

包红军,林建,曹爽,等,2020. 基于流域地貌的中小河流致洪动态临界面雨量阈值研究[J]. 气象,46(11):1495-1507. Bao H J, Lin J, Cao S, et al, 2020. Topography-based dynamic critical arearainfall threshold for small to middle-sized river flood warning [J]. Meteor Mon, 46(11):1495-1507 (in Chinese).

## 基于流域地貌的中小河流致洪动态 临界面雨量阈值研究\*

包红军<sup>1,2</sup> 林 建<sup>1,2</sup> 曹 爽<sup>1,2</sup> 王 蒙<sup>1,2</sup>

1 国家气象中心,北京 100081

2 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室,北京 100081

**提 要:** 构建基于流域下垫面地形地貌的中小河流致洪动态临界面雨量阈值移植技术,旨在提出一种解决无资料中小流域洪水预警方法。选取影响中小河流致洪的四个流域特征信息:面积、河道坡度、土地利用类型和土壤类型,建立基于流域土壤饱和度的致洪动态临界面雨量阈值与四个流域特征数据之间的指数模型;将指数模型移植至无资料或缺资料中小流域,根据待求的四个流域特征确定致洪动态临界面雨量阈值。选取我国东部亚热带季风气候区的淮河潢川流域、钱塘江屯溪与渔梁流域、太湖西苕溪与南苕溪流域五个中小流域为试验流域,以警戒洪水为例,结合流域长序列水文气象资料,基于 GMKHM 分布式水文模型分别推求出潢川、渔梁、西苕溪与南苕溪流域致洪动态临界面雨量阈值;依据建立的指数模型,推求确定屯溪流域致洪动态临界面雨量阈值,并与基于长序列水文气象资料反演出的动态临界面雨量阈值在屯溪流域 35 场典型洪水预警中的效果对比验证。结果表明,本研究构建的中小河流洪水致洪动态临界面雨量阈值模型与基于长序列水文气象资料的动态临界面雨量阈值反演模型在屯溪流域洪水预警效果相近,命中率为 91.4%,对无资料中小河流洪水预报预警与山洪灾害预警均有一定的借鉴意义。

**关键词:** 中小河流洪水预警,动态临界面雨量阈值,指数模型,地形地貌,GMKHM 分布式水文模型,中国东部

**中图分类号:** P49, P641

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.010

## Topography-Based Dynamic Critical Arearainfall Threshold for Small to Middle-Sized River Flood Warning

BAO Hongjun<sup>1,2</sup> LIN Jian<sup>1,2</sup> CAO Shuang<sup>1,2</sup> WANG Meng<sup>1,2</sup>

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological Studies, Beijing 100081

**Abstract:** A topography-based dynamic critical arearainfall threshold model was developed for solving flood warning of the ungauged and small to middle-sized basin in this paper. The exponential equation model between dynamic critical arearainfall threshold and four main characteristic factors was established. The four main characteristic factors include basin area, channel slope, land use and soil type, which affect the flood generation processes primarily in small to middle-sized basins. Dynamic critical arearainfall threshold in the ungauged basin is calculated with the developed exponential equation model of the gauged basins and four main characteristic factors of the ungauged basin. Five small to middle sized basins in the subtropical monsoon climate region of eastern China were selected as the test basins, including Huangchuan Basin of Huaihe

\* 国家重点研发计划(2018YFC1508102、2018YFC1507205、2016YFC0402702)、国家自然科学基金项目(41775111、41875131)、国家气象中心 2019 年现代化项目(1-13)、2020 年青年基金项目(Q202004、Q202006)和 2020 年科技成果转化基金项目(K202004)共同资助

2019 年 12 月 23 日收稿; 2020 年 8 月 28 日收修定稿

第一作者:包红军,主要从事水文气象与气象灾害风险业务与科研工作. E-mail: baohongjun@cma.gov.cn

River, Tunxi and Yuliang basins of Qiantang River, Xitiaoxi and Nantiaoxi basins of Taihu Lake. Taking the warning flood as an example, dynamic critical arearainfall thresholds of Huangchuan, Yuliang, Xitiaoxi and Nantiaoxi basins were inversed with the long-term hydrological and meteorological data by the GMKHM hydrological distributed model. According to the developed critical threshold model, dynamic critical arearainfall threshold of Tunxi Basin was calculated based on the developed exponential equation model. The topography-based dynamic critical arearainfall threshold was applied to flood warning verification of 35 representative flood events in Tunxi Basin. The results show that flood warning hit rate based on the topography-based dynamic critical arearainfall threshold is 91.4%, which is close to that on the basis of dynamic critical arearainfall threshold calculated with long-term hydrological and meteorological data in Tunxi Basin. The developed topography-based dynamic critical arearainfall threshold model has certain reference significance for similar flood warning of ungauged basins and flash flood warning.

**Key words:** flood warning of small to middle-sized basin, dynamic critical arearainfall threshold, exponential equation model, topography, GMKHM distributed hydrological model, eastern China

## 引 言

我国洪水灾害频繁发生,据统计,在我国一般年份洪水损失中,发生在中小河流上的占总损失的70%~80%[水利部水文局(水利信息中心),2010]。我国中小河流众多,流域面积在100~1000 km<sup>2</sup>的河流有5万多条,覆盖了85%的城镇及广大农村地区。中小河流防汛标准普遍偏低,洪水频发,灾害严重,2000—2010年的10年间,在由洪水造成的人员死亡中有近70%以上发生在中小河流上,给人民生活与财产损失造成很大的威胁(刘志雨等,2010;叶金印等,2014)。突发性强降水是导致洪灾损失严重的主要因子之一,中小河流洪水预报预警作为一项重要的防洪减灾非工程措施,是减少洪灾损失的最重要手段和方法之一(包红军等,2016c;2017)。

近年来,面对世界范围内越来越严重的中小河流洪水灾害,很多国家已经或正在研发有效的中小河流洪水监测预警预报系统和洪水管理方法,力求使灾害程度达到最小(Georgakakos,2006;Norbiato et al,2008;2009;Clark et al,2014;刘志雨等,2010;叶金印等,2014)。其中应用比较广泛的是美国天气局下属的水文研究中心开发的Flash Flood Guidance System(FFGS),在美国本土、中美洲及亚欧部分流域被广泛应用(Zogg and Deitsch,2013)。另外,美国马里兰大学和美国国家河流预报中心提出的基于分布式水文模型的预报系统(HEC-DHM)、意大利ProGEA公司研发的耦合TOPKAPI水文模型的预报预警系统(Bartholmes and Todini,2005)、日本国际合作社研发的加勒比海地区早期预

警系统等(Oishi et al,2014)在中小河流洪水预报预警中也取得了较好的应用效果。近10年来,世界气象组织也在积极推进洪水气象风险预警与影响预报,并在南亚开展基于社区单元的一体化洪水预警与管理示范项目。在国内,河南省水利厅采用HEC-HMS流域水文模型与单位线技术,建立中小河流预警预报系统。近年来,中国气象局组织气象灾害风险管理业务,在暴雨诱发中小河流洪水气象风险预警技术上取得较为明显进展;卢燕宇和田红(2015)利用HBV水文模型建立淮河上游降水-流量-水位关系,反推致洪临界面雨量阈值进行流域洪水预报预警;彭涛等(2014)基于新安江水文模型建立漳河流域基于临界雨量的中小河流洪水预报预警模型;叶金印等(2014)根据多年气象水文资料建立基于动态临界雨量的渭河流域预报预警模型;包红军(2014;2016)针对暴雨诱发的中小河流洪水气象风险预警技术,应用高分辨率GIS技术和DEM,提取中小河流特征信息;基于流域水文模型推求有完整气象水文资料的中小河流致洪动态临界面雨量阈值预警技术和基于水文频率分析的仅有降水资料而开会的中小河流洪水致洪动态临界面雨量阈值预警技术,取得了良好的应用成果。

目前,中小河流洪水预警技术主要可以分为两类:一类为基于高分辨率的分布式水文模型预报出每个子流域(或者网格点)的径流过程、洪峰等洪水特征,根据河流防洪标准,发布洪水预警,在实际使用时往往由于水文资料缺乏难以推广应用;另一类是动态临界(面)雨量阈值法,通过流域水文模型反演致洪临界(面)雨量的动态阈值,基于实时流域(面)雨量预报,发布洪水预警。后者是目前中小河

流洪水预报预警中更为常用的方法。但在我国部分中小河流流域,常常存在既无长序列水文资料,又缺少长序列降水资料。如何获取流域致洪降水动态临界界面雨量阈值是实现无资料中小河流洪水预报预警的关键技术之一。

本研究提出一种基于流域地形地貌特征信息的中小河流致洪动态临界界面雨量阈值推求方法:通过将完整长序列水文气象资料推求出的致洪动态临界界面雨量阈值,移植至无资料或缺资料中小流域,基于流域地形地貌特征确定致洪动态临界界面雨量阈值。选择我国东部亚热带季风气候区的淮河潢川流域、钱塘江屯溪与渔梁流域、太湖西苕溪与南苕溪流域等五个中小流域为试验流域,其中浙北密赛流域、西苕溪流域、皖南渔梁流域、淮河潢川流域、蒋家集流域为有完整长序列水文气象资料,建立致洪动态临界界面雨量阈值与流域地形地貌的指数模型,将其移植到屯溪流域,以警戒洪水为例,在流域典型洪水预警中验证基于流域地形地貌的致洪临界界面雨量阈值确定技术的适用性。

## 1 基于流域地形地貌的中小河流致洪临界界面雨量阈值确定技术

近 20 年来,基于流域地形地貌信息开展中小河流洪水预报预警的研究很多,以国际水文科学协会(IAHS)的无资料流域预测(PUB)计划最为典型(Sivapalan et al, 2003; 贾仰文等, 2005)。研究提出,在中小河流流域,流域面积、坡度、植被覆盖和土壤组成类型在很大程度上决定了流域降雨径流与洪水形成的高度非线性响应程度与洪水风险的脆弱性,结合有观测资料相似流域水文特征进行洪水预报预警是解决无资料或缺资料流域洪水问题的重要手段(刘苏峡等, 2010; Bárdossy and Singh, 2008; Foody et al, 2004; Vieux et al, 2004; Chahinian et al, 2005; Yao et al, 2012; Bao et al, 2011; 2017; 章国材, 2010; 包红军等, 2016a; 2016b; 2017)。因此,本研究基于利用有资料中小河流洪水致洪临界阈值确定成果,提出适用于无资料或缺资料流域的基于流域地形地貌的致洪动态临界界面雨量阈值确定技术。

### 1.1 有资料中小河流洪水气象风险预警临界阈值确定技术

中小河流洪水的大小除了与降雨总量、降雨强度有关外,还和流域初始状态(土壤含水量)密切相

关。当土壤较干(湿)时,降水下渗量大(小),产生地表径流量则小(大)。因此,在建立中小河流洪水气象风险预警阈值时,应该考虑防治区的中小流域土壤含水量情况。土壤含水量指标可采用土壤含水量饱和度,由水文模型输出。随着流域土壤饱和度的变化,中小河流洪水气象风险预警阈值也会随之发生变化,故称之为动态临界阈值(面雨量)。

根据流域的土壤含水量饱和度和雨量绘制 X-Y 散点图, X 轴为土壤含水量饱和度, Y 轴为雨量。以 24 h 雨量为例,针对历史资料系列中流域发生过的洪水(不分大小),分别计算前 24 h 雨量以及发生之前的土壤饱和度。

将土壤饱和度和最大 24 h 雨量绘制成 X-Y 散点图,并根据其对应的洪水过程是否超过警戒流量分为两类,用中小河流洪水临界雨量阈值线(非线性)作为判别函数,将土壤含水量饱和度和最大雨量组成的状态空间分为两个部分,作为系统模式识别进行研究。本文应用基于幂函数的最小均方差准则算法[水利部水文局(水利信息中心), 2010; 叶金印等, 2014; 包红军, 2016],建立不同土壤含水量饱和度下的中小河流洪水气象风险预警判别函数。

定义幂函数判别函数:

$$d(\mathbf{x}) = w_1 x_1^{a_1} + w_2 x_2^{a_2} + w_3 = \mathbf{w} \mathbf{x}^{\mathbf{A}} \quad (1)$$

式中:判断函数  $d(\mathbf{x})$  为动态临界阈值曲线,  $\mathbf{x}$  为流域土壤饱和度。  $\mathbf{x} = (x_1^{a_1}, x_2^{a_2}, 1)$  为增广特征矢量,  $\mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3)$  为增广权矢量。此时增广特征矢量的全体被称为增广特征空间。根据判别函数  $d(\mathbf{x})$  的值来判断  $\mathbf{x}$  的类别(即是否超洪水风险指标)。一般情况下,由于洪水形成的高度非线性,很难有完全一致的判别结果。因此,所求得的权矢量应该尽可能使被错分的训练模式最少。

以安徽南部屯溪流域为例,利用屯溪流域雨量站降雨资料以及屯溪水文站流量资料,采用 GMKHM 分布式水文模型(Bao et al, 2017)计算流域土壤含水量饱和度,根据土壤含水量饱和度和中小河流洪水发生前 24 h(国家级中小河流风险预警时效为 24 h)的最大雨量,应用基于幂函数的最小均方差准则的 Widrow-Hoff(W-H) 算法,建立中小河流洪水预警非线性判别函数,得出在不同土壤含水量饱和度下的 24 h 预报时效的中小河流洪水气象风险预警临界阈值(图 1; 包红军, 2014)。

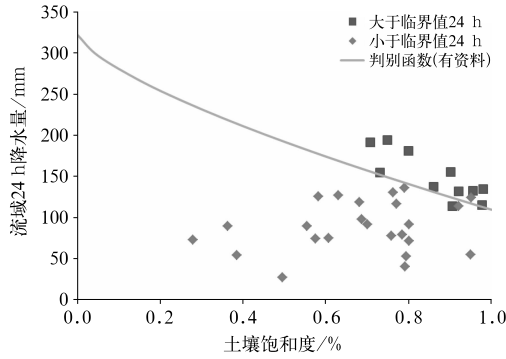


图 1 基于多年水文气象资料反演的  
屯溪流域 24 h 超警戒水位洪水预警  
临界动态面雨量阈值(包红军,2014)

Fig. 1 Dynamic critical 24 h arearainfall  
threshold based on the long-term hydrological  
and meteorological data for Tunxi  
Basin flood warning (Bao, 2014)

## 1.2 基于流域地形地貌的致洪动态临界面雨量阈值确定技术

这里以警戒洪水为例,推导基于流域地形地貌的中小河流流域致洪动态临界面雨量阈值。

除降水以外,流域面积、河道坡度、土地利用类型与土壤类型主要决定流域致洪的水文过程相关度,表 1 是受河道坡度、土地利用类型、土壤类型主要影响的水文过程表。在本研究中,以警戒洪水为例,选取影响中小河流致洪过程的流域面积、河道坡度、土地利用类型和土壤类型四个因素,构建致洪临界面雨量阈值与其指数的关系,建立基于流域地貌的中小河流流域致洪动态临界面雨量阈值模型。其中,流域面积和河道坡度由流域面积指数和河道坡度指数量化表示,土地利用类型与土壤类型采用土地利用类型指数和土壤类型指数量化(姚成,2007)。

表 1 河道坡度、土地利用类型、土壤类型  
主要影响的水文过程

Table 1 Hydrologic process affected by channel slope,

land use and soil type

| 序号 | 水文过程模块   | 主要影响因素      |
|----|----------|-------------|
| 1  | 冠层截留     | 土地利用类型      |
| 2  | 蒸散发      | 土地利用类型、土壤类型 |
| 3  | 产流       | 土地利用类型、土壤类型 |
| 4  | 坡面汇流     | 土地利用类型      |
| 5  | 地下(壤中)汇流 | 土壤类型        |
| 6  | 河道汇流     | 河道坡度        |

假定由流域长序列水文气象资料反演确定的中小河流域致洪动态临界阈值为  $P_{\text{threshold}}$ ,建立该流域动态临界阈值  $P_{\text{threshold}}$  与流域面积、河道坡度、土地利用类型和土壤类型量化关系。考虑四个因素之间衡量的差异,将其统一归一化为取值在(0,1)的流域面积指数(A)、河道坡度指数(S)、土地利用类型指数(L)和土壤类型指数( $S_i$ )的量化关系:

$$P_{\text{threshold}} = b_1 A^{b_2} S^{b_3} L^{b_4} S_i^{b_5} \quad (2)$$

式中: $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  为待定参数,A、S、L、 $S_i$  取值在(0,1)。

对式(2)取对数,得到:

$$\ln P_{\text{threshold}} = \ln b_1 + b_2 \ln A + b_3 \ln S + b_4 \ln L + b_5 \ln S_i \quad (3)$$

令  $Y^* = \ln P_{\text{threshold}}, b'_1 = \ln b_1, X_1^* = \ln A, X_2^* = \ln S, X_3^* = \ln L, X_4^* = \ln S_i$ ,则式(3)可写成:

$$Y^* = b'_1 + b_2 X_1^* + b_3 X_2^* + b_4 X_3^* + b_5 X_4^* \quad (4)$$

通过对式(4)做多元线性回归,求出  $b'_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  参数值。 $b_1$  由  $b'_1 = \ln b_1$  反推获取。

假定待求的中小河流 A 为  $A_u, S$  为  $S_u, L$  为  $L_u$  和  $S$  为  $S_{i_u}$ ,代入式(2),即可得到该流域的致洪临界面雨量阈值  $P_{\text{threshold}}^{\text{待求}}$ 。

在本研究中,中小河流流域的 A、S、L 和  $S_i$  根据以下方法推求:

一般认为中小河流指流域面积大于 200 km<sup>2</sup> 并小于 3 000 km<sup>2</sup> 的河流(水利部水文局,2008)。因此,根据 Zogg and Deitsch(2013),定义 A 的计算公式为:

$$A = \frac{10^{\frac{A_i - 200}{3000 - 200}}}{10} \quad (5)$$

式中  $A_i$  为流域面积(单位:km<sup>2</sup>)。

河流河道坡度是中小河流发生洪水潜势的重要组成部分,考虑到中小河流坡陡流急特点,根据 Zogg and Deitsch(2013)和水利部水文局(水利信息中心)(2010)的研究,流域河道平均坡度超过 30% 极易导致快速径流,形成中小河流洪水。因此,定义 S 的选择研究流域三级河流河道平均坡度:

$$S = \frac{10^{\frac{S_i}{0.3}}}{10} \quad (6)$$

式中  $S_i$  为流域河道平均坡度,如果  $S_i > 0.3$ ,则  $S = 1.0$ 。

根据 Zogg and Deitsch(2013)、Lazrus et al (2013)和姚成(2007)的研究,将 L 和  $S_i$  做归一化,具体取值见表 2 和表 3。

表 2 不同土地利用类型的中小河流洪水潜在指数  
Table 2 Flood potential index of small to medium-sized rivers with different land use types

| 序号 | 土地利用类型 | $L$ |
|----|--------|-----|
| 1  | 水体     | 0.1 |
| 2  | 空地     | 0.7 |
| 3  | 轻度开发用地 | 0.8 |
| 4  | 中度开发用地 | 0.9 |
| 5  | 重度开发用地 | 1.0 |
| 6  | 荒地     | 0.8 |
| 7  | 落叶阔叶林  | 0.5 |
| 8  | 常绿阔叶林  | 0.3 |
| 9  | 混交林    | 0.4 |
| 10 | 灌木林    | 0.6 |
| 11 | 草地     | 0.6 |
| 12 | 牧草/干草  | 0.5 |
| 13 | 耕地     | 0.5 |
| 14 | 湿地     | 0.2 |

表 3 同表 2, 但为土壤类型  
Table 3 Same as Fig. 2, but for soil types

| 序号 | 土壤类型    | $S_i$ |
|----|---------|-------|
| 1  | 砂土      | 0.2   |
| 2  | 壤砂土     | 0.4   |
| 3  | 砂壤土     | 0.3   |
| 4  | 粉壤土     | 0.4   |
| 5  | 淤泥      | 0.5   |
| 6  | 壤土      | 0.6   |
| 7  | 砂质黏壤土   | 0.7   |
| 8  | 粉质黏壤土   | 0.7   |
| 9  | 黏壤土     | 0.8   |
| 10 | 砂质黏土    | 0.8   |
| 11 | 粉质黏土    | 0.8   |
| 12 | 黏土      | 0.9   |
| 13 | 有机物     | 0.5   |
| 14 | 水体      | 0.1   |
| 15 | 基岩/不透水层 | 1.0   |

2 研究流域与数据

2.1 研究流域

选择皖南屯溪流域作为基于流域地形地貌的动态临界阈值待求的中小流域, 浙北密赛流域、西苕溪流域、南苕溪流域、皖南渔梁流域和淮河潢川流域作为有长序列水文气象资料的中小河流试验流域。

屯溪流域位于安徽省境内皖南山区, 邻近中国东南沿海, 属亚热带季风气候区。该地区四季分明, 气候温和, 多年平均气温约为 17℃。屯溪流域面积

为 2693 km<sup>2</sup>, 地势西高东低, 最大、最小以及平均海拔分别为 1398、116 和 380 m, 相对高差较大。流域雨量充沛, 多年平均雨量约为 1800 mm, 降水在年内年际分配极不均匀, 汛期内的雨量一般占年总雨量的 60% 以上。屯溪流域内植被良好, 主要包括常绿针叶林、落叶阔叶林、混合林、灌木林、牧草地与耕地, 土壤类型主要为壤土、砂质黏壤土、砂壤土和壤砂土(图 2)。

密赛流域位于浙江省开化县境内, 系温湿山丘区, 雨量丰沛, 植被良好, 年降水量为 1500~2000 mm。其主干流马金溪全长为 100.3 km, 河道弯曲, 坡陡流急滩多。密赛流域面积为 797 km<sup>2</sup>, 位于 29°07'~29°40'N、118°00'~118°40'E(图 3)。

西苕溪流域位于浙江省湖州市境内, 流域内现有人口 57.6 万, 流域面积为 2268 km<sup>2</sup>, 多年平均降水量为 1385.9 mm。流域地势西南高、东北低, 依次呈山地、丘陵、平原的梯度分布, 但以低缓丘陵为主。流域内土地利用类型齐全, 以林地为主, 其次是耕地、草地、工矿及居民用地、园地及未开发地。其中, 土地利用类型主要为常绿阔叶林、混合林、灌木林、牧草地与耕地, 其中竹林占林地的 46% 以上, 水田占约耕地的 86%; 以壤土、砂质黏壤土、壤砂土为主。西苕溪自西南向东北流向太湖(图 4)。

南苕溪是太湖的源头水系, 为苕溪流域上游分支, 干流长 63 km, 流域面积为 720 km<sup>2</sup>, 为东苕溪主源, 发源于天目山南麓临安临目马尖岗。流域地势西北高, 东南部低, 降雨主要集中在下半年, 年平均雨量为 1561 mm, 流域以壤土为主(图 5)。

渔梁流域为钱塘江上游干流新安江主要支流之一, 位于新安江左岸, 发源于黄山之东麓, 由丰乐水、富资水、布射水、杨之水(练河)4 条河于歙县汇合后流入新安江, 河长为 65 km, 流域面积为 1599 km<sup>2</sup>, 以壤土为主(图 6)。

潢河为淮河上游重要支流, 发源于新县万子山, 由颍孜镇两河村流入淮河, 干流全长为 140 km, 潢川站以上流域面积为 2050 km<sup>2</sup>, 多年平均径流为 12 亿 m<sup>3</sup>, 最大流量为 3726 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>(1968 年), 河道纵坡降约为千分之 1.18 m。潢水流域属亚热带湿润季风气候区, 冬季雨水偏少, 春季阴雨绵绵, 夏秋闷热多雨, 冷暖和旱涝转变急剧, 流域地形从西南向东北由高向低, 土壤类型以壤土和砂质黏壤土为主。

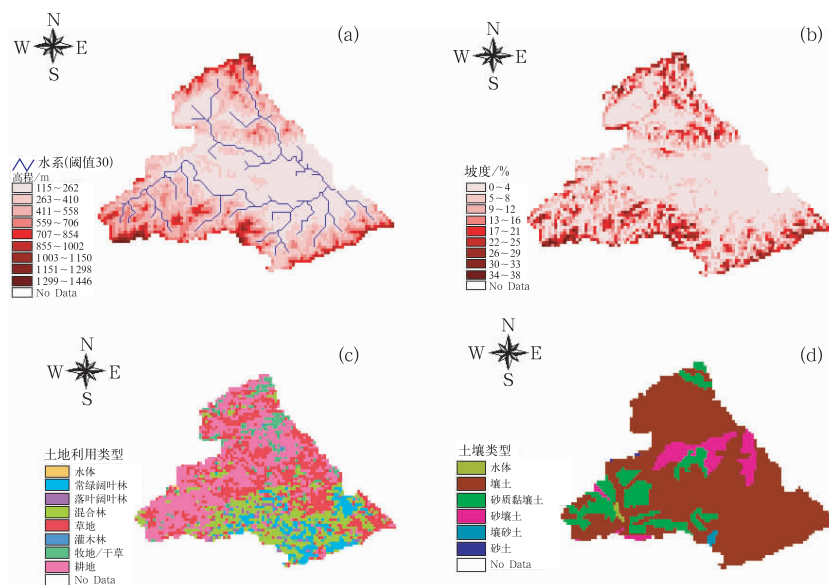


图 2 屯溪流域地形(a)、坡度(b)、土地利用类型(c)与土壤类型(d)

Fig. 2 Topography (a), slope (b), land use (c) and soil type (d) of Tunxi Basin

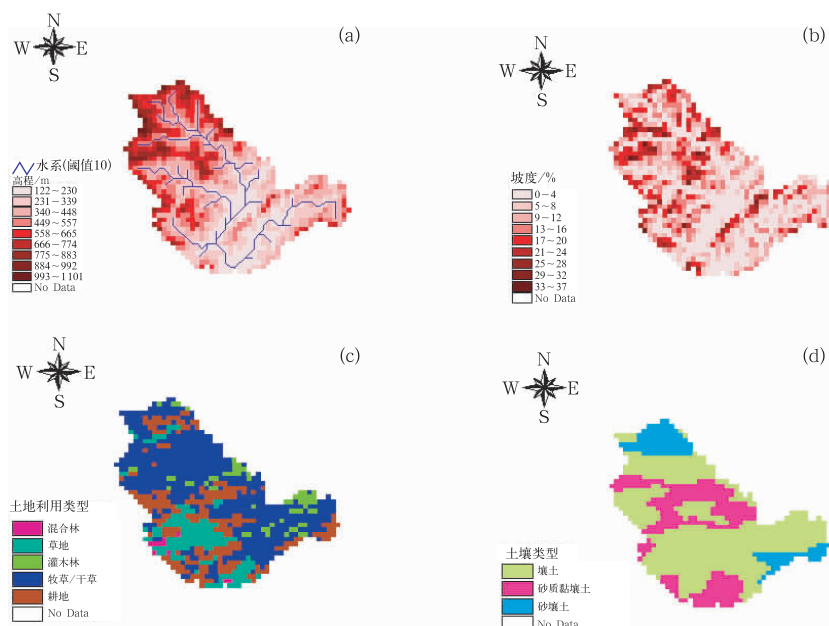


图 3 同图 2, 但为密赛流域

Fig. 3 Same as Fig. 2, but in Misai Basin

## 2.2 流域地形地貌与水文气象数据

所用  $30'' \times 30''$  分辨率的数字高程 (digital elevation model, DEM) 数据是由美国国家地质调查局提供 (<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/>)

(<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/>),  $30'' \times 30''$  分辨率的植被覆盖数据和  $30'' \times 30''$  分辨率的土壤类型数据分别由联合国粮农组织 (FAO) 和维也纳国际应用系统研究所 (IIASA) 共同构建的世界土壤数据库 (HWSD) 提供 (<http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home>)。

流域水文气象资料来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)与《中华人民共和国水文年鉴》(水利部水文局,1998—2008),收集屯溪、密赛、西苕溪、南苕溪、渔梁与潢川流域 1980—2008 年日尺度典型洪水的小时尺度水文气象资料。降水资料采

用反距离权重法(芮孝芳,2004),插值为  $30'' \times 30''$  空间分辨率的网格点降水,作为 GMKHM 分布式水文模型的输入大气强迫,六个流域的降水与水文站信息如表 4 所示。

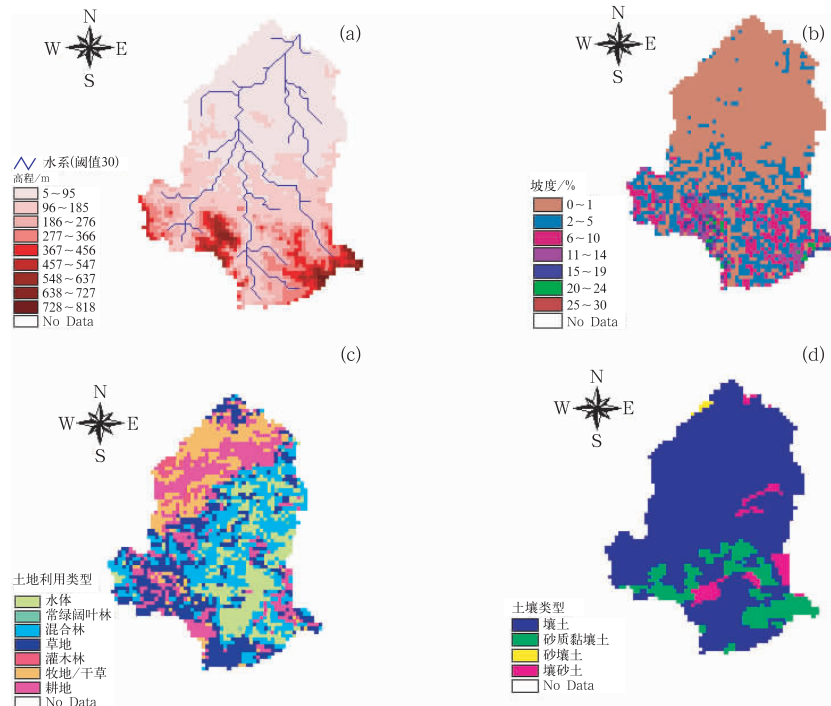


图 4 同图 2,但为西苕溪流域

Fig. 4 Same as Fig. 2, but in Xitiaoxi Basin

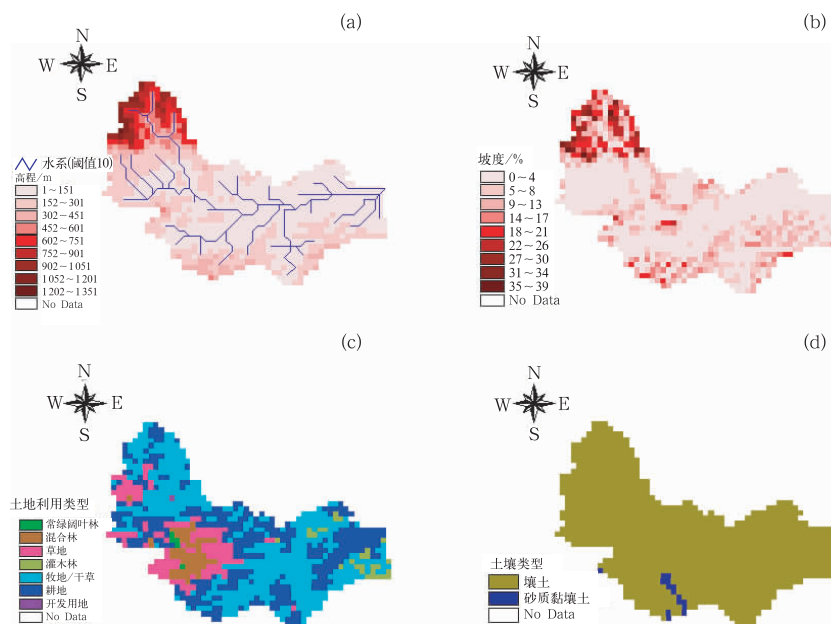


图 5 同图 2,但为南苕溪流域

Fig. 5 Same as Fig. 2, but in Nantiaoxi Basin



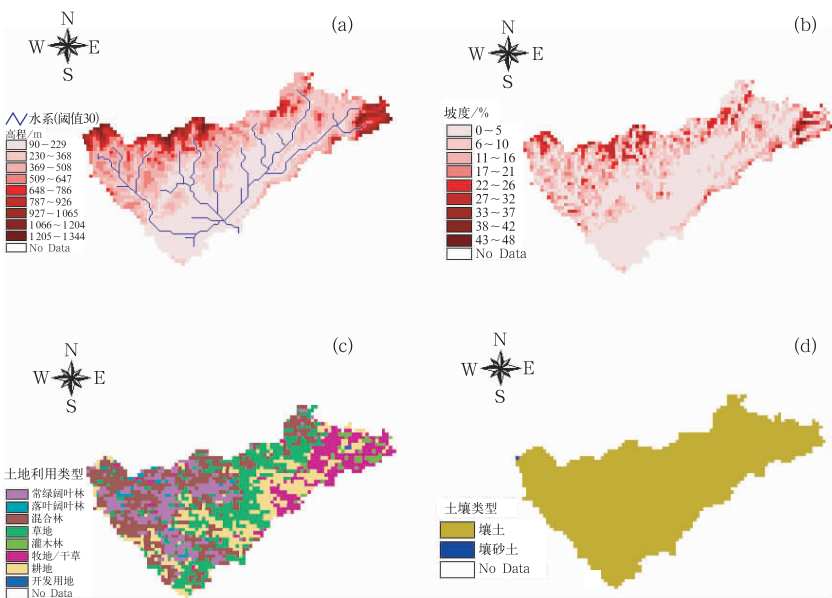


图 6 同图 2,但为渔梁流域  
Fig. 6 Same as Fig. 2, but in Yuliang Basin

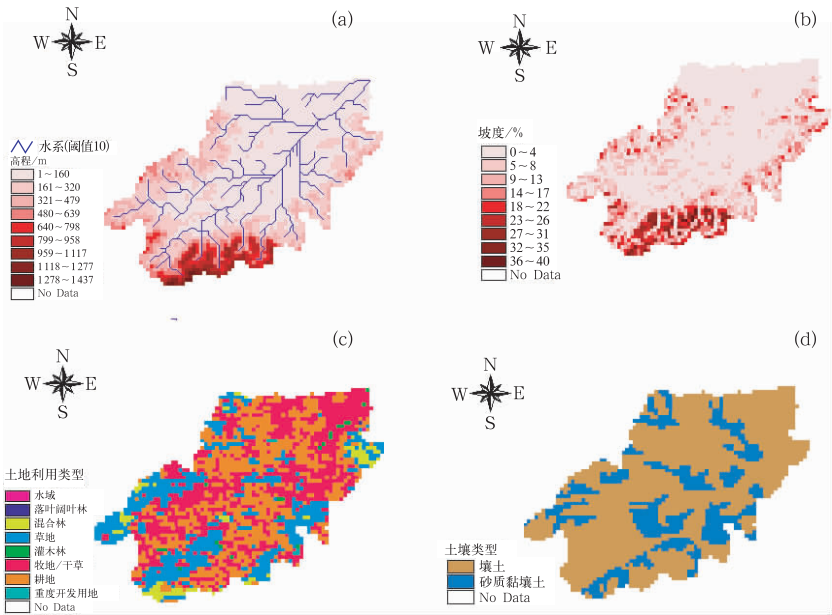


图 7 同图 2,但为潢川流域  
Fig. 7 Same as Fig. 2, but in Huangchuan Basin

表 4 六个流域的降水与水文站信息

Table 4 Information of rainfall stations and hydrologic stations information in six basins

| 序号 | 流域  | 水文站数/个 | 站名  | 雨量站数/个 | 站名   |
|----|-----|--------|-----|--------|--|
| 1  | 屯溪  | 1      | 屯溪  | 11     | 五城、石门、左龙、大连、屯溪、上溪口、儒村、黟县、岩前、休宁、流口              |
| 2  | 密赛  | 1      | 密赛  | 6      | 齐溪、马金、燕溪、皇林坑、大溪边、密赛                            |
| 3  | 西苕溪 | 1      | 范家庄 | 13     | 银坑、老石坎、丰城、赋石、李村、递铺、西亩、<br>范家村、钱坑桥、天子岗、横塘、梅溪、关上 |
| 4  | 南苕溪 | 1      | 余杭  | 4      | 溪口、南庄、徐家头、临安                                   |
| 5  | 渔梁  | 1      | 渔梁  | 10     | 许村、渔梁、新田、潜口、溪头、杨溪、伏岭、大源、洽舍、临溪                  |
| 6  | 潢川  | 1      | 潢川  | 6      | 吴陈河、新县、浍河、光山、潢川、双柳树                            |



3 应用结果分析

分别选取 1980—2008 年,密赛、西苕溪、南苕溪、渔梁和潢川流域的 16、18、15、28、16 场典型洪水,采用 GMKHM 分布式水文模型计算出流域下垫面土壤含水量饱和度。其中,GMKHM 分布式水文模型率定,根据模型参数先验估计方法(Bao et al,2017;包红军等,2017),依据模型参数与流域下垫面地形坡度、土地利用和土壤类型之间的定量关系,确定模型参数取值,并在六个流域典型洪水中进行验证。根据水文情报预报规范(水利部水文局,2008),六个流域均达到甲等方案。在本研究中,由于难以获取土壤湿度实测资料,故用率定后的水文模型模拟的土壤湿度来推求中小河流致洪临界动态雨量阈值。

根据流域下垫面土壤饱和度和流域洪水发生前 24 h(国家级中小河流风险预警时效为 24 h)的最大雨量,应用 W-H 算法,建立 24 h 预报时效的流域洪

水预警(警戒洪水)动态临界界面雨量阈值。表 5 为五个流域推求出的致洪(警戒洪水)动态临界界面雨量阈值。

表 5 基于长序列水文气象资料的密赛、西苕溪、南苕溪、渔梁和潢川流域致洪动态临界界面雨量阈值

Table 5 Dynamic critical 24 h arearainfall threshold based on the long-term hydrological and meteorological data of flood warning for Misai, Xitiaoxi, Nantiaoxi, Yuliang and Huangchuan basins

| 序号 | 流域  | 致洪动态临界阈值( $P$ 为阈值, $T$ 为土壤饱和度) |
|----|-----|--------------------------------|
| 1  | 密赛  | $P = -63.55T^{0.7} + 96$       |
| 2  | 西苕溪 | $P = -175.42T^{0.72} + 265$    |
| 3  | 南苕溪 | $P = -57.4T^{0.75} + 67.3$     |
| 4  | 渔梁  | $P = -127.5T^{0.71} + 192.6$   |
| 5  | 潢川  | $P = -163.4T^{0.68} + 246.9$   |

根据密赛、西苕溪、南苕溪、渔梁和潢川流域的 DEM、河道坡度、土地利用类型与土壤类型数据,分别推求  $A$ 、 $S$ 、 $L$  和  $S_i$ ,以及待推求阈值的屯溪流域对应指数(表 6)。

表 6 基于流域地形地貌的六个流域的  $A$ 、 $S$ 、 $L$  和  $S_i$  值

Table 6 The  $A$ ,  $S$ ,  $L$  and  $S_i$  values based on topography of six basins

| 流域特征  | 密赛    | 西苕溪   | 南苕溪   | 渔梁    | 潢川    | 屯溪    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $A$   | 0.163 | 0.518 | 0.153 | 0.316 | 0.458 | 0.777 |
| $S$   | 0.231 | 0.181 | 0.182 | 0.201 | 0.141 | 0.163 |
| $L$   | 0.518 | 0.473 | 0.526 | 0.471 | 0.803 | 0.492 |
| $S_i$ | 0.595 | 0.605 | 0.606 | 0.598 | 0.625 | 0.573 |

依据表 5 中五个流域动态临界界面雨量阈值,分别推求出土壤含水饱和度为 5%、15%、25%、35%、45%、55%、65%、75%、85%、95%时的流域致洪临界界面雨量阈值。根据式(2),分别建立 5%、15%、25%、35%、45%、55%、65%、75%、85%、95%土壤

含水饱和度时的临界雨量阈值与  $A$ 、 $S$ 、 $L$  和  $S_i$  之间的关系。基于式(3)和式(4),利用回归分析,分别求得不同流域土壤含水饱和度的  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$  和  $b_5$  参数值(表 7)。

表 7 根据长序列水文气象资料求得的参数  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$ 、 $b_5$

Table 7 Values of the parameters  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  based on the long-term hydrological and meteorological data in Misai, Xitiaoxi, Nantiaoxi, Yuliang and Huangchuan basins

| 土壤饱和度/% | $b_1/\times 10^5$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_4$ | $b_5$ |
|---------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| 5       | 5.269             | 1.300 | 2.814 | 1.460 | 1.767 |
| 15      | 6.408             | 1.332 | 2.946 | 1.519 | 1.786 |
| 25      | 8.547             | 1.367 | 3.109 | 1.599 | 1.828 |
| 35      | 12.492            | 1.412 | 3.310 | 1.703 | 1.869 |
| 45      | 19.885            | 1.463 | 3.548 | 1.826 | 1.917 |
| 55      | 35.995            | 1.525 | 3.840 | 1.980 | 1.983 |
| 65      | 77.984            | 1.605 | 4.211 | 2.176 | 2.064 |
| 75      | 224.145           | 1.709 | 4.701 | 2.436 | 2.186 |
| 85      | 963.472           | 1.852 | 5.369 | 2.791 | 2.325 |
| 95      | 8366.354          | 2.056 | 6.336 | 3.304 | 2.555 |

将求得的参数  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$ 、 $b_5$  应用到研究屯溪流域,分别代入式(2),求出屯溪流域不同流域土壤含水饱和度情境下的致洪临界面雨量阈值,采用误差最小二乘法,基于幂函数拟合得到基于流域地形地貌的流域移植动态临界面雨量阈值。

$$P = -242.3 \times T^{0.69} + 350.8 \quad (7)$$

式中:  $P$  为致洪临界雨量阈值,  $T$  为流域土壤含水饱

和度(单位: %)。与通过长序列历史水文气象资料推求的动态阈值  $P = -211.8 \times T^{0.71} + 321.1$  推求皮尔逊相关系数,其值为 0.9993,表明基于流域地形地貌、不考虑流域水文气象资料求得的动态临界面雨量阈值与应用长序列水文气象资料反演推求得的相关程度很高,较为一致(表 8 与图 8)。

表 8 两种方法推求的屯溪流域临界面雨量阈值对比(单位: mm)

Table 8 Dynamic critical arearainfall threshold comparison calculated by two methods (unit: mm)

| 土壤饱和度/% | 基于流域地形地貌的致洪临界面雨量阈值   |                                      | 历史水文气象资料反演的临界面雨量阈值                   |
|---------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|
|         | $P_{\text{threshold}} = b_1 A^{b_2} S^{b_3} L^{b_4} S_i^{b_5}$ | $P = -242.3 \times T^{0.69} + 350.8$ | $P = -211.8 \times T^{0.71} + 321.1$ |
| 5       | 311.23   | 320.135 017 8                        | 295.85                               |
| 15      | 280.41   | 285.358 027 2                        | 266.03                               |
| 25      | 255.02   | 257.703 785 9                        | 241.95                               |
| 35      | 232.67   | 233.375 055 2                        | 220.59                               |
| 45      | 211.99   | 211.140 639 6                        | 200.95                               |
| 55      | 192.36   | 190.400 256 3                        | 182.56                               |
| 65      | 173.97   | 170.803 678 3                        | 165.11                               |
| 75      | 155.98   | 152.123 872 7                        | 148.43                               |
| 85      | 139.05   | 134.202 982 1                        | 132.38                               |
| 95      | 122.18   | 116.925 591 7                        | 116.87                               |

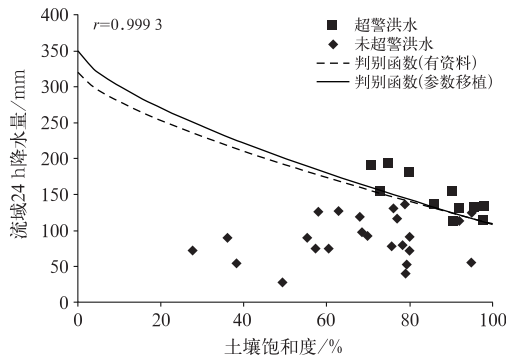


图 8 两种方法推求的动态临界雨量阈值

Fig. 8 Dynamic critical arearainfall threshold calculated by two methods

把两种方法推求得到动态临界雨量阈值曲线应用到屯溪流域 1980—2008 年共 35 场洪水(11 场超警戒水位、24 场未超警戒水位)气象预警中进行验证(表 9)。屯溪流域警戒水位为 124.80 m,根据水文年鉴,分别查出对应此水位的 35 场典型洪水的警戒流量值。基于 GMKHM 分布式水文模型模拟出每场洪水流量过程线,将洪峰发生前 24 h 内实际雨量与临界雨量阈值进行对比,作出中小河流洪水气象预警与否的判别,并根据实际洪水是否超警戒水

位来验证基于临界雨量阈值的气象预警是否正确。

由表 9 可见,基于流域地形地貌的动态临界雨量阈值在 35 场洪水气象预警检验中,准确预报 9 场超警洪水,漏报 2 场且空报 1 场,准确率为 91.4%;而基于历史长序列水文气象资料反演的动态临界雨量阈值,准确预报 10 场超警洪水,漏报 1 场,空报 1 场,准确率为 94.3%。

对于基于流域地形地貌的动态临界雨量阈值空报的 1995051500 号、2002051308 号和 2008060908 号洪水场次,从表 9 可以看出,临界雨量和降水量值相差较小,属于判断误差允许的范围。从预警效果检验总体看,基于流域地形地貌的动态临界雨量阈值的精度较好。在实际业务应用中,还要综合其他气象水文要素进行综合判断,以减少空报与漏报。

## 4 结论与讨论

本研究基于流域下垫面地形地貌特征信息,建立中小河流洪水致洪动态临界阈值移植确定技术,减少对流域水文资料的依赖程度。选取影响中小河流致洪过程的四个流域特征信息:流域面积、河道坡

表 9 两种临界面雨量阈值在屯溪流域的应用验证

Table 9 Application and verification of flood warning based on two critical rainfall thresholds in Tunxi Basin

| 序号 | 洪水编号       | 洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 降水量/mm | 临界阈值 1/mm | 是否预警 | 是否正确 | 临界阈值 2/mm | 是否预警 | 是否正确 |
|----|------------|---|--------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| 1  | 1982050108 | 4 280                                   | 191.32 | 155.57    | 是    | ✓    | 160.12    | 是    | ✓    |
| 2  | 1983051108 | 1 300                                   | 74.15  | 178.12    | 否    | ✓    | 185.40    | 否    | ✓    |
| 3  | 1983051422 | 1 510                                   | 74.59  | 172.57    | 否    | ✓    | 179.17    | 否    | ✓    |
| 4  | 1983052908 | 2 490                                   | 125.61 | 177.01    | 否    | ✓    | 184.17    | 否    | ✓    |
| 5  | 1983060906 | 2 170                                   | 97.35  | 159.04    | 否    | ✓    | 164.00    | 否    | ✓    |
| 6  | 1984050108 | 1 570                                   | 89.60  | 217.95    | 否    | ✓    | 230.38    | 否    | ✓    |
| 7  | 1984082620 | 2 512.8                                 | 135.93 | 141.98    | 否    | ✓    | 144.91    | 否    | ✓    |
| 8  | 1986061108 | 2 260                                   | 91.57  | 156.68    | 否    | ✓    | 161.36    | 否    | ✓    |
| 9  | 1987050108 | 633                                     | 54.14  | 213.72    | 否    | ✓    | 225.58    | 否    | ✓    |
| 10 | 1987061908 | 944.6                                   | 27.03  | 192.60    | 否    | ✓    | 201.71    | 否    | ✓    |
| 11 | 1988050704 | 1 390                                   | 77.30  | 147.06    | 否    | ✓    | 150.59    | 否    | ✓    |
| 12 | 1988061101 | 1 000                                   | 40.19  | 141.84    | 否    | ✓    | 144.76    | 否    | ✓    |
| 13 | 1989050108 | 1 740                                   | 78.92  | 142.87    | 否    | ✓    | 145.92    | 否    | ✓    |
| 14 | 1989061206 | 2 273.6                                 | 113.47 | 121.41    | 否    | ✓    | 121.98    | 否    | ✓    |
| 15 | 1989063023 | 1 740                                   | 71.45  | 140.33    | 否    | ✓    | 143.08    | 否    | ✓    |
| 16 | 1989072208 | 1 470                                   | 89.20  | 181.72    | 否    | ✓    | 189.46    | 否    | ✓    |
| 17 | 1990050108 | 1 700                                   | 52.67  | 141.40    | 否    | ✓    | 144.27    | 否    | ✓    |
| 18 | 1990061108 | 2 500                                   | 126.94 | 168.62    | 否    | ✓    | 174.74    | 否    | ✓    |
| 19 | 1991051800 | 2 220                                   | 130.37 | 146.36    | 否    | ✓    | 149.81    | 否    | ✓    |
| 20 | 1991063008 | 2 060                                   | 54.55  | 116.87    | 否    | ✓    | 116.93    | 否    | ✓    |
| 21 | 1992062000 | 3 150                                   | 114.85 | 112.77    | 是    | ✓    | 112.36    | 是    | ✓    |
| 22 | 1993052700 | 4 700                                   | 193.61 | 148.66    | 是    | ✓    | 152.38    | 是    | ✓    |
| 23 | 1994050100 | 4 160                                   | 154.68 | 124.41    | 是    | ✓    | 125.32    | 是    | ✓    |
| 24 | 1995051500 | 4 070                                   | 113.24 | 123.64    | 否    | ×    | 124.45    | 否    | ×    |
| 25 | 1996060100 | 6 490                                   | 180.69 | 140.49    | 是    | ✓    | 143.26    | 是    | ✓    |
| 26 | 1997060600 | 2 730                                   | 116.27 | 145.03    | 否    | ✓    | 148.33    | 否    | ✓    |
| 27 | 1998050108 | 4 270                                   | 132.32 | 116.12    | 是    | ✓    | 116.09    | 是    | ✓    |
| 28 | 1999052108 | 2 960                                   | 91.26  | 140.33    | 否    | ✓    | 143.08    | 否    | ✓    |
| 29 | 1999062215 | 3 780                                   | 131.23 | 121.47    | 是    | ✓    | 122.05    | 是    | ✓    |
| 30 | 1999082408 | 2 890                                   | 118.41 | 159.84    | 否    | ✓    | 164.89    | 否    | ✓    |
| 31 | 2001050108 | 1 410                                   | 72.36  | 235.71    | 否    | ✓    | 250.58    | 否    | ✓    |
| 32 | 2001062008 | 3 640                                   | 134.52 | 112.33    | 是    | ✓    | 111.87    | 是    | ✓    |
| 33 | 2002051308 | 2 120                                   | 123.81 | 116.73    | 是    | ×    | 116.76    | 是    | ×    |
| 34 | 2008060908 | 5 250                                   | 154.31 | 151.71    | 是    | ✓    | 155.79    | 否    | ×    |
| 35 | 2013062708 | 3 980                                   | 137.21 | 130.81    | 是    | ✓    | 132.45    | 是    | ✓    |

注:临界阈值 1 指基于流域多年水文气象资料的中小河流致洪临界面雨量阈值,临界阈值 2 指基于流域地形地貌的中小河流致洪临界面雨量阈值。

Note: No. 1 of critical threshold means critical arearainfall threshold based on long-term hydrometeorological data for small to middle-sized river flood warning, No. 2 of critical threshold means topography-based dynamic critical arearainfall threshold for small to middle-sized river flood warning.

度、土地利用类型和土壤类型,构建流域基于流域土壤饱和度的致洪动态阈值与四个流域特征信息的指数关系;选取淮河潢川流域、钱塘江屯溪与渔梁流域、太湖西苕溪与南苕溪流域五个中小流域,以警戒洪水为例,结合潢川、渔梁、西苕溪与南苕溪为四个流域长序列水文气象资料,基于 GMKHM 分布式水文模型推求出每个流域基于流域土壤饱和度的致洪动态阈值;依据致洪临界面雨量阈值与四个流域特征信息的指数关系,将阈值基于流域下垫面地形地貌特征信息,移植至屯溪流域,并与屯溪流域基于 GMKHM 分布式水文模型推求出的致洪动态临界

面雨量库阈值在屯溪流域 1980—2008 年的 35 场典型中小河流洪水预警中进行验证。结果表明,基于流域下垫面地形地貌特征信息的中小河流洪水致洪动态临界阈值移植确定技术与基于长序列水文气象资料推求的动态阈值在屯溪流域预警效果相近,均具有较高的精度,对无资料中小河流洪水预报预警与山洪灾害预警均有一定的借鉴意义。本研究技术应用中仍存在一定的空报与漏报,仍需要本研究从多源信息应用及动态临界面雨量阈值不确定性进一步分析与完善,提高中小河流洪水预报预警精度。

(1)加强多源信息应用,提升中小河流洪水风险

预警精度。本研究中应用资料主要为  $30'' \times 30''$  分辨率的 DEM、土地利用类型和土壤类型的遥感资料,以及流域长序列地面观测的水文气象资料。近年来,随着遥感水文学飞速发展,流域下垫面地形地貌地质遥感信息在水文气象领域应用越来越深入,DEM 已有全球  $30'' \times 30''$ ,局部  $1'' \times 1''$  的分辨率,飞机遥测可以获得更精准的 DEM 数据,在土地利用和土壤类型也有更高分辨率的遥感数据,同时还可以获取下垫面表层的土壤饱和度数据(包红军等,2017)。另外,本研究使用的降水数据来自气象部门地面自动站降水资料。而雷达、卫星与地面自动站多源降水融合的定量降水估测(QPE)在反映空间降水分布和降水量估计上具有明显优势,技术已经相对成熟,并已经在我国气象部门业务化,时间分辨率已经达到 30 s,空间分辨率为  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 。更精细化的遥感数据与降水数据,以及如土壤饱和度等更多遥感信息与地面实况相结合为提高流域下垫面地形地貌特征信息的中小河流洪水致洪动态临界面雨量阈值精准度提供了有利的途径(包红军等,2016a)。

(2)减少致洪动态临界面雨量阈值的不确定性,提升中小河流洪水风险预警精度。本研究中的阈值主要结合分布式水文模型,采用统计方法推求出的致洪临界状态,反映的是气候态属性。研究中采用遥感信息与水文气象资料、构建的统计关系、计算的分布式水文模型等均不可避免存在一定的误差,土壤饱和度也直接使用模型模拟结果,这也易导致推求出来的动态临界面雨量阈值存在一定的不确定性,使得预警出现空报或者漏报(如 2002051308 和 2008060908 号洪水)。如何引入概率或集合预报思想,推求动态临界面雨量阈值,是提高中小河流洪水阈值预警精度的另一重要途径(包红军等,2016c)。

## 参考文献

- 包红军,2014.中小河流洪水气象风险预警阈值指标确定技术研究[C]//第三届气象服务发展论坛文集.北京:气象出版社:197-204. Bao H J, 2014. Critical arearainfall threshold for small to middle-sized river flood warning[C]//Collection of Meteorological Services Development Forum(2014). Beijing:China Meteorological Press:197-204(in Chinese).
- 包红军,2016.中小河流洪水气象预警技术及业务应用信息[C]//天气预报技术文集(2015).北京:气象出版社:492-497. Bao H J, 2016. Meteorological early warning technology and operational application of flood in small to medium-sized rivers[C]//Collection of Weather Forecast Technology (2015). Beijing:China Meteorological Press:492-497(in Chinese).
- 包红军,李致家,王莉莉,等,2017.基于分布式水文模型的小流域山洪预报方法与应用[J].暴雨灾害,36(2):156-163. Bao H J, Li Z J, Wang L L, et al, 2017. Flash flood forecasting method based on Distributed Hydrological Models in a small basin and its application[J]. Torr Rain Dis, 36(2):156-163(in Chinese).
- 包红军,王莉莉,李致家,等,2016a.基于混合产流与二维运动波汇流分布式水文模型[J].水电能源科学,34(11):1-4,21. Bao H J, Wang L L, Li Z J, et al, 2016a. Grid-based distributed hydrological model with mixed runoff model and two-dimensional kinematic wave flow model[J]. Water Resour Power, 34(11):1-4, 21(in Chinese).
- 包红军,王莉莉,李致家,等,2016b.基于 Holtan 产流的分布式水文模型[J].河海大学学报(自然科学版),44(4):340-346. Bao H J, Wang L L, Li Z J, et al, 2016b. A distributed hydrological model based on Holtan runoff generation theory[J]. J Hohai Univ (Nat Sci), 44(4):340-346(in Chinese).
- 包红军,王莉莉,沈学顺,等,2016c.气象水文耦合的洪水预报研究进展[J].气象,42(9):1045-1057. Bao H J, Wang L L, Shen X S, et al, 2016c. A review: advances of flood forecasting of hydro-meteorological forecast technology[J]. Meteor Mon, 42(9):1045-1057(in Chinese).
- 贾仰文,王浩,倪广恒,等,2005.分布式流域水文模型原理与实践[M].北京:中国水利水电出版社. Jia Y W, Wang H, Ni G H, et al, 2005. Principle and Practice of Distributed Hydrological Model[M]. Beijing:China Water & Power Press(in Chinese).
- 刘苏峡,刘昌明,赵卫民,2010.无测站流域水文预测(PUB)的研究方法[J].地理科学进展,29(11):1333-1339. Liu S X, Liu C M, Zhao W M, 2010. Towards the methodology for predictions in ungauged basins[J]. Prog Geogr, 29(11):1333-1339(in Chinese).
- 刘志雨,杨大文,胡健伟,2010.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),46(3):317-321. Liu Z Y, Yang D W, Hu J W, 2010. Dynamic critical rainfall-based torrential flood early warning for medium-small rivers[J]. J Beijing Normal Univ (Nat Sci), 46(3):317-321(in Chinese).
- 卢燕宇,田红,2015.基于 HBV 模型的淮河流域洪水致灾临界雨量研究[J].气象,41(6):755-760. Lu Y Y, Tian H, 2015. Mechanism oriented approach for estimating critical rainfall of flood disaster: a case study based on HBV model[J]. Meteor Mon, 41(6):755-760(in Chinese).
- 彭涛,殷志远,李兰,2014.水文模型在计算中小流域致汛临界面雨量中的应用[J].气象,40(11):1354-1362. Peng T, Yin Z Y, Li L, 2014. Application of hydrological model to calculating flood critical area rainfall in small and medium river valleys[J]. Meteor Mon, 40(11):1354-1362(in Chinese).
- 芮孝芳,2004.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社. Rui X F, 2004. Principles of Hydrology[M]. Beijing:China Water & Power Press(in Chinese).
- 水利部水文局,1998—2008.中华人民共和国水文年鉴(1980—2008)

- [R]. 北京:水利部水文局. Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, 1998—2008. Annual hydrological report P. R. China-hydrological data[R]. Beijing: Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources(in Chinese).
- 水利部水文局, 2008. 水文情报预报规范: GB/T 22482—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 1-11. Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, 2008. Standard for hydrological information and hydrological forecasting: GB/T 22482—2008[S]. Beijing: China Standard Press, 1-11(in Chinese).
- 水利部水文局(水利信息中心), 2010. 中小河流山洪监测与预警预测技术研究[M]. 北京: 科学出版社. Hydrologic Bureau of Ministry of Water Resources Information Center of Ministry of Water Resources, 2010. Monitoring, Forecasting and Warning Technology for Small to Medium-Sized River and Mountain Flash Flood[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 姚成, 2007. 基于栅格的分布式新安江模型构建与分析[D]. 南京: 河海大学. Yao C, 2007. Development and application of grid-based distributed Xinanjiang\_Model[D]. Nanjing: Hohai University(in Chinese).
- 叶金印, 李致家, 常露, 2014. 基于动态临界雨量的山洪预警方法研究与应用[J]. 气象, 40(1): 101-107. Ye J Y, Li Z J, Chang L, 2014. Research and application of flash flood early warning method based on dynamic critical precipitation[J]. Meteor Mon, 40(1): 101-107(in Chinese).
- 章国材, 2010. 气象灾害风险评估与区划方法[M]. 北京: 气象出版社. Zhang G C, 2010. Meteorological Disaster Risk Assessment and Division Method[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- Bao H J, Wang L L, Zhang K, et al, 2017. Application of a developed distributed hydrological model based on the mixed runoff generation model and 2D kinematic wave flow routing model for better flood forecasting[J]. Atmos Sci Lett, 18(7): 284-293.
- Bao H J, Zhao L N, He Y, et al, 2011. Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with grid-Xinjiang model for flood forecast[J]. Adv Geosci, 29: 61-67.
- Bárdossy A, Singh S K, 2008. Robust estimation of hydrological model parameters[J]. Hydrol Earth Syst Sci, 12(6): 1273-1283.
- Bartholmes J, Todini E, 2005. Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting[J]. Hydrol Earth Syst Sci, 9(4): 333-346.
- Chahinian N, Moussa R, Andrieux P, et al, 2005. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale[J]. J Hydrol, 306(1/2/3/4): 191-214.
- Clark R A, Gourley J J, Flamig Z L, et al, 2014. CONUS-wide evaluation of national weather service flash flood guidance products[J]. Wea Forecasting, 29(2): 377-392.
- Foody G M, Ghoneim E M, Arnell N W, 2004. Predicting locations sensitive to flash flooding in an arid environment[J]. J Hydrol, 292(1/2/3/4): 48-58.
- Georgakakos K P, 2006. Analytical results for operational flash flood guidance[J]. J Hydrol, 317(1/2): 81-103.
- Lazrus H, Morss R E, Demuth J L, et al, 2013. “Know What to Do If You Encounter a Flash Flood”: mental models analysis for improving flash flood risk communication and public decision making[J]. Risk Anal, 36(2): 411-427.
- Norbiato D, Borga M, Dinale R, 2009. Flash flood warning in ungauged basins by use of the flash flood guidance and model-based runoff thresholds[J]. Meteor Appl, 16(1): 65-75.
- Norbiato D, Borga M, Esposti S D, et al, 2008. Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: an assessment for gauged and ungauged basins[J]. J Hydrol, 362(3/4): 274-290.
- Oishi T, Takaoka H, Harada M, et al, 2014. The effect of river regulation on channel form in small and medium-sized rivers[J]. J Japan Soc Civil Eng Ser B1, 70(4): I\_997-I\_1002.
- Sivapalan M, Takeuchi K, Franks S W, et al, 2003. IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003—2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences[J]. Hydrol Sci J, 48(6): 857-880.
- Vieux B E, Cui Z T, Gaur A, 2004. Evaluation of a physics-based distributed hydrologic model for flood forecasting[J]. J Hydrol, 298(12/3/4): 155-177.
- Yao C, Li Z J, Yu Z B, et al, 2012. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based Xinanjiang model using geographically based information[J]. J Hydrol, 468-469: 47-62.
- Zogg J, Deitsch K, 2013. The Flash Flood Potential Index at WFO Des Moines, Iowa[R]. Glasgow: WFO.