

不同水文模型在半干旱地区的应用比较研究

董小涛^{1,2} 李致家¹ 李利琴¹

(1.河海大学水资源环境学院,江苏 南京 210098;2.水利部综合事业局计划处,北京 100053)

摘要:分别采用新安江模型、HEC 模型和 TOPMODEL 模型对滦河宽城流域进行洪水模拟计算,认为蓄满产流模型可以进行半干旱地区洪水模拟和预报分析,在计算时段为 3 h 的情况下,采用历史水文资料无法区别出产流模式.如果采用超渗产流一类的模型,计算时段要小于 0.5 h.

关键词:TOPMODEL 新安江模型 HEC 模型 半干旱地区 洪水预报 蓄满产流 超渗产流

中图分类号: P338 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2006)02-0132-04

近半个世纪以来,湿润地区的降雨-径流模型得到了充分发展,产生了很多成熟的概念性模型以及半分布式的水文模型^[1-4].而半干旱地区还没有成熟的降雨-径流模型,在实际应用中,只是根据具体流域情况设计一些经验的预报方法.本文采用国内外成熟的新安江模型、TOPMODEL 模型以及 HEC 模型,对半干旱的滦河宽城流域进行洪水模拟计算并分析其适用性.

1 模型概述

本文选择 3 个水文模型,即新安江模型、TOPMODEL 模型以及 HEC 模型进行比较研究.

a. 新安江模型——分布式概念性模型.根据某流域下垫面的水文、地理情况将该流域分为若干个单元流域.演算每个单元流域预报的流量过程至流域出口,叠加后即是整个流域的预报流量过程.单元流域采用新安江模型进行模拟计算.单元流域的新安江模型由几个关键部分组成:蓄满产流计算模式;上、下和深层蒸散发计算;地表水、壤中水和地下径流 3 种水源以及坡地、河网汇流^[1-2].

b. TOPMODEL 模型——以地形为基础的半分布式流域水文模型,以反映地形空间变化的地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 或土壤-地形指数 $\ln(\alpha/(T_0\tan\beta))$ 为基础.地形指数一致的单元流域属于水文一致区,在该区内,流域的产流、汇流相同.模型有饱和地表径流与地下径流 2 种产流方式.表层与地下水含水层之间通过类似于下渗的重力排水进行水分交换.模型汇流采用等流时线法^[3-4].

c. HEC 模型——包含 HEC-GeoHMS 模型与 HEC-HMS 模型 2 部分.hec-GeoHMS(Hydrologic Engineering Center Geospatial Hydrological Model System)模型以 ArcviewGis 为工作平台,在 Extensions 内添加了 HEC-GeoHMS 和 HydrologicModeling 2 个扩展模块,其主要功能是利用数字高程模型(DEM)进行地形分析,计算出流域参数,完成对流域和河网的描述以及对流域的分块,确定河流的流向,为 HEC-HMS 水文模型提供输入资料(Mapfile 文件).hec-HMS(Hydrologic Engineering Center Hydrological Model System)是流域洪水预报模型,为模块化结构,包括 BasinModel、MeteorologicModel 和 ControlSpecifications 3 部分^{①-⑤}.

本文产流采用初损稳渗法,汇流采用运动波法,河道演算采用马斯京根法.

2 模型应用与比较

2.1 研究流域地理水文概况

本文选择半干旱的滦河宽城流域为研究区域.宽城是瀑河的出口水文站.瀑河位于潘家口流域东南角,流

收稿日期:2005-06-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50479017)

作者简介:董小涛(1978—),男,山西洪洞人,硕士研究生,主要从事水文模拟及洪水预报研究.

① HEC-GeoHMS User's Manual. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. Version 1.0. 2000.

② HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. Version 4.1. 1998.

③ HEC-HMS User's Manual. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. Version 2.1. 2001.

④ Hydrologic Modelling System HEC-HMS User's Manual. Hydrologic Engineering Center. 2000.

⑤ Hydrologic Modelling System HEC-HMS Technical Report. Hydrologic Engineering Center. 2000.

域面积1 720.7 km² ,河长 114 km ,自源地南流穿平泉县城向西南流 ,进入宽城县界 ,在宽城县滦河左岸汇入滦河。大庆中型水库建于 20 世纪 70 年代 ,是瀑河较大的控制工程。宽城流域所在位置见图 1。

滦河流域地处副热带季风区 ,燕山山脉横贯其中部 ,夏季炎热多雨 ,冬季寒冷干燥。降雨分布受地形影响 ,多年平均降雨量为 400 ~ 700 mm。受燕山山脉影响 ,降雨中心多集中在洒河、柳河、潘家口一带。流域内的洪水由暴雨形成 ,多发生在每年的 7 月下旬至 8 月上旬。受北方大陆低压冷空气和太平洋副高暖湿气流交汇的影响 ,夏季会形成较大范围的天气系统。在潘家口地区 ,往往会出现暴雨强度大、历时长、全面积汇流现象。另外在滦河一些主要流域 ,由于受地形抬升和热暴天气的影响 ,易形成强度大、历时短的局部暴雨 ,洪水具有陡涨陡落的特点。

宽城流域内有党坝、平原和宽城 3 个雨量站。蒸发资料为潘家口地区实测资料。本文采用 15 场洪水资料 ,其中 10 场洪水资料用来率定参数 ,剩余 5 场洪水资料用来检验。时段长 $\Delta t = 3\text{ h}$ 。

2.2 新安江模型结果

在新安江模型中 ,将宽城流域划分为 3 个子流域 ,每个子流域有一雨量值。率定出的模型参数见表 1。率定期和检验期模拟过程的特征值见表 2 和表 3 ,其中合格率统计是按照水文情报预报规范进行的^[5]。图 2 和图 3 中面积是量纲一的量)是 2 次洪水的模拟过程线。

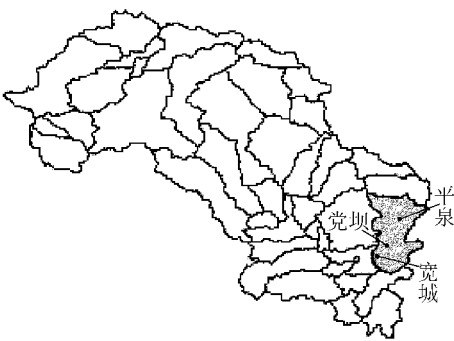


图 1 宽城流域示意图
Fig.1 Sketch of Kuancheng basin

表 1 新安江模型参数

Table 1 Parameters of Xinanjiang model																		
参 数	蒸散 发折 算系 数 K	蓄水量 分布 曲线指 数 B	深层 散发 系数 C	张力水 容量 WM/mm	上层张 力水 容量 WUM/mm	下层 张力 水容量 WLM/mm	不透水 面积 比例 IM	自由 水容量 SM/mm	自由水 容量分 布曲线 指数 EX	地下水 出流 系数 KG	壤中 流出 系数 KI	地下水 消退 系数 CG	壤中 流消 退系数 CI	河道汇 流的马 斯京干 法系 数 X	时段 TT/h	河网 水流 消退 系数 CS	流域 分块 数 NA	河网 汇流 滞时 L
率定值	1.14	0.4	0.1	180	20	60	0.01	42	1.2	0.2	0.5	0.99	0.5	0.45	3	0.01	3	0

表 2 各个模型率定与检验的洪水特征值

Table 2 Fitted and verified characteristic values with each model													
率定与 洪水 检验期 编号	洪水相对误差/%			洪峰相对误差/%			峰现误差/h			确定性系数			
	新安江 模型	TOP 模型	HEC 模型	新安江 模型	TOP 模型	HEC 模型	新安江 模型	TOP 模型	HEC 模型	新安江 模型	TOP 模型	HEC 模型	HEC 模型
率 定 期	1	34.9	14.1	- 5.1	34.9	4.9	- 14.6	1	0	0	0.67	0.86	0.85
	2	29.8	- 7.9	- 21.6	29.8	9.8	- 6.2	1	0	0	0.7	0.95	0.90
	3	- 9.4	10.3	- 0.7	- 9.4	0.4	- 5.7	- 1	1	1	0.93	0.90	0.92
	4	11.8	- 3.0	- 8.2	11.8	0.9	1.2	0	0	0	0.77	0.94	0.89
	5	9.5	1.3	- 2.7	9.5	- 0.7	- 2.2	0	- 1	- 1	0.86	0.85	0.88
	6	33.8	2.7	2.6	19.8	- 1.4	- 0.3	0	0	0	0.21	0.94	0.90
	7	- 17.3	- 11.3	29.1	- 17.3	7.6	3.8	- 1	2	1	0.82	0.32	0.52
	8	- 1.9	- 15.4	18.4	- 1.9	11.8	- 0.9	0	1	1	0.76	0.76	0.72
	9	3.1	- 8.4	- 26.0	3.1	- 0.9	- 33.3	1	1	1	0.86	0.81	0.63
	10	8.9	8.3	- 6.5	8.9	- 0.5	13.0	- 1	1	1	0.83	0.89	0.90
检 验 期	11	- 1.1	- 50.1	1.0	37.8	39.0	- 26.3	- 2	1	2	0.53	0.49	0.71
	12	- 8.2	- 19.0	4.6	19.2	27.5	0.3	- 1	1	1	0.82	0.47	0.57
	13	17.7	- 3.7	- 17.0	29.8	- 1.3	12.3	- 1	1	1	0.85	0.81	0.83
	14	- 18.0	- 19.0	7.4	- 6.2	3.2	1.5	0	2	1	0.88	0.71	0.82
	15	- 1.3	8.3	- 0.8	- 14	- 0.3	1.8	0	1	1	0.81	0.92	0.91

表 3 合格率统计

Table 3 Statistics of qualification rate												
率定与 检验期	洪量相对误差合格率/%			洪峰相对误差合格率/%			峰现误差合格率/%			确定性系数合格率/%		
	新安江 模型	TOP 模型	HEC 模型	新安江 模型	TOP 模型	HEC 模型	新安江 模型	TOP 模型	HEC 模型	新安江 模型	TOP 模型	HEC 模型
率定期	70	100	70	80	100	90	100	90	100	80	90	80
检验期	100	80	100	60	60	80	80	80	80	80	60	80

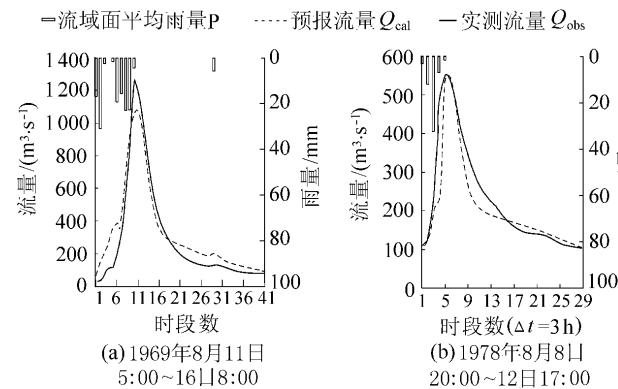


图2 新安江模型模拟的洪水过程

Fig.2 Hydrograph simulated with Xinanjiang model

2.3 TOPMODEL 模型结果

根据美国地质调查局(USGS)提供的全球 30"×30"DEM 数据^①,采用 ARCVIEW 提取水系并将流域分为 4 个子流域,各个子流域的地形指数关系见图 3.由图 3 可以看出,子流域 1 与其他 3 个子流域的地形指数有明显差异,而其他 3 个子流域的地形指数非常相似. TOPMODEL 模型的起始流域缺水量由起始流量通过换算公式估算.在模型水量平衡计算中起重要作用的初始变量 SRO 目前无法直接估算,本文采用试错法确定,结果见表 4.模型参数见表 5.

表5 TOPMODEL 模型参数

Table 5 Parameters of TOPMODEL model

模型参数	孔隙度因子 M/m	导水系数 $T_0/(m^2 \cdot h^{-1})$	时间参数 TD/h	植物根系最大蓄水容量 SR_{max}/m	起始植物根系缺水量 SRO/m	坡面汇流速度 $CHV/(m \cdot h^{-1})$	河道汇流速度 $RV/(m \cdot h^{-1})$
参数取值	0.014	5	0.5	0.04	0.03	4000	4500

2.4 HEC 模型结果

在 HEC 模型中,将流域划分为 3 个子流域,见表 6.各个子流域由上至下编号,依次命名为平泉、党坝、宽城.在洪水模拟计算前,输入各个观测站的流量、降雨量和蒸发量资料,建立 Meteorologic Model 和 Control Specifications,在其中选择模型计算采用的方法,给模型参数赋初始值,利用试错法调整参数,直到目标函数达到要求.率定和检验的洪水特征值见表 2、表 3.模型参数见表 6.起始变量初损采用类似于前期影响雨量 P_a 的计算方法,即采用提前 15 d 的日雨量进行计算.

2.5 模型分析比较

从模拟洪水的洪峰、洪量、峰现时间以及确定性系数 4 个指标来看,3 个模型模拟的精度大体相当.从率定期洪水的洪峰和洪量精度来看, TOPMODEL 模型较其他 2 个模型精度要高.对于检验期,则反之,即新安江模型与 HEC 模型的精度要高于 TOPMODEL 模型.另外,从模拟洪水的各个指标来看,各个模型检验期较率定期模拟洪水的精度均有所下降.每个模型率定期和检验期模拟洪水的平均合格率均大于 70%,根据水文情报预报规范^[5],模型预报的精度达到乙级标准,就可以用于洪水预报.

从模型参数率定的过程来看,新安江模型首先率定日模型参数,而后利用日模型参数计算出流域逐日的各种状态,如各层的土壤含水量、产流面积、自由水蓄量等.在次洪水模拟时,模型中关于水源划分、汇流参数需要重新率定,各场洪水起始流域状态从日模型中直接读取.这样日模型配合次洪水模型就可以进行实时洪水预报.对于 TOPMODEL 模型的初始变量 SRO ,每次都要采用试错法确定,所以如何事先估算初始变量 SRO

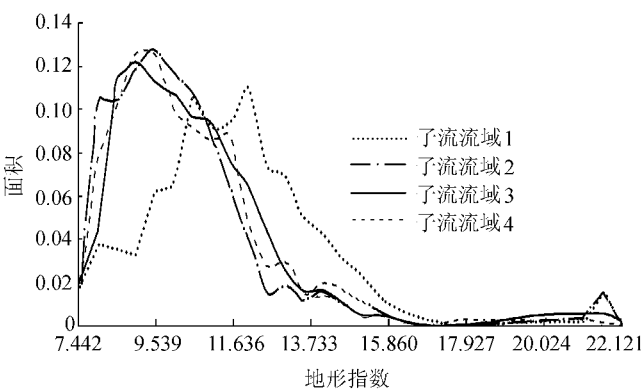


图3 宽城流域面积-地形指数关系

Fig.3 Relationship of area and terrain index of Kuancheng basin

表4 起始植物根系缺水量 SRO 取值

Table 4 Values of SRO

洪水起始时间	SRO/m	洪水起始时间	SRO/m
19620725T05	0.03	19780726T05	0.006
19640812T08	0	19780728T08	0.017
19690811T05	0.038	19780808T20	0.018
19690816T23	0.018	19830804T08	0.018
19690821T08	0.010	19840809T11	0.008
19770802T20	0.016	19940712T20	0.024
19780724T08	0	19950729T05	0

表6 流域分块与模型参数

Table 6 Basin partitioning and model parameters

子流域	面积比	稳渗率/ ($mm \cdot h^{-1}$)	坡度比/ %	糙率	断面 简化	K/h	X	出流 系数
平泉	0.38	6	0.003	0.025	梯形	3	0.4	0.5
党坝	0.39	6	0.003	0.025	梯形	3	0.4	0.5
宽城	0.33	6	0.003	0.025	梯形	3	0.4	0.5

① USGS GTOPO30 <http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/gtop30/gtopo30.html>, 2004.

是一个亟待解决的问题,否则难以将 TOPMODEL 用于作业预报.

从模型产流机制来看,新安江模型、TOPMODEL 模型都是采用蓄满产流机制,而 HEC 模型中的初损后损产流模型表面上是超渗产流,实际上初损产流相当于新安江模型的初始缺水量,后损产流相当于土壤的饱和稳定下渗率,就是蓄满产流机制.潘家口流域管理局水情预报中心经过多年的研究,认为采用新安江模型对滦河宽城流域进行洪水模拟计算最合适^{①-②}.

宽城流域属于典型的半干旱流域,采用蓄满产流机制的模型能够取得较好的模拟精度主要有 2 个原因:(a)由于北方地区植被较差,耕作土壤层较薄,一般是雷暴雨形成洪水和特大洪水,雨强很大,表层土壤受雨水的冲击很容易板结,阻碍了进一步下渗.(b)本文的计算时段 $\Delta t = 3\text{ h}$,实际上当充分供水时,在 1 h 内就可以达到稳定入渗.

3 结 语

从新安江模型、TOPMODEL 模型和 HEC 模型率定与检验的结果来看,在宽城流域应用 3 个模型的精度相当,各个指标的合格率均大于 70%,可以作为洪水作业预报方案供选择.但 TOPMODEL 的初始变量 SRO 事先较难估计,所以该模型用于实时洪水预报比较困难.

新安江模型、TOPMODEL 模型以及 HEC 模型在半干旱潘家口宽城流域的应用表明,蓄满产流模型能够进行半干旱地区洪水模拟和预报.对于我国半干旱的华北地区,洪水一般由雷暴天气形成,雨强大,在 1 h 之内就可以达到稳定下渗,在时段长 3 h 的情况下,现有的资料无法反映出超渗透产流情况,即使采用超渗产流模型计算并模拟较好,也是一种假象.如果要真正采用超渗产流一类的模型,计算时段要小于 0.5 h,雷达测雨为此提供了便利的条件.

参考文献:

[1] 赵人俊.流域水文模拟——新安江模型和陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社,1984:1-20.
[2] ZHAO Ren-jun, LIU Xin-ren. The Xinanjiang model[M]/SINGH V P. Computer Model of Watershed Hydrology. Littleton:Water Resources Publications, 1996:215-232.
[3] BEVEN K J, LAMB P R, QUINN P, et al. TOPMODEL[M]/SINGH V P. Computer Model of Watershed Hydrology. Littleton:Water Resources Publications, 1996:215-232.
[4] BEVEN J. Distributed hydrological modelling applications of the TOPMODEL concep[J]. Advance in Hydrological Processes, 1997, 11: 1069-1085.
[5] 水利部水文局. SL 250-2000 水情预报规范[S]. 北京:水利水电出版社,2000:13-15.

Application and comparison of three hydrological models in semi-arid region

DONG Xiao-tao^{1, 2}, LI Zhi-jia¹, LI Li-qin¹

(1. College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Planning Department of Bureau of Comprehensive Development, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: The three hydrological models, i. e. the Xinanjiang model, HEC model, and TOPMODEL were applied to flood simulation for Kuancheng basin of the Luanhe River, which is a semi-arid region, and satisfactory results were obtained even though the mode of runoff yield of the three models was the type of runoff yield under saturated storage. The analysis of the results demonstrates that the mode of runoff yield could not be distinguished from the historical hydrological data under the calculation interval of 3 h, and that the calculation interval should be less than 0.5 h if the model for runoff yield under excess infiltration is used.

Key words: TOPMODEL; Xinanjiang model; HEC model; semi-arid region; flood prediction; runoff yield under saturated storage; runoff yield under excess infiltration

① 潘家口、大黑汀水库洪水调度考评材料之二.水利部海委引滦工程管理局.1998.
② 潘家口、大黑汀水库洪水调度考评材料之八.水利部海委引滦工程管理局.1998.