

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0043

徐帅帅,王雅莉,陈淑芬,等.基于分布式水文模型的“尼伯特”台风暴雨洪水反演[J].南水北调与水利科技,2019,17(2):132-139. XU S S, WANG Y L, CHEN S F, et al. Characterization and simulation of 'Niebert' typhoon rain and flood in Meixi River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 132-139. (in Chinese)

# 基于分布式水文模型的“尼伯特”台风暴雨洪水反演

徐帅帅<sup>1,2</sup>, 王雅莉<sup>2,5</sup>, 陈淑芬<sup>1</sup>, 刘荣华<sup>2,3</sup>, 曲丽英<sup>4</sup>, 田济扬<sup>2,3</sup>

(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 济南 250101; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;  
3. 水利部 防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038; 4. 福建省水利水电科学研究院, 福州 350004;  
5. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

**摘要:** 台风暴雨具有强度大、降雨集中的特点, 容易在沿海地区中小流域形成局地破坏性洪水灾害, 基于高精度地形地貌数据构建分布式水文模型, 是实现中小流域洪水模拟和预报的重要手段。以福建闽清县梅溪流域为研究区, 基于高精度 DEM、土壤和土地利用数据, 采用中国山洪水文模型(CNFF-HM), 构建了梅溪流域分布式水文模型, 以 56 场实测水文气象资料对模型进行率定和验证, 并对 2016 年 7 月 9 日发生的“尼伯特”台风带来的暴雨洪水进行反演。结果显示, 构建的分布式水文模型验证和率定效果良好, 对“尼伯特”台风暴雨洪水模拟的洪峰流量误差小于 20%, 确定性系数达到 0.96, 因此模型能够很好地反映流域短历时强降雨引发的洪水特征, 为流域防洪减灾提供可靠的技术支撑。

**关键词:** 分布式水文模型; 降雨分析; 洪水反演; 尼伯特台风

中图分类号: TV62 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Characterization and simulation of 'Niebert' typhoon rain and flood in Meixi River basin

XU Shuaishuai<sup>1,2</sup>, WANG Yali<sup>2,5</sup>, CHEN Shufen<sup>1</sup>, LIU Ronghua<sup>2,3</sup>, QU Liying<sup>4</sup>, TIAN Jiyang<sup>2,3</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;  
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;  
3. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;  
4. Fujian Institute of Water Resource & Hydropower Research, Fuzhou 350004, China;  
5. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The typhoon storm has the characteristics of high intensity and concentrated rainfall. It is easy to form local destructive flood disasters in the middle and small-sized watersheds of coastal areas. The distributed hydrological model based on high-resolution topographic and geomorphic data is an effective way to forecast flood in small and medium-sized basins. The Meixi River basin in Minqing County of Fujian Province was selected as out study region. The China Flash Flood Model (CNFF-HM), based on the high-resolution DEM, soil data, and land use data, was used to build the distributed hydrological model of the Meixi basin. Fifty-six hydrological events were used to calibrate and validate the model. The flood caused by the 'Niebert' ty-

收稿日期: 2018-11-16 修回日期: 2018-12-27 网络出版时间: 2019-01-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190118.2140.014.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0203104); 国家自然科学基金(51579131); 中国博士后科学基金(2017M620839); 中国水科院科研专项(JZ0145B042016); 山东建筑大学博士基金(0000601489)

作者简介: 徐帅帅(1994—), 女, 山东人, 主要从事洪水预报预警方面研究。E-mail: sssxu6026@163.com

通信作者: 陈淑芬(1968—), 女, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事水处理技术与水资源优化等研究。E-mail: ccssf266121@sdjzu.edu.cn

phoon, which occurred on 9 July 2016, was simulated. The result showed the model performance was good with a less than 20% error for flood peak flow, and a Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) of 0.96. Thus the model can reflect the flood characteristics caused by short-term heavy rainfall in the basin, and provide reliable technical support for disaster prevention and reduction in the basin.

**Key words:** distributed hydrological model; storm analyses; flood simulation; 'Niebert' typhoon

水文模型是水文研究的重要方法和手段<sup>[1]</sup>,随着遥感、地理信息系统与全球定位系统等 3S 技术的发展,土壤类型、土地利用类型、地形坡度等流域空间信息资料更加易于获取,为分布式水文模型的推广与应用提供了大量数据支撑。与传统的集总式模型相比,分布式水文模型注重产汇流的物理机制、模型输入的空间变异性<sup>[2-4]</sup>以及不同单元之间的水力联系<sup>[5-6]</sup>,其结构复杂但模型参数具有较强的物理意义,且能够得到较高的模拟精度。

继丹麦、法国等研究机构联合开发的以网格为计算单元的 SHE 模型后,美国农业部(USDA)农业研究中心开发的 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型以遥感空间信息数据为基础,引入水文响应单元替代栅格计算单元,将其应用于模拟预测不同水文要素的变化,模型模拟效果较好<sup>[7]</sup>。我国在水文模型研究方面也取得一定成就。赵人俊等<sup>[8-10]</sup>通过大量产汇流计算提出了新安江模型,并在理论和结构等方面将其逐步完善,随着 GIS 分辨率以及 RS 数据精度与处理技术的提高,该模型进一步发展为以栅格为计算单元的分布式新安江模型。李致家等<sup>[11]</sup>在新安江模型基础上建立了分布式混合产流水文模型,并将新安江模型拓展至半湿润半干旱流域洪水模拟中。杨大文等<sup>[12]</sup>将 SHE 模型与 TOPMODEL 模型相结合,提出基于单位线与降水产流物理机制的 GBHM 模型,并利用函数关系式概化流域地形特征计算坡面流,减少了模型计算量。从国内外研究现状来看,分布式水文模型是流域水文模型发展的必然趋势。

2016 年 7 月 9 日 13 时 45 分 超强台风“尼伯特”(以下简称“尼伯特”台风)在福建泉州石狮市登陆,台风带来的强降雨导致福建省多条河流水位超预警。福建省闽清县遭遇超百年一遇<sup>[13]</sup>强降雨,此次短历时强降雨造成闽清全县受灾,其中坂东镇受灾最为严重。本文以闽清县梅溪流域为研究区,基于中国山洪水文模型(CNFF-HM),构建梅溪流域分布式水文模型,并利用该模型反演“尼伯特”台风暴雨洪水,为梅溪流域未来的山洪预警提供技术支撑。

## 1 资料与数据

### 1.1 研究区概况

梅溪流域位于福建省闽清县,流域面积 956 km<sup>2</sup>。梅溪是闽江的一级支流,发源于莲花山麓,干流全长 78.8 km,河道平均坡降 4.2 ‰。流域位于亚热带季风气候区,年平均气温 15~20 ℃。流域多年平均降水量 1 560 mm,相对湿度 78%~87%,降雨集中于 7—9 月。流域内四周地形高,尤以北部、西部和东南部地势最高,随着山脉、溪流展布,地势从四周山地像中央梅溪河谷逐渐降低,中部河谷盆地发育,流域地形特征见图 1。

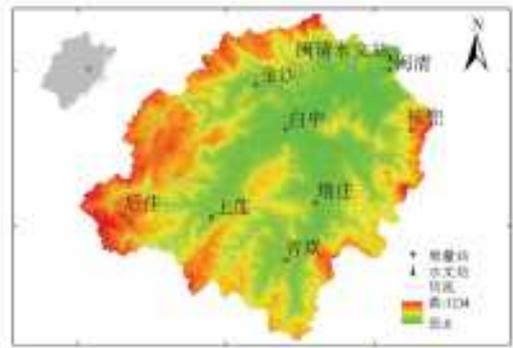


图 1 梅溪流域 DEM 及水文站点

Fig. 1 DEM data and hydrological sites of Meixi River basin

### 1.2 资料与数据

梅溪流域分布式水文模型计算所需数据包括: DEM、土壤、土地利用和水文气象等资料。

#### (1) DEM 数据

DEM 数据来源于国家地理信息中心,分辨率为 25 m。基于 DEM 数据对梅溪流域基础信息进行提取,首先采用 AGREE 算法<sup>[14-15]</sup>修正原始高程数据,并进一步采用 D8 算法<sup>[15-16]</sup>修正流域空间拓扑关系,得到更逼近真实流域状态的子流域。应用 GIS 工具提取修正后的流域、面积、坡度、水系等信息资料,并根据流域特征将梅溪流域划分为 60 个子流域,子流域平均面积约 16 km<sup>2</sup>,结果见图 2。

#### (2) 土壤及土地利用数据

研究区内地貌的垂直差异性导致土壤类型变化



图 2 梅溪子流域分布

Fig. 2 The watershed topology of Meixi River basin

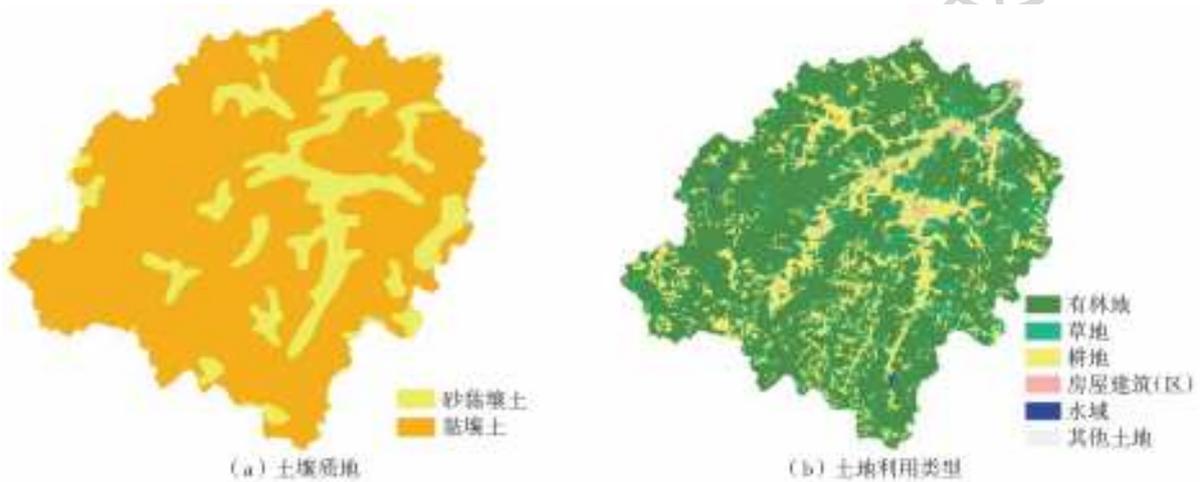


图 3 梅溪流域主要土壤质地和土地利用类型

Fig. 3 Main soil texture and land use types in Meixi River basin

表 1 梅溪流域水文监测站资料

Tab. 1 Basic information of hydrological stations in Meixi River basin

站点名称	站点类型	建站时间	洪水场次	数据年限
上莲	雨量站	1964 年 07 月	56	1964—2016 年
塔庄	雨量站	1964 年 05 月	56	1964—2016 年
白中	雨量站	1964 年 07 月	56	1964—2016 年
金沙	雨量站	1956 年 03 月	56	1964—2016 年
闽清	雨量站	1964 年 05 月	56	1964—2016 年
柿兜	雨量站	1964 年 07 月	56	1964—2016 年
后佳	雨量站	1965 年 07 月	15	2002—2016 年
省璜	雨量站	1964 年 05 月	56	1964—2016 年
闽清水文站	水文站	1989 年 01 月	56	1989—2016 年

注:雨量站和水文站实测数据由福建省水科院提供。

## 2 构建梅溪流域分布式水文模型

### 2.1 分布式水文模型构建

本文运用中国山洪水文模型(CNFF-HM)对洪水进行模拟。CNFF-HM 模型由中国水利水电科学

多样,本文从中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)下载 2015 年中国土地利用现状遥感监测数据和中国土壤质地空间分布数据,空间分辨率为 30 m×30 m。梅溪流域土壤以黏壤土为主,其次为砂质壤土,见图 3(a);流域土地利用分布见图 3(b),流域植被以有林地为主,占 68.5%,其次为耕地和草地。

### (3)水文气象数据

梅溪流域内包含 8 个雨量站和 1 个水文站。各站点的建站时间、洪水场次及数据见表 1,后佳站点资料年限较短。本文采用 SQL Server 数据库存储上述数据,数据库内数据可被梅溪水文模型直接读取,模型运行结果自动更新存储以便输出调用。

研究院研发,以子流域作为基本计算单元,在构建梅溪流域模型时,CNFF-HM 模型蒸散发计算采用新安江三层蒸散发模型<sup>[8-9]</sup>,产流计算采用新安江三水源模型<sup>[17-18]</sup>,坡面汇流计算采用时变分布式单位线法,壤中流与地下径流汇流计算采用线性水库法<sup>[19-20]</sup>,河道洪水演进计算采用动态马斯京根法<sup>[21]</sup>,模型计算时段步长为 30 min,以实现流域洪水过程整体建模和水文模拟,模型结构详见参考文献<sup>[22]</sup>。

### 2.2 模型精度评价指标

根据我国《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008),洪水预报精度评定项目主要包括洪峰流量(水位)、洪量(径流量)、洪峰出现时间及洪水过程等<sup>[23]</sup>。本文拟采用确定性系数 DC、洪峰相对误差  $Q_E$ 、径流深相对误差  $R_E$ 、峰现时间误差  $\Delta T$  作为模型精度指标对结果进行分析。计算方法为

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (1)$$

$$Q_E = \frac{|Q_{sim} - Q_{obs}|}{Q_{obs}} \times 100\% \quad (2)$$

$$R_E = \frac{R_{sim}}{R_{obs}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\Delta T = T_{sim} - T_{obs} \quad (4)$$

式中:  $Q_i$  为实测值;  $\hat{Q}_i$  为预测值;  $\bar{Q}_i$  为实测值的均值;  $n$  为资料序列长度;  $Q_E$  为洪峰流量相对误差;  $Q_{sim}$ 、 $Q_{obs}$  分别为洪峰流量模拟值、实测值;  $R_E$  为相对误差;  $R_{sim}$ 、 $R_{obs}$  分别为径流深模拟值、实测值;  $\Delta T$

为峰现时间差;  $T_{sim}$ 、 $T_{obs}$  分别为峰现时间模拟值、实测值。

### 2.3 模型率定与验证

用研究区内的闽清水文站 1989—2015 年洪水资料对分布式水文模型进行参数率定和检验, 其中, 1986—2003 年作为率定期, 2003—2015 年为验证期。率定期与验证期水文模型模拟效果见图 4。

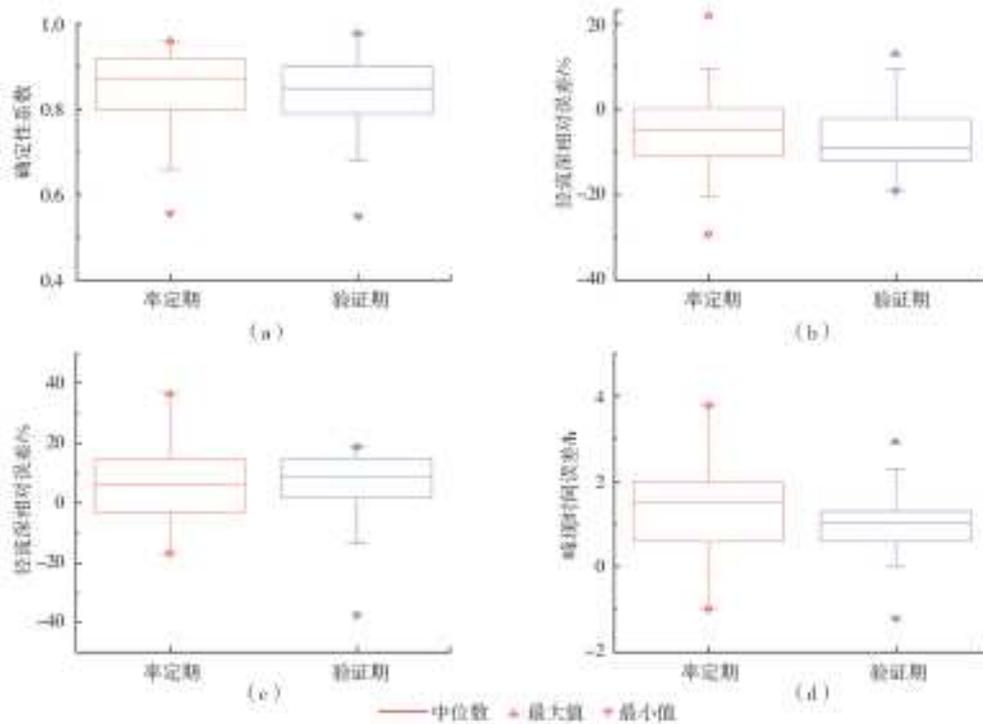


图 4 闽清水文站径流模拟效果

Fig. 4 Runoff simulation results at Minqing hydrological station

模型率定和验证结果见表 2。从表中可以看出, 率定期和验证的确定性系数均值都较高, 率定期确定性系数均值为 0.85, 验证期为 0.83; 率定期和验证期平均径流深相对误差均小于 20%, 率定期为 10.39%, 验证期为 11.35%; 率定期平均洪峰流量相对误差为 8.83%, 验证期为 9.52%; 率定期峰现时间误差 1.42 h, 验证期为 1.17 h, 验证期略小于率定期。同时, 率定期和验证期确定性系数、洪

峰流量相对误差、径流深相对误差和峰现时间相对误差的合格率较高, 根据我国《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008), 率定期和验证期的确定性系数、洪峰流量相对误差、径流深相对误差合格率均达到了甲级预报精度(大于 85%), 验证期和率定期峰现时间误差合格率也达到了乙级以上(大于 70%), 说明构建的分布式水文模型可用于梅溪流域洪水预报。

表 2 水文模型率定和验证结果对比

Tab. 2 Comparison of hydrological model calibration and verification results

时期	场次	年份	确定性系数		洪峰相对误差		径流深相对误差		峰现时间误差	
			均值	合格率/%	均值/%	合格率/%	均值/%	合格率/%	均值/h	合格率/%
率定期	38 场	1989—2003	0.85	95	8.83	92	10.39	95	1.42	79
验证期	18 场	2003—2015	0.83	89	9.52	100	11.35	94	1.17	89

选取两个典型场次(20020806 场次与 20150809 场次)洪水对比模拟洪水过程和实测洪水过程(时段步长为 30 min)进行对比分析, 见图 5(a)、5(b)。从

图中可以看出, 模拟洪水过程与实测洪水具有较好的一致性, 进一步说明了分布式水文模型对梅溪流域的洪水模拟效果良好。

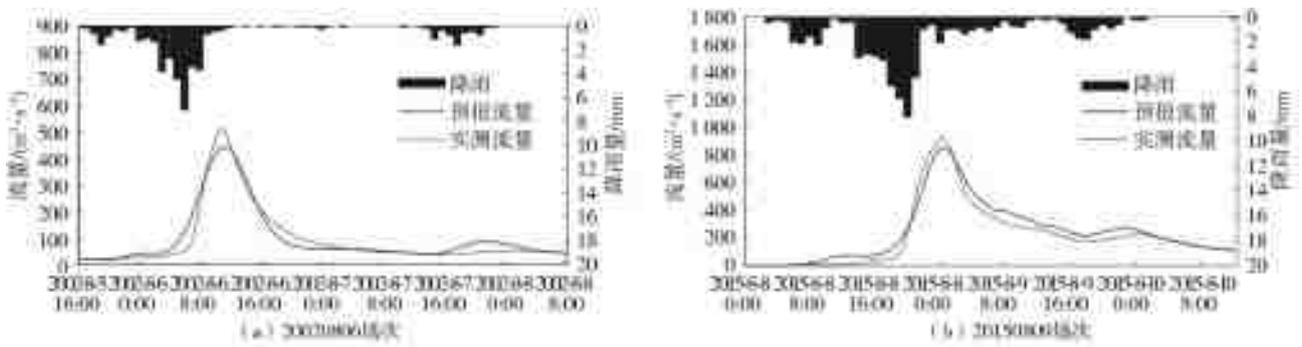


图 5 典型场次洪水模拟结果

Fig. 5 Simulation results of two flood events

模型参数是依据其物理意义设定初值及取值范围后,通过率定期与验证期模拟洪水过程与实际过

程比较,采用人工试错法对参数进行调整,最终根据模型精度指标确定参数最优值,模型参数值见表 3。

表 3 梅溪流域模型参数

Tab. 3 Model parameters in Meixi River basin

序号	参数名称	参数取值	序号	参数名称	参数取值
1	蒸发折算系数(Kc)	0.95	8	深层土壤蒸发系数(C)	0.110
2	自由蓄水量抛物线指数(B)	0.30	9	不透水率(IMP)	0.010
3	自由蓄水量曲线指数(EX)	1.30	10	壤中流日出流系数(KS)	0.300
4	上层土壤含水量(WUM)/mm	20.00	11	地下水日出流系数(KG)	0.300
5	下层土壤含水量(WLM)/mm	60.00	12	壤中流日消退系数(KKS)	0.050
6	深层土壤含水量(WDM)/mm	40.00	13	地下水日消退系数(KKG)	0.100
7	自由水蓄水库容量(SM)/mm	32.00	14	糙率 n	0.038

### 3 “尼伯特”台风暴雨洪水反演

#### 3.1 “尼伯特”台风暴雨分析

“尼伯特”台风于 2016 年 7 月 3 日 8 时在西北太平洋洋面上生成,中心最大风力约 8 级;9 日 13 时 45 分登陆于福建省泉州市石狮市,登陆时风力达 10 级,移动速度 25 m/s,为强热带风暴级台风;10 日 3 时于福建省宁化县减弱至热带低压;该次气旋的运动导致福建闽清梅溪出现大到特大暴雨。

雨量站观测资料显示,梅溪流域经历“尼伯特”台风降雨过程从 7 月 8 日开始至 7 月 11 日结束,降

雨持续时间为 4 d,强降水集中在 9 日 8 时至 13 时。各时段降雨见表 4。从表 4 中可以看出,最大 1 h 降雨出现在塔庄站,各站点最大 3 h、6 h 降雨量值均较大,大部分站点重现期超百年一遇。

采用反距离权重插值法(IDW)得到 7 月 9 日 8 时至 13 时逐时面雨量,见图 6,可以看出,降雨整体表现为由东南向西北逐渐覆盖增加分布特征,暴雨中心呈带状分布,主要集中于梅溪右岸支流,流域东南部。由此可见,“尼伯特”台风暴雨具有历时短、强度大、暴雨集中等特点,此种类型的降雨易形成灾害性洪水。

表 4 不同站点不同时段最大降雨量统计

Tab. 4 The maximum rainfall from different sites in different time intervals

站点	最大 1 h 降雨		最大 3 h 降雨		最大 6 h 降雨		最大 24 h 降雨	
	雨量/mm	重现期/a	雨量/mm	重现期/a	雨量/mm	重现期/a	雨量/mm	重现期/a
上莲	46.0	<5	146.0	>100	197.0	>100	234.5	20~50
塔庄	82.5	20~50	212.0	>100	269.0	>100	308.0	>100
白中	67.5	5~10	165.0	>100	225.0	>100	247.0	50~100
金沙	60.0	5~10	154.0	>100	203.5	>100	221.5	50~100
闽清	57.5	<5	142.5	>100	202.0	>100	227.5	20~50
柿兜	71.5	5~10	168.0	50~100	228.5	>100	269.5	20~50
后佳	48.5	>100	123.0	>100	156.0	50~100	203.0	20~50
省璜	62.5	5~10	175.0	>100	212.0	>100	249.0	20~50

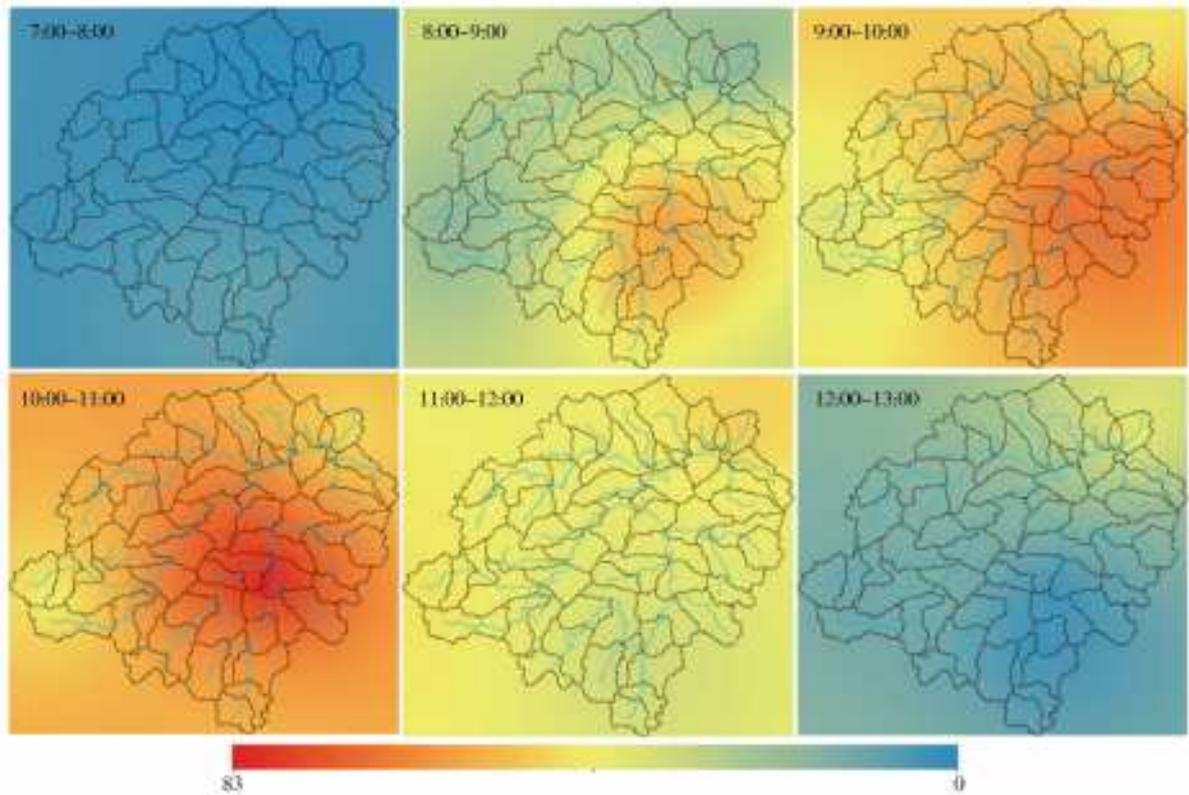


图6 7月9日不同时段降雨量空间分布

Fig. 6 The spatial distributions of rainfall in different time intervals

### 3.2 “尼伯特”台风暴雨洪水反演

采用上述分布式水文模型反演“尼伯特”台风场次洪水(2016年7月9日0时—11日8时),得到闽清水文站 20160709 场次洪水的模拟和实测径流过程,见图7。闽清水文站“尼伯特”洪水是单峰型大洪水,由模拟结果可知,洪峰实际出现时间为7月9日15时14分,模拟洪峰出现时间为14时,峰现时间误差为1.2 h;实际洪峰流量为4 710 m<sup>3</sup>/s,模拟洪峰流量为5 133 m<sup>3</sup>/s;确定性系数经计算为0.96。数据情况说明,运用CNFF-HM构建的分布式水文模型能够较为准确的模拟“尼伯特”场次洪水过程,也进一步说明了该模型能够反映流域的产汇流特征。

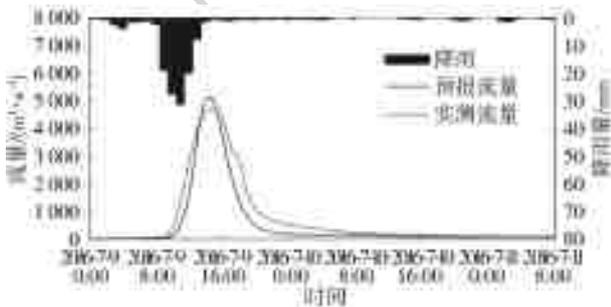


图7 “尼伯特”台风暴雨洪水径流模拟过程

Fig. 7 “Niebert” typhoon rain and flood runoff processes

根据“尼伯特”场次洪水模拟结果,得到梅溪流域的净雨量空间分布,见图8。从图中可以看出,该场降雨梅溪流域东部塔庄雨量站周边子流域的净雨

量最大,受洪水影响最严重,7月9日凌晨至11日8时净雨量达到160 mm左右。梅溪流域的实际受灾情况见图9,梅溪流域东南部省璜、塔庄站周围地区受灾较为严重,同时,受流域地形地貌影响,处于流域谷底洼地的坂东镇(塔庄站下游)受灾最为严重,大量来水汇集于19 km<sup>2</sup>的坂东镇。对比净雨空间分布图和实际受灾范围图可知,净雨量最大的地区与实际受灾范围具有较好的一致性,说明基于分布式水文模型对流域洪水进行模拟和预报对流域防洪减灾有重要的指导意义。

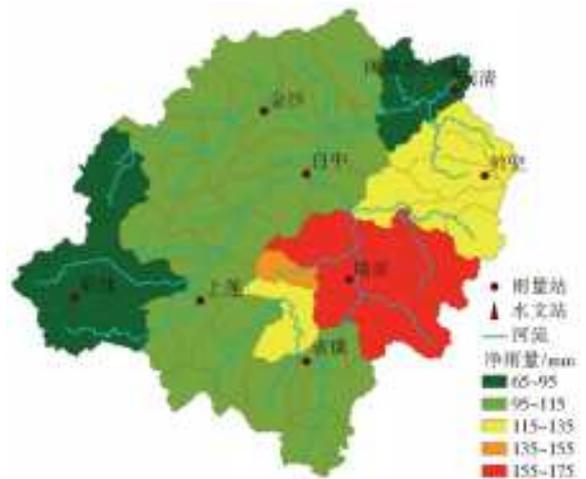


图8 “尼伯特”台风暴雨产流量空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of runoff yield from “Niebert” typhoon rain



图 9 梅溪流域实际受灾范围

Fig. 9 Actual disaster area in Meixi River basin

## 4 结 论

本文以梅溪流域作为研究区,采用高精度 DEM 数据划分子流域,构建梅溪流域分布式水文模型,采用长系列水文气象资料对分布式水文模型进行率定和验证,在“尼伯特”台风暴雨分析的基础上,对“尼伯特”台风暴雨洪水进行反演,得出以下结论。

(1)运用流域 56 场洪水对模型进行率定和验证结果表明,率定期和验证期确定性系数、径流深相对误差、洪峰流量相对误差、峰现时间误差均达到了乙级以上预报精度,说明基于分布式水文模型的流域洪水模拟结果较为理想,模型可用于流域洪水预报。

(2)“尼伯特”台风导致的降雨,最大 1 h 降雨量超百年一遇,24 h 降雨也达到百年一遇。降雨呈从西北到东南逐渐增加的特点。整体上看,降雨具有历时短、强度大、降雨集中的特点。

(3)运用构建的分布式水文模型模拟,确定性系数较高,模拟净雨空间分布与流域实际受灾情况较为一致,说明构建的梅溪流域分布式水文模型能够反映极端降雨条件下流域的产汇流过程。

### 参考文献(References):

[1] 王中根,刘昌明,左其亭,等. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 430-439. (WANG Z G, LIU C M, ZUO Q T, et al. Methods of constructing distributed hydrological model based on DEM[J]. Progress in Geography, 2002, 21(5): 430-439. (in Chinese))

[2] 喇承芳,仇杰,刘晓帆,等. 分布式水文模型在大通河流域的应用研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(11): 9-12. (LA C F, QIU J, LIU X F, et al. Study on distributed hydrological model in the Datong River basin[J]. Yellow

River, 2016, 38(11): 9-12. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2016.11.003.

[3] YAO C, ZHANG K, YU Z, et al. Improving the flood prediction capability of the Xinanjiang model in ungauged nested catchments by coupling it with the geomorphologic instantaneous unit hydrograph[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517(2): 1035-1048. DOI: org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.037.

[4] 包红军,王莉莉,李致家,等. 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, 2016, 44(4): 340-346 (BAO H J, WANG L L, LI Z J, et al. A distributed hydrological based on Holtan runoff generation theory[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(4): 340-346. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2016.04.010.

[5] 郭生练,熊立华,杨井,等. 基于 DEM 的分布式流域水文物理模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2000, 33(6): 1-5. (GUO S L, XIONG L H, YANG J, et al. A DEM and physically based hydrological model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2000, 33(6): 1-5. (in Chinese))

[6] 郭俊. 流域水文建模及预报方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013. (GUO J. Studies on Watershed hydrological modeling and forecasting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.D409170.

[7] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R, et al. Large area hydrologic modeling and assessment: Part I. model development[J]. Journal of American Water Resources Assessment, 1998, 34(1): 73-89.

[8] 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 (ZHAO R J. Watershed hydrological simulation: Xin'an River Three-Source model and northern Shanxi model[M]. Beijing: Water Power Press, 1984. (in Chinese))

[9] 王佩兰,赵人俊. 新安江模型(三水源)参数的检验[J]. 河海大学学报, 1989, 17(4): 19-23. (WANG P L, ZHAO R J. Examination of parameters of Xinanjiang model (3 components)[J]. Journal of Hohai University, 1989, 17(4): 19-23. (in Chinese))

[10] 刘金涛,宋慧卿,张行南,等. 新安江模型理论研究的进展与探讨[J]. 水文, 2014, 34(1): 1-6. (LIU J T, SONG H Q, ZHANG X N, et al. A discussion on advances in theories of Xinanjiang model[J]. Hydrology, 2014, 34(1): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2014.01.001.

[11] 包红军,王莉莉,李致家,等. 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, 2016, 34(11): 1-4. (BAO H J, WANG L L, LI Z J, et al. Grid-based distributed hydrological model with mixed

- runoff model and two-dimensional kinematic wave flow model [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2016, 34(11): 1-4. (in Chinese))
- [12] 王磊,王忠静,尹航,等. GBHM 模型原理及其在中尺度流域的应用[J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 256-261. (WANG L, WANG Z J, YIN H, et al. A distributed hydrological model- GBHNM and its application in middle-scale catchment[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(2): 256-261. (in Chinese))
- [13] 伍永年,马啸,邱萍蔚. 台风“尼伯特”给福建省造成的灾害成因分析[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(1): 88-91. (WU Y N, MA X, QIU P W. Causes of flood disaster for typhoon Nepartak in Fujian Province, 2016[J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27(1): 88-91. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-9264. 2017. 01. 021.
- [14] HELLWEGER R. Agree-DEM surface reconditioning system[EB/OL]. <http://www.ce.utexas.edu/prof/maid/ment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html>, 1997.
- [15] 张维,杨昕,汤国安,等. 基于 DEM 的平缓地区水系提取和流域分割的流向算法分析[J]. 测绘科学, 2012, 37(2): 94-96. (ZHANG W, YANG X, TANG G A, et al. DEM-based flow direction algorithms study of stream extraction and watershed delineation in the low relief areas[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(2): 94-96. (in Chinese))
- [16] O'CALLAGHAN J F, MARK D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. Computer vision, graphics, and image processing, 1984, 27(3): 323-344. DOI: org/10. 1016/S0734-189X(84)80011-0.
- [17] 芮孝芳,宫兴龙,张超,等. 流域产流分析及计算[J]. 水力发电学报, 2009, 28(6): 146-150. (RUI X F, GONG X L, ZHANG C, et al. Formation and calculation of watershed runoff yield [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(6): 146-150. (in Chinese))
- [18] 芮孝芳. 产流模式的发现与发展[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 1-6. (RUI X F. Discovery and development of the flow pattern [J]. Advances in science and technology of water resources, 2013, 33(1): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2013. 01. 001.
- [19] 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. (XU B L, DONG Z C, HONG X. Lumped karst hydrological model and its application [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 37-42. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2017. 02. 007.
- [20] 魏兆珍. 海河流域下垫面要素变化及其对洪水的影响研究[D]. 天津:天津大学, 2013. (WEI Z Z. Study on the underlying surface change of Haihe River basin and its impacts on flood [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese))
- [21] WANG Y L, LIU R H, GUO L, et al. Forecasting and providing warnings of flash floods for ungauged mountainous areas based on a distributed hydrological model [J]. Water, 2017, 9(10): 776. DOI: org/10. 3390/w9100776.
- [22] 郭良,丁留谦,孙东亚,等. 中国山洪灾害防御关键技术[J]. 水利学报, 2018, 49(9): 1-13. (GUO L, DING L Q, SUN D Y, et al. Key techniques of flash flood disaster prevention in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1-13 (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20180728.
- [23] GB/T 22484-2008, 水文情报预报规范[S]. (GB/T 22484-2008, Standard for hydrological information and hydrological forecasting[S]. (in Chinese))

(上接第 131 页)

- [23] 吕放放,胡俊,卢爱国,等. 北京某下凹桥区排水系统建模研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(7): 103-108. (LYU F F, HU J, LU A G, et al. Modeling of drainage system in Xia Aoqiao district, Beijing [J]. Water Supply and Drainage, China, 2014, 30(7): 103-108. (in Chinese))
- [24] 钱海平,陆敏博,韩素华. 城市雨水管道排水能力影响因素分析:以苏州市为例[J]. 净水技术, 2016, 35(2): 80-83. (QIAN H P, LU M B, HAN S H. Analysis of the influencing factors on the drainage capacity of urban rainwater pipeline: A case study of Suzhou City [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(2): 80-83. (in Chinese)) DOI: 10. 15890/j. cnki. jsjs. 2016. 02. 015.
- [25] 王溯,李田,冯沧,等. 排水系统地下水渗入量的水力学模型辅助评估[J]. 中国给水排水, 2010, 26(10): 13-18. (WANG S, LI T, FENG C, et al. Hydraulic model aided assessment of groundwater infiltration into drainage system [J]. Water Supply and Drainage, China, 2010, 26(10): 13-18. (in Chinese))
- [26] 郑敬伟,刘舒,胡昌伟. 流域洪水数字模型标准化研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(5): 534-538. (ZHENG J W, LIU S, HU C W. Study on standardization of watershed flood digital model [J]. Journal of Hehai University (Natural Science Edition), 2009, 37(5): 534-538. (in Chinese))