

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221031

基于集合卡尔曼滤波的实时校正技术在流域洪水预报中的应用

舒全英¹, 王青青², 郭磊¹, 刘成秀³, 章兴³, 林平³

(1. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002; 2. 浙江大禹信息技术有限公司, 浙江 杭州 310002; 3. 舞川环境科技(上海)有限公司, 上海 201102)

摘要: 为提高金华江流域实时洪水预报精度, 建立了耦合 MIKE 11 NAM 与 MIKE 11 HD 的流域洪水预报模型和基于集合卡尔曼滤波的实时校正模型, 实现了金华江流域洪水预报实时校正。流域洪水预报模型对流域内主要站点的模拟效果较好, 洪水流量和洪水水位模拟精度较高; 实时校正模型在预见期 10 h 以内, 校正效果随预见期增加而降低, 在预见期前期可有效降低预报误差。整体上, 建立的流域洪水预报模型和基于集合卡尔曼滤波的实时校正模型能够满足金华江流域洪水预报应用要求。

关键词: 水文水动力; 流域洪水预报; 集合卡尔曼滤波; 实时校正技术

中图分类号: [TV124] **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)03-0061-04

1 概况

金华江是钱塘江右岸最大的一级支流, 由东阳江、武义江汇合而成, 流域面积为 6 798 km², 主流长 182 km^[1], 流域及主要站点分布见图 1。金华江流域属于亚热带季风气候, 全年包括梅汛期(4~7 月)和台汛期(7~10 月)两个雨季, 区域产流明显, 具有峰高量大、水量集中、涨落较快的特点, 洪水过程一般集中在 3 d 左右^[2]。流域已建 2 座大型水库和 14 座中型水库, 通过拦蓄洪水和调节水流发挥重要作用。洪水预报的准确性和

及时性在整个流域的防洪调控过程中至关重要。本文先建立金华江流域洪水预报模型, 然后利用基于集合卡尔曼滤波的实时校正技术校正预报结果, 以期提高金华江流域实时洪水预报精度。

2 建立模型

2.1 数据准备

收集 2000~2019 年的洪水资料, 经过数据处理、完整性及实用性分析, 选择金华站实测洪峰流量大于 2 400 m³/s 的场次洪水, 共 12 场, 其中 9 场(数据质量较好)用于率定, 3 场用于验证, 详细信息见表 1。

表 1 洪水场次信息

Tab. 1 Flood information

类型	序号	洪水年份	洪水编号	峰值流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	时段
率定	1	2010	20100625	2 610	06-10~07-02
	2	2011	20110620	3 660	06-05~06-22
	3	2014	20140623	4 250	06-15~07-02
	4	2014	20140820	4 180	08-15~08-25
	5	2016	20160629	3 870	06-24~07-15
	6	2016	20160916	2 460	09-03~09-30
	7	2017	20170625	4 170	06-08~07-06
	8	2019	20190705	4 060	07-01~07-21
	9	2019	20190811	2 610	08-05~08-15
验证	10	2000	20000624	4 200	05-25~06-30
	11	2002	20020630	3 380	06-20~07-05
	12	2007	20071009	3 040	10-01~10-15



图 1 金华江流域分区及主要站点分布

Fig. 1 Distribution of Jinhua River basin zoning and main stations

收稿日期: 2022-05-16, 修回日期: 2022-06-17

基金项目: 浙江省水利厅科技重点项目(RB2038); 浙江省重点研发计划项目(2021C03017)

作者简介: 舒全英(1983-), 男, 高级工程师, 研究方向为水利信息化, E-mail: shuquanying@qq.com

2.2 模型构建

(1)水文模型。采用 MIKE 11 NAM 水文模型^[3],划分 68 个水文分区(图 1),模型基本参数只作初始赋值,最大含水率、根区储水层最大含水率、坡面流汇流系数、壤中流汇流时间、坡面流汇流时间、坡面流产流临界值、壤中流产流临界值、地下水产流临界值、基流汇流时间分别取为 5 mm、100 mm、0.6、800 h、10 h、0.5、0.5、0.5、1 000 h。

(2)水动力模型。采用 MIKE 11 HD 水动力模型^[3],概化的河道包含预报水文站所在的南江、金华江、武义江及其主要支流河道,并将主要大中型水库概化为虚拟河道。模型外部边界为上游入流和下游出口的边界条件,河道上游端点采用 NAM 水文模型计算的流量结果作为源头入流边界条件,区间子流域入流也通过 NAM 水文模型计算,并连接到河道中,模型下游采用兰溪实测水位边界设置。模型内部边界主要为水工建筑物,水闸、橡胶坝的调度方式按照相关调度规则设置,水库下泄流量则采用实际数据。计算时,模型河道糙率初始值设为 0.03 s/m^{1/3}。在耦合 MIKE 11 NAM 和 MIKE 11 HD 模型后,采用人工手动率定的方法联合率定模型参数。

(3)实时校正模型。采用 MIKE 11 DA 模块中的实时校正模块中的集合卡尔曼滤波法^[4],集合卡尔曼滤波通过对集合成员的统计来计算误差方差阵,具有求解过程简单、预报精度高、适用于强非线性系统等优点,是常用的洪水预报实时修正技术^[5]。取主要站点(包括永康、武义、东阳、南王埠、对家地、金华)对流量进行实时校正预报。其中,集合大小为 50,开始滤波时间为自计算开始 2 h,误差预报模型采用自回归误差预报模型。根据流域特征和实际使用需求,设置预报频率为 3 h,预见期为 24 h。

2.3 评价指标

采用确定性系数 D_c 、相对误差 ϵ 和均方根误差 R_{RMSE} 评价预报精度,计算公式^[6,7]分别为:

$$D_c = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_c - X_0)^2}{\sum_{i=1}^n (X_0 - \bar{X}_0)^2} \quad (1)$$

$$\epsilon = [(X_c - X_0) / X_0] \times 100\% \quad (2)$$

$$R_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_c - X_0)^2} \quad (3)$$

式中, n 为预报值或实测值的序列个数; X_c 为预报值; X_0 为实测值; \bar{X}_0 为实测值的平均值。

根据《水情报报规范》确定许可误差并计算合格率^[8]。

3 结果与分析

3.1 洪水预报

由于区域下垫面差异较大,包含建成区、山区等,水文参数有所差异,水文参数最大含水率、根区储水层最大含水率、坡面流汇流系数、壤中流汇流时间、坡面流汇流时间、坡面流产流临界值、壤中流产流临界值、地下水产流临界值、基流汇流时间的最终取值分别为 3~45 mm、51~400 mm、0.3~0.9、500~950 h、3~20 h、0.1~0.7、0.2~0.9、0.2~0.9、1 000~1 600 h。

金华站控制流域面积为 5 953 km²,距离兰江仅 25 km,其洪水预报在金华江防洪工作中占有举足轻重的位置^[9],故以金华站为例,评价耦合 MIKE 11 NAM 与 MIKE 11 HD 的流域洪水预报模型的流量计算结果(表 2)。在 9 场率定场次中,实测与计算流量的确定性系数大部分在 0.90 以上,仅 20160916、20190811 两场为 0.78、0.89,平均确定性系数为 0.91;水量相对误差均在 20% 以内,水量合格率为 100%;洪峰相对误差均在 20% 以内,洪峰合格率为 100%;峰现时差除 20160916 外,均在 3 h 以内,峰现时间合格率为 89%。在 3 场验证场次中,20000624 比其他两场洪水表现较差;所有验证场次的平均确定性系数为 0.88,水量合格率为 67%,洪峰合格率为 67%,峰现时间合格率为 33%。分析表明,总体上模型在洪水流量方面模拟效果较好,验证洪水效果略逊,这是由于参与验证的洪水场次数据质量一般,且年份较远,与现状下垫面条件有一定差别。

表 2 金华站场次洪水流量计算结果评价

Tab. 2 Evaluation of flood discharge calculation results of Jinhua station

类型	序号	洪水编号	确定性系数	水量相对误差/%	洪峰相对误差/%	峰现时差/h
率定	1	20100625	0.91	-5.20	-1.40	0.8
	2	20110620	0.94	-11.60	-8.50	-0.5
	3	20140623	0.92	-11.50	-9.60	-1.6
	4	20140820	0.94	2.00	7.00	-1.0
	5	20160629	0.94	-5.20	-0.10	0.6
	6	20160916	0.78	-1.50	-0.40	4.9
	7	20170625	0.93	-7.10	-10.10	0.1
	8	20190705	0.96	-9.50	-2.10	-2.3
	9	20190811	0.89	2.90	6.50	1.6
验证	10	20000624	0.81	-24.70	-24.10	-5.0
	11	20020630	0.88	-15.10	-2.60	-4.5
	12	20071009	0.95	-5.90	7.80	-3.0

对金华站的场次洪水水位计算结果进行评价(表 3)。在 9 场率定场次中,实测与计算水位的

表 3 金华站场次洪水水位计算结果评价

Tab. 3 Evaluation of flood level calculation results of Jinhua station

类型	序号	洪水编号	确定性	实测最高	模拟最	最高水位
			系数	水位/m	高水位/m	误差/m
率定	1	20100625	0.85	34.86	35.03	0.17
	2	20110620	0.97	35.91	35.78	-0.13
	3	20140623	0.94	36.53	36.24	-0.29
	4	20140820	0.93	36.49	36.76	0.27
	5	20160629	0.93	36.05	36.24	0.19
	6	20160916	0.77	34.57	34.91	0.34
	7	20170625	0.90	36.40	36.17	-0.23
	8	20190705	0.93	36.31	36.46	0.15
	9	20190811	0.80	34.84	35.37	0.53
验证	10	20000624	0.89	36.51	35.65	-0.86
	11	20020630	0.88	35.82	35.75	-0.07
	12	20071009	0.93	35.34	35.80	0.46

确定性系数大部分在 0.9 以上,有 3 场确定性系数在 0.8 左右,平均确定性系数为 0.89;最高水位误差基本在 0.30 m 以内,20160916、20190811 的最高水位误差分别为 0.34、0.53 m。3 场验证场次的平均确定性系数为 0.90,最高水位误差除 20020630 外表现一般。分析表明,总体上模型在洪水水位方面表现效果较好,平均确定性系数约 0.9,率定场次的最高水位误差整体上小于验证场次,水位存在的误差可能是由于部分未概化的小尺寸堰、坝等结构物产生了影响。

为进一步分析模型对整个流域的模拟效果,对流域内各主要站点的模型计算结果进行评价。考虑数据质量和流量级别,评价范围选用率定洪水场次,以各站点在警戒水位以下 20 cm 对应的流量进行分级统计,见表 4,其中对家地站和南王埠站无警戒水位。由表 4 可知,武义站、金华站、对家地站、南王埠站的确定性系数较高,平均确定性系数在 0.86 以上,合格率均为 100%;东阳站模拟效果稍逊,平均确定性系数在 0.78 以上,9

表 4 流域主要站点率定场次结果评价

Tab. 4 Evaluation on the result of calibration of main stations in the basin

站点	流量分级 ($m^3 \cdot s^{-1}$)	平均确定性系数	洪峰平	水量平	峰现时间	合格率 /%
			均相对 误差/%	均相对 误差/%	平均绝对 误差/h	
永康	≥ 749	0.93	10.80	8.95	0.90	80(4/5)
	< 749	0.80	30.37	16.63	1.60	25(1/4)
武义	≥ 1209	0.92	8.27	10.49	1.00	100(3/3)
	< 1209	0.91	10.04	11.39	1.30	100(6/6)
金华	≥ 3063	0.94	6.23	7.81	1.35	100(6/6)
	< 3063	0.86	2.78	3.24	2.40	100(3/3)
东阳	≥ 609	0.84	13.51	7.26	1.20	83(5/6)
	< 609	0.78	9.36	4.20	1.60	100(3/3)
对家地		0.90	10.21	9.68	1.49	100(8/8)
南王埠		0.89	6.22	6.73	2.38	100(9/9)

场中有 8 场合格;永康站合格率相对较差,尤其是流量小于 $749 m^3/s$ 时,洪峰平均相对误差和水量平均相对误差较大,分别为 30.37%、16.63%,4 场洪水中仅有 1 场洪水合格。这是由于模型上游未概化的小水库在洪水期间截留了一定量洪水,导致实际到达下游的水量较小,进而导致模拟与实测值差异较大。综上所述,模型对整个流域模拟效果较好,永康站及上游表现稍逊。

3.2 实时校正

为进一步提高预报精度,实时滚动预报金华站等主要站点流量。以 20110620、20170625 两场为例,金华站实时校正前后的预报结果见图 2。整体上,模型计算值、滚动预报值和实测值随时间的变化趋势基本一致;在预见期不同时段,滚动预报值与实测值的差距不同,在预见期前期,滚动预报值与实测值误差较小,滚动预报值比模型计算值更接近实测值,在预见期后期,滚动预报值与实测值的误差变大,有接近模型计算值的趋势。综上所述,在预见期初期,滚动预报随时间而变化,预报能力较好,可有效提升洪水预报精度;而随预报时间的增加,在预见期后期,实时滚动预报能力减弱,预报精度有所下降。

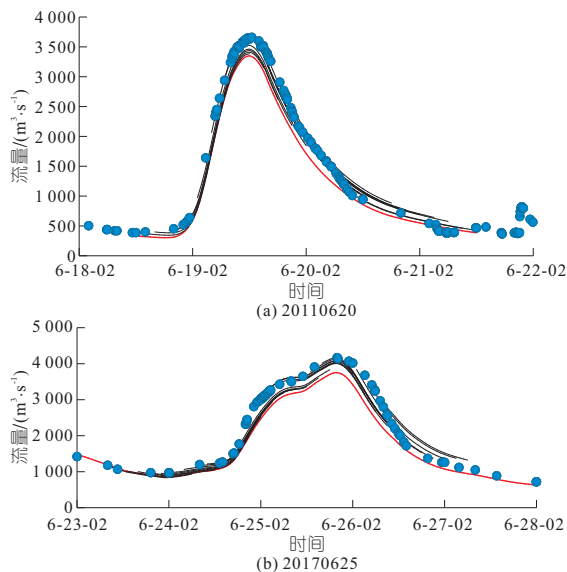


图 2 金华站洪水预报结果对比图

Fig. 2 Comparison of flood forecast results of Jinhua station

对流域内各站点的实时滚动预报结果进行评价(根据已有资料,各站点采用了 10 场以上的洪水数据),见图 3。6 个站点在 10 h 预见期内的预报精度均较理想,从预见期时段来看,预见期前期误差较小,1 h 的平均 R_{RMSE} 不超过 $100 m^3/s$,随着预见期增长,平均 R_{RMSE} 逐渐增大,实时校正作用逐渐减弱。综上所述,实时校正模型在预见期前期可有效提升各站点预报精度。

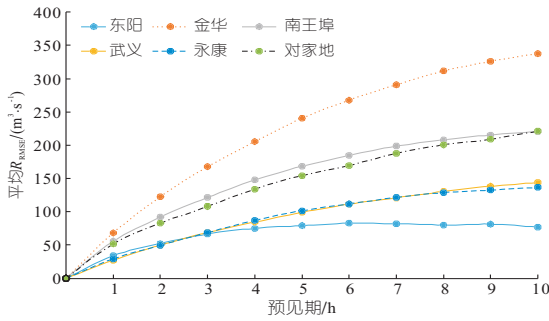


图 3 各站点不同预见期结果评价

Fig. 3 Evaluation of results in different forecast periods of each station

4 结论

- a. 结合 MIKE 11 NAM 和 MIKE 11 HD 建立了金华江流域洪水预报模型,在流量和水位方面表现较好;利用基于集合卡尔曼滤波的实时校正模型校正预报结果,可提高实时洪水预报精度,为金华江流域洪水预报及调度提供参考。
- b. 流域洪水预报模型主要概化了大中型水库,对小水库的影响考虑不足,可补充完善以提高预报精度。

Application of Real-time Correction Technology Based on Ensemble Kalman Filter in Basin Flood Forecasting

SHU Quan-ying¹, WANG Qing-qing², GUO Lei¹, LIU Cheng-xiu³, ZHANG Xing³, LIN Ping³

- (1. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310002, China;
- 2. Zhejiang Dayu Information Technology Limited Company, Hangzhou 310002, China;
- 3. Wuchuan Water & Environment Co., Ltd., Shanghai 201102, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of real-time flood forecasting in Jinhua River basin, the basin flood forecasting model coupled with Mike 11 Nam and Mike 11 HD and the real-time correction model based on Ensemble Kalman filter were established, and the real-time correction of flood forecasting in Jinhua River basin was realized. The simulation effect of the basin flood forecasting model on the main stations in the basin is good, and the simulation accuracy of flood discharge and flood level is high. When the real-time correction model is within 10h of the forecast period, the correction effect decreases with the increase of the forecast period, and the prediction error can be effectively reduced in the early stage of the forecast period. On the whole, the established basin flood forecasting model and the real-time correction model based on Ensemble Kalman filter can meet the application requirements of flood forecasting in Jinhua River basin.

Key words: hydrology and hydrodynamics; basin flood forecasting; ensemble Kalman filter; real time correction technology

(上接第 167 页)

Study on Law of Water and Sediment Transport and Erosion and Sedimentation in the Yellow River Diversion Channel

ZHOU Yu-wei¹, XIAO Juan¹, WU Wen-yong²

- (1. College of Hydro Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
- 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Taking a reconstruction canal section in Zuncun Irrigation District as the research object, this paper studied the sediment transport characteristics and scouring and silting change law of the canal. The causes of channel siltation were analyzed by sampling suspended matter, bed sand and measured velocity. The results show that the most serious siltation occurs at the head of the canal, and the siltation during the water shut-down period is an important factor causing the siltation of the canal. The flow rate of sediment carrying under each water conveyance condition is given, which provides the basis for the reduction of siltation and the efficient operation of the irrigation area in the future.

Key words: channel sediment transport; sand carrying capacity; sediment deposition; Yellow River Irrigation Area

参考文献:

- [1] 浙江省水利厅. 浙江省河流手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [2] 罗志洁, 杜世鹏, 张晓文. 浙江省金华江流域大型水库洪水调度方案研究[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(2): 31-35, 41.
- [3] 林波, 刘琪璟, 尚鹤, 等. MIKE 11/NAM 模型在挠力河流域的应用[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 99-108.
- [4] DHI. MIKE11 a modelling system for rivers and channels reference manual [M]. 2014:293-305,41.
- [5] 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.
- [6] 舒全英, 郭磊, 孙甜, 等. 基于数据驱动的确窑水库洪水预报[J]. 水电能源科学, 2021, 39(11): 115-118.
- [7] ZHANG KE, WANG QINGQING, CHAO LI-JUN, et al. Ground observation-based analysis of soil moisture spatiotemporal variability across a humid to semi-humid transitional zone in China[J]. Journal of hydrology, 2019, 574: 903-914.
- [8] 中华人民共和国水利部. 水文情报预报规范: GB/T22482-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [9] 元晓华, 王浩. 金华站预报方案建模及洪水预报系统研制[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(16): 254-255, 274.