

Comparative Study of Flood Simulation Methods at Small Watershed

Wanmin Su¹, Pigu Wang², Bin He¹, Yujun Zhang², Guohua Liang¹

¹Institute of Water Resources & Flood Control, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

²Water Supply Company of Dalian City, Dalian Liaoning

Email: swm1101308504@163.com

Received: May 19th, 2016; accepted: Jun. 4th, 2016; published: Jun. 7th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Due to the fact that the floods in small basins often rise and drop steeply and there is lack of long series of hydrological data, it's difficult to establish the flood forecasting scheme. In terms of the issue, Bingyugou watershed in semi-arid or semi-humid areas is chosen as the study case. On the basis of analyzing its climate, flood characteristics and data acquisition situation, DHF and HEC-HMS models are selected to simulate flood hydrograph. The simulation results suggest that two models perform well and can be applied to guide flood forecast and early warning in small basins in the case of dry antecedent soil and large rainfall intensity, infiltration-excess runoff occurred easily. The mean error of DHF model is smaller than that of HEC-HMS model. For the small watershed in semi-arid or semi-humid regions with long series of data, the DHF model is the first choice for flood forecasting. The HEC-HMS model is of great promotive value in the basins with missing data.

Keywords

Small Watershed, Flood Simulation, DHF Model, HEC-HMS Model

小流域洪水模拟方法对比研究

苏万敏¹, 王丕国², 何 斌¹, 张玉君², 梁国华¹

¹大连理工大学, 水资源与防洪研究所, 辽宁 大连

²大连市供水有限公司, 辽宁 大连

作者简介: 苏万敏(1992-), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事洪水预报方面的研究。

Email: swm1101308504@163.com

收稿日期: 2016年5月19日; 录用日期: 2016年6月4日; 发布日期: 2016年6月7日

摘要

小流域洪水陡涨陡落, 又因缺乏长系列的实测水文资料, 其洪水预报方案编制困难。针对该问题, 以北方半湿润半干旱地区的冰峪沟小流域为例, 在分析该流域气候、洪水特点以及资料获取情况的基础上, 结合国内常用洪水预报模型的适用情况, 选取大伙房模型和HEC-HMS模型开展冰峪沟小流域的洪水模拟研究。模拟结果表明: 当前期土壤较干旱、降雨强度较大时, 易于发生超渗产流, 大伙房模型和HEC-HMS模型模拟产汇流的效果都较好, 均可用于指导小流域进行洪水预报预警。但相比而言, 大伙房模型模拟产汇流的平均误差较小, 对于具有长系列实测水文数据的半干旱半湿润地区小流域, 可优先选择大伙房模型进行洪水预报。而HEC-HMS模型在实测水文资料较缺乏的小流域更具有推广价值。

关键词

小流域, 洪水模拟, 大伙房模型, HEC-HMS模型

1. 引言

小流域洪水灾害频发且常伴有地质灾害, 严重威胁着人民生命和财产安全, 因而开展小流域洪水模拟方法的研究意义重大。一般而言, 小流域洪水具有陡涨陡落、汇流时间短的特点[1], 不易于进行洪水预报; 另外, 小流域往往又缺乏长系列的实测水文数据和高精度的地形地质等资料, 很多水文模型的应用受到限制, 其洪水预报方案的编制比大流域更为困难。因此, 如何选取合适的预报模型是做好小流域洪水预报的关键。

针对小流域洪水预报, 目前还没有通用的洪水预报模型, 国内应用较广泛的有集总式和少数分布式模型等, 如采用新安江模型在湿润地区中小河流建立的山洪预报方案[2]、应用于黄土高原小流域的 HEC-HMS 模型[3]、LL-III 分布式模型[4]以及改进的 CASC2D 模型[5]等; 而国外通常建立分布式预报模型, 例如 TOPMODEL、TOPKAPI、HEC-HMS 模型等[6], 并结合 GIS、雷达估测降雨等技术来构建小流域的洪水预报预警系统[7]。我国幅员辽阔, 南北方气候和下垫面条件差别较大, 产流机制不同。其中, 大伙房模型以超渗产流机制为基础, 比较适合北方半干旱地区, 尤其在东北地区应用效果较好[8]; 我国南方湿润地区的降雨径流多为蓄满产流, 新安江模型应用效果较好[9]; TOPMODEL 模型在国内外的应用已经相当成熟, 但模型并没有考虑降雨、蒸发等要素的时空变异性[10]; HEC-HMS 分布式模型结构简单, 需要的实测水文资料较少, 并对地形地质等资料要求不高, 适合小流域的洪水预报[11] [12]。总体来说, 每种洪水预报模型的适用情况不同, 其产汇流机制也有所差别, 在实际应用中并不是模型越复杂模拟效果越好, 因此选取小流域洪水预报模型时, 应综合考虑各种因素确定适合的预报模型。

本文以大连市英那河上游的冰峪沟小流域为研究区域, 分析冰峪沟流域 2005~2013 年间仅有的 7 场实测洪水资料, 选取大伙房模型和 HEC-HMS 模型, 开展该流域的洪水模拟研究, 为小流域洪水预报预警提供技术支持。

2. 研究区域及模型选择

2.1. 区域概况

冰峪沟小流域地处辽东半岛大连市境内。如图 1 所示, 冰峪沟水文站位于英那河上游, 集水面积为 260 km²;

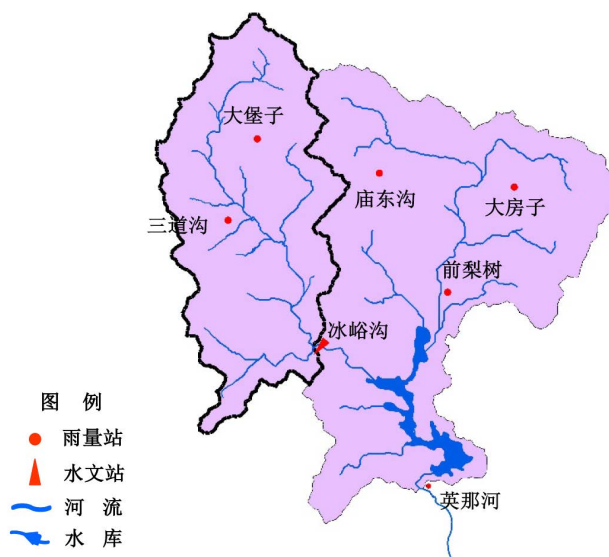


Figure 1. Sketch map of the Bingyugou basin
图 1. 冰峪沟流域概况图

该流域呈树状狭长型，主河道全长 43 km，平均河道比降为 2.31‰；流域内植被较好，其中林地、灌木丛和耕地分别约占流域面积的 68%、22%和 10%。该流域处于温带亚湿润气候区，降水的时间分布极不均匀，主要集中在 7 月下旬至 8 月上旬。由于暴雨持续时间长强度大，加之地势北高南低，洪水过程陡涨陡落，造成灾害严重。

2.2. 模型选择

本次研究选用冰峪沟流域 2005~2013 年之间的实测水文资料，模拟时段长为 1 小时，经过整理、审查之后仅得到 7 场洪水，对其产汇流机理分析发现：该流域的洪水过程普遍具有起涨时间较短、退水快的特点，尤其是当前期土壤较为干旱、降雨量较大(暴雨持续时间长)时，其降雨产流方式与超渗产流原理相似。

结合国内常用水文模型的适用情况，综合考虑冰峪沟流域的气候、降雨产流特点，因而选取集总式的大伙房模型进行该流域历史场次洪水模拟；同时又因冰峪沟流域的实测水文资料系列较短，难以建立复杂的分布式洪水预报模型，因而选取 HEC-HMS 半分布式模型开展本次研究，并将两种模型的模拟结果进行对比分析。

3. 洪水模拟

3.1. 洪水模拟模型

1) 大伙房模型(DHF model)

大伙房模型[8] [13]是大伙房水库管理局在 1973 年提出的，主要适用于北方半湿润半干旱地区，模型以超渗产流为原理，引用双层入渗曲线进行扣损计算；汇流模型采用变强度、变汇流速度的经验单位线。其中，蒸散发按照两层模式进行计算，表层按照流域平均蒸散发能力蒸发，待表层需水量蒸发完以后，下层开始蒸发。

产流计算过程：首先从降雨中扣除雨间蒸散发量和不透水面上的直接径流量，得到净渗雨强；然后，采用不同抛物线分别描述表层蓄水容量和下层渗率的空间分布状况，进一步从净渗雨强中扣除表层的缺水量和流域平均总下渗量，得到表层流；最后，用总径流扣除表层流得地下径流。汇流计算时利用前期影响净雨量控制汇流速度，采用指数和三角函数乘积叠加的方式建立经验单位线汇流模型。

2) HEC-HMS 模型

HEC-HMS 模型是由美国陆军工程师团水资源研究中心开发的，如图 2 所示，该模型将实际产汇流过程简

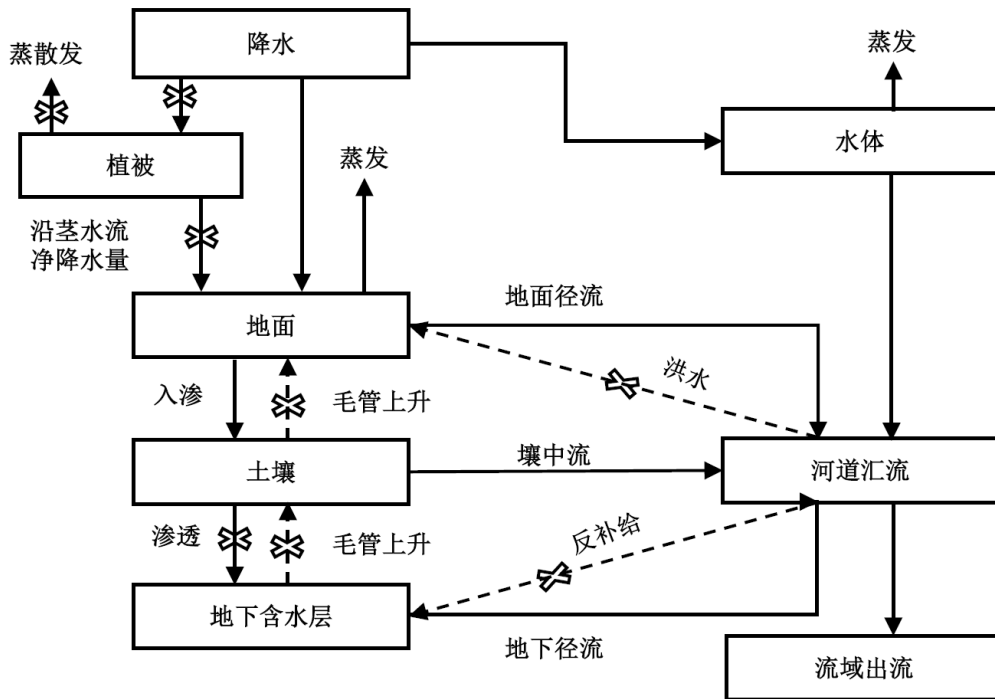


Figure 2. Principle of HEC-HMS model
图 2. HEC-HMS 模型原理

化为产流计算、直接径流、基流和河道汇流 4 个组成部分，基本思想是在划分多个子流域单元的基础上，建立气象模型计算各个子流域的面降雨，然后分别选取产流、汇流方法，计算每个子流域的净雨量，经过坡面、河道汇流，最后演算至流域出口。

HEC-HMS 模型将产汇流过程组成部分模块化，主要包括：子流域模型、气象模型、控制模块、时间序列数据模块等。其中，子流域模型和气象模型是模型运行的基础和关键，一般情况下，在复杂地形的山区小流域，划分的子流域越精细，模型模拟结果越稳定[14]，但在资料精度不高的情况下，可适当减少子流域数量。子流域模型确定后，可以选用泰森多边形法计算各个雨量站点在各子流域的面积权重，以此来计算各子流域的面降雨量，最后生成气象模型。

3.2. 基于大伙房模型的洪水模拟

考虑到场次洪水较少，故模拟研究过程中不分率定期和检验期；大伙房模型的参数采用改进的粒子群算法进行率定[15]，最后确定的模型参数值见表 1，模拟结果如表 2 所示。根据水文情报预报规范(GB/T22482-2008)，模拟径流量合格率为 100%，模拟汇流过程的合格率为 85.7%，其中不合格的场次洪水是“080731”洪水。

1) 从产流模拟结果来看，大伙房模型模拟径流量精度整体较高。对于前期土壤较干旱、降雨总量较大的洪水，模型模拟径流量的误差不超过 12%，如“080731”、“080811”、“120803”等场次洪水，降雨量越大，雨强就越大(暴雨历时短)，符合模型超渗产流的特点，因此模型模拟效果较好。

2) 从汇流模拟结果可知，大伙房模型模拟洪峰流量和峰现时间的效果均较好，符合水文情报预报规范(GB/T22482-2008)的评定，但整体的平均确定性系数模拟精度略低，这与大伙房模型退水较快的特点有关。对于“120728”场次洪水，该场洪水降雨量很少且前期土壤较为湿润，可能发生蓄满产流，其峰现时间滞后、洪水过程偏瘦，与大伙房模型汇流特点不符，因此模拟峰现时间提前，模拟确定性系数精度较低；对于“080731”场次洪水，本身就是多峰洪水，峰现时间很难模拟；另外，由于流域自动测报系统 2011 年以后才稳定运行，也

Table 1. Optimized parameters of DHF model

表 1. 基于大伙房模型的参数优选结果

产流参数	B	$K2$	$S0$	$U0$	$D0$	Ka	a
参数值	1.01	0.32	40	70	110	0.85	2.40
汇流参数	$B0$	$K0$	K	n	DD	CC	COE
参数值	1.02	0.11	0.45	4.3	0.64	0.55	0.09

Table 2. Simulated results of DHF model

表 2. 基于大伙房模型的模拟结果

序号	洪号	降雨总量/mm	初始含水量/mm	径流深				洪峰流量			峰现误差/h	确定性系数
				实际/mm	模拟/mm	绝对误差/mm	相对误差/%	实际/(m ³ /s)	模拟/(m ³ /s)	相对误差/%		
1	050808	116.6	94	100.0	98.6	-1.4	-1.4	372	383	2.8	-1	0.91
2	080731	146.3	65	102.4	98.5	-3.9	-3.8	181	210	16.1	-2	0.61
3	080811	143.4	60	86.3	93.6	7.2	8.4	443	506	14.4	-1	0.70
4	120728	58.9	100	58.7	48.6	-10.1	-17.2	243	235	-3.3	-1	0.56
5	120803	201.0	91	167.4	181.9	14.5	8.7	897	939	4.7	0	0.70
6	130701	128.3	63	69.6	77.4	7.8	11.2	298	303	1.6	0	0.82
7	130716	84.3	82	68.6	57.4	-11.2	-16.4	286	260	-9.2	0	0.92

可能是资料记载有偏差，但很难识别出究竟是哪方面的因素导致峰现时间模拟效果不好。

3.3. 基于 HEC-HMS 模型的洪水模拟

根据研究区域的 DEM 数据，利用 HEC-GeoHMS 模块生成子流域模型和气象模型(见图 3)。根据流域的洪水特点和下垫面条件，HEC-HMS 模型的产流、汇流和河道洪水演算分别采用初损后损法、Snyder 单位线法和马斯京根法。由于 HEC-HMS 模型所需实测水文资料较少，所以研究中分率定期和检验期。本文根据土地利用类型确定不透水面积，并结合土壤等数据确定下渗率的初始值，选用“080811”、“120803”和“130716”等 3 场洪水率定模型的参数，其余场次洪水用于模型参数的检验。最终确定的参数值及洪水模拟结果如表 3~5 所示。

根据水文情报预报规范(GB/T22482-2008)，HEC-HMS 模型对 7 场洪水的径流量模拟结果都合格，洪峰流量和峰现时间的模拟精度与大伙房模型模拟结果一样，也只有“080731”洪水不合格，但 HEC-HMS 模型整体的平均确定性系数模拟精度比大伙房模型高。产生这种结果的原因是：HEC-HMS 模型与大伙房模型均采用超渗产流方法，对于“080811”、“120803”等降雨强度较大的洪水，两种模型模拟效果均较好，对于“130716”等降雨量较小的洪水，两种模型模拟误差稍大，因此两种模型对产流量的模拟精度相差不大；大伙房模型汇流方法退水较快，与冰峪沟流域实际退水过程拟合效果较差，因此确定性系数的模拟效果没有 HEC-HMS 模型好，如图 4 所示。

综上所述，冰峪沟小流域地处北方半湿润半干旱丘林山区，其产汇流规律复杂多变，当前期土壤较干旱、降雨强度较大时，流域符合超渗产流特征，大伙房模型和 HEC-HMS 模型模拟产汇流的效果都比较好。对于前期土壤偏湿润、降雨量和雨强较小的洪水，两种模型模拟效果稍差，如“120728”洪水、“130716”洪水等，原因可能是实际降雨发生了蓄满产流。但总体而言，处于半湿润半干旱地区的小流域，一般都以超渗产流为主，因此两个模型模拟产汇流的精度均较高，具有较好的适用性。

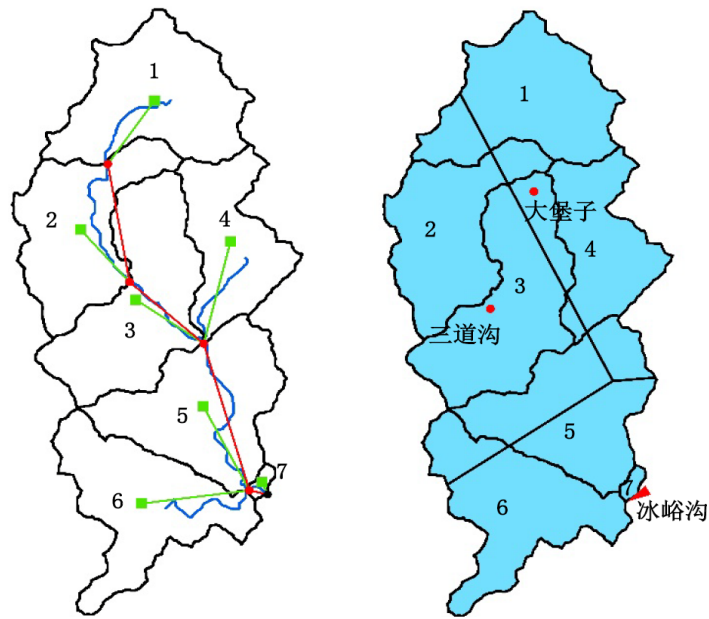


Figure 3. Basin models and meteorological models
图 3. 子流域模型和气象模型

Table 3. Optimized parameters of runoff generation and concentration based on HEC-HMS model
表 3. 基于 HEC-HMS 模型的产流和汇流参数优选结果

子流域序号		1	2	3	4	5	6	7
产流参数	稳渗率	1.0	1.1	0.9	1.4	0.8	1.2	1.6
	流域滞时	7.7	8.8	4.3	2.6	2.0	4.5	0.5
汇流参数	峰值系数	0.36	0.34	0.50	0.69	0.79	0.71	0.56

Table 4. Optimized parameters of channel conflux based on HEC-HMS model
表 4. 基于 HEC-HMS 模型的河道汇流参数优选结果

河道	河道 1	河道 2	河道 3	河道 4
槽蓄曲线坡度	3	2.3	3.7	0.4
流量比重因子	0.34	0.38	0.3	0.48

Table 5. Simulation results of HEC-HMS model
表 5. 基于 HEC-HMS 模型的模拟结果

分期	序号	洪号	降雨总量/mm	初始含水量/mm	径流深				洪峰流量			峰现误差/h	确定性系数
					实际/mm	模拟/mm	绝对误差/mm	相对误差/%	实际/(m ³ /s)	模拟/(m ³ /s)	相对误差/%		
率定期	1	080811	143.4	55	86.3	93.3	7.0	8.1	443	512	15.8	-1	0.80
	2	120803	201.0	87	167.4	181.4	14.0	9.2	897	727	-9.0	0	0.85
	3	130716	84.3	79	68.6	59.3	-9.3	-13.0	286	252	-11.9	0	0.96
检验期	1	050808	116.6	90	100.0	84.4	-15.6	-15.0	372	346	-7.2	-1	0.87
	2	080731	146.3	62	102.4	95.4	-7.0	-6.2	181	190	5.1	-2	0.79
	3	120728	58.9	96	58.7	51.2	-7.5	-12.8	243	239	-1.6	0	0.58
	4	130701	128.3	62	69.6	77.4	7.8	12.0	298	334	-12.2	0	0.86

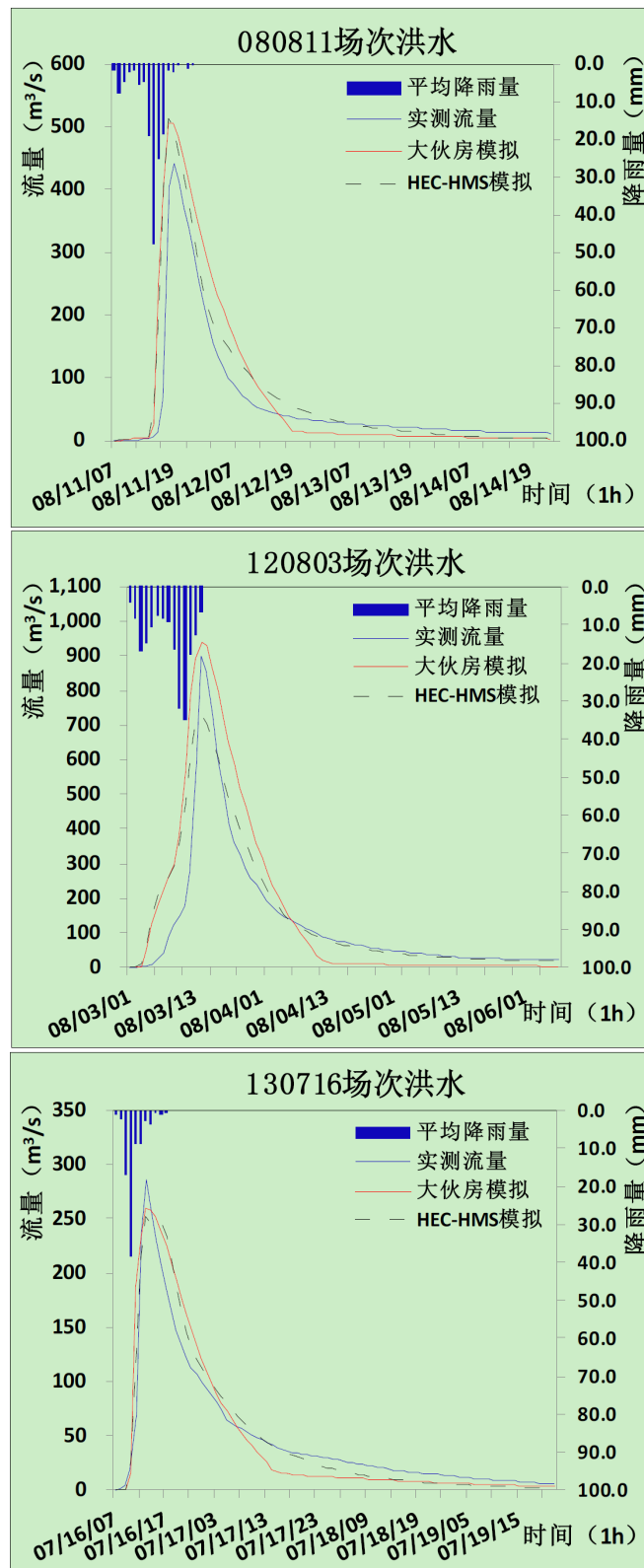


Figure 4. Comparison of simulation results between DHF and HEC-HMS models

图 4. 大伙房模型与 HEC-HMS 模型模拟结果对比

4. 结论

本文利用大伙房模型和 HEC-HMS 模型进行冰峪沟小流域历史洪水的模拟研究, 结果表明: 两个模型模拟产汇流的结果都较好, 均可用于指导冰峪沟小流域的洪水预报。但相比而言, 大伙房模型模拟产汇流的平均误差较小, 因此在实际工作中, 对于处于半干旱半湿润地区的小流域, 如果掌握较长系列的实测水文数据, 可优先选择大伙房模型建立洪水预报方案, 这也恰恰是目前大多数小流域所不具备的。而 HEC-HMS 模型的参数值可以结合地形和土地利用等资料来确定, 其应用于水文资料较缺乏的小流域更具有优势。

基金项目

“中央高校基本科研业务费专项资金资助, DUT16ZD204” (supported by “the Fundamental Research Funds for the Central Universities”)

参考文献 (References)

- [1] 刘志雨, 侯爱中, 王秀庆, 等. 基于分布式水文模型的中小河流洪水预报技术[J]. 水文, 2015, 35(1): 1-6.
LIU Zhiyu, HOU Aizhong and WANG Xiuqing. Flood forecasting for small- and medium-sized rivers based on distributed hydrological modeling. Journal of China Hydrology, 2015, 35(1): 1-6. (in Chinese)
- [2] 叶金印, 吴勇拓, 李致家, 等. 湿润地区中小河流山洪预报方法研究与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 615-621.
YE Jinyin, WU Yongtuo, LI Zhijia, et al. Forecasting methods for flash floods in medium and small rivers in humid regions and their applications. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(6): 615-621. (in Chinese)
- [3] 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 and ZHANG Bo. Applicability of the distributed hydrological model of HEC-HMS in a small watershed of the Loess Plateau area. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(3): 52-57. (in Chinese)
- [4] 刘战友, 李兰, 朱灿, 等. 分布式水文模型在洪水预报中的对比研究[J]. 水电能源科学, 2006, 24(2): 70-73.
LIU Zhanyou, LI Lan, et al. Comparison of distributed hydrology model in flood forecasting. Water Resources and Power, 2006, 24(2): 70-73. (in Chinese)
- [5] 李致家, 胡伟升, 丁杰, 等. 基于物理基础与基于栅格的分布式水文模型研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 5-13.
LI Zhijia, HU Weisheng, et al. Study on distributed hydrological model of solving physical equation on grids. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 5-13. (in Chinese)
- [6] 徐宗学. 水文模型: 回顾与展望[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 278-289.
XU Zhongxue. Hydrological models: Past, present and future. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(3): 278-289. (in Chinese)
- [7] JAVIER, J. R. N., et al. Flash flood forecasting for small urban watersheds in the Baltimore Metropolitan region. Weather and Forecasting, 2007, 22(6): 1331-1344. <http://dx.doi.org/10.1175/2007WAF2006036.1>
- [8] 王猛, 彭勇, 梁国华. 大伙房模型在石佛寺流域洪水预报方案中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 93-97.
WANG Meng, PENG Yong and LIANG Guohua. Application of DHF Model in flood forecasting for Shifosi basin. South-to-North Water Diversion and Water Science and Technology, 2012, 10(2): 93-97. (in Chinese)
- [9] 赵人俊. 流域水文模型——新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
ZHAO Renjun. Hydrological model—Xin'anjiang model and Shanbei model. Beijing: China Water & Power Press, 1984. (in Chinese)
- [10] BEVEN, K. J., KIRKBY, M. J. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Journal, 1979, 24(1): 43-69. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667909491834>
- [11] Hydrologic Engineering Center of US Army Corps of Engineers. Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual. US, 2013.
- [12] 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): 17-19.
DENG Xia, DONG Xiaohua and BO Huijuan. Research on influence of objective function on HEC-HMS Model parameter calibration. Water Resources and Power, 2010, 28(8): 17-19. (in Chinese)
- [13] 刘爱杰, 王本德. DHF 模型及其在微计算机上的应用[J]. 大连理工大学大学学报, 1984, 23(3): 27-28.
LIU Aijie, WANG Bende. DHF model and application by microcomputer. Journal of Dalian University of Technology, 1984,

23(3): 27-28. (in Chinese)

- [14] 冷佩, 宋小宁, 李新辉. 复杂山区小流域径流模拟影响因素分析[J]. 水文, 2010, 30(6): 5-9.
LEBG Pei, SONG Xiaoning and LI Xinhui. Analysis of influencing factors in runoff simulation for complicated mountain area. Journal of China Hydrology, 2010, 6(30): 5-9. (in Chinese)
- [15] 彭勇, 梁国华, 周惠成. 基于改进微粒群算法的梯级水库群优化调度[J]. 水力发电学报, 2009, 28(4): 49-55.
PENG Yong, LIANG Guohua, ZHOU Huicheng. Optimal operation of cascade reservoirs based on improved particle swarm optimization algorithm. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 8(4): 49-55. (in Chinese)