

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.03.004

基于集合卡尔曼滤波的新安江模型状态变量实时修正方法

李漫漫¹,石朋¹,尚艳丽²,赵兰兰³,袁杰⁴,崔彦萍⁵,瞿思敏¹

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 泰安市水文局,山东 泰安 271000;
3. 水利部信息中心,北京 100053; 4. 河北省承德水文水资源勘测局,河北 承德 067000;
5. 江苏省水文水资源勘测局,江苏 南京 210029)

摘要: 为了提高洪水预报的精度,基于集合卡尔曼滤波,提出对流域中子流域中间状态量进行全状态量回溯修正方法。该方法根据每个子流域地貌特征和汇流时间不同,分别找出其相应的回溯时间,与新安江模型相结合对各个子流域特定时段前的中间状态量进行全状态量回溯修正,逐步降低误差的累积。采用理想模型验证,结果显示子流域中间状态量得到有效修正,洪量相对误差和洪峰相对误差减小,确定性系数提高。以大坡岭流域为例,采用该方法对流域12场历史洪水进行修正,修正结果表明此方法能有效提高洪水预报的精度,可在实际洪水预报中推广应用。

关键词: 洪水预报;集合卡尔曼滤波;回溯修正;新安江模型;理想模型;大坡岭流域

中图分类号: P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)03-0209-06

Real-time updating method for the state variables of Xinanjiang model based on ensemble Kalman filter

LI Manman¹, SHI Peng¹, SHANG Yanli², ZHAO Lanlan³, YUAN Jie⁴,
CUI Yanping⁵, QU Simin¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Tai'an Bureau of Hydrology, Tai'an 271000, China;
3. Information Center, MWR, Beijing 100053, China;
4. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Chengde, Chengde 067000, China;
5. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of flood forecasting, the paper proposes a retroactive correction method for the whole intermediate state variables of a sub-basin based on the ensemble Kalman filter. According to the different geomorphic feature and confluence time of each sub-basin, its corresponding retroactive time is found, and then, the Xinanjiang model is combined with to correct the state of each sub-basin before a certain time, gradually reducing the accumulation of errors. The results of the ideal model show that the intermediate state of sub-basin is effectively corrected, relative error of peak and volume decreases, and the deterministic coefficient increases. 12 historical floods of the Dapoling Basin, selected as an example, are effectively modified by the proposed method. As a result, the method can effectively improve the accuracy of flood forecasting and can be widely used in actual flood forecasting.

Key words: flood forecasting; ensemble Kalman filter; retroactive correction; Xinanjiang model; ideal model; Dapoling Basin

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405601);国家自然科学基金(51479062,41730750)

作者简介: 李漫漫(1992—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:lmman6069@163.com

通信作者: 石朋,教授。E-mail:ship@hhu.edu.cn

引用本文: 李漫漫,石朋,尚艳丽,等. 基于集合卡尔曼滤波的新安江模型状态变量实时修正方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):209-214.

LI Manman, SHI Peng, SHANG Yanli, et al. Real-time updating method for the state variables of Xinanjiang model based on ensemble Kalman filter[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(3):209-214.

如何提高洪水预报的准确性和及时性是洪水预报的重要内容^[1-3]。然而当使用水文模型进行预报时,受模型自身结构及输入资料误差的影响,预报值精度不高,难以满足要求,因此对预报值进行实时修正是十分必要的。多年来,学者们对洪水预报实时修正技术进行了大量研究,如 AR 模型^[4]、系统动态响应曲线^[5-8]、卡尔曼滤波^[9-12]等。对流域中间状态量修正主要采用卡尔曼滤波。

卡尔曼滤波在假设系统是线性的、噪声是白色的基础上,以系统的状态变量达到均方差最小为目的进行最优估计的四维数据同化。但采用卡尔曼滤波对多维非线性系统的误差协方差矩阵进行预报时,计算量巨大,基于此 Evensen^[13]提出集合卡尔曼滤波。集合卡尔曼滤波(ensemble Kalman filter, EnKF)主要是利用集合成员的统计量来计算误差协方差矩阵,避免了线性化系统这一步,同时在更新系统状态时不需事先确定模型协方差,这使该方法得到了广泛应用^[14-16]。岳延兵等^[17]将集合卡尔曼滤波与神经网络技术相耦合以提高河道洪水预报精度;赖锡军^[18]、顾炉华等^[19]基于集合卡尔曼滤波提出多变量交替校正,通过交替水位和流量校正非恒定流状态;Pauwels 等^[20]指出流域出口流量受过去一段时间内的土壤湿度和气象条件影响,因此采用 ENKF 对一段时段前的土壤湿度进行修正,并命名为回溯型集合卡尔曼滤波;Moradkhani 等^[21]基于集合卡尔曼滤波应用于降雨径流模型,来更新土壤含水量和快速径流这 2 个主要模型状态量;Samuel 等^[22]选择了双状态参数估计模式的集合卡尔曼滤波在萨克门托模型中进行 3 种情况的数据同化分析:单独土湿修正、单独流量修正、同时修正土湿和流量,表明流量和土壤含水量的综合同化提供了更准确的土壤含水量和径流预报,特别是缩短修正时间;McMilla 等^[23]将回溯型集合卡尔曼滤波与标准集合卡尔曼滤波应用于流量预报系统对比修正土壤含水量、含水层储量和地表水储量,结果表明回溯型集合卡尔曼滤波修正效果更好。

在洪水预报中,新安江模型在中国是应用最多、最广的水文模型^[24]。本文将集合卡尔曼滤波应用于新安江模型,通过流域出口断面预报流量与实测值之间的误差,得到流域出口断面计算流量的分析值,同时对新安江模型不同子流域的土壤含水量、自由水蓄量、产流面积、地表径流、壤中流、地下径流进行全状态量回溯修正,逐步降低误差的累积,提高洪水预报的精度。

1 研究方法

1.1 集合卡尔曼滤波的数据同化步骤

集合卡尔曼滤波是基于蒙特卡罗方法,利用集合统计量用来估计预报协方差的序列数据同化方法。集合卡尔曼滤波的数据同化步骤如下:

a. 针对模型自身特点,对状态变量和观测值加以一系列合理范围的干扰,形成随机变量集合。本文中状态变量集合为 X_i ,状态变量为不同子流域的土壤含水量、自由水蓄量、产流面积、地表径流、壤中流、地下径流和流域出口预报流量,样本数为 N 。观测值为流域出口断面实测流量。

b. 对状态变量进行预报,获得模型预测集合:

$$X_{t,i} = \Phi(X_{t-1,i}, W_{t-1}) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \tag{1}$$

$$Z_{t,i} = H[X_{t,i} \quad V_{t,i}] \tag{2}$$

式中: $X_{t,i}$ 、 $X_{t-1,i}$ —— t 时刻、 $t-1$ 时刻第 i 个样本的状态变量; $\Phi(\cdot)$ ——状态转移函数; W_{t-1} —— $t-1$ 时刻的系统噪声; $Z_{t,i}$ —— t 时刻第 i 个样本的观测值; H ——观测矩阵; $V_{t,i}$ —— t 时刻第 i 个样本的观测噪声。系统噪声和观测噪声皆为高斯白噪声。

c. 选取模型预测集合平均值 $\bar{X}_t$ 替代真实值,由预测样本集合计算得到预测协方差矩阵 P_t 。

$$\bar{X}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{t,i} \tag{3}$$

$$P_t = \frac{1}{N-1} E_t E_t^T \tag{4}$$

其中 $E_t = [X_{t,1} - \bar{X}_t, X_{t,2} - \bar{X}_t, \dots, X_{t,N} - \bar{X}_t]$

d. 根据实测值和预测值,结合预测协方差矩阵 P_t ,得到卡尔曼增益矩阵 K_t ,并更新预测值得到分析值 $X_{t,i}$ 。

$$K_t = P_t H^T (H P_t H^T + R)^{-1} \tag{5}$$

$$X_{t,i} = X_{t,i} + K_t [Z_{t,i} - H X_{t,i}] \tag{6}$$

e. 对 $X_{t,i}$ 的样本集合取均值,得到分析值均值。 $X_{t,i}$ 作为集合中 N 个样本更新后的系统状态量,代入构成循环,回到步骤 b。

1.2 模型中输入资料的不确定性

本文流域模型参数经多年降雨径流资料率定,不考虑参数的变化,降雨量、蒸发量、初始状态量(土壤含水量、自由水蓄量、产流面积、地表径流、壤中流、地下径流)误差决定了新安江模型预报流量。本文选定各个子流域的土壤含水量、自由水蓄量、产流面积、地表径流、壤中流、地下径流和流域出口预报流量作为状态变量,同时输入资料降雨量、蒸发量是有误差的,实测值选用的是流域出口断面流量,对这些值加以扰动形成扰动集合。这些集合都服从正态分布,表示如下:

$$Z_{t,i} = Z_t + V_{t,i} \quad V_{t,i} \sim N(0, (\sigma Z_t)^2) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \tag{7}$$

式中: Z_t —— t 时刻的被干扰值; $Z_{t,i}$ —— t 时刻 Z_t 随机扰动产生集合之一; σ ——噪声比例,由先验信息确定。

1.3 回溯修正

流域出口断面流量与过去一段时间内气象条件、土壤特性和径流分布有关,对一定时段前的模型中间状态量进行修正为回溯修正。当回溯修正采用的算法为集合卡尔曼滤波回溯修正。每个子流域距离流域出口断面的距离不同,地貌特征不同,其造成汇流时间的不同。对于不同子流域,回溯时间是不同的。本文采用马斯京根法作为河网汇流方法,因此可根据司伟等^[5]提出的系统微分动态响应曲线,找到子流域的当前马斯京根上断面入流量与一段时间后哪个时段流域出口断面流量的相关关系最大,并找到每个子流域的回溯时间。

2 模拟效果分析

2.1 评定指标

在模拟效果分析中,采用洪峰相对误差 ΔQ_P 、洪量相对误差 ΔR_T 、确定性系数 D_C 这 3 种指标衡量。

$$\Delta Q_P = \frac{Q_{CP} - Q_{OP}}{Q_{OP}} \times 100\% \tag{8}$$

$$\Delta R_T = \frac{R_C - R_0}{R_0} \times 100\% \tag{9}$$

$$D_C = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Ci} - Q_{Oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Oi} - \bar{Q}_{Oi})^2} \tag{10}$$

式中: Q_{CP} 、 Q_{OP} ——洪峰流量的计算值、实测值; R_C 、 R_0 ——次洪径流深的计算值、实测值; Q_{Ci} 、 Q_{Oi} —— i 时段的计算径流、实测径流; $\bar{Q}_{Oi}$ ——实测流量的平均值。

2.2 集样本本数的确定

集合卡尔曼滤波中以集合大小的统计量来代替真实值的,集合大小的选取十分重要。本文将集合卡尔曼滤波与新安江模型结合进行模型构建,编写程序。经过多次程序运行发现,当样本过小时每次预报效果不稳定,当样本过大时则预报结果无太大改善且增加计算量。集样本本数经程序调试得出结果为 1 000。

2.3 理想模型检验

本文理想模型的输入资料、输出资料和参数全部已知。理想模型为一个面积为 400 km²、有 4 个雨量站的假设流域。对理想降雨量、蒸发量加入随机误差作为实测值,同时对理想初始中间状态量加入误差,经新安江模型计算得到计算流量。对存在误差的降雨量、蒸发量和流域初始中间状态量加以随机扰动,形成集样本经新安江模型预报,运用集合卡尔曼滤波进行全状态量回溯修正得到修正流量。

图 1 是理想模型其中一个子流域状态量的修正效果图。由图 1 可知:地表径流修正最快,相对误差迅速减小;土壤含水量、自由水蓄量和产流面积经过一段时间的振荡之后,相对误差逐渐减小;而壤中流和地下径流修正最慢,但也向真值靠拢,相对误差缓慢减小。这是因为地表径流和流域出口流量的相关性最强,收敛速度最快;土壤含水量、自由水蓄量和产流面积和流域出口流量的相关性较强,收敛较为缓慢;壤中流和地下径流量级很小,对流域出口流量影响不大,收敛速度最慢。土壤含水量、自由水蓄量、产流面积、地表径流、壤中流、地下径流综合影响着流域出口流量。从图 2 中看出,理想模型的流量过程线修正效果很好,理想洪水

过程线和修正洪水过程线基本吻合,同时 D_c 由 0.974 提高到 0.999,洪峰相对误差由 -12.6% 减少至 -0.01% ,洪量相对误差由 -9.60% 减少至 -0.20% 。理想模型的修正效果证实了集合卡尔曼滤波在新安江模型上运用的有效性。

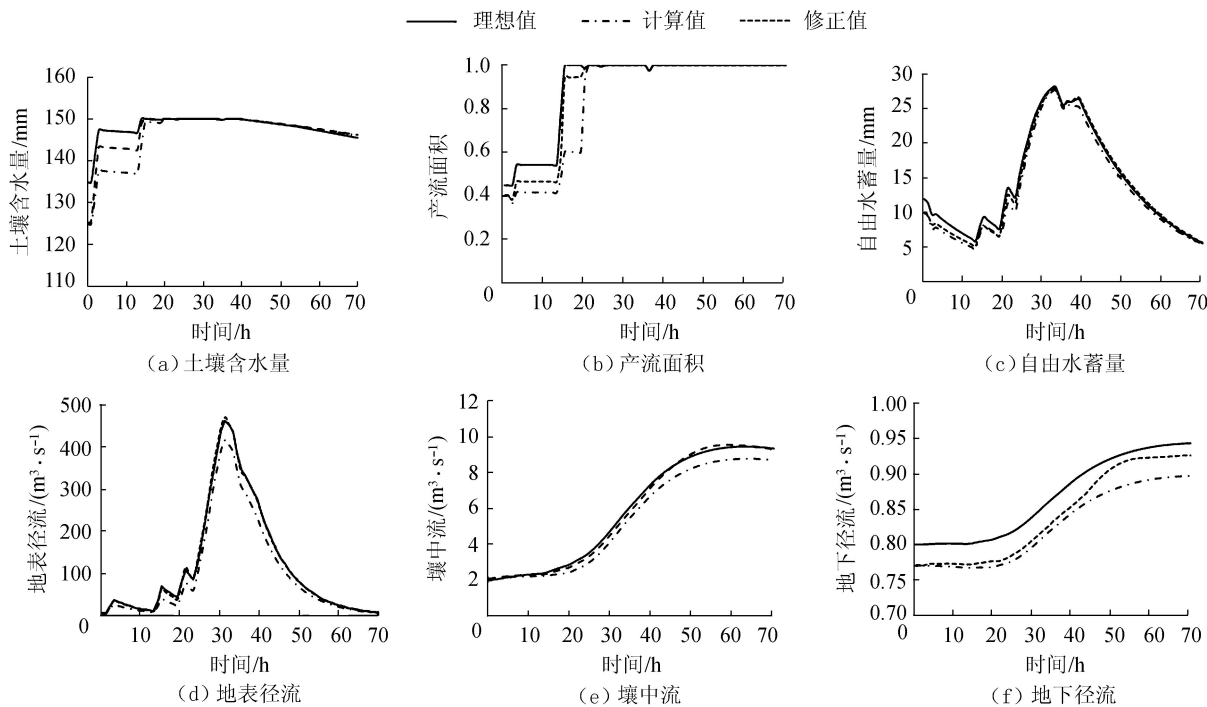


图1 理想模型子流域状态量修正效果

Fig.1 Error correcting result of state variables for the sub-watershed with the ideal model

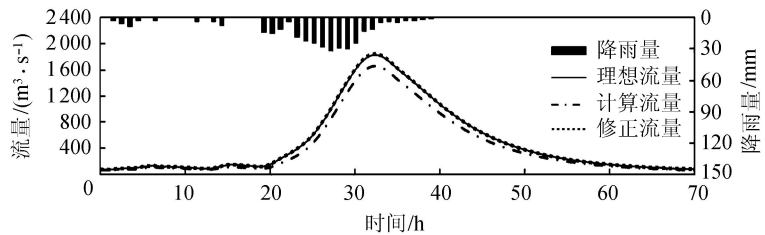


图2 理想模型修正效果

Fig.2 Correction result of the ideal model

2.4 实际流域检验

本文选取淮河上游的大坡岭流域,该流域位于 $32^{\circ}42'N$ 、 $113^{\circ}75'E$,总面积为 1640 km^2 ,干流总长度为 73 km 。流域内有桐柏、二道河、吴城、新集、月河店、黄岗、固县、潘庄、胡家湾、固庙、毛集、回龙寺和大坡岭 13 个雨量站。大坡岭流域位于大别山山区,主要覆盖山脉,以丘陵和山区为主,植被丰富,水利工程较少。流域多年平均径流深为 375 mm ,多年平均降雨量为 918 mm ,汛期主要集中在 6—9 月。

选用大坡岭流域 12 场历史洪水使用新安江模型进行计算、修正和检验。图 3 为其中 2 场洪水。表 1 的计算结果显示,12 场洪水经过集合卡尔曼滤波修正,洪量和洪峰相对误差大部分都有所降低,峰现时间多数得到有效修正,确定性系数都得到提高。

3 结 语

本文通过根据子流域不同的地貌特征、汇流时间,找出其对应的回溯时间。将集合卡尔曼滤波全状态量回溯修正分别应用于理想流域和大坡岭流域。通过理想模型的检验,得出集合卡尔曼滤波可以有效修正模型中间状态量:土壤含水量、自由水蓄量、产流面积、地表径流、壤中流、地下径流,提高洪水预报精度,证实了此方法的可行性。在实际流域的应用表明,集合卡尔曼滤波对洪量、洪峰和峰现时间都达到了较优的修正效果,值得在实际洪水预报中应用和推广。

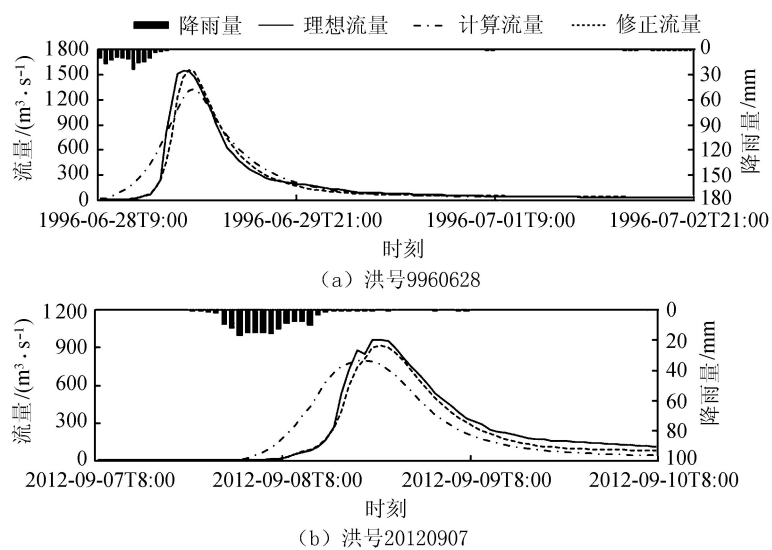


图 3 实际洪水修正效果

Fig.3 Correction result of the actual flood with the ideal model

表 1 大坡岭流域 12 场洪水修正结果

洪号	实测值		计算值				修正值			
	径流深/ mm	洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	径流相对 误差/%	ΔQ_P /%	峰现 时间/h	D_C	径流相对 误差/%	ΔQ_P /%	峰现 时间/h	D_C
20030717	72.92	1070	-9.63	-8.63	1	0.939	-4.86	-3.11	0	0.994
20050625	65.93	1920	-7.13	3.80	-1	0.987	-4.19	2.06	0	0.997
20050709	139.21	3520	-6.65	3.08	0	0.982	-0.59	2.81	0	0.997
20050829	111.58	2580	-5.95	-5.51	1	0.956	-3.32	-3.88	0	0.998
20070703	68.41	1370	-11.02	-17.90	2	0.752	-9.64	-6.66	1	0.963
20090828	68.45	1140	-6.80	-7.62	0	0.959	-2.94	-2.55	0	0.995
20100715	129.00	2020	-6.22	5.25	0	0.934	-4.84	3.65	1	0.993
20120907	39.52	966	-13.37	-17.08	2	0.731	-12.41	-4.82	0	0.977
19960628	51.11	1550	7.55	-9.06	-2	0.901	-5.06	1.57	0	0.972
19970717	48.87	1220	14.91	1.89	-3	0.930	-1.44	-1.57	-2	0.998
19980701	68.77	1140	5.15	9.03	-1	0.924	0.70	5.12	1	0.995
19980803	340.38	1730	-2.68	4.66	0	0.908	-1.98	1.90	1	0.994

参考文献:

[1] 芮孝芳. 洪水预报理论的新进展及现行方法的适用性[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(5):1-4. (RUI Xiaofang. Advances in theories of flood prediction and suitability of existing methods[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(5):1-4. (in Chinese))

[2] 邱瑞田, 王本德, 周惠成. 水库汛期限制水位控制理论与观念的更新探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(1):68-72. (QIU Ruitian, WANG Bende, ZHOU Huicheng. New idea for controlling the limited elevation of reservoirs in the flood season[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1):68-72. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 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 Simin, BAO Weimin, SHI Peng, et al. AR model error correction equation parameter tolerance estimation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2003, 31(5): 497-500. (in Chinese))

[5] 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 Wei, BAO Weimin, QU Simin. 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))

- [6] 张小琴,刘可新,包为民,等. 产流误差比例系数的系统响应修正方法[J]. 水科学进展,2014,25(6):789-796. (ZHANG Xiaoqin, LIU Kexin, BAO Weimin, et al. Runoff error proportionality coefficient correction based on system response[J]. Advances in Water Science,2014,25(6):789-796. (in Chinese))
- [7] SI Wei, BAO Weimin, GUPTA H V. Updating real-time flood forecasts via the dynamic system response curve method[J]. Water Resources Research, 2015, 51(7):5128-5144.
- [8] BAO Weimin, SI Wei, QU Simin. 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.
- [9] 刘开磊,姚成,李致家,等. 水动力学模型实时校正方法对比[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(2):124-129. (LIU Kailei, YAO Cheng, LI Zhijia, et al. Comparison of real time correction methods of hydrodynamic model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2014,42(2):124-129. (in Chinese))
- [10] 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. (GE Shouxi, CHENG Haiyun, LI Yurong. Real time updating of hydrodynamic model by using Kalman filtering[J]. Journal of Water Engineering,2005,36(6):687-693. (in Chinese))
- [11] 吴晓玲,王船海. 基于卡尔曼滤波的水动力模型实时校正方法[J]. 武汉大学学报(工学版),2008,41(3):5-8,12. (WU Xiaoling, WANG Chuanhai. Real-time correction of hydrodynamic model based on Kalman filter[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2008,41(3):5-8,12. (in Chinese))
- [12] 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. (WANG Chuanhai, WU Xiaoling, ZHOU Quan. Application of Kalman filter technique in real-time flood forecasting[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2008,36(3):300-305. (in Chinese))
- [13] EVENSEN G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics[J]. Journal of Geophysical Research, 1994,99(C5):10143.
- [14] 黄春林,李新. 基于集合卡尔曼滤波的土壤水分同化试验[J]. 高原气象,2006,25(4):665-671. (HUANG Chunlin, LI Xin. Experiments of soil moisture data assimilation system based on ensemble Kalman filter[J]. Plateau Meteorology, 2006,25(4):665-671. (in Chinese))
- [15] SAMUEL J, COULIBALY P, DUMEDAH G, et al. Assessing model state and forecasts variation in hydrologic data assimilation[J]. Journal of Hydrology, 2014,513(5):127-141.
- [16] BURGERS G, LEEUWEN P J V, Evensen G. Analysis scheme in the ensemble Kalman filter[J]. Monthly Weather Review, 1998, 126(6):1719-1724.
- [17] 岳延兵,李致家,范敏. 集合卡尔曼滤波与神经网络融合的洪水预报研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1):23-28. (YUE Yanbing, LI Zhijia, FAN Min. Study of flood forecasting by ensemble Kalman filtering and neural network[J]. Journal of Hydroelectric,2014,33(1):23-28. (in Chinese))
- [18] 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. (LAI Xijun. Real-updating multivariate analysis for unsteady flows with ensemble Kalman filter[J]. Advances in Water Science,2009,20(2):241-248. (in Chinese))
- [19] 顾炉华,赖锡军. 基于集合卡尔曼滤波的实时校正方法[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(2):73-77. (GU Xijun, LAI Xijun. A real-time alternating method based on ensemble Kalman filter[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(2):73-77. (in Chinese))
- [20] PAUWELS V R N, DE LANNOY G J M. Improvement of modeled soil wetness conditions and turbulent fluxes through the assimilation of observed discharge[J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 7(3):458-477.
- [21] MORADKHANI H, SOROOSHIAN S, GUPTA H V, et al. Dual state-parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter[J]. Advances in Water Resources, 2005, 28(2):135-147.
- [22] SAMUEL J, COULIBALY P, DUMEDAH G, et al. Assessing model state and forecasts variation in hydrologic data assimilation[J]. Journal of Hydrology, 2014, 513(5):127-141.
- [23] MCMILLA H K, HREINSSON E, CLARK M P, et al. Operational hydrological data assimilation with the recursive ensemble Kalman filter[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2013, 17(1):21-38.
- [24] 赵人俊,王佩兰,胡凤彬. 新安江模型的根据及模型参数与自然条件的关系[J]. 河海大学学报(自然科学版),1992,20(1):52-59. (ZHAO Renjun, WANG Peilan, HU Fengbin. Relation between parameter values and corresponding natural condition of Xinanjiang Model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 1992,20(1):52-59. (in Chinese))