

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.004

水文水力学结合的秦淮河流域洪水模拟与实时校正

汪昊燃¹,王 容²,黄鹏年³,何 健⁴,姚 成¹

(1. 河海大学水文与水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 水利部水文水资源监测预报中心,北京 100053;
3. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院,江苏 南京 210044; 4. 江苏省水文水资源勘测局,江苏 南京 210029)

摘要: 针对以栅格新安江模型为代表的分布式水文模型在秦淮河流域洪水模拟预报中下游感潮河段应用精度受限的问题,以前埭村(秦)站为节点,上游采用栅格新安江模型计算产流,下游采用水动力学模型对受闸泵调度影响的感潮河段水位进行模拟,并采用 K 最近邻(KNN)法和反馈法对模拟结果进行实时校正。结果表明,采用 KNN 法校正后确定性系数为 0.718~0.975,达到了乙等预报精度要求,可用于秦淮河流域洪水模拟预报。

关键词: 栅格新安江模型;一维水动力模型;洪水模拟;实时校正;秦淮河流域

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)03-0025-06

Research on flood simulation and real-time correction of Qinhuai River Basin combined with hydrology and hydraulics

WANG Haoran¹, WANG Rong², HUANG Pengnian³, HE Jian⁴, YAO Cheng¹
(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Hydrology Monitor and Forecast Center, Ministry of Water Resources of China, Beijing 100053, China;
3. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
4. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China)

Abstract: The distributed hydrological model represented by the Grid Xin'anjiang model was used for flood simulation and forecasting in the Qinhuai River Basin. The spatiotemporal simulation is highly refined in the middle and upper reaches, but its application accuracy is limited in the downstream reaches. In this study, the Qianhancun (Qin) station is used as the node, the grid Xin'anjiang model is used to calculate the runoff in the upstream, the hydrodynamic model is used to simulate the water level of the tidal river section affected by the operation of the gate pump in the downstream, and the K -nearest neighbor (KNN) algorithm and feedback method is adopted to correct the simulation results in real time. After the correction of the KNN method, the coefficient of certainty is 0.718-0.975, which meets the forecast accuracy requirements of Class B.

Key words: Grid-Xin'anjiang model; one-dimensional hydrodynamic model; flood simulation; real-time correction; Qinhuai River Basin

中小河流流域的洪水预报一直是防汛工作的重点^[1-3]。分布式水文模型如栅格新安江模型等,对山地丘陵地形时空模拟精细化程度较高,在汇流阶段一般采用马斯京根法或扩散波计算汇流,计算结果受河道地形、回水顶托和闸坝建筑等影响,导致模拟精度降低^[4-11]。水力学模型对感潮河段潮位计算具有良好的模拟精度,但上游山地丘陵地区多为天然河道,地形复杂,断面形状不规则,造成水力学相关参数计算困难^[12],因此有必要将水文学模型与水力学模型相结合,以此来建立河流与流域之间的水力联系。殷骏^[13]在南四湖区对水文和一维水力耦合预报模型的研究明确了该模型的可行性和稳定性;在水文学和水力学模型结合的基础上,李致家等^[14]对比了一维水力学模型和二维水力学模型的适用情况,发现一维水力学模型计算精度在低水位情况下受各水体之间连通性影响较大;孙映宏等^[15]根据山区、平原区、分洪区以及河道等不同的产汇流条件将水文学与水力学模型耦合后应用在山前小流域,取得了良好的模拟效果。一维水力学模型在低水

基金项目: 国家自然科学基金(51979070,41901036)
作者简介: 汪昊燃(1996—),男,硕士研究生,主要从事水文预报研究。E-mail:201301010029@hhu.edu.cn
通信作者: 姚成(1982—),男,副教授,博士,主要从事水文预报研究。E-mail:yaocheng@hhu.edu.cn
引用本文: 汪昊燃,王容,黄鹏年,等. 水文水力学结合的秦淮河流域洪水模拟与实时校正[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):25-30.
WANG Haoran, WANG Rong, HUANG Pengnian, et al. Research on flood simulation and real-time correction of Qinhuai River Basin combined with hydrology and hydraulics[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 25-30.

位计算时,由于各水体之间水流交换减少,导致模拟结果精度受到影响,需采用实时校正方法对误差结果进行修正^[16]。实时校正方法一般分为过程误差校正方法和终端误差校正方法,在一维水力学模型的实时校正中,可采用卡尔曼滤波法对区间入流、状态变量等过程进行校正^[17-19],也可采用 K 最近邻 (K -nearest neighbor, KNN) 法等对计算结果进行校正。KNN 法^[20]不需要建立自回归方程,不需要计算相关参数,在实时校正中有较好的应用前景^[21]。刘开磊等^[22]采用 KNN 法对一维水力学模型计算结果进行校正,发现该方法能较大幅度、稳定地提高模拟精度;反馈模拟法对于较短的预见期有良好的校正效果,且与预报模型无关,同样是终端误差实时校正的常用方法之一^[23]。

秦淮河流域河网密集,上游以山区为主,坡度较大;下游河段出口与长江相连,其水位受长江潮汐作用影响显著,属于感潮河段且同时受水闸调度的影响。本文采用栅格新安江模型与一维河网水力学模型结合的模式模拟水位。在流域上游山地丘陵地区采用栅格新安江模型计算出流,流域下游平原感潮河段采用一维水力学模型计算水位,并对计算结果实时校正,以期提高洪水水位模拟的精度。

1 研究区域概况

秦淮河流域位于长江下游,地形四周高、中间低,坡度较大,总面积2 684 km²;上游属山地丘陵区,下游地区河道窄、坡度小的地形条件导致流域上游汇流快,下游泄洪缓慢^[24]。

东山村位于南京市江宁区东山大桥上游 200 m 处,是秦淮河流域下游出口的水位控制站。秦淮河在东山村下游 300 m 处分流入老秦淮河及秦淮新河。秦淮新河全长16.8 km,秦淮新河闸位于秦淮新河河口处;武定门闸位于老秦淮河中段,与东山村相距 12 km,见图 1。武定门闸上水位站、秦淮新河闸上水位站主要为调度作用,东山村为主要负责报汛的水位控制站,因此选取东山村作为水位模拟计算的研究水位站。东山村水位受到上游来水、武定门闸、秦淮新河闸以及长江潮汐的影响,汛期水位上涨迅速,因此水位呈现绳套或非单一性复杂关系。

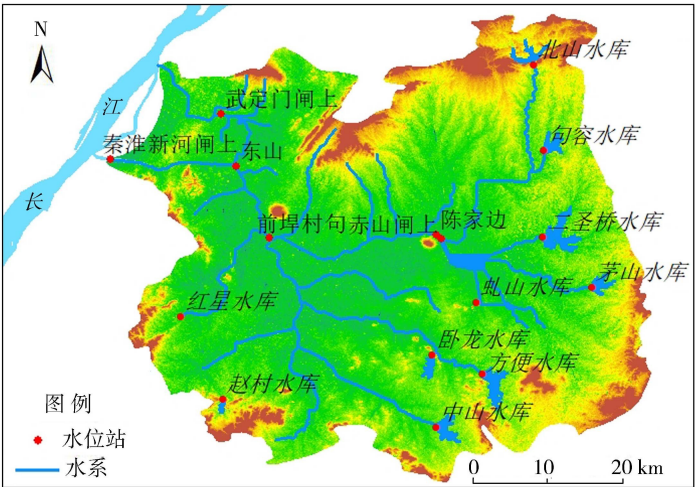


图 1 秦淮河流域概况
Fig. 1 Boundary of Qinhuai River Basin

2 预报模型构建

2.1 栅格新安江模型

栅格新安江模型产流部分采用蓄满产流模型,计算单元栅格冠层截留量、河道降水量以及蒸散发量以推求地表径流、壤中流和地下径流,再将 3 种水源按各栅格间的演算次序演算至流域出口;模型汇流部分采用主网格马斯京根法,将 3 种产流水源依次演算至站点出口^[25]。整理 2010—2018 年东山村逐时水位资料,2014—2018 年秦淮河流域的逐日降雨、径流资料,以秦淮河水系上游前埠村(秦)站为水文模型及水力学模型的分界点,流域上游采用栅格新安江模型进行模拟。DEM 网格大小为 1 km×1 km,流域内共有 9 座水库,出流均按主网格马斯京根法演算至前埠村(秦)站;前埠村上游包含 11 个雨量站,均在流域范围内。

2.2 水力学模型

秦淮河干流采用一维河网水力学模型进行计算。模型的上边界采用由栅格新安江模型计算的流量过程,以流域下游出口处的长江潮位作为河网水力学模型的下边界。

前埠村(秦)站下游包括秦淮新河闸上、武定门闸上、东山村 3 个水位站,云台山河、牛首山河和外港河 3 条主要支流;秦淮河干流在东山村分为人工河道秦淮新河和老秦淮河两条河流汇入长江(图 2)。前埠村(秦)站至下游出口共设有 86 个断面,其中秦淮新河糙率取 0.022,老秦淮河糙率取

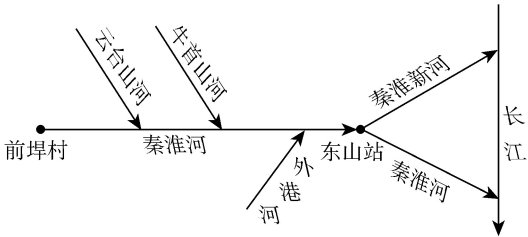


图 2 河网概化图
Fig. 2 Generalization diagram of drainage networks

0.024,其余支流糙率取 0.021。秦淮新河闸与武定门闸为调度水闸,调度规则均为当水位低于 6.5 m 时引水,当水位高于 8.5 m 时泄洪。前圩村(秦)站以下流域地势低洼,存在多个圩区,将圩区分为水面、水稻田、旱荒地和城市道路进行计算;产流计算将土壤分为两层,采用蓄满产流方法计算;圩区内采用单位线法计算汇流,汇流至圩区河道后,以圩区排涝模数进行量化,作为旁侧入流进入秦淮河河道内。

采用的河网水力学方程为圣维南方程组:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Qu)}{\partial x} + gA \frac{\partial Z}{\partial x} - gAS_0 + gAS_f = 0 \tag{2}$$

式中: A 为过水断面面积; Q 为流量; u 为流速; Z 为断面水位; g 为重力加速度; S_0 为水流沿程损失; S_f 为摩阻比降。将式(1)用四点线性 Preissmann 隐式格式进行差分,可以得到任一河段差分方程:

$$\begin{cases} Q_{j+1} - Q_j + C_j Z_{j+1} + C_j Z_j = D_j \\ E_j Q_j + G_j Q_{j+1} + F_j Z_{j+1} - F_j Z_j = \varphi_j \end{cases} \tag{3}$$

式中 C_j 、 D_j 、 E_j 、 F_j 、 G_j 、 φ_j 均为系数,由初值计算。

河网水力学模型将河网分为树状河网和环状河网。前圩村(秦)站至东山村之间的河道及汇入河道的支流呈树状河网水系,采用树状河网追赶法进行河道水位计算,即对于已知的流量边界条件,上断面 L_1 和下断面 L_2 可假设如下追赶关系:

$$\begin{cases} Z_j = K_{j+1} - T_{j+1} Z_{j+1} \\ Q_{j+1} = P_{j+1} - V_{j+1} Z_{j+1} \end{cases} \tag{4}$$

式中: j 为断面编号($j=L_1, L_1+1, L_1+2, \dots, L_2-1$); K 、 T 、 P 、 V 为追赶系数。由式(2)和式(3)联立可得递推关系,依次求得 K_{j+1} 、 T_{j+1} 、 P_{j+1} 、 V_{j+1} ,最后得到:

$$Q_{L_2} = P_{L_2} - V_{L_2} Z_{L_2} \tag{5}$$

式(5)与下边界条件 $Q_{L_2}=f(Z_{L_2})$ 联解可得 Z_{L_2} ,依次回代可求得 Z_j 、 Q_j 。

环状河网包括内河道和外河道,外河道计算与树状河网计算类似,均由河道一端边界条件已知的外节点推求另一端水力要素未知的内节点。东山村以下的老秦淮河、秦淮新河构成环状河网水系,采用环状河网双追赶系数法进行水位计算。内河道的计算没有端点边界条件可用,河段差分方程依然可表示为式(2),首、末断面水位为基本未知量,因此需要利用双追赶方程求解。

3 实时校正方法

3.1 KNN 法

KNN 法校对计算主要包括 4 个步骤:①计算模拟时段前 70% 的误差数据存放为全部历史误差数据,用于以后时段的实时校正;②根据误差自回归理论,考虑前面多个时段(N_T),设定预见期为 e_{xt} ,则可以从 N_T+e_{xt} 时刻开始至 $m-1+N_T+e_{xt}$ 建立 m 个历史预报误差向量集;③识别最近邻样本,以向量间的欧式距离为评价相似相关性的指标,找出与当前预报误差相关向量最相似的 X 个预报误差向量;④对该 X 个预报误差向量对应的预报误差加权,使用反距离权重法对当前误差进行估计。

3.2 反馈法

反馈法基于洪水预报误差的相似性,对洪水预报误差进行实时校正,在洪水预报实时校正方面已取得较好的结果^[26]。反馈法通过计算实测流量与预报流量之间的反馈因子(F),将流量过程分为涨洪段和落洪段,进而对预报流量进行修正。

先从第 2 个时刻起计算各时刻与前一时刻的流量差:

$$\Delta Q_{obs,i} = Q_{obs,i} - Q_{obs,i-1} \tag{6}$$

$$\Delta Q_{cal,i} = Q_{cal,i} - Q_{cal,i-1} \tag{7}$$

式中: $Q_{obs,i}$ 为本时刻实测流量; $Q_{cal,i}$ 为本时刻预报流量。

通过各时刻与前一时刻的预报流量差和实测流量差,计算 F :

$$F = \frac{\Delta Q_{\text{obs},i} + \Delta Q_{\text{obs},i-1}}{\Delta Q_{\text{cal},i} + \Delta Q_{\text{cal},i-1}}$$

(8)

可以得到涨水段反馈模拟实时校正计算公式为

$$Q_{\text{obs},i} = Q_{\text{obs},i-1} + \Delta Q_{\text{cal},i} F$$

(9)

退水段反馈模拟实时校正计算公式为

$$Q_{\text{obs},i} = \frac{Q_{\text{cal},i} Q_{\text{obs},i-1}}{Q_{\text{cal},i-1}}$$

(10)

4 计算结果对比

选取秦淮河流域 2014—2018 年 9 场典型洪水,采用栅格新安江模型计算前埭村(秦)站上游至该站的产汇流过程,选定前 8 场进行次洪模型参数率定,最后 1 场用来检验。部分分布参数由输入的土壤类型、植被覆盖类型等数据直接计算,如自由水蓄水容量 SM、张力水蓄水容量 WM 等。部分敏感参数率定结果为:蒸散发折算系数 1.00;上层张力水容量占比 0.17;下层张力水容量占比 0.50;地下水消退系数 0.993;壤中流消退系数 0.90;河网水流消退系数 0.83。洪水模拟结果如表 1 所示。

表 1 前埭村(秦)站洪水模拟成果统计

Table 1 Statistics of flood simulation results at Qianhancun (Qin) Station

洪水场次	实测径流深/ mm	计算径流深/ mm	径流深相对 误差/%	实测洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	计算洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	洪峰相对 误差/%
2014070203	77.7	89.3	14.9	772	859	11.3
2015061505	106.4	69.9	-34.3	939	781	-16.8
2015062308	236.3	265.1	12.2	1 100	1 450	31.8
2016070105	329.6	351.3	6.6	1 200	1 130	-5.8
2016071312	63.9	69.2	8.4	465	498	7.1
2017060920	92.7	97.7	5.4	976	982	0.6
2017092308	58.9	50.1	-14.8	577	516	-10.52
2018070502	43.1	41.8	-3.2	451	416	-7.7
2018081707	57.5	63.0	9.6	659	730	10.8

根据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》:模拟计算结果中,前埭村(秦)站以上流域 8 场洪水,径流深合格率与洪峰合格率均为 87.5%;预报检验的 1 场洪水径流深和洪峰都合格。所选 9 场洪水的径流深误差与洪峰误差都达到乙等精度要求。由栅格新安江模型计算的前埭村(秦)站洪水流量过程可用于一维水力学模型上边界流量输入过程。

选取次洪模拟中的 5 场洪水进行水位模拟计算。将前埭村(秦)站的模拟流量过程作为一维水力学模型上边界流量输入条件,下游出口处长江潮位作为一维水力学模型的下边界,并采用 KNN 法和反馈法进行实时校正。对模拟水位的评价标准主要考虑其与实测水位的绝对误差,因此对东山站水位计算结果的评价采用确定性系数(C_{NSE})和洪峰水位误差(δ_{PE})2 种指标。对未校正的栅格新安江-河网水力学模型计算成果、反馈模拟法校正的计算成果和 KNN 法校正的计算成果分别计算两种指标,计算结果如图 3 所示。部分模拟水位过程如图 4 所示。

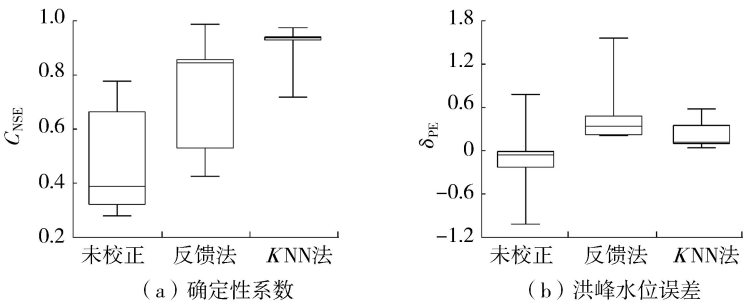


图 3 校正方法指标对比

Fig. 3 Comparison of indexes of correction methods

由图 3 中可以看出:未校正的水位模拟计算结果存在较大的不确定性,经过反馈法和 KNN 法校正后的模拟水位过程确定性系数均有较大提升,且 KNN 法校正效果相比反馈法更好。对于洪峰水位绝对误差,未校正的模拟洪峰水位计算结果波动较大,经过校正后精度得到提高,且 KNN 法校正后的模拟洪峰水位误差更加稳定,误差值在 0.04 ~0.55 m 之间,模拟精度较高。2015062508 号洪水未校正的模拟水位确定性系数为

0.388,该场洪水的上边界前埭村(秦)站的入流模拟结果较好,但经过河网水力学模型计算后,东山站的模拟水位较实测水位相差较大,造成确定性系数偏小。经过调查,本场洪水在南京市造成严重内涝,因此在三汊河口处人工开凿临时泄洪道,对下边界条件产生影响,导致高水位时模拟结果与实测结果误差较大。同时根据调度规则,下游两处水位站会在水位高于 8.5 m 时泄洪,因此模拟水位在 8.5 m 左右时会出现模拟调度实际未调度或模拟未调度实际调度的情况,造成在低水位时模拟结果不佳。经过实时校正后,2015062508 号洪水洪峰/水位模拟结果和确定性系数均大幅度提高,可以满足模拟精度要求。

2017060920 号洪水未校正的模拟水位误差只有 0.13 m,但确定性系数仅为 0.322。同时根据水位过程线可知,由于模拟的水位过程涨水阶段相较于实测水位过程滞后约 12 h,造成确定性系数偏小。分析前埭村(秦)站入流情况可知,在洪水发生初始阶段该站流量为负值,即出现逆流情况,而栅格新安江模型模拟流量过程不会出现逆流情况,因此上边界条件出现较大误差,造成模拟水位过程与实际水位过程在时间尺度出现偏移。经过 KNN 法校正后的水位模拟过程在最高水位时出现了一些精度损失,而峰现时差以及确定性系数有了较大的提高。

在实时校正前,栅格新安江模型与河网水力学模型结合的预报方法对水位的模拟计算结果受平原圩区地形影响较大,且因模型的局限性导致在低水位时模拟结果不佳,洪峰水位模拟精度较高但峰现时间有较大误差。而对模拟结果采用 KNN 法和反馈法进行实时校正后,均能有效提高东山站水位模拟精度。对比 2 种实时校正方法,反馈法计算简单,KNN 法可以根据实际预报需要灵活调整参数,且校正后的水位模拟结果相较于反馈法精度更高。

5 结 语

秦淮河流域地势四周高中间低,形成了许多圩区,导致上游汇流快,下游泄洪慢,且受水闸泵站和长江潮汐的影响,洪水预报工作具有不确定性和复杂性。本文构建以栅格新安江模型计算的前埭村(秦)站流量过程为一维河网水力学模型上边界、以下游出口处长江潮位为模型下边界的水位模拟计算模型,选取秦淮河流域 2014—2017 年的 5 场次洪水进行水位模拟计算。结果表明,河网水力学模型对平原圩区河道汇流计算具有较高的精度,结合栅格新安江模型的预报径流过程作为上边界输入条件后,实现了对受水工建筑物影响的感潮河段水位的模拟计算。在经过实时校正之后,解决了低水位情况下水位预报精度不高的问题,其中 KNN 法校正后确定性系数为 0.718 ~0.975,达到了乙等预报精度要求,可为秦淮河流域防汛提供参考。由于本文所选洪水场次较少,还需要在收集更多资料后对该模型进行进一步计算验证和校正,逐步形成预报可靠性较高的秦淮河流域栅格新安江与河网水力学结合的预报模型。

参考文献:

[1] 张旭旻,瞿思敏,李倩,等. 基于协整理论的淮河流域上游洪水预报实时校正方法[J]. 水资源保护,2022,38(6):88-95. (ZHANG Xumin,QU Simin,LI Qian,et al. Real-time correction method of flood forecasting for the upper Huaihe River Basin based on cointegration theory[J]. Water Resources Protection,2022,38(6):88-95. (in Chinese))

[2] 晁丽君,张珂,陈新宇,等. 基于多源降水融合驱动的 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的适用性[J]. 河海大学学

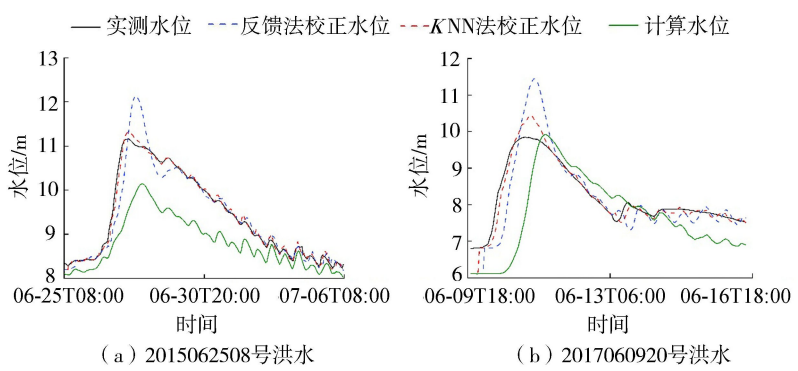


图 4 模拟水位过程
Fig.4 Hydrograph of simulated water level

- 报(自然科学版),2022,50(3):55-64. (CHAO Lijun,ZHANG Ke,CHEN Xinyu,et al. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small and medium-sized watersheds[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(3):55-64. (in Chinese))
- [3] 刘志雨,刘玉环,孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):1-6. (LIU Zhiyu,LIU Yuhuan,KONG Xiangyi. Problems, strategies and key technology research of flood forecasting and early warning for small and medium-sized rivers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(1):1-6. (in Chinese))
- [4] 常露,刘开磊,姚成,等. 复杂河道洪水预报系统研究:以淮河王家坝至小柳巷区间流域为例[J]. 湖泊科学,2013,25(3):422-427. (CHANG Lu,LIU Kailei,YAO Cheng,et al. Real-time flood forecasting system for complicated river channels: a case study from Wangjiaba to Xiaoliuxiang section in the Huaihe River Basin[J]. Journal of Lake Sciences,2013,25(3):422-427. (in Chinese))
- [5] 薛天柱. 洪水演算方法在白龙江河段洪水预报中的应用研究[D]. 兰州:兰州大学,2013.
- [6] 包红军,李致家,王莉莉. 具有行蓄洪区的复杂水系实时洪水预报研究[J]. 水力发电学报,2009,28(4):5-12. (BAO Hongjun,LI Zhijia,WANG Lili. Real-time flood forecasting for complex watershed with flood diversion and flood retarding areas[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2009,28(4):5-12. (in Chinese))
- [7] 张文婷,刘永志,张行南,等. 联安围防洪保护区洪水演进模拟分析[J]. 水资源保护,2022,38(2):1-6. (ZHANG Wenting,LIU Yongzhi,ZHANG Xingnan,et al. Flood routing simulation and analysis of Lian'anwei flood protection zone[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):1-6. (in Chinese))
- [8] 姚成,章玉霞,李致家. 扩散波与马斯京根法在栅格汇流演算中的应用比较[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(1):6-10. (YAO Cheng,ZHANG Yuxia,LI Zhijia. Application and comparison of cell-to-cell diffusion wave and Muskingum routing methods[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2013,41(1):6-10. (in Chinese))
- [9] 孙文宇,王容,姚成,等. 基于栅格新安江模型的秦淮河流域洪水模拟及实时校正研究[J]. 人民珠江,2021,42(10):10-17. (SUN Wenyu,WANG Rong,YAO Cheng,et al. Study on flood simulation and its real-time correction of Qinhuai River Basin based on Grid-Xin'anjiang model[J]. Pearl River,2021,42(10):10-17. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 沙永兵,黄迎春,石彬,等. 五强溪水库近坝区洪水预报方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):58-65. (SHA Yongbing,HUANG Yingchun,SHI Bin,et al. Study on flood forecasting method in the near-dam area of Wuqiangxi Reservoir[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(4):58-65. (in Chinese))
- [12] 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. (YANG Tiantian,LIANG Guohua,HE Bin,et al. Study and application of a flood forecasting model based on coupled hydrological-hydrodynamic approach[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2017,15(1):72-78. (in Chinese))
- [13] 殷骏. 水文学与水动力学耦合的洪水预报模型[D]. 南京:河海大学,2003.
- [14] 李致家,包红军,孔祥光,等. 水文学与水力学相结合的南四湖洪水预报模型[J]. 湖泊科学,2005,17(4):299-304. (LI Zhijia,BAO Hongjun,KONG Xiangguang,et al. Flood routing and forecasting model of Lake Nansihu by coupling hydrological model with hydraulic models[J]. Journal of Lake Sciences,2005,17(4):299-304. (in Chinese))
- [15] 孙映宏,姬战生,向小华,等. 山前小流域水文—水力学耦合洪水预报研究[J]. 水利水电技术,2016,47(11):9-13. (SUN Yinghong,JI Zhansheng,XIANG Xiaohua,et al. Study on hydrologic-hydraulic coupling model of flood forecasting for mountain-front watershed[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(11):9-13. (in Chinese))
- [16] 芮孝芳. 流域水文模型研究中的若干问题[J]. 水科学进展,1997,8(1):97-101. (RUI Xiaofang. Some problems in research of watershed hydrology model[J]. Advances in Water Science,1997,8(1):97-101. (in Chinese))
- [17] 赵雪瑞. 一维水动力学洪水预报模型及实时校正研究:以渭河流域为例[D]. 太原:太原理工大学,2021.
- [18] 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(8):24-26. (WANG Lili,BAO Hongjun,LI Zhijia. Study on the real-time correction model based Kalman Filter[J]. Water Power,2020(8):24-26. (in Chinese))
- [19] 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))

[21] 马小雪,杨军,曾春芬,等. 江苏沿海四港感潮河段非汛期水沙运动特点初探[J]. 人民长江,2014,45(19):9-12. (MA Xiaoxue, YANG Jun, ZENG Chunfen, et al. Characteristics of water and sediment movement in non-flood season in tidal reach of four ports in coastal Jiangsu Province[J]. Yangtze River,2014,45(19):9-12. (in Chinese))

[22] 牛明香,王俊. 基于 Landsat 遥感影像的黄河三角洲东营段海岸线变化分析[J]. 水资源保护,2020,36(4):26-33. (NIU Mingxiang, WANG Jun. Analysis of coastline variations in Dongying section of Yellow River Delta based on Landsat remote sensing image[J]. Water Resources Protection,2020,36(4):26-33. (in Chinese))

[23] 张珂,吴南,徐国鑫,等. GF-1 遥感影像结合等高线消除云层干扰的连续水体重建法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021,49(4):295-302. (ZHANG Ke, WU Nan, XU Guoxin, et al. An extraction method for continuous water body through cloud interference removal using GF-1 remote sensing and DEM[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):295-302. (in Chinese))

[24] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报,2005,9(5):589-595. (XU Hanchu. A study on Information extraction of water body with the modified normalized difference water index(MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing,2005,9(5):589-595. (in Chinese))

[25] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979,9(1):62-66.

[26] 肖德荣. 长江河口盐沼湿地外来物种互花米草扩散方式与机理研究[D]. 上海:华东师范大学,2010.

[27] 于谦,王韞玮,高抒. 潮汐与陆架环流作用下的悬沙输运:江苏新洋港海岸冬季观测结果[J]. 南京大学学报(自然科学), 2014,50(5):626-635. (YU Qian, WANG Yunwei, GAO Shu. Suspended sediment transport under the action of tidal and shelf circulation: winter observation of Xinyang Port coast, Jiangsu Province[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2014,50(5):626-635. (in Chinese))

[28] 陈才俊. 大米草对江苏省淤泥质海滩环境的影响[J]. 海洋与海岸带开发,1988(3):7-10. (CHEN Caijun. Effects of *Spartina anglica* on the environment of silt beach in Jiangsu Province[J]. Marine and Coastal Zone Development,1988(3):7-10. (in Chinese))

[29] 赵秧秧. 江苏中部海岸盐沼前缘的地貌动力过程[D]. 南京:南京大学,2015.

[30] 陈可锋,王乃瑞,徐俊辉,等. 射阳港拦门沙航道整治工程建设前后水沙特征分析[J]. 海洋工程,2018,36(4):129-137. (CHEN Kefeng, WANG Nairui, XU Junhui, et al. Analysis of water and sediment characteristics before and after construction of ganmensha channel regulation project in sheyang port[J]. Ocean Engineering,2018,36(4):129-137. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-10 编辑:刘晓艳)

(上接第 30 页)

[20] KARLSSON M,YAKOWITZ S. Nearest-neighbor methods for Nonparametric rainfall-runoff forecasting[J]. Water Resources Research,1987(7):1300-1308.

[21] 刘开磊,李致家,姚成,等. 基于 k-最近邻筛选的 BMA 集合预报模型研究[J]. 水利学报,2017,48(4):390-397. (LIU Kailei,LI Zhijia,YAO Cheng,et al. Study on the Bayesian model averaging coupling with the k-nearest neighbor selection[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(4):390-397. (in Chinese))

[22] 刘开磊,李致家,姚成,等. 水文学与水力学方法在淮河中游的应用研究[J]. 水力发电学报,2013,32(6):5-10. (LIU Kailei,LI Zhijia,YAO Cheng,et al. Study on hydrology and hydraulic methods applied to the middle Huai River Basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2013,32(6):5-10. (in Chinese))

[23] 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,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))

[24] 王建群,张显扬,卢志华. 秦淮河流域数字水文模型及其应用[J]. 水利学报,2004,35(4):42-47. (WANG Jianqun,ZHANG Xianyang,LU Zhihua. Digital hydrological model of Qinhuai River Basin and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004,35(4):42-47. (in Chinese))

[25] 李致家,姚成,章玉霞,等. 栅格型新安江模型的研究[J]. 水力发电学报,2009,28(2):25-34. (LI Zhijia,YAO Cheng,ZHANG Yuxia,et al. Study on grid-based Xin'anjiang model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2009,28(2):25-34. (in Chinese))

[26] 徐杰,李致家,霍文博,等. 半湿润流域洪水预报实时校正方法比较[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):317-322. (XU Jie, LI Zhijia, HUO Wenbo, et al. Comparison of real-time correction methods of flood forecasting in semi-humid watershed[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(4):317-322. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-21 编辑:胡新宇)