

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0058

刘畅,陈兴伟,刘传铭. 晋江流域 HEC-HMS 模型关键参数的分区率定[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 40-47, 96. LIU C, CHEN X W, LIU C M. The determination of key parameters of HEC-HMS based on multi-sites calibration and validation in Jinjiang River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 40-47, 96. (in Chinese)

# 晋江流域 HEC-HMS 模型关键参数的分区率定

刘 畅<sup>1</sup>, 陈兴伟<sup>1,2,3</sup>, 刘传铭<sup>1</sup>

(1. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福州 350007;  
3. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007)

**摘要:**为进一步揭示流域自然地理条件的空间分异,以及大型水库等人类活动对分布式水文模型参数时空变化的影响,以东南沿海的晋江流域为典型区,通过对研究区内 3 个水文站和山美水库集水区的亚区设置,构建晋江流域 HEC-HMS 模型;选取 1996—2014 年历年最大一场洪水系列,运用循环渐近法,对模型进行分区率定,以分析模型关键参数初损率  $\lambda$  和波速  $V$  的时空变化。结果表明:分区率定法可以得到流域不同区域模型关键参数的合理取值。模型关键参数时空变化明显,其中,初损率  $\lambda$  在 4 个亚区的平均值分别为 0.33、0.54、0.559 和 0.571,与区域的土地利用结构、水利工程等因素有关,水库集水区的初损率平均值最小,可能与区域林地面积增加以及水库蓄水有关;初损率在时间上的变化则与相应时间的起涨流量相关,起涨流量越大则初损率越小。5 个不同区域河道的波速  $V$  平均值为 3.218、2.241、1.95、1.427 和 1.217 m/s,呈上游至下游递减,区域平均坡度越大则波速越大;而波速  $V$  在时间上的变化与最大 6 h 降雨量及上游来水条件相关,降雨量越大、上游水量越大则波速越大。分区率定方法充分利用了流域水文控制站点的水文资料,构建的流域 HEC-HMS 模型,可以更好地反映流域不同区间水文过程的变化。  
**关键词:** HEC-HMS 模型;参数;时空变化;大型水库;晋江流域

中图分类号:P333 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## The determination of key parameters of HEC-HMS based on multi-sites calibration and validation in Jinjiang River basin

LIU Chang<sup>1</sup>, CHEN Xingwei<sup>1,2,3</sup>, LIU Chuanming<sup>1</sup>

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;  
2. Fujian Province Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou 350007, China;  
3. State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** A case study was conducted in the Jinjiang River basin, which is located in south-east coast of China, in order to explore how the spatial variations of the natural conditions and the human activities like large reservoir affect the temporal-spatial variations of the distributed hydrological model parameters. Three hydrological stations and the dam of Shanmei reservoir were used to separate the watershed into four sub-areas and the method of multi-sites calibration and validation was used to set up the HEC-HMS model. The annual largest flood series from 1996 to 2014 were selected and two key parameters, the initial loss rate ( $\lambda$ ) and the flood wave velocity ( $V$ ), were calibrated in each sub-area with approximate circulation method. The results showed

收稿日期:2018-10-26 修回日期:2019-01-16 网络出版时间:2019-01-24  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190122.1210.008.html>  
基金项目:国家自然科学基金(41877167)  
作者简介:刘畅(1994—),男,福建福州人,主要从事水文水资源研究。E-mail:1521010322@qq.com  
通信作者:陈兴伟(1963—),男,福建福鼎人,教授,博士,主要从事流域水沙污染物过程与防灾减灾研究。E-mail:cxwchen215@fjnu.edu.cn

that: The multi-sites calibration method was effective to obtain the values of key parameters in each sub-area. The temporal-spatial variation of parameters was clear. The annual average of the initial loss rates at four sub-area were 0.33, 0.54, 0.559 and 0.571, respectively, being affected by the land use and water conservancy project. The initial loss rate at reservoir catchment area was the lowest one among the four sub-areas, which indicated that woodland increasing and reservoir storage decreased the initial loss rate. The temporal variation of initial loss rate was dependent on the initial discharge. The greater the initial discharge was, the smaller the initial loss rate was. The annual averages of flood wave velocity at different sub-area were 3.218, 2.241, 1.95, 1.427 and 1.217 m/s, respectively, and it decreased from upstream to downstream. The spatial variation of flood wave velocity was related to the average slope of the watershed while the temporal variation was related to the largest 6 h areal rainfall and upstream runoff. A larger of the average slope and areal rainfall leads into a greater of wave velocity. The method of multi-sites calibration for setting up of HEC-HMS made it possible to reveal the differences of hydrologic processes in different region of the basin.

**Key words:** HEC-HMS; parameters; spatial-temporal variation; large reservoir; Jinjiang River basin

洪水灾害是人类面临的损失最严重的自然灾害之一。随着人口的增加,经济的发展,财产的聚集,洪灾损失呈逐年上升趋势<sup>[1]</sup>。洪水过程及其规律的研究是减轻洪灾危害的有效途径。分布式水文模型有效地反映了复杂的水文循环过程和机理,在解决水文实际问题中得到普遍应用<sup>[2-7]</sup>。HEC-HMS 模型是美国陆军兵团水文工程中心开发的水文模型,将水文过程分为降雨、产流、坡面汇流、地下水、河道汇流这几个过程。模型具有模块化的设计结构,产流和汇流过程均有多种不同的方案可供选择,用户可以根据研究区域的实际情况,选取适当的方法进行流域的水文过程模拟。HEC-HMS 模型在国内洪水研究方面有比较广泛的应用,取得较好的模拟效果<sup>[8-11]</sup>。

已有研究结果表明<sup>[8-12]</sup>, HEC-HMS 模型模拟过程中的主要参数包括径流曲线数(CN)、初损、流域滞时以及蓄量常数 K 等;其中, CN、流域滞时可运用 HEC-GeoHMS 模块计算得到,而初损(或初损率  $\lambda$ )、蓄量常数 K(或波速  $V$ )作为模型的关键参数需要进行率定。Yusop 等<sup>[13]</sup>、Lin 等<sup>[14]</sup>将部分模型参数设置为场次变化,以提高模拟精度。Lin 等<sup>[14]</sup>通过选取合适  $V$  值而固定  $V$  值、变化初损率的方法进行模型的率定。刘传铭等<sup>[15]</sup>在 Lin 等<sup>[14]</sup>的基础上,进一步分析了模型参数特点和物理意义,提出了模型关键参数  $\lambda$  和  $V$  率定的循环渐近法;并根据率定结果分别建立了初损率( $\lambda$ )与起涨流量、波速( $V$ )与最大 1 h 雨强的经验关系,取得了比较好的模拟效果,促进了模型的洪水预报应用。

上述研究针对的一般是单一站点的模型率定,对于有着多个站点的流域,通过多站点率定,可以更好地反映流域水文过程的空间变化。相关的模型构建方法还有待进一步研究。

另一方面,水库、水电站等水资源管理措施对模型模拟结果的影响较大<sup>[5,16-17]</sup>,也会对模型参数空间变化产生影响。因此,对于大型水库影响下的多站点流域,HEC-HMS 模型的构建方法及其关键参数的时空变化问题值得进一步研究。本文以东南沿海的晋江流域为典型区,利用流域内 3 个水文站以及山美水库的观测数据,采用分区率定的方法,开展相关研究。

## 1 研究区概况与数据

晋江是福建省仅次于闽江、九龙江和汀江的第四条大江,位于福建省泉州市;流域面积 5 629 km<sup>2</sup>,干流长 182 km。包含西溪、东溪两大支流,其中西溪发源于安溪感德乡,东溪发源于永春县呈祥乡。流域属热带海洋性季风气候,降雨多集中夏季;地貌以山地为主,河流深切,地势高峻。受气候和地形因素影响,流域内部多发暴雨洪水,进而导致滑坡、泥石流等灾害。山美水库位于东溪流域中游,坝高 102.8 m,水库正常高水位 96.48 m,控制流域面积 1 020 km<sup>2</sup>,在晋江流域夏季多发洪水期间在防洪方面发挥重要的作用。

研究区数据包括空间数据以及水文气象数据。空间数据包括地形、土壤以及土地利用数据,其中地形数据为 30 m 分辨率 DEM;土壤数据为福建省土壤肥料实验站绘制的 1:50 万土壤类型图经数字化得到,并利用土壤水文特性软件 SPAW 计算得到其水文特性;土地利用数据为 2006 年 Landsat TM 遥感影像解译得到。

水文气象数据为 1996—2014 年每年最大一场洪水资料,包括晋江流域内 28 个雨量站降雨数据、3 个水文站实测流量数据、山美水库下泄流量、水位变化以及水库水位-库容曲线等。

## 2 研究方法

### 2.1 HEC-HMS 模型主要参数及其关键参数率定的循环渐近法

HEC-HMS 模型<sup>[18-19]</sup>主要参数包括 CN、初损、流域滞时以及蓄量常数  $K$  等,其中 CN、流域滞时与土地利用类型、土壤类型以及水文条件相关,可以根据 CN 值查算表,并结合 Arcgis 平台直接计算获得。初损指径流产生前的降雨损失,与土壤前期含水量有关,因初损不易求得,定义一个参数初损率( $\lambda$ ),初损与流域最大蓄水能力( $S$ )的关系为

$$I_a = \lambda \times S \quad (1)$$

因  $S$  变化范围较大,为缩小取值范围,可以通过径流曲线数 CN 来求得  $S$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

蓄量常数  $K$  主要影响洪水的汇流速度,通过洪水运动波速可以求得  $K$

$$K = \frac{L}{V \times 3600} \quad (3)$$

式中: $L$  为河道长度(m); $V$  为洪水运动波波速(m/s)。

对于每一场洪水,参数  $\lambda$  和  $V$  均为未知数,需要通过参数率定来确定。刘传铭等<sup>[15]</sup>提出的参数率定循环渐近法,通过固定  $\lambda$  变化  $V$ ,再固定  $V$  变化  $\lambda$ ,多次循环后模型洪水模拟结果逐渐接近目标值。率定得到的初损率和波速,分别用于和起涨流量及最大 1 h 雨强进行线性拟合,构建了两组比较好的经验关系。这种模型率定方法所得参数物理意义明确,模型模拟精度较高,有助于拓展 HEC-HMS 模型在洪水预报等方面的应用。

### 2.2 晋江流域 HEC-HMS 模型构建及其关键参数的分区率定

#### 2.2.1 流域分区以及子流域的划分

运用 HEC-GeoHMS 对流域 DEM 进行处理,根据流域内三个水文站(安溪、洪濂、石砬)以及山美水库大坝的位置,分别设置流域出口,从而将晋江流域分为 4 个亚区(图 1),其中,安溪亚区 2 464 km<sup>2</sup>,水库集水区 1 020 km<sup>2</sup>,洪濂亚区 688 km<sup>2</sup>,石砬亚区 861 km<sup>2</sup>。

在此基础上,将晋江流域划分为 73 个子流域,其中安溪亚区 34 个,水库集水区 15 个,洪濂亚区 10 个,石砬亚区 14 个。

#### 2.2.2 三个水文站的关键参数率定

选取 1996—2014 年石砬站历年最大一场洪水系列,其中以 1996—2009 年为率定期,采用循环渐



图 1 研究区概况与子流域划分

Fig. 1 Location of the study area, sub-areas and hydrological stations

进法,率定各个亚区的参数  $\lambda$  和  $V$ 。模拟时间步长 30 min。以洪峰流量、洪量相对误差,峰现时间差和效率系数为指标评价模拟的精度。

#### 2.2.3 山美水库集水区关键参数率定

运用 HEC-HMS 模型中的水库模块<sup>[20]</sup>,设置水库的水位-库容曲线。每场洪水模拟时,输入水库的初始水位以及下泄流量过程即可进行模型模拟,模拟得到水库的水位变化过程。因为没有实测洪水过程,水库集水区的模拟目标为水库的水位变化过程,当模拟水位过程与实测水位过程相近,则认为水库集水区模拟效果较好。通过水位过程效率系数和洪水过程期间的最大水位差,可以评价水库集水区的模拟精度。

#### 2.2.4 参数影响因子分析

初损率  $\lambda$  和洪水前期的流域土壤含水量有关,但土壤含水量资料不足。相关研究<sup>[14-15]</sup>认为起涨流量作为洪水开始上涨时的流量,可以在一定程度上反应土壤前期的含水量。他们的结果表明初损与起涨流量密切相关。参照该法,选取洪水起涨前 24 h 的流量平均值  $Q$  作为起涨流量,各亚区均可建立  $Q$  与初损率  $\lambda$  的相关关系,用于分析参数  $\lambda$  的变化。

波速  $V$  的大小和洪水的汇流过程有关,参考相关文献的方法,选取了包括 1 h 最大降雨强度<sup>[15]</sup>、最大 3 h 降雨强度<sup>[21-23]</sup>、最大 6 h 降雨强度<sup>[24-26]</sup>等,均取得较好的效果。因此本文选取最大 1 h、3 h 和 6 h 亚区面雨量与波速  $V$  建立相关关系,并进行比较。

## 3 结果分析

### 3.1 率定结果

山美水库集水区和 3 个水文站的率定结果见表 1。总体上看,除了 2004、2005 年两场洪水的模拟效

果较差外,其他场次结果都比较好。2004 年安溪站、洪濂站洪峰流量分别仅为 402.5、254.9 m<sup>3</sup>/s,相比于其他场次洪水,这场洪水的水量太小难以准确模拟;观测误差也可能是原因之一。2005 年洪水模拟效果较差的原因,包括实测数据的合理性等问题有待进一步核查。不计入这两场洪水的结果,率定期安溪站的洪峰平均误差 8.5%,洪量平均误差 5.34%,平均峰现时差 0.92 h,平均效率系数

0.858;洪濂站分别为 9.97%、7.96%、1.58 h 和 0.831;石碇站分别为 10.66%、12.07%、2.5 h 和 0.767。表明流域上游的安溪、山美水库两个亚区的模拟结果比受山美水库调节影响的洪濂、石碇亚区好。这一结果也表明,一方面,水库调度导致下游河道水情复杂,需予更准确观测;另一方面,模型自身尚需进一步改进水库调节对流域径流过程影响的模拟。

表 1 模型模拟结果

Tab. 1 Results of HEC-HMS model

洪水场次	山美水库		安溪站					洪濂站					石碇站				
	最大水位差/m	效率系数	实测洪峰/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	洪峰误差/%	洪量误差/%	峰现时差/h	效率系数	实测洪峰/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	洪峰误差/%	洪量误差/%	峰现时差/h	效率系数	实测洪峰/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	洪峰误差/%	洪量误差/%	峰现时差/h	效率系数
1996	0.570	0.990	2 800.0	7.76	-4.10	-0.50	0.910	1 830.0	-9.85	-1.38	-1.50	0.871	4 630.0	-2.69	12.72	-3.0	0.701
1997	0.187	0.978	2 980.0	2.82	7.34	-1.50	0.928	1 218.3	-4.51	8.74	-2.00	0.902	4 190.0	0.94	13.49	-4.0	0.904
1998	0.332	0.949	1 650.0	30.31	4.21	-0.50	0.630	486.1	12.61	8.06	-0.50	0.635	2 692.5	45.17	43.42	-2.0	0.318
1999	0.238	0.987	4 440.0	4.04	-9.46	0	0.904	1 244.3	-14.93	-10.91	0	0.915	5 850.0	8.05	-5.67	-2.0	0.800
2000	0.970	0.990	3 600.0	13.51	-11.03	2.50	0.855	1 380.0	15.45	4.61	-3.00	0.848	6 167.5	16.10	3.66	-2.5	0.938
2001	0.225	0.990	1 430.0	-21.00	-3.43	-0.50	0.908	1 137.5	7.53	6.01	-0.50	0.923	2 410.0	-21.26	19.40	1.0	0.664
2002	0.980	0.990	3 470.0	0.16	-10.59	0	0.907	1 958.0	-12.48	-14.20	-5.50	0.824	4 857.5	8.55	11.40	-1.0	0.957
率定期	0.280	0.990	1 720.0	3.34	2.07	1.5	0.862	1 110.0	0.68	-8.18	1.00	0.838	3 825.0	2.22	1.19	-1.5	0.897
2004	无	无	402.5	-23.80	-2.62	-2.00	0.317	254.9	29.82	15.42	2.50	0.516	1 507.1	22.69	19.17	-4.0	-0.006
2005	1.980	0.973	2 940.0	63.74	20.78	-1.00	0.422	830.0	22.78	40.65	0	0.131	4 735.0	20.16	36.83	-0.5	0.364
2006	0.514	0.990	3 700.0	4.65	0.85	0.50	0.830	1 520.0	1.27	-14.64	-1.50	0.926	5 390.0	3.07	-13.75	0.5	0.877
2007	0.296	0.990	2 070.0	8.89	-3.29	-1.00	0.925	480.0	-3.33	-2.86	-0.50	0.781	3 035.9	0.28	12.94	0.5	0.836
2008	0.084	0.990	835.7	1.39	-5.34	-1.00	0.797	568.0	15.35	7.29	-2.00	0.801	2 580.0	4.07	5.22	-3.0	0.777
2009	无	无	1 100.0	-4.17	3.00	-1.50	0.830	388.0	-21.68	8.58	-1.00	0.710	1 886.5	-15.55	1.99	-9.0	0.529
绝对平均	0.425	0.985		8.50	5.34	0.92	0.858		9.97	7.96	1.58	0.831		10.66	12.07	2.5	0.767
2010	0.848	0.990	2 860.0	-1.97	23.72	0	0.860	754.6	6.79	-0.19	-1.50	0.895	4 148.9	-14.12	22.69	2.0	0.822
2011	0.783	0.990	1 650.0	1.43	15.61	-0.50	0.809	277.1	-50.23	-16.63	2.00	0.045	2 498.5	-34.10	6.50	5.5	0.131
2012	0.142	0.990	1 150.0	-10.17	-9.78	0	0.925	436.2	-24.44	6.16	0.50	0.820	2 048.2	-28.37	3.94	2.5	0.679
2013	0.393	0.990	1 770.0	10.54	17.38	6.00	0.706	388.2	-15.69	1.04	9.00	0.674	2 630.0	-13.56	2.45	7.5	0.616
2014	0.447	0.990	2 114.0	2.07	18.19	-1.00	0.910	484.2	-0.91	-7.14	1.50	0.852	3 073.1	-9.51	0.76	0	0.963
绝对平均	0.523	0.990		5.23	16.94	1.50	0.842		11.95	3.63	3.13	0.81		16.39	7.46	3.0	0.770

3.2 模型关键参数变化的经验关系

通过率定,可以得到各亚区各场次洪水的模型关键参数初损率λ和波速V的取值。各亚区的初损率λ与对应场次的起涨流量的关系见图2。其相关分析结果如表2,显示初损率与起涨流量的相关系数均在0.75以上,说明初损率与起涨流量的相关性较强。

分别尝试建立了波速V与1h、3h、6h降雨量的相关关系,对比后发现6h降雨量的相关性最好。而从亚区看,安溪亚区、水库集水区的波速与最大

表 2 初损率-起涨流量相关关系

Tab. 2 Regression of the initial loss rate and the initial discharge

区域	相关关系	相关系数(R <sup>2</sup> )
安溪亚区	$\lambda=325.098 \times Q^{-1.370}$	0.799
水库集水区	$\lambda=7.126 \times Q^{-0.690}$	0.859
洪濂亚区	$\lambda=501.661 \times Q^{-1.745}$	0.791
石碇亚区	$\lambda=3.979 \times Q^{-0.497}$	0.765

6h降雨强度相关关系较好,而洪濂亚区、石碇亚区的相关关系较差。显然,洪濂亚区的波速V除了受

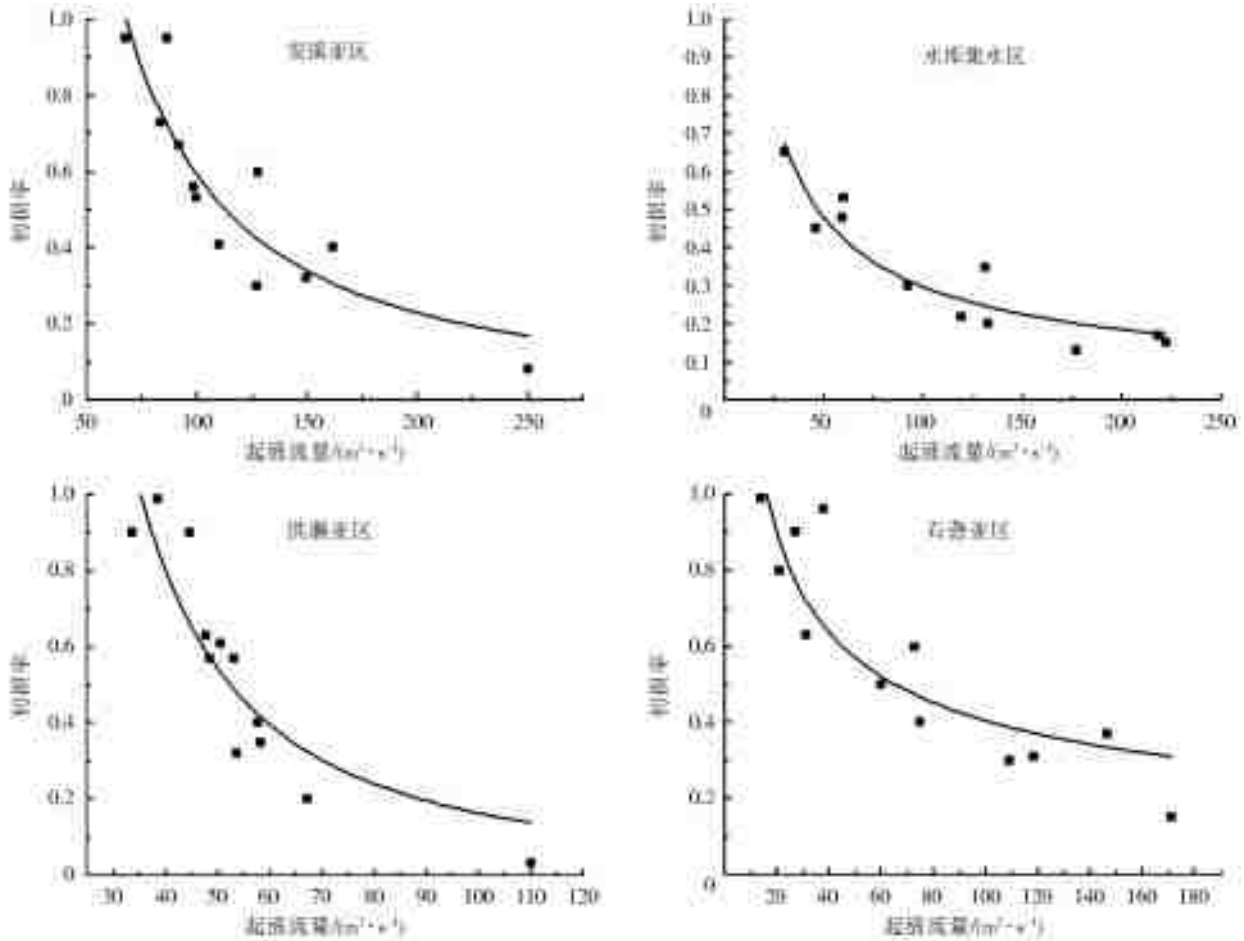


图 2 各亚区初损率-起涨流量关系

Fig. 2 Relationship between the initial loss rate and the initial discharge at each sub-area

到亚区内降雨影响外,还受到山美水库下泄流量的影响,因此将洪濂亚区波速  $V$  的影响因子更替为洪濂亚区的面雨量和下泄流量径流深之和。石砦亚区内东溪、西溪两支流的汇流过程不同,波速除受到降雨影响外还与上游洪水过程相关,波速  $V$  的取值不应相同。综合考虑这些因素,采用安溪亚区(2 464 km<sup>2</sup>)与石砦亚区西溪支流(610 km<sup>2</sup>)按面积比的加权面雨量作为西溪支流的影响因子,石砦亚区东溪支流采用相同方法。图 3 为波速  $V$  和对应场次的 6 h 降雨量关系,表 3 为各亚区波速  $V$  与最大 6 h 降雨量的相关关系。表明新的影响因子使得洪濂和石砦亚区的相关关系也比较好。

表 3 波速与降雨强度相关关系

Tab. 3 Regression of flood wave velocity and areal rainfall

区域	相关关系	相关系数( $R^2$ )
安溪亚区	$V=0.070 \times P^{0.873}$	0.795
水库集水区	$V=0.103 \times P^{0.831}$	0.782
洪濂亚区	$V=0.038 \times P^{0.846}$	0.870
石砦亚区西溪支流	$V=0.059 \times P^{0.852}$	0.793
石砦亚区东溪支流	$V=0.112 \times P^{0.564}$	0.768

总体上看,流域上游的安溪亚区,区域内无大型

水库调度影响,安溪亚区参数的影响因子主要为降雨,因此参数的率定可以与降雨相关要素直接建立关系。其他亚区受到水库调度作用以及在多站点的情况下,上游洪水的影响,影响参数的因子不仅是降雨,还包括其他要素,因此各亚区用于建立参数经验关系的要素选取也不同。

### 3.3 模型验证

为了进一步验证模型参数率定结果以及两个参数经验关系的有效性,选取 2010—2014 年共 5 场洪水进行验证。根据表 2、表 3 所示的经验关系,分别计算 4 个亚区 5 场洪水的  $\lambda$  和  $V$ ,代入模型进行模型的验证模拟。

验证期结果也在表 1 一并列出,其中 2011 年洪濂站洪峰流量仅 277.1 m<sup>3</sup>/s,也难以准确模拟。验证期结果同样表明,流域上游的安溪、山美水库两个亚区的模拟结果,比受山美水库调节影响的洪濂、石砦亚区好。

### 3.4 初损率和波速的时空变化及其影响因素

#### 3.4.1 初损率

率定期 1996—2009 年 4 个亚区的初损率变化

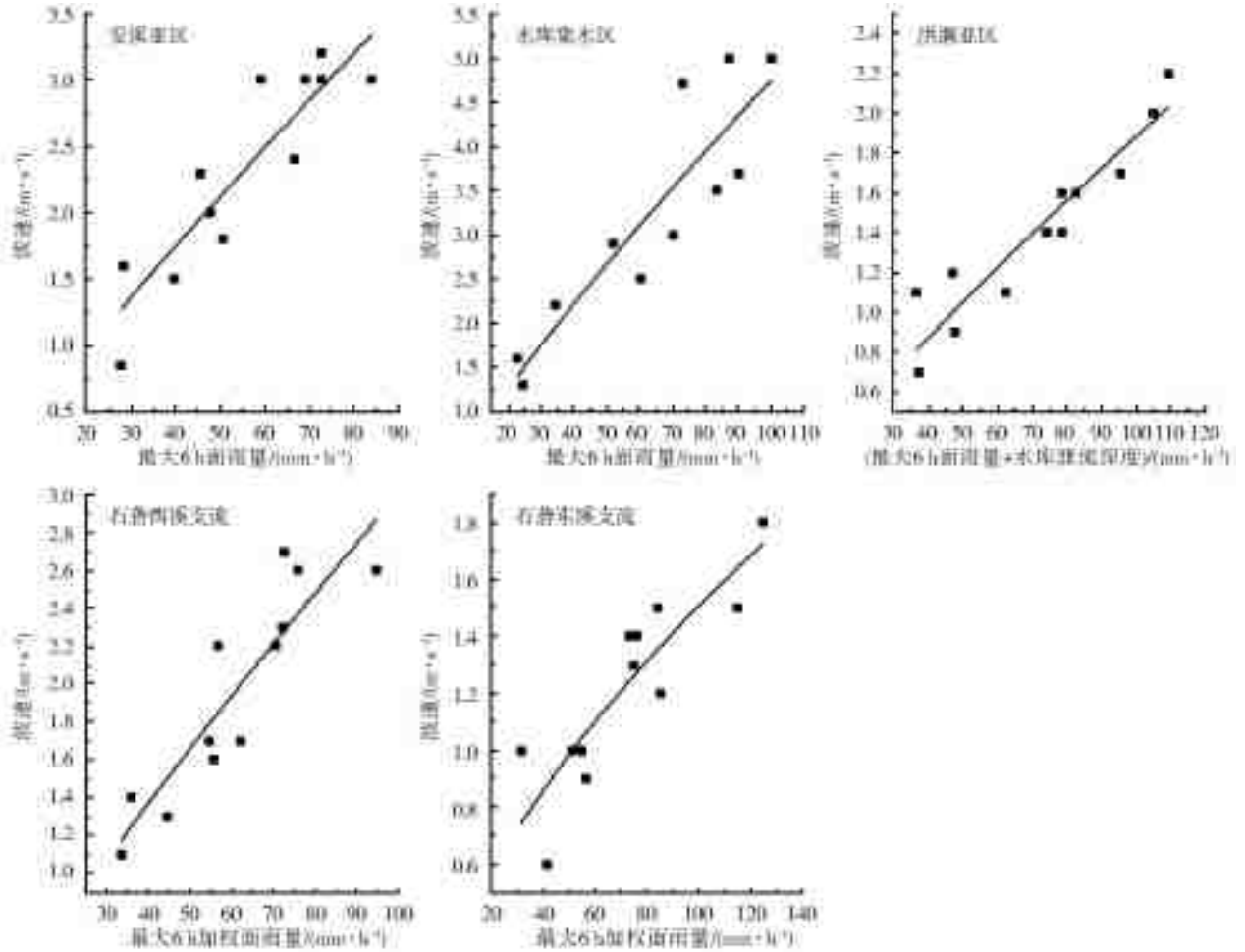


图3 各亚区波速与降雨强度关系

Fig. 3 Relationship between flood wave velocity and areal rainfall

可以点绘见图4,其均值统计见表4。结果表明,初损率的时空变化比较大。水库集水区初损率的平均值最小,仅0.33,且场次间的变化也最小。通过统计各亚区土地利用中林地面积的比例,水库集水区的林地面积比例最大,其他3个亚区的初损率值也基本表现出与林地面积比例的负相关。因为林地有较好的涵养水源的作用,同样条件下林地土壤含水量较其他土地利用类型较大,水库集水区的土壤前期含水量也大于其他亚区,再加上山美水库的蓄水作用也会导致其周边土壤含水量的上升,因此模型

表4 各亚区初损率平均值和林地面积比例

Tab. 4 Mean of the initial loss rate and percentage of forest land at each sub-area

区域	安溪亚区	水库集水区	洪濂亚区	石碧亚区
初损率平均值	0.54	0.33	0.559	0.571
林地面积比例(%)	53.4	64.4	60.7	47.8

中水库集水区的初损率 $\lambda$ 取值最小,变化最小是符合流域的实际情况。

### 3.4.2 波速

率定期1996—2009年4个亚区波速的统计见表5,场次间的变化分东、西溪点绘见图5。图5显示了在晋江西溪、东溪干流河道各亚区的波速变化,西溪流域上游波速明显大于下游波速,东溪流域的三个区段波速也依次递减。通过对比各河道流经流域的平均坡度,河道波速的大小与河道流经流域的平均坡度相关,平均坡度越大则波速越大。晋江流域下游地势平坦,坡度较小,延缓了洪水的汇流速度,两大支流西溪和东溪的波速均较上游小。

图5还显示了降雨强度与波速的相关关系,降雨强度越大,洪水汇流越快则波速越大。不同年份

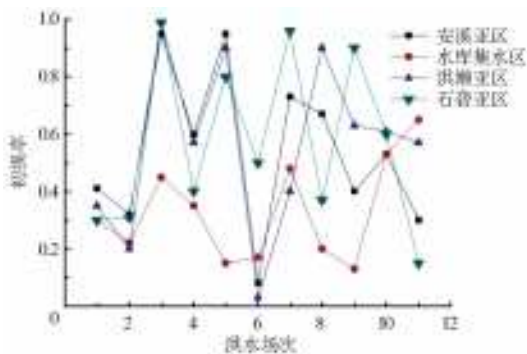


图4 初损率 $\lambda$ 的时空变化

Fig. 4 Spatial variation of the initial loss rate

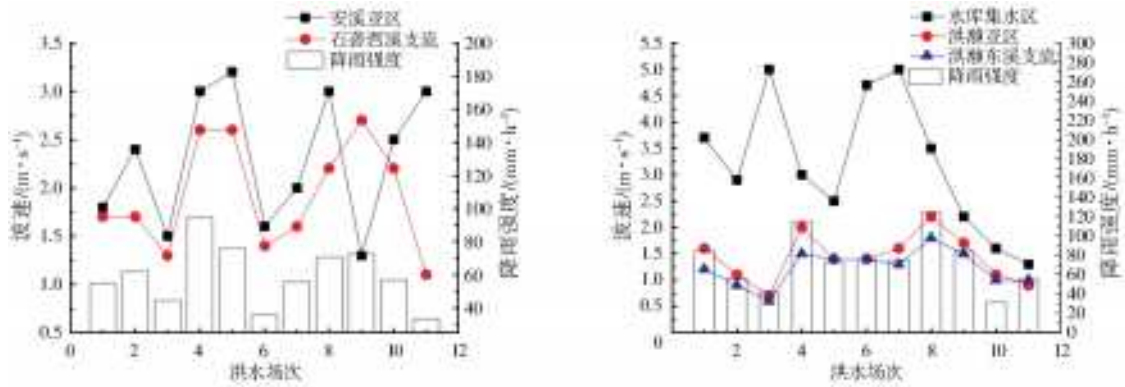


图 5 西溪、东溪波速对比与降雨强度

Fig. 5 Flood wave velocity and areal rainfall at Xixi and Dongxi stations

场次洪水的降雨过程不同,降雨强度影响了波速在年际间的变化;而流域平均坡度则影响了不同区段波速的平均值,即波速的整体变化。

表 5 流域各区间河道波速平均值与河道流域平均坡度

Tab. 5 Mean of flood wave velocity and average slope at each sub-area

流域区间	安溪亚区	石碇西溪支流	水库集水区	洪静亚区	石碇东溪支流
平均波速/(m·s <sup>-1</sup> )	2.241	1.95	3.218	1.427	1.217
平均坡度/(°)	18.25	14.133	17.62	13.99	8.998

#### 4 结论

(1)采用分区率定法构建的流域 HEC-HMS 模型,充分利用了流域水文控制站点的水文观测资料,可以更好地反映流域不同区间水文过程的变化。

(2)分区率定法可以得到流域不同区域模型关键参数的空间变化。其中,初损率  $\lambda$  在 4 个亚区的平均值分别为 0.54、0.33、0.559 和 0.571; 5 个不同区域河道波速  $V$  的平均值分别为 3.218、2.241、1.95、1.427 和 1.217 m/s。

(3)初损率  $\lambda$  在空间上的变化与区域的土地利用结构、水利工程等因素有关,水库集水区的初损率  $\lambda$  平均值最小,可能与集水区内林地面积的增加以及大型水库的蓄水作用有关。初损率  $\lambda$  在时间上的变化与相应时间的起涨流量(反映流域下垫面含水量)相关,起涨流量越大初损率  $\lambda$  越大。波速  $V$  整体呈现由上游至下游递减的趋势,这与流域下游地势更为平坦,坡度减小有关;而波速  $V$  年际间变化则与相应的降雨强度、上游来水条件相关,降雨强度越大、上游来水量越大则波速越大。

#### 参考文献(References):

[1] 孙章丽,朱秀芳,潘耀忠,等.洪水灾害风险分析进展与展望[J].灾害学,2017,32(3):125-130,136. (SUN Z

L,ZHU X F,PAN Y Z, et al. Flood risk analysis: progress, challenges and prospect[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32 (3): 125-130, 136. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-811X.2017.03.022.

[2] YONG B,ZHANG W C,ZHAO D Z, et al. Application of hydrological modeling system HEC-HMS to Baohe catchment of Hanjiang Basin[J]. Bulletin of Soil & Water Conservation,2006,6(3):86-90.

[3] GYAWALI R,WATKINS D W. Continuous hydrologic modeling of snow-affected watersheds in the Great Lakes Basin using Hec-hms[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18 (1): 29-39. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000591.

[4] CYDZIK K,HOGUE T S. Modeling postfire response and recovery using the hydrologic engineering center hydrologic modeling system (Hec-Hms) [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 45 (3): 702-714. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2009.00317.x.

[5] 徐宗学,程磊.分布式水文模型研究与应用进展[J].水利学报,2010,41(9):1009-1017. (XU Z X,CHENG L. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(9):1009-1017. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2010.09.001.

[6] 吴杰峰,陈兴伟,高路,等.人类活动对晋江流域径流演变影响的分析与定量评估[J].南水北调与水利科技,2017,15(2):65-72,79. (WU J F,CHEN X W,GAO L, et al. Quantitative assessment of runoff changes under the impact of human activities in the Jinjiang River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2017,15(2):65-72,79. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.010.

[7] 侯静雯,叶爱中,甘衍军,等.洪水灾害危险性评价方法的研究与改进[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):57-62,107. (HOU J W, YE A Z, GAN Y J, et al. Research and Improvement on Assessment Method of

- Flood Hazard[J]. *South-to-north Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(1): 57-62, 107. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 20180009.
- [8] 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. (ZHANG J J, NA L, ZHANG B. Applicability of the distributed hydrological model of HEC-HMS in a small watershed of the Loess Plateau area[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(3): 52-57. (in Chinese) DOI: 10. 13332/j. 1000-1522. 2009. 03. 021.
- [9] 胡国华, 陈肖, 于泽兴, 等. 基于 HEC-HMS 的郴江流域山洪预报研究[J]. *自然灾害学报*, 2017, 26(3): 147-155. (HU G H, CHEN X, YU Z X, et al. Research on forecast of mountain flood in Chenjiang River basin based on HEC-HMS model[J]. *JOURNAL OF NATURAL DISASTERS*, 2017, 26(3): 147-155. (in Chinese) DOI: 10. 13577 /j. jnd. 2017. 0318.
- [10] 李信. 基于 HEC-HMS 的雅砻江流域理塘河洪水预报研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015. (LI X. Flood Forecasting for Litang River, Yalong region based on HEC-HMS[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). 2015. (in Chinese))
- [11] 郑鹏, 林韵, 潘文斌, 等. 基于 HEC-HMS 模型的八一水库流域洪水重现期研究[J]. *生态学报*, 2013, 33(4): 1268-1275. (ZHENG P, LIN Y, PAN W B, et al. Flood return period analysis of the Bayi reservoir watershed based on HEC-HMS model[J]. *ACTA ECOLOGICA SINICA*, 2013, 33(4): 1268-1275. (in Chinese) DOI: 10. 5846/stxb201204060484.
- [12] SARDOII E. R, ROSTAMI N, SIGAROU DI S. K, et al. Calibration of loss estimation methods in Hec-hms for simulation of surface runoff (case Study: Amirkabir Dam Watershed, Iran)[J]. *Advances in Environmental Biology*, 2012, 6(1): 343-348.
- [13] YUSOP Z, CHAN C H, KATIMON A. Runoff characteristics and application of Hec-hms for modelling stormflow hydrograph in an oil palm catchment[J]. *Water Science & Technology*, 2007, 56(8): 41-48. DOI: 10. 2166/wst. 2007. 690.
- [14] LIN M S, CHEN X W, CHEN Y, et al. Improving calibration of two key parameters in hydrologic engineering center hydrologic modelling system, and analysing the influence of initial loss on flood peak flows[J]. *Water Science & Technology a Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2013, 68(12): 24-2718. DOI: 10. 2166/wst. 2013. 562.
- [15] 刘传铭, 陈兴伟, 吴杰峰. HEC-HMS 水文模型参数初损率和波速率定的循环渐近法[J]. *灾害学*, 2017, 32(4): 222-226. (LIU C M, CHEN X W, WU J F. Approximate circulating method for the parameters calibration of HEC-HMS[J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(4): 222-226. (in Chinese) DOI: 10. 3969 / j. issn. 1000—811X. 2017. 04. 037.
- [16] DING X Y, ZHOU H D, WANG Y H. Impacts of climate change on pollution load in the Three Gorges Reservoir Based on a distributed hydrological model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(8): 1991-1998.
- [17] ZHAO G, GAO H L, NAZ B S, et al. Integrating a reservoir regulation scheme into a spatially distributed hydrological model[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 98: 16-31. DOI: 10. 1016/j. advwatres. 2016. 10. 014.
- [18] SCHARFFENBERG, WILLIAM A. Hydrologic modeling system HEC-HMS: user's manual-version 4. 0 [Z]. U. S. A: U. S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, 2013.
- [19] 李向新. HEC-HMS 水文建模系统原理·方法·应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015. (LI X X. Principles, methods and applications of HEC-HMS hydrologic modeling system[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015. (in Chinese)).
- [20] 林志东, 陈兴伟. 基于大型水库调节的晋江流域洪水模拟[J]. *山地学报*, 2017, 35(1): 16-22. (LIN Z D, CHEN X W. Rainflood simulation in Jinjiang River basin with regulation of large reservoir[J]. *Mountain Research*, 2017, 35(1): 16-22. (in Chinese) DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008-2786. 000191.
- [21] 温立成. 基于中短期降水预报的洪水预报与洪水调度研究[D]. 南京: 河海大学, 2004. (WEN L C. Flood forecasting and dispatching based on mid-and-short-range rainfall forecasting[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese) DOI: 10. 7666/d. w029562.
- [22] 雷向杰, 李芳, 赵晓萌. 延安市 2013 年 7 月极端连续降水致灾评估分析[J]. *暴雨灾害*, 2016, 35(6): 521-528. (LEI X J, LI F, ZHAO X M. Evaluation and analysis of extreme continuous precipitation induced disasters of Yan'an City in 2013 July[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2016, 35(6): 521-528. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-9045. 2016. 06. 004.
- [23] 李忠燕, 田其博, 张东海. 石阡县降雨型滑坡临界雨量的研究[J]. *贵州气象*, 2017, 41(5): 33-38. (LI Z Y, TIAN Q B, ZHANG D H, et al. Preliminary study of critical rainfall of landslides at Shiqian[J]. *Journal of Guizhou Meteorology*, 2017, 41(5): 33-38. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-6598. 2017. 05. 006.

(下转第 96 页)



- areas of China[J]. Geographical Research, 2015, 34(1): 39-52. (in Chinese)) DOI:10.11821/dlyj201501004.
- [11] 刘惠敏. 长江三角洲城市群综合承载力的时空分异研究[J]. 中国软科学, 2011(10): 114-122. (LIU H M. Global factor analysis and spatial differentiation study on comprehensive carrying capacity of urban agglomeration in the Yangtze River Delta[J]. China Soft Science, 2011(10): 114-122. (in Chinese))
- [12] 湖南省社会科学院绿色发展研究团队. 长江经济带绿色发展报告(2017)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2018. (Green development research team of human academy of social sciences. report on green development of Yangtze River Economic Belt (2017) [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2018. (in Chinese))
- [13] 付云鹏, 马树才. 城市资源环境承载力及其评价——以中国 15 个副省级城市为例[J]. 城市问题, 2016(2): 36-40. (FU Y P, MA S C. Urban resource and environment carrying capacity and its evaluation: A case study of 15 sub-provincial cities in China[J]. Urban problems, 2016(2): 36-40. (in Chinese)) DOI:10.13239/j. bjsshkxy. cswt. 160204.
- [14] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 等. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析[J]. 地理科学, 2013, 33(11): 1323-1329. (WANG F X, MAO A H, LI H L. Quality measurement and regional difference of urbanization in Shandong Province based on the entropy method[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(11): 1323-1329. (in Chinese))
- [15] 王振波, 梁龙武, 方创琳, 等. 京津冀特大城市群生态安全格局时空演变特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4132-4144. (WANG Z B, LIANG L W, FANG C L, et al. Study of the evolution and factors influencing ecological security of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4132-4144. (in Chinese)) DOI:10.5846/stxb201802050300.
- [16] 沈体雁, 冯等田, 孙铁山. 空间计量经济学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011. (SHEN T Y, FENG D T, SUN T S. Spatial Econometrics[M]. Beijing: Peking University press, 2011. (in Chinese))
- [17] 何宜庆, 翁异静. 鄱阳湖地区城市资源环境与发展协调评价[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 502-509. (HE Y Q, WENG Y J. Assessment of harmonious development between resource, environment and urban economy in Poyang Lake area[J]. Resources Science, 2012, 34(3): 502-509. (in Chinese))

.....

(上接第 47 页)

- [24] 封毅, 武博强, 崔灵周. 基于 BP 神经网络的台风降雨量预测研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 289-293. (FENG Y, WU B Q, CUI L Z. Study of forecasting typhoon rainfall based on BP neural network[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(3): 289-293. (in Chinese))
- [25] 管晓祥, 姚新宇, 沈婕, 等. 基于分布式模型的多维动态临界雨量山洪预警研究[J]. 江苏水利, 2017(12): 46-50. (GUAN X X, YAO X Y, SHEN J, et al. Study on multidimensional dynamic critical rainfall flash flood warning based on distributed model[J]. Jiangsu Water Resources, 2017 (12): 46-50. (in Chinese)) DOI:10.16310/j. cnki. jssl. 2017. 12. 010.
- [26] 蔡新玲, 蔡依晖, 叶殿秀, 等. 渭河流域降雨结构时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 370-375. (CAI X L, CAI Y X, YE D X, et al. Spatiotemporal variability characteristics of precipitation pattern in Weihe River basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 370-375. (in Chinese)) DOI:10.13869/j. cnki. rswc. 2017. 06. 056.