雨量。(4)假定不同初始土壤含水量,重复以上步骤计算得不同初始土壤含水量对应的临界雨量,原理如图 10 所示。

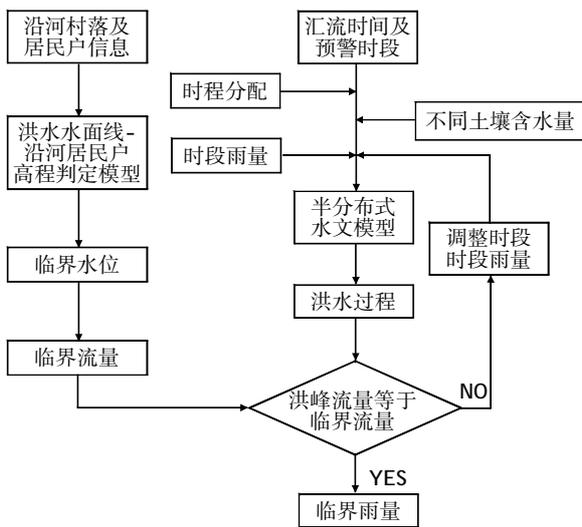


图 10 基于水文模型的临界雨量计算流程

Fig.10 The process of the critical rainfall calculation based on the hydrological model

#### 3.2 典型防灾对象雨量指标计算

分别计算南高而村、柳埠东村的临界雨量,设置初始土壤含水量分别为 20%、50%、80%,同一预警时段,将假定不同降雨量及对应的时程分配作为降雨数据输入,利用半分布式水文模型计算控制断面的洪峰流量;将洪峰流量与临界流量对比,若相等则为该土壤含水量下的临界雨量,不相等则重新假定降雨量直至相等为止,如表 2 所示。

#### 3.3 应用及验证

根据计算的临界雨量成果,采用 1995~2014 年典型雨量记录和灾情记录,每年选择 3~5 场典型暴雨,

共 75 场,对雨量预警指标进行了验证,如表 3 所示。

结果表明,75 场降雨,南高而村发生了 21 次山洪,应用计算的临界雨量指标预警次数 32 次,指标的准确率 85.3%;柳埠东发生了 24 次山洪,报警次数 33 次,指标的准确率 88%。分别存在 11 次、9 次误报情况,原因:小型水库等水利工程的建设,河道护坡衬砌等河道治理措施,流域特征发生改变,导致临界雨量成果相对偏小。综上认为该临界雨量指标精确度较高,可应用于两个村落的山洪灾害预警工作。

表2 沿河村落临界雨量指标(mm)

Table2 The critical rainfall indexes of the villages along the river

预警村	预警时段/h	20%	50%	80%
柳埠东村	1	52	44	39
	2	85	72	61
	3	104	90	75
	4	112	96	79
南高而村	1	54	43	33
	2	73	57	45
	3	87	68	53

表3 临界雨量指标验证

Table3 The verification of the critical rainfall indexes

	验证场次	灾情记录场次	指标预警场次	误报场次	准确率
南高而	75	21	32	11	85.3%
柳埠东	75	24	33	9	88%

### 4 结论

(1)研究提出了一套基于半分布式水文模型的山丘区小流域防灾对象的雨量预警指标计算方法。针对南高而、柳埠东两个防灾对象,建立半分布式水文模型,结合场次暴雨洪对模型进行率定;利用洪水水面线-沿线居民户高程判定模型确定其成灾水位,利用曼宁公式确定成灾流量。基于流域汇流时间确定预警时段,假定不同土壤含水量,通过模型试算法反推临界雨量,并采用 1964~2014 年的 75 场降雨的雨量记录和灾情记录对临界雨量进行了验证。

(2)根据现场调查的历史洪水洪痕数据,利用水位流量关系计算洪峰流量,基于洪峰值与流域概化过程新的峰值比值及流域概化过程线求出近似场次洪水过程线,据此对水文模型参数进行了率定。由于未获得具体的洪水过程资料,对模型参数精度和临界雨量计算可能产生一定影响。

(3)研究中认为汇流时间内降雨是导致山洪灾害发生的重要因素,因此以汇流时间为基础制定了3个预警时段。但实际中各场次降雨强度不同,汇流时间也是不同的。因此,有必要根据历史山洪灾害资料及时段降雨资料,分析与山洪灾害发生密切相关的降雨时段,作为预警时段。

#### 参考文献:

- [1] 原文林,宋汉振,刘美琪. 基于随机雨型的山洪灾害预警模式[J/OL]. 水科学进展, 2019,(4):1-13. (YUAN Wenlin, SONG Hanzhen, LIU Meiqi. An early warning model for flash floods based on random rainfall patterns [J/OL]. Advances in Water Science, 2019,(4):1-13. (in Chinese))
- [2] 刘媛媛,胡昌伟,张红萍,等. 资料匮乏地区山洪灾害临界雨量确定方法分析[J]. 水利水电技术, 2014,45(8):15-17. (LIU Yuanyuan, HU Changwei, ZHANG Hongping, et al. Hazard risk zoning of mountain flood for data deficient hilly region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014,45(8):15-17. (in Chinese))
- [3] 王江婷,杨同春,李伟,等. 基于降雨洪峰关系曲线的沿河村落预警指标确定[J]. 水文, 2017,37(2):36-41. (WANG Jiangting, YANG Tongchun, LI Wei, et al. How to determine early-warning index along river based on rainfall flood peak curve [J]. Journal of China Hydrology, 2017,37(2):36-41. (in Chinese))
- [4] 路阳. 基于临界雨量指标的小流域山洪灾害预警研究 [D]. 兰州大学, 2016. (LU Yang. A Flash Flood Disaster Warning in Small Watershed Based on the Critical Rainfall [D]. Lanzhou University, 2016. (in Chinese))
- [5] 王云,张鑫,王文亚,等. 基于临界雨量的陕南地区无资料小流域山洪灾害预警研究[J]. 中国农村水利水电, 2017,(8):92-95+102. (WANG Yun, ZHANG Xin, WANG Wenya, et al. Research on flood warning based on critical rainfall in small watershed of ungauged basins in the south of Shaanxi [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017,(8):92-95+102. (in Chinese))
- [6] 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 Weishuai. A review of rainfall thresholds for triggering flash floods [J]. Advances in Water Science, 2013,24(6):901-908. (in Chinese))
- [7] 徐少军,江炎生,毛北平,等. 基于降雨径流关系曲线插值法的山洪临界雨量计算[J]. 中国防汛抗旱, 2015,25(6):30-35. (XU Shaojun, JIANG Yansheng, MAO Beiping, et al. Method of flash flood rainfall indicator determination based on rainfall-runoff charts [J]. China Flood & Drought Management, 2015,25(6):30-35. (in Chinese))
- [8] 余有贵. NAM模型在珠江流域初步应用实践 [J]. 人民珠江, 2005, (3):34-37. (SHE Yougui. Preliminary application practice of NAM model in the Pearl River basin [J]. Pearl River, 2005,(3):34-37. (in Chinese))
- [9] 陈智洋,白炳锋,朱永泉,等. NAM模型在鳌江流域洪水预报中的应用[J]. 浙江水利科技, 2015,43(1):87-89. (CHEN Zhiyang, BAI Bingfeng, ZHU Yongquan, et al. Application of NAM model in flood forecasting of Minjiang River basin [J]. Zhejiang Hydropower, 2015,43(1):87-89. (in Chinese))
- [10] 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 Jijian, YANG Weichao, XU Kui, et al. Advances and prospect of flash flood forecasting [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018,37(11):1-14. (in Chinese))

## Calculation on the Critical Rainfall Indexes of the Small Watershed Based on Semi-Distributed Hydrological Model

SUN Jing<sup>1</sup>, SANG Guoqing<sup>2</sup>, WANG Weilin<sup>2</sup>, LIU Changjun<sup>3</sup>, ZHENG Congqi<sup>4</sup>

(1. Haihe River, Huaihe River and Xiaoqinghe River Basin Water Conservancy Management and Service Center of Shandong Province, Jinan 250000, China; 2. Water Resources and Environment, University of Jinan, Jinan 250000, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100000, China; 4. Shandong Hydrology Bureau, Jinan 250000, China)

**Abstract:** This study proposed a rainfall early warning indexes calculation method on the disaster prevention objects in the small watersheds of the hilly area based on the semi-distributed hydrological model. Firstly, NAM was used to establish a semi-distributed hydrological model of small watersheds, and the model was calibrated by combining the storm flood data. Besides, it established the model of the flood water surface line-the households elevation along the line based on the spatial distribution of the rivers and the households along it. The weakest flood control capacity of the households was located to determine the water stage, and the reverse calculation method of water stage and discharge was used to calculate the disaster prevention objects, and the model test algorithm method was used to calculate critical rainfall. Taking Nangaoer and Liubudong small watersheds as the cases to calculate its critical rainfall, and the calculated rainfall early warning indexes were compared with the observed rainfall based on the verified data series of 75 rainfalls during 1995-2014. The results show that the accuracy of the critical rainfall is above 80% that can be applied to the early warning of the flash disasters.

**Key words:** distributed hydrological model; disaster-prone water stage; critical rainfall; early warning indexes