

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190109

基于状态变量初值修正的洪水预报方法研究

李匡¹, 丁留谦¹, 刘舒¹, 阚光远¹, 刘可新²

(1.中国水利水电科学研究院 防洪抗旱减灾工程技术研究中心,北京 100038;

2.中国水利水电科学研究院 北京中水科水电科技开发有限公司,北京 100038)

摘要: 针对现有状态变量初值修正方法的不足,提出了一种基于状态变量初值修正的洪水预报方法(ISVC方法)。该方法以洪水起涨阶段平稳期的预报与实测流量过程间的残差为目标函数,采用粒子群优化算法对状态变量初值进行修正,利用修正后的状态变量初值开展洪水预报。将ISVC方法与新安江模型结合,采用赛塘流域进行了检验。结果表明,ISVC方法切实有效,能提高预报精度。ISVC方法具有一定的独立性、较强的适用性、一定的实用性等特点,具有一定的推广应用价值。

关键词: 洪水预报;状态变量初值;误差修正;新安江模型;粒子群优化算法

中图分类号: TV121⁺.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2020)04-0026-07

1 研究背景

洪水预报误差实时校正方法包括自回归模型^[1]、卡尔曼滤波^[2]等,常出现修正效果不理想的情况,如自回归模型假设误差系列存在自相关性,这在洪峰附近常常并不满足。包为民先后提出了降雨抗差分析方法^[3]和系统微分响应修正方法^[4],具有较好的修正效果,其中系统微分响应修正方法主要思想是将出口断面的预报误差信息动态反馈到面降雨、土壤含水量等水文要素中,将修正后的水文要素代入水文模型重新计算,以达到修正预报流量的效果。在研究与实践中,系统微分响应修正方法得以不断改进与应用^[5]。

任何水文要素的变化最终都将反映到出口断面的流量过程中,系统微分响应修正方法正是基于这一物理机制提出的,本文借鉴该方法的思想,提出了修正状态变量初值的方法,并基于此进行洪水预报。

状态变量是水文模型计算过程中,除去模型输入和模型输出以外的中间过程计算变量^[6]。在水文模型中,状态变量值由模型输入、模型参数按照计算公式计算得到。状态变量初值是洪水预报开始计算时刻的状态变量值,对洪水预报结果有着明显的影响。

概念性模型中的状态变量虽然具有一定的物理基础,但物理意义并不是很强,在现实世界中也难以找到对应的物理量。例如新安江模型中采用张力水蓄水量 W 来描述土壤含水量的动态变化过程,在一定程度上反映了土壤的干湿程度,但张力水蓄水量 W 并不是真正实测的土壤含水量^[7]。水箱模型中的各层水箱水深、萨卡拉门托模型中的上、下层张力水、上、下层自由水蓄量等也难以直接测量。因此通过观测手段来获取状态变量值存在一定的困难。

目前状态变量初值获取有两种方法,一是人为在年初给定一组状态变量值,连续演算到洪水开始时间;二是根据经验人为直接给定状态变量初值。由于年初的状态变量值、模型输入和模型参数存在误差,因此连续演算得到的状态变量初值也存在误差,特别是流域上的第一场洪水和久旱后洪水,误差更大。

目前常用的修正方法是人工经验修正,这对预报员的经验要求较高,且调整时随意性较大,缺乏规范化标准。鉴于人工修正状态变量初值的缺陷,提出一种自动修正状态变量初值的方法,并基于此开展洪水预报。

收稿日期:2019-04-19

基金项目:“十三五”国家重点研发计划课题(2017YFC0405804);北京市自然科学基金资助项目(8184094);中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(AU0145B202019)

作者简介:李匡(1983-),男,山西运城人,博士,高级工程师,主要从事洪水预报系统开发研究。E-mail:likuang0000@163.com

通讯作者:丁留谦(1965-),男,河南濮阳人,教授级高工,主要从事防洪减灾和渗流分析控制研究。E-mail:dingleq@iwhr.com

2 方法介绍

2.1 方法原理

典型的洪水预报过程如图 1 所示。一场洪水预报过程从计算开始时间到计算结束时间。预报时间一般选在造峰雨结束之后。预报开始时间之前为预热期,预热期内从计算开始时间到流量起涨时间称为平稳期,平稳期内一般只有零星小雨,主造峰雨还未到来,流量也比较平缓,没有明显的上涨过程。

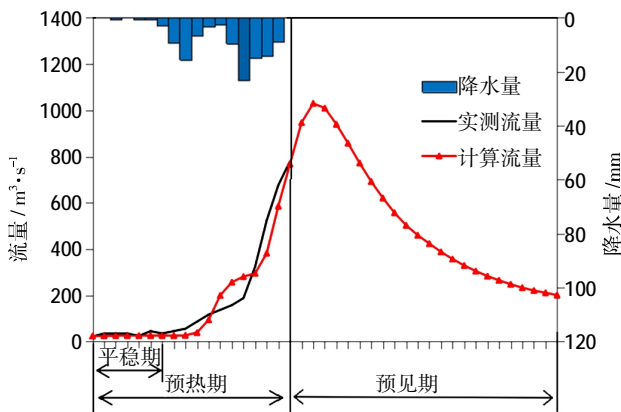


图 1 洪水预报过程

Fig.1 The flood forecasting process

水文模型计算时,在平稳期内,由于只有零星降水,计算流量主要来自于状态变量初值,平稳期计算流量的准确性即可反映状态变量初值的准确性。因此可以将平稳期的预报流量与实测流量拟合结果的好坏作为目标函数,采用自动优化算法来修正状态变量初值。由于状态变量初值对洪水预报具有连续性和系统性的影响,平稳期预报准确,整场洪水的预报也更准确。因此,利用修正后的状态变量初值重新进行洪水预报,通常情况下有望显著提高洪水预报精度。基于以上原理,提出基于状态变量初值修正的洪水预报方法,简称 ISVC (Initial State Variable Correction) 方法。

2.2 ISVC 方法的实现步骤

ISVC 方法具体计算步骤如下:

(1) 采用连续模拟至预热期开始时刻的状态变量初值进行洪水预报。或基于经验,人工赋值一套较为合理的状态变量初值进行洪水预报;

(2) 通过观察预热期内的实测和预报的洪水过程,确定平稳期;

(3) 计算平稳期内预报流量与实测流量的平均均方根误差 $NRMSE$, 判断 $NRMSE$ 是否大于阈值; 如果

是,则进行第(4)步,如果不是,则不对初值进行修正,结束计算;

(4) 计算平稳期的预报流量与实测流量的偏差 U ;

(5) 按照 U 确定初始状态变量修正时对应参数的取值范围;

(6) 采用优化算法寻找最优初始状态变量值;

(7) 重新进行洪水预报。

在以上步骤中,对以下 4 点进行说明。

2.2.1 平稳期及阈值的确定

平稳期确定采用人工选定方式。选择实测和预报流量没有明显起涨、主造峰雨刚刚开始的时刻作为起涨点,预热期开始时刻到起涨点之间为平稳期。

洪水预报必然会存在误差,平稳期存在误差是正常的,因此需要给定一个条件,满足条件的洪水才需要被修正。在洪水预报中,常用 Nash-Sutcliffe 系数 N_s 评价预报过程的好坏,但是 N_s 只适用于有涨落过程的序列,对于变化平稳的过程,计算的结果往往误差较大,例如当两组序列中的数据为相同的固定值时,按照 N_s 的计算公式,分母为 0,计算出的 N_s 为无穷大,这显然是不合理的。而平稳期的洪水过程往往较为平稳,因此不适合用 N_s 描述误差。故采用归一化均方根误差 ($NRMSE$) 来描述平稳期的误差。

归一化均方根误差 ($NRMSE$) 是对实测流量均值归一化^[9],计算公式如下:

$$NRMSE = \sqrt{(1/n) \sum_{i=1}^n [(Q_{ci} - Q_{oi}) / Q_{Ao}]^2} \quad (1)$$

式中: $NRMSE$ 为归一化均方根误差; Q_{ci} 为预报流量; Q_{oi} 为实测流量; Q_{Ao} 为实测流量的均值; n 为资料序列长度。

预测无误差时 $NRMSE$ 等于 0。给定平稳期阈值,当计算的平稳期 $NRMSE$ 小于阈值时,可认为状态变量初值没有误差,不需要调整;当计算的平稳期 $NRMSE$ 大于阈值时,认为状态变量初值存在误差,需要调整。

平稳期阈值根据预报方案中的历史洪水确定。在确定出平稳期后,计算各场洪水平稳期的误差 $NRMSE$, 将其与洪水是否合格对应。一般来说,平稳期误差越小,洪水合格的概率越高,因此,可以找到分界点,当 $NRMSE$ 大于分界点时,洪水合格率明显降低,分界点即为平稳期阈值。

2.2.2 状态变量初值的系数修正法

大部分概念性水文模型是分散型模型,为考虑降

雨分布不均匀对面雨量计算的影响,需要对流域进行计算单元划分,每单元分别计算状态变量初值,假设水文模型含有 m 个状态变量,流域被划分为 n 块,则会计算出 $m \times n$ 个状态变量初值。如果对每一单元的每个状态变量初值都进行修正,则会增加工作量,影响 ISVC 方法的效率。因此采用修正系数的方式,为每个状态变量给定一个系数,然后修正系数,各单元的状态变量初值都乘以对应的系数作为修正后的状态变量初值。这样修正的参数数量与状态变量的数量相同,均为 m 个,可以减小计算工作量。

采用偏差^④(Bias)衡量预报流量对实测流量的平均系统性偏离,偏差量 U 为预报流量平均值与实测流量平均值的差。

$$U = Q_{AC} - Q_{AO} \quad (2)$$

式中: Q_{AC} 为预报流量的均值。

当 $U > 0$ 时,则表示预报值偏大,需要将状态变量初值调小;反之亦然。

假设 V 为状态变量,取值范围为 $[V_{\min}, V_{\max}]$, V_0 为该状态变量初值, a 为 V_0 的修正系数。则当 $U > 0$ 时, a 的取值范围为 $[V_{\min}/V_0, 1]$,当 $U < 0$ 时, a 的取值范围为 $[1, V_{\max}/V_0]$ 。

2.2.3 目标函数

采用优化算法寻找最优状态变量时,所用到的目标函数如下:

$$BO = \sum_{i=1}^n |Q_{Ci} - Q_{Oi}| / \sum_{i=1}^n Q_{Oi} \quad (3)$$

2.2.4 优化算法

粒子群算法(PSO)^⑤是 Kennedy 和 Eberhart 于1995年提出的一种基于对鸟群捕食行为模拟的智能集群优化算法,目前已广泛应用于参数优化领域。本文采用文献[10]提出的标准粒子群算法。采用的粒子群算法中,粒子种群规模 M 设置为 70,粒子维数 D 为状态变量个数 7 个,加速因子 c_1, c_2 均为 2,位置与速度之间的限制系数 k 为 0.729,惯性权重 ω 在 0.5~0.9 之间自适应调整,迭代终止条件设为两种,一种是两次迭代目

标函数之差小于 $\varepsilon=10^{-5}$,另外一种为迭代最大次数为 200 次,计算时先达到其中一种时,计算结束。

3 研究对象

3.1 研究模型

新安江模型是典型的概念性模型,在湿润和半湿润地区有着广泛的应用。在新安江模型结构中,上层土壤含水量 WU 、下层土壤含水量 WL 、深层土壤含水量 WD 、产流面积比 FR 、自由水库蓄水量 S 、壤中流 RI 、地下径流 RG 的初值对洪水预报有影响。各状态变量的取值范围如表 1 所示。

表1 新安江模型状态变量取值范围

名称	WU	WL	WD	FR	S	RI	RG
最小值	0	0	0	0	0	0	0
最大值	WUM	WLM	WDM	1	SM	R0	R0

WUM, WLM, WDM, SM 为三水源新安江模型的模型参数,通过编制洪水预报方案确定。 $R0$ 为计算开始时刻的径流深。

新安江模型 $WU, WL, WD, FR, S, RI, RG$ 等 7 个状态变量分别对应 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7$ 等 7 个系数。不同偏差量 U 对应的修正系数取值范围如表 2 所示。

$WU_{\min}, WL_{\min}, WD_{\min}, FR_{\min}, S_{\min}, RI_{\min}, RG_{\min}$ 为各块中对应初始状态变量的最小值,当修正后的初始状态变量值大于各状态变量取值范围时,取最大值。

3.2 研究区域及数据

赛塘水文站位于赣江二级支流泸水干流,控制流域面积 3 004 km²。流域多年平均降水量为 1 553 mm,为典型的湿润地区。布设有赛塘、章庄、排头、平都、路口、洋溪、金田等 7 个雨量站,流域内无蒸发站,附近设有吉安蒸发站。吉安蒸发站所在的牛吼江与泸水均为赣江支流,赛塘水文站与吉安蒸发站直线距离仅 20 km,水文气象特性相似。

表2 修正系数取值范围

Table1 The range of the correction coefficients

U	参数	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
U>0	最小值	0	0	0	0	0	0	0
	最大值	1	1	1	1	1	1	1
U<0	最小值	1	1	1	1	1	1	1
	最大值	WUM/WU _{min}	WLM/WL _{min}	WDM/WD _{min}	1/FR _{min}	SM/S _{min}	R0/RI _{min}	R0/RG _{min}

赛塘流域被划分为4个计算单元,第1单元包含3个雨量站,第2单元包含2个雨量站,第3单元和第4单元均包含1个雨量站,采用泰森多边形法设置雨量站权重。流域测站分布、计算单元划分见图2。

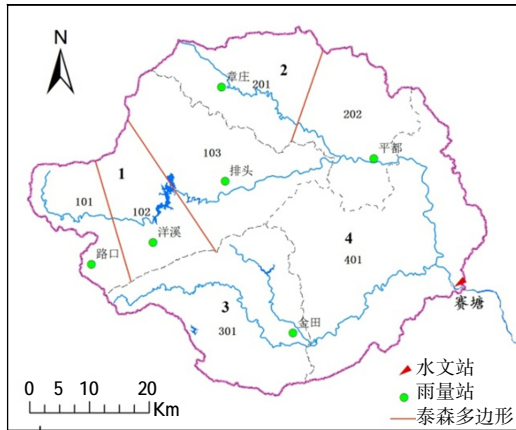


图2 赛塘流域
Fig.2 The Saitang River basin

收集到赛塘流域1992~2018年间的63场洪水资料,包括时段雨量资料、赛塘站流量资料、吉安站日蒸发资料等。采用新安江模型编制预报方案,计算时段长为3h。赛塘流域的合格洪水场次为50场,合格率为79.3%,精度评定为乙级。赛塘流域新安江模型参数见表3。

表3中,K、WUM、WLM、C、WM、B、IM、SM、EX、KG、KI、CG、CI为模型的蒸散发、产流、分水源及坡面、壤中流、地下径流汇流参数,其中WM=WUM+WLM+WDM;CS、L为河网汇流的滞后演算法参数;Xe为河槽流量比重系数;河道1n、河道2n、河道3n、河道4n为各单元出口到流域出口的河道分段数。

在模型结构确定的情况下,造成洪水预报不合格的原因有模型输入误差、参数误差、实测值误差、状态变量初值误差等,在对不合格的13场洪水进行分析后,模型输入、模型参数、实测值等均无明显异常,而其中9场是当年的第一、二场洪水及早旱后洪水,各场洪水的起始阶段有系统性误差,表明状态变量初值存在

较大误差。

4 结果与讨论

4.1 误差评价指标

采用ISVC方法对流域洪水进行应用,比较状态变量初值修正前后的预报成果。用以下3个指标评价修正效果的好坏^[11]。

洪峰相对误差:

$$\delta_Q = [(Q_{OP} - Q_{CP}) / Q_{OP}] \times 100\% \quad (4)$$

次洪径流深相对误差:

$$\delta_R = [(R_O - R_C) / R_O] \times 100\% \quad (5)$$

Nash-Sutcliffe 系数:

$$N_S = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_{Ot} - Q_{Ct}]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_{Ot} - Q_{AO}]^2} \quad (6)$$

式中:Q_{OP}、Q_{CP}分别为洪峰实测、计算流量;R_O、R_C分别为次洪实测、计算径流深;Q_{AO}为实测流量均值;Q_{Ot}为实测流量;Q_{Ct}为预报流量;n为资料序列长度。

4.2 总体应用结果

观察63场洪水的初次预报结果,人工确定各场洪水的平稳期。计算平稳期误差NRMSE,用100表示洪水合格,0表示不合格。按照NRMSE从小到大的顺序排列,将平稳期误差与洪水是否合格绘制在图上。由图3可见,随着NRMSE的增大,洪水的合格率降低,当NRMSE>58%时,不合格洪水场次明显增多,竖线为NRMSE=58%所在位置。NRMSE≤58%的洪水有

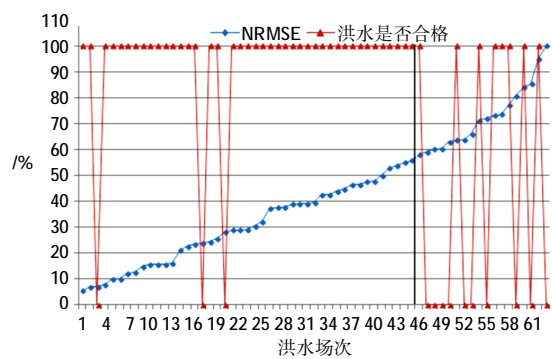


图3 NRMSE与洪水合格情况对比
Fig.3 The comparison of NRMSE and the flood qualification

表3 赛塘流域新安江模型参数

Table3 The parameters of the Xin'anjiang model in the Saitang River basin

K	WUM	WLM	C	WM	B	IM	SM	EX	KG	KI	CG	CI
0.8	12	83	0.16	152	0.4	0.02	23	1.2	0.3	0.4	0.898	0.75
CS	L	Xe	河道 1n		河道 2n		河道 3n		河道 4n			
0.81	1	0.371	4		3		3		0			

46场,其中合格洪水为43场,仅有3场不合格,合格率为93.5%;而NRMSE>58%的洪水有17场,其中合格洪水为7场,不合格洪水为10场,合格率为41.2%。可以看出,NRMSE=58%是较为明显的分界点,因此将其设定为平稳期阈值,NRMSE>58%的洪水需要被修正,而NRMSE≤58%的洪水则不需要修正。

按照给定的阈值,共有17场洪水满足修正条件,采用ISVC方法对其进行状态变量初值修正,重新预报后的计算结果如表4所示。

以修正后洪峰误差、洪量误差减小、Nash-Sutcliffe系数变大衡量修正结果是否变好。表3中17场洪水中变好的场次有12场,表明12场洪水经过修正后精度提高,变好率为70.6%。17场洪水中,修正前合格的有7场,修正后合格的有10场,63场洪水的总体合格率提升至84.1%。

9场第一场或久旱后洪水中,除第49场修正后效果变差以外,其余第7、14、23、36、40、48、50、58修正后效果均变好,变好率为88.9%,并且第7、14、23、36、40场等5场洪水由修正前的不合格变为合格。表明对第一场或久旱后的洪水修正效果更好。

第18、24、30、49、60场洪水修正后效果变差,其中第18、30、60场洪水由合格变为不合格,精度下降较大。这是因为洪水预报的复杂性,虽然有的洪水平稳期误差较大,但是整体预报效果较好,而ISVC方法修正

后,虽然平稳期误差减小了,但是却造成了整体误差变大。

4.3 典型洪水修正

第7场1994042523号洪水为1994年的第一场洪水,本次洪水初次模拟计算不合格,洪峰误差为-43.9%,洪量误差为-43.37%,确定性系数为0.2926。本场洪水初次模拟计算时的状态变量初值是根据人工设定的年初的状态变量值连续演算得到的。由于人工给定的年初状态变量值偏小,导致连续演算得到的本场洪水的状态变量初值偏小,进而导致该场洪水的模拟值偏小。

采用ISVC方法对本场洪水进行修正。首先根据该场洪水的实测值和初次预报情况,确定该场洪水的平稳期为1994/4/23 8:00-4/24 5:00;计算出平稳期NRMSE=63.03%,大于阈值58%,因此需要对该场洪水进行修正;计算出该场洪水平稳期的偏差U=-95.38,表示平稳期预报值偏小,需要调大状态变量初值。

按照表2对修正系数给定取值范围,从表5中找出各单元修正前的状态变量初值最小值,计算出该场洪水的修正系数取值范围如表6所示。

采用ISVC方法计算出的状态变量初值修正系数见表6。修正前后的状态变量初值见表5,其中,修正后的各单元WU、WD接近于蓄满状态,其余状态变量初值也有明显增大。

修正前后的对比见图4,修正后平稳期偏差由-95.38

表4 洪水修正效果统计

Table4 The statistics of the flood forecasting correction effects

洪水序号	洪峰误差 $\delta_0 / \%$		洪量误差 $\delta_R / \%$		Nash-Sutcliffe 系数 N_s		是否变好	是否合格	
	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后		修正前	修正后
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
7	-43.9	14.41	-43.37	-4.21	0.2926	0.867	✓	✗	✓
14	-35.62	1.25	-45.81	-4.19	0.5746	0.943	✓	✗	✓
15	-13.68	-4.39	-16.68	5.7	0.8975	0.9576	✓	✓	✓
18	-8.08	26.8	-0.59	45.22	0.8925	0.5217	✗	✓	✗
23	-40.53	-19.67	-35.22	-0.65	0.5493	0.7721	✓	✗	✓
24	-2.46	6.56	-3.3	13.28	0.9665	0.9435	✗	✓	✓
28	12.5	17.86	-15.99	-4.94	0.798	0.819	✓	✓	✓
30	-4.4	63.19	-16.25	43.36	0.8988	0.3135	✗	✓	✗
36	-31.86	5.25	-33.09	13.76	0.6307	0.9025	✓	✗	✓
40	-40.08	-19.03	-45.46	-13.46	0.5142	0.8305	✓	✗	✓
48	-42.65	33.24	-57.61	15.86	0.0831	0.7687	✓	✗	✗
49	-31.94	53.02	-32.46	57.93	0.5991	-0.6732	✗	✗	✗
50	-36.25	-33.17	-41.1	-30.54	0.6112	0.7114	✓	✗	✗
57	82.47	-2.15	82.57	-9.22	-3.0712	0.7341	✓	✗	✓
58	-42.58	31.25	-47.26	37.88	0.6632	0.7128	✓	✗	✗
60	-1.44	11.21	-0.62	25.88	0.7247	0.5329	✗	✓	✗
61	-4.87	9.32	-19.85	9.45	0.8587	0.892	✓	✓	✓

注:粗体表示第一场或久旱后洪水。

变为-1.05,表明平稳期的模拟精度明显提高。修正后的洪峰误差为-14.41%,洪量误差为-4.21%,确定性系数为0.867。修正后的洪峰洪量误差均小于20%,Nash-Sutcliffe系数也有明显提高,该场洪水由不合格变为合格。

表5 第7场洪水状态变量初值
Table5 The initial state variables of No.7 flood

名称	单元	WU /mm	WL /mm	WD /mm	FR	S /mm	QI /m ³ ·s ⁻¹	QG /m ³ ·s ⁻¹
修正前	1	12	51.4	25	0.2	2.8	2.1	1
	2	11.1	58.4	25	0.3	1.7	2.7	1.3
	3	11	59.7	25	0.3	0.8	1.7	0.9
	4	2.5	55	25	0.2	0.8	0.8	0.5
修正后	1	12	68.7	50.1	0.6	23	14.5	1.5
	2	12	78.3	50.2	0.8	14.5	15.4	1.9
	3	12	80	50.2	0.8	6.8	11.7	1.3
	4	7.8	73.7	50.2	0.6	6.8	5.5	0.7

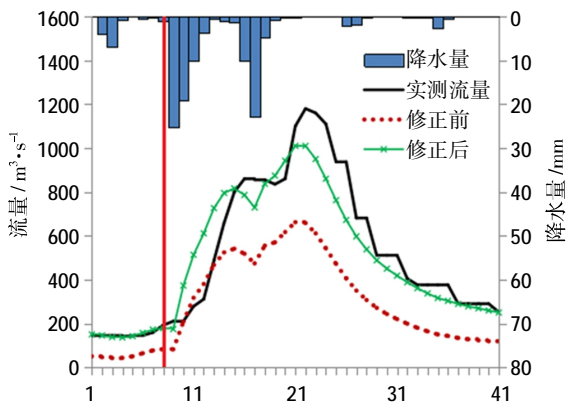


图4 第7场洪水修正前后对比

Fig.4 The comparison of No.7 flood before and after the correction

表6 第7场洪水状态变量系数取值范围与ISVC计算值

Table6 The range and calculating values of the state variable coefficients for No.7 flood

U	系数	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
U<0	最小值	1	1	1	1	1	1	1
	最大值	4.8	1.61	2.28	4.99	28.75	19.28	30.85
	ISVC 计算值	3.11	1.34	2.01	2.77	8.54	6.88	1.47

5 结论

本文提出了一种状态变量初值修正方法—ISVC方法,利用平稳期的预报流量和实测流量建立目标函

数,采用优化算法对状态变量初值进行修正,最后利用修正后的状态变量初值进行洪水预报。ISVC方法具有以下特点:

(1)一定的独立性:ISVC方法不对水文模型的原有设置做任何改变,不改变模型结构、参数、输入、输出。在进行初值修正时,只是利用水文模型的计算流量与实测流量建立误差目标函数,需要采用水文模型进行流量计算。因此具有一定的独立性。

(2)较强的适用性:绝大多数概念性水文模型会受到状态变量初值的影响,ISVC方法的原理对概念性水文模型均适用,在应用时,只需根据水文模型设置需要进行修正的状态变量初值即可。具有较强的适用性。

(3)一定的实用性:ISVC方法只需要利用少量的实测流量数据,数据容易获取并且精度较高。该方法不仅可以用于洪水模拟计算,还可以用时实时洪水预报,具有一定的实用性。

参考文献:

[1] 包为民.水文预报[M].北京:中国水利水电出版社,2006. (BAO Weimin. Hydrological Forecasting [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))

[2] 葛守西,程海云,李玉荣.水动力学模型卡尔曼滤波实时校正技术[J].水利学报,2005,36(6):1-9. (GE Shouxi, CHENG Haiyun, LI Yurong. Real time updating of hydrodynamic model by using Kalman filter [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,36(6):1-9. (in Chinese))

[3] 包为民,瞿思敏,李清生,等.遥测系统降雨观测误差估计方法研究[J].水利学报,2003,4:30-34. (BAO Weimin, QU Simin, LI Qing-sheng, et al. Study on estimation methods of rainfall gauge errors in remote system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,4:30-34. (in Chinese))

[4] Si Wei, Bao Weimin, Hoshin V Gupta. Updating real-time flood forecasts via the dynamic system response curve method [J]. Water Resources Research, 2015,(7):5128-5144.

[5] 刘可新,包为民,李佳佳,等.基于系统响应理论的分水源误差修正[J].水电能源科学,2014,32(11):44-47. (LIU Kexin, BAO Weimin, LI Jijia, et al. Error correction of different water sources based on theory of system response [J]. Water Resources and Power, 2014,32 (11):44-47. (in Chinese))

[6] 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. (ZHAO Renjun. Watershed Hydrological Simulation-Xinjiang Model and Northern Shaanxi Model [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1984. (in Chinese))

[7] Zhuo L, Han D W. Misrepresentation and amendment of soil moisture in conceptual hydrological modelling [J]. Journal of Hydrology,

- 2016,535:637-651.
- [8] 简相超,郑君里.混沌神经网络预测算法评价准则与性能分析[J].清华大学学报(自然科学版), 2001,41(7):43-46. (JIAN Xiangchao, ZHENG Junli. Analysis of algorithms and error evaluation criteria in chaotic neural network predictions [J]. Journal of Tsinghua University(Science & Technology), 2001,41(7):43-46. (in Chinese))
- [9] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [A]. Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks [C]. USA: IEEE Press,1995.
- [10] Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer [A]. Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation [C]. Piscataway: IEEE Press,1998.

Study on the Flood Forecasting Method Based on the Initial State Variable Correction

LI Kuang¹, DING Liuqian¹, LIU Shu¹, KAN Guangyuan¹, LIU Kexin²

(1. Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Beijing IWHR Technology Co.Ltd, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming at that the current artificial correction lacking of standard regulation, this paper proposed a flood forecasting method based on an initial state variable correction. It took the residual between the forecasting and measured flow during the stable period in the initial stage of flood as the objective function, and applied the particle swarm optimization algorithm to correct the initial state variables, which was used to forecast flood. The ISVC method was verified with the combination of Xin'anjiang model in the Saitang watershed. The results show that the ISVC method is effective in improving the precision of the flood forecasting.

Key words: flood forecasting; initial state variable; error correction; Xin'anjiang model; particle swarm optimization algorithm

(上接第 84 页)

Study on Correlation between Groundwater Level of Baotuquan Spring and Baiquan Spring in Jinan City

QI Huan^{1,2,3}

(1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Jinan 250014, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Jinan 250014, China; 3. Shandong Province Groundwater Environmental Protection and Rehabilitation Engineering Technology Research Center, Jinan 250014, China)

Abstract: In order to find out the hydraulic connection between Baotuquan Spring and Baiquan Spring in Jinan City, this paper selected the long-term monitoring data of groundwater level of Baotuquan Spring, Baiquan Spring and 7 karst groundwater dynamic observation wells from 2007 to 2011, by using correlation analysis, EOF analysis method, wavelet analysis and other methods to analyze the groundwater level dynamics. The results show that the overall connectivity of the karst aquifer between Baotuquan Spring and Baiquan Spring is good, and the hydraulic connection is relatively weak due to the influence of Jinan rock mass. The dynamic spatial distribution and the change trend of the groundwater level in Baotuquan Spring and Baiquan Spring are the same. Under the influence of the hydraulic gradient, the groundwater of Baotuquan Spring directly supplies the groundwater of Baiquan Spring. Both of the Baotuquan Spring water level and the Baiquan Spring water level have a continuous main oscillation period of about 12 months. The response time lag between them is 39.18d, and the groundwater runoff velocity is 433.89m/d. Therefore, in addition to mainly accepting the atmospheric precipitation in the southern mountainous regions and the replenishment of surface water seepage, Baiquan Spring also accepts the supply of Baotuquan Spring.

Key words: Baotuquan Spring; Baiquan Spring; groundwater level dynamic; EOF method; wavelet analysis