

基于BP神经网络和三次样条插值法的 感潮河段水位预报

季俊杰¹, 徐瑶瑶², 闻 昕³, 纪凯文³, 马晶洁³

(1. 江苏省河道管理局, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省太湖地区水利工程管理处, 江苏 苏州 215100;

3. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对常熟水利枢纽外江侧为感潮河段, 提出一种基于BP神经网络和三次样条插值结合的感潮河段水位预报方法。结果表明, 潮位预报预见期为1 d与2 d时, 模型绝对误差分别为0.06 m与0.18 m, 合格率分别为87.5%与70.9%, 满足《水文情报预报规范》所规定的发布正式预报要求; 预见期为3 d时, 模型绝对误差与合格率分别为0.28 m与61.4%, 满足参考性预报要求。水位预报预见期为1 d时, 模型绝对误差为0.07 m, 适用于枢纽的精细化调度; 预见期为2 d与3 d时, 模型绝对误差分别为0.13 m和0.18 m, 可为枢纽运行提供精准的外江侧水位预报。

关键词: 感潮河段; 水位预报; 水利枢纽

中图分类号: [TV123]

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2024)07-0033-0005

Water level forecast of tidal river sections based on the BP neural network and cubic spline interpolation method

Ji Junjie¹, XU Yaoyao², WEN Xin³, Ji Kaiwen³, MA Jingjie³

(1. *Jiangsu River Course Administration Bureau, Nanjing 210029, China;*

2. *Water Conservancy Engineering Management Office of Taihu Region of Jiangsu Province, Suzhou 215100, China;*

3. *College of water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)*

Abstract: A water level prediction method for tidal river sections on the outer river side of Changshu Water Conservancy Hub is proposed based on a combination of BP neural network and cubic spline interpolation. The results show that when the forecast period for tidal level forecast is 1 day and 2 days, the absolute errors of the model are 0.06 m and 0.18 m, respectively, and the qualification rates are 87.5% and 70.9%, meeting the requirements for issuing formal forecasts as stipulated in the "Hydrological Information Forecasting Specification"; When the forecast period is 3 days, the absolute error and qualification rate of the model are 0.28 m and 61.4%, respectively, meeting the reference forecast requirements. When the forecast period for water level is 1 day, the absolute error of the model is 0.07 m, which is suitable for the refined scheduling of the hub; When the forecast period is 2 days and 3 days, the absolute errors of the model are 0.13 m and 0.18 m, respectively, which can provide water level information reference for the operation of the hub.

Key words: tidal river section; water level forecast; water conservancy hub

收稿日期: 2024-04-19

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020065)

作者简介: 季俊杰(1987—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水利工程相关工作。E-mail: 236978377@qq.com

1 概 述

水位预报是基于已有水位、流量等水文信息,预报河流、湖泊未来水位的水文预报。根据使用场景,水位预报可分为湖泊水位预报、河流水位预报、感潮河段潮位预报等。其中,感潮河段的潮位预报由于影响因素较多,变化机理复杂,预报十分复杂和困难^[1-2]。目前,感潮河段潮位预报的常用方法主要包括水力学方法^[3-4]、统计学方法^[5]及神经网络分析方法^[6-8]等。水力学方法考虑了潮水与上游来水间的顶托作用,预报精度较高,但需要非常详细的地形资料,在实际应用中较为受限^[9]。统计学方法可以基于大数据率定潮位与多个影响因素间的联系,较为常用的方法有多元线性回归等^[10-12]。神经网络分析方法依据感潮河段潮位与相关水文要素数据的统计规律,通过多次计算与参数修正,确立各要素的影响权重,实现对感潮河段水位影响因素间非线性关系的模拟,预报精度较高^[13-14]。当前神经网络分析方法常用模型包括BP神经网络模型、LSTM神经网络模型等,其中,BP神经网络模型因其学习效率高、收敛性强而在潮位预报领域得到广泛且深远的应用^[15-17]。

常熟水利枢纽(以下简称枢纽)是连接望虞河和长江的控制性水工建筑物,工程通过双向有序引水和排水,完成防洪排涝和引清释污等多重调控任务,在应对洪涝灾害以及水污染治理等方面发挥至关重要的作用。枢纽调度运行取决于长江常熟段(外江)和望虞河水位的相对关系。一直以来,两侧水位相对关系依据实时监测和人工预判的水位信息判断,易误判闸泵的最佳启闭时间,造成运行效率低、能耗高等问题。精确预测枢纽两侧水位关系变化,是提升枢纽调度运行效率的重要技术基础。

长江常熟段为感潮河段,水位波动大,是枢纽两侧水位关系的主要决定因素。针对长江水位变幅大、预报复杂度高的特点,本文基于BP神经网络模型构建枢纽外江潮位预报方法,结合3次样条插值方法实现长江水位预报,为枢纽的精准、高效运行提供技术支撑。

2 研究区域与方法

2.1 研究区域概况

枢纽距望虞河入江口约1.1 km,是望虞河入长江的控制工程,具有挡洪、排涝、引水及改善水环境等综合功能。自建成以来,枢纽已累计引排水615亿 m^3 ,为保障太湖防洪、供水和水生态安全发挥了重要作用。

枢纽外江侧属于感潮河段,水位主要受上游来水与下游天文潮上溯的影响^[18],波动大且周期性明显,最高水位出现于高高潮,最低水位出现于低低潮,相邻高低潮间水位随时间均匀变化。由于月球引力作用,枢纽外江侧高高潮、高低潮、低高潮、低低潮出现时间循环,各潮时比前一天晚0.8 h左右,如图1(a)所示。外江水位单日变化4~5次,平均变幅2.55 m,最大变幅4.19 m,取2017—2019年日变幅最大的2 d与最小的3 d的逐时水位绘制成图,枢纽外江侧水位具有变幅大、变频高的特点,如图1(b)所示。

2.2 数据来源与处理

2.2.1 数据来源

选择大通站为上游来水代表站,吴淞站为下游天文潮上溯代表站。从枢纽运行管理处获取2017—2019年的外江测水位(每条间隔5 min,共315 360条),其中包含潮位数据4 380条。从相关水文年鉴获取2017—2019年的吴淞站潮位(4 380条)

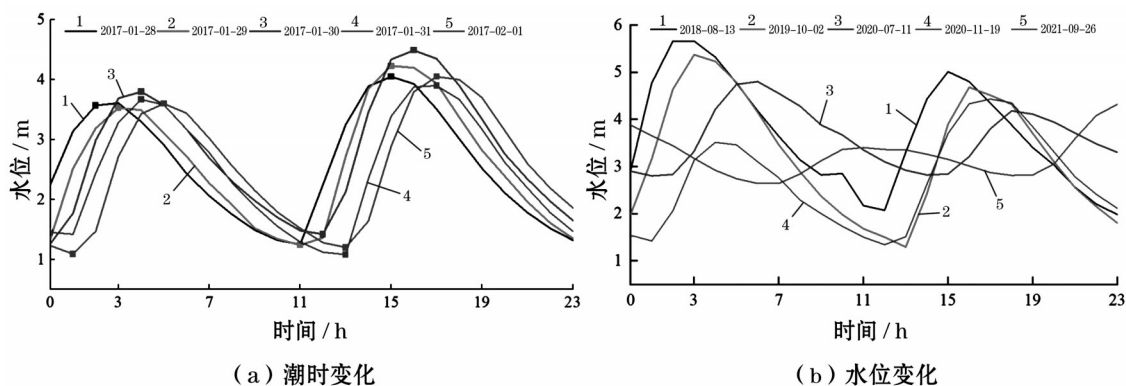


图1 外江侧变化规律示意

和大通站逐日平均水位(1 095条)。

2.2.2 数据分析

经统计,从外江水位时序数据中提取的高低潮数据共4 380个,缺失200个,占所获数据的4.57%,空缺值分布如图2(a)所示,空缺值密集时段共3段,为2017年4月末、2018年7月末与2019年8月末。2017—2019年外江水位时序数据共305 066条,缺失10 294条,占所获数据的3.37%,空缺值分布如图2(b)所示,空缺值密集时段共4段,为2017年1月、2017年4月末、2018年7月末、2019年8月末。空缺值分布无明显时序规律,应为枢纽外江侧水位监测传感器与上位机断连导致的随机性缺失。

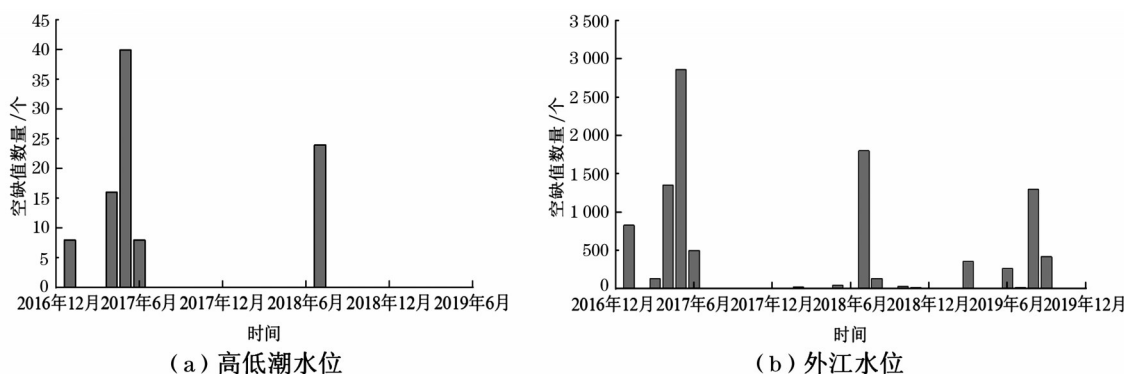


图2 枢纽水位数据空缺值分布

藏层和输出层的多层网络结构。BP神经网络通过误差反向传播更新隐藏层到输出层、输入层到隐藏层的权重和偏置值,使模型预测值与真实值之间的误差平方和最小。BP神经网络拓扑图见图3。

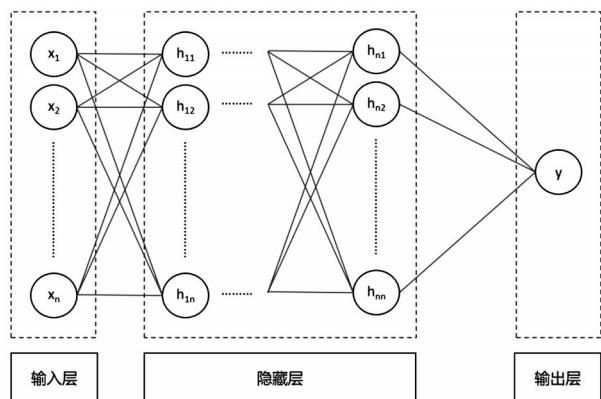


图3 BP神经网络拓扑

本文的BP神经网络模型共包含4个输入层、5个隐藏层与1个输出层,设置学习步长为1,动量因子为0.2。设置输出层为枢纽外江侧潮位,输入层

常熟枢纽外江侧水位变幅大、变频高,插补难度较大,而外江潮位数据变幅较小,相邻高低潮间水位随时间呈现均匀变化趋势,所以本文首先通过均值插补方法补充外江潮位缺失数据,再将处理后的外江潮位数据进行三次样条插值,得到外江水位缺失数据。在开展缺失数据插补之前,剔除与数据缺失时段时长相近的原始数据,插补后与实际水位数据进行比较,评估插补方法可靠性。

2.3 外江水位预报方法

2.3.1 BP神经网络模型构建和潮位预测

BP神经网络于1986年由Rumelhart和McClland等提出,是基于梯度下降学习规则,包含输入层、隐

为预报日前一日枢纽外江侧同一潮位、预报日吴淞站同一潮位、预报日前2 d大通日水位和预报日前3 d大通日水位,滚动计算以实现预见期分别为1 d、2 d、3 d的枢纽外江侧潮位预报。训练过程中,模型迭代次数上限为7 000 000次,使用2017—2018年枢纽外江侧潮位、吴淞站潮位与大通站日水位共216 790条数据作为训练集,为反映模型预测值与真实值差异,选用均方误差(MSE)为模型损失函数。均方误差计算式为

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2 \quad (1)$$

式中: y'_i 为模型估计值, $i=1,2,\dots,n$; y_i 为实际值, $i=1,2,\dots,n$; n 为样本数量。

为检验模型预报效果,设置验证集为2019年枢纽外江侧潮位、吴淞站潮位与大通站日水位共108 395个数据,令模型分别在预见期为1~3 d,预报2019年全年枢纽外江侧潮位。

2.3.2 潮时预报

根据上述分析所得潮时规律,枢纽外江侧潮时预报公式为

$$T_{i+1}=T_i+0.8 \quad (2)$$

式中: T_{i+1} 为当日潮时预报值; T_i 为前一日潮时预报值。

2.3.3 感潮河段水位预报

由于枢纽外江侧相邻高低潮间水位随时间均匀变化, BP神经网络模型预报潮位数据后, 结合潮时预报结果, 采用三次样条插值法, 获得高低潮间水位预报结果。

2.3.4 模型评价指标

采用平均绝对误差(ε)、平均相对误差(δ)评价潮位、水位预报结果, 计算式为

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - a_i| \quad (3)$$

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - a_i|}{x_i} \quad (4)$$

式中: n 为预报结果数; a_i 为实际值, $i=1, 2, \dots, n$; x_i 为预报值, $i=1, 2, \dots, n$ 。

3 结果分析与讨论

3.1 数据处理结果

经均值插补和三次样条插值方法获得的潮位和水位数据与实际值相差很小(表1), 平均绝对误差分别为0.042 m与0.21 m, 证明本研究所用数据处理方法可靠性较高, 能够有效补充枢纽缺失的外江侧潮位、水位数据。使用上述方法补充2017年1月、2017年4月末、2018年7月末、2019年8月末等时段空缺值, 共计10 294条。选取2019年3月1日至2日时序水位绘制数据处理效果图, 如图4所示, 水位涨落趋势基本符合枢纽外江水位涨落规律。经过数据处理后, 外江水位共315 360条。

表1 枢纽外江侧潮位、水位空缺值插补精度检验

时段	时长/d	潮位平均绝对误差/m	时段	时长/d	潮位平均绝对误差/m
2017年7月25日至8月2日	9	0.050	2017年1月1日至1月2日	2	0.15
2018年6月8日至6月16日	9	0.070	2018年4月7日至4月8日	2	0.23
2019年8月26日至9月3日	9	0.006	2019年7月9日至7月10日	2	0.25

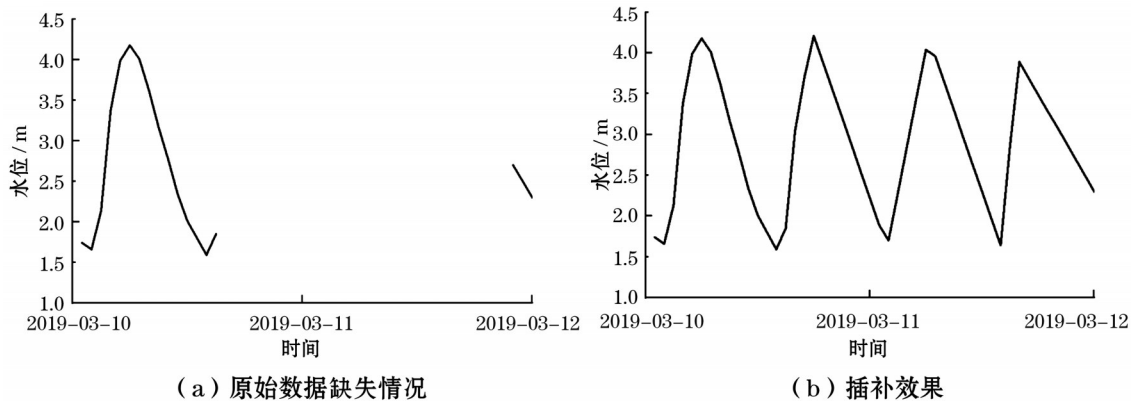


图4 外江水位原始数据多日缺失情况与插补效果

3.2 潮位预报结果

BP神经网络模型对2019年枢纽外江侧潮位的预报结果显示, 枢纽外江侧潮位预报精度随预见期增大而降低。预见期为1 d时, 预报值与实际值的相对误差和绝对误差最小, 分别为2.16%与0.06 m; 预见期为2 d时, 预报值与实际值的相对误差与绝对误差分别为6.48%与0.18 m; 预见期为3 d时, 预报值与实际值的相对误差与绝对误差分别为10.08%与0.28 m。根据《水文情报预报规范》规定, 一次预报的误差小于许可误差(0.3 m)时, 为合格预

报。合格预报次数与预报总次数之比的百分数为合格率, 表示多次预报总体的精度水平。预报项目精度按合格率大小分为甲、乙、丙3个等级, 预报方案精度达到甲、乙等级者, 可用于发布正式预报; 达到丙等者, 可用于参考性预报; 丙等以下者, 只能用于参考性估报。本文使用的潮位预报模型预见期为1 d与2 d时, 合格率分别为87.5%与70.9%, 满足发布正式预报要求; 预见期为3 d时, 预报合格率为61.4%, 满足参考性预报要求。

以往研究中, 长江下游感潮河段潮位预报方法

有调和分析法、多元线性回归法与机器学习法等^[18-20],预见期为1 d、2 d和3 d时,潮位预报方案合格率为75%~98%、70%~95%和50%~80%,绝对误差为0.09~0.25 m、0.11~0.26 m和0.20~0.33 m。与相关研究对比,本研究预报模型在预见期为1 d时精度较高。预见期为2 d和3 d时,潮位预报方案合格率和绝对误差与以往研究结果相近,预报精度未出现明显提升,这可能由模型训练集不足导致。在潮位变化剧烈时,训练集数据量不足致使模型对潮位的涨落估计不足,产生较大预报误差,并随模型的滚动计算逐步扩大。

3.3 水位预报结果

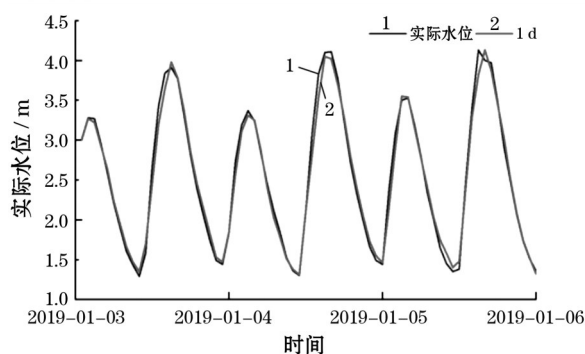
不同预见期下枢纽外江侧逐时水位预报结果表明(图5),预报精度随预见期增大而下降(表2),预见期为1 d时,预报值与实际值的相对误差和绝对误差最小,分别为2.74%与0.07 m。预见期为2 d和3 d时,预报值与实际值的相对误差和绝对误差分别为5.01%和0.13 m、7.06%和0.18 m。平原区水闸的过闸水位差可采用0.1~0.3 m,本研究中,预见期为1 d时的外江水位预报精度高,可为枢纽两侧水位关系准确判断提供支撑,适用于枢纽的精细化调度;预见期为2 d与3 d时,水位预报误差处于过闸水位差要求范围,可为枢纽两侧水位关系判断提供可靠参考,辅助枢纽制定调度计划。

4 结 论

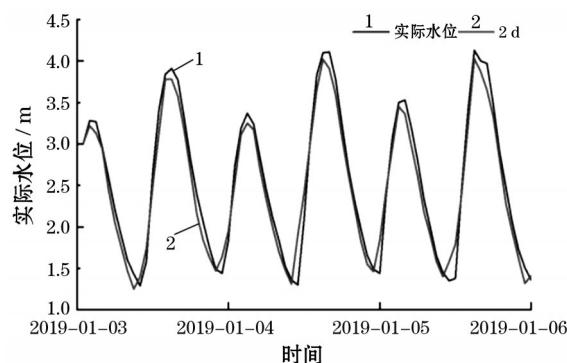
本文构建了BP神经网络和三次样条插值方法结合的枢纽外江侧水位预报模型,改进了感潮河段水位预报复杂度高的问题。该模型预报结果与实际水位变化具有较高的一致性,预见期为1 d时,预报精度较高,可以为枢纽精细化调度提供数据支撑;预见期为2 d与3 d时,模型预报值可以为枢纽运行提供水位信息参考。在下一步的研究中,研究人员将持续积累枢纽外江侧水位数据,不断扩大训练集数量与数据种类,提高模型学习率和预报方案精度。

参考文献:

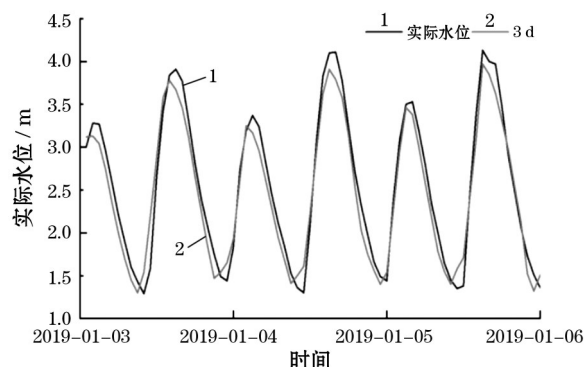
- [1] 都宏博. 感潮河段水位统计预报方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [2] 张小琴, 包为民. 感潮河段水位预报方法浅析[J]. 水电能源科学, 2009, 27(3): 8-10.
- [3] 邱超, 潘爽. 浦阳江流域感潮河段洪水预报研究[J]. 水文, 2024, 29(3): 1-13.
- [4] 韩超, 梅青, 刘曙光, 等. 平原感潮河网水文水动力耦合模型的研究与应用[J]. 水动力学研究与进展, 2014, 29



(a) 预见期为1 d



(b) 预见期为2 d



(c) 预见期为3 d

图5 预见期为1 d、2 d、3 d时外江水位预报结果

表2 模型预报精度评价

	预见期/d	平均绝对误差/m	平均相对误差/%
潮位预报	1	0.06	2.16
	2	0.18	6.48
	3	0.28	10.08
水位预报	1	0.07	2.74
	2	0.13	5.01
	3	0.18	7.06

(6): 706-712.

- [5] 闫龙增, 冉钦朋, 贺苹, 等. 三峡水库蓄水初期寸滩站洪水预报方法研究[J]. 水文, 2023, 43(1): 72-77.

(下转第46页)

主要的原因在于桩式护岸不需要打筑围堰截流、开挖回填量少、减少占地、不需要降水并可在有水条件下进行施工,且生态性好、工程造价省等优点,具有较好的推广价值。八一大沟治理工程结合在水位变化区采用管桩支护+桩间挡土采用土工筒袋措施,能有效解决预制桩等直立式挡墙护岸结构在不能大开挖的情况下挡土和滤水等方面存在的瓶颈问题,为预制桩生态护岸可靠、稳定、生态运行奠定坚实的基础,同时方便施工,打桩效率高,节省工程投资,有利于预制桩生态护岸的进一步推广应用,也是对国家“碳中和”“碳达峰”战略目标的响应。八一大沟塌坡段护岸已投入使用多年,河道岸坡完好,水位变化区生长了不少水生植物,生态景观好,取得了良好的经济效益、社会效益和生态效益,达到了既定的目标。

江苏省河湖众多、水系发达,水面积占整个地域面积的16%以上,河道生态要求高,再加上受投资、环保等因素制约,不少河道不宜采取打筑施工围堰大开挖施工措施,因此该项非开挖生态护岸治理新措施研究成熟后,有望能在江苏境内水利工程等项目中得到大范围的推广应用,具有广阔的前景。目前以该项技术为基础的江苏省水利科技课题,正在对土工织物筒袋袋体、袋装填充料、桩间合理间隙

及构造优化或者可回收再利用等方面做更加深入的研究,寻求更加可靠、经济、安全的生态治理措施。

参考文献:

- [1] 关春曼,张桂荣,程大鹏,等. 中小河流生态护岸技术发展趋势与热点问题[J]. 水利水运工程学报, 2014(4): 75-81.
- [2] 陈丙法,黄蔚,陈开宁,等. 河道生态护岸的研究进展[J]. 环境工程, 2018(3): 74-77.
- [3] 王一航,张金凤,张娜,等. 生态护岸在水利工程中的研究及应用进展[J]. 水道港口, 2020(2): 210-216.
- [4] 孙磊,刘雅雅. 装配式建筑预制混凝土构件生产成本控制的研究[J]. 北方建筑, 2019, 4(2): 79-81.
- [5] 陈红波,王强,吴芳. 预制桩板组合护岸在新沟河延伸拓浚工程中的应用[J]. 江苏水利, 2020(增刊2): 69-71, 75.
- [6] 满建舫,陈亚军,孙丹丹,等. 徐州市市区排涝泵站改造工程初步设计报告[R]. 徐州:徐州市水利建筑设计研究院有限公司, 2022.
- [7] 杨勇,储白露,董修新,等. 徐州市近期防洪排涝工程初步设计综合说明[R]. 徐州:徐州市水利建筑设计研究院, 2001.
- [8] 陈亚军,纪伟,袁承斌,等. 浅谈打入型反滤体在预制桩生态护岸工程上的研究[J]. 治淮, 2023(1): 23-29.
- [6] 谢文鸿. 基于机器学习的风暴潮智能预报[D]. 南京:南京信息工程大学, 2024.
- [7] 刘倩. 基于调和分析与神经网络的潮汐分析和预报[D]. 青岛:青岛大学, 2023.
- [8] 徐晓武,陈永平,甘敏,等. 基于非稳态调和分析和长短时记忆神经网络的河口潮位短期预报混合模型[J]. 海洋通报, 2022, 41(4): 401-410.
- [9] 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.
- [10] 白立影,戴凤君,谭亚,等. 镇江站天文潮预报模型研究[J]. 江苏水利, 2017(10): 40-43.
- [11] 周莉,严锋,何健,等. 基于多元逐步回归及实时修正的长江南京站高潮位预报[J]. 水利水电快报, 2023, 44(3): 22-25.
- [12] 史凯丰. 丹东潮水位站高低潮位预报的修正与应用[J]. 东北水利水电, 2023, 41(8): 25-26.
- [13] 陈志高,吴子豪,班亚,等. 基于调和分析及VMD-BP神经网络的感潮河段流量预报[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1389-1397.
- [14] 陈柯兵,邓良爱,李瀛,等. 基于AutoML的长江下游周句尺度枯水位及潮位预报[J]. 水运工程, 2023(11): 120-125.
- [15] 衣学军,汤岭,李致家,等. 基于机器学习的洪水预报实时校正[J]. 水电能源科学, 2023, 41(12): 78-81.
- [16] 葛路,张善亮,许月萍,等. 耦合BP神经网络的MIKE11模型预报无资料断面水位[J]. 水利水运工程学报, 2023(3): 57-67.
- [17] 李鑫,刘艳丽,朱士江,等. 基于新安江模型和BP神经网络的中小河流洪水模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(1): 93-97.
- [18] 傅太生,姚允龙,陆益. 长江下游镇江站高潮位预报分析[J]. 江苏水利, 2006(8): 28-32.
- [19] 姚思源,李国芳,钱睿智,等. 南水北调东线工程源头长江潮位预报[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(6): 1136-1146.
- [20] 王如云,李丹,周钧,等. 感潮河段单站等时距水位非线性优化预报模型[J]. 水道港口, 2017, 38(2): 132-136.

(上接第37页)