

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.03.006

# 基于 SCS 模型和新安江模型的雨量预警 指标综合动态阈值对比

俞彦<sup>1</sup>, 张行南<sup>1,2,3</sup>, 张鹏<sup>4</sup>, 彭海波<sup>4</sup>, 方园皓<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098;  
3. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098; 4. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610)

**摘要:**为了解决下垫面条件复杂性和前期影响雨量不确定性给小流域山洪预警带来的难题,选取广东省罗定市太平镇太北村和罗镜镇大平岗村两个小流域作为研究对象,通过水位流量关系和致灾水位插值得到致灾流量,由致灾流量通过三角汇流曲线反推得到临界产流量,考虑前期影响雨量的因素,分别通过 SCS 模型和新安江模型反推得到动态临界雨量,并与广东省用国家新技术方法算出的临界雨量进行对比。结果显示,两种模型在临界雨量的计算上均满足预警要求,但基于新安江模型计算得出的结果偏安全,在山洪预警中更加可靠。

**关键词:**山洪预警;降雨预警;降雨阈值;三角汇流曲线;SCS 模型;新安江模型

**中图分类号:**P338+.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)03-0028-06

**Comparison of comprehensive dynamic threshold of rainfall warning indicators based on SCS model and Xin'anjiang model** // YU Yan<sup>1</sup>, ZHANG Xingnan<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Peng<sup>4</sup>, PENG Haiibo<sup>4</sup>, FANG Yuanhao<sup>1</sup> (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro-Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China; 4. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** In order to solve the problems caused by the complexity of underlying surface conditions and the uncertainty of antecedent precipitation in mountainous small watershed, two small watersheds, Taibei village in Taiping Town and Dapinggang village in Luojing town of Luoding City, were selected as the research objects. The disaster-causing flow, which is interpolated by the stage-flow relation and the disaster-causing water level, can be used to calculate the critical runoff with the method of triangle confluence curve. With the consideration of the antecedent precipitation, SCS model and Xin'anjiang model are applied to calculate the dynamic rainfall threshold reversely, and the dynamic rainfall threshold will be compared with the critical rainfall calculated by the national new technology method used in Guangdong Province. The results show that both models meet the requirements in the calculation of rainfall threshold. Relatively speaking, the results based on the Xin'anjiang model are safer and more reliable in the flash flood warning.

**Key words:** flash flood warning; precipitation warning; rainfall threshold; triangle confluence curve; SCS model; Xin'anjiang model

山洪灾害突发性强,分布广,局地性强,动量大,破坏性强,对社会经济的负面影响越来越显著。据世界气象组织统计,全世界受山洪灾害影响的国家超过 100 个。我国山地丘陵区占比较大,夏季短历时强降雨频繁,山洪灾害问题也较为严重,2017 年

山洪灾害经济损失达 2 100 亿元,洪灾死亡人数大约占灾害死亡人数 64%,构成重大挑战<sup>[1]</sup>。

国内外针对降雨阈值的研究方法各有不同。美国构建的 Flash Flood Guidance 系统<sup>[2-3]</sup>被广泛应用于英美等西方国家,该模型充分考虑山洪的致灾因

基金项目:国家自然科学基金(51420105014)

作者简介:俞彦(1995—),男,硕士研究生,研究方向为水文物理规律模拟。E-mail: 18351936833@163.com

通信作者:张行南,教授。E-mail: zxn@hhu.edu.cn

素,因此对资料的完整性要求较高。日本因为自然环境条件单一,更加关注雨强大小和历时长短,提出了汇流时间降雨强度方法和实效雨量法等<sup>[4]</sup>。澳大利亚在各国山洪灾害研究成果的基础上建立了自己的山洪预警平台,采用不同颜色表示山洪灾害的危险性<sup>[5]</sup>。我国的山洪灾害降雨阈值研究起步较晚,方法由早期的统计学方法向水文模型方法过渡。陈桂亚等<sup>[6]</sup>基于降雨灾害同频率法计算了降雨阈值;陈瑜彬等<sup>[7]</sup>通过最小二乘法拟合实测降水量与临界雨量的函数关系,建立临界雨量函数;毛北平<sup>[8]</sup>运用垂向混合模型计算得到无资料地区降雨阈值;樊静等<sup>[9]</sup>运用 HBV 模型计算得到开都河致灾洪水临界雨量;卢燕宇等<sup>[10]</sup>将 TOPMODEL 模型与统计方法相结合应用于山洪灾害预警。

目前针对雨量预警指标的确定仍以静态的单一阈值为主,考虑水文过程及山洪灾害的特点,但雨量预警指标应考虑下垫面地形、植被等综合因素以及土壤含水量的动态变化过程。降雨强度并非是诱发山洪的唯一因素<sup>[11]</sup>,地形、土地利用以及土壤含水量等均对山洪的诱发产生影响。其中地形、土地利用类型等下垫面条件一定程度上决定了流域产汇流机制;而前期土壤含水量的动态变化直接影响降雨入渗、包气带蒸散发以及产流等过程,在其他条件相同的前提下,饱和的土壤更易诱发山洪,故在确定流域雨量预警指标时,需考虑地形、土地利用等综合要素以及土壤含水量动态变化的影响,构建综合动态阈值。而构建综合动态阈值的关键在于如何反映下垫面条件及土壤含水量动态变化对山洪诱发产生的影响。广东省地处热带和亚热带气候过渡区,台风和局地强对流天气常常引发局地强暴雨,且山区面积大,境内严重的山洪灾害时有发生,是我国山洪灾害影响显著的省份之一,故本文以广东省具有代表性的典型小流域为研究对象,探求适用于山区小流域降雨预警的方法。

## 1 流域概况

选取广东省罗定市具有代表性的典型小流域太平镇太北村和罗镜镇大平岗村作为研究对象,流域水系和高程概况如图 1 所示。

罗定市地处广东省西部,位于两广交界处,天气炎热且终年雨水丰富,多年平均降水量约为 1 400 mm,雨季为每年的 4—10 月,夏季暴雨频繁且降水量大,远大于蒸发能力。太平镇太北村和罗镜镇大平岗村小流域地处罗定市南部边陲,两小流域相邻,干流均汇入罗定河。其中,太平镇太北村小流域东西跨度为 25.8 km,南北跨度为 35 km,面积为

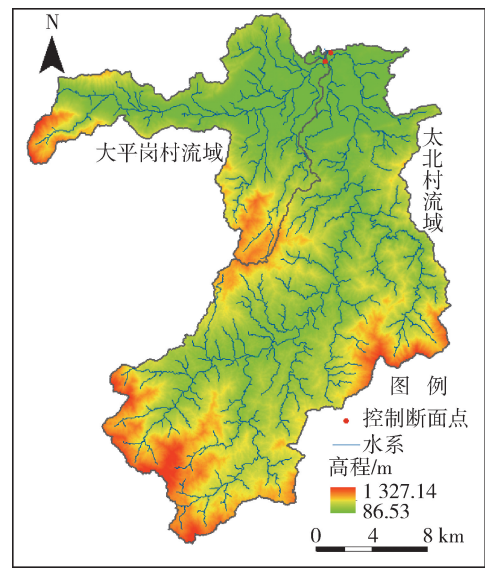


图 1 太北村和大平岗村流域图

Fig. 1 Watershed map of Taibei village and Dapinggang village

383.03 km<sup>2</sup>,最大高程差为 1 196 m,干流比降为 13.20‰;大平岗村小流域东西跨度为 21.38 km,南北跨度为 17.89 km,面积为 138.26 km<sup>2</sup>,最大高程差为 1 239.6 m,干流比降为 22.18‰。两者均属于典型的山地小流域。通过查询各小流域控制断面水文流量关系曲线得知,太北村小流域致灾水位为 89.95 m,临界流量为 1 547.4 m<sup>3</sup>/s;大平岗村小流域致灾水位为 89.54 m,临界流量为 607.1 m<sup>3</sup>/s。

## 2 研究方法

### 2.1 临界产流量推求

临界产流量是指诱发山地小流域山洪灾害对应的产流量。由于山地小流域的坡度较大,山洪多为高含沙水流,加上山地小流域资料不全,目前对山地小流域汇流的研究仍不成熟,对山地小流域的汇流模拟计算仍以汇流曲线为主。采用汇流曲线进行汇流模拟,临界产流量可通过临界流量除以汇流曲线的峰值得到:

$$R_t = Q_s / Q_p \quad (1)$$

式中: $R_t$  为临界产流量; $Q_s$  为临界流量; $Q_p$  为汇流曲线的峰值。

式(1)中,临界流量  $Q_s$  一般可根据地区的设计洪水以及河道的行洪标准确定,或根据已发山洪的调查评价资料分析获得。本文根据当地的致灾水位结合断面水位-流量关系曲线确定临界流量  $Q_s$  的取值。

缺资料的山地小流域汇流曲线包括时段单位线、三角汇流曲线等。考虑到山地小流域汇流过程的复杂性,从山洪灾害预警的实际出发,选择三角汇

流曲线来模拟山地小流域的汇流过程。三角汇流曲线可灵活反映不同计算步长条件下的汇流过程,在欧美国家应用广泛。

三角汇流曲线如图 2 所示,其主要特征值包括涨水段时间  $T_p$ 、退水段时间  $T_r$  以及汇流曲线峰值  $Q_p$  等。三角汇流曲线包围的面积为小流域单位净雨(即 1 mm)所产生的径流量  $V$ ,即,

$$V = 0.5\lambda(T_p + T_r)Q_p \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为单位转换系数。

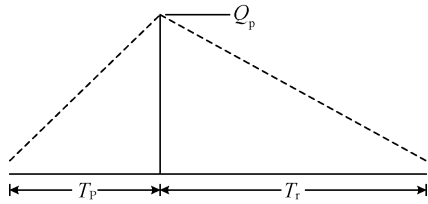


图 2 三角形汇流曲线示意图

Fig. 2 Triangular confluence diagram

为了得到三角形汇流曲线更加合理的特征值,本文结合广东省综合单位线来进行推导。

广东省综合单位线是通过研究纳希瞬时单位线方法,并汲取国内外经验,提出的一套具有广东特色的综合单位线<sup>[12]</sup>。《广东省暴雨径流查算图表使用手册》将整个广东省划分为五大区域,每个区域给出了典型的无因次单位线以及该无因次单位线对应的最大纵坐标值  $u_m$  以及一阶原点矩  $K$  的值。经查,罗定市属于综合单位线中的大陆低区,并且采用 III 号无因次单位线,可得到无因次单位线  $K$  值:

$$K = v_{ul}/T_p \quad (3)$$

其中  $v_{ul} = m_1 + \frac{1}{2}\Delta t$

式中: $\Delta t$  为单位线计算时段, h;  $m_1$  为单位线滞时,与流域的坡度及汇流路径等因素有关, h。

《广东省暴雨径流查算图表使用手册》建立了单位线滞时  $m_1$  与集水区域特征参数  $\theta$  的相关关系,参数  $\theta$  计算公式为

$$\theta = L/J^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中: $J$  为干流平均坡降,‰;  $L$  为汇流路径长度, m。

综合以上公式,可以推导出三角汇流曲线峰值  $Q_p$  的数学表达式:

$$Q_p = 0.09AK\left(m_1 + \frac{\Delta t}{2}\right)^{-1} \quad (5)$$

式中: $A$  为流域面积, km<sup>2</sup>; 系数 0.09 是通过量纲分析推导出的。

由式(5)可以看出,三角汇流曲线虽然方法较为简单,但该方法考虑了坡度、汇流路径以及流域面积等对汇流过程的影响,能反映不同流域下垫面条

件对汇流过程的影响,具有可操作性。通过该方法可方便地得到流域的临界产流量,为综合动态临界雨量的推求分析提供基础。

## 2.2 雨量综合动态临界阈值推求

SCS 模型和新安江模型是两种雨量阈值推求方法。基于 SCS 模型的推求方法需要考虑的下垫面条件可以综合反应在同一个参数上,该方法较为简单,对于山区小流域较合适。基于新安江模型的推求方法主要用到了该模型的蒸散发和产流模块,其利用蓄水容量分配曲线考虑到了土壤含水量不均匀问题。本文对比两种模型在临界雨量计算上的差异,以确定更适合山区小流域雨量阈值计算的方法。

### 2.2.1 基于 SCS 模型的推求方法

SCS 模型是美国农业部水土保持局于 1954 年开发的 SCS 模型,是目前应用最为广泛的流域水文模型之一<sup>[13]</sup>。其显著特点是模型结构简单、所需输入参数少,拥有集总式水文模型的优点<sup>[14]</sup>,是一种较好的小型集水区径流计算方法,基于 SCS 模型可以获得临界雨量的解析解。

SCS 模型基本产流方程为

$$R = \begin{cases} \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a} & P \geq I_a \\ 0 & P < I_a \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P$  为降水总量, mm;  $R$  为产流量, mm;  $I_a$  为初损水量, mm;  $S$  为流域土壤最大蓄水能力, mm。

结合广东省罗定市当地实际情况,令  $I_a = 0.2S$ , 则产流方程为

$$R = \begin{cases} \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & P \geq I_a \\ 0 & P < I_a \end{cases} \quad (7)$$

式中  $S$  为与流域前期湿润状况、坡度、植被、土壤类型和土地利用现状等有关的参数,可以通过 CN 值推求:

$$S = \frac{25400}{V_{CN}} - 254 \quad (8)$$

式中  $V_{CN}$  为 CN 值,是 SCS 模型中的重要参数,它反映下垫面的产流能力<sup>[15]</sup>,属于无量纲参数,理论取值范围是 0 ~ 100,实际应用中取值范围是 40 ~ 98。

本文根据土地利用类型、土壤类型等进行 CN 值查算。根据质地不同将土壤分为 4 类<sup>[16]</sup>,从 A 类到 D 类的不同类别的土壤具有如下演变规律:砂土含量逐渐降低,黏土含量逐渐增高,壤土含量在 B 类和 C 类中较高;渗透速率和导水速率逐渐降低,土壤的最大蓄水能力也逐渐降低。

式(7)和(8)表明,流域产流量与降水量和土壤最大蓄水能力有关,降水量增大或土壤蓄水能力的

减小均使产流量增大;而土壤质地、植被覆盖、土地利用方式和前期土壤含水量会综合影响土壤蓄水能力。同时,为了反应前期土壤含水量对 CN 值的影响,采用以下经验公式对 CN 值进行修正:

$$V_{CN,dry} = 4.2V_{CN}/(10 - 0.058V_{CN}) \quad (9)$$

$$V_{CN,wet} = 23V_{CN}/(10 + 0.13V_{CN}) \quad (10)$$

式中: $V_{CN,dry}$  为土壤较干燥情况下的 CN 值; $V_{CN,wet}$  为土壤较湿润情况下的 CN 值。

基于以上两式可以得到不同土壤含水量条件下的 CN 值,如图 3 所示( $V_{CN,normal}$  为正常土壤含水量情况下的 CN 值)。

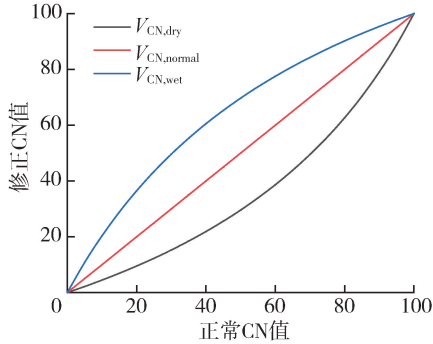


图3 不同土壤含水量条件下 CN 值示意图

Fig. 3 Schematic diagram of CN value under different soil moisture conditions

通过查询当地土地利用类型分布图和土壤质地分布图,利用加权平均算法,得到两个研究对象的正常 CN 值均为 86。

在确定不同时段临界产流量  $R_t$  的基础上,考虑不同前期土壤含水量条件下的流域土壤最大蓄水能力,由式(7)反推可以得到一系列反应流域综合动态的雨量预警阈值  $P'$  的解析解:

$$P' = \frac{1}{2}(0.4S + R_t + \sqrt{4R_tS + R_t^2}) \quad (11)$$

## 2.2.2 基于新安江模型的推求方法

新安江模型是由河海大学赵人俊教授领导的科研团队提出的模型,因其科学合理的概化、严密的模型结构等优势,能准确地模拟湿润及半湿润地区降雨条件下的蓄满产流及汇流过程,在我国广大湿润与半湿润地区的防洪减灾和水资源高效利用方面发挥了重要作用<sup>[17-19]</sup>。此外,新安江模型在广东省洪水预报以及防洪调度方面有较好的运用<sup>[20]</sup>。

考虑到降水和流域下垫面<sup>[21]</sup>分布不均匀的影响,新安江模型的结构设计为分布式,分为蒸散发计算、产流计算、分水源计算和汇流计算 4 个层次结构<sup>[20]</sup>。本文主要采用新安江模型的蒸散发及产流计算部分进行综合动态临界雨量的推求。

a. 蒸散发计算。流域蒸散发的计算没有考虑

流域内土壤含水量在面上分布的不均匀性,而是按土壤垂向分布的不均匀性将土层分为 3 层,用 3 层蒸散发模型计算蒸散发量。计算公式为

$$M_W = M_U + M_L + M_D \quad (12)$$

$$W = W_U + W_L + W_D \quad (13)$$

$$E = E_U + E_L + E_D \quad (14)$$

$$E_P = C_K E_M \quad (15)$$

式中: $M_W$  为流域平均张力水容量,mm; $M_U$  为流域上层张力水容量,mm; $M_L$  为流域下层张力水容量,mm; $M_D$  为流域深层张力水容量,mm; $W$  为总的张力水蓄量,mm; $W_U$  为上层张力水蓄量,mm; $W_L$  为下层张力水蓄量,mm; $W_D$  为深层张力水蓄量,mm; $E$  为总的蒸散发量,mm; $E_U$  为上层蒸散发量,mm; $E_L$  为下层蒸散发量,mm; $E_D$  为深层蒸散发量,mm; $E_P$  为流域蒸散发能力,mm; $C_K$  为流域蒸散发折算系数; $E_M$  为蒸发皿测得的蒸散发能力,mm。

b. 产流计算。新安江模型是先计算总径流量再进行水源划分,产流计算中采用蓄满产流。按照蓄满产流的概念,采用蓄水容量面积分配曲线来考虑土壤缺水分布不均匀的问题。所谓蓄水容量面积分配曲线是部分产流面积随蓄水容量而变化的累计频率曲线。应用蓄水容量面积分配曲线可以确定降雨空间分布均匀情况下蓄满产流的总径流量。为计算简便,假定不透水面积  $M_1 = 0$ ,其线型为

$$\frac{f}{F} = 1 - \left(1 - \frac{W'}{W_{max}}\right)^B \quad (16)$$

式中: $f$  为产流面积,km<sup>2</sup>; $F$  为全流域面积,km<sup>2</sup>; $W'$  为流域单点的蓄水量,mm; $W_{max}$  为流域单点最大蓄水量,mm; $B$  为蓄水容量面积曲线的指数。

c. 临界雨量推求。基于新安江模型的临界雨量推求采用穷举试错法进行。以土壤含水量的最大值设置不同的初始土壤含水量条件,针对不同的土壤含水量初始条件,以基于 SCS 模型推求的临界值作为初值,以 0.1 mm 为步长,生成一系列的临界雨量输入新安江模型计算,比较新安江模型计算的直接径流产流量以及临界产流量,当两者的差值小于 1 mm 时,认为对应的雨量为临界雨量。对所有土壤含水量初始条件重复以上过程,可以得到一系列反应流域综合动态的雨量预警阈值  $P$ 。

## 2.2.3 前期土壤含水量推求

上文中构建的综合动态阈值为不同土壤含水量条件下的阈值,在实际应用中流域尺度上的土壤含水量难以通过观测直接得到,故本文参考水文预报中的前期影响雨量概念,基于山洪灾害预警时段前期的降雨确定土壤含水量的状态。

前期影响雨量  $P_a$  的计算式为

$$P_{a,t+1} = K_a(P_{a,t} + P_t) \quad (17)$$

式中:  $P_{a,t}$ ,  $P_{a,t+1}$  分别为第  $t$  天和第  $t+1$  天开始时刻的前期影响雨量, mm;  $P_t$  为第  $t$  天的流域降水量, mm;  $K_a$  为流域蓄水的日消退系数, 每个月可近似取一个平均值, 等于  $(1 - E_m/W_m)$ , 其中  $E_m$  为流域月平均日蒸散发能力;  $W_m$  为流域最大蓄水量, 是反映该流域蓄水能力的基本特征。

### 3 结果与分析

图 4(a) (b) 分别为罗定市太平镇太北村和大平岗村基于 SCS 模型以及新安江模型分析得到的 1 h、3 h 和 6 h 的综合动态临界雨量值。

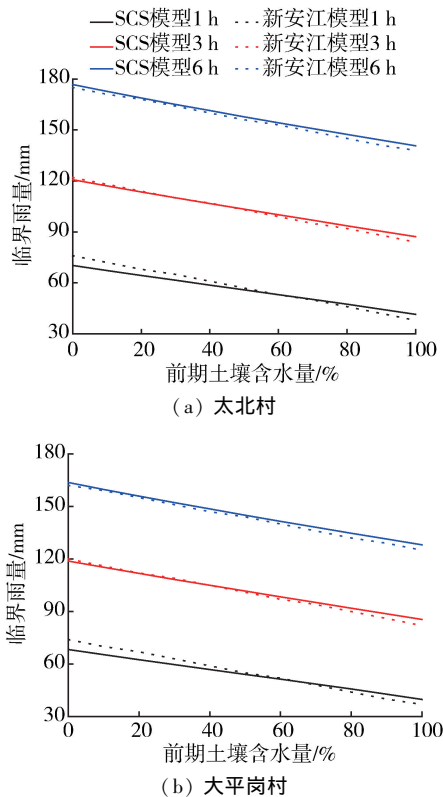


图 4 综合动态临界雨量值

Fig. 4 Comprehensive dynamic critical rainfall values

由图 4 可以看出, 不论针对哪个研究对象, 两个模型的计算结果均随前期土壤含水量的增大而减小, 表明模型计算符合降雨径流模拟物理规律。此外, 随着土壤含水量从 0% 到 100% 变化, 模型计算得出的临界雨量变化幅度最大为 36 cm, 这表明前期土壤含水量在小流域山洪预警中起到至关重要的作用, 若降雨前土壤较干燥, 含水量较小, 那么即使是很大的一场降雨, 其产流量也会很小; 若是降雨前土壤含水量就已经达到饱和状态, 那么即使是很小的一场降雨, 也可能造成山洪灾害。

图 5 是基于两个模型推求的太北村和大平岗村相同时段综合动态临界雨量值的对比。

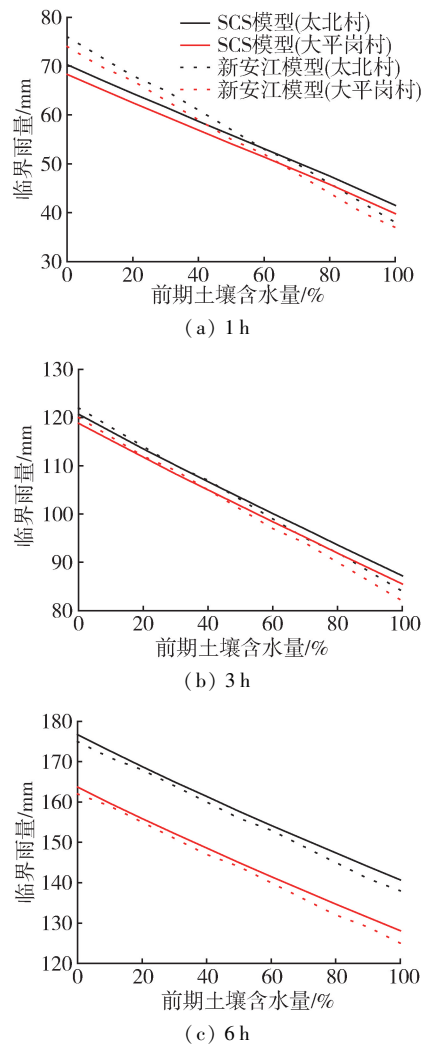


图 5 基于 SCS 模型和新安江模型推求的  
同时段临界雨量对比

Fig. 5 Comparison of critical rainfall at the same time based on SCS model and Xin'anjiang model

由图 5 可以看出, 两个模型计算出的综合动态临界雨量值存在一定的差异, 最大偏差为 5.7 mm。对于 1 h 和 3 h 的临界雨量而言, 存在某一土壤含水量的临界值, 当土壤含水量高于该临界值时, 基于新安江模型的临界雨量小于基于 SCS 模型的临界雨量; 而当土壤含水量低于该临界值时, 基于新安江模型的临界雨量大于基于 SCS 模型的临界雨量。对于 6 h 临界雨量而言, 虽然由 SCS 模型推求的临界雨量大于新安江模型, 但是随着土壤含水量的上升, 两者模拟的结果相差也越来越大。因此总的来说, 小流域一场暴雨发生后的较短时期内, 若土壤含水量偏干旱, 由 SCS 模型推导得出的临界雨量较为安全; 相反, 若土壤含水量偏湿润, 由新安江模型推求的临界雨量较为安全。这个差异是由 SCS 模型的基本假定导致的, 由于 SCS 模型认为产流过程中的初损值为定值, 并通过流域可能最大滞留量关系导出, 而考虑到产流过程的非线性特征, 在不同土壤含

水量条件下产流的初损值会有差异;另一方面新安江模型则通过指数型的张力水蓄水容量曲线来模拟产流过程,故从物理意义上来讲新安江模型更加可靠。

表 1 为太北村和大平岗村典型小流域的基于 SCS 模型和新安江模型的雨量预警指标综合动态阈值与国家标准复核预警指标的对比结果。国家标准复核预警指标是广东省水利水电科学研究院《广东省山洪灾害调查评价成果复核检验》项目中根据国家山洪灾害防治组《山洪灾害预警指标检验复核技术要求》计算的,该预警指标是前期土壤达到饱和状态时得出的,故采用土壤含水量 100% 时模型计算的临界雨量作为对比。

表 1 综合动态阈值成果对比

Table 1 Comparison of comprehensive dynamic threshold results

小流域	阈值 历时/h	国家标准方法 预警指标值	综合动态阈值	
			SCS 模型	新安江模型
太北村	1	40	41.5	38.0
	3	87	87.2	84.0
	6	141	140.7	138.0
大平岗村	1	40	39.8	37.0
	3	87	85.5	82.0
	6	128	128.1	125.0

从对比结果来看,雨量预警指标综合动态阈值与经国家标准复核后预警指标总体较为接近。基于 SCS 模型的临界雨量以及基于新安江模型的临界雨量均能对山洪过程进行合理预警,其中新安江模型在 1 h 降雨发生后即可预警,而 SCS 模型至少在 3 h 降雨后才达到预警条件。

基于 SCS 模型推求的降雨阈值比基于新安江模型推求的大。造成该现象的原因是 SCS 模型的基本假定和两个模型的原理不同。此外,从山洪灾害预警角度来看,基于新安江模型的降雨阈值偏安全,对受灾地区的人员、物资转移更具意义。

#### 4 结 语

SCS 模型和新安江模型在临界雨量的计算上均能满足预警要求,但新安江模型计算结果在山洪预警中更加可靠。

#### 参考文献:

[ 1 ] 王东升,袁树堂,杨祺.金沙江流域云南片水文极小值演变及生态基流保障分析[J].水资源保护,2019,35(4):35-41. (WANG Dongsheng, YUAN Shutang, YANG Qi. Analysis of hydrological minimum evolution and ecological base flow guarantee in Yunnan area of Jinshajiang River Basin, China [ J ]. Water Resources Protection, 2019, 35(4):35-41. (in Chinese))

[ 2 ] 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):21-24.

[ 3 ] 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.

[ 4 ] LOOPER J P, VIEUX B E. An assessment of distributed flash flood forecasting accuracy using radar and rain gauge input for a physics-based distributed hydrologic model [ J ]. Journal of Hydrology, 2011, 412/413:114-132.

[ 5 ] 任春风.山东省小流域山洪灾害预警指标分析研究与应用[D].济南:山东大学,2015.

[ 6 ] 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(12):40-43,54. (CHEN Guiya, YUAN Yaming. Research on analysis and computation method of critical precipitation amount of torrential flood [ J ]. Yangtze River, 2005(12):40-43,54. (in Chinese))

[ 7 ] 陈瑜彬,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 Yubin, YANG Wenfa, XU Yinshan. Study of dynamic critical precipitation drafted method under different soil moisture content level [ J ]. Yangtze River, 2015, 46(12):21-26. (in Chinese))

[ 8 ] 毛北平.垂向混合产流模型在无资料地区山洪灾害临界雨量计算中的应用[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(4):720-730. (MAO Beiping. Application of the vertically-mixed runoff model to the calculation of the rainfall threshold of flash floods in ungauged basins [ J ]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(4):720-730. (in Chinese))

[ 9 ] 樊静,江远安,陈颖,等.基于 HBV 模型的开都河致灾洪水临界雨量分析[J].沙漠与绿洲气象,2014,8(6):31-35. (FAN Jing, JIANG Yuanan, CHEN Ying, et al. The critical rainfall calculation in kaidu river based on hbv hydrological model [ J ]. Desert and Oasis Meteorology, 2014, 8(6):31-35. (in Chinese))

[ 10 ] 卢燕宇,谢五三,田红.基于水文模型与统计方法中小河流致洪临界雨量分析[J].自然灾害学报,2016,25(3):38-47. (LU Yanyu, XIE Wusan, TIAN Hong. Analysis of critical flood causing rainfalls in medium and small rivers based on hydrological model and statistical method [ J ]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(3):38-47. (in Chinese))

[ 11 ] 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))

- Chinese))
- [19] 李勇,蒋婷婷,景龙飞,等. 舟山岛水库有机农药和抗生素残留特征及潜在风险评估[J]. 水资源保护,2014,30(3):31-37. (LI Yong,JIANG Tingting,JING Longfei,et al. Characteristics of residual organic pesticides and antibiotics in reservoirs of Zhoushan Islands and potential risk evaluation [J]. Water Resources Protection,2014,30(3):31-37. (in Chinese))
- [20] MARSIK P, REZEK J, ŽIDKOVÁ M, et al. Non-steroidal anti-inflammatory drugs in the watercourses of Elbe basin in Czech Republic[J]. Chemosphere,2017,171:97-105.
- [21] SVIHLIKOVA V, LANKOWA D, PLOUTKA J, et al. Perfluoroalkyl substances (PFASs) and other halogenated compounds in fish from the upper Labe River basin[J]. Chemosphere,2015,129:170-178.
- [22] VYSTAVNA Y, HEJZLAR J, KOPÁČEK J. Long-term trends of phosphorus concentrations in an artificial lake; Socio-economic and climate drivers[J]. PloS One,2017,12(10):e0186917.
- [23] NAGYA, SIMON G, VASS I. Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface water of the Hungarian upper section of the Danube River [J]. Nova Biotechnologica et Chimica,2012,11(1):27-36.
- [24] KIRSCHNER A K T,REISCHER G H,JAKWERTH S,et al. Multiparametric monitoring of microbial faecal pollution reveals the dominance of human contamination along the whole Danube River[J]. Water Research,2017,124:543-555.
- [25] NAGY-KOVÁCS Z, LÁSZLÓ B, FLEIT E, et al. Behavior of organic micropollutants during river bank filtration in Budapest, Hungary[J]. Water,2018,10(12):1861.
- [26] MALOSCHIK E, ERNST A, HEGEDŰS G, et al. Monitoring water-polluting pesticides in Hungary [J]. Microchemical Journal,2007,85(1):88-97.
- [27] 姚晶晶,吴东海,陆光华,等. 水环境中PPCPs检测技术及风险评估研究进展[J]. 水资源保护,2018,34(1):76-82. (YAO Jingjing,WU Donghai,LU Guanghua,et al. Research progress of aquatic PPCPs detection technology and risk assessment [J]. Water Resources Protection,2018,34(1):76-82. (in Chinese))
- [28] 戴颖萱,刘颖,丁珊珊,等. 光催化降解水环境中多环芳烃的研究进展[J]. 水资源保护,2018,34(5):63-68. (DAI Yuxuan,LIU Ying,DING Shanshan,et al. Research progress on photocatalytic degradation of PAHs in water environment [J]. Water Resources Protection,2018,34(5):63-68. (in Chinese))

(收稿日期:2019-05-19 编辑:彭桃英)

(上接第33页)

- [12] 广东省水文局. 广东省暴雨径流查算图表使用手册[R]. 广州:广东省水文局,1991.
- [13] 刘家福,蒋卫国,占文凤,等. SCS模型及其研究进展[J]. 水土保持研究,2010,17(2):120-124. (LIU Jiafu,JIANG Weiguo,ZHAN Wenfeng,et al. Processes of SCS model for hydrological simulation;a review [J]. Research of Soil and Water Conservation,2010,17(2):120-124. (in Chinese))
- [14] 许波刘,董增川,洪娴. 集总式喀斯特水文模型构建及其应用[J]. 水资源保护,2017,33(2):37-42,58. (XU Boliu,DONG Zengchuan,HONG Xian. Lumped karst hydrological model and its application [J]. Water Resources Protection,2017,33(2):37-42,58. (in Chinese))
- [15] WILLIAMS J R,LASEUR W V. Water yield model using SCS curve numbers [J]. Journal of the Hydraulics Division,1976,102(9):1241-1253.
- [16] 齐苑儒,李怀恩,李家科,等. 西安市非点源污染负荷估算[J]. 水资源保护,2010,26(1):9-12,74. (QI Yuanru,LI Huaen,LI Jiake,et al. Estimation of Xi'an urban non-point source pollution load [J]. Water Resources Protection,2010,26(1):9-12,74. (in Chinese))
- [17] 赵人俊. 流域水文模拟:新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利水电出版社,1984.
- [18] 芮孝芳,凌哲,刘宁宁,等. 新安江模型的起源及其进一步发展的建议[J]. 水利水电科技进展,2012,32(4):1-5. (RUI Xiaofang,LING Zhe,LIU Ningning,et al. Origin of Xin'anjiang model and its further development [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(4):1-5. (in Chinese))
- [19] 霍文博,朱跃龙,李致家,等. 新安江模型和支持向量机模型实时洪水预报应用比较[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):283-289. (HUO Wenbo,ZHU Yuelong,LI Zhijia,et al. Comparison of Xin'anjiang model and Support Vector Machine model in the application of real-time flood forecasting [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(4):283-289. (in Chinese))
- [20] 杨哲,张行南,夏达忠,等. 基于包气带厚度的流域蓄水量计算及水文模拟[J]. 水力发电学报,2015,34(3):8-13. (YANG Zhe,ZHANG Xingnan,XIA Dazhong,et al. Calculation of maximum thickness of unsaturated zone and modeling of hydrological process in Xingxing watershed [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2015,34(3):8-13. (in Chinese))
- [21] 刘家宏,周晋军,邵薇薇. 城市高耗水现象及其机理分析[J]. 水资源保护,2018,34(3):17-21. (LIU Jiahong,ZHOU Jinjun,SHAO Weiwei. Analysis of urban high water dissipation phenomenon and its mechanism [J]. Water Resources Protection,2018,34(3):17-21. (in Chinese))

(收稿日期:2019-09-25 编辑:彭桃英)