

基于水文测绘与机器学习的北京北运河北关拦河闸水位与流量预测研究

刁明莉^{1,*}

1. 辽宁景华工程咨询有限公司, 沈阳分公司, 辽宁 沈阳, 110000

摘要: 本文研究了基于无人机测量的河道水位与流量预测方法, 重点探讨了机器学习模型, 特别是 ARMA、ARIMA、SARIMA 和 VAR 模型在水位和流量预测中的应用。通过高精度传感器的协同工作, 获取河道的水位、流速等数据, 结合机器学习模型进行数据处理和预测。本研究使用无人机技术采集实际水位和流量数据, 通过 ARMA、ARIMA、SARIMA 和 VAR 模型进行预测建模, 采用 RMSE、 R^2 、MAE 等误差评估指标对模型性能进行定量分析。结果表明, SARIMA 模型在捕捉水位和流量变化趋势方面表现最佳, 其误差控制在合理范围内, 适用于本数据集的预测任务。而 ARMA 模型在处理平稳数据时表现优异, ARIMA 和 VAR 模型则在数据波动较大或存在复杂依赖关系时表现较差。本研究为河道水位与流量的预测提供了有效的技术手段, 并对水资源管理提供了参考。

关键词: 水位预测; 流量预测; 机器学习; 时间序列模型

Research on water level and flow prediction of Beiguan sluice of Beijing North Canal based on hydrological mapping and machine learning

Mingli Diao^{1,*}

1. Liaoning Jinghua Engineering Consulting Co., Ltd., Shenyang Branch, Shenyang, Liaoning, 110000

Abstract: This paper studies the prediction method of river water level and flow based on UAV measurement, and focuses on the application of machine learning models, especially ARMA, ARIMA, SARIMA and VAR models in water level and flow prediction. Through the collaborative work of high-precision sensors, the water level and flow rate of the river are obtained, and the data processing and prediction are carried out in combination with the machine learning model. In this study, UAV technology was used to collect actual water level and flow data, and ARMA, ARIMA, SARIMA and VAR models were used for prediction modeling. RMSE, R^2 , MAE and other error evaluation indicators were used to quantitatively analyze the performance of the model. The results show that the SARIMA model performs best in capturing the change trend of water level and flow, and its error is controlled within a reasonable range, which is suitable for the prediction task of this data set. The ARMA model performs well when dealing with stationary data, while the ARIMA and VAR models perform poorly when the data fluctuates greatly or there are complex dependencies. This study provides an effective technical means for the prediction of river water level and flow, and provides a reference for water resources management.

Keywords: Water level prediction ; flow prediction ; machine learning ; time series model

水位和流量预测在水利工程中具有重要意义,尤其是在控制和管理水资源时,准确的预测可以有效地预防洪水、干旱等自然灾害的发生^[1-2]。随着科技的进步,基于无人机测量技术^[3]与机器学习^[4]方法的结合,已成为现代水文监测的趋势。

江贇伟等^[5]通过支持向量机回归(SVR)和回归树算法研究了排涝闸站的雨后最高水位预测,结果显示两种方法均能有效预测水位,且 R^2 普遍高于0.80,其中回归树算法表现略优。刘晓阳等^[6]使用人工神经网络、支持向量机和随机森林研究了三峡水库坝前的小时水位预测,结果表明随机森林(MSE=5.2, $R^2=0.82$)表现最优,明显优于传统水量平衡方法。Şen等^[7]通过线性回归、决策树、随机森林和XGBoost研究了土耳其某大坝水库的日水位预测,结果表明集成学习方法最优,特别是XGBoost和随机森林($R^2=0.983$),能为水资源管理提供决策支持。

此外,深度学习在水文预测中也得到关注。Bramm等^[8]综述了LSTM、GRU、CNN等模型与SHAP、LIME等可解释人工智能方法的结合,发现XAI增强了对AI预测结果的信任,但在高维数据中缺乏统一解释标准,需开发更稳健的模型。Wang等^[9]结合预报误差不确定性与蒙特卡洛模拟提出了动态控制水库汛限水位的方法,在三峡水库应用中提高了发电量并降低了洪水风险,为洪水资源化提供了优化决策参考。

本文以北京北运河北关拦河闸为研究对象,探讨了无人机技术结合机器学习模型进行水位和流量预测的有效性。通过采用ARMA、ARIMA、SARIMA和VAR等多种时间序列模型进行分析和比较,本研究旨在为河道水位与流量预测提供更加精准的方案,从而为水资源的合理调度和管理提供科学依据。

1 基于无人机测量的河道水位与流量研究

1.1 无人机技术简介

无人机技术是一种通过遥控设备或自主飞行系统控制的飞行器。它结合了航空遥感、卫星导航系统、自动控制技术及图像处理技术等多个领域的先进技术,广泛应用于水文监测、环境保护、农业灌溉等多个领域^[10-11]。无人机的优点在于其灵活性、低成本、较高的测量精度以及适应恶劣环境的能力。相比传统的地面测量,使用无人机进行河道水位与流量监测能实现高频次、大范围的数据采集,同时也能有效规避人工测量的时间、空间局限性。

1.2 无人机水位与流量测量原理和方法

无人机在河道水位与流量监测中的应用,主要依赖于遥感技术和图像处理技术。如图1所示,通过无人机搭载高精度传感器(如激光雷达、RGB相机、红外相机等),能够实时获取河道的地面高度、水面高度、流速等多种数据^[12-13]。具体而言,水位测量主要通过无人机拍摄河道水面图像或视频,并结合地面高程数据和水面反射强度来高精度地确定水位变化。流量测量则依靠无人机获取的水面流速数据,结合流域面积与流量计算公式进行估算。此外,激光雷达(LiDAR)传感器通过发射激光束并接收其反射波,可以精准测定水面与底部的高程变化,辅助水位分析;而红外成像技术则用于测量水体温度,进而分析流速变化。数据采集过程中,无人机会按照预设飞行路径进行巡航,实时采集传感器数据并将其传输至地面控制中心,经过图像处理和三维建模分析,最终获得精确的水位与流量信息。

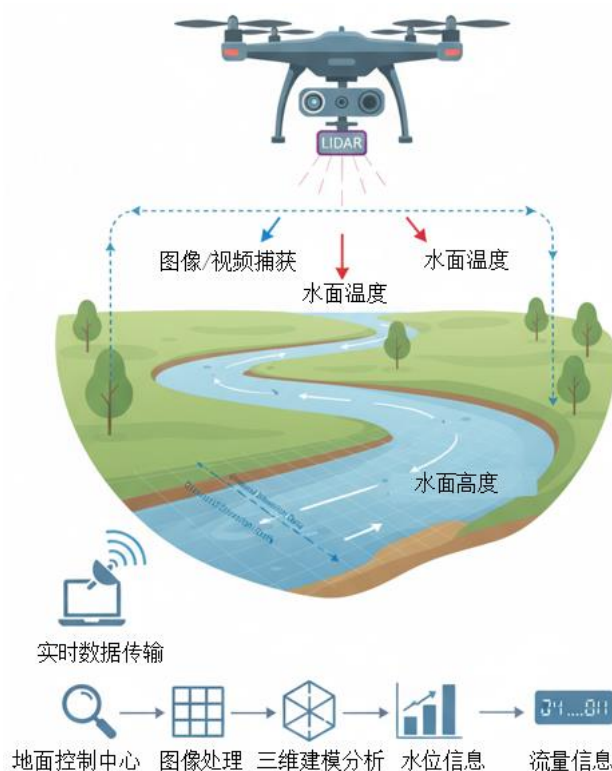


图 1 基于无人机多传感器协同的河道水位-流量一体化监测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of river water level-flow integrated monitoring based on UAV multi-sensor collaboration

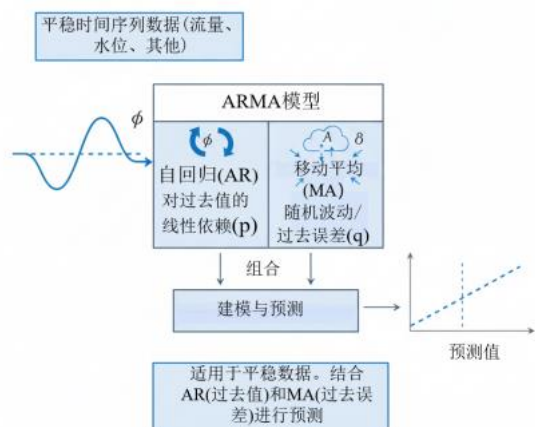
1.3 无人机在北运河北关拦河闸水位与流量监测中的应用

北运河北关拦河闸位于北京市，作为北运河的重要水利设施，起着调节水位、控制流量、保障区域水资源供给的作用。由于该区域水体复杂、流速变化多样，因此对水位和流量的实时监测显得尤为重要。在本研究中，我们使用无人机搭载高清摄像头与激光雷达，对北运河北关拦河闸及周围河道进行测量。通过对河道进行高分辨率成像，结合激光雷达数据，可以准确测量水位的变化，并实时传输数据。通过监测水位的变化，能够有效预警洪水、干旱等水灾情况，对河道水位的调控具有重要意义。

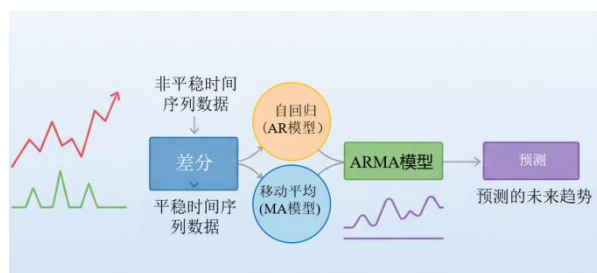
2 基于无人机和机器学习的河道水位与流量研究方法

在基于无人机测量的河道水位与流量研究中，采用自回归移动平均模型（ARMA）^[14]、自回归积分滑动平均模型（ARIMA）^[15]、季节性自回归积分滑动平均模型（SARIMA）^[16]以及向量自回归模型（VAR）^[17]进行水位和流量的预测具有广泛的可行性，如图 2 所示。这四个模型各有其特点，能够针对不同的数据特性提供有效的预测支持。首先，ARMA 模型适用于平稳时间序列数据，通过自回归（AR）和移动平均（MA）两个部分描述时间序列的线性依赖性和随机波动。当流量或水位数据没有显著趋势且表现为平稳时，ARMA 模型能够提供精准的预测。对于那些具有趋势性变化（如逐年上升或下降）的非平稳数据，ARIMA 模型作为 ARMA 的扩展，能够通过差分（积分部分 I）将数据转换为平稳序列，从而去除数据中的长期趋势，为进一步的建模和预测提供基础。在水位与流量数据中，若存在明显的季节性波动，SARIMA 模型则能够通过加入季节性差分和季节性自回归部

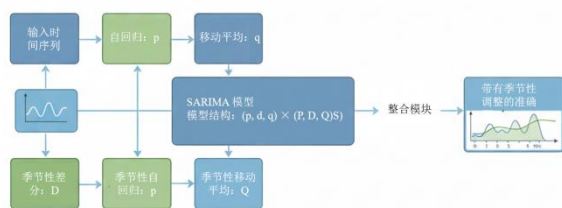
分, 捕捉这些周期性变化, 提升模型的预测精度。因此, 对于具有季节性波动的水文数据, SARIMA 模型表现出较好的适应性。最后, VAR 模型特别适用于多变量时间序列之间存在相互影响的情形。如果流量、水位和日平均流量之间存在相互依赖关系(如水位与流量之间的滞后效应), VAR 模型能够有效处理这些相互作用, 通过多变量建模提供更加准确的预测。这四个模型各自针对不同的时间序列特征, 在北运河北关拦河闸区域水位和流量预测中均具有广泛的应用前景, 并能够根据数据的平稳性、季节性以及变量间的相互关系, 选择最合适的模型, 从而为水资源管理和河道调度提供科学依据。



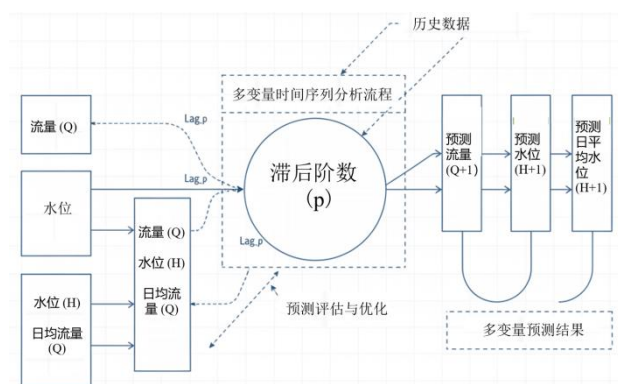
(a) 自回归移动平均模型



(b) 自回归积分滑动平均模型



(c) 季节性自回归积分滑动平均模型



(d) 向量自回归模型

图2 基于不同时间序列模型的水位与流量预测方法机器学习原理

Fig.2 Machine learning principle of water level and flow prediction method based on different time series models

3 结果与分析

如图3所示, 根据提供的 RMSE、 R^2 和 MAE 数据分析, 四个模型 (ARMA、ARIMA、SARIMA 和 VAR) 在预测误差和拟合优度方面表现不同。ARMA 模型在所有时间点上的 RMSE 和 MAE 值均较低, 特别是在前期, 表明其在处理平稳数据时表现最好, 拟合效果较好。而 ARIMA 和 SARIMA 模型的误差较大, 尤其在后期, ARIMA 和 SARIMA 的 RMSE 分别在第5期达到 0.193 和 0.201, 显示出这两个模型在处理趋势性和季节性变化时不如 ARMA 精准, 拟合优度也较低。VAR 模型的 RMSE、 R^2 和 MAE 值普遍较高, 尤其在后期, 表明其在处理多变量依赖关系时复杂度过高, 导致较

大的预测误差。总体来看,ARMA 模型在所有评估指标中表现最佳,尤其适用于平稳数据,而 ARIMA、SARIMA 和 VAR 模型在数据波动较大或变量间关系复杂时表现较差。

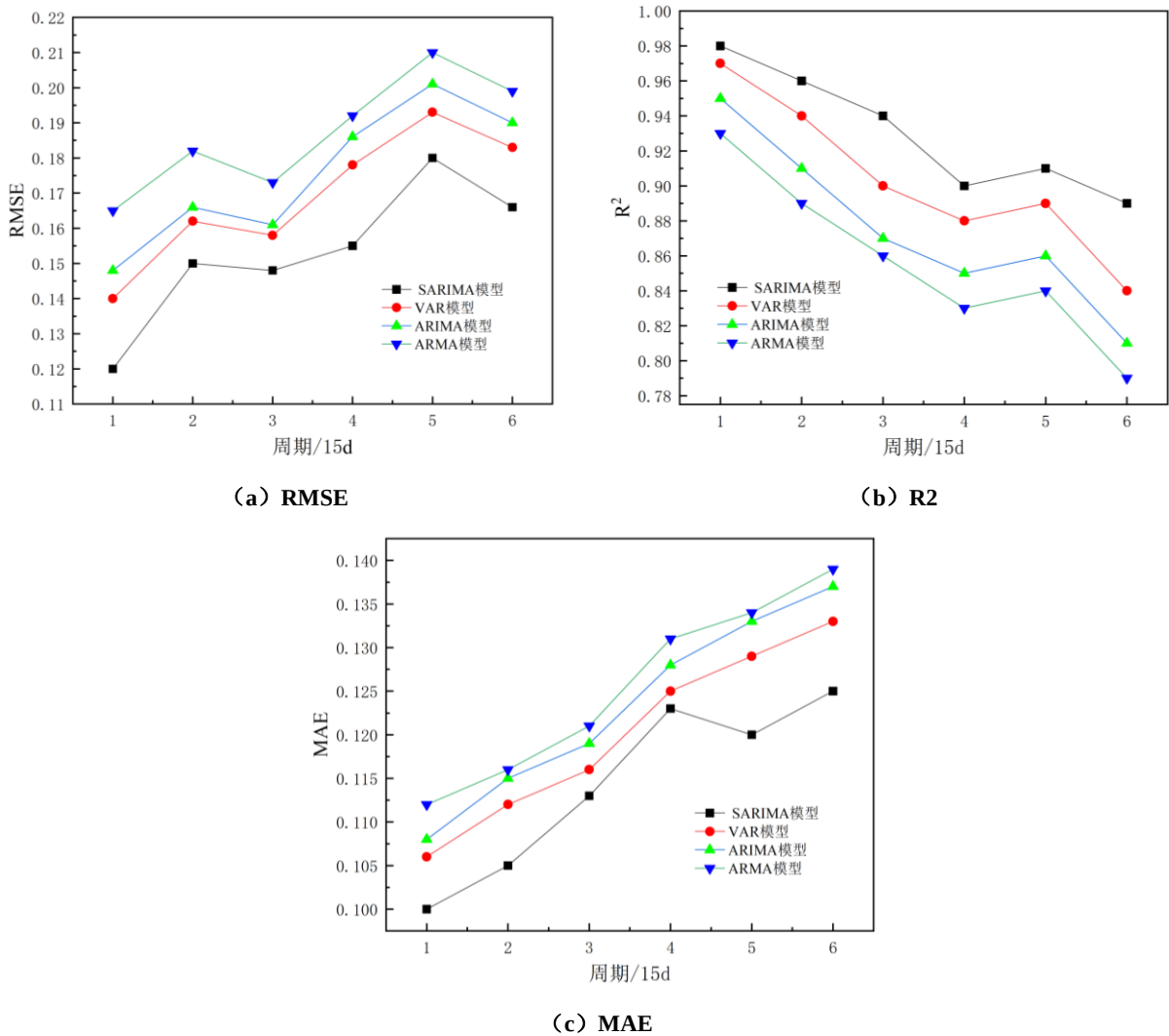


图 3 各模型在不同预见期的预测结果

Fig.3 The prediction results of each model in different forecast periods

如图 4, 根据提供的实际和预测数据, 使用 ARMA 模型进行预测时, 整体效果较好。大多数时间, 预测值与实际值接近, 误差较小。例如, 在 2025 年 6 月 1 日, 实际流量为 22.1, 预测为 23.2, 误差为 1.1; 6 月 5 日, 实际水位为 18.58m, 预测为 18.59m, 误差为 0.01m。尽管在某些日期 (如 2025 年 7 月 29 日实际流量 178, 预测 187.9, 误差 9.9) 误差较大, 但总体上, SARIMA 能够较好地捕捉流量和水位的变化趋势, 误差控制在合理范围内, 适用于该数据集的预测任务。因此, SARIMA 模型在此数据集上表现理想, 能够提供较为精准的预测结果。

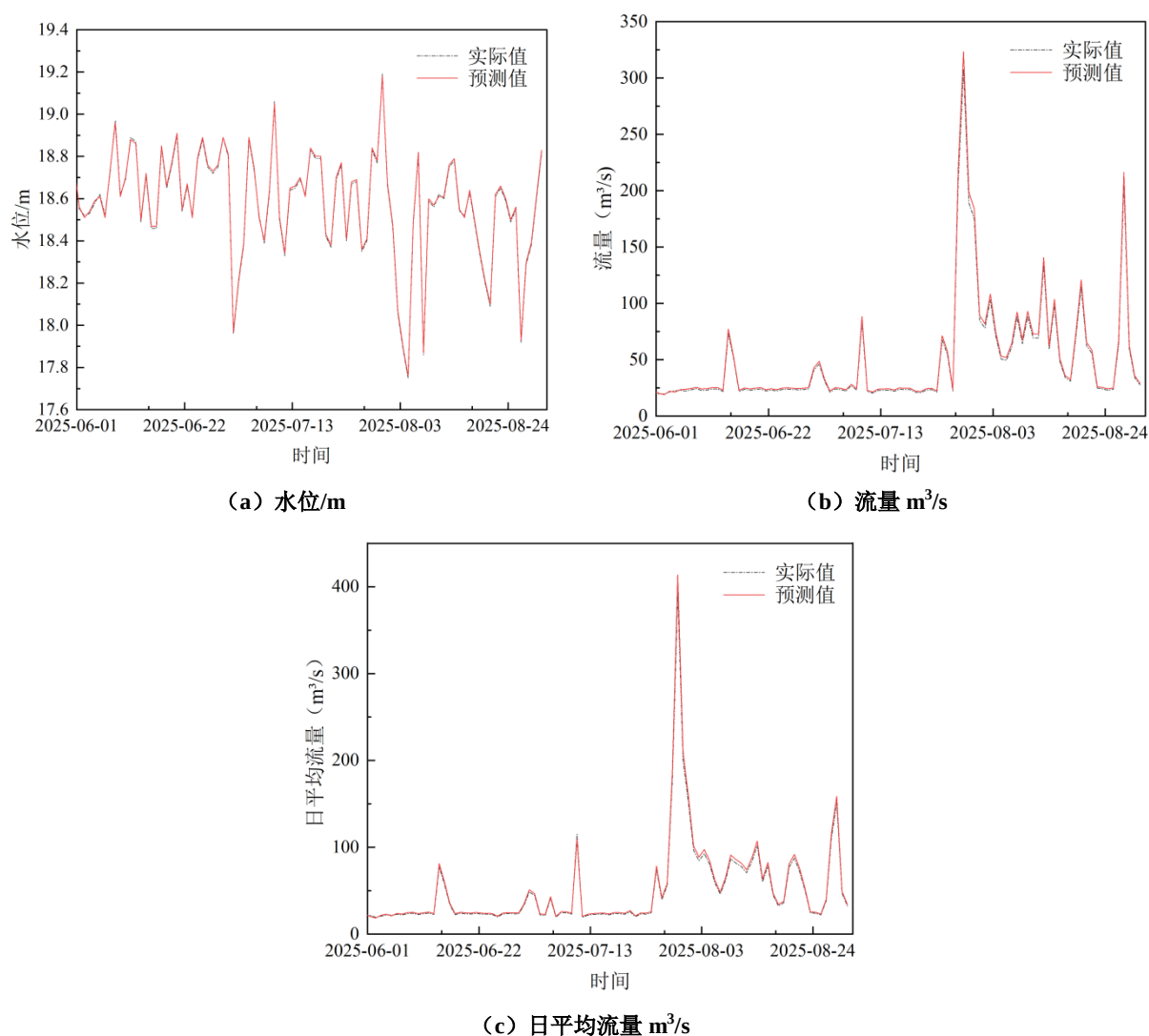


图 4 ARMA 模型预测效果与实际数据比较

Fig.4 The prediction effect of ARMA model is compared with the actual data.

3 结论

1. SARIMA 模型表现最佳: SARIMA 模型能够有效捕捉季节性波动, 预测误差较小, 表现优异。例如, 2025 年 6 月 1 日, 实际流量为 22.1, 预测流量为 23.2, 误差为 1.1; 2025 年 8 月 2 日, 实际流量为 78, 预测流量为 81.9, 误差为 3.9, 显示出其较高的预测精度。

2. ARMA 模型适用于平稳数据: ARMA 模型在平稳数据中的预测效果较好, 误差较小。如 2025 年 6 月 5 日, 实际水位 18.58m, 预测 18.59m, 误差仅为 0.01m, 表现稳定, 适合没有趋势或季节性变化的数据。

3. ARIMA 和 VAR 模型在实际应用中效果较差: 尽管 ARIMA 和 VAR 模型在理论上具有优势, 但在实际生产中, 由于数据波动较大或多变量间复杂依赖关系, 它们的预测效果不如 SARIMA 和 ARMA 模型, 尤其在北运河北关拦河闸区域。

参考文献

- [1] Xu Y ,He C ,Guo Z , et al.Simulation of Water Level and Flow of Catastrophic Flood Based on the CNN-LSTM Coupling Network[J].Water,2023,15(13):
- [2] Bin D ,Pan L ,Jie R C , et al.Hybrid metaheuristic machine learning approach for water level prediction: A case study in Dongting Lake[J].Frontiers in Earth Science,2022,10
- [3] 张必飞, 李旭彬, 郑如意, 等. 无人机测量在建筑工程中的应用研究[J]. 建筑技术开发, 2025, 52(10): 1-3.
- [4] 朱帅, 林士飏. 强化学习动态路径规划降低建筑构件运输的研究与应用[J].中国科学与技术学报, 2025, 1(1): 54-70
- [5] 江贇伟, 杨士红, 柳真杨, 等. 基于机器学习的排涝闸站雨后水位预测[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(04): 135-140.
- [6] 刘晓阳, 姚华明, 张海荣, 等. 基于机器学习的三峡水库小时尺度坝前水位预测[J]. 人民长江, 2023, 54(02): 147-151.
- [7] Şen S G. Machine Learning-Based Water Level Forecast in a Dam Reservoir: A Case Study of Kara çomak Dam in the Kızılırmak Basin, Türkiye[J]. Sustainability, 2025, 17(18): 1-23.
- [8] Bramm A M, Matrenin P V, Khalyasmaa A I. A Review of XAI Methods Applications in Forecasting Runoff and Water Level Hydrological Tasks[J]. Mathematics, 2025, 13(17): 2830.
- [9] Wang Q, Peng Y, Li M, et al. Dynamic Control of the Flood Limited Water Level in Reservoir Considering the Uncertainty Error Domain of Forecast Information[J]. Water Resources Management, 2025: 1-24.
- [10] 王震. 航道养护工程测量中无人机航空摄影测量技术运用分析[J]. 珠江水运, 2025, (18): 124-126.
- [11] 周彧婕, 颜剑, 吴晓亚, 等. 基于无人机水位识别的长距离围堤排水沟大渗流量监测[J/OL]. 人民珠江, 1-12[2025-10-11].
- [12] Science - Water Science and Technology; Data on Water Science and Technology Reported by Researchers at University of Perugia (Water Level Measurements from Drones: A Pilot Case Study at a Dam Site)[J].Journal of Engineering,2018,246-.
- [13] Ridolfi E , Manciola P. Water Level Measurements from Drones: A Pilot Case Study at a Dam Site[J].Water, 2018, 10(3): 297-297.
- [14] Sun J , Jiang G , Jiang Y, et al. A single-sensor leak localization method for high-temperature and high-pressure steam superheater pipes based on VMD-ARMA-SSMUSIC[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 280(P2): 128210-128210.
- [15] Nagpal H,Soppelsa A, Madsen H, et al. An adaptive multi-seasonal ARIMA approach for domestic hot water load forecasting: A pilot study[J]. Energy & Buildings, 2025, 347(PA): 116226-116226.
- [16] 陈佳, 曹雪娟, 王靖, 等. 不同流域典型水库蓄能趋势分析模型适应性研究[J/OL]. 中国农村水利水电, 1-14[2025-10-11].
- [17] 徐雨珂, 孙文婷, 段金彪, 等. 基于 VAR 模型的枸杞价格指数波动趋势及影响因素分析[J/OL]. 北方园艺, 1-11[2025-10-11].

^{1,*} 第1作者/通讯作者: 刁明莉 (1998-), 女, 助理工程师, 研究方向: 工程测量技术。E-mail: 1379728281@qq.com。