

基于 HBV 模型的尼洋曲流域上游 洪水致灾临界面雨量研究

林志强, 洪健昌, 尼玛吉, 路红亚

(西藏自治区气候中心, 西藏 拉萨 850000)

摘要: [目的] 建立工布江达以上尼洋曲流域的降水—径流关系, 构建该流域的致洪临界雨量指标, 以期开展山洪气象预警工作提供参考。[方法] 根据流域暴雨洪水致灾机制, 利用地面气象观测和 CMORPH 资料, 基于 HBV 水文模型进行计算分析。[结果] 利用 2007—2011 年观测数据对 HBV 水文模型的参数优化和率定, 模拟数据与观测数据的确定性系数为 0.91, NASH 效率系数为 0.89; 采用 2012—2014 年观测数据进行验证, 确定性系数为 0.86, NASH 效率系数为 0.85, 率定期和验证期的平均相对误差均为 3.1%, 表明经过率定的 HBV 模型对尼洋曲上游流域具有较好的适用性。[结论] 尼洋曲流域的洪水过程不仅与实时降水的面雨量有关, 还与前期基础水位有关, 致灾临界面雨量随前期基础水位升高而减小, 并且随着前期水位的变化, 临界雨量值呈现了非线性响应特征。

关键词: 尼洋曲流域; 临界面雨量; HBV 模型; 洪水灾害

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)04-0022-05

中图分类号: P339

文献参数: 等. 基于 HBV 模型的尼洋曲流域上游洪水致灾临界面雨量研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 22-26. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.004

Critical Rainfall Inducing Flood Disaster of Nyang River Based on HBV Model

LIN Zhiqiang, HONG Jianchang, NI Maji, LU Hongya

(Climate Center of Tibet Autonomous Region, Lasa, Tibet 850000, China)

Abstract: [Objective] This paper studied the relationship between rainfall and runoff over upper Nyang river above Gongbo-gyamda Hydrological station to find the critical rainfall that will result to flood. We expected to provide reference for the meteorology pre-warning of mountain torrents. [Methods] Data of ground meteorological observation and CMORPH were used. The upper Nyang river watershed of the hazard critical rainfall was obtained according to the HBV rainfall-runoff model. [Results] After parameter optimization and calibration, the HBV model had a certainty coefficient of 0.91 and NASH efficiency coefficient of 0.89 in the phase of calibration during 2007—2011. Model was validated using the data of 2012—2014, in this phase, certainty factor was 0.86 and NASH efficiency was 0.85. For both the phases of calibration and validating, relative error was averaged as 3.1%, which implied that the model was applicable. [Conclusion] The flood process in Nyang river basin was not only related to the rainfall in whole basin, but also to the previous water level. The critical rainfall of flood inducement decreased with the increase of previous water level, and vice versa. The critical rainfall showed a nonlinear responsive characteristics.

Keywords: Nyang River basin; interfacial precipitation; HBV model; flood disaster

在西藏自治区境内,流域面积大于 10 000 km² 的河流有 20 多条,流域面积大于 2 000 km² 的河流有 100 条以上^[1],由于西藏地区海拔高,地形条件复杂,生态脆弱,社会经济欠发达,抗灾能力弱,汛期受强降雨影响,中小河流山洪地质灾害灾害频次高、危害重、影响大,是政府关注的重点,也是西藏地区防灾

减灾服务的首要任务之一^[2-3],尤其是在气候变暖背景下,西藏地区极端气候事件频发^[4],中小河流山洪和地质灾害的危害更为凸显。例如,2000 年 8 月底,日喀则地区年楚河流域东部特大洪灾,日喀则到边境重镇亚东的交通全部中断,许多农牧民的房子被冲垮;2014 年 7 月全区因持续性或局部强降雨导致的

收稿日期: 2015-09-16

修回日期: 2015-10-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“西藏高原灾害性天气分析和预报方法研究”(41465006); 高原气候与气候变化创新团队基金项目(XZQX201302)

第一作者: 林志强(1982—),福建省漳州市人,硕士,工程师,主要从事高原天气预报工作。E-mail: linzq82@gmail.com。

山洪、泥石流等地质灾害 10 余起,受灾区域遍及拉萨市、山南地区、林芝地区、日喀则地区,灾情造成的直接经济损失达 160 余万元。山洪形成的主要原因是降雨,当一个小流域某时段内的降雨量达到或超过某一量级和强度,形成的洪水流量刚好为河道的安全泄洪能力,大于该量级雨量可引发山洪灾害,将此时的降雨量称为致灾临界雨量。致灾临界雨量是山洪灾害预测预报的重要指标,其中动态临界雨量在业务应用中最为方便^[5-7],具有较大的参考价值。为服务于西藏地区中小河流致洪暴雨预报,综合考虑流域社会生产和气象、水文观测站的分布,本研究选取尼洋曲上游(工布江达以上)流域为研究区域,以半分布式水文模型 HBV 为基础,利用历史气象和水文资料,建立该流域的致洪临界雨量指标,以期开展山洪气象预警业务提供参考,为高原复杂地形流域的致灾临界雨量确定探索方法,以减少山洪危害,保障西藏社会经济发展和人民生命财产安全。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

尼洋曲雅鲁藏布江 5 大支流之一,位于雅鲁藏布江中下游左岸,流域介于北纬 29°28′—30°30′和东经 92°10′—94°35′,流域东西长约 230 km,南北宽约 110 km,流域面积 17 535 km²,居雅鲁藏布江 5 大支流第 4 位,水量仅次于帕隆藏布^[8]。尼洋曲流域内山岳起伏,地形复杂,处于高原和藏东南峡谷的过渡地带,总的趋势是西北高、东南低。流域自然条件优越,年降水量约 634.7 mm,干湿季分明,5—10 月为雨季,集中 6—7 月,沿雅鲁藏布江河谷进入的暖湿气流控制本流域,温暖湿润多雨,降水从东向西递减;11 月至次年 4 月为旱季,主要受西风带影响,干燥少雨^[9]。流域内森林和水力资源丰富,农业历史悠久,水能资源丰富,据测算天然水能蕴藏量达 2.70×10⁶ kW,在干流和支流已建设大小水电站数十座,但水能开发利用仍然较低。尼洋曲源头至工布江达为上游段,上段为宽谷,下段为峡谷,长 125 km,落差 1 570 m,平均坡降 12.6%,拉林公路沿河而建,在汛期(6—9 月)流域洪水多发,对交通和电力有较大影响,由于流域内降雨致洪,河道水位上涨,导致沿河区域被淹,人民生命财产受损,是沿岸重要的气象衍生灾害。

1.2 数据资料

气象数据采用流域内及其邻近地面气象观测站,包括嘉黎、墨竹工卡、加查和泽当 4 个气象站的逐日降水和气温资料,由西藏自治区气象局信息中心提供;由于流域地处西藏高原地区,海拔较高,自然条件恶劣,流域内无气象观测站点,因此采用了

CMORPH(CPC MORPHing technique)降水数据作为降水观测的补充。在流域的简单对比分析;水文数据采用工布江达水文站逐日水位和流量资料;数字地面高程(DEM)为 90 m 分辨率的 SRTM 数据,利用 GIS 水文分析工具,去除小面积的流域后将尼洋曲上游分为 141 个子流域,采用泰森多边形方法得到各子流域逐日面雨量;土地利用为西藏地区 1:10 万土地利用基础数据集。气象、高程和土地利用数据用于驱动 HBV 水文模型。

CMORPH 数据是应用较广泛的卫星反演降水数据,由 NOAA 气候预测中心(CPC)创建,采用 CMORPH 逐日降水,空间分辨率为 0.25°×0.25°。通过双线性插值将 CMORPH 数据插值到流域气象观测站上,结果表明流域 4 个气象站的相关系数在 0.31~0.47 之间,平均绝对误差在 1.2~1.7 mm 之间,均方根误差在 2.4~3.1 mm 之间,与成璐等^[10]的分析结果相近,总体而言,受高原地区复杂地形的影响,CMORPH 降水在高原地区的精度较我国其它地区有所降低,由于 CMORPH 数据覆盖范围广,时效性强,可以弥补高原地区地面雨量观测不足,具有业务应用价值。

1.3 HBV 水文模型

HBV(hydrologiska fyrens vattenbalans)水文模型是由瑞典水文研究所研发的一个概念性、半分布式的流域水文模型,能模拟包括积雪、融雪、实际蒸散量、土壤水分存储、地下水和径流等水文过程,已在全世界多个不同气候条件的国家得到应用^[11],能适用于各种复杂气候条件下的水文模拟,具有输入参数少、适用性强和模拟精度高等优点。HBV 模型将流域分为多个子流域,每个子流域根据高程、水面面积和下垫面类型等分成多个径流带,水量平衡方程定义为:

$$P - E - Q = \frac{d}{dt} (S_p + S_M + U_z + L_z + V_L) \quad (1)$$

式中: P , E , Q ——降水、蒸发和流量; S_p ——雪盖; S_M ——土壤含水量; U_z ——表层地下含水层; L_z ——深层地下含水层; V_L ——水体体积。

HBV 模型综合考虑了土壤、水文、气象等多要素,能够对水文过程进行科学合理描述,具有很好的普适性。近些年来我国学者应用该模型于不同地区水文研究;王亚杰等^[12]应用于海南南渡江流域洪涝致灾临界面雨量研究;刘绿柳等^[13-14]利用 HBV 模型研究未来气候变化对珠江流域水文过程的影响;高超等^[15]对比了 HBV 等水文模型在不同尺度流域和数据的适用性;张建新等^[16]则分析了 HBV 模型在东北冰雪地区的适用性;王有恒等^[17]、樊静等^[18]和刘义花等^[19]分别分析了甘肃白龙江流域、新疆开都河流域

和青海玉树巴塘河流域的洪水致灾临界雨量,这些研究表明,HBV 模型对热带/亚热带湿润地区、温带湿润地区、干旱半干旱地区和冰雪地区均具有较好的适用性,但对高原复杂地形流域地区的研究较少,本研究采用 2007—2011 年观测数据对 HBV 模型进行率定,采用平均绝对误差 (MAE)、平均相对误差 (MRE)、均方根误差 (RMSE)、确定性系数 (R^2) 和 NASH 效率系数 (M) 来度量模拟结果:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |Q_o - Q_s| \quad (2)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{Q_o - Q_s}{Q_o} \right| \times 100\% \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_o - Q_s)^2}{N}} \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{[\sum (Q_o - \bar{Q}_o)(Q_s - \bar{Q}_s)]^2}{\sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum (Q_s - \bar{Q}_s)^2} \quad (5)$$

$$M = 1 - \frac{\sum (Q_o - Q_s)^2}{\sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (6)$$

式中: Q_o , Q_s ——观测值和模拟值; N ——样本数, MAE, MRE 和 RMSE 越小,模拟效果越好; R^2 和 M 取值在 0~1 之间,越接近 1,模拟效果越好。HBV 模型综合考虑了降水、气温、土壤含水性能和产汇流等要素进行径流模拟,包括了降水模块、土壤模块、产汇流模块和河道模块等,包括积雪和融雪参数、温度阈值参数、田间持水量等 30 多个具有物理意义的参数,为了使 HBV 模型更适用于研究区域,采用部分实测数据对 HBV 模型进行参数率定(表 1),然后以其他数据进行验证,以检验参数率定结果。

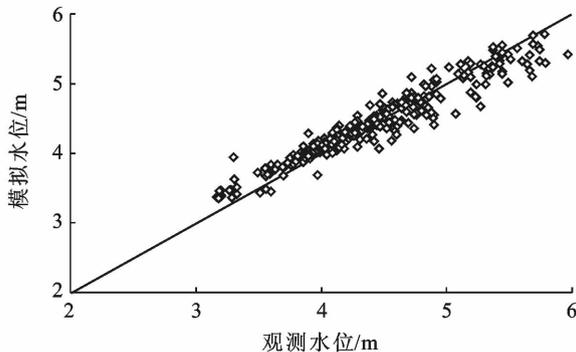


图 1 尼洋曲流域上游 HBV-D 水文模型率定期和验证期模拟—观测值

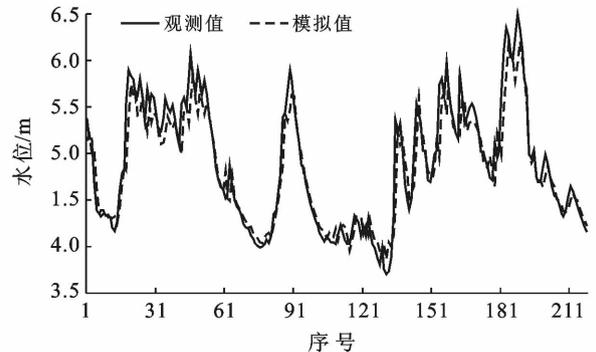
根据西藏自治区水文水资源勘测局提供的工布江达水文站河道考证资料,工布江达的警戒水位(一级)为 5 m,保证水位(二级)为 5.5 m,对 2007—2014 年逐日水位资料进行分析,共有 151 d 达到警戒水位,68 d 达到保证水位,图 2 给出了这些日数中不同量级的前一天的水位(起涨水位)和面雨量的出现率。

表 1 HBV 水文模型参数率定值

参数	参数含义	率定结果
BETA	土壤水分带阈值	0.26
KUZ1	表层区域快时间参数	0.09
KUZ2	表层区域慢时间常数	0.23
KLZ	底层时间常数	0.05
UZ	快速径流阈值	5.02
PERC	底层土壤渗流速度	1.48
PKORR	降水对雨量校正系数	0.75
CEVPL	水体蒸散校正系数	0.85
FCDEL	实际蒸散和潜在蒸散比值	0.67
INFMAX	最大渗透能力	7.20

2 水文模型参数率定和验证

将 2007—2011 年的气象和水文观测数据作为率定数据,用于确定 HBV 水文模型参数,模型率定期观测数据和模拟数据的 MAE, MRE 和 RMSE 分别为 0.14 m, 3.1% 和 0.18 m, 确定性系数达 0.91, NASH 效率系数为 0.89, 模拟效果很好, 表明 HBV 模型能够有效地模拟尼洋曲上游日径流过程(图 1)。以 2012—2014 年为验证期, 此期间观测数据用于检验模型参数适用性和模拟结果, 以检验模型的稳定性和可靠性。验证结果与率定期效果基本一致, 验证期的 MAE, MRE 和 RMSE 分别为 0.15 m, 3.1% 和 0.22 m, 确定性系数为 0.86, NASH 效率系数为 0.85, 模拟的水文过程与实测基本吻合(图 1), 进一步验证了经过率定的 HBV 模型能很好地模拟尼洋曲上游流域水文过程, 该模型能用于指定尼洋曲上游流域致灾临界雨量。



工布江达站的警戒水位和保证水位的起涨水位都在 4.3 m 以上,警戒水位和保证水位的起涨水位概率分布呈正态分布,5.3 m 出现概率最多。达到警戒水位和保证水位所需的面雨量随着起涨水位的增加而减小,起涨水位在 5 m 以下时,要达到警戒水位,面雨量需在 20 mm 以上;要达到保证水位,面雨量在 40 mm

以上。起涨水位达到 5 m 以上时,面雨量只需达到 5 mm 以上即可使水位达到警戒水位,只需达到

20 mm 以上即可使水位达到保证水位。当起涨水位达到 6 m 以上时,第二天的水位都能达到警戒水位。

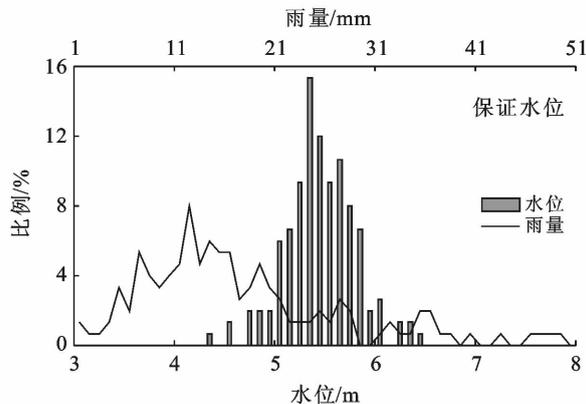
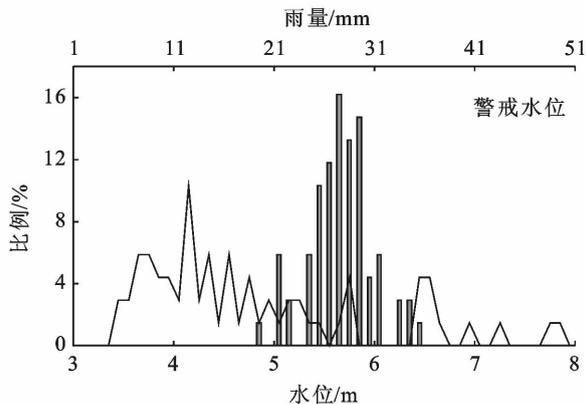


图 2 警戒水位和保证水位的前日水位和面雨量概率分布

3 不同前期水位的致灾临界雨量

流域洪水的发生是气象、地形、下垫面类型和水利防洪工程建设等多方面要素共同作用的结果,为了提供更有力的参考,致灾临界雨量应是一个与多方面条件相关的动态阈值,尤其与前期水文条件息息相关。按照图 3 所示流程利用率定后的 HBV 模型反算临界雨量:首先运行 HBV 模型使水位达到一定水

平,然后输入给定面雨量进行径流模拟,不断增加雨量值,直到模拟水位达到临界水位水平,该雨量即为所求临界雨量值(表 2)。临界雨量值随前期基础水位的升高而减小,且临界雨量随着不同的前期水位变化呈现非线性变化特征,升高相同高度的水位时,前期水位更高则临界面雨量增加值减小,这是因为高的前期水位,流域土壤更为湿润,持水能力减小,使得进入河流的水量增加,因而需要的雨量增加值减小。

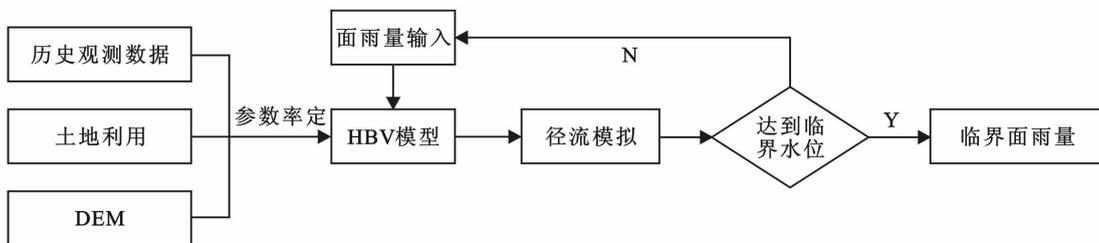


图 3 HBV 模型确定致灾临界雨量流程

表 2 尼洋曲上游流域临界面雨量

前期基础水位/m	临界水位	临界面雨量/mm
2.0	警戒水位(5 m)	150
	保证水位(5.5 m)	180
2.5	警戒水位(5 m)	113
	保证水位(5.5 m)	151
3.0	警戒水位(5 m)	82
	保证水位(5.5 m)	131
3.5	警戒水位(5 m)	70
	保证水位(5.5 m)	110
4.0	警戒水位(5 m)	50
	保证水位(5.5 m)	75
4.5	警戒水位(5 m)	20
	保证水位(5.5 m)	43
5.0	警戒水位(5 m)	5
	保证水位(5.5 m)	21

4 讨论与结论

强降水导致的中小河流流域洪水是西藏东南部地区重要的气象衍生灾害,根据流域暴雨洪水致灾机制,本文利用 2007—2014 年地面气象观测、水文观测资料和 CMORPH 资料,基于 HBV 水文模型建立了尼洋曲上游流域致灾临界面雨量,本文研究表明 HBV 模型对青藏高原复杂地形河流域具有适用性,结果能为西藏地区其他流域确定致灾临界面雨量提供思路,为西藏地区防灾减灾和水文气象服务提供决策参考。利用经过率定的 HBV 模型和气象部门的定量降水预报(PRF)、数值模式提供的集合降水预报等结果,可以进行河流径流中短期预报;另外,由于本研究采用的模型模拟时间步长和资料的限制,仅作出了日雨量的临界值,在水文气象服务和较短时间内

决策服务中,需要作出日尺度以内的径流预报,这是本研究今后进一步的工作目标。

[参 考 文 献]

- [1] 关志华,陈传友. 西藏河流水资源[J]. 资源科学,1980,2(2):25-35.
- [2] 温克刚,刘光轩. 中国气象灾害大典(西藏卷)[M]. 北京:气象出版社,2008.
- [3] 林志强,德庆,文胜军,等. 西藏高原汛期大到暴雨的时空分布和环流特征[J]. 暴雨灾害,2014,33(1):73-79.
- [4] 杜军,路红亚,建军. 1961—2012年西藏极端降水事件的变化[J]. 自然资源学报,2014,29(6):990-1002.
- [5] 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.
- [6] 郑芳,蔡建军. 蔡家川. 流域降雨—径流关系及水量平衡分析[J]. 水土保持通报,2012,32(1):71-76.
- [7] 卢燕宇,田红. 基于 HBV 模型的淮河流域洪水致灾临界雨量研究[J]. 气象,2015,41(6):755-760.
- [8] 王秀丽,范世东,黄继刚,等. 西藏尼洋曲流域考察报告[J]. 西藏科技,1996,22(2):10-16.
- [9] 宋善允,王鹏祥,杜军,等. 西藏气候[M]. 北京:气象出版社,2013.
- [10] 成璐,沈润平,师春香,等. CMORPH 和 TRMM3 B42 降水估计产品的评估检验[J]. 气象,2014,40(11):1372-1379.
- [11] Bergstorm S. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchment [M]. Norrköping: University of Lurid, 1976.
- [12] 张亚杰,吴慧,吴胜安,等. 南渡江流域暴雨洪涝致灾临界界面雨量的确定[J]. 应用气象学报,2014,25(6):731-740.
- [13] 刘绿柳,姜彤,徐金阁,等. 21 世纪珠江流域水文过程对气候变化的响应[J]. 气候变化研究进展,2012,8(1):28-34.
- [14] 刘绿柳,姜彤,徐金阁,等. 西江流域水文过程的多气候模式多情景研究[J]. 水利学报,2012,43(12):1413-1421.
- [15] 高超,刘青,苏布达,等. 不同尺度和数据基础的水文模型适用性评估研究:淮河流域为例[J]. 自然资源学报,2013,28(10):1765-1777.
- [16] 张建新,赵孟芹,章树安,等. HBV 模型在中国东北多冰雪地区的应用研究[J]. 水文,2007,27(4):31-34.
- [17] 王有恒,谭丹,景元书. HBV 水文预报模型在白龙江流域的应用研究[J]. 水土保持通报,2015,35(3):218-221.
- [18] 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.
- [19] 刘义花,鲁延荣,周强,等. HBV 水文模型在玉树巴塘河流域洪水临界雨量阈值研究中的应用[J]. 水土保持研究,2015,22(2):224-228.
- [8] 何易平,马泽忠,谢洪,等. 基于 GIS 的土地利用类型与山地灾害敏感性分析:以云南省昆明市东川区为例[J]. 水土保持学报,2004,18(4):177-181.
- [9] 何易平,马泽忠,谢洪,等. 长江上游地区不同土地利用方式对山地灾害的敏感性分析:以金沙江一级支流小江流域为例[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(4):528-533.
- [10] 唐川. 云南怒江流域泥石流敏感性空间分析[J]. 地理研究,2005,24(2):178-185.
- [11] 李世勤,邱启勇,王述强. 江西山洪灾害防治实践及思考[J]. 中国水利,2012(3):51-54.
- [12] 邱启勇,李世勤. 江西省 2010 年山洪灾害防御实践及思考[J]. 中国防汛抗旱,2011(5):27-29.
- [13] 黄志勇,刘莉萍. 浅谈江西山洪灾害成因及对策[J]. 江西水利科技,2007(2):82-84.
- [14] 鄢洪斌,朱均安,廖宏. 江西山洪灾害分布特征与预报初探[J]. 江西气象科技,2005,28(2):27-30.
- [15] 兰恒星,伍法权,周成虎,等. 基于 GIS 的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1500-1506.
- [16] He Yipin, Xie Hong, Cui Peng, et al. GIS-based hazard mapping and zonation of debris flows in Xiaojiang Basin, Southwestern China[J]. Environmental Geology, 2003,45(2):286-293.

(上接第 21 页)