

文章编号: 1000-5013(2012)03-0325-05

采用分布式 HEC-HMS 水文模型的 晋江流域暴雨次洪模拟

陈芬^{1,2}, 林峰¹, 陈兴伟²

(1. 福建师范大学 地理研究所, 福建 福州 350007;

2. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007)

摘要: 以晋江流域为研究区域,采用分布式 HEC-HMS 水文模型进行暴雨次洪模拟. 分别通过 SCS 曲线数法计算水文损失,单位线法计算直接径流,Muskingum 模型进行河道洪水演进,基流指数退水法模拟流域基流,并以 1972—1979 年的实测数据进行参数的率定及验证. 研究表明:单峰的洪水模拟结果与实测数据拟合比较好,模型效率系数都在 0.8 以上,峰现误差为 3 h 以内;多峰的洪水效率系数在 0.6 以下.

关键词: HEC-HMS 水文模型; 晋江流域; 洪水模拟; 暴雨

中图分类号: P 333.2; P334.92

文献标志码: A

分布式模型以其具有明确物理意义的参数结构成为水文学研究的热点. HEC-HMS 是美国陆军工程师团水文工程中心研发的水文模型系统,主要用于树状流域降雨-径流过程的模拟,是一个同 GIS 紧密耦合的分布式水文模型^[1-3]. 它充分考虑了流域下垫面和气候因素的时空变异性,以及地表参数变化对水文过程的影响. 国外很早就利用 HEC-HMS 进行径流模拟^[4-9],而我国模拟应用还处于初期阶段. 张建军等^[10],雍斌等^[11]利用 HEC-HMS 水文模型系统对官寨流域、汉江褒河流域半干旱半湿润地区进行适应性研究;万荣荣等^[12]在太湖上游西苕溪流域进行次洪水模拟及土地覆被变化的洪水响应. 近年来,晋江流域上游由于不合理的人类活动,使得同样量级的暴雨洪水的洪峰流量及洪峰峰现时间发生变化,小流域山洪频繁,造成巨大的经济损失及人员伤亡,山洪灾害已成为当地经济发展的制约因素之一. 本文利用 HEC-HMS 水文系统模型,进行晋江流域分布式洪水模拟.

1 研究方法 with 数据处理

1.1 研究区概况

晋江流域位于福建省东南部,西有戴云山脉,东面滨海,流域面积 5 629 km². 其中石龚水文站控制区流域的研究区面积为 5 007 km². 研究区属典型的亚热带海洋性季风气候,具有季风气候的显著特点,雨热同期,降水和气温随季节变化明显;降水丰富,但时空分布不均,自东南向西北递增,西北局部山区年降水量可达 2 000 mm,年平均降水量为 1 200~1 900 mm,降水的年内分布极为不均,降雨主要集中在 5~8 月,占全年 60%以上. 受台风影响,暴雨洪水发生频率高,洪水流量大,破坏力强,如 1935 年的洪峰流量达 1 万 m³·s⁻¹. 该区经济发达,人类活动比较活跃,土地利用/覆被变化较大,部分地区水土流失严重,径流的空间分布也差异较大.

1.2 HEC-HMS 水文模型

HEC-HMS 水文模型根据数字高程模型(DEM)将流域划分成若干网格单元或自然子流域,然后计算每一个单元(子流域)的产流量、坡面汇流和河道汇流,最后演算至流域出口断面. 模型主要包含净雨计算、直接径流过程模拟、基流计算和河道洪水演算等 4 个计算子模型. 每个计算子模型包括多种可

收稿日期: 2011-11-07

通信作者: 陈芬(1971-),女,助理研究员,主要从事 GIS 应用及水资源的研究. E-mail:fchen11@163.com.

基金项目: 福建省科技计划重点基金资助项目(2009R10039-2)

供选择的计算方法,即可根据不同的流域、资料情况及计算目的选择不同计算方法. HEC-GeoHMS 是 HEC-HMS 的数据接口,对输入的 DEM 等数据进行处理,生成 HEC-HMS 可以接受的格式文件.

1.3 数据处理

1.3.1 数据库的建立 利用 HEC-DSSVue 数据库系统,输入 1972—1979 年研究区流域内 7 场洪水的 40 个雨量站累积雨量数据、3 个水文站同期流量数据及山美水库的实测数据,建立研究区的雨量数据库和流量数据库. 整理已有的 30 m 分辨率的 DEM 数据,1:50 万的晋江流域土壤图,1:10 万福建省土地利用/覆被遥感解译数据图,通过数据配准及投影转换,统一为高斯克列格投影;按照径流曲线数(SCS)法对土壤水文类型的划分,将土壤分为 4 大类型,与土地利用图迭加得到水文响应单元(HRU).

1.3.2 流域水文参数的处理 利用 HEC-GeoHMS 1.1 模块对研究区的 DEM 进行填洼、流向、汇流累积量计算,提出河网,划分子流域,定义流域出口,获取流域的地形参数及河道特征参数. 然后,把研究区划分为 48 个子流域,计算出子流域坡度、流域中心位置,以及河长、最长水流路径和流域滞时参数等,生成 HMS 文件,为 HEC-HMS 模拟提供流域的基础数据(图 1). 研究区的平均坡度为 29.7°,河道总长度为 479.406 km.

1.3.3 雨量数据空间插值 由于降雨数据的空间分布不均匀,而流域的雨量站数据有限且分布也不均匀,故采用距离平方倒数(RDS)法计算流域平均降雨. RDS 法把无测站点的降雨视为附近雨量站点降雨和雨量站点间距离的函数,对较近的站赋予较大的权重.

2 流域模型模拟的过程

2.1 水文损耗计算

选择美国土壤局的 SCS 曲线数值法来计算降雨损耗. SCS 模型的降雨-径流关系的表达式^[13]为

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - 0.2S) \times 2}{(P + 0.8S)}, & P \geq 0.2S, \\ 0, & P < 0.2S. \end{cases} \quad (1)$$

S 值的变化幅度很大,从实用出发引入一个无因次参数 CN 与 S 建立经验关系,即 $S = (25\ 400/CN) - 254$. CN 称为曲线数,用于描述降雨-径流关系,它将 AMC(前期土壤湿润程度)、坡度、土壤类型和土地利用现状等因素综合在一起,用定量的指标来反映下垫面条件对产汇流过程的影响^[14].

2.2 直接径流

直接径流模拟采用 SCS 单位线法. 它是由美国农业水土保持局(Soil Conservation Service, 简称 SCS)提出的一个参数单位线模型. 研究表明,单位线洪峰流量与单位线到达洪峰时间之间的关系^[15]为

$$U_p = C \times (A/t_p).$$

式(2)中:A 为流域面积;C 为转换系数,国际单位中的数值为 2.08; t_p 为单位线到达洪峰时间, $t_p = \Delta t / (2 + t_{lag})$, Δt 为净雨历时(计算时间间隔), t_{lag} 为洪峰滞时. 在该模型中,基于划分的子流域,自动计算各子流域平均洪峰滞时.

2.3 河道的洪水演进

Muskingum 模型以上游水文过程线为边界条件,运用圣维南方程组计算下游的水文过程线. 该模型是在圣维南(Saint-Venant)方程组的基础上,根据河段的水量平衡原理与蓄泄关系,把河段上游断面的入流量过程演算为下游断面的出流量过程的方法. 模型将连续性方程作差分^[13],即

$$\frac{I_{t-1} + I_t}{2} - \frac{Q_{t-1} + Q_t}{2} = \frac{S_t + S_{t-1}}{\Delta t}.$$

式(3)中: I_{t-1} 和 I_t 分别为 $t-1$ 和 t 时刻的入流; Q_{t-1} 和 Q_t 分别为 $t-1$ 和 t 时刻的出流量; S_t 和 S_{t-1} 分别为 $t-1$ 和 t 时刻的河段蓄量.

Muskingum 模型把河道槽蓄量定义为

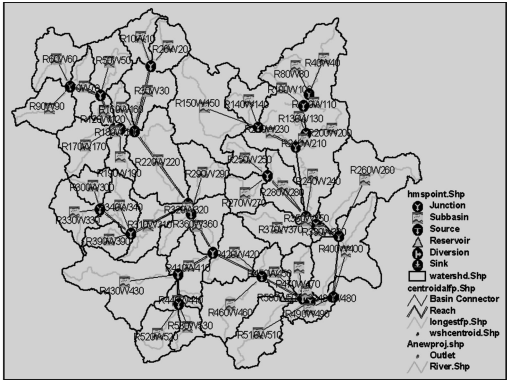


图 1 研究区的 HMS 图
Fig.1 HMS map of study area

$$S_t = KQ_t + KX(I_t - Q_t) = K[XI_t + (1 - X)Q_t]. \tag{4}$$

式(4)中: K 为蓄积量常数; X 为流量比重因素; $XI_t + (1 - X)Q_t$ 为权重流量. 当 $X=0$ 时, 表示河道由下游条件控制, 河槽蓄量与出流量之间有高度相关性; 当 $X = 0.5$ 时, 则表示赋予入流和出流相同的权重. 联立方程(3),(4)可得

$$Q_t = (\frac{\Delta t - 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t})I_t + (\frac{\Delta t - 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t})I_{t-1} + (\frac{2K(1 - X) - \Delta t}{2K(1 - X) + \Delta t})Q_{t-1}. \tag{5}$$

Muskingum 模型根据入流过程、初始条件, 以及 K 和 X 的值, 通过递归方法计算出流量过程线.

2.4 基流指数退水

基流指数退水法适合基流受降雨事件影响大的流域, 解释自然流域的基流, 其退水曲线^[16]为

$$Q_t = Q_0 K^t. \tag{6}$$

式(6)中: Q_0 为初始时间的基流; Q_t 为 Q_0 以后 t 时段的基流量; K 为小于 1 的退水系数. 在模型中, K 被定义为 t 时刻的基流量占前一日基流量的比率.

3 模型的校验

3.1 参数的率定

由于 CN 值已经确定, 洪水流域滞时的延迟时间由 Geohms 模块直接计算获得. 因此, 洪水模拟中需要率定的参数有: 初损、初始基流量、基流退水系数、退水拐点流量、流量比重因子、蓄积量常数.

3.2 模型的校验

Nash-Suttcliffe 模型效率系数(E_{os})^[17]同时选择相关系数(r)、相对误差(E_R)和峰现误差做为验证模型模拟的精度, 其计算式为

$$E_{os} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}, \quad r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)(Q_{o,i} - \bar{Q}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}}. \tag{7}$$

式(7)中: $Q_{s,i}$ 为 i 时间段的流量过程的模拟值; $Q_{o,i}$ 为 i 时间段的流量过程的观测值; \bar{Q}_o 为观测流量过程的均值; \bar{Q}_s 为模拟流量过程的均值; n 为模拟的时段数.

4 结果与分析

利用 1972—1973 年的实测流量数据进行参数的率定, 而以 1974—1979 年的流量数据进行模型的验证, 结果如表 1 所示. 表 1 中: Q_o 、 Q_s 分别是洪峰流量的观测值和模拟值; $E_{R,Q}$ 为洪峰流量相对误差; $\sum Q_o$ 、 $\sum Q_s$ 分别是洪水总量的观测值和模拟值; $E_{R,\sum Q}$ 洪水总量相对误差; Δt 为峰现时差; E_{os} 为效率系数; r 相关系数.

表 1 研究区次洪模拟结果

Tab. 1 Results of simulating rainfloods in study area

期间	洪峰号	$Q_o / \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_s / \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$E_{R,Q} / \%$	$\sum Q_o / 10^6 \text{m}^3$	$\sum Q_s / 10^6 \text{m}^3$	$E_{R,\sum Q} / \%$	$\Delta t / \text{h}$	E_{os}	r
率定	19720714	2 650	2 668.1	0.68	332.027	331.991	−10.70	3	0.909	0.964
	19730717	3 950	3 850.8	−2.51	517.337	517.320	−3.29	2	0.973	0.988
	19740501	1 000	1 241.7	24.17	327.720	327.730	3.12	2	0.302	0.748
	19750607	1 370	1 975.0	44.16	467.346	467.447	21.57	6	0.599	0.811
验证	19770801	1 840	1 953.1	6.14	180.909	180.923	7.93	1	0.925	0.962
	19780828	1 510	1 526.0	1.05	127.608	127.620	8.04	1	0.810	0.910
	19790610	2 800	2 952.5	5.17	428.297	428.306	2.03	1	0.870	0.940

从表 1 可知: 率定期 1972 年, 1973 年两场洪水的效率系数和相关系数都大于 0.9, 峰现误差在 3 h 误差之内, 洪峰相对误差为 3%之内, 洪量相对误差为 11%之内; 验证期 1977 年, 1978 年, 1979 年的效

率系数分别为 0.925,0.810,0.870,相关系数都大于 0.8,洪峰误差都在 1 h 以内,洪峰流量的相对误差在 6%以内,洪量相对误差在 10%以内.模拟结果在预报的误差范围以内.1974 年和 1975 年两场次洪的模拟结果不理想,效率系数分别为 0.302 和 0.599,不能达到预报的精度,这主要是由于多峰型洪水的情况相对比较复杂.模拟结果表明:该模型对于晋江流域单峰洪水模拟表现出良好的适应性.

从图 1 还可看出:对于单峰型洪水,出口断面模拟的洪水过程线与实测过程吻合较好,模拟的总体效果比较好;对于多峰型洪水,误差比较大,主要表现为峰现时间提前,洪峰陡涨陡落.

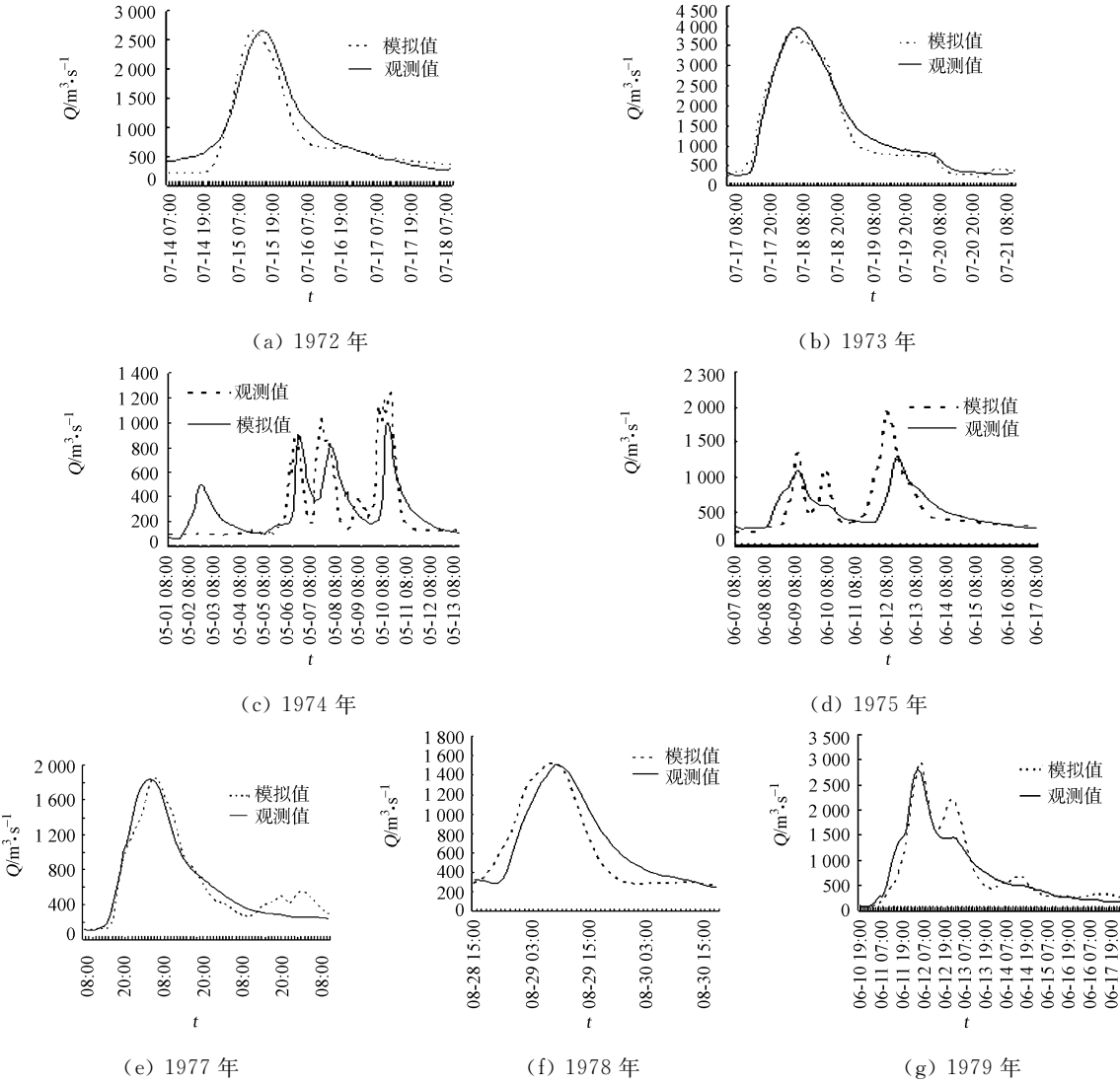


图 2 率定期与验证期模拟流量过程线
Fig. 2 Comparisons of simulated and observed streamflow hydrographs
in different calibration and validation periods

5 结束语

采用分布式水文模型 HEC-HMS 对晋江流域典型降雨次洪进行模拟,单峰型的暴雨次洪模拟效率系数大于 0.8,模拟的流量过程线与实际的流量过程线总体吻合.模拟结果表明:HEC-HMS 模型对晋江流域单峰型的暴雨次洪模拟具有较好的适应性,可为晋江流域及闽东南无资料地区的单峰洪水模拟及预警提供可行的方法及技术手段.然而,对于多峰型洪水,由于情况比较复杂,模拟的误差也比较大.

参考文献:

[1] 吴险峰,刘昌明,郝芳华,等.黄河小花区间暴雨径流过程分布式模拟[J].水科学进展,2004,15(4):511-516.

[2] 刘昌明,夏军,郭生练,等. 黄河流域分布式水文模型初步研究与进展[J]. 水科学进展,2004,15(4):495-500.

[3] 余钟波,潘峰,梁川,等. 水文模型系统在峨嵋河流域洪水模拟中的应用[J]. 水科学进展,2006,17(5):645-652.

[4] MARIK M,WAYLEN P. An application of the distributed hydrologic model CASC2D to a tropical montane watershed[J]. Journal of Hydrology,2006,330(3/4):481-495.

[5] OLEYBLO J O,LI Zhi-jia. Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China[J]. Water Science and Engineering,2010,3(1):14-22.

[6] VERMA A K,JHA M K,MAHANA R K. Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remotesensing and Geographical information system[J]. Paddy and Water Environment,2009,8(2):131-144.

[7] McCOLL C,AGGETT G. Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use decision support [J]. Journal of Environmental Management,2007,84(4):494-512.

[8] LIU Jin-tao,CHEN Xi,ZHANG Jia-bao,et al. Coupling the Xinanjiang model to a kinematic flow model based on digital drainage networks for flood forecasting[J]. Hydrol Process,2009,23(9):1337-1348.

[9] LIN Yu-pin,VERBURG P H,CHANG Chi-ru,et al. Developing and comparing optimal and empirical land-use models for the development of an urbanized watershed forest in Taiwan[J]. Landscape and Urban Planning,2009,92(3/4):242-254.

[10] 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.

[11] 雍斌,张万昌,赵登忠,等. HEC-HMS 水文模型系统在汉江褒河流域的应用研究[J]. 水土保持通报,2006,26(3):86-90.

[12] 万荣荣,杨桂山,李恒鹏,等. 中尺度流域次降雨洪水过程模拟:以太湖上游西苕溪流域为例[J]. 湖泊科学,2007,19(2):170-176.

[13] USACE. HEC-HMS technical reference manual[R]. California:US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center,2000.

[14] 王林. 基于 SWAT 模型的晋江流域产流产沙模拟[D]. 福州:福建师范大学,2008:6.

[15] USDA. Urban hydrology for small watersheds: TR 55[R]. Washington:United States Department of Agriculture,1975.

[16] PONCE V M. Diffusion wave modeling of catchment dynamics[J]. Journal of the Hydraulics Division,1986,112(8):716-727.

[17] NASH J E,SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models[J]. Journal of Hydrology,1970,10(3):282-290.

Application of HEC-HMS Distributed Hydrological Model to the Rainflood Simulation in Jinjiang River Basin

CHEN Fen^{1,2}, LIN Feng¹, CHEN Xing-wei²

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;
2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Taking Jinjiang River Basin as a study area, the HEC-HMS distributed hydrological model was used in simulating rainfloods occurred in the basin. In the process of simulation, the hydrological loss was calculated by the SCS curve method, the direct run-off by the unit line method, the channel flowing by the Muskingum model and the basin baseflow by the way of exponential recession mode. After calibration and validation on the basis of measured data during 1972 and 1979, it was found that, for uni-modal floods, the efficiency coefficients of the model were all great than 0.8 and the error time of peak flow was within 3 hours, showing a better performance in rainfloods simulation than for multi-modal floods, whose efficiency coefficients of the model were lower than 0.6.

Keywords: HEC-HMS hydrological model; Jinjiang River Basin; flood simulation; rainflood