

DOI:10.3969/j.issn.1004-4701.2017.6.03

山洪灾害临界雨量确定方法研究

熊威,王姣,胡强,万小强,唐少龙

(江西省水利科学研究院,江西 南昌 330029)

摘要:针对常规水位流量反推法在确定临界雨量时未考虑前期降雨量作用效果,以及推理公式法确定的小流域汇流时间精度不高的问题,运用流域最大蓄水量估算法,综合考虑前期降雨量,在此基础上,考虑到分布式水文模型能较好地反映小流域的物理特征,可以得到可靠性较高的汇流时间参数;据此,提出了一种改进的水位流量反推法.实例分析表明,通过建立的模型与方法所确定的临界雨量具有较高的可靠性,该方法可用于山洪临界雨量的计算,并能对其他中小流域的山洪预警提供参考.

关键词:水位流量反推法;临界雨量;山洪灾害;分布式水文模型;前期降雨量

中图分类号:TV122+.1 **文献标识码:**B **文章编号:**1004-4701(2017)06-0404-06

0 引言

山洪是指山区溪沟中发生的暴涨洪水。山洪灾害是指因山洪造成沿河村落人民群众的生命财产损失的灾害。山洪具有历时短、涨幅快、洪量大、成灾迅速、破坏力强等特点,其影响因素十分复杂,导致对山洪灾害的防治十分困难^[1,2]。山洪预警可在暴雨后或暴雨持续过程中短时间内迅速发出预警信息,提醒及时做好防御工作,是目前广泛应用于山丘区防治山洪灾害的技术手段^[3]。临界雨量是开展山洪预警的重要参数指标,以降雨量是否超过临界雨量为准则,确定是否启动预警预案。国内学者针对以临界雨量作为预警预报指标开展了大量的研究工作,陈桂亚等^[4]将“统计归纳法”应用于小流域临界雨量的计算,取得了较好的预期结果;张世才等^[5]将产流分析法用于山洪预警,发现与其他多种山洪预警方法相比产流分析法合理性较好;江锦红等^[6]从河道安全泄洪流量出发,提出了最小临界雨量和临界雨力的计算方法,并且构建了暴雨临界曲线作为山洪灾害预警标准;叶勇等^[7]提出了以水位反推法计算临界雨量,取得了较好的效果。以上临界雨量的计算方法为山丘区山洪预警提供了许多可行的方法,但是上述临界雨量的计算方法均为静态临界雨量,没有考虑前期雨量对土壤饱和度的影响,忽略了随着降雨的持续,

流域的下垫面已发生改变,未对小流域的汇流时间参数进行优化计算^[8,9]。因此,为了准确计算临界雨量,本文对目前应用广泛的水位流量反推法进行改进;首先,采用流域最大蓄水量估算法,综合考虑前期降雨量;其次,采用分布式水文模型^[10,11]获取小流域的物理特征,得到可靠性较高的汇流时间参数;最后,提出一种基于改进的水位流量反推法的山洪预警临界雨量的计算方法,以期提高山洪预警的准确率。

1 基于流域最大蓄水量估算法的前期降雨量估算

山洪灾害临界雨量不仅与累积降雨量和降雨强度有关,还与前期降雨量紧密相关,前期降雨量通过改变土壤含水量饱和度,使流域的下垫面条件发生变化,从而改变流域的产汇流结果。对于资料缺乏地区,可以采用土壤含水量对前期降雨量进行估算,也就是流域最大蓄水量估算法。

流域最大蓄水量估算法首先根据各流域的实际情况确定流域的最大蓄水量 W_m ,分别采用 $P_a = 0.5W_m$ 、 $P_a = 0.8W_m$ 、 $P_a = W_m$ 三个典型值,对前期降雨很少、中等、很多3种情况的前期降雨进行界定,代表流域土壤含水量较干($0.5W_m \leq P_a < 0.8W_m$)、一般($0.8W_m \leq P_a$)

收稿日期:2017-08-21

作者简介:熊威(1989-),男,硕士,助理工程师。

< W_m) 以及较湿 ($P_a = W_m$) 3 种典型情况。

考虑土壤含水量是为了计算临界雨量时的雨量扣损。扣损包括初损和稳定下渗两部分。初损应从暴雨开始逐时段扣除,直至扣除的雨量累积和等于初损值为止。扣损后的净雨时程分配成果,不宜使雨型主雨峰分配状况产生严重改变。初损扣完后,采用稳定下渗率逐时段进行扣损。

2 基于分布式水文模型的汇流时间参数优化

汇流时间是指水流由集雨区内水力学最远点流至集雨区出口所需的时间,是雨量预警方式中小流域洪水过程分析的关键性参数。单元流域汇流时间的计算可采用以下方法:

(1) 推理公式法

出于安全性的原则,以百年一遇设计洪水的汇流时间作为估算汇流时间。首先,根据流域内防灾对象以上流域面积、河流坡降、河道长度、植被地貌等自然地理条件,确定百年一遇 24 h 点暴雨量;其次,将点暴雨量转换为面暴雨量,并选定设计暴雨 24 h 的时程分配;然后进行设计净雨过程计算;最后点绘 $Rt/t \sim t$ 曲线。

根据面积大小,设若干个整数 t ,使用公式(1)计算相应的汇流时间 τ 值,在方格上点绘 $Q_m \sim t$ 和 $Q_m \sim \tau$ 曲线,两线交点所对应纵坐标,即为所求的汇流时间 τ 值。

$$\tau = \frac{0.278L}{mJ^{1/3}} \times \frac{1}{Q^{1/4}} \quad (1)$$

式中: L 为汇流长度,km; J 为比降; Q 为洪峰流量, m^3/s ; m 为流域汇流参数。

(2) 分布式水文模型法

分布式水文模型可以较好的反映流域的物理特征,可以获取可靠性较好的汇流时间参数。本文采用基于 DEM 的分布式水文模型^[12,13],该模型主要包括栅格产流模块、栅格汇流模块和河网汇流模块。模型将 DEM 中的每一个栅格划分为河道、地下土壤和地表三个不同的蓄水单元,其水文属性通过上下游断面处的流量来描述,模型产流机制设定为蓄满产流。流域中各点蓄水能力 (S_{mc}) 由其各点地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 决定,其关系式为:

$$S_{mc,i} = S_0 + \left[\frac{\ln(\alpha/\tan\beta)_i - \min\{\ln(\alpha/\tan\beta)_j\}}{\max\{\ln(\alpha/\tan\beta)_j\} - \min\{\ln(\alpha/\tan\beta)_j\}} \right] \bullet SM \quad (2)$$

式中: i, j 为栅格空间位置; S_0 为一常数,表示全流最小蓄水能力; SM 为全流域蓄水能力变化幅度; n 为经验指数。

栅格产流模块主要通过蓄满产流的方式计算浅层地表水蓄水量,计算公式为:

$$S_{p,i}(t) = S_{p,i}(t - \Delta t) + \max\{[S_i(t) - S_{mc,i}], 0\} \quad (3)$$

式中: $S_{p,i}$ 为浅层地表水量, m^3 ; S_i 为地下水蓄水量, m^3 ; S_{mc} 为地下水最大蓄水量, m^3 ; Δt 为计算时段长度。

栅格河道汇流模块主要通过马斯京根法,在考虑坡面流 Q_p 的情况下,计算栅格河道出口流量,计算公式为:

$$Q_{out,i}(t) = c_0[Q_{in,i}(t) - Q_{p,i}(t)] + c_1Q_{in,i}(t - \Delta t) + (1 - c_0 - c_1)Q_{out,i}(t - \Delta t) \quad (4)$$

式中: c_0, c_1 为河道马斯京根汇流参数; $Q_{out}(t)$ 为栅格河道出口流量, m^3/s ; $Q_{in}(t)$ 为栅格河道进口流量。

河网汇流模块主要是通过马斯京根法^[14]将河段上游结点的入流过程 $I(t)$ 推算至下游结点的出流过程 $Q(t)$,计算公式为:

$$Q(t) = hc_0Q(t - 1) + hc_1I(t) + (1 - hc_0 - hc_1)I(t - 1) \quad (5)$$

式中, hc_0, hc_1 为河网马斯京根汇流参数。

当几个河段交汇于一个水文结点时,将结点上游各个河段演算得到的出口流量相加即为该结点的流量。

分别采用推理公式法和分布式水文模型法对小流域进行不同频率设计洪水的计算和分析,考虑到分布式水文模型能较好的获取小流域的物理特征,得到可靠性较高的汇流时间参数,以分布式水文模型得到的汇流时间参数修正推理公式法的汇流时间,采用新设定汇流时间重新计算即可得到优化之后的设计暴雨与设计洪水成果。

3 基于改进水位流量反推法的山洪灾害临界雨量计算

常规水位流量反推法的原理是首先假定降雨与洪水同频率^[15],基于这样的假设条件,由成灾水位对应的流量,反推临界雨量的有关信息,即根据水位流量关系或者采用曼宁公式等水力学方法,将预警水位转化为相应的流量,根据暴雨洪水分析方法,用以反推相应的洪水和暴雨信息,进而获得临界雨量信息。

常规水位流量反推法的设计暴雨采用《江西省暴雨洪水查算手册》进行推求,由于篇幅所限,不详述其

推求过程。

在常规水位流量反推法的基础之上,运用流域最大蓄水量估算法,分别采用 $P_a = 0.5 W_m$ 、 $P_a = 0.8 W_m$ 、 $P_a = W_m$ 3 个典型值,对前期降雨很少、中等、很多 3 种情况进行界定。考虑到分布式水文模型能较好的反映小流域的物理特征,可以得到可靠性较高的汇流时间参数,用于对推理公式法的汇流时间参数进行修正,据此,建立一种基于改进水位流量反推法的临界雨量计算方法,其主要关键步骤如下:

- (1) 根据《江西省暴雨洪水查算手册》推求设计暴雨;
- (2) 基于暴雨与洪水同频率,以沿河村落附近的河道断面为控制断面,进行不同频率设计洪水的计算和分析,可得到洪峰流量、洪量、涨洪历时、洪水历时,再根据控制断面的水位流量关系,将洪峰流量转化为水位;
- (3) 根据分布式水文模型得到的汇流时间,重复步骤(1)、(2),得到修正后的设计暴雨和设计洪水成果;
- (4) 根据沿河村落、集镇、城镇所在控制断面的成灾水位,运用水位流量关系或者曼宁公式等水力学方法,计算对应的成灾流量;
- (5) 由成灾流量确定其相应频率的降雨,运用流域最大蓄水量估算法,分别采用 $P_a = 0.5 W_m$ 、 $P_a = 0.8 W_m$ 、 $P_a = W_m$ 三个典型值,对前期降雨很少、中等、很多 3 种情况进行界定,得到不同前期降雨量的临界雨量阈值;
- (6) 基于暴雨图集、水文手册等基础性资料,对结

果进行合理性分析。

4 应用实例

实例选取察溪河小流域对本文提出的改进水位流量反推法进行验证。察溪河小流域位于江西省永修县云山集团大源村,是修河的一条支流,流域面积 30.09 km²,河长 15.50 km,河道比降 12.4‰,两边为丘陵山区,高低起伏,河两岸分布有 2 个行政村,7 个自然村,影响人口约 900 人,遇强降雨易暴发山洪灾害。收集的基础数据包括永修县县级工作底图、数字线划地图(DLG)、暴雨图集、水文手册以及山洪灾害现场调查的成果,可获取到察溪河小流域较为完整的地貌与河流资料等信息,如流域面积、平均坡度、形状系数、最长汇流河道长度、比降等。

4.1 暴雨与产汇流计算

(1) 汇流时间参数优化

根据所收集的基础数据与《江西省暴雨洪水查算手册》,通过图表查算法得到察溪河小流域各频率下的降雨量,见表 1。依托山洪灾害分析评价软件,分别采用推理公式法,分布式水文模型法对察溪河小流域进行汇流时间参数的计算,计算结果见表 2。进行设计洪水计算时以分布式水文模型的汇流时间参数对推理公式法的汇流时间进行修正,即察溪河小流域推理公式法计算设计洪水时汇流时间为 2 h。

表 1 察溪河小流域设计暴雨成果

历时	均值/mm	变差系数	Cs/Cv	重现期雨量值/mm				
				100年(1%)	50年(2%)	20年(5%)	10年(10%)	5年(20%)
10 min	17.99	0.34	3.50	37	34	29	26	22
1 h	46.29	0.39	3.50	104	94	80	70	59
6 h	76.82	0.45	3.50	192	171	143	122	100
24 h	129.99	0.50	3.50	355	313	258	215	172

表 2 察溪河小流域汇流时间成果

面积/km ²	主沟道长度/km	主沟道比降/‰	汇流时间/h	
			推理公式法	分布式水文模型法
30.09	15.50	12.4	7	2

(2) 产汇流计算结果

在上述设计暴雨的计算基础之上,采用推理公式法

对察溪河小流域设计洪水进行计算,此处仅列出 $P_a = 0.8 W_m$,前期影响雨量一般情况下的洪峰流量值,结果见表 3。

表 3 察溪河小流域设计洪水成果

频率/%	1	2	5	10	20
$Q/(m^3/s)$	204	178	142	113	83

表 4 水位流量计算结果

Z/m	A/m ²	R/m	Q/(m ³ /s)
18.9	0.0	0.0	0
19.2	2.0	0.2	3
19.5	5.4	0.3	5
19.8	8.4	0.5	10
20.1	14.2	0.6	13
20.4	21.5	0.9	30
20.7	27.6	1.1	39
21.0	35.5	1.3	59
21.3	42.2	1.4	82
21.6	51.6	1.6	104
21.9	62.4	1.8	140
22.2	72.8	1.9	176
22.5	82.6	2.0	204

4.2 水力计算

根据控制断面的实测数据,利用曼宁公式计算得出断面的水位流量关系,如表 4。察溪河小流域调查得到的成灾水位经换算至控制断面为 21.65 m,成灾流量为 105 m³/s。

4.3 临界雨量计算

基于降雨与径流同频率的假定,通过 P-Q 曲线(图 1)成灾水位对应的频率为 11%,相应的察溪河小流域在前期降雨量一般情况下的(P_a = 0.8W_m)9 年一遇 1、2(汇流时间)3 h 的降雨量即为临界雨量,按照同样的方法,可以计算出 P_a = 0.5W_m 和 P_a = W_m,即前期降雨很少和很多情况下的临界雨量。3 种前期降雨量情况下的临界雨量见表 5。为了对比汇流时间修正对临界雨量的影响程度,选取察溪河小流域汇流时间为 7 h,按照同样计算过程进行计算得到临界雨量见表 6。

4.4 成果合理性分析

由于缺乏山洪灾害配套的降雨与洪水资料,进行成果合理性分析时以相应时段条件下临界雨量和设计暴雨雨量的差异为标准。

统计察溪河小流域设计暴雨成果及 3 种土壤含水量 1 h 临界雨量(汇流时间 2 h)成果进行对照分析(见

表 7)。由表 7 可以看出,察溪河小流域在 P_a = W_m、P_a = 0.8W_m 情况下,1 h 临界雨量分别为 63 mm 和 68 mm,均小于 10 年一遇设计暴雨,P_a = 0.5W_m 时,1 h 临界雨量为 72 mm 大于 10 年一遇设计暴雨,察溪河小流域防洪现状为 11 年,基于暴雨洪水同频率的假设,1 h 预警雨量合理,可靠性较高。表 7 可看出临界雨量随前期影响雨量(0.5W_m、0.8W_m、W_m)增加而逐渐减小,随着时段增大而增大,符合水文特性。

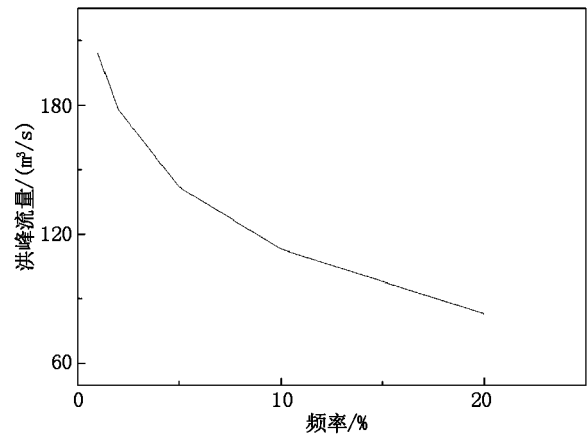


图 1 察溪河小流域 P-Q 关系曲线图

表 5 察溪河小流域临界雨量值(汇流时间 2 h) mm

时段	前期降雨量		
	P _a = 0.5 W _m	P _a = 0.8 W _m	P _a = W _m
1	72	68	63
2	87	84	82
3	98	95	93

表 6 察溪河小流域临界雨量值(汇流时间 7 h) mm

时段	前期降雨量		
	P _a = 0.5 W _m	P _a = 0.8 W _m	P _a = W _m
1	77	73	67
2	93	89	86
3	102	99	96

表 7 察溪河小流域预警雨量与设计暴雨对比表(汇流时间 2 h)

时段/h	临界雨量值				设计暴雨				现状防洪能力/年
	P _a = W _m	P _a = 0.8 W _m	P _a = 0.5 W _m	1%	2%	5%	10%	20%	
	1	63	68	72	104	94	80	70	

表 8 察溪河小流域预警雨量与设计暴雨对比表(汇流时间 7 h)

时段/h	临界雨量值/mm				设计暴雨/mm				现状防洪能力/年
	P _a = W _m	P _a = 0.8 W _m	P _a = 0.5 W _m	1%	2%	5%	10%	20%	
	1	67	73	77	104	94	80	70	

由表5、6可知,汇流时间7 h比2 h临界雨量偏大3~6 mm;由表7、8可知,汇流时间2 h的临界雨量比7 h更接近设计暴雨值,表明经过分布式水文模型修正后的汇流时间参数可靠性较好,获得的临界雨量精度更高。

5 结 论

本文通过运用流域最大蓄水量估算法,综合考虑前期降雨量,并且采用分布式水文模型对推理公式法的汇流时间参数进行修正,提出了一种改进的水位流量反推法。察溪河小流域的实例分析表明,通过建立的模型与方法所确定的临界雨量具有较高的可靠性与应用价值,可推广用于山洪临界雨量的计算,并能为其他中小流域的山洪预警提供参考。

总体来看,水位流量反推法对于无实测水文资料地区的山洪灾害防治意义重大,目前已广泛应用于临界雨量的计算,但是由于缺乏可靠的水文资料对其结果进行验证,制约了临界雨量精度的提高。随着近几年山洪灾害非工程措施和工程措施的逐步完善,未来可对山洪灾害预警以及临界雨量进行检验和修正。

参考文献:

- [1] 张红萍,刘舒,刘媛媛,等. 山溪洪水临界雨量基本概念剖析及方法分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2014(2):185~189.
[2] 雷声. 江西省山洪灾害防治项目概述[J]. 江西水利科技,2015,41

(3):179~181.

- [3] 孙璟. 小流域山洪灾害预警预报研究[D]. 南昌工程学院,2015.
[4] 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.
[5] 张世才,褚建华,张同泽. 祁连山区山洪灾害临界雨量计算和风险区划分[J]. 水土保持学报,2007,21(5):196~200.
[6] 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.
[7] 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,2008,28(1):56~58.
[8] 刘志雨,杨大文,胡健伟. 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(自然科学版),2010,46(3):317~321.
[9] 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(12):74~77.
[10] 焦伟杰,龙海峰. 改进的分布式水文模型在渭河流域的适用性分析[J]. 水电能源科学,2015(12):22~27.
[11] 龙海峰,熊立华,万民. 基于DEM的分布式水文模型在清江流域的应用[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(1):71.
[12] 张建军,纳磊,张波. HEC-HMS分布式水文模型在黄土高原小流域的可应用性[J]. 北京林业大学学报,2009,31(3):52~57.
[13] 黄金柏,温佳伟,王斌,等. 分布式水文模型在不同地形条件下的应用研究[J]. 水资源与水工程学报,2015(1):16~24.
[14] 王新宏,唐永鹏,张美洋,等. 基于水位/流量反推法的资料匮乏地区临界雨量研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(4):125~128.
[15] 王振忠,王国新. 基于水位流量反推法确定山洪灾害雨量预警指标探讨[J]. 吉林水利.

编辑:张绍付

Research on determining method for rainfall warning indexes of torrential flood disaster

XIONG Wei, WANG Jiao, HU Qiang, WAN Xiaoqiang, TANG Shaolong
(Jiangxi Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

Abstract: Aiming at the problem that the conventional water level flow reversal method was not considered for the effect of the early rainfall effect, and the accuracy of the small watershed confluence time which determined by the reasoning formula method was not high, the maximum water storage capacity estimation method was used to consider the preliminary rainfall affect. On the basis of this, considering the distributed hydrological model which can reflect the physical characteristics of small watersheds, reliability high convergence time parameters was get. Accordingly, that an improved water level flow reversal method was constructed. The analysis show that the established model and method were superior accuracy which can be used for the calculation of the critical rainfall of the mountain torrent, that can provide reference for the flash flood warning of other small and medium-sized watersheds.

Key words: Inversion method of water level flow; Critical rainfall; Flash flood disaster; Distributed hydrological model; Pre-influencing rainfall

翻译:郭庆冰