

文章编号: 1108 - 2786 - ( 2017 ) 1 - 16 - 07

DOI: 10. 16089 /j. cnki. 1008 - 2786. 000191

## 基于大型水库调节的晋江流域洪水模拟

林志东<sup>1</sup> 陈兴伟<sup>1 2 3\*</sup>

( 1. 福建师范大学 地理科学学院 福建 福州 350007; 2. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心 福建 福州 350007;

3. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地 福建 福州 350007)

**摘 要:** 为了进一步改善流域洪水空间变化与水库调节影响的模拟,应用分布式水文模型 HEC - HMS,在考虑大型水库调节模拟的基础上,对东南沿海晋江流域的暴雨次洪进行多站点率定模拟分析。选取 1972 ~ 1979 年晋江流域 15 场特大暴雨洪水,以洪峰误差、洪量误差、峰现时间、效率系数为评价指标,进行 10 场参数率定和 5 场模型验证。安溪、洪濂、石碇三个水文站在模型率定期的平均效率系数分别为 0.892、0.895、0.921,验证期的平均效率系数分别为 0.866、0.822、0.853。模拟效果较好,精度较高。结果表明:利用多站点模拟的方法,可以从流域尺度上更客观地率定模型参数,改善模型的模拟效果;初损率与起涨流量相关性显著,为模型洪水预报应用时初损参数的确定提供重要依据;山美水库的径流调节对洪濂站和石碇站的模拟结果具有显著影响。

**关键词:** HEC - HMS; 大型水库; 多站点模拟; 暴雨次洪; 晋江流域

**中图分类号:** P331

**文献标志码:** A

水文模型是对自然界中复杂的水文现象的近似模拟,在解决水文规律研究和生产实际问题等方面起着显著的作用<sup>[1]</sup>。HEC - HMS 是美国陆军兵团 ( US Army Corps of Engineer , US - ACE ) 水文中心开发的水文模型系统<sup>[2]</sup>。模型考虑下垫面的时空变异性,根据 DEM 及水系特征将流域划分成若干自然子流域或格网单元,依次计算每个子流域的产流量,最后演算到流域的出口断面,是较为全面的次降雨径流模拟模型。已有研究<sup>[3-12]</sup>表明 HEC - HMS 模型适用于众多流域的次洪模拟,结果显示其具有较高的精度,在洪水预报、降雨和下垫面空间变化的洪水响应等方面取得较多的成果。然而,众多学者运用 HEC - HMS 模型进行暴雨洪水研究时,往往只分析评价流域总出口点的模拟结果,且未能考虑流域内水库调度对洪水过程的影响。

就流域而言,仅考虑出口站,其总水量可能是平衡的,但对于流域径流情况的描述却是不充分的,空间分布预测需要多站点的校准和验证,流域子系统预测需要多要素的检验<sup>[14]</sup>。

流域中水库的滞洪、蓄洪作用对水文过程的产生重要影响。已有学者构建晋江流域 HEC - HMS 次洪模拟模型,结果显示其具有较好适应性,但只定义出口石碇站进行模拟分析,安溪、洪濂水文站的资料未以利用,也未考虑流域内大型水库对洪水调节的影响<sup>[13]</sup>。因此,本文以晋江流域为例,为了进一步改善流域洪水空间变化与水库调节影响的模拟,采用多站点率定的方法,并结合流域山美水库的调节,构建晋江流域三个水文站点校准和验证的 HEC - HMS 暴雨洪水模型,定量分析山美水库对洪水的影响,为区域的防洪减灾与水资源利用提供有效手

收稿日期( Received ): 2015 - 11 - 07; 改回日期( Accepted ): 2015 - 12 - 09。

基金项目( Foundation item ): 国家自然科学基金( 41301031 ); 福建省高校产学研合作科技重大项目( 2015Y4002 ) [ National Nature Science Foundation of China ( 41301031 ); Science and Technology Plan Key Projects of Fujian Province( 2015Y4002 ) ]

作者简介( Biography ): 林志东( 1990 - ), 男,福建漳州人,硕士研究生。研究方向:水文与水资源。[ Lin Zhidong ( 1990 - ), male, born in Zhangzhou, Fujian Province, M. Sc. candidate, major in hydrology and water resource ] E - mail : linzhidong56@ qq. com

\* 通信作者( Corresponding author ): 陈兴伟( 1963 - ), 男,博士,教授。研究方向:水文水资源与水环境。[ Chen Xingwei ( 1963 - ), male, PhD, professor, major in hydrology, water resource and water environment ] E - mail : cxwchen215@ 163. com

段与决策参考。

## 1 研究区概况

晋江流域位于福建泉州市东南部(图1),处于闽江与九龙江之间,流域面积 $5\,629\text{ km}^2$ ,占泉州市土地总面积 $53.8\%$ ,属亚热带湿润气候区,平均气温 $20^\circ\text{C} \sim 21^\circ\text{C}$ ,多年平均降水量 $1\,200 \sim 1\,900\text{ mm}$ ,降水年内分布不均,主要集中在 $5 \sim 8$ 月<sup>[15]</sup>;地貌上以中山、低山为主,地势高峻,河流深切,自西向东构成明显的阶状下降地形,形成了许多低缓丘陵和狭小的平原,整个地势向海倾斜<sup>[16]</sup>。晋江是福建省第三大河流,全长 $302\text{ km}$ ,干流长 $182\text{ km}$ ,有东、西溪二源,其正源为西溪,二溪汇流于南安的双溪口。山美水库位于晋江东溪流域中游,是研究区内唯一的大型水库,集水面积为 $1\,023\text{ km}^2$ ,占东溪流域的 $53.4\%$ ,总库容为 $6.55 \times 10^8\text{ m}^3$ ,坝高 $102.8\text{ m}$ ,水库正常高水位为 $96.48\text{ m}$ 。研究区每年兼受季风气候和台风影响,暴雨洪涝灾害频繁发生,山美水库发挥着防洪、灌溉、发电等重要作用,是晋江流域最重要的水利枢纽工程。

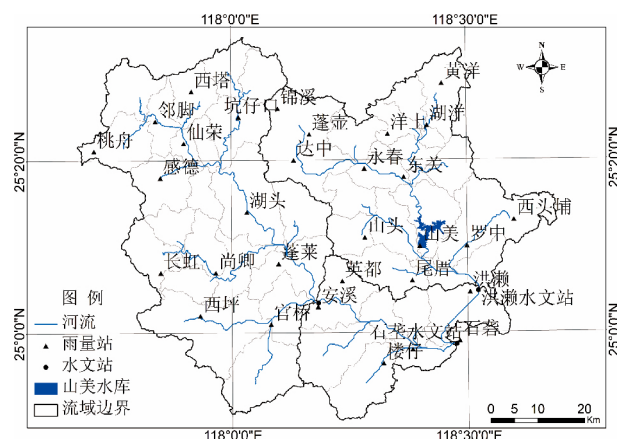


图1 研究区的位置及水文站、雨量站站点分布

Fig. 1 Location of study area and distribution of hydrological and rainfall stations

## 2 HEC-HMS 模型构建

### 2.1 基础数据整理

1) 水文数据。选取晋江流域1972~1979年洪濂、安溪、石碇三个水文站和30个雨量站15场逐时降雨径流数据,包含每年最大一次洪水。

2) 空间数据。包括地形数据、土壤类型和土地

利用数据。地形数据来源于研究区 $30\text{ m}$ 精度DEM。土壤数据通过对福建省土壤肥料实验站1:50万土壤类型图数字化得到,并化成11种主要土壤类型,土壤的水文属性通过美国农业部开发的土壤水特性软件SPAW(Soil Plant Atmosphere Water)软件计算得到<sup>[17]</sup>。土地利用数据为1985年的土地利用现状图,来源于中国科学院南京土壤所。

3) 水库数据。包括水库面积、坝高、最大库容、最高水位等基本信息,每场暴雨洪水的逐时水库水位和出库流量数据,来源于《浙闽台河流水文资料》<sup>[18]</sup>。

### 2.2 模型空间结构

利用HEC-GeoHMS5.0模块对研究区的DEM进行填洼、流向、汇流累积、河网提取,划分子流域,定义出口,并获取流域的地形参数及河道特征参数。晋江流域分成53个子流域,结合实际的气象水文站及水库分布情况,兼顾分布式子流域划分的意义,将整个流域以水文站点为名分为三个亚区。其中,安溪亚区面积 $2\,466\text{ km}^2$ ,分为25个子流域;洪濂亚区面积 $1\,704\text{ km}^2$ ,分为19个子流域;石碇亚区面积 $890\text{ km}^2$ ,分为9个子流域。

### 2.3 参数率定

借鉴已有的研究成果<sup>[19]</sup>,采用SCS曲线数法计算产流,SCS单线法计算坡面汇流,指数退水法模拟流域基流,马斯京根法进行河道洪水演进。参数校准顺序遵循先上游后下游的原则<sup>[14]</sup>,且当上游水文站校准完毕,保持其参数不变,继续校准下游水文站。由于石碇站洪水流量变化同时受安溪站和洪濂站影响,因此,先对上游的安溪和洪濂亚区进行参数率定,再率定石碇亚区的参数<sup>[20]</sup>。

模型部分参数可由实测资料直接求得或经验公式计算得到,如CN值可依托ArcGIS平台,利用土地利用数据和土壤数据进行叠加,获得各个子流域CN值,洪水流域滞时的延迟时间由模块直接计算获得,等等。有些参数是无法直接确定,如SCS产流模型中的参数初损,需要进行率定。本文借鉴Lin等研究的初损率定方法<sup>[12]</sup>,着重探讨HEC-HMS模型参数初损的率定。初损( $I_a$ )指径流产生前的所有降雨损失,主要包括截留、蒸发和下渗等。初损参数随流域前期土壤含水量等因素的变化而变化,且具有空间差异性。初损率( $\lambda$ )定义为初损( $I_a$ )与流域最大蓄水能力( $S$ )的比值,不同区域初损率取值存在差异<sup>[21]</sup>。 $I_a$ 不易求得,但通常认为 $I_a$

与  $S$  之间存在线性关系:

$$la = \lambda * S \quad (1)$$

为了计算  $S$ , 引入  $CN$  参数, 为径流曲线数, 是反映地表产流能力的综合参数<sup>[22]</sup>。 $S$  与  $CN$  的关系表达式为:

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

首先 根据土壤水文组、查算表获得各个子流域的  $CN$  值, 通过公式 (2) 求得各个子流域的  $S$  值。其次, 通过试错法的方式, 在  $\lambda$  取值 0 ~ 1 之间逐一尝试不同值, 再由公式 (1) 反推各个子流域的初损值  $la$ , 输入模型, 直到模拟的洪水过程与观测值最为吻合, 也即效率系数高, 洪峰、洪量与峰现时间误差小, 则认为  $\lambda$  值是该场次洪水的最优值。重复以上步骤, 求得率定期所有场次相应的最优  $\lambda$  值。

从洪水过程来讲, 分为涨水过程和退水过程<sup>[23]</sup>。将洪水开始上涨时刻的流量定义为起涨流量, 可以反映流域前期土壤的湿润程度。起涨流量越大, 流域降雨前期越湿润, 土壤下渗等降雨损失就越小; 反之起涨流量越小, 流域降雨前期越干燥, 土壤下渗的降雨损失就越小<sup>[24]</sup>。因此, 初损与起涨流量是密切相关的。所以, 可以尝试将率定期各个场次的  $\lambda$  值, 与流域出口水文站相应场次洪水过程的起涨流量建立相关关系。

#### 2.4 山美水库的率定

在 HEC-HMS 模型软件中水库运行主要分为四个步骤: ①根据山美水库自身条件, 设置水库面积、最大库容、最高水位、库容关系曲线等基本信息; ②设定不同场次洪水水库的初始水位或初始库容, 表示洪水来临时水库的初始状态; ③水库出流模拟方式采用水库的实测出库流量进行放水; ④水库集水区的洪水模拟是通过观测水位变化曲线与模拟水位曲线相对比, 曲线吻合表明水库的库容变化是准确的, 水库集水区模拟结果较好。

### 3 结果分析

#### 3.1 参数初损率定结果分析

通过反复尝试的方法对晋江流域三个亚区初损率进行率定, 每场洪水寻求一个最优初损率, 并建立初损率与起涨流量的关系式。图 2(a-c) 分别表示率定期 10 场洪水安溪、洪濂、石碇率定出的初损率值和起涨流量的散点图。可以看出: 安溪亚区的初损率集中在 0.3 ~ 0.4, 洪濂亚区的初损率集中在 0.4 ~ 0.5, 石碇亚区的初损率集中在 0.1 ~ 0.2, 流域初损率存在空间差异性, 上游较大, 下游较小; 初损率与起涨流量为幂函数拟合效果最好, 起涨流量越大, 初损率越小; 反之, 起涨流量越小, 初损率越大。由表 1 可知, 安溪、洪濂、石碇三个站点率定的初损率与起涨流量可以用相同的非线性关系来表示, 但参数有所不同, 也就是初损率与起涨流量的关系式在不同区域具有一定差异, 同样的起涨流量值在不同流域对应的初损率值大小是不一样的。三个回归方程的  $R^2$  值都达到 0.85 以上, 表明用起涨流量推求流域初损值的方法, 可以适用于晋江洪水期初损的确定。应用表 1 的相关关系, 通过水文站的实测流量过程确定的起涨流量, 可求得预测暴雨的初损率, 再由公式 (1)、(2) 反推初损值, 输入模型, 就可进行模型的验证, 或洪水模拟预报。

表 1 初损率与起涨流量的回归关系

Tab. 1 The regression of initial loss and initial discharge

站点	回归关系	$R^2$
安溪	$Y = 3.3369X^{-0.6149}$	0.917
洪濂	$Y = 2.2041X^{-0.4846}$	0.894
石碇	$Y = 2.3774X^{-0.5266}$	0.868

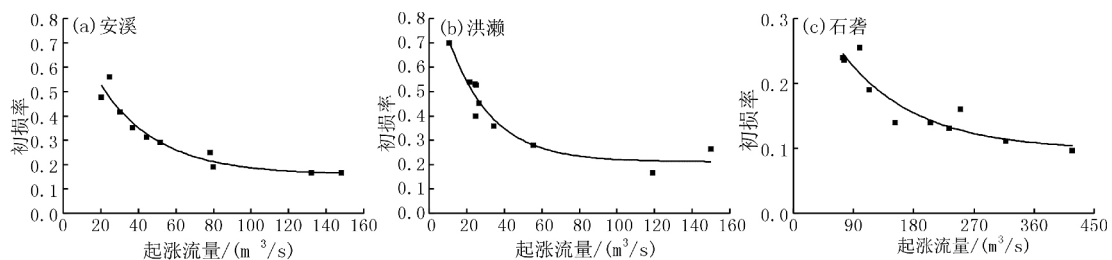


图 2 初损率与起涨流量的关系

Fig. 2 Relationship between initial loss and initial discharge

3.2 三个站点模拟结果分析

本文以 1 h 为模拟时间步长,并选取洪峰流量误差、洪量误差、峰现时间误差、效率系数<sup>[25]</sup>对模型模拟精度进行评价,晋江流域三个水文站站点的率定验证结果如表 2 所示。率定期 10 场洪水,安溪站洪峰误差最高为 13.4%,平均洪峰误差为 5.87%,洪量平均误差为 4.13%,平均峰现时间误差为 0.8 h,平均效率系数为 0.892;洪濂站洪峰平均误差为 6.63%,平均洪量误差为 7.42%,平均峰现时间为 1 h,平均效率系数为 0.895;石碇站平均洪峰误差为 9.72%,平均洪量误差为 6.57%,平均峰现时间为 1.3 h,平均效率系数为 0.921。率定期的模型模拟结果总体较好,除 760825 场洪濂站的洪峰误差为 14.56%、石碇站洪峰误差为 12.34% 和 770530 场洪濂站的峰现时间 4 h,由于这两场洪水过程复杂和水库调度的影响,导致模拟效果存在较大误差。验证期 5 场洪水总体模拟效果较好,除 790610 场次洪水洪濂站的洪峰误差达到 17.91%,峰现时间为 3 h,石碇站的洪峰误差为 19.23%,模拟误差较大,主要原因是 790610 场次属于洪水过程比较复杂的多

峰洪水,模拟精度较低。总体来看,模型通过多站点率定能够较为满意地重现降雨径流过程,建立的初损率与起涨流量的相关关系也适用于晋江流域次暴雨洪水的模拟。

3.3 山美水库影响分析

3.3.1 山美水库洪水过程模拟

山美水库位于晋江东溪流域中游,对洪濂水文站和石碇水文站的洪水过程具有显著影响。以 720604 场次洪水为例,分析山美水库与洪濂、石碇水文站的调洪模拟过程,结果如图 3 所示,可以看出:入库流量曲线与出库流量曲线具有明显的差异,洪水经过水库调节之后变得涨落平缓;入库洪峰流量达到 1 481 m<sup>3</sup>/s,出库洪峰流量为 340 m<sup>3</sup>/s,说明水库具有很强的削峰能力,有效降低流域下游洪害风险;水库模拟水位线与观测水位线基本吻合,说明了 HEC-HMS 模型对水库库容变化的模拟与实际相一致,水库集水区的洪水模拟结果较好。由此可见,HEC-HMS 模型能够很好模拟大型水库的调洪过程,适用于大型水库调度影响的晋江流域暴雨洪水模拟。

表 2 HEC-HMS 模拟晋江流域洪水的评价结果

Tab. 2 Evaluation for simulate flood events of Jinjiang watershed by HEC-HMS

率定期或 验证期	洪水场次	安溪站				洪濂站				石碇站			
		洪峰误差 /%	洪量误差 /%	峰现时间 /h	效率 系数	洪峰误差 /%	洪量误差 /%	峰现时间 /h	效率 系数	洪峰误差 /%	洪量误差 /%	峰现时间 /h	效率 系数
率定期	720604	1.13	3.70	-1	0.930	7.52	6.43	0	0.966	9.78	10.30	0	0.912
	720715	6.84	1.32	2	0.924	9.04	11.58	0	0.871	6.34	5.49	2	0.969
	730702	-10.57	5.88	1	0.883	-7.38	1.08	2	0.962	13.48	3.26	-1	0.966
	730716	0.32	-4.85	1	0.931	2.63	3.27	-2	0.916	9.30	-0.80	-2	0.934
	731009	-5.09	5.13	2	0.891	9.73	16.00	1	0.872	15.52	-2.58	2	0.863
	741017	13.40	-4.77	0	0.909	2.45	-9.81	0	0.963	5.53	14.87	2	0.955
	741108	7.68	-1.17	0	0.877	6.90	-5.59	0	0.806	10.12	-4.97	1	0.907
	751005	-0.80	-2.05	0	0.897	2.86	8.66	1	0.918	5.39	-5.86	1	0.979
	760825	9.59	-6.79	1	0.807	14.56	3.57	0	0.84	12.34	-13.51	0	0.866
	770530	-3.65	5.67	0	0.873	3.26	8.25	4	0.837	9.45	4.65	2	0.862
验证期	绝对平均	5.87	4.13	0.8	0.892	6.63	7.42	1	0.895	9.72	6.57	1.3	0.921
	770801	4.57	-1.29	2	0.919	-3.60	-4.10	1	0.832	10.02	11.07	2	0.846
	770815	-2.77	-7.53	1	0.911	11.43	-13.61	1	0.765	-7.10	3.85	2	0.895
	780828	-0.35	-7.78	0	0.811	7.49	13.71	1	0.871	6.40	1.82	1	0.842
	790610	10.72	-13.17	1	0.887	17.91	0.23	3	0.807	19.23	-9.22	1	0.858
	790822	-1.21	-12.47	1	0.805	-6.96	15.50	2	0.837	-2.27	-0.54	1	0.827
	绝对平均	3.92	8.45	1	0.866	9.48	9.43	1.6	0.822	9.00	5.30	1.4	0.853

注:洪水场次是以洪水发生日期命名,如 720604 表示 1972 年 6 月 4 日发生的洪水事件。

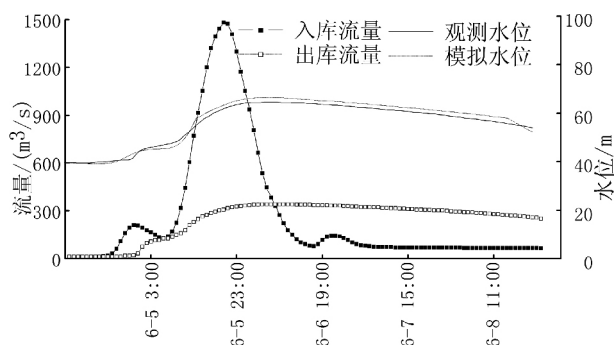


图3 山美水库调洪过程模拟

Fig. 3 Optimized flood operation course for Shanmei reservoir

### 3.3.2 山美水库调洪效应分析

以 720604 场次洪水为例,分析水库调洪对晋江流域洪濂、石碇水文站的洪水过程模拟的影响。图 4(a)、(b) 分别表示假设无山美水库调洪影响下,洪濂站与石碇站的洪水过程模拟结果。可以看出:洪濂站模拟洪水线峰高尖瘦,而观测洪水过程线涨落平缓;洪濂站洪峰观测值为  $1340 \text{ m}^3/\text{s}$ ,而洪峰模拟值达到的  $2512 \text{ m}^3/\text{s}$ ,接近洪峰观测值的两倍;石碇站的洪水过程受到安溪和石碇的共同影响,石碇站洪峰模拟值达到  $6938 \text{ m}^3/\text{s}$ ,而洪峰观测值为  $5360 \text{ m}^3/\text{s}$ ,模拟值比观测值高出  $1578 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由此可见,

水库具有很强的削峰作用,有效降低洪濂站和石碇水文站的洪峰流量,并使洪水过程线涨落平缓。

洪濂、石碇水文站的 15 场洪水的观测洪峰值和假设无水库调节时的洪峰值,如图 4(c-d) 所示,可以看出:假设无水库调节的洪峰流量将会明显大于有水库调节的洪峰流量,而且洪峰值越大的洪水,经山美水库调节,洪峰值降低越多。15 场洪水洪濂站的平均洪峰观测值为  $839.93 \text{ m}^3/\text{s}$ ,假设无水库调节的平均洪峰值为  $1516.55 \text{ m}^3/\text{s}$ ,石碇站的平均洪峰观测值为  $2377.33 \text{ m}^3/\text{s}$ ,假设无水库调节的平均洪峰值为  $3588.04 \text{ m}^3/\text{s}$ 。总体上,山美水库对洪水过程调节,使洪濂亚区和石碇亚区的洪水洪峰流量值分别降低 45.6% 和 22.3%。

## 4 结论和讨论

应用分布式水文模型 HEC-HMS,在考虑大型水库调节模拟的基础上,对东南沿海晋江流域的暴雨次洪进行多站点率定模拟分析,得出以下结论:

(1) 通过流域内三个水文站点进行模型校准和验证过程,更客观真实地率定模型参数,反映了洪水过程的空间变化;运用水库模块,实现了流域内大型

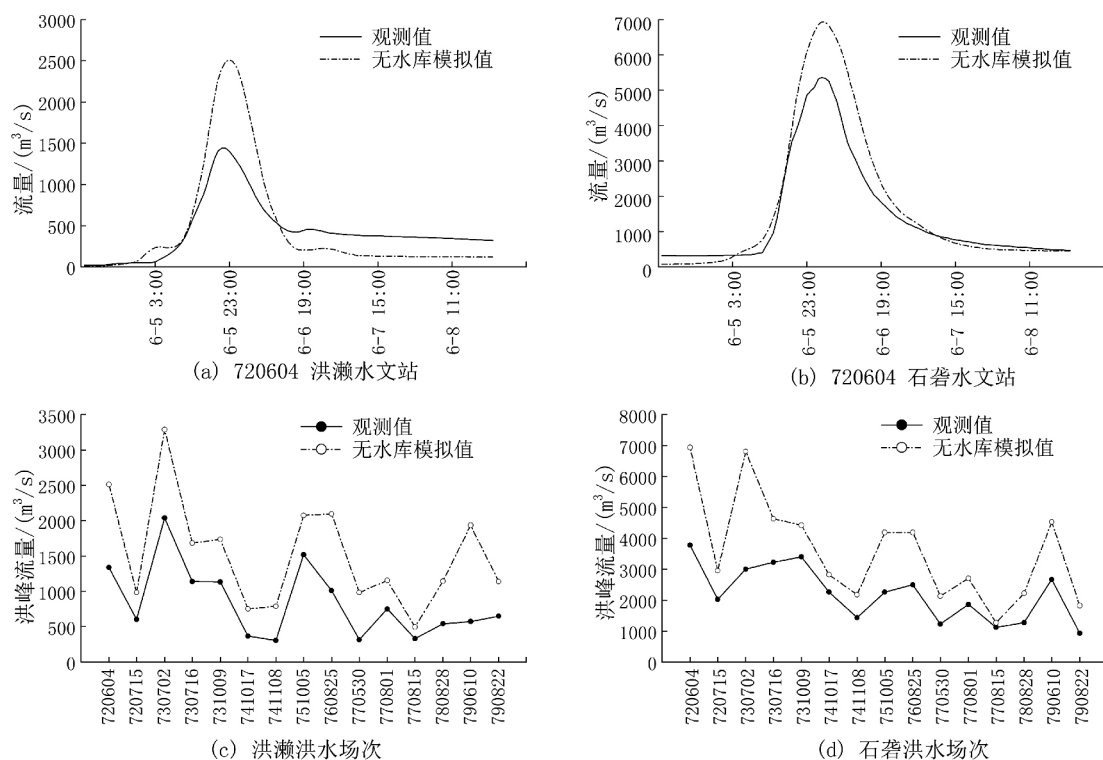


图4 洪峰流量模拟值与观测值比较

Fig. 4 Comparisons of peak flood between observed and simulated values

水库调度对洪水影响模拟结果较好,从而建立一个高精度的晋江流域 HEC-HMS 洪水模型。

(2) 率定中采用初损率推求初损值的方法,考虑了流域下垫面空间差异性,建立了晋江流域初损率与起涨流量的经验关系,从而可以通过实测可得的起涨流量推求初损,实现模型的洪水预报功能。

(3) 晋江流域山美水库的径流调节对于流域洪水过程影响具有显著影响,总体上使下游的洪涝、石碇的洪水过程线更为平缓,洪峰流量分别平均降低 45.6%、22.3%。

本文应用 HEC-HMS 模型进行洪水模拟时,按照先上游后下游的原则进行多站点率定,改善了流域洪水空间变化的模拟效果,并运用模型的水库模块,实现了水库调洪过程模拟,极大程度提高了下游水文站的模拟精度。本研究考虑了水库调度对洪水过程的影响,是流域洪水模拟一种新的尝试,为有关洪水研究提供参考价值。在后续研究中,如何运用 HEC-HMS 模型进行水库调度方案的优化,有待深入研究。

## 参考文献(References)

- [1] 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 Zongxue, CHENG Lei. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(9): 1009-1017]
- [2] USACE. HEC-HMS hydrologic modeling system user cs manual California: Hydrologic Engineering Center, 2000
- [3] 雍斌,张万昌,赵登忠,等. HEC-HMS 水文模型系统在汉江襄河流域的应用研究 [J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 86-90 [YONG Bin, ZHANG Wanchang, ZHAO Zhong, et al. Application of hydrological modeling system HEC-HMS to Baohe catchment of Hanjiang basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(3), 86-90]
- [4] 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 Jianjun, NA Lei, ZHANG Bo. 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]
- [5] 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 Peng, LIN Yun, PAN Wenbin, 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]
- [6] 廖富权. HEC-HMS 模型构建及其在恭城河流域洪水预报中的应用 [D]. 广西大学, 2014: 51-83 [LIAO Fuquan. HEC-HMS building and application in flood forecasting of Gongcheng river basin [D]. Guangxi University, 2014: 51-83]
- [7] 陈莹,许有鹏,尹义星. 土地利用/覆被变化下的暴雨径流过程模拟分析——以太湖上游西苕溪流域为例 [J]. 地理科学, 2009, 29(1): 117-123 [CHEN Ying, XU Youpeng, YIN Yixing. Assessment of effects of land use changes on storm runoff generation—a case study of Xitiaoxi basin [J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 29(1): 117-123]
- [8] 丁杰,李致家,郭元,等. 利用 HEC 模型分析下垫面变化对洪水的影响——以伊河东湾流域为例 [J]. 湖泊科学, 2011, 23(3): 463-468 [DING Jie, LI Zhijia, GUO Yuan, et al. Flood responds to the change of underlying surface with the HEC model—a case of Dongwan Basin Yi River [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(3): 463-468]
- [9] 王纳纳,唐川,唐宏旭. 基于 HEC-HMS 的水打沟泥石流汇流过程 [J]. 山地学报, 2015, 33(3): 318-325 [WANG Nana, TANG Chuan, TANG Hongxu. Conflux process of debris flow in Shuida Gully using HEC-HMS model [J]. Mountain Research, 2015, 33(3): 318-325]
- [10] YANG Shengchi, YANG Tsun-Hua. Uncertainty assessment: reservoir inflow forecasting with ensemble precipitation forecasts and HEC-HMS [J]. Research Article, 2014, 10: 1-11
- [11] CHE D, MAY S L W. Development of an optimization/simulation model for real time flood control operation of river reservoirs systems [J]. Water Resources Management, 2015, 29(11): 3987-4005
- [12] LIN M, CHEN Xingwei, CHEN Ying, et al. Improving calibration of two key parameters in hydrologic engineering center hydrologic modelling system, and analyzing the influence of initial loss on flood peak flows [J]. Water Science & Technology, 2013, 68(12): 2718-2724
- [13] 陈芬,林峰,陈兴伟. 采用分布式 HEC-HMS 水文模型的晋江流域暴雨次洪模拟 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 325-329 [CHEN Fen, LIN Feng, CHEN Xingwei. Application of HEC-HMS distributed hydrological model to the rainfall-flood simulation in Jinjiang river basin [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2012, 33(3): 325-329]
- [14] CAO W Z, BOWDEN B W, DAVIE T, et al. Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability [J]. Hydrological Processes, 2006, 20(5): 1057-1073
- [15] 鹿世瑾,王岩. 福建气候 [M]. 北京: 气象出版社, 2012: 138-141 [LU Shijin, WANG Yan. The Climate of Fujian [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012: 138-141]
- [16] 赵昭炳,陈佳源. 福建省地理 [M]. 福州: 福建人民出版社, 1993: 72-77 [ZHAO Zhaobing, CHEN Jiayuan. Geography of Fujian Province [M]. Fuzhou: Fujian People's Publishing House, 1993: 72-77]
- [17] BRACMORT K S, ARABI M, FRANKENBERGER J R, et al. Modeling long-term water quality impact of structural BMPs [J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006, 49(2): 367-374
- [18] 福建省水利电力厅. 浙闽台河流水文资料 [M]. 福州, 福建

- 省水文总站, 1972 – 1981 [Fujian Department of Water Conservancy and Electric Power, River Hydrological Resource of ZheM-inTai [M]. Fuzhou, Fujian Province of Hydrological Station Press, 1972 – 1981]
- [19] 林木生. 晋江西流域暴雨空间变化的洪水响应研究 [D]. 福建师范大学, 2012: 31 – 42 [LIN Musheng. Flood response to the spatial variability of storm in the Jinjiang Xixi watershed [D]. Fujian Normal University. 2012: 31 – 42]
- [20] 王林, 陈兴伟. 基于 3 个站点校准与验证的晋江流域径流模拟 [J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(6): 21 – 26 [WANG Lin, CHEN Xingwei. Runoff simulation with calibration and validation of three stations in Jinjiang River basin [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(6): 21 – 26]
- [21] 周淑梅, 雷廷武. 黄土丘陵沟壑区典型小流域 SCS – CN 方法初损率取值研究 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4240 – 4247 [ZHOU Shumei, LEI Tingwu. Calibration of SCS – CN initial abstraction ratio of a typical small watershed in the Loess Hilly – Gully region [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4240 – 4247]
- [22] 刘家福, 蒋卫国, 占文凤, 等. SCS 模型及其研究进展 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 120 – 124 [LIU Jiafu, JIANG Weiguo, ZHAN Wenfeng, et al. Processes of SCS model for hydrological simulation: a review [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(2): 120 – 124]
- [23] 王红亚, 吕明辉. 水文学概论 [M]. 北京大学出版社, 2007: 86 – 88 [WANG Hongya, LV Minghui. The Introduction of Hydrology [M]. Beijing: Peking University Press, 2007: 86 – 88]
- [24] 林木生, 陈兴伟, 陈莹. 晋江西流域洪水与暴雨时空分布特征的相关分析 [J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2226 – 2231 [LIN Musheng, CHEN Xingwei, CHEN Ying. Regression analysis of flood response to the spatial and temporal variability of storm in the Jinjiangxixi watershed [J]. Resources Science, 2011, 33(12): 2226 – 2231]
- [25] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282 – 290

## Rainflood Simulation in Jinjiang River Basin with Regulation of Large Reservoir

LIN Zhidong<sup>1</sup>, CHEN Xingwei<sup>1 2 3</sup>

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Fujian Provincial 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:** Extreme storm runoffs often cause flood hazards. The convective rainstorms and typhoon storms occur frequently in summer, and the loss caused by flood is often tremendous in the south-east coastal of China. In this study, a hydrological model (HEC – HMS) was applied to Jinjiang watershed in this region. In order to improve the flood simulation in spatial variation of river basin, three hydrological stations were used for calibration and validation in simulation. The regulation of a large reservoir was also simulated. Ten rainstorm flood events occurring from 1972 to 1975 were used to calibrate the model using a trial-and-error approach, and five rainstorm events occurring from 1975 to 1979 were used to validate the model. The simulation results were evaluated with the errors of flood peak discharge, flood volume and time of peak discharge, and efficiency coefficient. The average efficiency coefficients for calibration in three hydrological stations of Anxi, Honglai and Shilong were 0.892, 0.895 and 0.921, respectively, while 0.866, 0.822 and 0.853 in validation period. It shows that the calibration and validation with three stations result in more realistic parameter values and improve the simulation efficiency. The correlation between initial loss and initial discharge makes the model more applicable for flood forecasting. The regulation of Shanmei Reservoir has a great affect to the simulation of Honglai and Shilong.

**Key words:** HEC – HMS; large reservoir; multi-stations simulation; rainflood; Jinjiang River Basin