

基于分布式水文模型的嘉陵江流域 暴雨洪涝致灾风险阈值研究^①

宋楠¹, 马振峰², 范广洲¹, 郭海燕², 徐沅鑫²

1. 成都信息工程大学, 成都 610225; 2. 四川省气候中心, 成都 610072

摘要: 以四川嘉陵江流域的金溪水文站以上段为研究区域, 基于分布式水文模型 HBV-D 对河流暴雨洪涝灾害的临界面雨量阈值进行研究, 结果表明: 模型在嘉陵江流域的适用性较好, 在 2013—2015 年率定期和 2010—2012 年验证期的 Nash 效率系数分别为 0.68 和 0.67, 相关系数超过 0.82; 通过模型反演建立降水—流量—水位的关系, 得到了不同前期基础水位的 24h 面雨量和水位的关系, 将金溪水文站的警戒水位(306.5 m)和保证水位(308.7 m)作为临界判别条件, 确定了不同前期基础水位的致灾临界面雨量。

关键词: 嘉陵江流域; HBV-D 水文模型; 致灾临界面雨量

中图分类号: P429

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2018)02-0186-07

在全球气候变暖的背景下, 极端天气事件发生的频次、强度、空间范围以及持续时间都在发生变化. 我国是全球气候变暖特征最显著的国家之一, 旱涝灾害是影响中国最严重的极端天气气候灾害^[1]. 而科学预估未来强降水事件的出现不管在频率上还是强度上都会有所增加, 因此, 进行暴雨洪涝灾害风险的研究, 加强风险管理, 减少人员伤亡以及财产损失, 对于保障社会和谐与可持续发展有重要意义。

致灾阈值是指气候灾害发生时的临界天气气候条件^[2], 达到这一临界条件时, 就可能导致灾害发生, 造成生命伤亡或社会经济财产损失. 降水是引发洪涝灾害的直接因素和主要激发条件, 但是降水要达到一定的量级或强度才能引发洪涝灾害^[3]. 导致暴雨洪涝灾害发生的临界气象条件即致灾阈值, 可以表述为临界面雨量, 这一临界条件是暴雨洪涝灾害预报预警、评估及防治规划的重要依据和参考。

由于我国气候条件和地形地貌条件复杂, 并且存在降水数据和水文资料不完善等问题, 因此流域暴雨洪涝灾害临界面雨量的确定方法种类繁多, 但实际都是要确定雨—洪关系. 主要方法可分为两种, 一是统计归纳法, 通过分析洪水的水文特征来确定水文站以上流域的面雨量及其他有关变量的关系, 建立统计模型, 确定临界面雨量^[4-6]; 另一个是水文水动力学方法, 利用率定后的模型建立研究区降水和径流的关系, 基于这种关系反演确定临界面雨量指标, 近年来主要使用的模型有 TOPMODEL 模型^[6-7]、HBV 模型^[8-13]、新安江模型^[14-16]、FloodArea 模型^[17-18]. 统计方法简单易用, 但是对于中小流域而言, 流域下垫

① 收稿日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275097); 四川省科技支撑计划项目(15ZC0098).

作者简介: 宋楠(1993-), 女, 湖南郴州人, 硕士研究生, 主要从事暴雨洪涝灾害风险评估研究.

通信作者: 马振峰, 正研级高级工程师.

面条件等的变化对于临界雨量的确定有重要影响,导致采用降水数据或历史灾情数据确定的致灾阈值有一定的随机性和局地性,影响到预警指标的准确性,并且统计方法还会受到历史资料的限制.随着水文气象耦合技术的发展,水文模型在确定流域暴雨洪涝灾害临界面雨量上提供了重要的技术手段.水文水动力学方法有一定的物理基础,综合考虑了降雨、温度、下垫面条件、径流、河道特性等因素,可以准确描述水文过程,具有较强的适应性,在国内多个流域中有较好的应用.

嘉陵江是长江上游的一条支流,接纳白龙江后经过四川省广元市和南充市,到达重庆汇入长江.嘉陵江流域降水充沛,降落下来的水从地面与地下汇入河网,对径流的补给量大,同时由于支流较多,洪水汇流容易造成洪涝灾害.鉴于以上所述,本文选取嘉陵江中游的一部分流域为研究区域(105°E—106.5 °E, 31°N—33°N),面积为 13 190.9 km²,采用 HBV-D 水文模型为研究工具,建立河流径流量与降雨的关系,分析嘉陵江流域的暴雨洪涝致灾阈值,为更好地开展风险预警服务提供参考依据.

1 资料与方法

1.1 资 料

气象数据来自于流域内 5 个气象站 2010—2015 年的逐日观测资料,包括日平均气温、最高气温、最低气温以及降水量.水文数据采用的是金溪水文站(106.35°E, 31.12°N)的 2010—2015 年的流量和水位资料.数字地面高程(DEM)为 90 m 分辨率的 SRTM 数据,土地利用数据和土壤持水力数据由四川省气候中心提供,土地利用数据的分辨率是 30 m,土壤持水力数据的分辨率是 1 km,数据时间均为 2010 年.

1.2 方 法

本研究采用 HBV-D 水文模型确定嘉陵江流域的致灾临界面雨量,具体方法如下:采用模型对嘉陵江流域金溪水文站以上段的水文过程进行模拟,根据流量和水位的关系,通过模型反演建立雨量—流量—水位之间的关系,推算出到达金溪站警戒水位和保证水位的临界面雨量.

1.3 HBV-D 模型介绍

HBV 水文模型是瑞典国家水文局(SMHI)开发研制的降水径流模型,是一个基于 DEM 划分子流域的半分布式概念模型^[19].HBV 模型到目前为止有很多个改进的版本,本研究采用的是 HBV-D 模型^[20],该模型由气象插值、积雪累积融化、蒸发量估算、土壤水分计算、径流产生等子模块构成,时间步长为日尺度.HBV-D 版本的模型与其他版本最大的区别是它增加了汇流时间,模拟了各子流域的径流过程后,在出口断面汇流形成径流.模型工作原理简单易懂,应用简便,只需输入研究区 DEM、日平均气温、降水、土地利用、土壤持水力和汇流时间等数据,就可以模拟径流,输出结果以径流深表示.模型有 50 多个参数,其中一部分参数可以根据其意义直接确定,另一部分则需要反复调试,以获得最佳模拟效果.

模型率定和验证时,使用由 Nash 等提出的 Nash 效率系数(Me)和水量平衡系数(WB)来判断模型的适用性.Nash 效率系数和水量平衡系数可以用来反映模型的误差, Me 和 WB 越接近 1,拟合效果越好.并且使用相关系数(R)来评价模型模拟径流和实测径流的相关程度, R 越接近 1,模拟效果越好.

$$Me = 1 - \frac{\sum (Q_o - Q_{sim})^2}{\sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2}$$

$$WB = \frac{\sum Q_{sim}}{\sum Q_o}$$

$$R^2 = \frac{[\sum (Q_o - \bar{Q}_o)(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})]^2}{\sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2}$$

式中, Q_o 和 $\bar{Q}_o$ 分别为观测流量及平均观测流量, Q_{sim} 和 $\bar{Q}_{sim}$ 分别为模拟流量及平均模拟流量.

2 数据准备与处理

为保证模型的正常运行,要对数据进行一些处理,统一坐标范围、空间分辨率和投影.数据的分辨

率(即像元大小)为 100 m,投影坐标为 Albers 等面积割圆锥投影,第 1 纬线、第 2 纬线、中央经线分别为 27°,45°,105°.

2.1 子流域划分

HBV 模型需要将流域划分为若干个子流域,根据各子流域的高程、土地利用类型、土壤持水力、汇流时间等进行水文模拟. 当今通常采用数字高程模型(DEM)生成流域河网、子流域划分、流域界限的确定以及提取流域地形参数^[21]. 本文使用 ArcGIS 软件从 DEM 数据中提取嘉陵江一部分流域(105°E—106.5 °E, 31°N—33°N),裁剪后面积为 13 190.9 km²,并用 MapWindow GIS 软件对流域进行划分,将金溪水文站设为出水口,调整参数后划分为 25 个子流域,如图 1 所示.

2.2 气象数据插值

模型构建使用的气象数据包括逐日的降水量、最高最低气温以及平均气温等资料,本文统计并整理了研究区域内 5 个气象站的气象数据、站点信息如表 1 所示,站点位置如图 1. 然后使用 R 语言软件,用 Kriging 方法将气象站的数据插值到各个子流域的中心点,得到对应子流域的面雨量和温度等.

表 1 气象站信息

站号	名称	经度/°	纬度/°	海拔/m
57208	剑阁	105. 47	32. 02	536
57217	旺苍	106. 28	32. 23	486
57303	苍溪	105. 92	31. 73	460
57306	阆中	105. 97	31. 58	383
57314	南部	106. 05	31. 35	365

2.3 汇流时间

汇流时间模块是 HBV-D 的一个主要特点,可以更准确地模拟各子流域的径流过程. 每个子流域河段的长度(L)不一样,用 ArcGIS 提取每个子流域的河流长度,通过公式 $T=L * 0.012/1\ 000$ 计算每个子流域的汇流时间.

2.4 径流模拟

将划分好的子流域数据、经过插值的气象数据、土壤持水力、土地利用数据以及汇流时间等分别处理成模型要求的格式,输入模型中进行径流模拟.

2.5 模型参数率定和验证

2.5.1 率定

选取 2013—2015 年金溪水文站逐日径流数据对 HBV 水文模型进行率定,采用 Nash 效率系数考察模拟结果与实测值的接

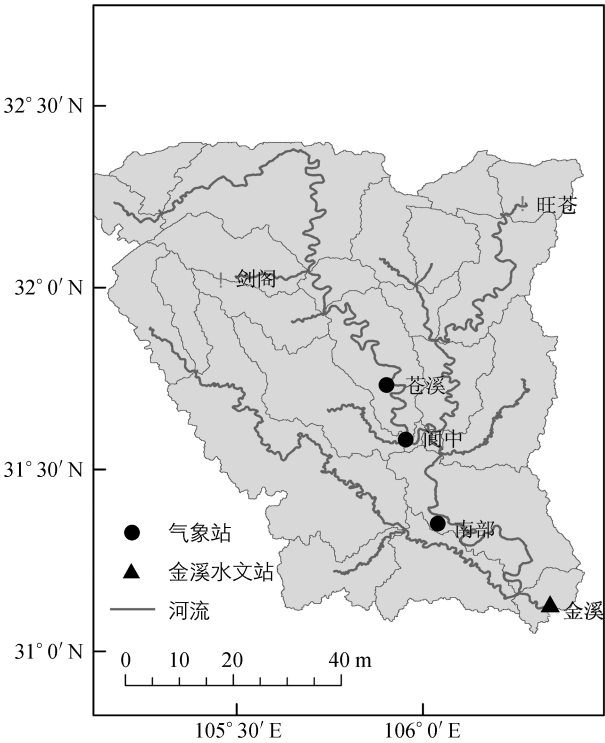


图 1 子流域划分

近程度, Nash 效率系数越接近 1, 模拟效果越好, 通过反复调整模型参数, 使 Nash 效率系数接近 1, 即模拟值与实测值获得最优拟合, 调整后的主要模型参数如表 2 所示.

经过计算, 调整后模型的 Nash 系数达到 0.68, 相关系数超过 0.82, 水量平衡系数 WB 为 1.0.

图 2 中给出了率定期内模拟和观测的日径流量曲线, 验证了模型在率定期的模拟结果很理想, 也表明模型在率定期内能有效模拟嘉陵江流域的水文过程和日径流量.

表 2 模型主要参数

参数名	参 数	值	参数名	参 数	值
TX	降雪阈值温度/℃	−0.42	INFMAX	最大渗透能力/(mm · d ^{−1})	2.0
TS	融雪阈值温度/℃	18.50	KUZ2	表层土壤消退系数 2/d	0.40
PKORR	降水对雨量的校正系数	1.25	UZ1	表层土壤含水阈值/mm	476
SKORR	降雪对寸量的校正系数	0.03	KUZ1	表层土壤消退系数 1/d	0.025
ERED	拦截时实际蒸散量系数	1.9	PERC	渗透系数/(mm · d ^{−1})	12.10
TTGRAD	无降水的温度梯度/(° · m ^{−1})	−0.55 × 10 ^{−2}	KLZ	深层土壤消退系数/d	0.002 8
TVGRAD	有降水的温度梯度/(° · m ^{−1})	−0.95 × 10 ^{−2}	DRAW	控制常量/(mm · d ^{−1})	0.003
PGRAD	降雨随高度递减率 1/100 m	0.5	SMINI	初始土壤湿度/mm	112.3
BETA	经验参数	1.8			

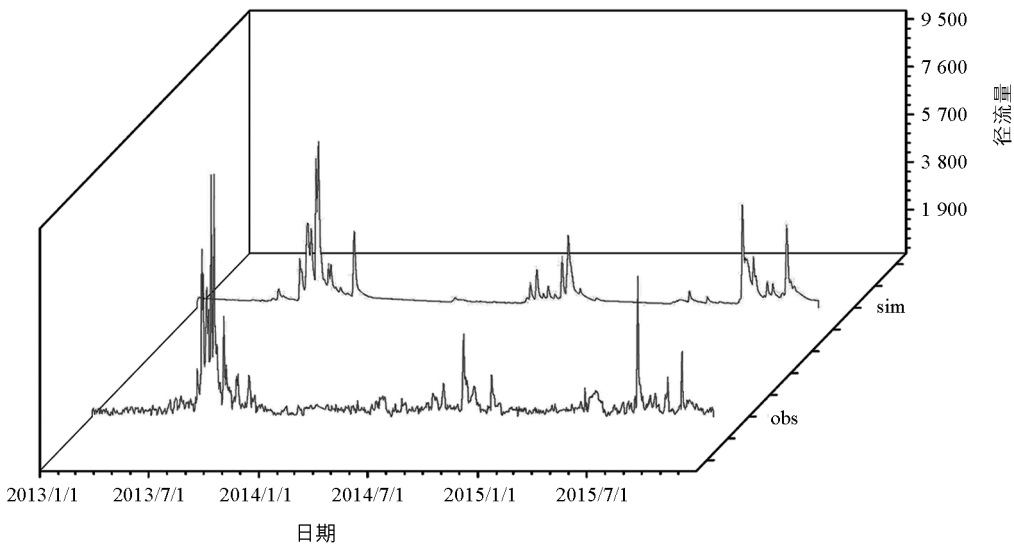


图 2 嘉陵江流域 HBV-D 模型率定期径流量模拟值 sim 和实测值 obs

2.5.2 验证

为进一步验证模型的稳定性和可靠性, 用前面率定好参数的模型, 选取 2010—2012 年作为验证期, 用模型进行水文模拟. 图 3 中给出了验证期模拟值和观测值的日径流量曲线, 可以看出两条曲线基本一致, 洪峰的模拟也较吻合. 经过计算, 验证期的 Nash 系数为 0.67, 相关系数 R 达到 0.82, 水量平衡系数为 0.94, 模拟精度较高, 这进一步表明 HBV-D 模型可以较好地模拟嘉陵江流域水文过程, 因此, 该模型可以用于确定嘉陵江流域的致灾临界面雨量.

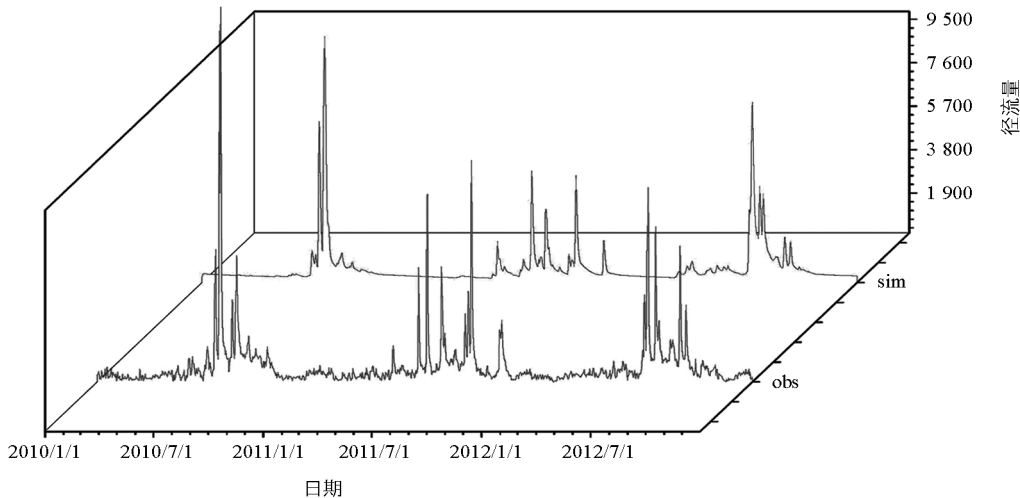


图 3 嘉陵江流域 HBV-D 模型验证期径流量模拟值 sim 和实测值 obs

3 HBV-D 模型在确定致灾临界面雨量上的应用

以上可知 HBV-D 水文模型对金溪水文站以上流域的径流模拟效果较好,通过模型模拟,得到的是径流深,径流深与径流量之间有一个适用关系,这个关系为

$$X = (L * 1\,000 * S) / (24 * 3\,600)$$

其中 X 为径流量(m^3/s), L 为径流深(m), S 为流域面积(km^2).

这样由 HBV 模型模拟就可以得到径流量与降水的关系,然而判断河道洪水是否致灾的直接指标是水位的大小,因此还需要确立水位和流量的关系,从而得到水位和降水的关系,作为确定致灾临界雨量的依据.通常河道的水位和流量存在一定的对应关系,在较长时期内只要河道变动不大就可以用一条单一的曲线表示,本文主要研究的是致洪降水,因此这里只考虑水位上涨后的水位与流量的关系.由于金溪水文站的起涨水位一般高于 295.6 m,因此本研究筛选出了 2010—2015 年的逐日平均水位不低于 295.6 m 的平均水位及其对应的流量,建立水位和流量的关系曲线(图 4).

暴雨洪涝灾害的发生除了与降水有很大的关系,还与河道的前期水位有关,前期基础水位较高,较少的降雨量也能使流域发生洪水过程,因此需要考虑不同前期基础水位的影响.由金溪水文站的多次洪水过程,选出不同前期基础水位且洪水发生当日面雨量小于 10 mm 的洪水过程,这里的前期基础水位指洪水发生前一日的水位,将洪水发生当日给定不同的面雨量,运行模型得到不同当日面雨量条件下的流量,根据上面得到的水位—流量关系,推求对应的水位,进而拟合出面雨量—水位关系曲线.分别在每一次洪水过程中,通过多次调整雨量进行模拟,便可以得到不同前期基础水位不同面雨量条件下的流量,再求出对应的水位,绘制出的面雨量—水位关系曲线(图 5).

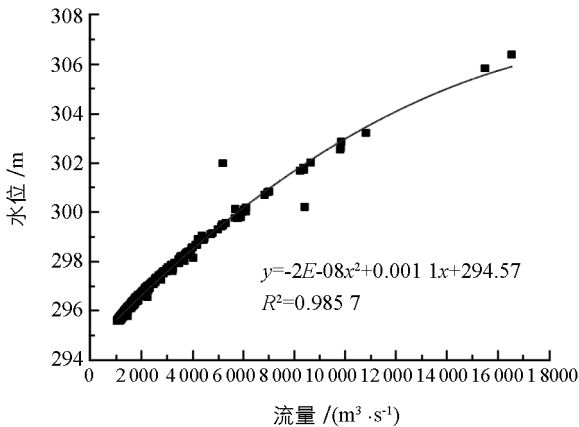


图 4 金溪站 295.6 m 及以上水位的水位—流量关系曲线

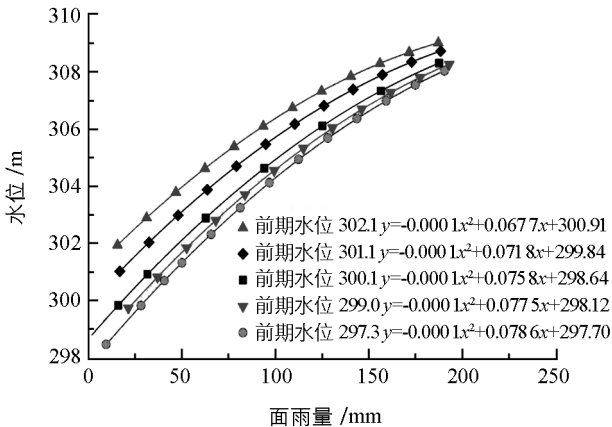


图 5 不同前期基础水位的面雨量—水位关系曲线

将金溪水文站的警戒水位(306.5 m)和保证水位(308.7 m)作为临界判别条件,代入到图中的水位—面雨量关系式中,得到不同前期基础水位下对应的不同判别条件的 24h 临界面雨量(表 3). 将不同判别条件推求出的临界面雨量与对应的前期基础水位点绘出来,便得到金溪水文站不同判别条件对应的临界面雨量曲线(图 6). 由图可以看出临界雨量值随着前期基础水位升高而减小,也就是说,当河流水位较高时,即使较小的降水也有可能导致洪涝灾害.

表 3 嘉陵江流域致灾临界面雨量

前期基础水位/m	临界面雨量/mm	
	达到警戒水位	达到保证水位
297.3	135.22	182.17
299.0	129.90	176.89
300.1	123.97	171.54
301.1	109.44	158.30
302.1	96.26	146.97

4 结论与讨论

基于分布式水文模型 HBV-D 对嘉陵江流域金溪水文站以上段的日径流过程进行模拟,考虑了前期基础水位的影响,通过降水—径流—水位的关系确定了暴雨洪涝致灾阈值. 结果表明:① HBV-D 模型能较好地模拟出金溪以上段流域对降水的响应过程,与实际情况基本吻合,可以用于确定嘉陵江流域的暴雨洪涝致灾阈值. ② 以警戒水位和保证水位为临界判别条件,确定了不同前期基础水位下嘉陵江流域的致灾临界 24 h 面雨量值.

应用 HBV-D 水文模型确定了金溪水文站暴雨洪涝致灾临界面雨量,效果较理想,但仍然存在不足,由于资料限制,没能多选出几年进行验证. 土壤持水力与土地利用数据的时间均为 2010 年,在其他年份的径流模拟时,可能存在一定的偏差,并且只是针对嘉陵江流域,文中的方法对其他流域的适用性需要进一步考证.

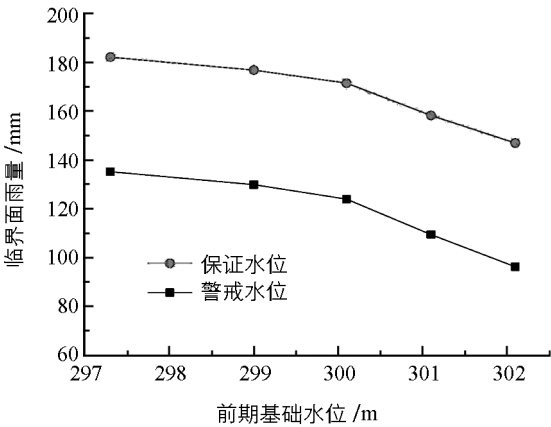


图 6 不同前期基础水位下的临界面雨量

参考文献:

[1] 秦大河. 影响我国的主要气象灾害及其发展态势 [J]. 中国应急救援, 2008(6): 4—6.

[2] MARTINA M L V, TODINI E, LIBRALON A. A Bayesian Decision Approach to Rainfall Thresholds Based Flood Warning [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2006, 10(3): 413—426.

[3] 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.

[4] 段生荣. 典型小流域山洪灾害临界雨量计算分析——以黄河流域大通河支流为例 [J]. 中国农村水利水电, 2008(8): 63—65.

[5] 樊建勇, 单九生, 管珉, 等. 江西省小流域山洪灾害临界雨量计算分析 [J]. 气象, 2012, 38(9): 1110—1114.

[6] 卢燕宇, 谢五三, 田红. 基于水文模型与统计方法的中小河流致洪临界雨量分析 [J]. 自然灾害学报, 2016, 25(3): 38—47.

[7] 张亚萍, 刘德, 廖峻, 等. 一种基于水文模拟建立中小河流洪水气象风险等级指标的方法 [J]. 暴雨灾害, 2012, 31(4): 351—357.

[8] 高蓓. 官厅水库流域致灾临界面雨量及洪灾风险分析 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.

[9] 张晨琛, 胡铁鑫, 于秀晶, 等. 吉林省中小河流暴雨致灾临界面雨量域值研究 [J]. 气象灾害防御, 2016, 23(3): 30—33.

[10] 孟玉婧, 白美兰, 李喜仓, 等. 基于 HBV 水文模型的西拉木伦河流域洪水临界面雨量的应用分析 [J]. 内蒙古气象, 2015(4): 14—17.

[11] 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.

[12] 张亚杰,吴慧,吴胜安,等. 南渡江流域暴雨洪涝致灾临界面雨量的确定 [J]. 应用气象学报, 2014, 25(6): 731—740.

[13] 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.

[14] 高歌,陈德亮,徐影. 未来气候变化对淮河流域径流的可能影响 [J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 741—748.

[15] 包红军. 中小流域暴雨致洪临界面雨量阈值确定技术研究 [C] //创新驱动发展提高气象灾害防御能力——S3 第三届气象服务发展论坛——公众、专业气象预报服务技术与应用. 中国气象学会, 2013: 8.

[16] 彭涛,位承志,叶金桃,等. 汉江丹江口流域水文气象预报系统 [J]. 应用气象学报, 2014, 25(1): 112—119.

[17] 刘鸣彦,王颖,郑石,等. 清原地区“0816”洪水灾害临界雨量分析 [J]. 气象与环境学报, 2015, 31(5): 25—30.

[18] 姬兴杰,李凤秀,朱业玉,等. 河南省洛河上游暴雨山洪致灾临界面雨量的确定 [J]. 气象与环境学报, 2015, 31(6): 43—50.

[19] BERGSTROM S. The HBV Model: Its Structure and Applications [M]. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 1992.

[20] KRYSANOVA V. Modelling River Discharge for Large Drainage Basins: from Lumped to Distributed Approach [J]. Hydrological Sciences Journal, 1999, 44(2): 313—331.

[21] 何丽丽,刘洪斌,孙艳玲. 数字高程模型在分布式水文建模中的应用——以三峡库区晏家河小流域为例 [J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(3): 406—409.

A Study of Thresholds of Rainstorm-Flood Hazard Based on HBV-D Hydrological Model Over the Jialing River Basin

SONG Nan¹, MA Zhen-feng², FAN Guang-zhou¹,
GUO Hai-yan², XU Yuan-xin²

1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;
2. Sichuan Meteorological Centre, Chengdu 610072, China

Abstract: In a case study of the upstream basin of the Jinxi Hydrologic Station in the Jialing River of Sichuan, the area precipitation threshold values of rainstorm-flood hazard were determined based on the distributed hydrological model HBV-D. The results showed that this model was well applicable to the upper Jialing River Basin. The Nash efficiency index in the calibration period of 2013—2015 and the verification period of 2010—2012 was 0.68 and 0.67, respectively, and the correlation coefficients were over 0.82. According to the relationship among area rainfall, runoff and water level established based on retrieval, curves of 24-hour area precipitation and different previous water levels were determined. Finally, according to the critical criteria-warning water level (306.5 m) and safety water level (308.7 m) at the Jinxi Hydrologic Station, the area precipitation thresholds in different previous water levels were determined.

Key words: the Jialing River Basin; hydrological model of HBV-D; area precipitation thresholds of rainstorm-flood hazard