

洪水预报的比例系数系统响应误差修正方法

瞿思敏¹, 陆威村¹, 蒋思军², 陈 辉³, 石 朋¹, 虞 鸿⁴, 张 铜⁴

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 长潭水库事务中心, 浙江 台州 318020;
3. 绍兴市汤浦水库有限公司, 浙江 绍兴 312000; 4. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002)

摘要:针对系统微分响应误差修正方法在水文预报中同时修正多个变量出现的信息不足的问题,考虑各变量误差在不同时段对洪水预报精度的影响,提出了比例系数系统响应误差修正方法。以同时修正新安江模型各雨量单元降水量为例,分别采用湿润区(长诏水库流域)的理想模型和半干旱半湿润区(日照水库流域)的实际流域进行了检验。结果表明:经过误差修正,湿润区理想模型和半干旱半湿润区实际流域在次洪流量模拟中的平均纳什效率系数分别从 0.906 和 0.573 提升至 0.994 和 0.809,比例系数系统响应误差修正方法修正效果明显,具有跨气候区的强适应性。

关键词:洪水预报;系统微分响应;误差修正;比例系数;长诏水库流域;日照水库流域

中图分类号:TV124 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)02-0088-07

Proportional coefficient system response error correction method for flood forecasting//QU Simin¹, LU Weicun¹, JIANG Sijun², CHEN Hui³, SHI Peng¹, YU Hong⁴, ZHANG Jian⁴(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Changtan Reservoir Affairs Center, Taizhou 318020, China; 3. Shaoxing Tangpu Reservoir Co., Ltd., Shaoxing 312000, China; 4. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China)

Abstract: In response to the problem of insufficient information when using the system differential response error correction method to correct multiple variables simultaneously, a proportional coefficient system response error correction method was proposed based on considering the influences of each variable error on the accuracy of flood forecasting in different durations. Taking the simultaneous correction of the rainfall across rainfall units in the Xin'anjiang model as an example, an ideal model in a humid region (the Changzhao Reservoir Basin) and an actual basin in a semi-arid/semi-humid region (the Rizhao Reservoir Basin) were used to verify the method. Results showed that after correction, the average Nash-Sutcliffe efficiency coefficients for flood simulation in the humid-region ideal model and the semi-arid/semi-humid actual basin were improved significantly from 0.906 to 0.994 and from 0.573 to 0.809, respectively, indicating that the proportional coefficient system response error correction method has a remarkable correction effect and strong adaptability across diverse climatic zones.

Key words: flood forecasting; system differential response; error correction; proportional coefficient; the Changzhao Reservoir Basin; the Rizhao Reservoir Basin

洪水灾害历来是我国最严重的自然灾害之一,给人民群众生命财产带来了严重的威胁^[1]。随着经济的快速发展,实时洪水预报作为流域防洪重要的非工程措施日益受到重视^[2]。但在预报的各个环节都可能存在误差,如模型输入^[3-4]、模型结构及参数^[5-6]、状态变量初值^[7-8]等,这些误差因素使得洪水预报精度常难以满足要求。因此,采用误差修正技术^[9]保障和提升洪水预报精度一直是水文学研究的热点。

洪水预报误差修正技术较多^[10],如自回归模型 (autoregressive model, AR)^[11]、卡尔曼滤波技术^[12-13]、机器学习技术^[14]、综合修正方法^[15]等。但现有的误差修正方法基本上都存在物理概念基础不强、损失预见期和修正条件有限制等缺陷。传统 AR 模型认为误差前后时段相关^[16],但是当预报量发生突变时就破坏了相关关系,该模型就不再适用。如在洪峰附近流量会有突变,前后时段误差并不相关,此时仍然采用 AR 模型进行修正,效果并不理

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211400);国家自然科学基金项目(52179011,U2243229)
作者简介:瞿思敏(1977—),女,教授,博士,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:wanyily@hhu.edu.cn
通信作者:石朋(1976—),男,教授,博士,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:ship@hhu.edu.cn

想。卡尔曼滤波技术虽然在修正过程中明确考虑了模型和资料的不确定性,理论基础与设计思路都比较科学^[17-19],但用于水文预报中,由于有效信息获取困难,可利用的实时信息量有限,效果往往与 AR 模型相近。Bao 等^[20]提出了系统微分响应(system differential response, SDR)误差修正方法,该方法物理意义明确,既不损失预见期,也不增加模型参数^[21],目前在很多流域的水文模拟中得到验证,且应用广泛^[22-24],如对面平均雨量^[25]、面平均产流^[26]、自由水蓄量^[27]的误差修正等,结果表明,该误差修正方法对洪水预报精度有明显提升。

SDR 误差修正方法在应用中也遇到了一些问题,如出现修正量偏大、流量过程线呈锯齿状的现象^[28],以及修正多个变量时会遇到信息不足^[29]等问题。本文针对修正过程中信息不足的问题,在 SDR 误差修正方法中引入比例系数,提出比例系数系统响应误差修正方法,利用提出的方法同时修正新安江模型中各雨量单元的降水量,并采用理想模型和实际流域验证该方法的修正效果。

1 误差修正方法

1.1 SDR 误差修正方法

将流域水文模型概化为一个系统,模型内任一变量的改变都会引起流域出口断面流量的变化,该系统的响应函数可表示为

$$Q=f(X,\theta) \tag{1}$$

式中: Q 为模型因变量; X 为模型输入变量; θ 为模型参数,一般不随时间变化。

当只考虑模型输入的影响时(以降水量 P 为例),函数可简化为

$$Q=f(P) \tag{2}$$

对式(2)两边同时求微分:

$$dQ=\frac{\partial Q}{\partial P}\bigg|_{P=P_c}dP \tag{3}$$

式中 P_c 为修正前的降水量。

若样本系列长度为 L ,其中,待修正的样本系列长度为 $n(n\leq L)$,实测流量系列 $\boldsymbol{Q}=(Q_1, Q_2,\cdots, Q_L)^T$,计算流量系列 $\boldsymbol{Q}_c=(Q_{c1}, Q_{c2},\cdots, Q_{cn})^T$,修正前的降水量系列 $\boldsymbol{P}_c=(P_{c1}, P_{c2},\cdots, P_{cn})^T$,式(3)的全微分表达式矩阵形式为

$$\Delta\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{U}\Delta\boldsymbol{P}+\boldsymbol{\tau} \tag{4}$$

$$\text{其中}\quad \boldsymbol{U}=\begin{pmatrix} \frac{\partial Q(P_{c1})}{\partial P_{c1}} & \cdots & \frac{\partial Q(P_{c1})}{\partial P_{cn}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q(P_{cn})}{\partial P_{c1}} & \cdots & \frac{\partial Q(P_{cn})}{\partial P_{cn}} \end{pmatrix}$$

$$\Delta\boldsymbol{Q}=(Q_1-Q_{c1},Q_2-Q_{c2},\cdots,Q_L-Q_{cn})^T$$

$$\Delta\boldsymbol{P}=(\Delta P_{c1},\Delta P_{c2},\cdots,\Delta P_{cn})^T$$

式中: $\boldsymbol{U}$ 为系统响应矩阵; $\Delta\boldsymbol{Q}$ 为实测值与计算值的差值; $\Delta\boldsymbol{P}$ 为降水量修正量; $\boldsymbol{\tau}$ 为随机误差项,是符合零均值分布特点的白噪声向量。

采用最小二乘法求解式(4),则降水量修正量 $\Delta\boldsymbol{P}$ 为

$$\Delta\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{U}^T\boldsymbol{U})^{-1}\boldsymbol{U}^T\Delta\boldsymbol{Q} \tag{5}$$

修正后的降水量 $\boldsymbol{P}'$ 为

$$\boldsymbol{P}'=\boldsymbol{P}_c+\Delta\boldsymbol{P} \tag{6}$$

1.2 比例系数系统响应误差修正方法

应用 SDR 误差修正方法校正水文模型中的变量,主要是利用流量的误差信息回溯反演来修正模型变量。该方法通过计算变量的系统响应曲线建立变量与出口流量之间的关系,利用最小二乘法计算变量修正值,理论上该方法可以对模型中的任一变量进行修正。利用该方法对水文模型中单个变量进行修正时,通过计算 T 个时段的流量误差,可以反演 $t(t\leq T)$ 个时段的变量误差,但对 $M(M>1)$ 个变量同时进行修正时,仅依据 T 个时段流量反演 $M_t(M_t>T)$ 个时段的变量误差,无法求解。如同时修正新安江模型中各雨量单元的降水量、上下层和深层的初始土壤含水量、地面径流壤中流和地下径流等,往往会出现信息不足的问题,难以进行误差反演。本文以同时修正新安江模型中各雨量单元降水量为例,引入比例系数,提出比例系数系统响应误差修正方法。

设流域内有 N 个雨量单元,则修正后雨量单元降水量 $\boldsymbol{P}'$ 为

$$\boldsymbol{P}'=\begin{pmatrix} \hat{e}^{P_{1,1}}+\Delta P_{1,1} & \cdots & P_{N,1}+\Delta P_{N,1} \\ \vdots & & \vdots \\ \hat{e}^{P_{1,T}}+\Delta P_{1,T} & \cdots & P_{N,T}+\Delta P_{N,T} \end{pmatrix} \tag{7}$$

式中 $P_{j,i},\Delta P_{j,i}(j=1,2,\cdots,N;i=1,2,\cdots,T)$ 分别为第 j 个雨量单元在第 i 个时段的降水量和降水量误差。

每个时段各雨量单元采用同一个比例系数,设 $\alpha_i,\Delta\alpha_i$ 分别为第 i 个时段的比例系数和比例系数误差,比例系数初始值均设为 1,将式(7)近似概化为

$$\boldsymbol{P}'=\begin{pmatrix} \hat{e}^{P_{1,1}(\alpha_1+\Delta\alpha_1)} & \cdots & P_{N,1}(\alpha_1+\Delta\alpha_1) \\ \vdots & & \vdots \\ \hat{e}^{P_{1,T}(\alpha_T+\Delta\alpha_T)} & \cdots & P_{N,T}(\alpha_T+\Delta\alpha_T) \end{pmatrix} \tag{8}$$

因此,求解 $\Delta\boldsymbol{P}$ 可转换为求解 $\Delta\boldsymbol{\alpha}=(\Delta\alpha_1,\Delta\alpha_2,\cdots,\Delta\alpha_T)^T$ 。

水文模型可概化为

$$\boldsymbol{Q}=f(\boldsymbol{\alpha}) \tag{9}$$

其中 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_T)^T$

根据 SDR 误差修正方法原理,其中 $n(n \leq T)$ 个比例系数的修正量为

$$\Delta \alpha = (U^T U)^{-1} U^T \Delta Q \quad (10)$$

其中 $U = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q(\alpha_1)}{\partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial Q(\alpha_1)}{\partial \alpha_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q(\alpha_T)}{\partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial Q(\alpha_T)}{\partial \alpha_n} \end{bmatrix}$

比例系数系统响应误差修正方法的步骤为:

- ①将实测降水量系列代入新安江模型,得到初始的计算流量系列;
- ②对第 k 个时段的比例系数 $\alpha_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 增加一个很小的常数,保持其他时段的比例系数不变,得到新的比例系数系列,将新的比例系数系列与实测降水量系列相乘即可得到新的降水量系列;
- ③将新的降水量系列代入新安江模型计算得到新的流量系列;
- ④计算新的流量过程与初始计算流量的差值,得到矩阵 U ;
- ⑤根据式(10),得到比例系数的修正量,并进一步得到修正后的降水量系列,最后输入水文模型,得到修正后的流量系列。

在实际流域的实时预报中,采用定时滚动预报机制,以整点时刻为预报周期节点。每次预报时,基于数据的时效性与完整性原则,选取该整点时刻之前特定时长的历史数据。这些数据涵盖流域内各类关键水文信息,包括但不限于不同时间段的流量数据、降水量数据、水位数据等。利用这些历史数据,进行模型中相关变量的误差反演计算,对模型变量进行调整,进而得到修正后的计算流量。完成上述计算后,以修正后的计算流量为基础,重复执行之前的数据采集、误差反演计算、模型变量调整等流程,实现不间断的滚动预报。

1.3 评价指标

分别采用洪量相对误差 (E_{RR})、洪峰相对误差 (E_{RQ})、纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE) 评价该方法的修正效果。洪量和洪峰相对误差分别反映洪量、洪峰计算值与实测值之间的偏离程度; NSE 越接近 1, 表示吻合程度越好。

2 实例验证

本文聚焦于降水量输入的系统误差修正。湿润区因高频次、高强度降水的时空异质性,雨量站观测易漏测局地暴雨细节(如短时强对流降雨); 半干旱半湿润区因降水时空分布不均且雨量站密度低,插值后的面平均降水量代表性不足。二者均需通过合适的误差修正来提升模型输入的可靠性。

选取两类流域开展差异化验证: ①选择浙江省东部湿润地区的长诏水库流域进行理想模型检验, 利用新安江模型生成无误差的基准流量作为“理论真值”, 在原始降水量数据中人为添加可控幅度的随机误差, 通过误差修正方法对含误差的降水量进行修正后, 再次驱动模型生成修正流量。将修正流量与基准真值进行对比, 验证方法对含误差降水量的修正能力。②选择山东省南部半干旱半湿润地区的日照水库流域进行实际流域检验, 直接采用水文站实测流量作为物理真值, 将实测降水量输入模型生成初始模拟流量。采用比例系数系统响应误差修正方法对实测降水量进行修正, 并将修正后的降水量输入模型进行计算, 最后对比修正流量与实测流量, 检验该方法在真实流域实时洪水预报中的修正效果。

2.1 研究区概况

长诏水库位于曹娥江支流新昌江上, 水库总库容 1.8 亿 m^3 。长诏水库流域处于 $29^\circ 20' N \sim 29^\circ 40' N$ 、 $120^\circ 50' E \sim 121^\circ 20' E$, 集水面积 276 km^2 , 常年日照约 1900 h, 多年平均降水量 1626.6 mm, 多年平均蒸发量 825 mm, 多年平均气温 16.6 $^\circ C$ 。该流域属亚热带气候, 温和湿润, 四季分明, 在季风影响下, 降水量年际变化较大, 且年内分配不均, 主要集中于汛期。流域内有 8 个雨量站, 长诏水库流域水系及站点分布见图 1。

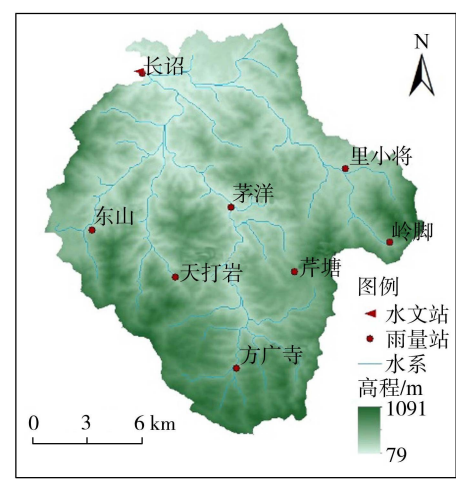


图 1 长诏水库流域水系及站点分布

Fig. 1 Water system and station distributions in the Changzhao Reservoir Basin

日照水库位于傅疃河中游, 水库总库容 3.21 亿 m^3 。日照水库流域处于 $35^\circ N \sim 35^\circ 30' N$ 、 $118^\circ 25' E \sim 119^\circ 30' E$, 集水面积 548 km^2 , 常年日照约 2500 h, 多年平均降水量 870 mm, 多年平均蒸发量 1400 mm, 多年平均气温 12.7 $^\circ C$ 。该流域气候受温带季风影响, 四季分明, 降水量年际变化较大, 且年

内分配不均,降水主要集中在夏季汛期。流域内分布着 7 个雨量站,日照水库流域水系及站点分布见图 2。

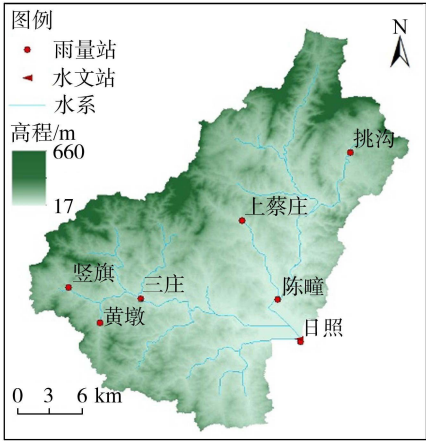


图 2 日照水库流域水系及站点分布

Fig. 2 Water system and station distributions in the Rizhao Reservoir Basin

2.2 理想模型检验

理想模型指模型的输入、输出、结构、参数、误差均为已知的模型,常用于分析误差的特性,检验方法的应用效果。为了确保使用的降水量数据与实际暴雨情况相一致,本文选择湿润区的长诏水库流域建立理想模型,并选取长诏水库流域 1988—2017 年共 37 场洪水资料进行研究。时段降水量、蒸发和流量数据来源于长诏水库运行管理中心的水文监测数据库,时段长均为 1 h,采用新安江模型进行流量模拟计算,利用人机交互参数率定方法得到模型参数,结果见表 1。

表 1 长诏水库流域新安江模型参数

Table 1 Xin' anjiang model parameters of the Changzhao Reservoir Basin	
参数	率定值
流域蒸散发折算系数	0.8
上层张力水容量	20 mm
下层张力水容量	80 mm
深层蒸散发折算系数	0.16
流域平均张力水容量	190 mm
张力水蓄水容量曲线指数	0.3
不透水面积占全流域面积的比例	0.01
自由水蓄水容量	7 mm
自由水蓄水容量曲线指数	1.1
自由水水箱对壤中流的出流系数	0.35
自由水水箱对地下水的出流系数	0.35
地面径流消退系数	0.5
壤中流消退系数	0.8
地下水消退系数	0.995
水流平均传播时间	0.9 h
流量比重系数	0.38

将原始降水量 P_0 代入新安江模型计算得到流量 Q_0 ,作为该流域的实测流量。根据随机误差值 ΔP_0 不超过原始降水量的 20%,且满足原始降水量与随机误差值之和非负的约束条件,将原始降水量 P_0 增加随机误差值,得到新的降水量 P_1 ,将 P_1 代入新安江模型得到计算流量 Q_1 。应用比例系数系统响应误差修正方法对 P_1 进行误差反演,得到 P_1 的修正量 ΔP_1 ,将 P_1 与该修正量相加得到降水量 P_2 后,代入新安江模型得到修正流量 Q_2 。采用 E_{RR} 、 E_{RQ} 、NSE 分析修正后模型的模拟精度。

表 2 为长诏水库流域 37 场洪水修正前后理想模型模拟结果对比。从表 2 可以看出,在湿润区长诏水库流域的理想模型检验中,经比例系数系统响应误差修正方法修正后,所有次洪流量模拟的 NSE 均有明显提升,平均 NSE 从 0.906 提升到 0.994,提高了 0.088。修正前 24 场次洪 NSE 大于 0.900;修正后 37 场次洪 NSE 均大于 0.900,其中有 31 场次洪 NSE 大于 0.990,说明模拟精度有所提高。含误差的总降水量平均值由 214.4 mm 修正为 230.3 mm,与原始总降水量平均值很接近;洪量平均相对误差由修正前 8.9%降低到 1.3%,下降了 7.6%;洪峰平均相对误差从 26.0%降低到 3.1%,下降了 22.9%,修正效果显著。说明比例系数系统响应误差修正方法可以有效地提高模拟精度。

为了进一步说明比例系数系统响应误差修正方法的修正效果,选取 000709 号洪水 (2000-07-09T21:00 至 2000-07-15T00:00) 进行分析,结果如图 3 所示,为方便比较, ΔP_1 取其相反数,使降水量的随机误差值 ΔP_0 与修正量 ΔP_1 同号。

从图 3(a)(b)可以看出,由于设置了随机误差值, P_1 与 P_0 在 07-10T02:00 至 07-10T08:00 时段相差较大,修正后 P_2 与 P_0 的吻合度明显提升;降水量的随机误差值和修正量也具有较高的一致性。从图 3(c)可以看出,修正前计算流量过程与实测流量过程在洪峰处和涨洪段拟合效果一般,修正后的流量过程中洪峰与实测洪峰更加接近,涨洪段的拟合效果也变好,模拟过程得到改善。说明比例系数系统响应误差修正方法能够修正流域降水量误差,提高模拟精度。洪量相对误差从修正前的 -16.4%变化为 1.1%,洪峰相对误差从 -31.3%变化为 -1.2%,NSE 从 0.896 提升到 0.999,修正效果较好。比例系数系统响应误差修正方法的修正效果表明,修正方法同时修正新安江模型各雨量单元的降水量可以在一定程度上提高模拟精度。

表 2 误差修正前后理想模型模拟结果对比

Table 2 Comparison of simulation results of ideal model before and after error correction									
洪号	原始总 降水量/mm	含误差的总 降水量/mm	修正后的总 降水量/mm	$E_{RR}/\%$		$E_{RQ}/\%$		NSE	
				修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后
880729	472.2	451.1	471.3	-8.1	0.8	-12.1	-0.9	0.927	0.998
890628	221.5	205.3	221.5	-6.1	0.1	23.9	2.2	0.944	0.999
890911	251.6	220.0	249.8	-14.6	0.5	-14.2	0.3	0.944	0.999
900818	117.1	111.6	115.3	-1.4	3.7	27.2	9.7	0.937	0.993
900830	546.8	507.3	548.5	-7.6	1.1	-10.8	-1.0	0.935	0.999
910415	64.0	69.3	63.6	9.8	0.2	47.6	8.4	0.786	0.993
920701	163.0	152.7	162.4	-6.2	0.4	-5.0	-1.6	0.915	0.997
920827	508.1	483.1	508.8	-5.4	0.5	10.7	0.6	0.956	0.999
920922	187.5	159.8	187.0	-15.0	0.1	-28.7	-2.4	0.934	1.000
930501	143.0	126.8	143.9	-16.6	1.7	-38.1	4.9	0.861	0.988
930629	199.4	203.2	199.8	3.3	0.5	31.2	1.8	0.926	0.998
940608	381.2	368.0	378.6	-3.1	-0.2	-17.9	1.4	0.954	0.999
940820	204.5	184.3	206.0	-13.3	1.3	-19.2	1.2	0.954	1.000
941008	138.2	134.0	138.0	-3.6	0.3	15.9	0.9	0.916	0.998
950422	230.2	227.6	231.6	0.1	1.1	49.4	8.3	0.845	0.995
970707	240.6	216.0	251.6	-9.8	2.2	17.4	0.5	0.886	0.971
970817	305.0	273.3	303.0	-11.3	-0.1	-26.2	-1.6	0.940	1.000
980616	185.8	161.6	189.1	-15.0	2.8	-31.6	16.8	0.837	0.966
980919	130.8	114.1	130.6	-17.9	0.5	-29.4	0.5	0.913	0.999
990616	93.0	84.5	92.2	-9.7	0.1	-30.2	-1.1	0.920	0.999
990830	154.0	146.1	159.0	-6.3	3.9	-41.2	-1.8	0.861	0.995
000709	102.0	84.5	101.4	-16.4	1.1	-31.3	-1.2	0.896	0.999
010620	188.5	167.5	190.7	-10.9	1.8	-32.7	-2.0	0.898	0.996
040811	284.3	253.2	286.2	-25.9	2.6	-19.4	-1.0	0.892	0.993
050717	223.4	229.7	223.8	11.9	4.1	56.3	12.7	0.742	0.982
050804	254.3	239.1	253.9	-4.6	0.5	11.7	0.8	0.930	1.000
050910	324.6	288.3	323.9	-13.0	-0.1	-20.8	-1.9	0.954	1.000
060713	122.8	110.6	111.8	0.3	0.1	36.2	1.4	0.894	0.999
080729	176.5	154.5	180.9	-19.7	3.0	-34.5	1.9	0.853	0.990
090810	264.1	247.0	263.1	-7.4	0.1	-30.1	-1.6	0.929	0.999
150710	189.3	191.2	187.7	3.2	0.3	32.9	4.3	0.903	0.999
150810	300.5	285.5	299.8	-5.3	0.4	-17.1	0.2	0.938	0.999
150814	80.1	76.0	82.3	-3.3	5.4	21.7	4.6	0.850	0.984
160611	278.1	255.3	279.2	-7.4	0.7	-27.8	1.1	0.926	0.998
160625	162.6	150.5	161.5	-8.0	-0.2	-15.8	0.6	0.947	0.998
160913	226.6	220.6	231.9	-2.3	3.6	27.9	6.4	0.943	0.997
170609	402.5	380.5	392.3	-6.4	-2.8	-16.9	6.9	0.937	0.950
平均值	230.2	214.4	230.3	8.9	1.3	26.0	3.1	0.906	0.994

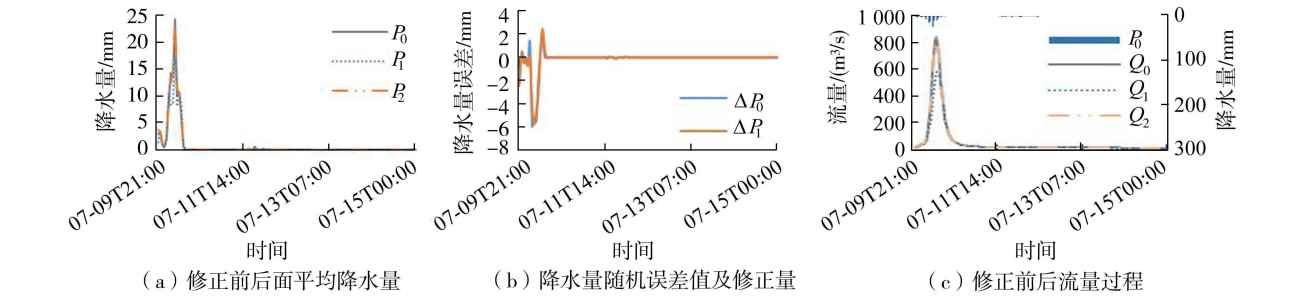


图 3 000709 号洪水修正效果

Fig. 3 Correction effect of flood No. 000709

2.3 实际流域检验

选取半干旱半湿润区的日照水库流域 1988—1998 年共 21 场洪水资料进行实际流域检验。时段

水量、蒸发和流量数据来源于日照水库管理运行中心的水文监测数据库,时段长均为 1 h。采用新安江模型进行流量模拟计算,利用人机交互参数率定方

法得到模型参数,结果见表 3。采用比例系数系统响应误差修正方法对各雨量单元降水量进行修正,误差修正前后预报结果评价指标对比见表 4。

表 3 日照水库流域新安江模型参数

Table 3 Xin' anjiang model parameters of the Rizhao Reservoir Basin	
参数	率定值
流域蒸散发折算系数	0. 75
上层张力水容量	20 mm
下层张力水容量	80 mm
深层蒸散发折算系数	0. 16
流域平均张力水容量	155 mm
张力水蓄水容量曲线指数	0. 3
不透水面积占全流域面积的比例	0. 01
自由水蓄水容量	15 mm
自由水蓄水容量曲线指数	1. 1
自由水箱对壤中流的出流系数	0. 45
自由水箱对地下水的出流系数	0. 25
地面径流消退系数	0. 3
壤中流消退系数	0. 88
地下水消退系数	0. 995
水流平均传播时间	0. 68 h
流量比重系数	0. 38

表 4 误差修正前后日照水库流域预报结果评价指标对比
Table 4 Comparison of evaluation indexes of forecast results before and after error correction in the Rizhao Reservoir Basin

洪号	$E_{RR}/\%$		$E_{RQ}/\%$		NSE	
	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后
880713	25. 9	3. 0	8. 0	-30. 0	0. 419	0. 824
900618	-7. 7	-5. 8	-5. 9	1. 1	0. 316	0. 658
900713	0. 3	30. 1	-58. 5	-29. 8	0. 652	0. 768
900715	-4. 1	12. 4	-39. 2	-6. 5	0. 631	0. 848
900801	-7. 6	10. 1	-28. 5	-8. 7	0. 717	0. 845
900908	-3. 3	10. 6	-6. 1	1. 6	0. 826	0. 941
910611	-23. 9	-4. 5	-28. 7	10. 7	0. 797	0. 943
910621	12. 1	52. 2	-62. 4	-0. 3	0. 652	0. 869
910721	75. 8	77. 3	-32. 0	-12. 7	0. 703	0. 763
920720	-3. 6	18. 2	-52. 7	6. 0	0. 557	0. 797
940823	0. 3	-4. 5	-14. 4	3. 7	0. 413	0. 702
950711	-27. 6	30. 2	-53. 1	35. 4	0. 577	0. 812
950816	-13. 3	-4. 7	-40. 9	-10. 8	0. 490	0. 851
950821	14. 6	14. 7	-48. 7	-23. 1	0. 453	0. 713
960628	124. 2	86. 6	-1. 6	-28. 9	0. 157	0. 574
970819	13. 7	22. 7	-15. 0	6. 5	0. 695	0. 954
980702	31. 7	5. 4	-16. 1	-24. 7	0. 465	0. 775
980715	17. 6	21. 8	-46. 0	9. 9	0. 472	0. 737
980804	3. 4	7. 5	-42. 9	-8. 4	0. 575	0. 754
990813	-11. 5	-0. 9	16. 4	5. 2	0. 817	0. 925
980724	-11. 9	0. 1	-42. 5	-12. 5	0. 640	0. 933
平均值	20. 7	20. 1	31. 4	13. 2	0. 573	0. 809

从表 4 可以看出,对日照水库流域的各雨量单元降水量修正后,洪量平均相对误差从 20. 7%降低到 20. 1%,下降了 0. 6%;洪峰平均相对误差从 31. 4%降低到 13. 2%,下降了 18. 2%;平均 NSE 从

0. 573 提升到 0. 809,提高了 0. 236。修正效果明显,说明比例系数系统响应误差修正方法能有效提升洪水预报精度。

图 4 为修正前后 950816 号洪水 (1995-08-16T00:00 至 1995-08-21T10:00) 流量过程对比。从图 4 可以看出,比例系数系统响应误差修正方法的修正效果显著,经误差修正后,模拟结果的 NSE 从修正前的 0. 490 提升到 0. 851,提高了 0. 361;洪量相对误差从-13. 3%变化为-4. 7%,误差绝对值下降了 8. 6%;洪峰相对误差从-40. 9%变化为 -10. 8%,误差绝对值下降了 30. 1%。

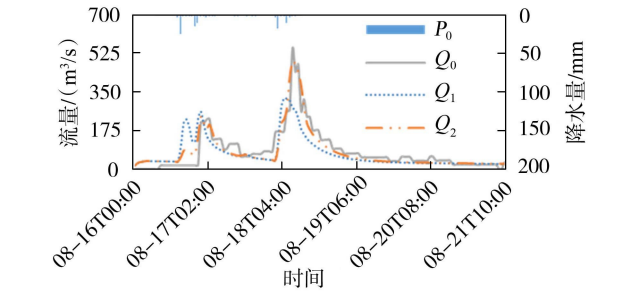


图 4 误差修正前后 950816 号洪水流量过程对比
Fig. 4 Comparison of flow processes of flood No. 950816 before and after error correction

3 结 论

- a. 理想模型检验结果表明,利用比例系数系统响应误差修正方法对新安江模型各雨量单元的降水量进行修正在理论上是可行的。修正后长诏水库流域流量模拟结果的平均 NSE 从修正前的 0. 906 提升到 0. 994,提高了 0. 088;洪量平均相对误差从 8. 9%降低到 1. 3%,下降了 7. 6%;洪峰平均相对误差从 26. 0%降低到 3. 1%,下降了 22. 9%,修正效果显著。
- b. 实际流域计算结果表明,进行误差修正后,日照水库流域流量模拟结果的平均 NSE 从误差修正前的 0. 573 提升到 0. 809,提高了 0. 236;洪量平均相对误差从 20. 7%降低到 20. 1%,下降了 0. 6%;洪峰平均相对误差从 31. 4%降低到 13. 2%,下降了 18. 2%,说明比例系数系统响应误差修正方法有效,能提升洪水预报精度。
- c. 比例系数系统响应误差修正方法在湿润区 (长诏水库流域) 与半干旱半湿润区 (日照水库流域) 均显著提升了洪水预报精度,体现了其跨气候区的强适应性。

参考文献:

[1] 万新宇,王光谦. 近 60 年中国典型洪水灾害与防洪减灾对策[J]. 人民黄河,2011,33(8):1-4. (WAN Xinyu,

- WANG Guangqian. Typical flood disasters during last sixty years and strategies of flood control and disaster mitigation in China [J]. Yellow River, 2011, 33 (8): 1-4. (in Chinese))
- [2] 刘国伟. 水文科学的基本问题及当代前沿[J]. 水科学进展, 2020, 31 (5): 685-689. (LIU Guowei. Basic problems and frontier of hydrology[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 685-689. (in Chinese))
- [3] 张琳, 王国利. 洪水预报模型输入与输出的误差分布及相关性分析[J]. 水文, 2022, 42 (1): 23-28. (ZHANG Lin, WANG Guoli. Analysis on error distributions of input data and output data of flood forecasting model and its correlation[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(1): 23-28. (in Chinese))
- [4] YAN Xueman, SONG Jinxi, AN Yongkai, et al. Uncertainty quantization of meteorological input and model parameters for hydrological modelling using a Bayesian-based integrated approach[J]. Hydrological Processes, 2024, 38 (1): e15040.
- [5] XIE Xianhong, ZHANG Dongxiao. A partitioned update scheme for state-parameter estimation of distributed hydrologic models based on the ensemble Kalman filter [J]. Water Resources Research, 2013, 49 (11): 7350-7365.
- [6] SUN Xiaozhuo, ZENG Xiankui, WU Jichun, et al. A two-stage Bayesian data-driven method to improve model prediction[J]. Water Resources Research, 2021, 57(12): e2021WR030436.
- [7] SABZIPOUR B, ARSENAULT R, TROIN M, et al. Sensitivity analysis of the hyper parameters of an ensemble Kalman filter application on a semi-distributed hydrological model for streamflow forecasting[J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: 130251.
- [8] 梁忠民, 赵建飞, 段雅楠, 等. 微分形式新安江模型[J]. 水科学进展, 2024, 35(3): 374-386. (LIANG Zhongmin, ZHAO Jianfei, DUAN Yanan, et al. Differential-form Xin' anjiang model[J]. Advances in Water Science, 2024, 35 (3): 374-386. (in Chinese))
- [9] 杨姗姗, 曾明, 田锐. 洪水预报误差修正技术研究进展 [J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32 (12): 35-40. (YANG Shanshan, ZENG Ming, TIAN Rui. Research progress of error correction techniques for flood forecasting[J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(12): 35-40. (in Chinese))
- [10] 黄一昕, 王钦钊, 梁忠民, 等. 洪水预报实时校正技术研究进展[J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2021, 19 (1): 12-35. (HUANG Yixin, WANG Qinzha, LIANG Zhongmin, et al. Research advances on real-time correction methods for flood forecasting [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 12-35. (in Chinese))
- [11] 张娟, 钟平安, 徐斌, 等. 洪水预报自回归实时校正多步外延方法研究[J]. 水文, 2019, 39(6): 41-45. (ZHANG Juan, ZHONG Ping'an, XU Bin, et al. Research on multi-step epitaxy method for auto-regressive real-time correction of flood forecasting[J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(6): 41-45. (in Chinese))
- [12] 王莉莉, 包红军, 李致家. 基于 Kalman 滤波的实时校正模型研究[J]. 水力发电, 2020, 46(8): 24-26. (WANG Lili, BAO Hongjun, LI Zhijia. Study on the real-time correction model based Kalman filter [J]. Water Power, 2020, 46(8): 24-26. (in Chinese))
- [13] SUN Y, TIAN X, BAO W, et al. Improving the forecast performance of hydrological models using the cubature Kalman filter and unscented Kalman filter [J]. Water Resources Research, 2023, 59(3): e2022WR033580.
- [14] 衣学军, 汤岭, 李致家, 等. 基于机器学习的洪水预报实时校正[J]. 水电能源科学, 2023, 41(12): 78-81. (YI Xuejun, TANG Ling, LI Zhijia, et al. Real-time correction of flood forecasting based on machine learning[J]. Water Resources and Power, 2023, 41 (12): 78-81. (in Chinese))
- [15] 周梦, 陈华, 郭富强, 等. 洪水预报实时校正技术比较及应用研究 [J]. 中国农村水利水电, 2018 (7): 90-95. (ZHOU Meng, CHEN Hua, GUO Fuqiang, et al. The application of real-time correction techniques for flood forecasting[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018 (7): 90-95. (in Chinese))
- [16] 刘可新, 徐海卿, 庞丽丽, 等. 实时洪水预报中基于岭估计的 AR 修正模型研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报 (中英文), 2023, 21(3): 212-221. (LIU Kexin, XU Haiqing, PANG Lili, et al. Research on ridge-estimation based autoregressive model in real-time flood forecasting [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21 (3): 212-221. (in Chinese))
- [17] SUN Y, BAO W, QU S, et al. Development of the consider cubature Kalman filter for state estimation of hydrological models with parameter uncertainty [J]. Journal of Hydrology, 2023, 625: 130080.
- [18] SUN Y, TIAN X, BAO W, et al. Improving treatment of noise specification of Kalman filtering for state updating of hydrological models: combining the strengths of the interacting multiple model method and Cubature Kalman filter [J]. Water Resources Research, 2023, 59 (7): e2022WR033635.
- [19] SUN Y, BAO W, VALK K, et al. Improving forecast skill of lowland hydrological models using ensemble Kalman filter and unscented Kalman filter [J]. Water Resources Research, 2020, 56(8): e2020WR027468.

(下转第 105 页)

[18] 徐俊杰. 基于智能体的洪涝灾害损失评估研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2023.

[19] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J]. 水资源保护, 2024, 40(4):36-47. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding/waterlogging disaster based on multi-agents models[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 36-47. (in Chinese))

[20] 张伟,庄子孟,孙慧超,等. 我国城市内涝风险图编制关键问题及研究展望[J]. 水资源保护, 2023, 39(5):58-68. (ZHANG Wei, ZHUANG Zimeng, SUN Huichao, et al. Key issues and study prospect of urban waterlogging risk map in China[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5):58-68. (in Chinese))

[21] 李宛谕,黄显峰,金国裕,等. 基于 ANP-PP-SPA 的区域洪灾风险评价模型研究[J]. 水利经济, 2020, 38(4): 45-50. (LI Wanyu, HUANG Xianfeng, JIN Guoyu, et al. Assessment model for regional flood risks based on ANP-PP-SPA[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(4):45-50. (in Chinese))

[22] Department for Communities and Local Government. Planning policy statement 25: development and flood risk [R]. London: Department for Communities and Local Government, 2006.

[23] Standing Committee on Agriculture and Resource Management. Floodplain management in Australia: best practice principles and guidelines [R]. Zealand: Standing Committee on Agriculture and Resource Management, 2000.

[24] 施加福,王昊,周晋军,等. 城市内涝灾害对应应急救援服务可达性的影响评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(2): 27-33. (SHI Jiafu, WANG Hao, ZHOU Jinjun, et al. Assessment of the impact of urban waterlogging disasters on the accessibility of emergency rescue services [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(2):27-33. (in Chinese))

[25] WU Y, TANG M, ZHOU Z, et al. Rainfall pattern construction method based on DTW-HCA and urban flood simulation; a case study of Nanchang City, China [J]. Water, 2024, 16:65.

(收稿日期:2024 - 07 - 11 编辑:王芳)

(上接第 94 页)

[20] BAO Weimin, SI Wei, QU Simin. Flow updating in real-time flood forecasting based on runoff correction by dynamic system response curve[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(4):747-756.

[21] WANG Jian, BAO Weimin, XIAO Zhangling, et al. Objectivity verification experiment of the dynamic system response curve method for streamflow simulation [J]. Journal of Hydrology, 2023, 617:128969.

[22] WANG Jian, BAO Weimin, XIAO Zhangling, et al. Multi-model integrated error correction for streamflow simulation based on Bayesian model averaging and dynamic system response curve [J]. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127518.

[23] 蒋语珣,瞿思敏,蒋思军,等. 系统微分响应误差修正方法在 VIC 模型中的应用与研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(10):96-103. (JIANG Yuxun, QU Simin, JIANG Sijun, et al. Application of and research on system differential response error correction method in VIC model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(10): 96-103. (in Chinese))

[24] ZHANG Xiaoqin, BAO Weimin, SUN Yiqun. Enhancing the hydrologic system differential response method for flood forecasting correction [J]. Journal of Hydrology, 2021, 592:125793.

[25] SI Wei, GUPTA V H, BAO Weimin, et al. Improved dynamic system response curve method for real-time flood forecast updating[J]. Water Resources Research, 2019, 55(9):7493-7519.

[26] 张小琴,吴成城,余亮亮,等. 基于微分响应的流域产流分单元修正方法[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6):1906-1913. (ZHANG Xiaoqin, WU Chengcheng, SHE Liangliang, et al. A spatial distributed runoff correction approach based on differential response [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6):1906-1913. (in Chinese))

[27] 包为民,阙家骏,赖善证,等. 洪水预报自由水蓄量动态系统响应修正方法[J]. 水科学进展, 2015, 26(3):365-371. (BAO Weimin, QUE Jiajun, LAI Shanzheng, et al. Free-water storage error correction based on dynamic system response in flood forecasting [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3):365-371. (in Chinese))

[28] 刘可新,李匡,梁犁丽,等. 产流误差平稳矩阵的系统响应修正方法参数分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(1): 53-61. (LIU Kexin, LI Kuang, LIANG Lili, et al. Parameters analysis on the error correction method with runoff error smooth matrix based on system response [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(1): 53-61. (in Chinese))

[29] SUN Y, BAO W, JIANG P, et al. Development of multivariable dynamic system response curve method for real-time flood forecasting correction[J]. Water Resources Research, 2018, 54(7):4730-4749.

(收稿日期:2024 - 05 - 10 编辑:施业)