

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkj.2020.0001

梁忠民,黄一昕,胡义明,等. 全过程联合校正的洪水预报修正方法[J]. 南水北调与水利科技,2020,18(1):1-10,17. LIANG Z M, HUANG Y X, HU Y M, et al. The entire-process correction approach for flood forecasting[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(1):1-10,17. (in Chinese)

全过程联合校正的洪水预报修正方法

梁忠民,黄一昕,胡义明,李彬权,王军

(河海大学 水文水资源学院,南京 210098)

摘要:洪水实时校正是洪水预报的重要组成部分,也是水文预报研究的热点与难点。为进一步提高洪水预报精度,提出了一种全过程联合校正的洪水预报修正方法。该方法的主旨是在雨量站数目较多的流域,构建雨量站网密度与洪水预报误差分配比例之间的定量关系;对雨量站数目较少的流域,借用该比例关系,将洪水预报总误差按比例划分为面雨量输入误差和模型误差两部分;再基于系统响应理论,对研究流域的这两部分误差进行修正,从而实现输入误差与模型误差的全过程联合校正。在淮河三个典型流域的应用结果表明,相较于目前单变量的系统响应曲线修正方法,全过程联合校正方法可进一步提升误差修正效果,提高洪水预报精度。

关键词:洪水预报;实时校正;误差修正;系统响应;面雨量;模型参数;新安江模型

中图分类号:TV11;P338 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The entire-process correction approach for flood forecasting

LIANG Zhongmin, HUANG Yixin, HU Yiming, LI Binquan, WANG Jun

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Real-time correction is an important component of flood forecasting, and also a hot and difficult topic in hydrological forecasting research. For this purpose, an entire-process correction approach was proposed to improve the accuracy of real-time flood forecasting. Firstly, we took a basin with plentiful rain gauges. Based on rainfall data of that basin, the relationship between the density of rain gauges and the ratio of flood forecasting error was established. Then, for the basin with a small number rain gauges, ratio of the real-time flood forecasting error into areal rainfall error and model error was used to calculate the error of the flood forecasting. Finally, based on system response theory, the two forecasting errors were simultaneously corrected as to realize the entire-process correction of model input and model structure. The application results in three typical basins of Huaihe River showed that the entire-process correction approach could improve the effect of error correction and the accuracy of flood forecasting compared to the current single-variable dynamic system response curve method.

Key words: flood forecasting; real-time correction; error correction; system response; areal rainfall; model parameters; XAJ model

实时洪水预报是最重要的防灾减灾非工程措施之一^[1-3]。由于自然的复杂及人类认识的局限,使得洪水预报不可避免地存在误差,给实时洪水作业预报带来精度瓶颈。因此,实时校正成为降低预报误

差、提升预报精度的最后一道屏障,必不可少^[4-5]。

纵观国内外关于洪水预报实时校正方法的研究,大体可分为两类:一是终端误差校正途径,该途径不考虑洪水预报中间过程误差的各种影响因素,

收稿日期:2019-08-26 修回日期:2019-09-18 网络出版时间:2019-09-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190927.1418.012.html>

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0402709);国家自然科学基金(41730750)

作者简介:梁忠民(1962—),男,辽宁凤城人,教授,博士生导师,主要从事水文水资源方面研究。E-mail: zmliang@hhu.edu.cn

直接对最终的预报误差(终端误差)进行校正,如自回归(auto-regressive, AR)校正算法及其改进方法^[6-8]、递推最小二乘法(recursive least squares, RLS)等^[9-11];二是过程误差校正途径,其本质是对水文预报各个过程(如降雨、产流、汇流等)或预报模型的状态变量进行校正,通过降低预报各环节的误差以达到降低终端误差的目的,如采用卡尔曼滤波(kalman filter)技术进行状态变量或产流过程的校正^[12-14]。研究表明,这些传统方法一般都存在物理基础不强、损失预见期和校正效果不理想等缺陷^[15]。鉴于此,包为民等^[15-16]提出了动态系统响应曲线(dynamic system response curve, DSRC)方法,并将其应用到洪水预报的过程误差校正。随后,一些研究者借助 DSRC 方法,对新安江模型产流量、自由水蓄量、流域面雨量、以及土壤含水量等过程变量和状态变量进行校正^[17-22],均取得比 AR 模型更好的校正效果。近年来,针对 DSRC 方法在实际应用中可能会出现修正值偏大、流量过程线波动较大等不合理现象,人们又提出了平稳约束项的解决方法^[21,23-24]。但应用 DSRC 方法校正时有一个前提假设,即认为终端误差只是由洪水预报各个过程(变量)中的某个(或几个)引起的,而剩余的其他过程或变量没有误差,这样将全部的终端误差归咎于一个过程或变量的误差来进行校正,与洪水预报中误差存在于各个过程的实际情况不甚相符,存在一定的局限性。

因此,本文基于 DSRC 方法的系统响应理论,提出一种误差全过程联合校正方法,可同时对面雨量误差和模型误差进行校正。该方法综合了终端误差校正和过程误差校正两类途径,最终目的是进一步降低终端总误差。根据淮河典型流域的场次洪水资料,将本文校正方法与新安江模型结合进行验证研究,并与现有 DSRC 校正方法进行对比,通过量化的精度结果,验证全过程联合校正方法的合理性和有效性。

1 实时校正方法

1.1 系统响应理论

水文或洪水预报系统可用图 1 概化描述。

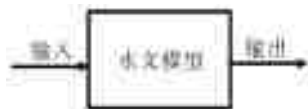


图 1 水文或洪水预报系统示意图

Fig. Schematic diagram of a hydrological or flood forecasting system

洪水预报系统中,输入、输出信息间的关系可表达为如下系统方程形式为

$$Q(t) = f[X(t), t] \quad (1)$$

式中: $X(t)$ 为图 1 中的系统输入; $Q(t)$ 为系统的输出; $f(\cdot)$ 为系统函数; t 为时间。

具体化输入、输出的关系,用如下响应函数来描述为

$$Q = H_0 X + \epsilon_0 \quad (2)$$

其中

$$H_0 = \frac{\partial Q(X)}{\partial X} \Big|_{X=X_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial q_1}{\partial x_L} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial q_K}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial q_K}{\partial x_L} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $Q = [q_1, q_2, \dots, q_K]^T$ 为模型计算的流域出口断面流量系列; $X = [x_1, x_2, \dots, x_L]^T$ 为模型的状态变量和输入变量系列,对新安江模型而言,可以是降雨量 $P = [p_1, p_2, \dots, p_{L_p}]^T$ 、模型参数 $\theta = [\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_{L_\theta}]^T$ 、产流量 $R = [r_1, r_2, \dots, r_{L_R}]^T$ 、自由水蓄量 $S = [s_1, s_2, \dots, s_{L_s}]^T$ 、土壤含水量 $W = [w_1, w_2, \dots, w_{L_w}]^T$ 等中的一种,也可以是几种的组合,以上向量中的 $K, L (L_p + L_\theta + L_R + L_s + L_w)$ 表示系列个数或变量数目; H_0 为输出变量对输入变量的系统响应矩阵,通过向后差分代替偏微分求解^[17-18]; ϵ_0 为误差项。

将实测系列与计算系列的响应函数(式(2))相减,得输入误差与输出误差间的响应系统为

$$E_Q = H E_X + \epsilon \quad (4)$$

其中

$$H = \frac{\partial Q(X)}{\partial X} \Big|_{X=X_c} = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial q_1}{\partial x_L} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial q_K}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial q_K}{\partial x_L} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $E_Q = [q_{obs,1} - q_{c,1}, q_{obs,2} - q_{c,2}, \dots, q_{obs,K} - q_{c,K}]^T$ 为实测流量系列 $Q_{obs} = [q_{obs,1}, q_{obs,2}, \dots, q_{obs,K}]^T$ 与计算流量系列 $Q_c = [q_{c,1}, q_{c,2}, \dots, q_{c,K}]^T$ 的差值; $E_X = [x_{obs,1} - x_{c,1}, x_{obs,2} - x_{c,2}, \dots, x_{obs,L} - x_{c,L}]^T$ 为实际输入系列 $X_{obs} = [x_{obs,1}, x_{obs,2}, \dots, x_{obs,L}]^T$ 与计算输入系列 $X_c = [x_{c,1}, x_{c,2}, \dots, x_{c,L}]^T$ 的差值; H 为流量对输入变量的系统响应矩阵; ϵ 为误差项。

1.2 DSRC 修正方法

DSRC 方法是基于系统响应理论,即将水文模型概化为输入(修正量)与输出之间的响应系统,根据需要对输入变量或模型参数进行修正。

以面雨量误差的 DSRC 修正为例,则根据式(4)建立面雨量误差与实测流量误差的响应系统为

$$\mathbf{E}_Q = \mathbf{H}\mathbf{E}_P + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_1}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial q_1}{\partial p_L} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial q_K}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial q_K}{\partial p_L} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{E}_Q = [q_{\text{obs},1} - q_{c,1}, q_{\text{obs},2} - q_{c,2}, \dots, q_{\text{obs},K} - q_{c,K}]^T$ 为实测流量系列 $\mathbf{Q}_{\text{obs}} = [q_{\text{obs},1}, q_{\text{obs},2}, \dots, q_{\text{obs},K}]^T$ 与计算流量系列 $\mathbf{Q}_c = [q_{c,1}, q_{c,2}, \dots, q_{c,K}]^T$ 的差值; $\mathbf{E}_P = [p_1 - p_{c,1}, p_2 - p_{c,2}, \dots, p_L - p_{c,L}]^T$ 为实际面雨量系列 $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_L]^T$ 与计算面雨量系列 $\mathbf{P}_c = [p_{c,1}, p_{c,2}, \dots, p_{c,L}]^T$ 的差值; \mathbf{H} 为流量对面雨量的系统响应矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为误差项。

根据最小二乘原理 (least squares, LS 原理)^[25], 得到面雨量误差的估计式为

$$\mathbf{E}'_P = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{E}_Q \quad (8)$$

相应地, 得到面雨量的校正量 ΔP ,

$$\Delta P = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{E}_Q = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T [Q(P, \theta, t) - Q(P_c, \theta, t)] \quad (9)$$

式中: ΔP 为面雨量的校正量系列; $Q(P, \theta, t)$ 为实测流量过程, $Q(P_c, \theta, t)$ 为模型预报流量过程, $t=1, 2, \dots, K$; P_c 为计算的面雨量过程, θ 为模型参数。

校正后面雨量 P'_c 为

$$P'_c = P_c + \Delta P \quad (10)$$

将 P'_c 重新输入水文模型进行产汇流计算, 则得到校正后的流域出口断面流量过程 $Q'_c(t)$ 为

$$Q'_c(t) = f(P'_c, t) \quad (11)$$

关于 DSRC 方法的具体推导和计算过程不赘述, 请参阅相关文献[19, 21]。

1.3 全过程联合校正方法

本文提出的全过程联合校正方法, 其出发点是将洪水预报的终端误差 (总误差) 按一定比例, 划分成面雨量误差和模型误差; 然后基于系统响应理论, 借鉴 DSRC 思路, 建立面雨量误差、模型误差与终端误差 (总误差) 之间的响应系统, 从而可实现面雨量和模型误差的全过程联合校正。

校正步骤归纳如下。

(1) 将图 1 中的水文模型系统表达为由输入、输出和模型参数组成的系统方程, 见式(12)。

$$Q(t) = f[P(t), \theta(t), t] \quad (12)$$

式中: $Q(t)$ 为模型计算流量过程; $P(t)$ 为面雨量系列; $\theta(t)$ 为模型参数系列; t 为时间。

(2) 认为面雨量和模型参数 (模型已选定) 的变化是引起流域出口断面流量变化的主要因素, 选取面雨量系列 $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_{L_p}]^T$ 和模型参数系列 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{L_\theta}]^T$ 两者作为校正变量, 上述系统方程式(12) 写为

$$\mathbf{Q} = f(\mathbf{P}, \boldsymbol{\theta}) \quad (13)$$

(3) 将洪水预报的总误差 \mathbf{E}_T 分成两部分, 一是由于计算的面雨量不确定性而带来的预报误差 \mathbf{E}_P , 二是由于模型参数不准确而带来的预报误差 \mathbf{E}_M 。其中, 本文的总误差是以预报流量过程与实测流量过程离差绝对值之和表示的, 即

$$\mathbf{E}_T = \mathbf{E}_P + \mathbf{E}_M \quad (14)$$

(4) 选择雨量站网密集的流域作为实验流域, 建立流域雨量站密度与各部分误差之间的定量关系。

根据实验流域所有雨量站 (个数为 n) 的雨量数据及流域出口断面的流量资料, 率定出一套最优的新安江模型参数 ($\boldsymbol{\theta}$)。一般而言, 对同一场洪水, 若雨量站数目不同, 计算的面雨量也会不同, 则由出口断面流量与面雨量数据率定出的参数也将不同。对 n 足够大的该流域, 雨量站密度高 $\rho_n = n/F$ (F 为流域面积), 此时计算的面雨量误差可以忽略, 即 $\mathbf{E}_{P, \rho_n} = 0$; 由此率定的这套模型参数所代表的水文模型最能反映该流域的产汇流机制, 由于忽略了面雨量的误差, 则此时出口断面流量过程的总误差就是模型误差, 即 $\mathbf{E}_{M, \rho_n} = \mathbf{E}_{T, \rho_n}$ 。这个模型误差反映了目前人们对该流域产汇流机制认识水平及模拟能力, 是固有的。

借鉴抽站法概念, 从所有的 n 个雨量站中随机抽取 m 个, $m=1, 2, \dots, n$; 根据 m 个站的雨量及已率定的最优模型参数 $\boldsymbol{\theta}$, 计算雨量站密度 $\rho_m = m/F$ 下的洪水预报总误差 \mathbf{E}_{T, ρ_m} 。由于对不同的 ρ_m , 采用的都是最优的那一套模型参数 $\boldsymbol{\theta}$, 而与最优参数 $\boldsymbol{\theta}$ 对应的模型误差 \mathbf{E}_{M, ρ_m} 是固定的, 所以不同 ρ_m 下, 模型误差都取同一值, 即 $\mathbf{E}_{M, \rho_1} = \dots = \mathbf{E}_{M, \rho_m} = \dots = \mathbf{E}_{M, \rho_n}$ 。由此, 即可根据式(14) 计算雨量站密度 ρ_m 下面雨量误差 \mathbf{E}_{P, ρ_m} , 即 $\mathbf{E}_{P, \rho_m} = \mathbf{E}_{T, \rho_m} - \mathbf{E}_{M, \rho_m} = \mathbf{E}_{T, \rho_m} - \mathbf{E}_{M, \rho_n} = \mathbf{E}_{T, \rho_m} - \mathbf{E}_{T, \rho_n}$ 。

按照上述步骤即可得到 ρ_m 与 \mathbf{E}_{T, ρ_m} 、 \mathbf{E}_{P, ρ_m} 、 \mathbf{E}_{M, ρ_m} 的对应关系, 见表 1。

据表 1 构建 ρ_m 与面雨量误差占总误差的比例 $\eta_{P, \rho_m} (= \mathbf{E}_{P, \rho_m} / \mathbf{E}_{T, \rho_m})$ 和模型误差占总误差的比例 $\eta_{M, \rho_m} (= \mathbf{E}_{M, \rho_m} / \mathbf{E}_{T, \rho_m})$ 之间的定量关系, 且 $\eta_{P, \rho_m} + \eta_{M, \rho_m} = 1$ 。关系见表 2。

表 1 ρ_m 与 E_{T,ρ_m} 、 E_{P,ρ_m} 、 E_{M,ρ_m} 的对应关系

Tab. 1 The correspondence between ρ_m and E_{T,ρ_m} , E_{P,ρ_m} , and E_{M,ρ_m}

雨量站密度	预报总误差	面雨量计算误差	模型误差
$\rho_1 = 1/F$	E_{T,ρ_1}	$E_{P,\rho_1} = E_{T,\rho_1} - E_{T,\rho_n}$	$E_{M,\rho_1} = E_{T,\rho_n}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$\rho_m = m/F$	E_{T,ρ_m}	$E_{P,\rho_m} = E_{T,\rho_m} - E_{T,\rho_n}$	$E_{M,\rho_m} = E_{T,\rho_n}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$\rho_n = n/F$	E_{T,ρ_n}	$E_{P,\rho_n} = 0$	$E_{M,\rho_n} = E_{T,\rho_n}$

表 2 ρ_m 与 η_{P,ρ_m} 、 η_{M,ρ_m} 之间的定量关系

Tab. 2 Quantitative relationship between ρ_m , η_{P,ρ_m} and η_{M,ρ_m}

雨量站密度	面雨量误差比例	模型误差比例
ρ_1	$\eta_{P,\rho_1} = 1 - \eta_{M,\rho_1}$	$\eta_{M,\rho_1} = E_{T,\rho_n} / E_{T,\rho_1}$
\vdots	\vdots	\vdots
ρ_m	$\eta_{P,\rho_m} = 1 - \eta_{M,\rho_m}$	$\eta_{M,\rho_m} = E_{T,\rho_n} / E_{T,\rho_m}$
\vdots	\vdots	\vdots
ρ_n	$\eta_{P,\rho_n} = 1 - \eta_{M,\rho_n} = 0$	$\eta_{M,\rho_n} = E_{T,\rho_n} / E_{T,\rho_n} = 1$

(5) 由实验流域得到表 2 中所描述的定量关系, 可应用于雨量站密度较低的临近或相似流域, 实现洪水预报的实时校正。使用时, 将应用流域(雨量站密度为 ρ) 的洪水预报总误差 $E_{T,\rho}$ 按照误差的分配比例, 划分成面雨量误差 $E_{P,\rho}$ 和模型误差 $E_{M,\rho}$, 公式为

$$E_{P,\rho} = \eta_{P,\rho} \times E_{T,\rho} \quad (15)$$

$$E_{M,\rho} = \eta_{M,\rho} \times E_{T,\rho} \quad (16)$$

(6) 基于 DSRC 方法的系统响应理论, 对应用流域的面雨量误差 $E_{P,\rho}$ 和模型误差 $E_{M,\rho}$ 联合校正。

由式(9)得到面雨量校正量系列 ΔP_ρ 和模型参数校正量系列 $\Delta \theta_\rho$, 将式(15)和(16)代入得

$$\Delta P_\rho = (A^T A)^{-1} A^T E_{P,\rho} = \eta_{P,\rho} \cdot (A^T A)^{-1} A^T E_{T,\rho} \quad (17)$$

$$\Delta \theta_\rho = (B^T B)^{-1} B^T E_{M,\rho} = \eta_{M,\rho} \cdot (B^T B)^{-1} B^T E_{T,\rho} \quad (18)$$

式中: 洪水预报总误差系列 $E_{T,\rho} = [Q(P, \theta, 1) - f(P_{c,\rho}, \theta_{c,\rho}, 1), Q(P, \theta, 2) - f(P_{c,\rho}, \theta_{c,\rho}, 2), \dots, Q(P, \theta, K) - f(P_{c,\rho}, \theta_{c,\rho}, K)]^T$ 为实测流量系列 $Q(P, \theta, K) = [Q(P, \theta, 1), Q(P, \theta, 2), \dots, Q(P, \theta, K)]^T$ 与模型预报流量系列 $f(P_{c,\rho}, \theta_{c,\rho}, K) = [f(P_{c,\rho}, \theta_{c,\rho}, 1), f(P_{c,\rho}, \theta_{c,\rho}, 2), \dots, f(P_{c,\rho}, \theta_{c,\rho}, K)]^T$ 的差值; $P_{c,\rho}$ 为校正前的面雨量系列; $\theta_{c,\rho}$ 为校正前的模型参数系列; $\Delta P_\rho = [\Delta p_{\rho,1}, \Delta p_{\rho,2}, \dots, \Delta p_{\rho,jp}]^T$ 为面雨量校正量系列; A 为面雨量的动态系统响应矩阵; $\Delta \theta_\rho = [\Delta \theta_{\rho,1}, \Delta \theta_{\rho,2}, \dots, \Delta \theta_{\rho,j\theta}]^T$ 为模型参数校正量系列; B 为模型参数的动态系统响应矩阵。

将式(17)和(18)的计算结果代入式(10), 得到校正后的面雨量系列 $P'_{c,\rho}$ 和校正后的模型参数系

列 $\theta'_{c,\rho}$, 如式(19)、(20)

$$P'_{c,\rho} = P_{c,\rho} + \Delta P_\rho \quad (19)$$

$$\theta'_{c,\rho} = \theta_{c,\rho} + \Delta \theta_\rho \quad (20)$$

将校正后的 $P'_{c,\rho}$ 和 $\theta'_{c,\rho}$ 重新输入预报模型, 便可得到校正后的流域出口断面流量过程 $Q'_{c,\rho}(t)$ 为

$$Q'_{c,\rho}(t) = f[P'_{c,\rho}, \theta'_{c,\rho}, t] \quad (21)$$

2 应用验证

2.1 流域概况及资料情况

选取淮河支流白露河上的北庙集流域作为实验流域, 构建流域雨量站密度与洪水预报误差分配比例之间的定量关系; 选取与白露河临近的潢川流域和黄泥庄流域作为应用流域, 基于实验流域的定量关系, 进行洪水预报实时校正方法的应用验证。流域所在位置及各流域主要站点分布情况见图 2。

北庙集流域属于白露河流域上游, 属山区丘陵区, 流域面积为 1 710 km²。北庙集流域 2016 年开始设立了 59 个加密观测雨量站, 雨量站密度较高, 本次研究收集到 2016—2017 年加密观测雨量及相应的 3 场完整降雨洪水资料, 据此建立雨量站密度与洪水预报误差分配比例关系。同时, 北庙集流域 2007—2015 年设有 10 个雨量站, 所以选取这段时期内资料较完善的 10 场洪水进行实时校正验证研究。

潢川流域与北庙集流域临近, 上游新县境内属深山区, 以下为浅山丘陵区, 流域面积 2 050 km²。流域内共 5 个雨量站, 类同于北庙集流域场次洪水挑选原则, 本次选取了 2003—2005 年资料完整的 10 场洪水进行实时校正验证研究。

黄泥庄流域与北庙集流域水文相似, 同为山区和丘陵区, 位于史河的上游, 流域面积 805 km²。流域内共有 6 个雨量站, 本次选取了 1980—2015 年该流域较大的 10 场洪水。

2.2 水文模型及评价指标

北庙集流域、潢川流域和黄泥庄流域, 均位于淮河南部的湿润地区, 所以本文采用国内广泛应用于湿润区的三水源新安江模型作为洪水预报模型^[26], 将其与全过程联合校正方法结合进行研究。为评估实时校正方法的效果, 采用以下 4 项指标

(1) 洪峰相对误差

$$\Delta Q_m = [(Q_{m,obs} - Q_{m,c}) / Q_{m,obs}] \times 100\% \quad (22)$$

(2) 次洪径流深相对误差

$$\Delta R = [(R_{obs} - R_c) / R_{obs}] \times 100\% \quad (23)$$

(3) 确定性系数

$$N_S = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - Q_c(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}]^2} \quad (24)$$

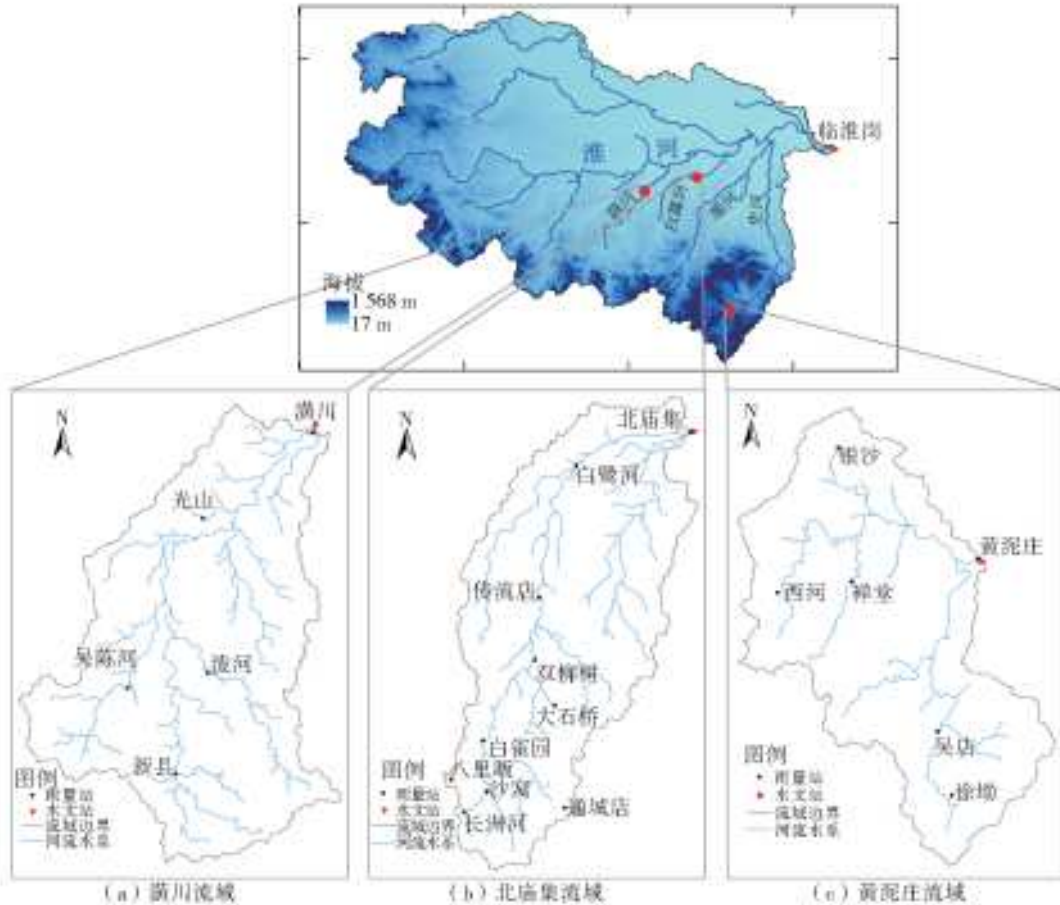


图2 淮河三个典型流域雨量站分布

Fig. 2 Distribution of rain gauges in the three basins of Huaihe River

(4) 确定性系数平均提升幅度

$$INS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_{S_{后,i}} - N_{S_{前,i}}) / (1 - N_{S_{前,i}}) \times 100\% \quad (25)$$

式中： $Q_{m,obs}$ 、 $Q_{m,c}$ 分别为实测洪峰、计算洪峰； R_{obs} 、 R_c 分别为实测次洪径流深、计算次洪径流深； Q_{obs} 为实测流量均值； $N_{S_{前,i}}$ 、 $N_{S_{后,i}}$ 分别为第 i 场洪水校正前、校正后的确定性系数。

INS 指标反映了校正后确定性系数比校正前接近其最大值 1 的提升程度，该值越大，表明提升幅度越高，即校正效果越明显。

2.3 验证结果及分析

根据北庙集流域 2016—2017 年(3 场洪水)59 个雨量站的加密观测资料，按照 1.3 节中的方法和步骤，分别构建面雨量误差、模型误差与雨量站密度之间的定量关系，见图 3。其中，图 3(a)、3(b) 及 3(c) 分别为基于洪号 20160701、20160720 及 20170709 的 3 场洪水构建的定量关系，图 3(d) 为这 3 个定量关系的平均线。可以看出，根据 3 场次洪确定的关系彼此差别不大，可以用其平均线来代表，由此也说明，虽然不同年份的场次洪水大小可能差

异较大，但根据高密度站网获得的场次洪水资料建立的面雨量误差、模型误差与雨量站密度之间的这种定量关系是较为固定的。

借用图 3(d) 的定量关系，分别对北庙集流域 2007—2015 年的 10 场洪水(10 个雨量站)、潢川流域 2003—2005 年的 10 场洪水(5 个雨量站)和黄泥庄流域 1995—2015 年的 10 场洪水(6 个雨量站)进行验证研究。上述 30 场洪水全过程联合校正法的校正预报结果见表 3，同时，为了对比研究，表中也提供了使用 DSRC 方法只进行面雨量误差校正的结果。

由表 3 可知，校正前，新安江模型洪峰相对误差 ΔQ_m 在 $-20\% \sim +31\%$ 范围内，合格率(在 $\pm 20\%$ 内，下同)为 77%；次洪径流深相对误差 ΔR 在 $-9\% \sim +28\%$ 范围内，合格率 83%；确定性系数 N_s 在 0.73~0.96 范围内，平均约 0.85。经 DSRC 面雨量校正后， ΔQ_m 在 $-23\% \sim +18\%$ 内，合格率 97%； ΔR 在 $-10\% \sim +20\%$ 内，合格率 97%； N_s 在 0.79~0.97 内，平均 0.92。经本文全过程联合校正后， ΔQ_m 在 $-5\% \sim +22\%$ 内，合格率 97%； ΔR 在 $-3\% \sim +23\%$ 内，合格率 97%； N_s 在 0.90~0.99 内，平均 0.96。结果表明，两种校正方法均能降低

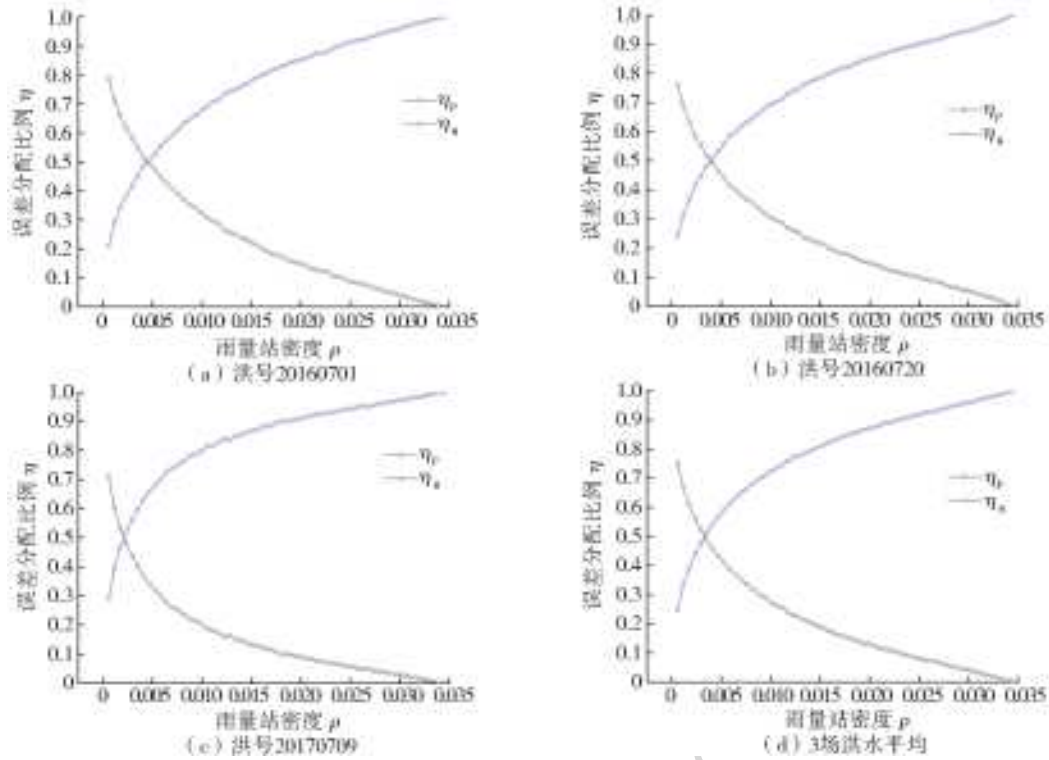


图 3 雨量站密度与误差分配比例的关系

Fig. 3 Relationships between the number of rain stations and the proportions of error allocation

表 3 淮河三个流域共 30 场洪水实时校正结果

Tab. 3 Real-time correction results of 30 floods in the three basins of Huaihe River

流域	场次	洪号	指标名称	实测值	模型预报法		面雨量误差校正法		全过程联合校正法	
					预报值	相对误差	计算值	相对误差	计算值	相对误差
北庙集 ($m=10, F=1\ 710\ \text{km}^2$) $\eta_p=38.74\%$ $\eta_s=61.26\%$	1	20070708	洪峰流量	1 490	1 379	7	1 492	0	1 391	7
			径流深	116	103	11	109	6	108	7
			N_s		0.77		0.79		0.92	
	2	20080816	洪峰流量	861	1 008	-17	1 061	-23	896	-4
			径流深	64	57	12	58	10	57	12
			N_s		0.82		0.83		0.91	
	3	20080830	洪峰流量	610	540	11	582	5	561	8
			径流深	40	37	9	39	3	38	4
			N_s		0.84		0.86		0.93	
	4	20090524	洪峰流量	340	274	19	319	6	315	7
			径流深	18	16	12	18	-2	18	2
			N_s		0.75		0.93		0.97	
	5	20100716	洪峰流量	485	456	6	501	-3	461	5
			径流深	26	22	13	24	5	24	7
			N_s		0.85		0.91		0.95	
	6	20120908	洪峰流量	537	437	19	521	3	478	11
			径流深	41	33	19	39	4	37	8
			N_s		0.75		0.92		0.93	
	7	20140712	洪峰流量	485	408	16	504	-4	444	8
			径流深	41	31	24	38	7	34	16
			N_s		0.74		0.88		0.90	
	8	20140831	洪峰流量	498	532	-7	500	0	481	3
			径流深	57	54	6	56	2	55	3
			N_s		0.92		0.97		0.98	

续表

流域	场次	洪号	指标名称	实测值	模型预报法		面雨量误差校正法		全过程联合校正法	
					预报值	相对误差	计算值	相对误差	计算值	相对误差
北庙集 ($m=10, F=1\ 710\text{ km}^2$) $\eta_p=38.74\%$ $\eta_D=61.26\%$	9	20150617	洪峰流量	512	436	15	539	-5	491	4
			径流深	42	34	19	41	1	37	11
			N_S		0.76		0.91		0.94	
	10	20150627	洪峰流量	948	1 013	-7	1 026	-8	961	-1
			径流深	66	64	3	64	2	65	2
			N_S		0.91		0.96		0.98	
潢川 ($m=5, F=2\ 050\text{ km}^2$) $\eta_p=55.43\%$ $\eta_D=44.57\%$	1	20030622	洪峰流量	705	776	-10	717	-2	705	0
			径流深	31	31	-1	29	6	30	4
			N_S		0.96		0.97		0.99	
	2	20030626	洪峰流量	380	425	-12	381	0	373	2
			径流深	24	23	2	21	10	22	8
			N_S		0.84		0.89		0.92	
	3	20030629	洪峰流量	2 180	1 846	15	2 411	-11	2 163	1
			径流深	103	85	17	102	1	96	6
			N_S		0.80		0.95		0.96	
	4	20030708	洪峰流量	1 750	1 220	30	1 899	-9	1 830	-5
			径流深	68	49	28	73	-9	70	-3
			N_S		0.73		0.97		0.99	
5	20040717	洪峰流量	1 070	1 279	-20	1 171	-9	1 067	0	
		径流深	71	74	-4	68	4	69	2	
		N_S		0.86		0.89		0.97		
6	20040805	洪峰流量	825	979	-19	894	-8	863	-5	
		径流深	32	32	-1	30	6	31	3	
		N_S		0.88		0.92		0.98		
7	20040814	洪峰流量	1 200	1 373	-14	1 276	-6	1 226	-2	
		径流深	65	67	-3	62	5	64	2	
		N_S		0.92		0.94		0.98		
8	20050513	洪峰流量	262	182	31	228	13	240	8	
		径流深	13	11	16	13	-3	13	0	
		N_S		0.80		0.94		0.98		
9	20050727	洪峰流量	600	656	-9	565	6	578	4	
		径流深	37	40	-9	36	4	37	-1	
		N_S		0.90		0.96		0.97		
10	20050821	洪峰流量	402	306	24	375	7	379	6	
		径流深	40	34	14	39	3	39	3	
		N_S		0.87		0.93		0.97		
黄泥庄 ($m=6, F=805\text{ km}^2$) $\eta_p=33.93\%$ $\eta_D=66.07\%$	1	19950519	洪峰流量	631	583	8	645	-2	606	4
			径流深	17	13	21	14	17	15	12
			N_S		0.92		0.93		0.97	
	2	19980523	洪峰流量	730	619	15	704	4	698	4
			径流深	17	17	-1	16	1	17	-1
			N_S		0.95		0.97		0.98	
	3	20000624	洪峰流量	444	374	16	472	-6	427	4
			径流深	12	9	25	11	14	10	22
			N_S		0.90		0.93		0.95	
	4	20030506	洪峰流量	635	746	-18	646	-2	607	4
			径流深	17	18	-5	15	10	17	-1
			N_S		0.83		0.94		0.96	

续表

流域	场次	洪号	指标名称	实测值	模型预报法		面雨量误差校正法		全过程联合校正法	
					预报值	相对误差	计算值	相对误差	计算值	相对误差
黄泥庄 ($m=6, F=805\text{km}^2$) $\eta_p=33.93\%$ $\eta_r=66.07\%$	5	20030622	洪峰流量	1 030	1 149	-12	1 053	-2	942	9
			径流深	23	21	10	19	20	20	13
			N_s		0.88		0.92		0.96	
	6	20050803	洪峰流量	1 050	1 094	-4	1 161	-11	1 026	2
			径流深	27	25	7	24	12	22	17
			N_s		0.89		0.92		0.95	
	7	20060722	洪峰流量	384	308	20	350	9	299	22
			径流深	11	10	7	12	-10	10	6
			N_s		0.88		0.89		0.95	
	8	20080622	洪峰流量	1 800	1 410	22	1 642	9	1 567	13
			径流深	38	28	25	31	18	29	23
			N_s		0.86		0.88		0.94	
	9	20100712	洪峰流量	944	908	4	964	-2	908	4
			径流深	30	29	3	29	4	30	2
			N_s		0.94		0.96		0.98	
10	20120713	洪峰流量	966	749	22	792	18	862	11	
		径流深	19	17	6	18	3	18	4	
		N_s		0.89		0.90		0.93		

注:表中洪峰流量单位为 m^3/s ,径流深单位为 mm ,相对误差单位为%。

初始的预报误差,提高预报精度。相较而言,对洪峰、洪量的校正,两种方法精度相当;而对确定性系数,全过程联合校正方法优于 DSRC 面雨量校正方法。

图 4 提供了三个流域新安江模型以及两种校正方法的 N_s 系数进行对比。可以看出,本文的全过程联合校正方法对所有场次洪水过程均能得到很好

的校正效果。

根据式(25)分别计算三个流域 10 场洪水校正后的确定性系数平均提升幅度 INS 值,结果见表 4,同时将三个流域的雨量站密度 ρ 值列于表中。可以发现,流域的雨量站密度 ρ 不同,INS 亦也有差异,其中,潢河流域 ρ 最低,校正后 INS 最大;黄泥庄流

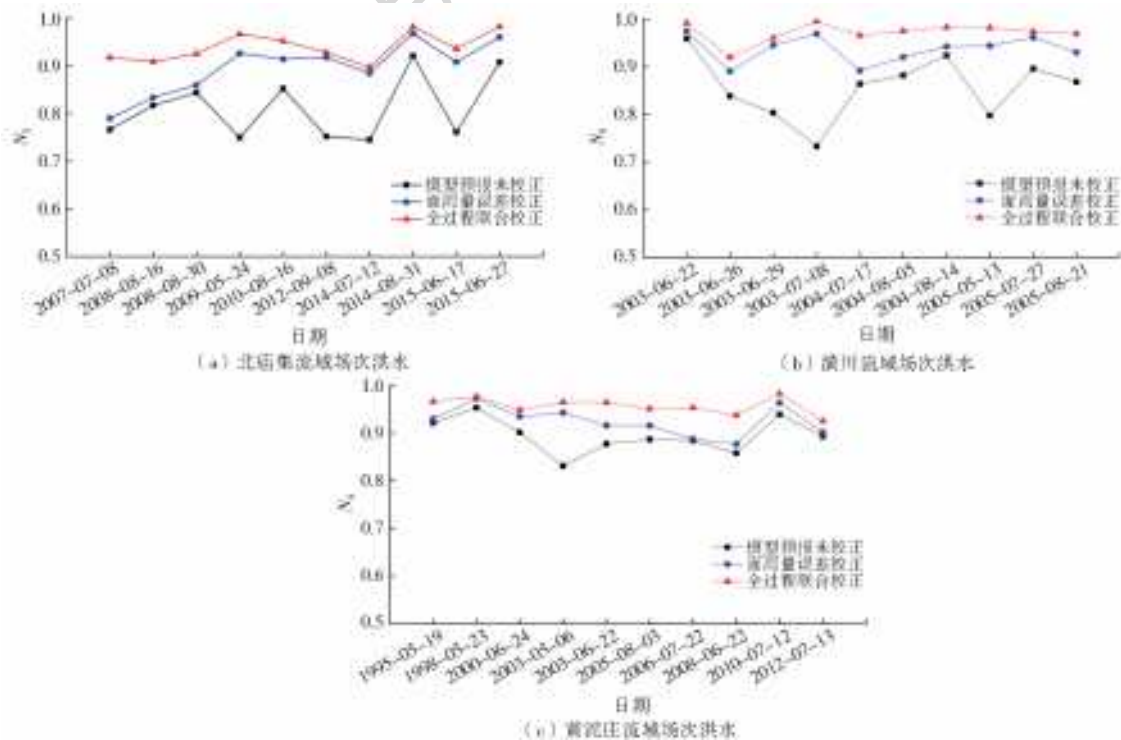


图 4 淮河三个流域共 30 场洪水实时校正 N_s 系数对比

Fig. 4 N_s coefficients of 30 real-time corrected floods in the three basins of Huaihe River

表 4 淮河三个流域确定性系数平均提高幅度

Tab. 4 The INS in the three basins of Huaihe River

流域	北庙集		潢川		黄泥庄	
$\rho=N/F$	10/1 710=0.005 8		5/2 050=0.002 4		6/805=0.007 5	
校正方法	DSRC 面雨量校正	全过程联合校正	DSRC 面雨量校正	全过程联合校正	DSRC 面雨量校正	全过程联合校正
INS/%	44	68	49	78	27	58

域 ρ 最大,校正后 INS 最小。初步表明,对于雨量站个数较少,即 ρ 较小的流域,校正效果提升更明显。

图 5 显示了潢川流域 2004 年 8 月 14 日的一场洪水(洪号为 20040814)校正前后的对比效果。图中 P 表示逐时段面雨量, Q_{obs} 表示实测流量过程, Q_1 表示新安江模型的预报流量过程, Q_2 表示 DSRC 面雨量校正后的流量过程, Q_3 表示全过程联合校正后的流量过程。

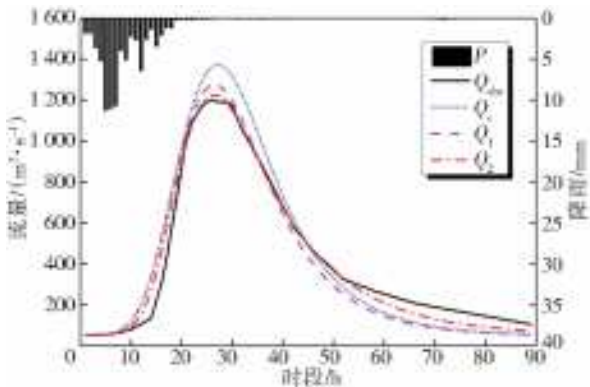


图 5 潢川流域 20040814 场初始预报及洪水校正结果

Fig. 5 Real-time correction Result of 20040814 flood in the Huangchuan basin

由图 5 可以看出,两种方法对于该场洪水均具有较好的校正效果。相较而言,全过程联合校正方法不论对洪峰还是洪水过程的校正,效果更为理想,一定程度上说明了将洪水预报总误差分解到预报各子过程(如面雨量误差、模型误差),再进行联合校正的做法更为合理,可进一步提高精度。

3 结 论

(1)本文基于系统响应理论,提出了一种全过程联合校正新方法。通过对洪水预报各环节误差(如输入误差、模型参数误差等)的联合校正,避免将终端误差(总误差)指定为其中一种误差的硬性做法。该方法物理意义明确,概念上更合理。

(2)在淮河三个典型流域的验证结果表明,整体而言,全过程联合校正方法可以进一步提升实时洪水预报的校正效果,具有较好的适用性。分析发现,流域的雨量站密度越低,确定性系数提高幅度越大。

(3)作为示例,本文将全过程联合校正方法在淮

河典型流域进行了应用,其做法也适用于其他流域的洪水预报的实时修正,但应用本方法,需要建立雨量站密度与洪水预报误差分配比例之间的定量关系。随着我国水文站网密度日益提高,特别是近些年,中小河流洪水预报和山洪防治工作的开展,水文站网密度得到很大提升,可以满足本文方法的应用条件。

参考文献(References):

- [1] 方修琦,陈莉,李帅. 1644—2004 年中国洪涝灾害主周期的变化[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 656-661. (FANG X Q, CHEN L, LI S. Changes of dominant periods of flood disaster in China during 1644 to 2004[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 656-661. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1001-6791.2007.05.004.
- [2] 刘国纬. 论防洪减灾非工程措施的定义与分类[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 98-103. (LIU G W. Definition and classification of non-structure measures for flood prevention[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(1): 98-103. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1001-6791.2003.01.017.
- [3] 张建业. 中国水文预报技术发展的回顾与思考[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 435-443. (ZHANG J Y. Review and reflection on China's hydrological forecasting techniques[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 435-443. (in Chinese))
- [4] 覃光华,王建华,赵英林. 实时洪水预报研究综述及展望[J]. 城市道桥与防洪, 1999, 27(4): 35-39. (TAN G H, WANG J H, ZHAO Y L. Summary and prospect of real-time flood forecast study[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 1999, 27(4): 35-39. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1006-1436.2006.08.092.
- [5] 田雨,雷晓辉,蒋云钟,等. 洪水预报实时校正技术研究综述[J]. 人民黄河, 2011, 33(3): 25-26. (TIAN Y, LEI X H, JIANG Y Z, et al. Review of real-time correction techniques for flood prediction[J]. Yellow River, 2011, 33(3): 25-26. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2011.03.010.
- [6] 李蝶娟,周冰清. 自回归总径流线性响应模型在洪水预报中的应用[J]. 水科学进展, 1992, 3(2): 142-148. (LI D J, ZHOU B Q. ATLR model and its application in flood prediction[J]. Advances in Water Science, 1992, 3(2): 142-148. (in Chinese))

- [7] 郭磊,赵英林. 基于误差自回归的洪水实时预报校正算法的研究[J]. 水电能源科学, 2002, 20(3): 25-27. (GUO L, ZHAO Y L. Study on adjustment methods of real-time flood forecasting in view of autoregressive model[J]. Water Resources and Power, 2002, 20(3): 25-27. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7709. 2002. 03. 009.
- [8] 瞿思敏,包为民,石朋,等. AR 模式误差修正方程参数抗差估计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 497-500. (QU S M, BAO W M, SHI P, et al. Robust estimation of parameters for AR model error correction equation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(5): 497-500. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn:1000-1980. 2003. 05. 004.
- [9] 梁忠民,栾承梅,李致家. 线性动态系统模型在实时洪水预报中的应用[J]. 水力发电, 2003, 29(6): 16-18. (LIANG Z M, LUAN C M, LI Z J. Application of a linear dynamic system model in real-time flood forecasting[J]. Water Power, 2003, 29(6): 16-18. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2003. 06. 005.
- [10] 梁忠民,董增川,王建群,等. 西辽河实时洪水统计预报模型[J]. 水利水电技术, 2004, 35(8): 8-10. (LIANG Z M, DONG Z C, WANG J Q, et al. Statistical model of real-time flood prediction for the western Liaohe River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(8): 8-10. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0860. 2004. 08. 003
- [11] 周轶,菅浩然,李致家,等. 基于递推最小二乘改进算法的洪水预报模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(1): 77-80. (ZHOU Y, JIAN H R, LI Z J, et al. Flood forecasting model based on improved recursive least square method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(1): 77-80. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn:1000-1980. 2007. 01. 019.
- [12] 葛守西. 一般线性汇流模型实时预报方法的初步探讨[J]. 水利学报, 1985(4): 1-9. (GE S X. The preliminary study of forecasting method on real time for general linear model of flow concentration [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985(4): 1-9. (in Chinese))
- [13] 陆波. 流域水文模型与卡尔曼滤波耦合实时洪水预报研究[D]. 南京:河海大学, 2006. (LU B. Study on the real-time flood forecast by watershed hydrological model coupled with Kalman filter technique [D]. HoHai University, 2006. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/d. y911874.
- [14] DECHANT C M, MORADKHANI H. Examining the effectiveness and robustness of sequential data assimilation methods for quantification of uncertainty in hydrologic forecasting[J]. Water Resources Research, 2012, 48(4): 4518-4532. DOI: 10. 1029/2011WR011011.
- [15] 包为民,司伟,沈国华,等. 基于单位线反演的产流误差修正[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 317-322. (BAO W M, SI W, SHEN G H, et al. Runoff error updating based on unit hydrograph inversion[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 317-322. (in Chinese))
- [16] BAO W M, SI W, QU S M. Flow updating in real-time flood forecasting based on runoff correction by a dynamic system response curve[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(4): 747-756. DOI: 10. 1061/(asce)he. 1943-5584. 0000848.
- [17] 司伟,包为民,瞿思敏. 洪水预报产流误差的动态系统响应曲线修正方法[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 497-503. (SI W, BAO W M, QU S M. Runoff error correction in real-time flood forecasting based on dynamic system response curve[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 497-503. (in Chinese))
- [18] 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 W M, QUE J J, LAI S Z, 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)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2015. 03. 008.
- [19] SI W, BAO W, GUPTA H V. Updating real-time flood forecasts via the dynamic system response curve method[J]. Water Resources Research, 2015, 51(7): 5128-5144. DOI: 10. 1002/2015WR017234.
- [20] 司伟,余鸿慧,包为民,等. 面平均雨量的系统响应曲线修正方法及其在富春江流域洪水预报中的应用[J]. 水力发电学报, 2016, 35(1): 38-45. (SI W, YU H H, BAO W M, et al. Area-mean rainfall updating by system response curve method and application to real-time flood forecasting of Fuchunjiang basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(1): 38-45. (in Chinese)) DOI: 10. 11660/slfdx. 20160105.
- [21] 包为民,孙逸群,周俊伟,等. 基于总体最小二乘法的系统响应修正方法[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 560-567. (BAO W M, SUN Y Q, ZHOU J W, et al. A new version of system response method for error correction based on total least squares[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(5): 560-567. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20160532.
- [22] 司伟,包为民,瞿思敏,等. 基于面平均雨量误差修正的实时洪水预报修正方法[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 533-541. (SI W, BAO W M, QU S M, et al. Real-time flood forecast updating method based on mean areal rainfall error correction[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(2): 533-541. (in Chinese)) DOI: 10. 18307/2018. 0224.

(下转第 17 页)

- network in the forecasting of urban water consumption [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2007, 33(S1): 110-115. (in Chinese) DOI: 10. 13789/j. cnki. wwel964. 2007. s1. 020.
- [19] ZUBAIDI S L, DOOLEY J, ALKHADDAR R M, et al. A Novel approach for predicting monthly water demand by combining singular spectrum analysis with neural networks [J]. *Journal of Hydrology*, 2018 (561): 136-145. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2018. 03. 047.
- [20] 张德贤. 前向神经网络合理隐含层结点个数估计[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(5): 21-23. (ZHANG D X. A new approach for efficient estimation of the number of hidden units for feedforward neural network[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(5): 21-23. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn:1002-8331. 2003. 05. 007.
- [21] 储诚山, 张宏伟, 郭军. 基于遗传算法和 BP 神经网络的用水量预测[J]. *中国农村水利水电*, 2006(4): 36-38. (CHU C S, ZHANG H W, GUO J. Prediction of water demand with genetic algorithm and BP neural network[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2006(4): 36-38. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2006. 04. 015.
- [22] FIRAT M, YURDUSEV M A, TURAN M E. Evaluation of artificial neural network techniques for municipal water consumption modeling [J]. *Water Resources Management*, 2019, 23(4): 617-632. DOI: 10. 1007/s11269-008-9291-3.
- [23] 冀荣华, 李鑫, 张舒蕾, 等. 基于时延神经网络的多深度土壤含水率预测[J]. *农业工程学报*, 2017(33): 132-136. (JI R H, LI X, ZHANG S L, et al. Prediction of soil moisture in multiple depth based on time delay neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017(33): 132-136. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2017. z1. 020.
- [24] 占敏, 薛惠锋, 王海宁, 等. 贝叶斯神经网络在城市短期用水预测中的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(3): 73-79. (ZHAN M, XUE H F, WANG H N, et al. Application of Bayesian neural network to prediction of urban short-term water consumption [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(3): 73-79. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 03. 013.
- [25] 张瑞她, 张庆华, 蒋磊, 等. 山东省 2001 年—2010 年用水趋势与影响因素分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(2): 37-40. (ZHANG R T, ZHANG Q H, JIANG L, et al. Analysis of water consumption trend and its impact factors from 2001 to 2010 in Shandong Province[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(2): 37-40. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2014. 02. 009.
- [26] 孙勇, 徐祖信. 城市用水量预测影响因素分类以及对预测目标的权重分析[J]. *能源环境保护*, 2008, 34(4): 59-61. (SUN Y, XU Z X. Impact factors classification Urban water consumption forecast and priority weight analysis for forecasting target[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2008, 34(4): 59-61. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-8471. 2008. z2. 031.
- [27] 梁振东, 何晓静, 方红远. 基于聚类线性回归法的区域用水量影响因素分析[J]. *海河水利*, 2016(3): 32-36. (LIANG Z D, HE X J, FANG H Y. Analysis on impacting factors of regional water resources utilization based on clusterwise linear regression method[J]. *Haihe Water Resources*, 2016(3): 32-36. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-8471. 2008. z2. 031.

(上接第 10 页)

- [23] 刘可新, 张小琴, 包为民. 产流误差平稳矩阵的系统响应修正方法[J]. *水利学报*, 2015, 8(46): 960-966. (LIU K X, ZHANG X Q, BAO W M, et al. A system response correction method with runoff error smooth matrix[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 8(46): 960-966. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20141128.
- [24] SUN Y, BAO W, JIANG P, et al. Development of a regularized dynamic system response curve for real-time flood forecasting correction[J]. *Water*, 2018, 10(4): 450. DOI: 10. 3390/w10040450.
- [25] LAWSON C L, HANSON R J. Solving least squares problems[M]. Prentice-Hall, 1974. DOI: doi: http://dx. doi. org/
- [26] 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. (ZHAO R J. Watershed hydrological simulation: Xin'anjiang model and northern Shaanxi model[M]. Beijing: Water Conservancy and Electricity Press, 1984. (in Chinese))