

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0147

廖如婷, 胡珊珊, 杜龙刚, 等. 基于 HEC-HMS 模型的温榆河流域水文模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 15-20. LIAO R T, HU S S, DU L G, et al. Hydrological simulation of Wenyu River basin based on HEC-HMS model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 15-20. (in Chinese)

基于 HEC-HMS 模型的温榆河流域水文模拟

廖如婷^{1,2}, 胡珊珊^{1,2}, 杜龙刚³, 黄振芳³

(1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 首都师范大学 水资源安全北京实验室, 北京 100048;
3. 北京市水文总站, 北京 100089)

摘要: 水文模拟对于流域防洪减灾、水资源规划管理有重要的意义。将分布式水文模型 HEC-HMS 应用到北京温榆河流域, 模拟该区域 1980-2005 年间 6 场暴雨洪水过程和 1983-1995 年日降雨径流过程, 评估 HEC-HMS 模型在模拟场次洪水和日径流过程两种时间尺度上的适用性。结果表明, 场次洪水模拟的洪峰流量和洪量相对误差均在 20% 以内, 峰现时差均不超过 2 h, 平均 Nash 效率系数为 0.82, 平均相关系数 r 为 0.92; 日径流模拟率定期和验证期的平均 Nash 效率系数为 0.6, 平均相关系数 r 为 0.78, 平均相对误差为 3.95%。分析结果表明, HEC-HMS 模型在温榆河流域的适用性较好, 能够有效模拟北方地区短时间和长时降雨径流过程, 可用于该区域的洪水预报和水资源评价与管理。

关键词: HEC-HMS 模型; 温榆河流域; 次洪模拟; 日径流模拟; 参数率定

中图分类号: TV121 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hydrological simulation of Wenyu River basin based on HEC-HMS model

LIAO Ruting^{1,2}, HU Shanshan^{1,2}, DU Longgang³, HUANG Zhenfang³

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Beijing Laboratory of Water Resources Safety, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

3. Beijing Hydrological Station, Beijing 100089, China)

Abstract: Hydrological simulation is important for flood hazard mitigation and water resources management. In this study, we adopted the distributed hydrological model HEC-HMS to simulate the flood events and daily runoff of the Wenyu River basin in Beijing, China. The model was calibrated and validated with the data of 6 storm events during 1980-2005 and daily stream flow during 1983-1995. The results showed that for all of the 6 floods, the relative errors of peak flow and runoff amount were less than 20%, and the peak time difference was within 2 h. The average Nash efficiency coefficient and average correlation coefficient r were 0.82 and 0.92, respectively. For the daily runoff simulation, the average Nash efficiency coefficient was 0.6, the average correlation coefficient r was 0.78, and the average relative error was 3.95%. Preliminary analysis showed that the HEC-HMS model applied well to the Wenyu River basin. It can effectively simulate the short term and long term rainfall and runoff processes in northern China, and can be used for flood forecast, water resources evaluation and management in this area.

Key words: HEC-HMS model; Wenyu River basin; flood simulation; daily runoff simulation; calibration

收稿日期: 2018-06-28 修回日期: 2018-09-29 网络出版时间: 2018-10-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181018.1516.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41501027); 北京市教委科技计划(KM201810028015); 首都师范大学国家“双一流”建设高校项目

Funds: National Natural Science Foundation of China (41501027); Beijing Municipal Education Commission General Science and Technology Project (KM201810028015); National "Double First Class" University Project of Capital Normal University

作者简介: 廖如婷(1994), 女, 四川邻水人, 主要从事流域水文过程模拟研究。E-mail: 940351813@qq.com

通讯作者: 胡珊珊(1984), 女, 湖北宜昌人, 讲师, 博士, 主要从事变化环境对水文过程的影响研究。E-mail: hushanshan@cnu.edu.cn

20 世纪以来,随着地理信息系统和遥感技术的迅速发展,分布式水文模型成为水文水资源研究的有效手段。HEC-HMS 是由美国陆军兵团水文工程中心 (Hydrologic Engineering Center) 开发的半分布式水文模型,因其物理机制明确、结构简单、能概化模拟流域的复杂下垫面特性,已经被广泛的应用于不同国家和地区。国外学者们应用 HEC-HMS 模型进行了一系列流域水文相关的研究,在沙特阿拉伯 Makkah^[1,2]、印度 Chenab^[3]、伊朗 Jafarabad^[4] 等流域模拟效果良好。此外,HEC-HMS 模型评估城市化对洪水的影响研究在印度 Thirusoolam^[5]、斯里兰卡 Kelani^[6]、沙特阿拉伯 Jazan^[7]、孟买 Oshiwara^[8] 等流域取得了很大进展。在国内,HEC-HMS 水文模型先后应用于米塞、万安流域^[9]、晋江流域^[10]、江河流域^[11]、紫荆关流域^[12] 等,效果都较为理想。近些年,我国学者开始将 HEC-HMS 模型应用于流域土地覆被变化的洪水响应研究^[13-14]、山洪预报^[15-17] 和长期径流过程模拟^[18-19] 等方面,都取得了较好的研究结果。从国内外研究现状来看,HEC-HMS 模型目前主要应用于流域洪水预报及下垫面变化影响分析,在流域长时间尺度的水资源模拟与管理中应用较少。本文将 HEC-HMS 模型应用到北京温榆河流域,分别进行场次洪水模拟和日径流模拟,分析评价 HEC-HMS 模型在两个时间尺度上的模拟效果,探讨并总结 HEC-HMS 模型在北方城市化影响区域的适用性和局限性,为 HEC-HMS 模型在类似区域的应用研究提供参考。

1 研究区概况

温榆河流域位于北京市北部,发源于燕山南麓,属于海河流域的北运河水系,全长约 47.5 km,流域面积 2 478 km²^[20]。本文选取温榆河沙河闸水文站控制流域为研究区,汇水面积约 1 099 km² (图 1),其中山区(高程大于 100 m)面积约 708.3 km²,占研究区面积的 64.4%;平原区面积约 390.7 km²,占 35.6%,跨北京市昌平、延庆和海淀三个区县,20 世纪 80 年代以来随着北京卫星城镇的扩展,流域内的土地利用发生了明显改变,建成区面积大大增加,目前已占到整个流域面积的 19.5%。流域属于温带大陆性季风气候,多年平均降雨量为 642.5 mm,降雨多集中在 6 月-9 月,约占全年的 84%,多年平均蒸发量为 1 815.5 mm (20 cm 口径蒸发皿),其中 4 月-6 月占全年的 42%^[21]。

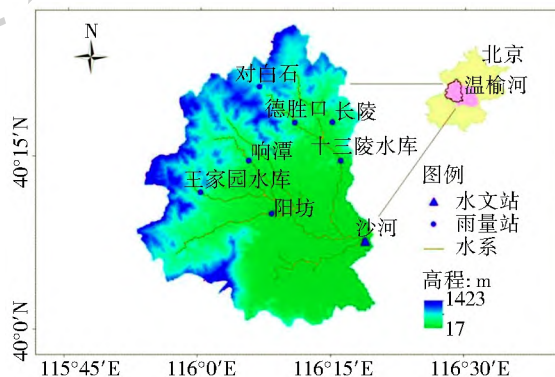


图 1 研究区位置及雨量站、水文站分布

Fig. 1 Location of study area and spatial distribution of discharge and rainfall stations

2 温榆河流域 HEC-HMS 模型构建

2.1 数据来源与处理

研究区 DEM (数字高程模型) 数据和 Landsat 遥感影像数据来源于中国科学院地理空间数据云平台^[22],空间分辨率均为 30 m。DEM 数据用于子流域的划分和流域特征的提取,遥感影像用于解译得到研究区土地利用类型,本文将研究区土地利用类型分为草地、耕地、林地、水域、建设用地和未利用地 6 大类。土壤数据是由南京土壤所提供的第二次全国土地调查 1:400 万土壤数据,主要土壤类型为褐土和黄垆土。通过查找土壤中黏粒、砂粒、有机质等的含量,建立土壤类型属性数据表。

研究区水文气象资料主要来源于北京市水文总站,部分摘自历年《海河流域水文资料(第 3 卷)》。水文气象资料包括温榆河流域上游 1980-2005 年间 8 个雨量站及流域出口沙河闸水文站的实时、日降雨径流数据,其中流量数据根据沙河水库水位库容曲线反推入库流量得到^[23-24]。蒸发数据采用苏庄站 1980-2005 年的 20 cm 蒸发皿日蒸发数据。

2.2 模型构建

本文在 HEC-HMS 模型的扩展模块 HEC-GeoHMS 的支持下,依托 ArcGIS 软件将研究区划分为 6 个子流域,并提取子流域及河道的特征参数。HEC-HMS 模型主要由流域模块 (Basin Model)、气象模块 (Meteorological Model)、控制运行模块 (Control Specifications) 以及时间序列数据模块 (Time Series Data) 组成。其中,流域模块是对实际流域上降雨径流过程的模型概化。本文根据降雨径流的形成过程,将其划分为降雨损失、直接径流、基流和河道汇流四个部分,分别采用 SCS-CN 曲线法、SCS 单位线法、指数退水法和马斯京根法

进行计算。气象模块采用权重因子法对降雨数据分析处理,建立雨量站与各个子流域的地理关系。控制运行模块设定模拟计算的时间步长为 1 h。时间序列数据模块输入研究区中相关站点的坐标、雨量、流量以及蒸发等实测资料,为整个模型的模拟计算提供数据基础。

本文建立的模型中主要需要确定的参数为 CN、流域滞时以及马斯京根法中的蓄量常数 K 和流量比重 X。其中, CN 值根据研究区土地利用和土壤数据查表^[25] 计算得出。流域滞时、蓄量常数 K 和流量比重 X 则需要在已有流域、河道特征参数的基础上计算, 然后进行参数率定确定。

2.3 模型率定与验证

为了使建立的 HEG-HMS 模型模拟结果达到最优, 必须对模型参数进行优化。HEG-HMS 模型提供了单变量梯度法 (Univariate Gradient) 与 Nelder Mead 法 2 种方法及七种目标函数供用户选择, 目标函数包括峰值加权均方根误差、洪峰流量百分比误差和洪量百分比误差等^[26]。本文采用单变量梯度参数优选法, 并以峰值加权均方根误差为目标函数来进行模型参数的优化。

在验证过程中, 选用洪峰流量相对误差 (D_v)、洪量相对误差 (D_p)、峰现时差 (ΔT)、Nash 效率系数

(N_{SE})、相关系数 (r) 等 5 个指标进行模拟精度评价。跟据 SL250- 2000《水文情报预报规范》^[27], 洪峰流量相对误差 D_v 和洪量相对误差 D_p 在实测值的 20% 以内为合格; 峰现时差 ΔT 的范围为 3 h, 其中 D_v 、 D_p 、 ΔT 的绝对值越小, 表明模型的模拟精准度越高; Nash 效率系数 N_{SE} 和相关系数 r 的范围是 0 到 1, 值越大, 表示模拟效果越好^[28]。

3 结果与分析

根据上述方法构建温榆河流域 HEG-HMS 模型, 其中场次洪水模拟采用 1980- 2005 年间的 4 场暴雨洪水数据对模型的参数进行率定, 2 场暴雨洪水数据进行验证; 日降雨径流模拟采用 1983- 1988 年的日径流数据对模型的参数进行率定, 1990- 1995 年的日径流数据对模型进行验证。

3.1 场次洪水模拟结果分析

从模拟结果可以看出(表 1), 在率定期和验证期这 6 场洪水中, 洪峰流量相对误差 D_v 和洪量相对误差 D_p 基本上都控制在 20% 以内, 峰现时差 ΔT 均不超过 2 h; 相关系数 r 均大于 0.85; 率定期和验证期的平均 Nash 系数 N_{SE} 为 0.82。根据《水文情报预报规范》(SL 250- 2000)^[27], 本文构建的 HEG-HMS 模型次洪模拟结果比较理想。

表 1 研究区 HEG-HMS 模型场次洪水模拟结果
Tab. 1 Simulation results for flood events of study area by HEG-HMS

时期	洪号	降雨量 /mm	洪峰流量			洪量			峰现时差/h	r	N_{SE}
			实测/($m^3 \cdot s^{-1}$)	模拟/($m^3 \cdot s^{-1}$)	相对误差(%)	实测/mm	模拟/mm	相对误差(%)			
率定期	19860626	75	174	173	- 0.68	9	12	27.65	- 1	0.85	0.64
	19880802	97	275	247	- 10.39	18	18	1.06	1	0.95	0.91
	19940711	97	162	194	19.86	13	15	13.46	- 1	0.97	0.87
	19940717	39	164	123	- 25.14	10	9	- 7.59	1	0.90	0.78
验证期	19980705	213	531	499	- 6.17	32	32	0.21	- 2	0.96	0.92
	20010818	55	124	111	- 11.04	6	6	6.79	0	0.90	0.78
平均					- 5.59			6.93		0.92	0.82

注: 表中峰现时差, 正值表示模拟洪峰时间晚于实测洪峰时间, 负值表示模拟洪峰时间早于实测洪峰时间。

结合实测与模拟流量过程对比图(图 2)可以看出, 模型对于峰高量大的单峰洪水模拟效果较好, 洪号 19880802、19940711 和 19980705 这三场洪水的相关系数和 Nash 效率系数都在 0.9 左右, 峰现时间上多表现为雨停峰现。洪号 19860626 和 19940717 模拟洪水过程与实测洪水过程误差较大, 分析其原因可能是受实测流量精度和时间步长影响, 由于实测流量数据为经过反推的入库流量, 与真实值之间可能存在一定误差; 且实测流量的时间步长不一致, 模型中为线性插值结果, 坦化了实际的流

量过程线, 导致局部模拟过程与实测过程相差较大。

3.2 日径流过程模拟结果分析

从表 2 中可以看出, 率定期日径流相关系数为 0.74、Nash 效率系数为 0.55, 相对误差为- 5.66%, 率定期日流量模拟效果较好, 总体模拟值略低于实测值; 验证期日径流相关系数为 0.81、Nash 效率系数为 0.65, 相对误差为 2.23%, 表明验证期总体模拟值略高于实测值, 且模拟效果较优于率定期。

图 3 和图 4 分别为率定期和验证期的模拟与实测逐日流量过程线的比较, 从图中可以看出, 日径流

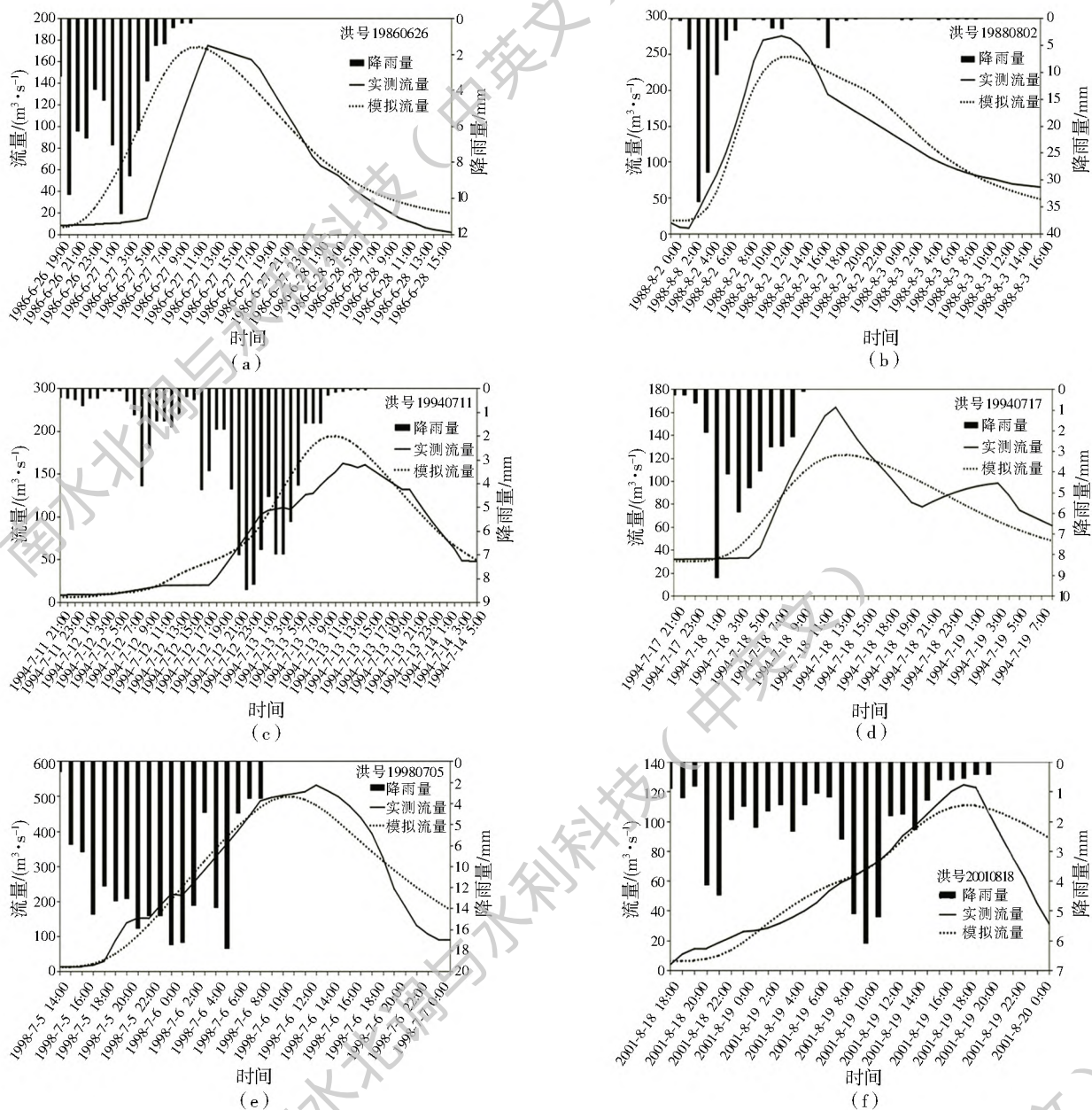


图 2 温榆河流域率定期((a)-(d))和验证期((e)-(f))实测与模拟流量对比

Fig. 2 Comparison between observed and simulated floods in calibration period ((a)-(d)) and verification period ((e)-(f)) in Wenyu River basin

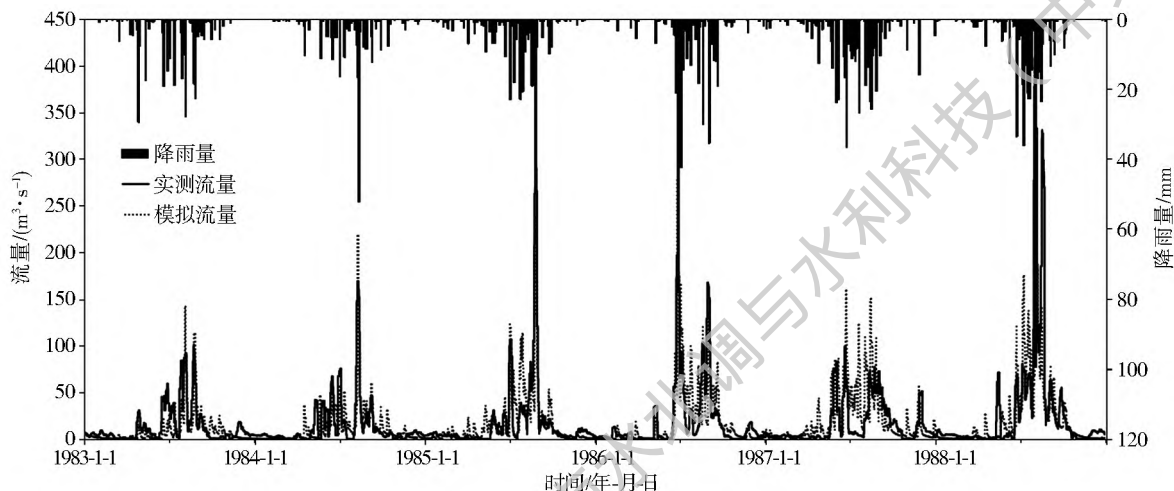


图 3 率定期模拟与实测流量过程线

Fig. 3 Simulated and actual discharge hydrograph in calibration period

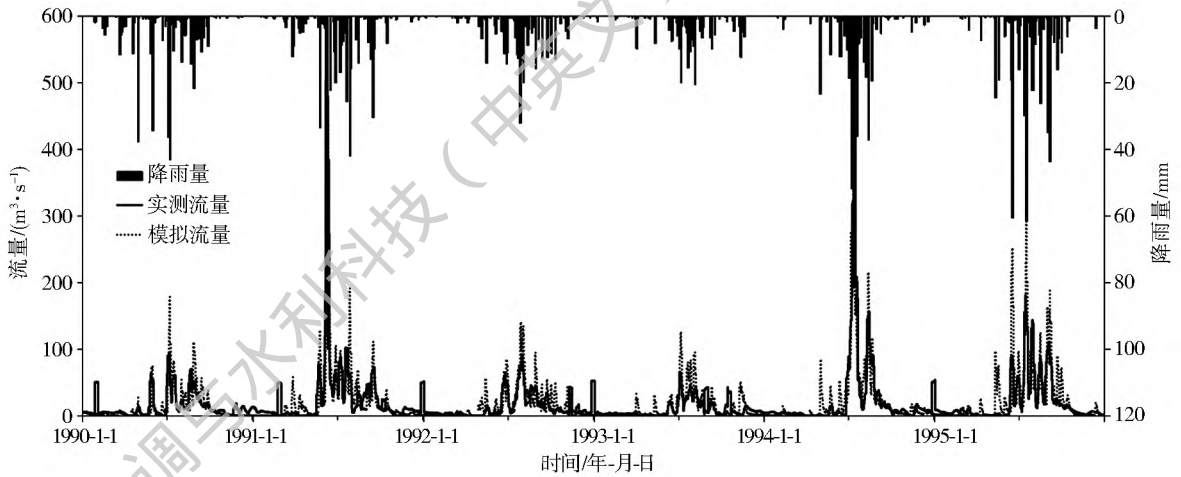


图 4 验证期模拟与实测流量过程线

Fig. 4 Simulated and actual discharge hydrograph in validation period

模拟值与实测日流量过程线拟合程度较好,模拟效果整体令人满意。部分日流量峰值模拟偏大,可能是由于流域内水保措施的修建、人类活动频繁等多方面因素造成了径流量减少。

表 2 研究区 HEG-HMS 模型日径流过程模拟结果

Tab. 2 Simulation results for daily runoff of study area by HEG-HMS

模拟期	时间	相对误差 (%)	r	N_{SE}
率定期	1983-1988	-5.66	0.74	0.55
验证期	1990-1995	2.23	0.81	0.65
平均			0.78	0.6

4 结论与讨论

(1) 本文利用研究区气象、水文、土壤、土地利用数据,构建了温榆河流域 HEG-HMS 模型。通过对模型参数的不断优化与率定,场次洪水模拟的平均 Nash 效率系数为 0.82,平均相关系数 r 为 0.92;日径流模拟的平均 Nash 效率系数为 0.6,平均相关系数 r 为 0.78。表明 HEG-HMS 模型能够较为准确的反映研究区的水文过程,具有较好的适用性。

(2) HEG-HMS 模型对于场次洪水模拟和日降雨径流模拟都具有较好的适用性,可以用于流域洪水预报和水资源评价与管理。

(3) 流域内高强度的人类活动和下垫面改变导致的产汇流变化是影响模型模拟精度的重要原因,HEG-HMS 模型在城市化地区的改进是进一步研究的方向。

参考文献 (References):

[1] DAWOD G M, MIRZA M N, ALGHAMDI K A. GIS Based spatial mapping of flash flood hazard in Makkah City, Saudi Arabia[J]. Journal of Geographic Information System, 2011, 3 (3): 225-231.

[2] AL-GHAMDI K A, ELZAHARY R A, MIRZA M N, et al. Impacts of urban growth on flood hazards in Makkah City, Saudi Arabia[J]. International Journal of Water Resources & Environmental Engineering, 2012, 4: 23-34.

[3] SHAHID M A, BOCCARDO P, USMAN M, et al. Predicting peak flows in real time through event based hydrologic modeling for a trans boundary river catchment[J]. Water Resources Management, 2017, 31 (3): 793-810. DOI: 10.1007/s11269-016-1435-2.

[4] MOSTAFAZADEH R, SADOODIN A, BAHREMAND A, et al. Scenario analysis of flood control structures using a multi criteria decision making technique in Northeast Iran[J]. Natural Hazards, 2017, 87 (3): 1827-1846. DOI: 10.1007/s11069-017-2851-1.

[5] SURIYA S, MUDGAL B V. Impact of urbanization on flooding: The thirusoolam sub watershed A case study[J]. Journal of Hydrology, 2012, 412(1): 210-219.

[6] SILVA M M G T D, WEERAKOON S B, HERATH S. Modeling of event and continuous flow hydrographs with HEG-HMS: Case study in the Kelani River Basin, Sri Lanka[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19 (4): 800-806. DOI: 10.1061 / (ASCE) HE.1943-5584.0000846.

[7] ALFY M E. Assessing the impact of arid area urbanization on flash floods using GIS, remote sensing, and HEG-HMS rainfall runoff modeling[J]. Hydrology Research, 2016, 47(6). DOI: 10.2166/nh.2016.133.

[8] ZOPE P E, ELDHOTI I, JOTHIPRAKASH V. Impacts of land use land cover change, and urbanization on flooding: A case study of Oshiwara River Basin in Mumbai, India[J]. Catena, 2016, 145: 142-154. DOI: 10.1016/j.catena.2016.06.009.

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

[10] 陈芬, 林峰, 陈兴伟. 采用分布式 HEG-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 F, LIN F, CHEN X W. Simulation of storm in Jinjiang Basin using HEG-HMS hydrological model

- [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2012, 33(3): 325-329. (in Chinese)
- [11] JIN H, LIANG R, WANG Y, et al. Flood Runoff in Semi-Arid and Sub-Humid Regions, a case study & A simulation of Jianghe Watershed in Northern China[J]. Water, 2015, 7(9): 5155-5172. DOI: 10.3390/w7095155.
- [12] 赵永超, 王加虎, 梁菊平, 等. HEC-HMS 模型在紫荆关流域水文模拟中的应用[J]. 水电能源科学, 2017(12): 10-13. (ZHAO Y C, WANG J H, LIANG J P, et al. Application of HEC-HMS model in hydrological simulation of the Zijinguan Basin[J]. Hydroelectric Energy Science, 2017(12): 10-13. (in Chinese)) DOI: 10.1000/7709(2017)12-0010-04.
- [13] 林木生. 东南沿海晋江西溪流域洪水径流演变与模拟分析[D]. 福州: 福建师范大学, 2015. (LIN M S. Flood Runoff Evolution and Simulation Analysis of Xixi River Basin in Southeast Coast of Jiangxi[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2015. (in Chinese))
- [14] REN J, ZHENG X, CHEN P, et al. An Investigation into Sub-Basin Rainfall Losses in different underlying surface conditions using HEC-HMS: A case study of a loess hilly region in Gedong Basin in the Western Shanxi Province of China[J]. Water, 2017, 2(1): 1-27. DOI: 10.3390/w9110870.
- [15] ZHANG H L, WANG Y J, WANG Y Q, et al. Quantitative comparison of semi- and fully distributed hydrologic models in simulating flood hydrographs on a mountain watershed in southwest China[J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25(6): 877-885.
- [16] 赵睿. 山丘区小流域暴雨洪水分析计算方法应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2015. (ZHAO R. Application of analysis and calculation method for storm flood in small watershed at hill area[D]. Jinan: Shandong University, 2015. (in Chinese))
- [17] 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(3): 147-155. (HU G H, CHEN X, YU Z X, et al. Research on mountain flood forecasting in Lancang River Basin based on HEC-HMS[J]. Journal of Natural Disasters, 2017(3): 147-155. (in Chinese)) DOI: 10.13577/j.jnd.2017.0318.
- [18] 吴建红, 朱积军. HEC-HMS 模型及其应用比较研究[J]. 科技创新导报, 2010(4): 6-7. (WU J H, ZHU J J. Application and comparison of HEC-HMS model[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2010(4): 6-7. (in Chinese))
- [19] DU J K, LI Q, HAN Y R, et al. Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 464-465(5): 127-139.
- [20] 郁达伟, 于淼, 魏源送, 等. 1980~2010 年温榆河的水环境质量时空演变特征[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2803-2813. (YU D W, YU M, WEI Y S, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of water environmental quality in Wenyu River from 1980 to 2010[J]. Journal of Environmental Science, 2012, 32(11): 2803-2813. (in Chinese))
- [21] 唐莉华, 张思聪, 吕贤弼. 温榆河上游流域的洪水模拟及不确定性分析[C]// 第二届全国水问题研究学术研讨会论文集, 2009: 168-174. (TANG L H, ZHANG S C, LYU X B. Simulation and uncertainty analysis of flood in upper reaches of Wenyu River[C]// National Water Research Symposium. 2009: 168-174. (in Chinese))
- [22] 地理空间数据云[EB/OL] <http://www.gscloud.cn>. (Geospatial data Cloud[EB/OL] <http://www.gscloud.cn>. (in Chinese))
- [23] 张帆, 张君友. 浅谈反推入库洪水方法[J]. 治淮, 2010(2): 24-25. (ZHANG F, ZHANG J Y. Discussion on the method of backstepping? reservoir in flow[J]. Governance Huai River, 2010(2): 24-25. (in Chinese))
- [24] 陈昌杰, 姜和平. 应用 Excel 软件拟合库容曲线[J]. 小水电, 2002(6): 19-20. (CHEN C J, JIANG H P. Application of Excel software to fit reservoir capacity curves[J]. Small Hydro Power, 2002(6): 19-20. (in Chinese))
- [25] 李向新. HEC-HMS 水文建模系统原理·方法·应用[M]. 中国水利水电出版社, 2015. (LI X X. Principles, methods and applications of HEC-HMS hydrological modeling system[M]. China Water Power Press, 2015. (in Chinese))
- [26] 邓霞, 董晓华, 薄会娟. 目标函数对 HEC-HMS 模型参数率定的影响研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(8): 23-25. (DENG X, DONG X H, BO H J. Influence of objective function on parameter calibration of HEC-HMS model[J]. Hydroelectric Energy, 2010, 28(8): 23-25. (in Chinese))
- [27] SL 250-2000, 水文情报预报规范[S]. (SL 250-2000. Specification for hydrological information forecast[S]. (in Chinese))
- [28] 梁睿. HEC-HMS 水文模型在北张店流域的应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012. (LIANG R. Application of HEC-HMS hydrological model in the Beizhangdian watershed[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012. (in Chinese))