

河北雨洪模型在半干旱区的应用与研究

李瑞^{1,2,3}, 张士锋^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 河北雨洪模型是一种兼具蓄满和超渗产流机制的概念性水文模型。为了探索河北雨洪模型在半干旱区的应用效果,并研究目标函数对模型模拟结果的影响,以黄河上游小流域为研究区,对研究区 1994–2010 年间的 10 场洪水过程进行模拟,并分别以峰值加权均方根误差、加权误差及效率系数为目标函数,研究了不同目标函数对模型模拟结果的影响。结果表明:河北雨洪模型对西北半干旱区的洪水过程模拟有良好的适用性;不同目标函数对模型模拟结果的影响各有侧重,但模拟结果都很接近,在实际问题中,应根据关注的重点恰当选取目标函数而避免一定的盲目性;选取峰值加权均方根误差作为目标函数时,模型对副峰的模拟效果较好。

关键词: 河北雨洪模型; 半干旱区; 参数率定; 目标函数; 洪水模拟

中图分类号: TV121; P334⁺.92

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0019-07

The application and research of Hebei Flood model in semi-arid area

LI Rui^{1,2,3}, ZHANG Shifeng^{1,2}

(1. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, CAS, Beijing 100101, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Hebei Flood model is a conceptual hydrological model with both storage-excess runoff and infiltration-excess runoff mechanisms. In order to investigate the application effects of Hebei Flood model in semi-arid areas and of objective function on the simulation results, in this paper 10 floods were simulated from 1994 to 2010 based on Hebei Flood model for the study area which located in the upstream of the Yellow River areas. The effects of different objective functions (by using the peak-weighted root mean square error, weighted error and efficiency coefficient, respectively) on the simulation results were studied. The results showed that: Hebei Flood model has good applicability to simulate the flood process in the semi-arid areas of northwest China, the effects of different objective functions on the simulation results of the model have different emphases, but the simulation results were very close, so in practical respects, the objective function should be selected considering the appropriate focus of attention to avoid certain blindness, when the peak-weighted root mean square error was chosen as the objective function, the simulation of the secondary peak was better.

Key words: Hebei Flood model; semi-arid area; parameter calibration; objective function; flood simulation

1 研究背景

水文模型是探索和认识水循环和水文过程的重要手段,也是解决水文预报、水资源规划与管理、水文分析与计算等实际问题的有效工具^[1]。水文模

型发展迅速,近几十年来,国内外产生了很多成熟的概念性模型以及半分布式、分布式水文模型^[2],如新安江模型^[3]、河北雨洪模型^[4]、双曲正切模型^[5]、TOPMODEL 模型^[6]、SWAT 模型^[7]等。然而,由于半干旱区存在着降水稀少且时空分布不均、下垫面

收稿日期:2017-01-09; 修回日期:2017-02-20

基金项目:中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-301);国家自然科学基金项目(41641001)

作者简介:李瑞(1990-),男,河南济源人,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。

通讯作者:张士锋(1965-),男,湖北荆州人,博士,副研究员,主要从事水文水资源研究。

条件复杂且局部产流现象普遍等特征,产汇流模拟计算难度较大。因此,水文模型基本都是在南方湿润区适用性优良,而在西北半干旱区适用性较差,模拟精度也不高^[8]。

河北雨洪模型是在借鉴国内外诸多水文模型的基础上,根据河北省的降雨径流特点及下垫面特性,研究出的适合半干旱半湿润区的概念性水文模型^[9],近年来已经有不少学者对其开展了科学研究并取得相应进展^[10-12]。同时,在水文模型的使用过程中,目标函数的选取对模拟结果也有一定影响。虽然已有不少学者对水文模型的目标函数问题进行了探讨^[13-15],但目前国内外针对水文模型目标函数选取的研究尚少。不同的实际问题应选用何种目标函数才能使水文模型获得最优的模拟效果仍然是一个研究热点。

鉴于此,本文基于河北雨洪模型,对位于黄河上游半干旱区的小流域 1994-2010 年间的 10 场洪水过程进行模拟,评价河北雨洪模型在半干旱区的实际应用效果,同时分别研究不同目标函数的选取对模型模拟结果的影响,科学客观地评价目标函数的优劣,从而给出目标函数的选取建议,避免其选取的盲目性,为洪水预报及水资源管理等相关管理部门提供理论依据。

2 模型介绍

河北雨洪模型兼具蓄满和超渗两种产流机制,较单一产流机制的水文模型扩大了适用范围,它包括产流模型和汇流模型。模型结构如图 1 所示。

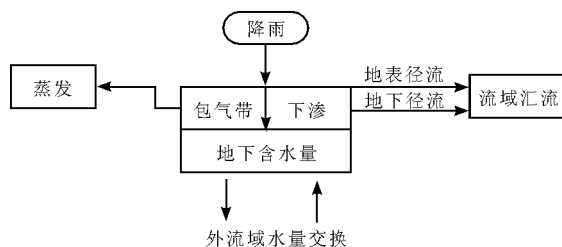


图 1 河北雨洪模型结构图

2.1 产流模型

河北雨洪模型建立了受控于表层土壤湿度的下渗曲线,同时结合流域下渗能力分配曲线,建立了双层产流机制,产流过程“先超后渗”,适用于半干旱半湿润区,且较好地解决了分布不均情况下的流域产流问题^[16],相关公式如下:

下渗能力分配曲线:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{f}{f_m} \right)^n \quad (1)$$

平均下渗率:

$$\bar{f} = \begin{cases} i - \frac{i^{n+1}}{f_m^n(n+1)}, & i < f_m \text{ 时} \\ f_m - \frac{f_m}{n+1}, & i \geq f_m \text{ 时} \end{cases} \quad (2)$$

下渗曲线:

$$f = \left(i - \frac{i^{n+1}}{f_m^n(n+1)} \right) e^{-uI} + f_c \quad (3)$$

时段地表径流计算:

$$R_s = P_t - F_t \quad (4)$$

时段地下径流计算:

$$R_g = F_t + P_a - (W_m - W_m(1 - \frac{F_t + P'_a}{W'_m})^{1+b_0}) \quad (5)$$

式(1)~(5)中: f_m 为流域最大下渗率, mm/h; $\bar{f}$ 为流域时段平均下渗率, mm/h; f_c 为流域稳定下渗率, mm/h; n 为下渗能力分配曲线指数; i 为降水强度, mm/h; u 为反映下渗率消退速度的参数; I 为土层表层湿度, mm; F_t 为时段下渗水量, mm; W_m 为流域平均蓄水容量, mm; W'_m 为流域最大点的蓄水容量, mm, $W'_m = (1 + b_0)W_m$; b_0 为流域蓄水容量分配曲线指数; P_a 为前期影响雨量, mm; P'_a 对应于流域的蓄水容量分配曲线上的纵坐标。

2.2 汇流模型

模型分别处理流域的调蓄作用及洪水波的传播作用,将时段净雨或者上游断面的流量过程按照传播时间进行平移,再联立非线性蓄泄方程和水量平衡方程,求得下游断面或流域出口的流量过程,从而推导出一套洪水演进的非线性汇流计算方法^[17]。

公式如下:

$$Q_t = \frac{I_{t-T} + DQ_{t-1}^{1-b} - 0.5Q_{t-1}}{DQ_t^{-b} + 0.5} \quad (6)$$

$$D = A/(1-b) \quad (7)$$

$$A = A_0 F^{1.2} / \Delta t / 60 \quad (8)$$

式(6)~(8)中: Q_t 为本时段的流域出流量, m^3/s ; Q_{t-1} 为上一时段的流域出流量, m^3/s ; I_{t-T} 为前推一个传播时间 T 的入流量, m^3/s ; A_0 为汇流时间, min; F 为流域面积, km^2 ; b 为河道过水断面形状参数。

3 参数率定

3.1 目标函数

在对水文模型进行参数率定时,一般采用流域出口断面的流量资料作为实测流量过程。参数率定

之前首先需要选取目标函数,且目标函数用实测流量和模拟流量表示。本文选取的目标函数 Obj 为峰值加权均方根误差。计算所有时段流量的实测值与对应模拟值的差值及差值的平方值,并对每一组平方值赋予不同的权重。当实测值 $>$ 实测值平均值时,权重值 > 1.0 ; 否则,权重值 < 1.0 ^[18]。因此,实测峰值对应着最大的权重值。计算公式如下:

$$Obj = \left\{ \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2 \left(\frac{Q_{obs,i} + \bar{Q}_{obs}}{2\bar{Q}_{obs}} \right) \right] \right\}^{1/2}$$

(9)

式中: N 为时段数; $Q_{obs,i}$ 、 $Q_{sim,i}$ 分别为第 i 时段的流量实测值和模拟值, m^3/s ; $\bar{Q}_{obs}$ 为实测流量的平均值, m^3/s 。

对于模型的模拟结果采用纳西效率系数进行评价,公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

(10)

式中: N 、 $Q_{obs,i}$ 、 $Q_{sim,i}$ 、 $\bar{Q}_{obs}$ 意义同上。

3.2 粒子群算法

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization Algorithm, PSO) 是由美国的 Eberhart 博士和 Kennedy 博士于 1995 年提出的一种基于群体智能的进化算法^[19],该算法采用实数求解,不要求目标函数可微,且模型参数较少,原理简单,可用于解决大规模、不可微、多峰值和非线性的复杂优化问题^[20]。PSO 算法最早源于对鸟群觅食行为的研究,在求解优化问题时,问题的解对应于搜索空间中一只鸟的位置,称这些鸟为“粒子”(particle)或“主体”(agent)。每个粒子都有自己的速度(决定飞行的距离和方向)和位置,还有一个由被优化函数所决定的适应值(fitness)。各粒子记忆、追随当前的最佳粒子,并在解空间中进行搜索。每次的迭代过程非完全随机,如果找到了较好解,将会以此作为依据来寻找下一个解^[21]。本文基于 MATLAB 科学计算软件,通过粒子群算法工具箱 (PSOt) 完成参数的自动率定过程。

4 模型应用

4.1 研究区概况及数据

本文的研究区为药水河流域。药水河属黄河水系,为湟水河右岸一级支流,发源于青海省东部湟源县境内,干流河长 52.2 km,河道平均比降 32‰。全

流域属高原山区,处于黄土高原与青藏高原的过渡带,为大陆性季风气候,年降水量 400 ~ 500 mm,年蒸发量 738 mm。流域形状呈扇形,地理位置介于 E101°00′ ~ E102°21′、N36°09′ ~ N36°41′ 之间(图 2),面积 636 km²。流域内森林覆盖率为 26.8%,此外还有大面积的灌丛和草地,植被条件良好。降水集中在 5 - 9 月,以短历时暴雨为主。流域兼具蓄满产流和超渗产流机制,产汇流计算可使用河北雨洪模型。

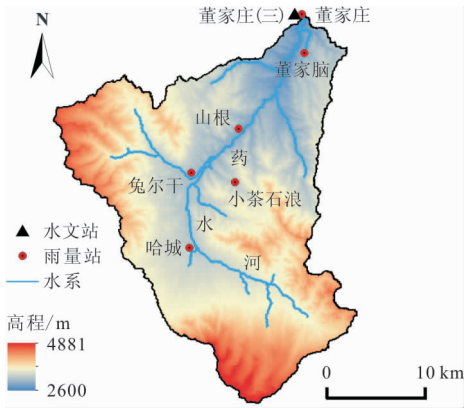


图 2 药水河流域

本文的数据基础为研究区流域出口董家庄(三)水文站 1994 - 2010 年的流量过程资料及流域内 6 个雨量站对应的降水过程。设定计算步长为 1h,在模拟前通过 MATLAB 对摘录的 10 场次洪水进行线性插值,统一处理成时间间隔为 1h 的规则时间序列数据。

4.2 模拟结果与分析

根据研究区 1994 - 2010 年共 10 场降雨洪水实测资料,采用 6 场洪水资料来率定模型参数,另外 4 场洪水资料来做模拟效果检验。表 1 所示为本次河北雨洪模型的参数优化表,表 2 为模型参数率定期和检验期的洪水特征值表。

从表 2 可以看出,效率系数在 0.60 以上的有 9 场次洪水,占有洪水场次的 90%,平均效率系数为 0.73。模拟洪峰误差在 20% 以内的有 7 场,占有洪水场次的 70%,平均误差为 16.81%。模拟洪量平均误差为 11.80%,其中只有 1 场次洪水洪量模拟不合格。峰现时间的模拟方面,有一场洪水的模拟洪峰提前 5 h 出现,另一场的模拟洪峰滞后了 5 h,其余都在 3h 以内(含 3 h),占有洪水场次的 80%。

图 3 和图 4 分别为率定期和验证期各两场洪水的流量过程,可以看出模拟和实测流量过程整体拟合得较好。单峰的洪水过程模拟效果优于其他多峰的复合洪水的模拟效果,如 19940818 次洪水的模拟

效果就比较好,径流深误差和洪峰误差分别为 2.98% 和 5.40%,效率系数为 91%。模型对多峰复合洪水中的副峰流量也能保证一定的的模拟精度。对 19970710、20000727、20070627 及 20070702 共 4 场双峰洪水的模拟和实测副峰流量值进行对比发

现,平均误差为 27.2%,20070627 洪水的副峰模拟误差仅为 3.5%。

总体上看,河北雨洪模型在黄河上游半干旱区小流域的模拟效果良好,表明模型对于该区域的暴雨洪水过程模拟具有较好的适用性。

表 1 河北雨洪模型优化参数

参数名称	$f_m/$ (mm·h ⁻¹)	n	u	$f_c/$ (mm·h ⁻¹)	$W_m/$ mm	b_0	X	As	bs	Ts/h	Ag	bg	Tg/h
最优参数	300	0.66	0.012	0.05	94	0.4	0.8	0.42	0.14	3.6	5.6	0.9	32

表 2 河北雨洪模型参数率定期与验证期洪水特征值

分期	雨洪编号	总雨量/ mm	实测径 流深/mm	模拟径 流深/mm	径流深 误差/%	实测洪峰/ (m ³ ·s ⁻¹)	模拟洪峰/ (m ³ ·s ⁻¹)	洪峰 误差/%	峰现 时差/h	确定性 系数
率定期	19940725	40.39	8.75	9.92	13.38	60.40	49.97	17.27	0	0.87
	19940810	26.72	4.19	4.58	9.35	45.70	28.16	38.38	5	0.68
	19960702	14.93	1.79	1.71	4.41	16.95	14.03	17.25	-2	0.45
	19970710	15.44	2.88	2.92	1.34	26.00	18.78	27.77	-1	0.84
	20000727	28.97	3.03	3.54	16.98	33.00	33.36	1.10	-1	0.62
	20040627	28.06	4.68	3.27	30.23	21.90	18.61	15.03	3	0.72
验证期	19940818	20.09	6.64	6.84	2.98	45.70	48.17	5.40	1	0.91
	20070627	14.58	3.46	3.14	9.39	22.10	20.70	6.33	-5	0.73
	20070702	21.79	5.78	4.83	16.40	33.60	28.68	14.65	-1	0.84
	20100716	14.46	3.62	4.11	13.50	50.30	37.77	24.91	2	0.67
均值					11.80			16.81	2.1	0.73

注:峰现时差负值表示洪峰提前。

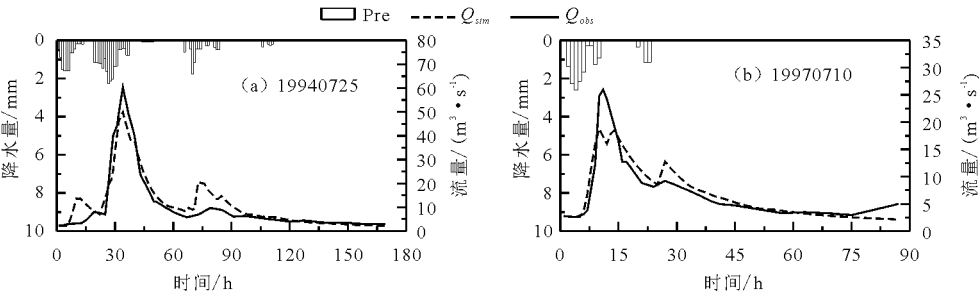


图 3 率定期模拟流量与实测流量过程对比

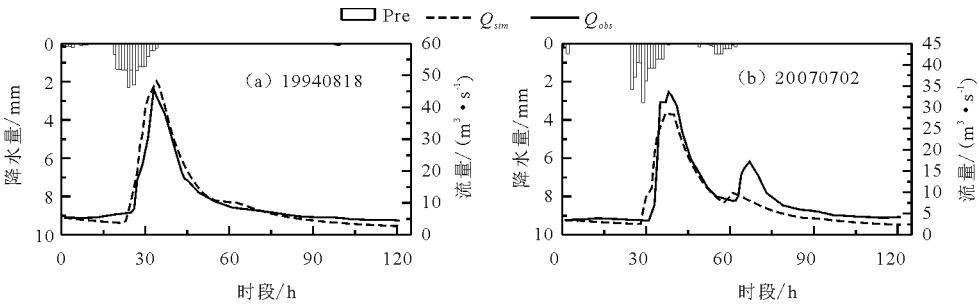


图 4 验证期模拟流量与实测流量过程对比

5 目标函数对模型的影响

模型参数具有很大的随机性^[22]。在水文模型的参数率定过程中,选取不同的目标函数会得到不同的参数值,从而影响模型的模拟结果。为研究不同目标函数对模型模拟结果的影响,本文在以峰值加权均方根误差为目标函数(Obj_1)的基础上,另选取峰值相对误差、洪量相对误差和平均相对误差的加权误差及纳西效率系数作为目标函数,分别用 Obj_2 、 Obj_3 表示,公式如下:

峰值相对误差:

$$f(1) = \frac{|q_{sim} - q_{obs}|}{q_{obs}} \tag{11}$$

洪量相对误差:

$$f(2) = \frac{|\sum_{i=1}^N Q_{sim,i} - \sum_{i=1}^N Q_{obs,i}|}{\sum_{i=1}^N Q_{obs,i}} \tag{12}$$

平均相对误差:

$$f(3) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Q_{sim,i} - Q_{obs,i}|}{Q_{obs,i}} \tag{13}$$

子函数权重系数的大小主要取决于要素的重要程度,本文给予整个模拟洪水过程同等的关注度,因

此权重值均取 1/3,则目标函数为:

$$Obj_2 = \frac{1}{3}f(1) + \frac{1}{3}f(2) + \frac{1}{3}f(3) \tag{14}$$

式(11) ~ (14) 中: N 、 $Q_{obs,i}$ 、 $Q_{sim,i}$ 意义同上; q_{obs} 、 q_{sim} 分别为实测和模拟峰值流量, m^3/s 。

纳西效率系数(Obj_3) 的公式可参见式(10)。

同时,为了综合评价目标函数对模型模拟结果的影响,选取 5 种精度评定指标,分别为峰值相对误差 a 、洪量相对误差 b 、平均相对误差 c 、峰现时差 d 及效率系数 DC ,其中峰现时差 d 的计算公式如下(其余同上):

$$d = T_s - T_o \tag{15}$$

式中: T_s 、 T_o 分别为峰现时间的模拟值与实测值, h 。若 d 为负数,表明洪峰提前,若 d 为正数,表明洪峰滞后。

5.1 不同目标函数的模拟与实测流量过程对比

图 5 和图 6 分别为率定期和验证期不同目标函数的模拟和实测流量过程线。由图 5 和图 6 可以看出 3 种目标函数的洪水模拟与实测流量过程线吻合度都比较好。其中,以加权误差为目标函数的模拟洪峰流量普遍大于其他两种目标函数的模拟洪峰流量,有些场次大于实测洪峰流量值,如 19940818 和 20000727 两场次洪水的模拟洪峰流量分别为 57.73 和 40.26 m^3/s ,实测洪峰流量为 45.70 和 33.00 m^3/s 。

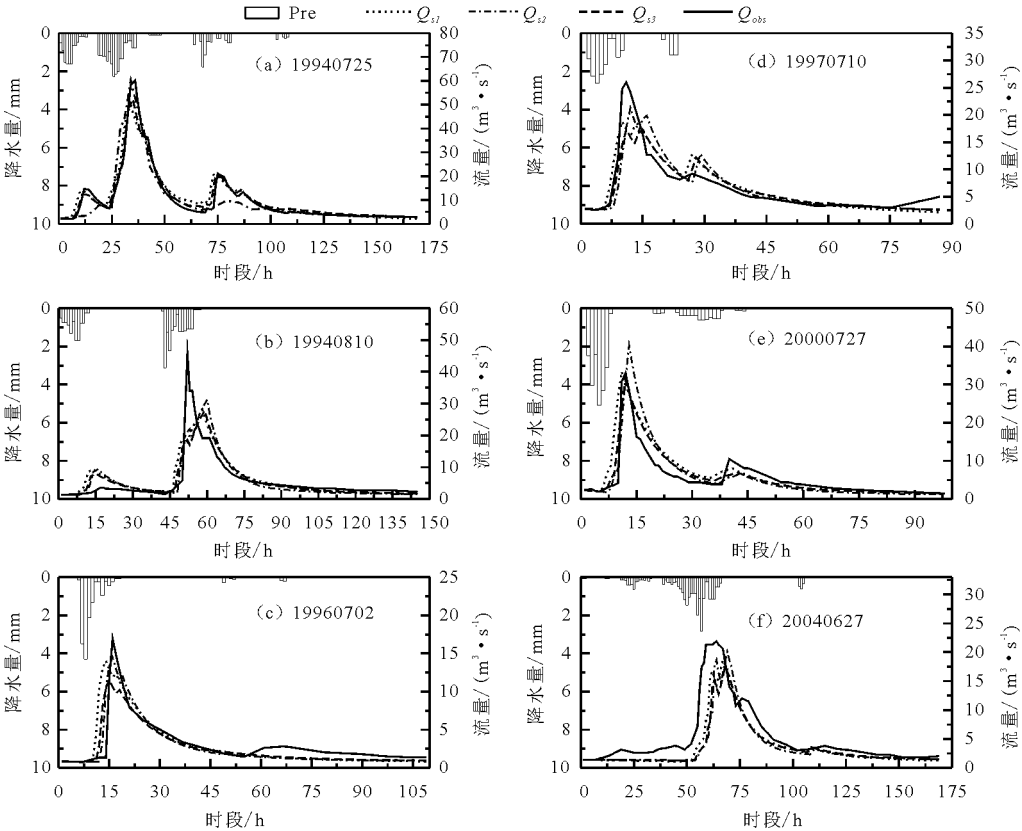


图 5 不同目标函数率定期模拟与实测流量过程对比

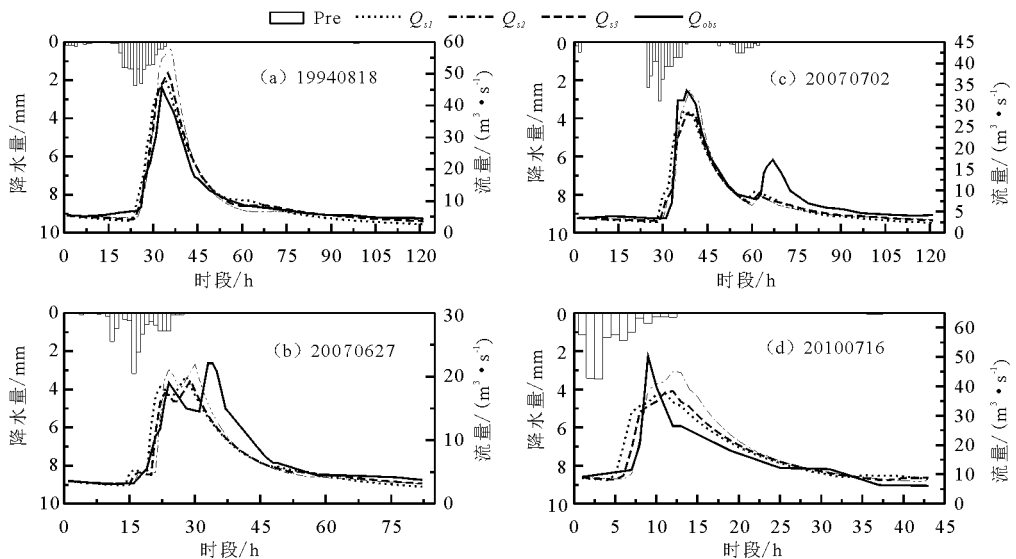


图6 不同目标函数验证期模拟与实测流量过程对比

表3 不同目标函数模拟与实测流量相关性系数对比

目标函数	雨洪编号										平均值
	940725	940810	960702	970710	000727	040627	940818	070627	070702	100716	
Obj_1	0.8867	0.6918	0.5905	0.8361	0.7624	0.8244	0.9673	0.7570	0.8752	0.7474	0.7939
Obj_2	0.8790	0.7213	0.8576	0.7714	0.8133	0.6739	0.9824	0.8050	0.8982	0.8013	0.8203
Obj_3	0.8907	0.7092	0.7399	0.8166	0.8626	0.7161	0.9865	0.8137	0.9200	0.7909	0.8246

以峰值加权均方根误差为目标函数的模拟流量过程的峰现时间均有不同程度的提前。对多峰复合型洪水中的副峰模拟值与实测值进行对比发现,以峰值加权均方根误差为目标函数对副峰的模拟效果优于以加权误差和纳西效率系数为目标函数对副峰的模拟效果。

5.2 不同目标函数的模拟与实测流量相关性分析

对所有场次洪水的模拟和实测流量进行相关性分析,结果见表3。统计每场次洪水的流量模拟值与实测值的相关性系数中的最大值,以峰值加权均方根误差为目标函数的有2场次,以加权误差为目标函数的有3场次,以效率系数为目标函数的有5场次,且3种目标函数对应场次洪水模拟和实测流量的相关性系数的均值分别为0.7939、0.8203和0.8246。从相关性系数的角度来看,以加权误差和效率系数为目标函数的次洪模拟结果略优于以峰值加权均方根误差为目标函数的模拟结果,但两者的相关性系数平均值差别很小。

5.3 不同目标函数的评定指标对比

在3种目标函数下,分别对10场洪水进行模拟,然后根据5种精度评定指标分别计算出模拟误差的平均值,结果见表4。

表4 不同目标函数模拟误差比较

目标函数	$a/\%$	$b/\%$	$c/\%$	d/h	Dc
Obj_1	16.81	11.80	31.67	2.1	0.73
Obj_2	13.30	10.75	25.45	2.7	0.74
Obj_3	20.57	11.29	23.83	2.2	0.79

从表4可以看出,以峰值均方根误差为目标函数的平均峰现时差最小,为2.1 h,平均相对误差最大,达到31.67%;以加权误差为目标函数的平均峰值相对误差最小,为13.30%,但平均峰现时差最大,为2.7 h;以效率系数为目标函数的平均效率系数最大,为0.79,且平均相对误差最小,为23.83%,但平均峰值相对误差却达到20.57%,为三者中最大。三个目标函数对洪量相对误差的控制处在同一水平,平均洪量相对误差分别为11.80%、10.75%和11.29%。

从精度评定指标的角度来看,河北雨洪模型在3种目标函数下对实测洪水的模拟结果差异不大。 Obj_1 模拟的峰现时差最小,但平均相对误差为三者中最大; Obj_2 对10场次洪水的洪峰模拟的误差控制是最好的,但对峰现时差的模拟是最差的; Obj_3 模拟的平均相对误差最小,且10场次洪水的平均效率系

数最大,但其对洪峰的模拟误差普遍偏大。因此,3个目标函数的优劣不是绝对的。在进行模型参数率定时,应根据重点关注的指标进行目标函数的选取。如果对洪峰和洪量的模拟精度有较高的要求,建议选择 Obj_2 ;如果要求模型能够较为准确地预报洪峰出现的时间,应选择 Obj_1 ;如果更关注效率系数则选取 Obj_3 。

6 结 论

本文基于概念性河北雨洪模型,选取位于黄河上游半干旱区的小流域作为研究区,对研究区 1994–2010 年间的 10 场洪水过程进行模拟,并分别以峰值加权均方根误差、加权误差及纳西效率系数为目标函数,研究了不同目标函数对模型模拟结果的影响,结论如下:

(1)河北雨洪模型对研究区的率定期和验证期共 10 场洪水的模拟效果良好,平均径流深误差、平均洪峰误差、平均峰现时差及平均效率系数分别为 11.8%、16.81%、2.1 h 及 0.73,可见模型对于西北半干旱区小流域的暴雨洪水过程模拟有较好的适用性。

(2)3 种目标函数下,模型通过粒子群算法率定得到的参数值对模型的模拟效果影响不大,但不同目标函数对模型模拟效果的影响各有侧重,在选取目标函数时应依据实际问题恰当选择,避免对目标函数的盲目选取。若对洪峰和洪量的模拟精度有较高要求,建议选择 Obj_2 ;如果比较重视峰现时间的准确性,应选择 Obj_1 ;如果更关注效率系数则选取 Obj_3 。

(3)本研究对复合型洪水中的副峰模拟进行了探索,发现选取峰值加权均方根误差比选取加权误差和纳西效率系数作为目标函数时,模型对副峰的模拟效果稍好。

参考文献:

- [1] 徐宗学. 水文模型:回顾与展望[J]. 北京师范大学学报, 2010, 46(3): 278–289.
- [2] 黄金柏, 温佳伟, 王 斌, 等. 分布式水文模型在不同地形条件下的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 16–24.
- [3] 赵人俊. 流域水文模拟—新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984: 103–180.
- [4] 水利部水文局, 长江水利委员会水文局. 水文情报预报技术

- 手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 423–428.
- [5] 山西省水利厅. 山西省水文计算手册[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011: 64–73.
- [6] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing model of basin hydrology[J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1979, 24(1): 43–69.
- [7] Arnold J G, Allen P M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watershed[J]. Journal of Hydrology, 1996(176): 57–77.
- [8] 李 琪. 全国水文预报技术竞赛参赛流域水文模型分析[J]. 水科学进展, 1998, 9(2): 191–195.
- [9] 胡春歧, 张登杰, 胡军波. 半分布式河北雨洪模型在黄壁庄以上流域的应用[C]//. 中国水利学会 2006 学术年会论文集, 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [10] 刘 郁, 赵兰兰, 马 丁. 半干旱半湿润地区洪水预报模型适用性研究[J]. 水文, 2016, 36(1): 32–36.
- [11] 程双虎, 胡春歧, 马存湖. 分布式单位线在河北雨洪模型中的应用[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(5): 11–14.
- [12] 黄鹏年, 李致家, 姚 成, 等. 半干旱半湿润流域水文模型应用与比较[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 4–9.
- [13] 欧阳硕, 徐高洪, 戴明龙, 等. 概念性水文模型参数多目标率定及参数组合预报[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(6): 64–71.
- [14] 郭 俊, 周建中, 周 超, 等. 概念性流域水文模型参数多目标优化率定[J]. 水科学进展, 2012, 23(4): 447–456.
- [15] 熊立华, 盖永岗, 陈小兰, 等. 不同目标函数下水文模拟结果的综合[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(2): 143–146.
- [16] 刘家富, 李 京, 李秀霞. 中美典型水文模型比较研究[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(1): 17–23.
- [17] 冯秀英. 河北雨洪模型在水资源评价中的应用[J]. 河北水利水电技术, 2003(1): 29–31.
- [18] 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.
- [19] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//. Proceeding of the 6th Int'l Symposium on Micro Machine and Human Science, Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1995: 39–43.
- [20] 刘苏宁, 甘 泓, 魏国孝. 粒子群算法在新安江模型参数率定中的应用[J]. 水利学报, 2010, 41(5): 537–544.
- [21] 徐 刚, 缪 韧, 杜发兴. 基于粒子群算法的交互式水文模型参数率定[J]. 中国农村水利水电, 2008(10): 27–29.
- [22] 闫红飞, 王船海, 文 鹏. 分布式水文模型研究综述[J]. 水电能源科学, 2008, 26(6): 1–4.