

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.012

基于协整理论的淮河流域上游洪水预报实时校正方法

张旭旻¹, 瞿思敏¹, 李倩², 石朋¹, 嵇海祥³, 宋兰兰¹, 王麒栋⁴

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 苏州市网慧水利设计咨询有限公司, 江苏 苏州 215128;
3. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210008; 4. 舟山市生态环境局, 浙江 舟山 316021)

摘要: 为了提高淮河流域上游的洪水预报精度, 引入计量经济学中的协整理论与误差修正模型用于洪水预报实时校正; 同时为了解决自回归算法无法针对非平稳序列建模以及序贯相关性问题, 构建了基于误差修正概念的自回归误差修正模型。以淮河鲁台子站以上流域为研究区域, 基于分布式垂向混合产流模型模拟结果, 分别构建一阶至三阶自回归模型、误差修正模型和基于误差修正的自回归模型对模拟结果进行校正, 采用修正效果评价系数、确定性系数、洪峰相对误差、径流深相对误差和峰现时差 5 个评价指标, 分析对比各校正模型对流域 2003—2014 年 10 场洪水的校正效果。结果表明: 3 种实时校正方法均对淮河流域上游洪水有一定的校正效果, 其中, 自回归模型校正效果最差, 排除误差序列非平稳的两次洪水后, 其平均修正效果评价系数为 0.20; 误差修正模型能够有效校正预报洪水, 其平均修正效果评价系数为 0.76; 基于误差修正的自回归模型校正效果较好, 与传统自回归模型相比, 对洪峰流量的校正效果显著提高, 其平均修正效果评价系数达到 0.98, 可用于淮河流域上游洪水预报的实时校正。

关键词: 协整理论; 误差修正模型; 自回归模型; 实时校正; 淮河流域上游

中图分类号: TV124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)06-0088-08

Real-time correction method of flood forecasting for the upper Huaihe River Basin based on cointegration theory //
ZHANG Xumin¹, QU Simin¹, LI Qian², SHI Peng¹, JI Haixiang³, SONG Lanlan¹, WANG Qidong⁴ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Wanghui (Suzhou) Water Resources Consulting Co., Ltd., Suzhou 215128, China; 3. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Ministry of Water Resources, Nanjing 210008, China; 4. Zhoushan Ecological Environment Bureau, Zhoushan 316021, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of flood forecasting in the upper Huaihe River Basin, the cointegration theory and error correction model (ECM) in econometrics were introduced for real-time correction of flood forecasting. Meanwhile, for solving the problem that the autoregressive (AR) model is not able to simulate the non-stationary sequence and the problem of sequential correlation, the autoregressive error correction model (ARECM) was constructed based on the concept of error correction. With the Huaihe River Basin above the Lutaizi station used as the study area, 1- to 3-order AR model, ECM and ARECM were constructed respectively to correct the simulation results of the distributed vertical mixed runoff generation model. The correction results of different correction models regarding 10 floods' forecasting from 2003 to 2014 in the upper Huaihe River Basin were analyzed and compared using five evaluation indexes, including the correction effect evaluation coefficient, deterministic coefficient, relative error of flood peak, relative error of runoff depth, and error of time to flood peak. The results show that the forecasted flood in the upper Huaihe River Basin is effectively corrected by the three real-time correction models. The correction performance of the AR model is relatively worse, and after two floods that have non-stationary error sequences are excluded, the average correction effect evaluation coefficient is 0.20; ECM can effectively correct forecasted floods, and the average correction effect evaluation coefficient is 0.76; the correction performance of ARECM is better as compared to the traditional AR model, and the correction effect of flood peak is

基金项目: 国家自然科学基金(52179011); 国家重点研发计划(2019YFC0409000)

作者简介: 张旭旻(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 2277877769@qq.com

通信作者: 石朋(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事流域水文模拟研究。E-mail: ship@hhu.edu.cn

significantly improved, with the average correction effect evaluation coefficient being 0.98, demonstrating that ARECM can be well applied to real-time correction of flood forecasting in the upper Huaihe River Basin.

Key words: cointegration theory; error correction model; autoregressive model; real-time correction; the upper Huaihe River Basin

流域水文模型研究采用时不变非线性系统,通过历史水文数据对模型参数进行率定,用于未来洪水预报,但这种预报方案往往得不到令人满意的结果^[1]。其原因在于,流域水文系统是一个时变非线性系统,在人类活动和气候变化的影响下,水文规律随时间变化。此外,流域水文系统是一个复杂系统,用模型进行模拟时,常进行一系列的假设和简化,这些假设和简化在外延时会带来较大误差。包红军等^[2-4]通过构建模拟效果更准确的短时定量降水序列和洪水预报智能模型尝试解决模型外延时产生的误差问题。但在现有技术水平下,还无法从根源解决上述问题,因此,需要通过实时校正技术对预报结果进行适时、适量的校正,以提高洪水预报精度。

实时校正方法根据校正对象的不同大体上可以分为两类:一是过程误差校正方法(process bias correction, PBC),二是终端误差校正方法(terminal bias correction, TBC)^[5]。PBC 主要对模型输入、参数、状态变量等进行校正,包括递推最小二乘校正法、卡尔曼滤波方法、动态系统响应曲线方法等。已有研究表明,动态系统响应曲线方法能够对模拟流量结果进行有效的校正^[6-7],但在实际应用中会出现“振荡”现象,可通过引入平稳矩阵减缓该缺陷。王莉莉等^[8]构建了淮河中游的 Preissmann 四点隐式差分格式的一维水动力模型,并利用卡尔曼滤波对构建的水动力模型进行校正,结果表明,经过校正的模型对水位和流量的预报精度更高。TBC 方法不考虑预报过程误差,直接对最终流量结果进行校正,从而达到实时更新原预报值的目的。TBC 方法中自回归模型(autoregressive model, AR)应用最为广泛,该校正模型已被应用于多个流域的洪水预报结果实时校正中。已有研究表明,AR 模型能够有效地对预报洪水结果进行实时校正,但对洪峰流量误差校正效果不佳^[5,9-11]。其原因在于,AR 模型存在一个基本假定,认为误差序列存在序贯相关性^[12],当这种序贯相关性因为序列突变而变化时,会导致较差的校正结果,而洪峰前后误差序列不可避免地存在突变,所以 AR 模型校正效果较差。同时 AR 模型需满足时间序列为平稳序列的前提条件,而实际上,大多数水文要素时间序列都是非平稳的。基于非平稳时间序列运用 AR 模型进行分析会导致“伪回归”现象的发生。

Engle 等^[13]1987 年提出的协整理论为非平稳时间序列分析提供了有力的理论依据,常被用来处理同阶单整的非平稳时间序列问题^[14-15]。基于协整理论的误差修正模型(error correction model, ECM)通过引入一阶差分项消除了变量可能存在的趋势因素,避免了“伪回归”问题,同时通过引入误差修正项削弱了序贯相关性的影响。ECM 模型作为计量经济学中解决误差修正问题的经典模型,在水文学中应用较少。针对河川径流为平稳系列的假设所造成的“伪回归”问题,张利亚等^[14,16-17]分别将 ECM 模型应用于第二松花江流域、黄河流域和渭河流域,构建了年径流量预测模型,取得了较好的应用效果。

已有研究表明,分布式水文模型能够较好地考虑流域降水与下垫面空间分布不均的特点,有效提高洪水预报精度^[18-19],同时垂向混合产流模型综合考虑了蓄满、超渗产流模式,因此,在半干旱半湿润地区具有良好的应用效果。本文采用分布式垂向混合产流模型模拟结果作为本次实时校正算法研究的数据来源。本文以淮河流域上游为研究区域,尝试将协整理论与 ECM 模型应用于自回归建模中,解决 AR 模型无法分析非平稳时间序列以及序贯相关性的问题,并在分布式垂向混合产流模型基础上,建立一阶至三阶 AR 模型、ECM 模型、基于误差修正的自回归模型(autoregressive error correction model, ARECM)对模拟结果进行校正,对比各模型校正效果,以期提高淮河流域上游洪水预报精度,为防洪调度提供更有力的科学依据。

1 研究区概况与数据来源

淮河流域地处我国东部,介于长江与黄河流域之间,流域面积 18.7 万 km²。本文以淮河鲁台子以上流域为研究区域,面积为 8.86 万 km²,气温由北向南升高,蒸发量南小北大,年平均蒸散发为 900 ~ 1500 mm。淮河流域为典型半干旱半湿润流域,多年平均降水量为 911 mm,多年平均径流深为 231 mm,多年平均径流系数为 0.25,其径流年内分布不均,主要集中在汛期。流域水系如图 1 所示。研究数据来源于水文年鉴(2003—2014 年)逐日逐时段实测降水、流量和蒸散发数据(逐时段蒸散发数据由逐日数据平均得到)。

洪水对模型进行参数率定与检验,模型模拟结果如表1所示。结果表明,模型平均确定性系数为0.74,模拟结果合格率为70%,能够较好地模拟淮河流域上游洪水过程。

3 实时校正方法

3.1 ECM 模型

ECM模型是一种具有特定形式的计量经济学模型。首先需要对自变量 x 与因变量 y 进行协整分析,以发现变量之间的协整关系(即长期均衡关系),假设协整关系的回归方程形式为

$$y_t = b_0 + b_1 x_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

式中: b_0 、 b_1 为系数; ε_t 为 t 时刻误差修正项,即回归方程的残差序列,反映 t 时刻因变量在短期波动中偏离长期均衡关系的程度。

将误差修正项看作一个解释变量,连同其他反映短期波动的解释变量一起,建立短期模型,即ECM模型。误差修正模型的主要形式为

$$\Delta y_t = b_0 + b_1 \Delta x_t + \gamma \varepsilon_{t-1} + \mu_t \quad (2)$$

式中: Δy_t 、 Δx_t 为 t 时刻因变量与自变量的一阶差分; ε_{t-1} 为 $t-1$ 时刻误差修正项; μ_t 为纯随机数列; γ 为系数,多为负值。

根据实际应用的场景,可对ECM模型的形式进行变化,首先将观测流量作为因变量,模拟流量的一阶滞后项作为自变量进行协整分析,得到

$$Q_{\text{obs},t} = b_0 + b_1 Q_{\text{sim},t-1} + \varepsilon_t \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{obs},t}$ 为 t 时刻实测流量; $Q_{\text{sim},t-1}$ 为 $t-1$ 时刻模拟流量。

基于式(3)构建的短期模型为

$$\Delta Q'_{\text{obs},t} = b_0 + b_1 \Delta Q_{\text{sim},t-1} + \gamma \varepsilon_{t-1} + \mu_t \quad (4)$$

其中 $\varepsilon_{t-1} = Q_{\text{obs},t-1} - b_0 - b_1 Q_{\text{sim},t-2}$
式中: $\Delta Q'_{\text{obs},t}$ 为估计的 t 时刻实测流量数据一阶差分; $\Delta Q_{\text{sim},t-1}$ 为 $t-1$ 时刻模拟流量数据一阶差分。

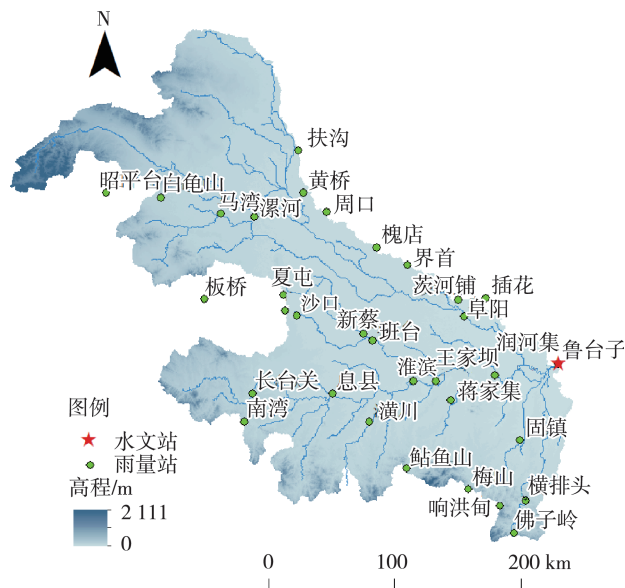


图1 鲁台子以上流域水系与站点

Fig.1 Schematic diagram of water system and stations in river basin above Lutaizi station

2 分布式垂向混合产流模型构建

垂向混合产流模型由包为民等^[20]于1997年提出,模型将超渗产流与蓄满产流进行垂向组合,降水到达地面后,首先通过下渗能力分布曲线划分为地面径流和下渗水流。在土壤含水量大的区域,下渗水流补充土壤含水量,不产流;在含水量小的区域,下渗水流补充土壤含水量达到饱和后,产生地面以下径流。由于同时考虑了超渗和蓄满两种产流模式,该模型既适用于湿润地区产汇流过程模拟,也适用于半干旱半湿润地区产汇流过程模拟^[20-21]。为了更好地考虑降水和下垫面分布不均对流域产汇流过程的影响,本文基于垂向混合产流模型和DEM资料,构建了栅格型分布式垂向混合产流模型,根据2003—2014年淮河鲁台子站实测资料,选取10场

表1 鲁台子以上流域洪水模拟结果

Table 1 Results of flood simulation in river basin above Lutaizi station

阶段	洪号	降水量/ mm	实测径流 深/mm	模拟径流 深/mm	径流深相 对误差/%	实测洪峰/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟洪峰/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰相对 误差/%	峰现 时差/h	确定性 系数	是否 合格
率定期	20030620	1000.3	400.5	291.4	-27.24	7820	8780	12.28	-37	0.48	否
	20060624	228.6	31.6	27.6	-12.66	2190	2590	18.26	-16	0.77	是
	20060721	196.8	51.7	49.5	-4.26	2520	2540	0.79	-8	0.95	是
	20070627	591.5	253.3	208.8	-17.57	7970	9140	14.68	19	0.54	否
	20080415	87.6	21.1	19.6	-7.11	2450	2460	0.41	-1	0.93	是
	20100629	253.1	86.7	74.5	-14.07	4630	4600	-0.65	56	0.88	是
	20120907	81.8	19.2	16.4	-14.58	2260	2600	15.04	0	0.56	是
	20140827	100.9	17.1	19.0	11.11	2480	2200	-11.29	-27	0.86	是
检验期	20050706	751.7	389.1	376.8	-3.16	6650	6440	-3.14	-3	0.89	是
	20100811	287.1	88.9	74.5	-16.20	3020	3970	31.46	35	0.54	否
平均值		357.9	107.8	115.8	7.42	4200	4530	7.86	2	0.74	

假设具有 t 时刻的实测流量数据以及 $t+1, \dots, t+n$ 时刻的预报流量数据,在利用 ECM 模型对预报数据进行滚动校正时,首先计算出 $\Delta Q_{\text{sim},t}$ 与 ε_t , 根据式(4)计算得出 $\Delta Q'_{\text{obs},t+1}$, 将 $\Delta Q'_{\text{obs},t+1}$ 与 $Q_{\text{obs},t}$ 相加即可得到 $t+1$ 时刻校正后流量结果 $Q'_{\text{obs},t+1}$; 类似地,对 $t+n+1$ 时刻预报数据进行校正时,根据 $\Delta Q_{\text{sim},t+n}$ 与 ε_{t+n} 计算得出 $\Delta Q'_{\text{obs},t+n+1}$, 将 $\Delta Q'_{\text{obs},t+n+1}$ 与 $Q'_{\text{obs},t+n}$ 相加即可得到 $t+n+1$ 时刻校正后流量结果 $Q'_{\text{obs},t+n+1}$ 。因此,假设分布式垂向混合产流模型预见期为 n , 则 ECM 模型预见期为 $n+1$ 。式(4)为一阶 ECM 模型,二阶 ECM 模型如式(5)所示,三阶模型形式相似。

$$\Delta Q'_{\text{obs},t} = b_0 + b_1 \Delta Q_{\text{sim},t-1} + b_2 \Delta Q_{\text{sim},t-2} + \gamma \varepsilon_{t-1} + \mu_t \quad (5)$$

式中 b_2 为系数。

3.2 AR 模型

AR 模型基于变量的自相关性,认为 t 时刻变量的值可以用其之前各时刻的值来预测。在实时校正过程中,根据实测流量与预报流量计算误差序列,在假设误差序列为平稳序列的前提下,建立误差 AR 模型,估计下一时刻误差值,从而达到校正效果。AR 模型为

$$e_t = \sum_{k=1}^{t-1} a_k e_{t-k} + \varepsilon'_t \quad (6)$$

式中: e_t 为 t 时刻预报值与实测值之间误差; a_k 为系数; k 为自回归阶数; ε'_t 为 t 时刻随机误差,为零均值独立同分布误差序列。

3.3 ARECM 模型

依据 Granger 表述定理,如果变量 x 与 y 是协整的,则变量间的短期非均衡关系总能由 ECM 模型表述^[13]。为便于解释推导,假设根据实测流量与预报流量构建的误差序列存在如下一阶自回归形式的长期均衡关系:

$$e_t = \alpha_0 + \alpha_1 e_{t-1} + \varepsilon_t \quad (7)$$

式中 α_0, α_1 为系数。

实际上,单场洪水误差序列很少处在均衡点上,因此根据单场洪水建立的误差 AR 模型只能反映误差序列的短期或非均衡关系。假设针对单场洪水具有如下二阶自回归形式模拟方程:

$$e_t = \beta_0 + \beta_1 e_{t-1} + \beta_2 e_{t-2} + \mu_t \quad (8)$$

式中 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 为系数。该模型显示, t 时刻误差值 e_t 可由 e_{t-1} 和 e_{t-2} 估计得到。由于误差序列可能是非平稳的,因此不能直接应用普通最小二乘法 (ordinary least square, OLS) 计算参数取值。根据式(8)可得

$$\Delta e_t = \beta_0 + \beta_1 e_{t-1} - e_{t-1} + \beta_2 e_{t-2} + \mu_t \quad (9)$$

对式(9)进一步变换后可得

$$\Delta e_t = \beta_1 \Delta e_{t-1} - \lambda (e_{t-1} - \gamma_0 - \gamma_1 e_{t-2}) + \mu_t \quad (10)$$

其中 $\gamma_0 = \beta_0/\lambda$ $\gamma_1 = (\beta_1 + \beta_2)/\lambda$

式中 λ 为系数。如果 e_t 为一阶单整序列,则 Δe_t 为平稳序列,可以应用 OLS 法计算模型参数取值。令 $\gamma_0 = \alpha_0$, $\gamma_1 = \alpha_1$, 由式(10)可得:

$$\Delta e_t = \beta_1 \Delta e_{t-1} - \lambda \varepsilon_{t-1} + \mu_t \quad (11)$$

式(11)通过引入一阶差分项消除了变量可能存在的趋势因素,避免了“伪回归”与可能存在的多重共线性问题,解决了非平稳误差序列的自回归建模问题,同时通过引入误差修正项,体现了变量水平信息。式(11)为本文采用的一阶 ARECM 模型,式(12)为二阶 ARECM 模型,三阶模型形式相似。

$$\Delta e_t = \beta_1 \Delta e_{t-1} + \beta_2 \Delta e_{t-2} - \lambda \varepsilon_{t-1} + \mu_t \quad (12)$$

3.4 评价指标

选取修正效果评价系数^[1]与确定性系数作为评价校正效果优劣的指标。并根据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,针对洪峰与径流量分别选取洪峰相对误差、峰现时差、径流深相对误差对洪水要素校正效果进行详细的评价。

修正效果评价系数为

$$C = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{\text{raw},t} - Q_{\text{obs},t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{\text{sim},t} - Q_{\text{obs},t})^2} \quad (13)$$

式中 $Q_{\text{raw},t}$ 为校正后 t 时刻流量。

4 实时校正模型应用效果分析

4.1 平稳性检验

采用广泛应用于时间序列平稳性检验的 Augment Dickey-Fuller (ADF) 检验法对 10 场洪水误差序列进行平稳性检验。基于 ADF 检验的回归方程为

$$\Delta y_t = \alpha + \beta t + \delta y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \xi_i \Delta y_{t-i} + \zeta_t \quad (14)$$

式中: α, β, δ 为系数; p 为总滞后阶数; ζ_t 为白噪声序列; ξ_i 为滞后阶数为 i 的线性时间趋势项。

对淮河流域上游 10 场洪水的误差序列进行 ADF 检验,结果如表 2 所示。10 场洪水中除 20120907 与 20140827 次洪水误差序列外,其余洪水误差序列均为平稳序列。本研究中,为了体现 ARECM 模型在非平稳时间序列建模中的优势,对 20120907 与 20140827 次洪水依旧构建 AR 模型,对垂向混合产流模型模拟结果进行校正。需要强调的是,针对 20120907 与 20140827 次洪水构建的 AR 模型为“伪回归”模型,并没有实用价值。

表2 ADF 检验结果
Table 2 Results of ADF test

洪号	是否为平稳序列	是否含有趋势项	是否含有截距项
20030620	是	否	否
20050706	是	是	否
20060624	是	否	是
20060721	是	否	是
20070627	是	是	否
20080415	是	是	否
20100629	是	是	否
20100811	是	是	否
20120907	否		
20140827	否		

4.2 协整检验

协整关系能够反映变量间长期存在的一种稳定均衡关系。对多变量应用 ECM 模型时需满足变量间具有协整关系的前提条件,因此,对变量进行协整检验是很有必要的。协整检验^[13]核心在于对回归方程残差进行单位根检验(即平稳性检验),若残差序列为单整序列(即平稳序列),则变量间存在协整关系。本文对误差修正模型中的变量进行协整检验,各变量间协整检验结果的 P 值如表 3 所示。当 $P > 0.05$ 时,认为在 5% 置信度区间内接受原假设;当 $P > 0.1$ 时,认为在 10% 置信度区间内接受原假设,而原假设为不具有协整关系。

表3 协整检验结果的 P 值

Table 3 P values of cointegration test results

洪号	模拟值与 实测值	e_t 与 e_{t-1}	e_t 、 e_{t-1} 与 e_{t-2}	e_t 、 e_{t-1} 、 e_{t-2} 与 e_{t-3}
20030620	0.14	0.00	0.00	0.00
20050706	0.00	0.00	0.00	0.00
20060624	0.09	0.11	0.00	0.00
20060721	0.05	0.00	0.00	0.00
20070627	0.02	0.00	0.00	0.00
20080415	0.00	0.04	0.00	0.00
20100629	0.03	0.04	0.00	0.00
20100811	0.00	0.02	0.00	0.00
20120907	0.14	0.14	0.00	0.00
20140827	0.47	0.00	0.00	0.00

在建立 ECM 模型的 10 场洪水中,对模型模拟值与实测值进行协整检验,其中 7 场洪水 P 值小于 0.1,在 10% 置信度区间内拒绝原假设,认为序列间具有协整关系,通过了协整检验。未通过 10% 置信度协整检验的 3 场洪水中,有 2 场洪水 P 值为 0.14,可以近似认为通过了协整检验;而 20140827 次洪水, P 值为 0.47,未通过 10% 置信度协整检验,因此,不采用 ECM 模型对该场洪水进行误差校正。在一阶 ARECM 模型建立中,对 e_t 与 e_{t-1} 进行协整检验,10 场洪水中有 8 场洪水通过了 5% 置信度协整检验,其中,未通过协整检验的 2 场洪水

的 P 值分别为 0.11 与 0.14,可以近似认为通过 10% 置信度协整检验,能够用于模型建立。针对二阶与三阶 ARECM 模型,所有变量在各场次洪水中均通过了 5% 置信度的协整检验,可用于建立 ARECM 模型。

4.3 模型效果分析

选取流域 2003—2014 年 10 场洪水资料以及分布式垂向混合产流模型模拟结果,分别建立一阶至三阶 AR、ECM 和 ARECM 实时校正模型对模拟结果进行校正,并对校正效果进行对比分析。

从校正结果的修正效果评价系数(表 4)看,ECM 与 ARECM 模型相较于 AR 模型具有明显优势,3 种方法的校正效果与模型阶数基本成正比,但针对某一场洪水,建议依照最小信息量准则确定校正模型的阶数。AR、ECM、ARECM 模型平均修正效果评价系数为 -0.77、0.76、0.98。AR 模型表现效果较差,原因在于 20120907 与 20140827 次洪水误差序列不满足平稳序列的假设,校正效果较差,删除以上两场洪水后,AR 模型的平均修正效果评价系数提高到 0.20。针对 20120907 与 20140827 次洪水,ARECM 模型修正效果评价系数明显优于 AR 模型,其中 ARECM 模型修正效果评价系数分别达到了 1.00 与 0.92 远高于 AR 模型的 -9.15 与 -0.65 (一阶至三阶模型的平均值),证明了 ARECM 模型在针对非平稳误差序列建模方面具有很强的能力,同时证明了可以通过引入协整理论解决 AR 模型无法针对非平稳误差序列建模的问题。根据确定性系数的统计结果(表 5),ARECM 模型校正效果明显优于 ECM 模型与 AR 模型,且 ECM 模型校正效果优于 AR 模型,证明了 ECM 与 ARECM 模型在实时校正方面的适用性。

由表 6 可见,以洪峰相对误差为评价指标,AR 模型校正效果最差,ECM 模型与 ARECM 模型校正后的洪峰相对误差相较于 AR 模型分别减小了 11.22% 与 17.41%。其原因在于 ARECM 模型通过引入误差修正项,保证了变量的水平值没有被忽视,减弱了误差序列的序贯相关性对建模的影响,使得模型在洪峰处不仅依靠误差序列的自相关性进行校正,同时也考虑了校正后误差序列与实测误差序列上一时刻的偏离程度,避免了 AR 模型在误差突变点处产生较大误差的现象。峰现时差(表 7)与洪峰相对误差结果相似,ARECM 模型与 ECM 模型校正效果远优于 AR 模型,其中,20120907 与 20140827 次洪水不满足平稳序列假设,但仍构建了 AR 模型,导致校正效果较差,因此没有在表 7 中计算这两场洪水二、三阶 AR 模型校正后的峰现时差。由表 8 可

表 4 修正效果评价系数统计结果

Table 4 Statistics of correction effect evaluation coefficient

洪号	ECM 模型			AR 模型			ARECM 模型		
	一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶
20030620	0.36	0.65	0.74	0.20	0.99	0.37	1.00	0.95	0.98
20050706	0.99	1.00	1.00	-0.09	0.03	0.02	1.00	0.99	1.00
20060624	1.00	1.00	1.00	0.16	0.16	0.22	1.00	1.00	1.00
20060721	0.15	0.18	0.18	-0.12	0.30	0.30	0.97	0.99	0.99
20070627	0.95	0.94	0.95	-0.03	0.05	0.05	1.00	1.00	1.00
20080415	0.99	0.99	0.99	0.40	0.23	0.24	0.95	0.98	0.98
20100629	0.95	0.95	0.97	0.02	0.32	0.32	1.00	0.99	0.99
20100811	0.73	0.74	0.74	0.18	0.21	0.20	1.00	0.99	0.99
20120907	0.52	0.49	0.49	0.35	-13.82	-13.99	1.00	1.00	1.00
20140827				-0.88	0.12	0.11	0.78	0.99	0.99
平均值	0.74	0.77	0.78	0.02	-1.14	-1.22	0.97	0.99	0.99

表 5 确定性系数统计结果

Table 5 Statistics of deterministic coefficient

洪号	原始预报结果	ECM 模型			AR 模型			ARECM 模型		
		一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶
20030620	0.48	0.67	0.82	0.86	0.59	0.66	0.68	0.91	0.96	0.99
20050706	0.89	1.00	1.00	1.00	0.88	0.89	0.89	1.00	1.00	1.00
20060624	0.77	1.00	1.00	1.00	0.81	0.81	0.82	1.00	1.00	1.00
20060721	0.95	0.96	0.96	0.96	0.94	0.96	0.96	1.00	1.00	1.00
20070627	0.82	0.99	0.99	0.99	0.81	0.83	0.83	1.00	1.00	1.00
20080415	0.93	1.00	1.00	1.00	0.96	0.95	0.95	1.00	1.00	1.00
20100629	0.88	0.99	0.99	1.00	0.88	0.92	0.92	1.00	1.00	1.00
20100811	0.54	0.87	0.88	0.88	0.63	0.64	0.63	1.00	1.00	0.99
20120907	0.56	0.79	0.78	0.78	0.71	-5.48	-5.55	0.95	0.94	1.00
20140827	0.86				0.73	0.87	0.87	0.97	1.00	1.00

表 6 洪峰相对误差统计结果

单位: %

Table 6 Statistics of relative error of flood peaks

unit: %

洪号	原始预报结果	ECM 模型			AR 模型			ARECM 模型		
		一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶
20030620	12.24	-23.18	-16.69	-13.86	16.47	0.67	19.43	0.95	1.02	0.67
20050706	-3.13	-0.04	-0.05	-0.05	-3.60	-1.81	-1.84	-0.06	0.25	0.27
20060624	18.40	-0.50	-0.44	-0.39	22.60	22.57	25.11	1.20	1.28	0.95
20060721	0.77	5.16	5.04	4.99	-0.83	3.88	3.87	-0.49	-0.16	-0.11
20070627	8.76	-4.04	-4.15	-3.70	15.67	11.57	11.54	-0.10	-0.09	0.49
20080415	0.60	-41.39	-1.39	-1.39	3.79	3.24	3.22	2.08	1.36	1.36
20100629	-0.75	-4.60	-4.58	-3.27	0.75	4.85	4.83	-0.18	-1.33	-1.30
20100811	31.46	-8.40	-7.99	-7.96	42.39	39.17	39.16	-2.28	-3.36	-3.84
20120907	15.17	-12.70	-12.83	-12.92	24.70	-87.64	-87.74	-0.15	-0.92	-0.93
20140827	-11.41				-26.49	-15.77	-15.38	-7.19	2.07	2.11
平均值	10.27	11.11	5.91	5.39	15.73	19.12	21.21	1.47	1.18	1.20

注: 平均值为各模型相对误差绝对值的平均值。

见,以径流深相对误差为评价指标,ECM 模型与 AR 模型对模拟结果的校正效果相近,不如 ARECM 模型。

综上所述,AR 模型校正效果最差,其主要原因在于 AR 模型以误差序列的自相关性为基础进行校正,无法对洪峰处误差进行较好的校正;ECM 模型依赖实测值与预报值,因此在洪峰处模型校正效果较好,但径流深方面,校正效果与 AR 模型相似。

ARECM 模型模拟效果较好,通过误差修正项的引入,避免了 AR 模型在洪峰处校正效果差的缺陷,提高了洪峰误差校正效果,同时通过引入协整理论解决了 AR 模型无法对非平稳序列建模的问题。

为了直观地展示校正效果,选取 2 场典型洪水(20030620 和 20100811 次洪水),对比 3 种三阶实时校正模型校正后的流量过程线(图 2)。从图 2 可以看出,2 场洪水的流量模拟与实测结果相差较大;

表 7 峰现时差统计结果

单位:h

Table 7 Statistics of error of time to flood peaks

unit: h

洪号	原始预报结果	ECM 模型			AR 模型			ARECM 模型		
		一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶
20030620	-37	-1	-1	-1	-37	0	-36	0	0	0
20050706	-3	-1	0	0	-2	-1	-2	0	-1	0
20060624	-16	-1	-1	-1	-16	-1	-18	-1	-1	1
20060721	-8	-1	-1	-1	-9	1	-7	5	1	-1
20070627	-8	-1	-1	-1	-9	1	-7	5	1	-1
20080415	-1	-1	-1	-1	-6	-1	-7	-1	-1	-1
20100629	56	-1	-1	-1	52	-1	52	-1	-1	-1
20100811	35	-1	-1	-1	35	-1	34	-1	-1	-1
20120907	0	-2	0	0	0			2	0	0
20140827	-27				-1			0	0	0
平均值	19.10	1.11	0.78	0.78	16.70	0.88	20.38	1.60	0.70	0.60

注: 平均值为各模型时差绝对值的平均值。

表 8 径流深相对误差统计结果

单位:%

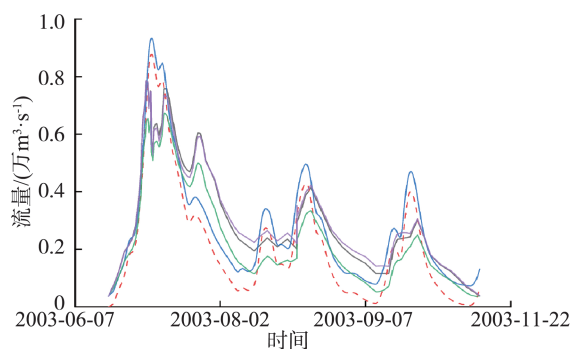
Table 8 Statistics of relative error of runoff depth

unit: %

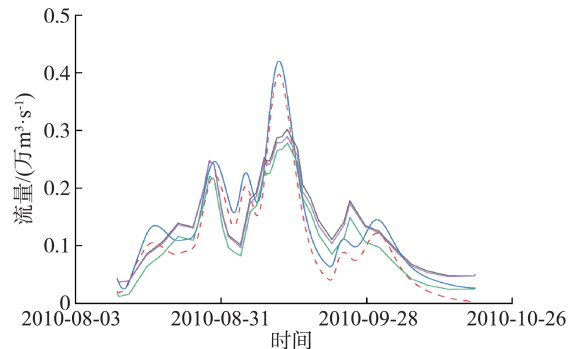
洪号	原始预报结果	ECM 模型			AR 模型			ARECM 模型		
		一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶
20030620	-27.24	-32.16	-24.13	-20.88	-19.34	2.02	-4.83	1.10	5.19	2.70
20050706	-3.15	-0.13	-0.19	-0.19	-3.83	-0.17	-0.22	-0.13	-0.40	-0.36
20060624	-12.52	-0.39	-0.60	-0.46	-4.86	-4.92	-0.36	0.20	0.47	0.33
20060721	-4.14	8.84	8.66	8.64	-4.65	-0.07	-0.14	-0.73	-0.22	-0.14
20070627	-5.97	-5.61	-5.68	-5.17	6.72	-0.04	-0.05	-0.12	0.37	0.45
20080415	-7.08	-1.28	-1.27	-1.27	2.39	-0.65	-0.64	2.34	1.47	1.46
20100629	-14.08	-4.39	-4.39	-3.14	-9.97	-1.33	-1.38	0.12	-1.54	-1.51
20100811	-16.12	-18.80	-18.39	-18.39	9.44	0.75	0.64	-1.54	-2.68	-3.05
20120907	-22.15	-22.94	-23.51	-23.68	-7.42	-115.00	-115.65	-0.17	-0.78	-0.80
20140827	-2.20				-25.92	-6.24	-5.85	-9.57	2.36	2.42
平均值	11.47	10.50	9.65	9.09	9.45	13.12	12.98	1.60	1.55	1.32

注: 平均值为各模型相对误差绝对值的平均值。

— 实测流量 - - - 模拟流量 — 三阶AR模型 — 三阶ECM模型 — 三阶ARECM模型



(a) 20030620 次洪水



(b) 20100811 次洪水

图 2 三阶模型校正结果

Fig. 2 Correction results of 3-order models

AR 模型以实测与模拟流量的误差序列为基础进行校正,对模拟流量线型影响较小;ECM 模型直接考虑实测流量的影响,能够显著改变模拟流量线型,使校正结果更贴近实测流量;ARECM 模型校正效果最好,能够对模拟洪峰流量进行准确的校正,显著提高了淮河流域上游洪水预报精度。

5 结 论

a. AR 模型能够有效地对垂向混合产流模型洪水模拟结果进行校正,但由于序贯相关性的影响,在洪峰处校正效果较差,而在径流深方面与 ECM 模型校正效果相似。

b. ECM 模型能够较好地解决洪水实时校正问题,模型校正效果优于 AR 模型但劣于 ARECM 模型,从洪峰相对误差角度,校正效果相较于 AR 模型改善了 11.22%。

c. ARECM 模型通过引入误差修正项,减弱了误差序列序贯相关性对建模的影响,并通过引入一阶差分项,避免了“伪回归”与可能存在的多重共线性问题,避免了 AR 模型对洪峰校正效果较差的缺陷。模型校正后平均洪峰相对误差为 1.28%,平均径流深相对误差为 1.49%,从洪峰相对误差角度看,ARECM 模型校正效果相较于 AR 模型改善了 17.41%,校正效果较好,可用于校正实时洪水预报结果。

参考文献:

- [1] 包为民. 水文预报[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009: 224-225.
- [2] 包红军,曹勇,曹爽,等. 基于短时临近降水集合预报的中小河流洪水预报研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 197-203. (BAO Hongjun, CAO Yong, CAO Shuang, et al. Flood forecasting of small and medium-sized rivers based on short-term nowcasting and ensemble precipitation forecasts [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(3): 197-203. (in Chinese))
- [3] 曹勇,包红军,张恒德,等. 基于快速滚动更新的无缝隙定量降水预报模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 303-308. (CAO Yong, BAO Hongjun, ZHANG Hengde, et al. Seamless quantitative precipitation forecasting model based on rapid rolling update technique [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 303-308. (in Chinese))
- [4] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 28-35. (ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 28-35. (in Chinese))
- [5] 黄一昕,王钦钊,梁忠民,等. 洪水预报实时校正技术研究进展[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 12-35. (HUANG Yixin, WANG Qinzhaoh, LIANG Zhongmin, et al. Research advances on real-time correction methods for flood forecasting [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 12-35. (in Chinese))
- [6] 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.

- [7] 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. (LIANG Zhongmin, HUANG Yixin, HU Yiming, 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. (in Chinese))
- [8] 王莉莉,包红军,李致家. 基于 Kalman 滤波的实时校正模型研究[J]. 水力发电, 2020, 46(8): 24-26. (WANG Lili, BAO Hongjun, LI Zhijia. Study on the real-time correction model based Kalman filter [J]. Water Power, 2020, 46(8): 24-26. (in Chinese))
- [9] 周梦,陈华,郭富强,等. 洪水预报实时校正技术比较及应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(7): 90-95. (ZHOU Meng, CHEN Hua, GUO Fuqiang, et al. The application of real-time correction techniques for flood forecasting [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(7): 90-95. (in Chinese))
- [10] 曲田,朱艳军,陈在妮,等. 大渡河流域径流预报实时校正方法应用研究[J]. 人民长江, 2021, 52(增刊1): 63-67. (QU Tian, ZHU Yanjun, CHEN Zaini, et al. Application of real-time correction method for runoff prediction in Dadu River [J]. Yangtze River, 2021, 52(Sup1): 63-67. (in Chinese))
- [11] 张娟,钟平安,徐斌,等. 洪水预报自回归实时校正多步外延方法研究[J]. 水文, 2019, 39(6): 41-45. (ZHANG Juan, ZHONG Pingan, XU Bin, et al. Research on multi-step epitaxy method for auto-regressive real-time correction of flood forecasting [J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(6): 41-45. (in Chinese))
- [12] 韩通,李致家,刘开磊,等. 山区小流域洪水预报实时校正研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 208-214. (HAN Tong, LI Zhijia, LIU Kailei, et al. Research on real-time correction method of flood forecasting in small mountain watershed [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(3): 208-214. (in Chinese))
- [13] ENGLE R F, GRANGER C W J. Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing [J]. Econometrica, 1987, 55(2): 251-76.
- [14] 张利亚,张利平,曹枫林,等. 基于协整与误差修正机制的径流预测模型研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006(6): 6-9. (ZHANG Liya, ZHANG Liping, CAO Fenglin, et al. Annual runoff forecasting research based on the theory of cointegration and error correction model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006(6): 6-9. (in Chinese))

(下转第 145 页)

- [12] YOUNES A A, ABDULHADY Y A M, SHAHAT N S, et al. Removal of cadmium ions from wastewaters using corn cobs supporting nano-zero valent iron [J]. Separation Science and Technology, 2021, 56(1): 1-13.
- [13] NADA A A M A A, MAHDY A A, EL-GENDY A A. Spectroscopy and chemical studies of cation exchangers prepared from corn cobs [J]. BioResources, 2009, 4(3): 1017-1031.
- [14] TAN Guangqun, YUAN Hongyan, LIU Yong, et al. Removal of lead from aqueous solution with native and chemically modified corncobs [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174(1/2/3): 740-745.
- [15] LIU J, DAVIS A P. Phosphorus speciation and treatment using enhanced phosphorus removal bioretention [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(1): 607-614.
- [16] FOO K Y, HAMEED B H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 156(1): 2-10.
- [17] TEDOLDI D, CHEBBO G, PIERLOT D, et al. Impact of runoff infiltration on contaminant accumulation and transport in the soil/filter media of sustainable urban drainage systems: a literature review [J]. Science of the Total Environment, 2016, 569-570: 904-926.
- [18] LI S, BARRETO V, LI R, et al. Nitrogen retention of biochar derived from different feedstocks at variable pyrolysis temperatures [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2018, 133: 136-146.
- [19] SHARMA A, WEINDORF D C, WANG D, et al. Characterizing soils via portable X-ray fluorescence spectrometer: 4. cation exchange capacity (CEC) [J]. Geoderma, 2015, 239-240: 130-134.
- [20] HSIEH C H, DAVIS A P. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff [J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(11): 1521-1531.
- [21] 陈友媛, 李培强, 李闲驰, 等. 浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制 [J]. 环境科学, 2021, 42(1): 274-282. (CHEN Youyuan, LI Peiqiang, LI Xianchi, et al. Effect of enteromorpha prolifera biochar on the adsorption characteristics and adsorption mechanisms of ammonia nitrogen in rainfall runoff [J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 274-282. (in Chinese))
- [22] DE BASHAN L E, BASHAN Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003) [J]. Water Research, 2004, 38(19): 4222-4246.

(收稿日期: 2021-09-01 编辑: 施业)

(上接第 95 页)

- [15] 杜望, 王衍学. 基于协整和向量误差修正的轴承剩余寿命预测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 32-39. (DU Wang, WANG Yanxue. RUL prediction method for rolling bearing based on cointegration system and vector error correction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 32-39. (in Chinese))
- [16] 张金萍, 李红宾, 肖宏林, 等. 基于误差修正模型的黄河源区年径流预测 [J]. 人民黄河, 2020, 7: 5-8. (ZHANG Jinping, LI Hongbin, XIAO Honglin, et al. Annual runoff prediction in the source area of the Yellow River based on error correction model [J]. Yellow River, 2020, 7: 5-8. (in Chinese))
- [17] 张金萍, 原文林, 郭兵托. 基于协整分析的河川径流预测 [J]. 水电能源科学, 2013, 31(5): 18-20. (ZHANG Jinping, YUAN Wenlin, GUO Bingtuo. Study on prediction of stream flow based on cointegration theory [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(5): 18-20. (in Chinese))
- [18] 姚成, 李致家, 张珂, 等. 基于栅格型新安江模型的中小河流精细化洪水预报 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 19-25. (YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Ke, et al. Fine scale flood forecasting for small and medium sized rivers based on grid Xin'anjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 19-25. (in Chinese))
- [19] 张珂, 张企诺, 陈新宇, 等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型 [J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 94-101. (ZHANG Ke, ZHANG Qينو, CHEN Xinyu, et al. Gridded Xin'anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 94-101. (in Chinese))
- [20] 包为民, 王从良. 垂向混合产流模型及应用 [J]. 水文, 1997, 17(3): 19-22. (BAO Weimin, WANG Congliang. Vertically-mixed runoff model and its application [J]. Journal of China Hydrology, 1997, 17(3): 19-22. (in Chinese))
- [21] 瞿思敏, 包为民, 张明, 等. 新安江模型与垂向混合产流模型的比较 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(4): 374-377. (QU Simin, BAO Weimin, ZHANG Ming, et al. Comparison of Xin'anjiang model with vertically-mixed runoff model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(4): 374-377. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-10-08 编辑: 施业)