

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0120

高益辉, 钟平安, 徐斌, 等. 河流系统实时洪水预报误差多点联合校正方法研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 21-26.  
GAO Y H, ZHONG P A, XU B, et al. Study on multi point joint correction method for real time flood forecasting errors of river systems[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 21-26. (in Chinese)

# 河流系统实时洪水预报误差多点联合校正方法研究

高益辉<sup>1</sup>, 钟平安<sup>1</sup>, 徐斌<sup>1</sup>, 朱非林<sup>1</sup>, 曹瀚翔<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 台州天勤地理信息工程有限公司, 浙江 台州 318000)

**摘要:** 实时校正是改善洪水实时预报精度的重要手段。河流系统中多个站点之间具有高度的水力联系, 各个站点之间的误差也具有空间关联性。依据河道水流演进的基本方程和动态自适应的自回归方法, 建立了考虑误差空间演化的河流系统实时洪水预报误差多点联合校正方法。利用洪峰段洪量误差、洪峰流量误差、纳什效率系数(NSE)和峰滞时间等指标分别对多点联合校正和不考虑误差空间关联性的单点校正开展校正效果评估。以淮河王家坝断面以上为背景开展实证研究, 结果表明: 考虑河流系统误差空间关联性的多点联合校正效果优于单点校正, 洪峰段效果更为显著, 能够更有效地提高河流系统洪水预报的精度。

**关键词:** 洪水预报误差; 实时校正; 马斯京根法; 多点联合校正; 单点校正; 自回归模型

**中图分类号:** P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0021-06

## Study on multi-point joint correction method for real-time flood forecasting errors of river systems

GAO Yihui<sup>1</sup>, ZHONG Pingan<sup>1</sup>, XU Bin<sup>1</sup>, ZHU Feilin<sup>1</sup>, CAO Hanxiang<sup>2</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Taizhou Tian Qin Geographic Information Engineering Co., Ltd., Taizhou 318000, China)

**Abstract:** Real-time correction is an important way to improve the accuracy of real-time flood forecasting. There are high level hydraulic connections among the multiple stations in a river system, and the errors between the multiple stations are spatially interconnected as well. Based on the basic equations of river flood routing and the dynamic adaptive autoregressive method, this study proposed a multi-point joint correction method for real-time flood forecasting errors with consideration to the spatial evolution of errors. The correction effect was evaluated in terms of the flood volume error during flood peak period, flood peak discharge error, Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, and lag time of peak. This paper conducted a case study on the region up the Wangjiaba section of Huaihe River to demonstrate the proposed methodology. The results indicated that the effect of multi-point joint correction was better than that of single point correction, and the effect was even more prominent for the flood peak period. The proposed method can effectively improve the accuracy of flood forecasting of the river system.

**Key words:** flood forecasting errors; real-time correction; Muskingum method; multi-point joint correction; single point correction; autoregressive model

由于水文物理过程的复杂性和人类认识水平的局限性, 实时洪水预报中不可避免地存在由于数据

输入、模型结构和模型参数等不确定性带来的误差<sup>[1-2]</sup>。实时校正是减轻不确定性影响, 改善实时洪

收稿日期: 2018-05-24 修回日期: 2018-07-19 网络出版时间: 2018-07-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180725.1148.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405606); 国家自然科学基金(51579068); 中央高校基本科研业务费专项资金(2018B10514)

Funds: National Key Research and Development Program of China (2017YFC0405606); National Natural Science Foundation of China (51579068); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2018B10514)

作者简介: 高益辉(1993-), 男, 安徽滁州人, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: 1076611524@qq.com

通讯作者: 钟平安(1962-), 男, 安徽无为, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: pazhong@hhu.edu.cn

水预报精度的重要措施<sup>[3,4]</sup>。

从 20 世纪 60 年代开始,国内外学者对洪水预报实时校正方法进行了广泛的研究。Koren V. I. 等<sup>[5]</sup>将广义差分 ARMA 模型引入预报模型,在多瑙河布达佩斯至巴加河段采取自我校正预报器算法进行水位预报; Wood E. F. <sup>[6]</sup>在大流域上使用卡尔曼滤波器技术,建议采用分区子系统的处理方式,采用增补噪声过程的技术补偿预报误差,来处理各个子系统之间互相影响的问题;葛守西<sup>[7]</sup>指出了托尼迪建议的 MISP 算法存在的问题,建议了一种用衰减记忆在线识别、衰减卡尔曼滤波和匹配法自适应滤波联合运用的算法;李致家等<sup>[8]</sup>讨论了基于马斯京根流量演算河道洪水实时预报的半自适应滤波模型;田雨、雷晓辉等<sup>[9]</sup>对典型的水文模型流量预报实时校正算法、误差自回归校正算法、衰减记忆最小二乘算法和卡尔曼滤波算法四种洪水预报实时校正方法进行了对比分析,讨论了各种方法的利弊。

国内外专家学者对洪水预报实时校正的研究成果丰富,但较少考虑河流水系整体对校正结果的影响。本文针对以往实时校正方法对预报误差空间关联性考虑不足的问题,基于动态自适应的自回归方法,构建多点关联的系统校正模型,并以淮河王家坝断面为背景验证模型的有效性。

## 1 方法原理

### 1.1 河流系统预报误差实时校正需求

流域干支流上下游断面存在水力联系,组成一个有机的河流系统。如图 1 所示,流域内有  $n+1$  个断面,因为有水力联系存在,各断面的预报误差组成是不同的,第 1 到第  $n$  支流断面的流量仅来源于其控制面积以上降水径流,洪水预报产生的预报误差不受其他断面的影响,可以采用目前已有的实时校正方法进行单点校正。而第  $n+1$  断面流量包括两个部分,一是上游相关支流断面出流经河道汇流传播而来,二是区间入流。显然,  $n+1$  断面的预报误差也由两部分组成,如采用单点误差信息进行实时校正,则上游关联断面的校正结果对  $n+1$  断面的影响将无法反映。由此可见,当某断面上有上游关联断面时,采用多点联合校正方法,可以反映预报误差在空间上的传递。

根据以上分析,将一个具有  $n+1$  个断面的复杂流域水系分成两种类型:一是断面流量只由本断面以上的流域降水汇流形成,如图 1 中的断面 1 至断面  $n$ ;二是断面流量由上游若干断面入流和区间入

流组成,如图 1 中的第  $n+1$  断面。对于两种不同类型分别采取单点校正和多点联合校正。

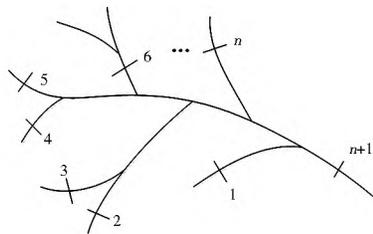


图 1 多支流水系示意图

Fig. 1 A river system with multiple branches

### 1.2 单点校正

对于图 1 中的断面 1 至断面  $n$  所示的没有上关联断面的实时洪水预报误差校正,直接采用本断面的误差系列分析得到实时校正项。以第  $i$  断面为例,单点校正的计算步骤如下。

(1) 计算历史(或面临时刻前已发生的)误差系列。

$$\delta_i(t) = Q_{F_i}(t) - Q_i(t) \quad (1)$$

式中:  $\delta_i(t)$  为时刻的模型计算误差;  $Q_{F_i}(t)$  为  $t$  时刻的模型预报流量;  $Q_i(t)$  为  $t$  时刻的实测流量。

(2) 建立误差实时校正模型,即建立未来时刻预报误差与历史误差之间的关系<sup>[10-11]</sup>。

$$\hat{\delta}_i(t) = f[\delta_i(t-1), \delta_i(t-2), \dots] \quad (2)$$

式中:  $\hat{\delta}_i(t)$  为  $t$  时刻的模型预报误差估计值;  $\delta_i(t-j)$  为  $t-j$  时刻的模型预报误差;  $f[\cdot]$  为误差校正函数。

(3) 未来时刻经过实时校正后的预报流量估计值为:

$$Q_{F_i}^*(t) = Q_{F_i}(t) - \hat{\delta}_i(t) \quad (3)$$

式中:  $Q_{F_i}^*(t)$  为  $t$  时刻  $i$  断面经实时校正后的模型预报流量。

如果要多时段连续校正,则按下式计算:

$$\hat{\delta}_i(t+j) = f[\hat{\delta}_i(t+j-1), \dots, \hat{\delta}_i(t), \delta_i(t-1), \delta_i(t-2), \dots] \quad (4)$$

$$Q_{F_i}^*(t+j) = Q_{F_i}(t+j) - \hat{\delta}_i(t+j) \quad (5)$$

### 1.3 多点联合校正方法

具有上关联断面的流量组成复杂,如图 1 中断面  $n+1$  所示,预报误差来源也复杂,需要先对  $n+1$  断面的误差进行分解,分为上关联断面预报误差和区间来水预报误差。

$$\hat{\delta}_{n+1}(t) = g[\hat{\delta}_1(t), \dots, \hat{\delta}_n(t)] + \hat{\delta}_0(t) \quad (6)$$

式中:  $\hat{\delta}_{n+1}(t)$  为  $t$  时刻预报误差的估计值;  $\hat{\delta}_i(t)$  为上游第  $i$  断面  $t$  时刻的预报误差估计值;  $g[\hat{\delta}_1(t), \dots, \hat{\delta}_n(t)]$  为上游关联断面  $t$  时刻的预报误差在  $n+1$  断面的响应;  $\hat{\delta}_0(t)$  为区间入流预报误差估计

值, 估计方法与单点校正相同。

未来某时刻经过实时校正后的预报流量为:

$$Q'_{F_{n+1}}(t) = Q_{F_{n+1}}(t) - \delta_{n+1}(t) \quad (7)$$

式中:  $Q'_{F_{n+1}}(t)$  为  $t$  时刻下断面经实时校正后的模型预报流量;  $Q_{F_{n+1}}(t)$  为  $t$  时刻下断面模型预报流量。

如果要多时段连续校正, 则按下式计算:

$$\delta_{n+1}(t+j) = f[\delta_1(t+j), \dots, \delta_n(t+j)] + \delta_0(t+j) \quad (8)$$

$$Q'_{F_{n+1}}(t+j) = Q_{F_{n+1}}(t+j) - \delta_{n+1}(t+j) \quad (9)$$

式(6)中  $g[\delta_1(t), \dots, \delta_n(t)]$  的确定采用马斯京根法, 忽略各个上断面到下断面传播时间的差异, 采用先合后演进行上下断面间的洪水演进计算<sup>[12-13]</sup>。

$$Q'_{F_{n+1}}(t) - \delta_{n+1}(t) = M_0 \left[ \sum_{i=1}^n Q_{F_i}(t) - \sum_{i=1}^n \delta_i(t) \right] + M_1 \left[ \sum_{i=1}^n Q_{F_i}(t-1) - \sum_{i=1}^n \delta_i(t-1) \right] + M_2 [Q_{F_{n+1}}(t-1) - \delta_{n+1}(t-1)] \quad (10)$$

$$M_0 = \frac{0.5 \Delta t - Kx}{0.5 \Delta t + K - Kx} \quad (11)$$

$$M_1 = \frac{0.5 \Delta t + Kx}{0.5 \Delta t + K - Kx} \quad (12)$$

$$M_2 = \frac{-0.5 \Delta t + K - Kx}{0.5 \Delta t + K - Kx} \quad (13)$$

式中:  $M_0, M_1, M_2$  为马斯京根法参数;  $K$  为各断面蓄量流量关系曲线的平均坡度, 也是相应蓄量恒定流状态下的河段平均传播时间;  $x$  为反应水面曲线形状的参数。

如果预报模型的河道洪水演进也是采用的马斯京根法, 则有:

$$Q_{F_{n+1}}(t) = M_0 \left[ \sum_{i=1}^n Q_{F_i}(t) \right] + M_1 \left[ \sum_{i=1}^n Q_{F_i}(t-1) \right] + M_2 [Q_{F_{n+1}}(t-1)] \quad (14)$$

进而导出:

$$f[\delta_1(t), \dots, \delta_n(t)] = M_0 \left[ \sum_{i=1}^n \delta_i(t) \right] + M_1 \left[ \sum_{i=1}^n \delta_i(t-1) \right] + M_2 f[\delta_1(t-1), \dots, \delta_n(t-1)] \quad (15)$$

$$\delta_{n+1}(t) = f[\delta_1(t), \dots, \delta_n(t)] \quad (16)$$

$$\delta_i(t) = M_0 \delta_i(t) + M_1 \delta_i(t-1) + M_2 \delta_i(t-1) \quad (17)$$

则有:

$$\delta_{n+1}(t) = f[\delta_1(t), \dots, \delta_n(t)] = \delta'_1(t) + \dots + \delta'_n(t) \quad (18)$$

将上式带入式(6)得到:

$$\delta_{n+1}(t) = \delta_0(t) + \dots + \delta_n(t) + \delta_0(t) \quad (19)$$

式中:  $\delta_{n+1}(t)$  为  $t$  时刻下断面预报流量误差的校正

预测值;  $\delta(t)$  为  $t$  时刻上断面预报流量误差在下断面的响应;  $\delta_0(t)$  为  $t$  时刻区间来水预报误差。

区间来水预报不好测量, 采用下断面预报误差扣除上断面预报流量误差在下断面的响应来推算, 公式如下。

$$\delta_0(i) = \delta_{n+1}(i) - \delta_{n+1}(i) \quad (20)$$

$$\delta_0(t) = f[\delta_0(t-1), \delta_0(t-2), \dots] \quad (21)$$

最终, 未来时刻经过实时校正后的预报流量估计值为:

$$Q'_{F_{n+1}}(t) = Q_{F_{n+1}}(t) - [\delta_0(t) + \delta_1(t) + \dots + \delta_n(t)] \quad (22)$$

## 2 实例分析

### 2.1 计算条件

淮河王家坝站位于淮河上游和中游的分界处, 也是淮河干流、洪河、白露河的交汇处, 见图 2。王家坝的上游有息县、潢川、班台三座水文站, 王家坝的来水分为息县、潢川、班台和区间等四个部分组成。



图 2 淮河王家坝断面以上水系  
Fig. 2 The water system up the Wangjiaba section of Huaihe River

选择 20140928、20150626、20160714 三场洪水进行实时预报与校正分析。实时预报结果采用淮河水利委员会水文局实时预报系统得到, 预报对象为息县、潢川、班台、王家坝四个断面的流量过程, 时段长为 6 h。息县、潢川、班台预报误差由各自断面的预报和实测流量过程获得, 息县、潢川、班台至王家坝的区间预报误差采用王家坝断面预报误差减去息县、潢川、班台预报误差在王家坝的响应得到, 息县、潢川、班台和区间的误差校正采用单点校正, 选用动态自适应的自回归方法, 自回归阶数采用 AIC 准则确定<sup>[14]</sup>, 本研究为 3 阶; 王家坝断面采用多点联合校正。实时校正外延一个时段。

单点校正动态自适应的自回归方法, 采用以下中心化公式<sup>[15-16]</sup>:

$$\hat{\delta}_i(t) = \delta_i + C_1[\delta_i(t-1) - \delta_i] + C_2[\delta_i(t-2) - \delta_i] + C_3[\delta_i(t-3) - \delta_i] + \zeta_i \quad (23)$$

式中:  $\hat{\delta}_i(t)$  为单站点误差预测值;  $\delta_i$  为该站点计算时段内误差均值;  $C_1, C_2, C_3$  为率定的自回归参数, 随时间推移动态率定;  $\zeta_i$  为随机项。

息县、潢川、班台的误差演进采用马斯京根法, 参数  $M_0, M_1, M_2$  分别为 0.039、0.293、0.746<sup>[17-18]</sup>。

息县、潢川、班台至王家坝区间校正动态自适应自回归方法, 采用以下中心化公式:

$$\hat{\delta}_0(t) = \delta_0 + D_1[\delta_0(t-1) - \delta_0] + D_2[\delta_0(t-2) - \delta_0] + D_3[\delta_0(t-3) - \delta_0] + \zeta_0 \quad (24)$$

式中:  $\delta_0(i)$  为区间来水误差;  $\hat{\delta}_0(t)$  为  $t$  时刻区间来水误差预报。  $D_1, D_2, D_3$  为率定的自回归参数, 随时间推移动态率定;  $\zeta_0$  为随机项。

## 2.2 评价指标

### (1) 洪峰段洪量误差。

洪峰段流量误差是指洪峰出现时段及其前后各两个时段所对应的洪量<sup>[19-20]</sup>, 此处采用相对值, 即:

$$E_W = \frac{\sum_{i=m-2}^{m+2} W'_i}{\sum_{i=m-2}^{m+2} W_i} \times 100\% \quad (25)$$

式中:  $W'$ ,  $W$  为校正后洪峰段洪量和实测洪峰段洪量;  $m$  为实测过程的峰现时间。

### (2) 洪峰流量误差。

洪峰流量误差指一次洪水过程的最大流量的误差, 本文采用相对值。

### (3) 纳什效率系数。

纳什效率系数指洪水预报过程与实测过程之间的吻合程度, 即:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_e(i) - y_0(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [y_0(i) - \bar{y}_0]^2} \quad (26)$$

式中:  $E$  为纳什效率系数;  $y_0(i)$  为实测值;  $y_e(i)$  为预报值;  $\bar{y}_0$  为实测值的均值;  $n$  为资料序列长度。  $E$  取值范围为负无穷至 1。  $E$  接近 1, 表示模式质量好, 模型可信度高;  $E$  接近 0, 表示模拟结果接近观测值的平均值水平, 即总体结果可信, 但过程模拟误差大;  $E$  小于 0, 则模型是不可信的<sup>[21-22]</sup>。

### (4) 峰滞时间。

峰滞时间指预报峰现时间减去实测峰现时间, 本文为预报时段间隔乘以 6 h。

## 2.3 结果分析

本文直接利用王家坝断面预报误差进行单点校正作为比较方案, 其方法同前。表 1 为不同实时校正方法校正指标对照表, 图 3 至图 5 为不同校正方法的过程线对照图。

表 1 王家坝断面单点校正和多点联合校正指标对比

Tab. 1 Comparison between the indexes of the single point correction and multi point joint correction methods in the Wangjiaba section

次洪	方案	洪峰段洪量误差 (%)	洪峰流量误差 (%)	纳什效率系数	峰滞时间 / 6 h
20140928	原始预报	13.74	14.11	0.87	0
	联合校正	0.48	1.64	0.97	1
	单点校正	2.45	4.43	0.95	1
20150626	原始预报	5.32	29.28	0.77	4
	联合校正	7.37	13.72	0.97	4
	单点校正	9.31	15.55	0.96	4
20160714	原始预报	25.48	22.49	0.82	0
	联合校正	1.50	0.40	0.99	1
	单点校正	6.68	6.72	0.98	2
平均	原始预报	14.85	21.96	0.82	1.3
	联合校正	3.12	5.25	0.98	2.0
	单点校正	6.15	8.90	0.96	2.3

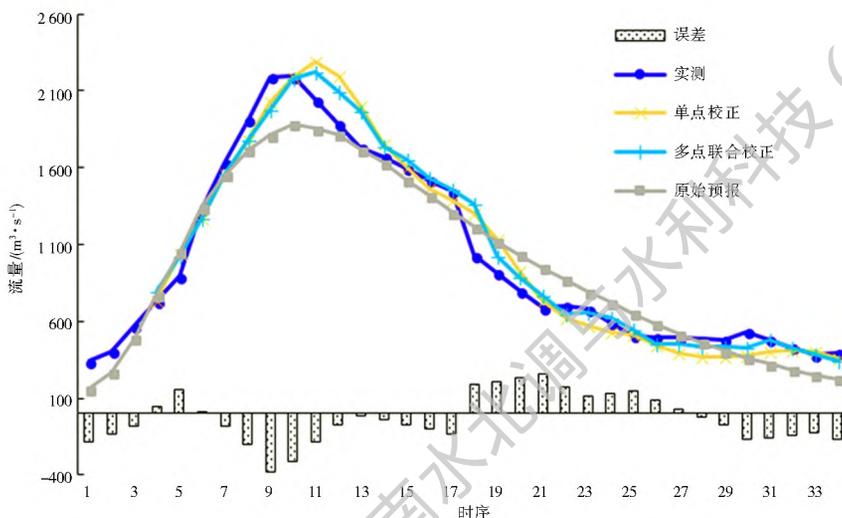


图 3 王家坝 20140928 次洪不同校正方法的结果对比

Fig. 3 Comparison of the correction results by different methods for the 20140928 flood of the Wangjiaba section

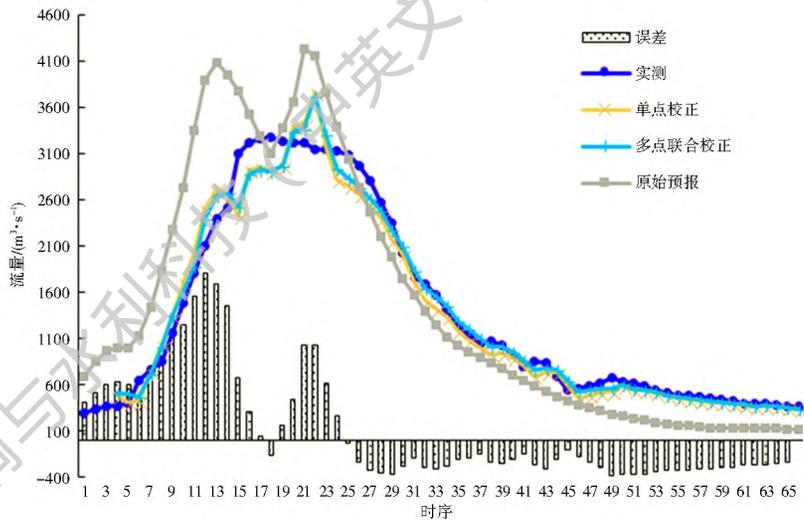


图4 王家坝 20150626 次洪不同校正方法的结果对比

Fig. 4 Comparison of the correction results by different methods for the 20150626 flood of the Wangjiaba section

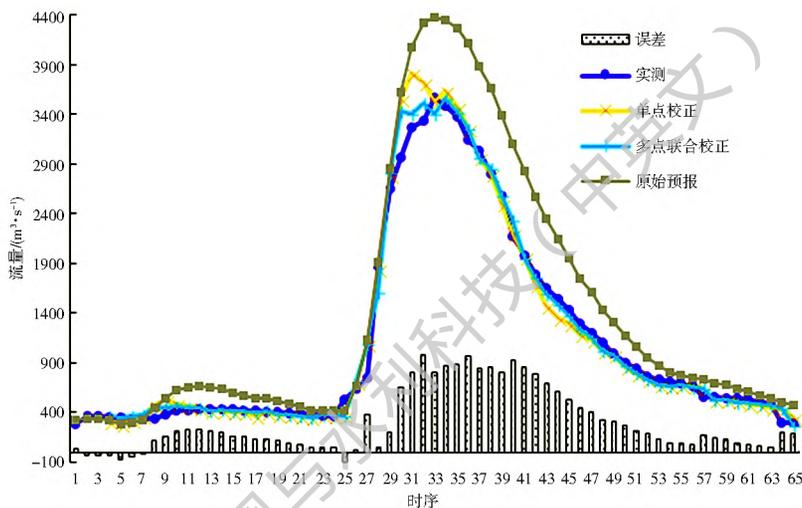


图5 王家坝 20160714 次洪不同校正方法的结果对比

Fig. 5 Comparison of the correction results by different methods for the 20160714 flood of the Wangjiaba section

由表 1 和图 3 至图 5 可知如下结果。

(1) 在洪峰段洪量误差、洪峰流量误差和纳什效率系数三个指标中, 多点联合校正方法均优于单点校正, 能够有效地提升实时校正的效果。

(2) 单点校正与多点联合校正方法在峰现时间指标中校正效果基本相同。这可能是自回归模型的特点决定的, 两者对相位的影响机制相同。

(3) 当误差变化平缓时, 多点联合校正方法与单点校正方法区别不大, 优势不明显; 当误差变化剧烈时, 多点联合校正明显优于单点校正。

### 3 结论

根据河流系统预报误差实时校正需求, 本文提出了河流系统实时洪水预报误差多点联合校正方法。多点联合校正考虑了王家坝来水的空间组成, 剔除了上游关联断面校正成果的影响, 而王家坝单点校正时以总误差为对象, 实际上是将关联断面预

报误差经过了两次重复校正, 在河流系统中存在复杂水利联系时, 采用多点联合校正效果会更好。

本文成果为复杂水系多断面预报的实时校正提供了新的思路。受限时间、连续多时段外延效果和预报能力、缺测资料处理方式等问题需要进一步继续展开研究, 也可以尝试其他的回归建模方法与本研究作对比。

#### 参考文献(References):

- [1] ZHU F L, ZHONG P A, SUN Y M, et al. Real time optimal flood control decision making and risk propagation under multiple uncertainties [J]. Water Resources Research, 2017, 53 (12), 10635-10654. DOI: 10.1002/2017WR021480.
- [2] ZHU F L, ZHONG P A, SUN Y M. Multi-criteria group decision making under uncertainty: Application in reservoir flood control operation [J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 100, 236-251. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.11.032.
- [3] 梁忠民, 戴荣, 李彬权. 基于贝叶斯理论的水文不确定性分析研

- 究进展[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 274-281. (LIANG Z M, DAI R, LI B G. A review of hydrological uncertainty analysis based on Bayesian theory [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 274-281. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2010.02.008.
- [4] 叶守泽, 夏军. 水文科学研究的世纪回眸与展望[J]. 水科学进展, 2002(1): 93-104. (YE S Z, XIA J. Century's retrospect and looking into the future of hydrological science [J]. Advances in Water Science, 2002(1): 93-104. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2002.01.017.
- [5] KOREN V I, BELCHIKOV Y A, KUCHMENT L S, et al. Hydrological forecasting: proceedings of the symposium, Oxford, UK, 15-18 April, 1980. [J]. IAHS AISH Publication, 1980. DOI: 10.1007/978-90-483-3403-8\_4.
- [6] WOOD E F. Filtering of partitioned large scale hydrological systems[J]. Hydrological Sci Bull, 1981, 26(1), 33-46. DOI: 10.1080/02626668109490860.
- [7] 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): 3-11. (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): 3-11. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.1986.10.011.
- [8] 李致家, 孔祥光, 朱兆成, 等. 河道洪水实时预报的半自适应模型研究[J]. 水科学进展, 1998, 9(4): 367-372. (LI Z J, KONG X G, ZHU Z C, et al. Half self adaptive updating Kalman filter model of channel flow routing [J]. Advances in Water Science, 1998, 9(4): 367-372. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.1998.04.010.
- [9] 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 technology for flood forecast [J]. Yellow River, 2011, 33(3): 25-26. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2011.03.010.
- [10] 王文鹏, 李春红, 王建平. 洪水预报系统中实时校正模型的优选方法[J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(1): 78-83. (WANG W P, LI C H, WANG J P. Optimal selection method of real time correction model in flood forecasting system [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2012, 36(1): 78-83. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-3893.2012.01.021.
- [11] 顾巍巍, 孙如飞, 张卫国, 等. 水库洪水实时优化校正预报模型的探究与应用[J]. 水力发电, 2017, 43(7): 22-25. GU W W, SUN R F, ZHANG W G, et al. Research and application of real time flood correction and forecast model for reservoir flood [J]. Water Power, 2017, 43(7): 22-25. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2017.07.006.
- [12] CUNGE J A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum Method) [J]. Journal of Hydraulic Research, 1969, 7(2): 205-230. DOI: 10.1080/00221686909500264.
- [13] 王家彪, 雷晓辉, 廖卫红, 等. 马斯京根模型改进新思路[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(2): 87-92, 37. (WANG J B, LEI X H, LIAO W H, et al. A new idea for modifications of the Muskingum routing model [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(2): 87-92, 37. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2016.02.016.
- [14] AKAIKE H. Factor analysis and AIC [J]. Psychometrika, 1987, 52(3): 317-332. DOI: 10.1007/BF02294359.
- [15] 焦伟杰, 龙海峰. 基于自回归模型的分布式水文模型预报校正[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(2): 103-108. (JIAO W J, LONG H Z. Forecast and correction of distributed hydrological model based on autoregression model [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(2): 103-108. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.02.19.
- [16] 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(3): 25-27. (GUO L, ZHAO Y L. Study on adjustment methods of real time flood forecasting in view of autoregressive model [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2002(3): 25-27. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2002.03.009.
- [17] 李致家. 具有行蓄洪区的河道流量演算方法探讨[J]. 水科学进展, 1997(1): 68-73. (LI Z J. Research on channel routing method with flood diversion and flood retarding areas [J]. Advances in Water Science, 1997(1): 68-73. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.1997.01.011.
- [18] 梁忠民, 王旭伟, 宁亚伟, 等. 基于动力系统反演理论的马斯京根流量演算误差校正[J]. 水力发电, 2017, 43(12): 9-12. (LIANG Z M, WANG X W, NING Y W, et al. Study on error correction method of Muskingum flow calculation based on dynamic system inversion theory [J]. Water Power, 2017, 43(12): 9-12. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2017.12.003.
- [19] 杨敏芝, 钟平安, 汪曼琳, 等. 大汶河流域陆面蒸发估算方法比较[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 50-55. (YANG M Z, ZHONG P A, WANG M L, et al. Comparative study on the methods of estimating land surface evaporation in Dawenhe river basin [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 50-55. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2017.05.008.
- [20] WU Y N, ZHONG P A, ZHANG Y, et al. Integrated flood risk assessment and zonation method: a case study in Huaihe River basin, China [J]. Natural Hazards, 2015, 78(1): 635-651. DOI: 10.1007/s11069-015-1737-3.
- [21] 吴业楠, 钟平安, 赵云发, 等. 基于灰色关联分析的相似洪水动态展延方法[J]. 南水北调与水利科技, 2014(1): 126-130. (WU Y N, ZHONG P A, ZHAO Y F, et al. Dynamic extending approach of similar flood based on gray correlation analysis [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014(1): 126-130. (in Chinese)) DOI: 10.3724/sp.j.1201.2014.01126.
- [22] 谭乔凤, 王旭, 王浩, 等. ANN、ANFIS 和 AR 模型在日径流时间序列预测中的应用比较[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 12-17, 26. (TAN Q F, WANG X, WANG H, et al. Comparative study of ANN, ANFIS and AR model for daily runoff time series prediction, 2016 [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(6): 12-17, 26. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2016.06.003.