

基于EnKF的无实测资料区间支流反分析

王家彪¹, 赵建世¹, 雷晓辉², 王浩^{1,2}, 魏隽煜¹, 廖卫红²

(1. 清华大学, 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 区间入流误差是河道洪水演算不确定性来源之一。为此, 一部分研究基于水动力模型和数据同化方法对区间总入流误差进行动态修正, 但无法推算出某条支流的单独入流过程; 另一部分研究通过从下游往上游反算水流的方式推算区间支流入流, 但反算结果稳定性差, 对边界条件误差敏感, 推算的入流过程误差较大。针对上述问题, 本文提出了基于集合卡尔曼滤波(EnKF)的区间支流反分析方法。方法由一维河道水动力模型正、反向水流演算初步估算支流入流, 并构建监测断面滞时矩阵, 计算水流扰动传播时间, 从而确定用于支流入流校正的流量监测值。当EnKF校正的结果仍然存在较大误差时, 可再次运用EnKF对首次校正结果进一步校正。将该方法应用于理想案例和西江实例, 推算的支流入流过程与实测过程十分接近, 入流结果 R^2 和 NSE 皆在0.99以上, 相对 $RMSE$ 也小于0.05。结果表明, 本文提出方法可准确计算出无实测资料的区间支流入流过程, 研究结果对于提高河道洪水演算精度具有重要意义。

关键词: 反问题; 数据同化; 反向水流计算; 滞时矩阵; EnKF

中图分类号: TV122

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20190442

1 研究背景

河道水流计算模型是洪水管理与水库调度的重要工具。随着流域数字化与洪水管理需求的不断提高, 水动力模型已广泛应用于河道汇流演算以获取更实时精细的水流动态信息^[1-2]。采用水动力模型计算河道水流存在诸多不确定性, 其误差来源主要包括上下游边界条件, 区间入流以及河道糙率信息。对于很多河道尤其是山区小河道而言, 其区间支流虽然可通过现场勘测或遥感等方式确定具体位置^[3], 但入流过程往往缺少实测资料, 来自于支流入流的误差严重降低了水流计算精度。准确分析出支流入流过程对提高河道水流计算精度意义重大。

采用水文学方法汇流演算时, 通常由水文模型产流模拟或直接从河道入流与出流量差推算出区间总入流, 入流系列时间间隔一般在小时以上, 其精度和时间尺度都不足以满足洪水实时管理的需求^[4-7]。采用水动力学方法进行汇流演算时, 区间入流常作为圣维南方程组的反问题进行求解^[8]。已有部分研究借助于水文模型等方式获取初始区间入流信息, 并基于水动力模型和数据同化方法对初始入流误差进行动态修正^[5,9-10]。如, 张蕾等^[11]与李光炽等^[12]基于离散的圣维南方程推导出区间入流校正量的解析表达式, 然后由主干河道实测水位、流量过程动态修正入流过程; 吴晓玲等^[13]认为在河道水流实时校正中得到的系统噪声均值是由区间入流不精确引起, 由此基于卡尔曼滤波方法对区间入流初始值动态修正。虽然上述工作取得了一定成效, 但由于区间水量不平衡误差同时受到

收稿日期: 2019-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(91747208; 51579129)

作者简介: 王家彪(1990-), 博士生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: waterwhu@foxmail.com

通讯作者: 雷晓辉(1974-), 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源、水库调度及水力控制等研究。

E-mail: lxh@iwhr.com

上下游边界条件、河道地形、模型参数等多方面影响，该类方法难以确定具体的误差来源，推算的区间入流不够可靠。另外，从总水量平衡进行修正，无法直接确定某条支流的单独入流过程。为此，有学者通过直接从下游往上游反算水流的方式推算区间支流入流，包括马斯京根反演^[4,14-15]和反向求解圣维南方程组等^[16-17]。相对而言，这类水流反算结果稳定性较差^[14]，对下游边界条件误差敏感，推算的入流过程仍具有很大不确定性^[18]。

本文将数据同化应用于支流反分析研究中，采用集合卡尔曼滤波方法(EnKF)对水动力模型反算得到的支流入流结果进行校正。EnKF方法已广泛用于河道水文、水动力模型实时校正研究中^[19-24]，能动态校正流量水位误差、修正模型糙率系数，从而改善河道水流计算精度。本文首先以支流入流断面为界将河道划分为两段，分别采用一维河道水动力模型进行正、反向水流计算，根据入流断面流量差初步估算支流入流过程。然后，构建监测断面滞时矩阵，计算水流扰动传播时间，确定用于校正支流入流的监测断面流量观测值。考虑到EnKF校正的结果仍可能存在较大误差，研究二次运用EnKF对首次校正结果进一步校正，以提高支流计算精度。

2 水流计算

本文通过求解圣维南方程组计算非恒定水流，水流计算方程如下：

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{2A^2} \right) + g \frac{\partial Z}{\partial x} + g S_f = 0 \quad (2)$$

式中： t 为计算时间，s； x 为纵向坐标，m； A 为过流断面面积， m^2 ； B 为水面宽度，m； Q 为过流流量， m^3/s ； q 为区间入流量， $m^3/(s \cdot m)$ ； Z 为断面水位，m； S_f 为摩阻坡度，由下式(3)得到：

$$S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{AR^{4/3}} \quad (3)$$

式中： n 为河床糙率系数； R 为过流断面水力半径，m。

方程采用四点偏心隐格式差分方法求解(图1)，离散方程(1)和(2)。

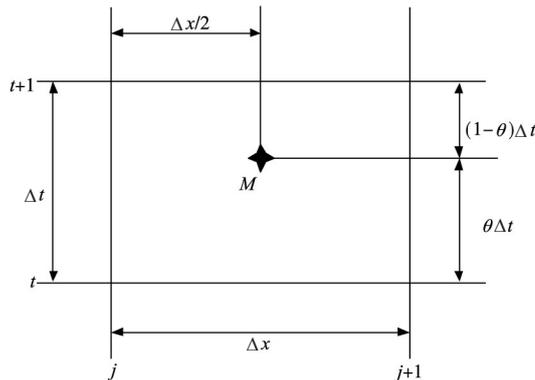


图1 普里斯曼差分格式离散

对任意离散河段 j ，可得到线性方程组，

$$a_{2j-1}^1 Q_j + a_{2j-1}^2 Z_j + a_{2j-1}^3 Q_{j+1} + a_{2j-1}^4 Z_{j+1} = b_{2j-1} \quad (4)$$

$$a_{2j}^1 Q_j + a_{2j}^2 Z_j + a_{2j}^3 Q_{j+1} + a_{2j}^4 Z_{j+1} = b_{2j} \quad (5)$$

式中： Q_j 、 Z_j 分别为第 j 断面 $t+1$ 时刻的流量和水位值；系数 a_{2j-1}^i ， a_{2j}^i ，以及 b_{2j-1} ， b_{2j} ($i=1, 2, 3, 4, j=1, 2, \dots, N$)由上一时步流量水位确定，计算公式如下：

$$a_{2j-1}^1 = -a_{2j-1}^3 = -1, \quad ,$$

$$\begin{aligned}
a_{2j-1}^2 &= a_{2j-1}^4 = \frac{B_{j+1/2}^t \Delta x}{2\Delta t \theta} \\
b_{2j-1} &= q_{j+1/2} \Delta x - \frac{1-\theta}{\theta} (Q_{j+1}^t - Q_j^t) + a_{2j-1}^2 (Z_{j+1}^t + Z_j^t) \\
a_{2j}^1 &= \frac{\Delta x}{2\Delta t \theta} - \left(\frac{Q}{A}\right)_j^t + \left(\frac{g|Q/A|n^2}{2\theta R^{4/3}}\right)_j^t \Delta x \\
a_{2j}^3 &= \frac{\Delta x}{2\Delta t \theta} + \left(\frac{Q}{A}\right)_{j+1}^t + \left(\frac{g|Q/A|n^2}{2\theta R^{4/3}}\right)_{j+1}^t \Delta x \\
a_{2j}^2 &= -a_{2j}^4 = -g(A_j + A_{j+1})/2 \\
b_{2j} &= \frac{\Delta x}{2\Delta t \theta} (Q_{j+1}^t + Q_j^t) - \frac{1-\theta}{\theta} \left[\left(\frac{Q^2}{A}\right)_{j+1}^t - \left(\frac{Q^2}{A}\right)_j^t \right] + \frac{1-\theta}{\theta} a_{2j}^2 (Z_{j+1}^t - Z_j^t)
\end{aligned}$$

其中对于支流汇入情形, $q_{j+1/2} \Delta x$ 等于 $t+1$ 时刻支流入流 Q_L 。

在给定上下游边界条件和初始条件后, 可采用追赶法求解方程组(4)、(5), 实现水流的动态计算^[25]。

3 支流入流计算模型

3.1 支流入流初步计算 假定河道断面 j 处有支流汇入, 且在下游断面 G 处有水位流量观测站点, 如图 2 所示。

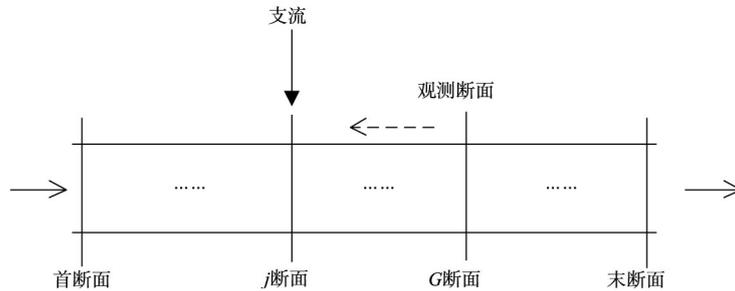


图 2 区间支流汇入断面与观测断面

由于无实测的支流入流资料, 因此需通过干流河道实测流量信息对支流入流进行估算。以支流汇入断面 j 为界, 将河道分成 $1-j$, $j-N$ 两段分别进行水流正、反向演算, 由断面 j 处支流入流前后的流量差推算支流入流。其中水流反向演算: 以 G 断面为上游、 j 断面为下游, 逆着水流方向(图 2 虚箭头)计算经支流汇流后 j 断面的流量。由于在反算支流时, j 断面的水位、流量过程未知, 因此可通过近似拟合该断面处的 $Q-Z$ 关系曲线作为分段河道的边界条件, 具体步骤如下:

(1) 以首断面 1 处实测流量 $Q_1(t)$ 、末断面 N 处实测水位 $Z_N(t)$ (或该处 $Q-Z$ 关系曲线) 为边界条件, 对全河段 $1-N$ 进行水流模拟计算, 得到支流汇入断面 j 处流量、水位过程。拟合 j 断面 $Q-Z$ 关系曲线, 作为 $1-j$ 河段水流计算下边界条件。其中, $Q-Z$ 关系曲线采用如下常用指数形式^[26]:

$$Q = \alpha (Z + \beta)^\gamma \quad (6)$$

式中, α 、 β 和 γ 为经验拟合系数。

当 j 断面 $Q-Z$ 关系曲线已知时, 此步骤可省略。

(2) 以首断面 1 处实测入流量、下游断面 j 处 $Q-Z$ 关系曲线为边界条件, 计算支流汇入前的断面 j 处流量 $Q_j(t)$ 和水位过程 $Z_j(t)$ 。

(3) 以监测断面 G 处实测流量过程 $Q_G(t)$ 为上边界条件, 步骤(2)计算的断面 j 处水位过程 $Z_j(t)$

(反向水流计算对边界条件敏感, 若将步骤(1)得到的断面 j 处 $Q-Z$ 关系曲线作为边界条件, 反向结果不稳定)近似为下边界条件, 从下游至上游反向计算支流汇入后的断面 j 处流量过程 $-Q'_j(t)$ (此时, $G-j$ 河段计算的流量皆为负值)。

(4)由步骤(3)计算的断面 j 处流量过程 $-Q'_j(t)$ 减去步骤(2)计算的断面 j 处流量过程 $Q_j(t)$, 可初步计算出断面 j 处支流入流流量:

$$Q_L^0(t) = -Q'_j(t) - Q_j(t) \quad (7)$$

3.2 监测断面滞时矩阵 支流汇入河道后随干流传播至监测断面, 其误差产生的影响需一定传播时间才能在断面 G 处观测到, 存在滞时响应的问题^[27]。由数据同化方法对支流入流进行校正时, 采用的观测断面 G 处实测值应尽可能地包含当前时刻支流误差扰动信息。用于校正的监测值 $Q_G(t_c)$ 与支流入流值 $Q_L(t_j)$ 存在如下时间滞后关系:

$$t_c = t_j + Tr_{j-G} \quad (8)$$

式中, Tr_{j-G} 为断面 j 处支流扰动传播至断面 G 处时间(即滞时), Tr_{j-G} 的大小可通过对 t_j 时刻支流入流值 $Q_L(t_j)$ 按比例施加正态分布扰动后, 由断面 G 处出现最大波动的时间来确定:

$$Q'_L(t_j) = Q_L(t_j) + er(t), \quad er(t) \sim N\left(0, h^2 Q_L(t_j)^2\right) \quad (9)$$

每一 t_j 时刻汇入的支流都会对于流产生水流扰动信息, 并且在 t_c 时刻传播至监测断面, 由此可得到监测断面对支流入流的滞时矩阵:

$$Tr(t) = \begin{bmatrix} Tr_{j-G}(\Delta t, 1) & \cdots & Tr_{j-G}(\Delta t, nG) \\ \vdots & & \vdots \\ Tr_{j-G}(T\Delta t, 1) & \cdots & Tr_{j-G}(T\Delta t, nG) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $Tr(t)$ 为 t 时刻的滞时矩阵; nG 为监测断面数, 本文考虑单个监测断面, 即 $nG=1$; T 为总计算时步。

3.3 集合卡尔曼滤波校正 集合卡尔曼滤波方法(EnKF)由 Monte-Carlo 抽样生成集合样本模拟校正变量均值和误差协方差^[28], 并通过不断引入观测数据对模型预测值进行动态校正。根据 3.1 节支流初步计算结果以及 3.2 节监测断面滞时矩阵, 运用 EnKF 对支流初值进行校正, 步骤如下(图 3):

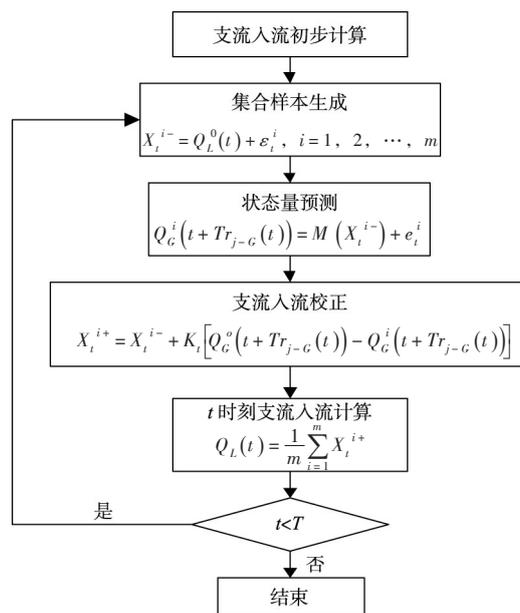


图3 基于 EnKF 的支流反分析流程

(1) 支流入流初值。由 3.1 节方法计算 t 时刻支流入流 $Q_L^0(t)$ ，并由滞时矩阵(10)确定用于 t 时刻校正的干流观测值 $Q_G^o(t + Tr_{j-g}(t))$ 。

(2) 集合样本生成。利用 Monte-Carlo 抽样方法生成 t 时刻集合样本：

$$X_t^{i-} = Q_L^0(t) + \varepsilon_t^i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

式中： m 为集合样本数，取为 50； ε_t^i 随机扰动， $\varepsilon_t^i \sim N(0, R_t)$ ， R_t 为模型预测误差协方差；负上标代表校正前状态变量。

(3) 状态量预测。由第 2 节水流计算模型计算不同支流流量 X_t^{i-} 对应的 $t + Tr_{j-g}(t)$ 时刻观测断面 G 处流量 $Q_G^i(t + Tr_{j-g}(t))$ ：

$$Q_G^i(t + Tr_{j-g}(t)) = M(X_t^{i-}) + e_t^i \quad (12)$$

式中， e_t^i 表示观测误差， $e_t^i \sim N(0, E_t)$ ， E_t 代表观测误差协方差。

(4) 支流入流校正。

$$X_t^{i+} = X_t^{i-} + K_t [Q_G^o(t + Tr_{j-g}(t)) - Q_G^i(t + Tr_{j-g}(t))] \quad (13)$$

式中：正上标代表校正后状态变量； K_t 为增益系数，满足：

$$K_t = \text{cov}(X_t^{i-}, Q_G^o(t + Tr_{j-g}(t))) [\text{cov}(Q_G^o(t + Tr_{j-g}(t)), Q_G^o(t + Tr_{j-g}(t))) + E_t]^{-1} \quad (14)$$

(5) 支流入流计算。计算 t 时刻支流入流量 $Q_L(t)$ ：

$$Q_L(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_t^{i+} \quad (15)$$

(6) 转入下一时步 $t+1$ 时刻。

采用 EnKF 数据同化时，初值对校正结果影响很大，在初始集合均值与真值偏差较大时，EnKF 不能得到最优分析^[29]。在应用上述方法进行支流反分析时，若初始估算结果误差较大时，EnKF 校正结果很可能仍存在很大误差。此时可将步骤(1)中由水动力模型反算的支流入流初值替换为 EnKF 首次校正结果，降低初值误差，对支流入流进行二次校正，以进一步改善支流推算精度。

3.4 评价指标 本文采用相关系数 R^2 ，相对均方根误差 $\left(\frac{RMSE}{\bar{O}}\right)$ 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 (NSE) 三项误差指标评价模型模拟效果，计算公式如下：

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{t=1}^T (O_t - \bar{O})(M_t - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (O_t - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^T (M_t - \bar{M})^2}} \right)^2 \quad (16)$$

$$\frac{RMSE}{\bar{O}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (O_t - M_t)^2}}{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T O_t} \quad (17)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (O_t - M_t)^2}{\sum_{t=1}^T (O_t - \bar{O})^2} \quad (18)$$

式中： M_t 为模拟值； O_t 为实测值。

4 模型应用

4.1 理想案例 假设有一棱柱形梯形断面河道，底宽 10 m，边坡 2，底坡 1/10000，糙率系数 0.017。河道全长 20 km，在距离上游入口 8 km 处有一支流汇入，在距离上游入口 16 km 处设有水文观测站

点。干流观测断面和支流入流流量过程如图4所示(在理想案例中,支流入流不考虑观测误差,监测流量实际由水动力模型正向模拟得到)。

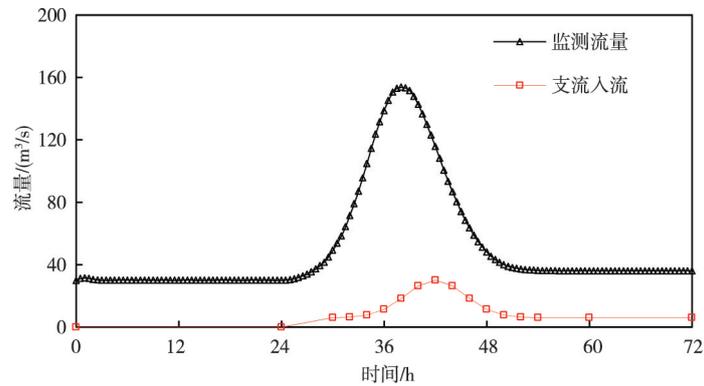


图4 理想案例干流监测断面与支流流量过程

4.1.1 支流初步计算和滞时矩阵确定 首先,根据3.1节所述方法计算支流入流初值。然后,对入流初值人为施加不同程度的扰动(式(9)中 h 取不同值),确定监测断面滞后响应时间。其中,支流峰值时刻(42 h)产生的扰动在监测断面的响应过程如图5所示。图5中可看出,虽然绝对扰动程度不同,但支流峰值时刻产生的扰动都在22 min左右对监测断面水流产生了最大干扰,此时监测断面观测的流量值应包含了最多的支流入流信息。因此,对应于峰值时刻的滞时 Tr_{j-G} 取为22 min。

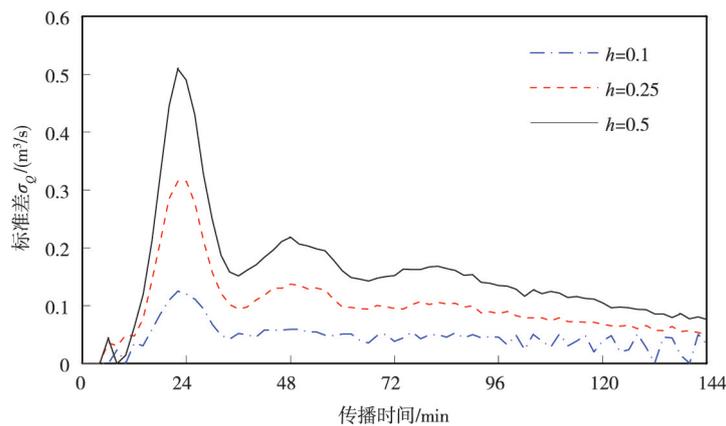


图5 支流峰值时刻扰动在监测断面处的响应过程

4.1.2 EnKF校正结果 根据支流入流初步计算结果以及监测断面滞时矩阵,由3.3节EnKF校正方法对支流入流初值进行校正,校正结果见图6。

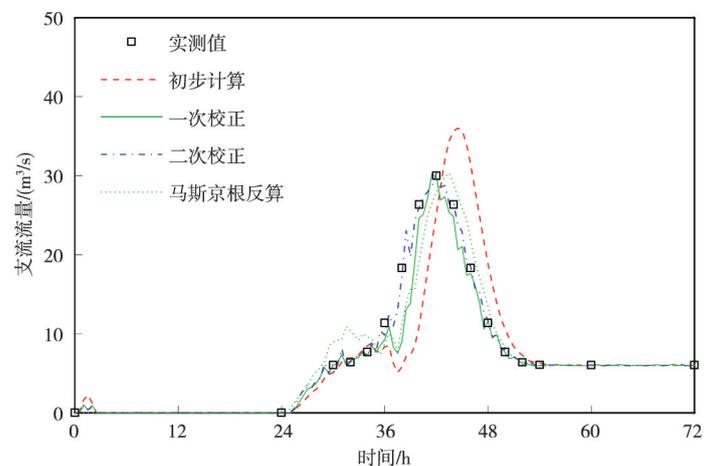


图6 理想案例支流反分析计算结果

结果表明，仅由水动力模型初步计算的支流入流存在很大误差，峰值和峰现时间都严重偏离实测入流过程；但经两次 EnKF 校正后，支流入流基本与实际过程相吻合。其中，第一次校正后，所得结果相对均方根误差仍然偏大，校正的支流入流在 38 h 左右与实测过程出现了较大偏离；经过 EnKF 再次校正后，偏离情况明显得到改善，最终计算结果相对均方根误差收敛至 5% 以内。基于 EnKF 的支流反分析校正结果误差指标见表 1。此外，表 1 和图 6 中还给出了采用马斯京根方法反算的支流入流结果。对比结果表明，仅经一次 EnKF 校正后所推算的支流入流即比马斯京根反算的入流精度更高。此外，马斯京根反算方法对入流误差敏感，当误差较大时，反算结果出现负值^[14]。

表 1 理想案例支流入流反分析结果误差评价

		R^2	$RMSE/\bar{O}$	NSE	
无误差结果	初步计算	0.5415	0.5646	0.3756	
	一次校正	0.9330	0.2023	0.9198	
	二次校正	0.9963	0.0441	0.9962	
	马斯京根反算	0.8609	0.2681	0.8607	
入流边界	$a_1=0.1\%$	初步计算	0.5409	0.5652	0.3743
		一次校正	0.9519	0.1684	0.9444
		二次校正	0.9870	0.0871	0.9851
	$a_1=1\%$	初步计算	0.5332	0.5767	0.3486
		一次校正	0.9339	0.1977	0.9235
		二次校正	0.9776	0.1105	0.9761
观测断面	$a_2=0.1\%$	初步计算	0.5373	0.5705	0.3624
		一次校正	0.9367	0.1889	0.9301
		二次校正	0.9982	0.0422	0.9965
	$a_2=1\%$	初步计算	0.5502	0.5582	0.3898
		一次校正	0.9435	0.2496	0.8780
		二次校正	0.9467	0.1876	0.9310
组合误差	$a_1=0.1\%, a_2=0.1\%$	初步计算	0.5368	0.5710	0.3613
		一次校正	0.9033	0.2356	0.8913
		二次校正	0.9912	0.0690	0.9907
	$a_1=0.1\%, a_2=1\%$	初步计算	0.5495	0.5590	0.3881
		一次校正	0.9264	0.2430	0.8843
		二次校正	0.9469	0.2067	0.9163
	$a_1=1\%, a_2=0.1\%$	初步计算	0.5300	0.5825	0.3354
		一次校正	0.9311	0.2010	0.9209
		二次校正	0.9696	0.1261	0.9689
	$a_1=1\%, a_2=1\%$	初步计算	0.5418	0.5701	0.3635
		一次校正	0.9279	0.2551	0.8725
		二次校正	0.9412	0.2172	0.9067

4.1.3 观测误差影响分析 支流入流反分析过程中，正、反向水动力演算精度受观测资料误差影响，从而间接影响 EnKF 分析结果。同时，用于 EnKF 校正的观测断面流量过程会直接影响 EnKF 分析结果。研究分别考虑入流边界误差、观测断面流量误差以及两种误差同时存在时的反演结果，进一步分析观测误差对支流反算结果的影响，计算结果见表 1。流量观测误差通常与流量大小正相关^[30]，本文按比例 0.1% 和 1% 人工生成正态分布观测误差(式(19))：

$$Q(t) = Q_0(t) + e_Q(t), \quad e_Q(t) \sim N(0, aQ_0(t)) \quad (19)$$

式中 a 为比例系数，分别取值 0.1% 和 1%。

由表1可以看出，入流边界和观测断面误差都对支流反演精度有一定负面影响，其中观测断面误差较入流边界误差影响更大。尽管如此，在不同误差扰动情形下，本文方法推算的支流入流过程各项评价指标都很接近，本文方法对入流边界和观测断面流量误差不敏感。

4.2 实例应用 经理想案例验证后，将方法应用于西江流域浔江河段的实例中，以检验其实用性。浔江河段为西江主干河道，位于广西壮族自治区境内。该段河道沿程分布有平南、藤县、梧州等县市城镇，是西江流域洪水高发河段。本文主要分析大湟江口至长洲库区入口(距离大湟江口130.74 km)河段，其中距离大湟江口73.89 km处有支流蒙江汇入主干河道，在距离大湟江口96.19 km处有监测站点藤县水文站，具体位置如图7所示。

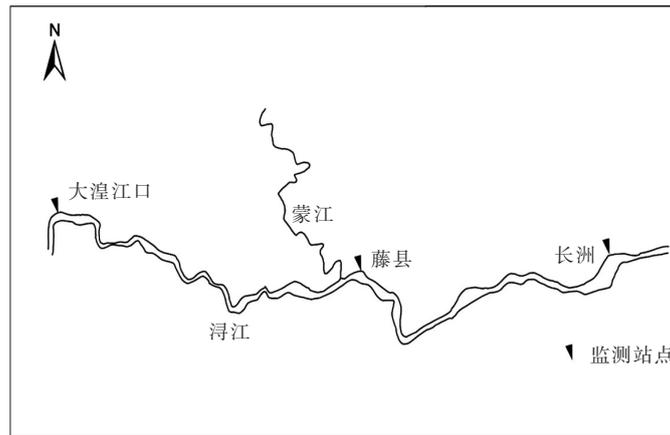


图7 浔江河段、支流及监测站点位置

研究分别选取大湟江口不同特征的三场次洪水进行分析，其中，蒙江汇入处干流断面 $Q-Z$ 关系曲线以及三场次洪水对应藤县水文站监测流量过程如图8所示。

采用第3节支流反分析方法计算支流蒙江入流过程，结果见图9和表2。

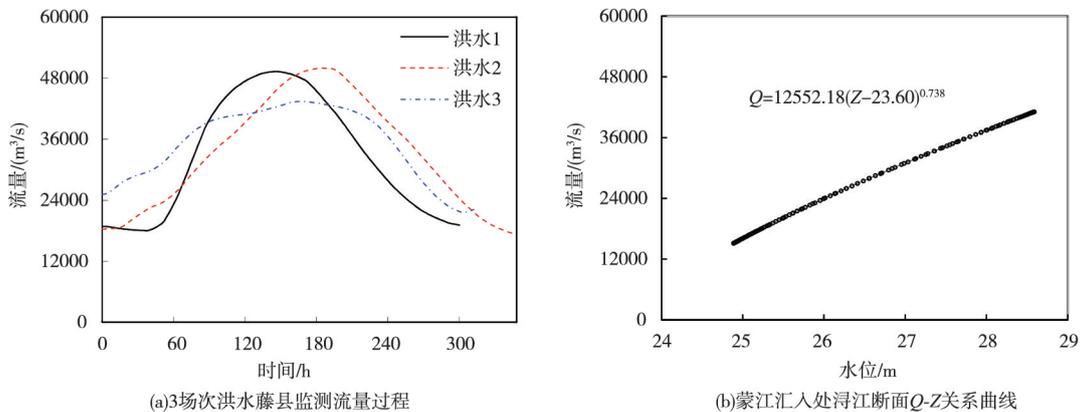


图8 三实测场次洪水过程及浔江断面 $Q-Z$ 关系曲线

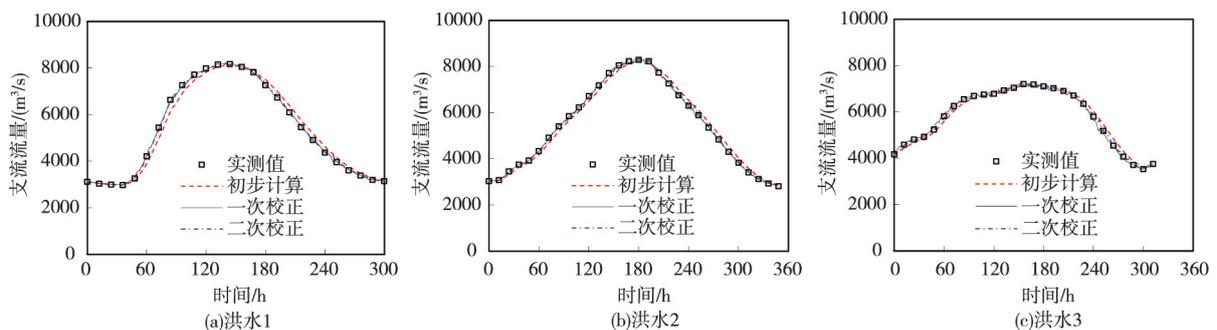


图9 浔江实例中支流蒙江入流反分析计算结果

表2 浔江实例中支流蒙江入流反分析结果误差评价

		R^2	$RMSE / \bar{O}$	NSE
洪水场次 1	初步计算	0.9869	0.0421	0.9868
	一次校正	0.9997	0.0064	0.9996
	二次校正	0.9995	0.0082	0.9995
洪水场次 2	初步计算	0.9910	0.0322	0.9910
	一次校正	0.9996	0.0078	0.9995
	二次校正	0.9990	0.0110	0.9989
洪水场次 3	初步计算	0.9869	0.0246	0.9866
	一次校正	0.9992	0.0061	0.9992
	二次校正	0.9987	0.0077	0.9987

图9和表2中结果表明,本文方法推算的三场次洪水其支流蒙江入流都与实测过程十分接近,支流推算精度高。综合图9和表2可看出,虽然由水动力模型估算的蒙江入流过程已较为接近实测入流过程,但仍具有一定误差;经一次EnKF校正后,三场次洪水蒙江支流入流过程均得到明显改善,计算的 R^2 和 NSE 都改善至0.99以上,而相对均方根误差缩小至校正前的25%以内。与理想案例不同,经EnKF再次校正后的蒙江入流过程改善并不明显,评价指标反而略微劣化。由此可见,只有当首次校正的支流入流过程可靠度较低时(初始入流估算误差较大时,其中初始入流估算误差与河道地形、扰动滞时有关)才需二次校正,否则经EnKF一次校正即可达到较好效果。总体来说,本文提出的支流入流反分析方法对于天然河道实例也具备有效性。

5 结论

本文提出了一种基于EnKF的无实测资料区间支流反分析方法,方法首先由河道正、反向水流计算初步估算支流入流过程,然后采用EnKF对初步估算过程进行校正。将该方法应用于理想案例和西江实例,主要结论为:(1)研究以支流汇入断面为界,基于一维河道水动力模型正、反向水流计算初步估算支流入流,解决了无初始入流资料的问题。构建了监测断面滞时矩阵,计算水流扰动传播时间,以确定用于支流校正的监测断面观测值,解决了EnKF滞时校正的问题。(2)采用EnKF二次校正有利于改善支流分析精度,但二次校正并非必要。当初始估算的支流入流误差较大、首次校正的支流入流过程可靠度较低时,运用EnKF二次校正可显著改善首次校正结果精度。(3)将方法应用于理想案例和西江实例,推算的支流入流过程与实测过程十分接近,支流入流 R^2 和 NSE 皆在0.99以上,相对均方根误差也小于0.05。结果表明,本文提出的方法对于计算无实测资料的区间支流有效可行。

本文提出的区间支流反分析方法对于其他相关问题也有借鉴意义。例如,可将EnKF应用于沿程均匀旁侧入流校正分析、河道边界条件校正、区间取水反分析、污染源溯源等问题中。另外,本文主要讨论了单条区间支流的情况,实际河道往往存在多条缺乏资料的区间支流,未来将研究如何对多条区间支流进行反分析。

参 考 文 献:

- [1] 杨甜甜,梁国华,何斌,等.基于水文水动力学耦合的洪水预报模型研究及应用[J].南水北调与水利科技,2017,15(1):72-78.
- [2] 曾志强,杨明祥,雷晓辉,等.流域河流系统水文-水动力耦合模型研究综述[J].中国农村水利水电,2017(9):72-76.

- [3] 李甲振, 郭新蕾, 巩同梁, 等. 无资料或少资料区河流流量监测与定量反演[J]. 水利学报, 2018, 49(11): 1420-1428.
- [4] 董爱红. 区间洪水预报方法的探讨[J]. 水利科技, 2001(3): 1-2.
- [5] 张小琴, 包为民. 新安江模型与水动力学模型结合的区间入流动态修正研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(6): 37-41.
- [6] 黄仁勇, 王敏, 张细兵, 等. 三峡水库区间入流过程计算[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6): 67-69, 80.
- [7] 张利敏, 廖卫红, 殷兆凯, 等. 基于HEC-HMS模型推求西江流域巨型水库群区间入流[J]. 中国农村水利水电, 2017(6): 65-69.
- [8] 董文军, 杨则燊. 一维圣维南方程的反问题研究与计算方法[J]. 水利学报, 2002(9): 61-65.
- [9] 王船海, 郭丽君, 芮孝芳, 等. 三峡区间入库洪水实时预报系统研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 677-681.
- [10] HABERT J, RICCI S, PIACENTINI A, et al. Estimation of Lateral Inflows using Data Assimilation in the Context of Real-Time Flood Forecasting for the Marne Catchment in France [M]//Advances in Hydroinformatics. Springer, Singapore, 2014.
- [11] 张蔷, 王船海, 李书建, 等. 基于卡尔曼滤波水动力学实时校正中不平衡量修正研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2013, 28(5): 552-558.
- [12] 李光炽, 钱真. 感潮河道区间入流反分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 266-271.
- [13] 吴晓玲, 王船海, 向小华. 实时校正中的旁侧入流反演方法[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 52-57.
- [14] 关志成, 吴海龙, 崔军, 等. 马斯京根法洪水演进反演计算方法的探讨[J]. 水文, 2006(2): 9-12.
- [15] DAS A. Reverse stream flow routing by using Muskingum models[J]. Sadhana, 2009, 34(3): 483-499.
- [16] PRICE R K, FERNANDO W A Y S, SOLOMATINE D P. Inverse modelling for flood propagation[C]//7th International Conference on Hydroinformatics. Nice, France, 2006.
- [17] SZYMKIEWICZ R. Solution of the inverse problem for the Saint Venant equations[J]. Journal of Hydrology, 1993, 147(1/4): 105-120.
- [18] D'ORIA M, TANDA M G. Reverse flow routing in open channels: A bayesian geostatistical approach[J]. Journal of Hydrology, 2012, 460: 130-135.
- [19] 雷晓辉, 王浩, 廖卫红, 等. 变化环境下气象水文预报研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 9-18.
- [20] 赖锡军. 水动力学模型与集合卡尔曼滤波耦合的实时校正多变量分析方法[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 241-248.
- [21] 王船海, 吴晓玲, 周全. 卡尔曼滤波校正技术在水动力学模型实时洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 300-305.
- [22] 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): 687-693.
- [23] 李大勇, 董增川, 刘凌, 等. 一维非恒定流模型与卡尔曼滤波耦合的实时交替校正方法研究[J]. 水利学报, 2007, 38(3): 330-336.
- [24] LAI R, FANG H, HE G, et al. Dual state-parameter optimal estimation of one-dimensional open channel model using ensemble Kalman filter[J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25(4): 564-571.
- [25] 王家彪. 西江流域应急调度模型研究及应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016.
- [26] PAPPENBERGER F, MATGEN P, BEVEN K J, et al. Influence of uncertain boundary conditions and model structure on flood inundation predictions[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(10): 1430-1449.
- [27] LI Y, RYU D, WESTERN A W, et al. Assimilation of stream discharge for flood forecasting: The benefits of accounting for routing time lags[J]. Water Resources Research, 2013, 49(4): 1887-1900.
- [28] EVENSEN G. The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation[J]. Ocean Dynamics, 2003, 53(4): 343-367.
- [29] 王世璋, 闵锦忠, 陈杰, 等. 迭代集合平方根滤波在风暴尺度资料同化中的应用[J]. 大气科学, 2013, 37(3): 563-578.
- [30] ZHANG J, CHEN L, SINGH VP, et al. Determination of the distribution of flood forecasting error[J]. Natural Hazards, 2015, 75(2): 1389-1402.

Inverse simulation of ungauged branch inflow based on the EnKF

WANG Jiabiao¹, ZHAO Jianshi¹, LEI Xiaohui², WANG Hao^{1, 2}, WEI Junyu¹, LIAO Weihong²

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The lateral inflow error is one the main uncertainty sources of river flood routing. Parts of previous methods for inverse simulation of lateral inflow are not able to determine the separate inflow of a specific branch, because they commonly calculate the total lateral inflow based on the principle of water balance combined with hydrodynamic models and data assimilation. In other parts of previous methods, the reverse flood routing from downstream to upstream has ever been attempted for the inverse analysis of branch inflow. However, the results from reverse flood routing is sensitive to the boundary conditions, and significant uncertainties lead to large errors in the inverse simulation results. In terms of above-mentioned issues, an EnKF-based method is proposed for the inverse simulation of ungauged branch inflow. The branch inflow is firstly calculated via the forward and reverse flood routing with one-dimensional hydrodynamic model. Then, the lag-time matrix used for EnKF is determined by the propagation time of perturbation from branch to the gauging station. When large errors are obtained in the first-time calibration results, the EnKF should be reused with the first results as the background. The EnKF-based method is applied to an ideal case and a real-world case in Xijiang River, and the inverse simulation results are pretty good. In both cases, the assessment indicators R^2 and NSE are above 0.99, and the relative $RMSE$ is less than 0.05. The case studies demonstrate the efficiency and effectiveness of our proposed method in inverse simulation of ungauged branch inflow, and the research is helpful to improve the simulation accuracy of flood routing.

Keywords: inverse problem; data assimilation; reverse flow routing; lag-time matrix; EnKF

(责任编辑: 王成丽)

论文摘要编写要点

论文摘要十分重要,它是沟通读者和作者之间的桥梁。在今天信息时代,读者不可能阅读刊物的每一篇论文去查找所需的信息,只有通过摘要了解论文的主要内容,从而判断有无必要阅读全文。国内外的检索系统为了信息交流,更建立了各种二次文献数据库,帮助读者通过查找论文摘要,以便提取原文。而二次文献数据库的基础是作者的论文摘要。但许多作者却往往忽视了论文摘要的这一重要意义,没有下工夫把论文摘要写好,尤其是英文摘要。当今科技领域,英文已经成为国际交流语言,世界各国学者想追踪了解某一学科的发展情况,多会用英文工具书、数据库进行检索。而国外的检索系统也主要通过英文摘要判断论文是否被收录进数据库。为了帮助作者写好摘要,我编辑部在给作者的论文修改通知中都附有《摘要编写要点》,供作者参考。现再刊登于下,以便作者查阅。

1. 摘要是论文内容不加注释和评论的简短陈述,应包括正文的要点,具有独立性和自含性,让读者不阅读全文就能了解论文的基本内容,以判断有无必要阅读全文,也可供二次文献采用。

2. 摘要应说明研究工作的目的、方法与手段、结果和结论,要尽量简短,尽可能省略课题的背景信息。

3. 摘要中的内容应在正文中出现,不能对正文进行补充和修改。

4. 摘要中不用图、表、非公用共知的符号和术语,不能引用文献;缩写名称在第一次出现时要有全称(包括中文和英文)。

5. 摘要中不要多列数据,出现的应该是最重要的、最关键数据。

6. 中文摘要一般300字左右,中英文摘要应基本对照,不能因为某些内容不好翻译就略去。

7. 关键词是为了文献标引工作,是从论文中选取出来用以表示全文主题内容信息的单词或术语,一般为3~8个词,尽量用规范词。

《水利学报》编辑部