

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221394

鄱阳湖水位对五河来水的时空响应研究

张培培¹, 左天林², 戴会超³, 毛劲乔¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024; 3. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 鄱阳湖水位受到长江干流和湖泊流域五河来水(五河分别为赣江、抚河、信江、饶河、修水)的共同影响, 其中五河径流为鄱阳湖的主要来流。为探究五河来水变化对鄱阳湖水位的时空影响, 结合数据驱动模拟与敏感性分析方法, 定量研究了鄱阳湖水位与五河来水的响应关系。首先, 结合 PSO-GA 算法和支持向量回归(SVR)技术建立了湖泊水位预测模型, 模拟分析鄱阳湖水位与五河来水的时间响应关系; 然后, 基于此模型采用连续预测方法研究了鄱阳湖水位对五河来水响应的空间分布特征。结果表明, 鄱阳湖水位对五河来水变化响应较强的时期在5~7月, 尤以5月响应程度为甚; 空间分布上, 鄱阳湖湖区中部对五河来水变化的响应程度最高, 以2010年5月为例, 当五河来流增加40%时, 都昌站水位一周内平均可抬高1.16 m, 北部星子站、湖口站分别平均抬高1.15、1.03 m, 南部棠荫站、康山站平均抬高0.97 m。结果明确了鄱阳湖水位对五河来水的时空响应特征, 可为鄱阳湖水资源管理及流域优化调控提供科学依据。

关键词: 鄱阳湖; 水位预测; 五河来水; 时空特征; 响应关系

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0019-04

1 引言

鄱阳湖是我国第一大淡水湖, 也是长江流域重要的通江湖泊, 属于过水性、吞吐型、季节性变化的浅水湖泊, 在防洪抗旱、水源涵养、生物多样性保持等方面发挥着重要作用^[1,2]。鄱阳湖流域内河流众多, 其中集水面积超过10 000 km²的有赣江、抚河、信江、饶河、修水(简称五河)。五河来水分别从南、东、西三面汇入鄱阳湖, 与鄱阳湖区形成完整的鄱阳湖水系。鄱阳湖水位主要受流域和长江的双重影响, 上游五河水系汇集流域内径流, 为鄱阳湖湖区的主要来水。三峡工程建设运行后, 鄱阳湖水位受三峡工程等人类活动的影响情况备受关注^[3]。然而, 由于长江干流的顶托与拉空作用对鄱阳湖水位的影响较显著, 且大型水利工程的影响也多体现在长江干流, 因此现有研究在分析鄱阳湖水位变化响应时多侧重长江干流的影响。五河来水作为鄱阳湖的主要入湖水量,

对鄱阳湖水位的时空影响特征对鄱阳湖水资源管理与保护及五河流域水库群的优化调度均有重要的参考意义。本文引入粒子群算法(PSO)和遗传算法(GA)对模型参数与变量时滞进行寻优, 以进一步提高模型在全局范围内寻找最优解的效率, 进而建立了结合粒子群算法(PSO)和遗传算法(GA)的支持向量回归(SVR)水位预测模型, 并采用连续预测方法模拟分析了五河来水改变时鄱阳湖水位的时空变化, 揭示了鄱阳湖水位对五河来水的时空响应特征, 为鄱阳湖水资源管理及流域优化调控提供了参考。

2 结合 PSO-GA 算法的支持向量回归(SVR)理论

湖泊水位模拟模型主要包括水动力模型^[4,5]和数据驱动模型^[6], 其中数据驱动模型无需地形数据, 且具有高效快速的优点。以机器学习为基础的支持向量回归(SVR)方法在解决非线性回归

收稿日期: 2022-07-09, **修回日期:** 2022-08-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52109013, U2040205); 江西省科技厅重大科技研发专项(20213AAG01012); 中国博士后科学基金项目(2021M701049)

作者简介: 张培培(1990-), 女, 博士、助理研究员, 研究方向为水利工程生态调控, E-mail: ppzhang@hhu.edu.cn

通讯作者: 毛劲乔(1978-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水利工程生态调控, E-mail: maojq@hhu.edu.cn

问题中具有良好的泛化能力^[7],尤其在解决样本量小及非线性回归问题时展现了较高的精度^[8]。SVR 的基本原理是将训练数据通过非线性方式映射到高维特征空间中,并在其中进行线性回归,使低维特征空间中的非线性回归问题转化为高维特征空间的线性回归问题,具有能解决样本量小和非线性等问题的优点。其基本原理如下。

给定数据集为 $\{x_i, y_i\} (i=1, 2, \dots, n)$, 设回归函数为:

$$f(x) = \omega^T \varphi(x) + b \quad (1)$$

式中, ω 为映射的线性组合; $\varphi(x)$ 为非线性映射; b 为偏置量。

引入松弛变量 ξ_i, ξ_i^* 和不敏感损失参数 ϵ , 式(1)可转化为一个优化问题:

$$\min \frac{\omega^T \omega}{2} + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} y_i - \omega^T \varphi(x_i) - b \leq \epsilon + \xi_i \\ \omega^T \varphi(x_i) + b - y_i \leq \epsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, C 为误差项惩罚参数, $C \geq 0$ 。

根据拉格朗日乘数法构造 Lagrange 函数, 将优化问题转化为对偶优化问题, 得到支持向量回归(SVR)函数方程为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i \cdot x_j) + b \quad (3)$$

式中, α_i, α_i^* 均为拉格朗日乘子; $K(x_i \cdot x_j) = \varphi(x_i) \varphi(x_j)$ 为核函数。

对 SVR 模型参数寻优时, 鉴于粒子群算法(PSO)全局寻优性强和遗传算法(GA)局部寻优性强的特点, 将遗传算子融入粒子群中, 形成 PSO-GA 联合算法。该算法通过加入选择、交叉和变异的机制, 让粒子跳出当前的局部最优位置, 在全局范围内寻找更优值, 提高了粒子群的多样性, 同时克服了粒子群算法中局部最优的问题, 算法的全局优化能力得到显著提高。

3 基于 PSO-GA-SVR 的鄱阳湖水位模型

鄱阳湖代表性水文站主要有北部的湖口站、星子站, 中部的都昌站、吴城站、棠荫站, 南部的康山站 6 个站点, 五河下游控制性流量站主要包括虬津(修水)、外洲(赣江)、李家渡(抚河)、梅港(信江)、虎山和渡峰坑(饶河), 用以表征五河入湖流量。

3.1 模型结构与精度评价

鄱阳湖水位预测模型以五河上的水文站的逐

日平均流量和长江干流九江站的逐日平均流量及湖区站点的前期水位为输入变量, 以湖区湖口、星子、都昌、吴城、棠荫、康山站的逐日平均水位为模型输出变量。利用结合 PSO-GA 算法的 SVR 理论方法(PSO-GA-SVR)分别建立鄱阳湖各站点水位预测的数据驱动模型。模型模拟精度以均方根误差(R_{RMSE})、决定系数(R^2)、平均绝对误差(M_{MAE})、平均相对误差(M_{MRE}) 4 个指标来评价。

3.2 模型参数优选

支持向量回归(SVR)模型的性能主要取决于三个重要的自由参数, 即不敏感损失参数 ϵ 、误差项惩罚参数 C 、核函数参数 γ 的选择, 由于不同情况下水位对流量的滞后性表现各异, 输入变量时滞的不同会影响到模型有效输入的特征集, 故模型参数优选时同时确定了时滞区间的选取, 具体选取流程见图 1。设置 PSO-GA 算法的种群数目 $N=300$, 最大迭代次数 $T=300$, 学习因子 $c_1=c_2=0.5$, 惯性权重 $\omega=1$, 时滞的搜索范围为 $[-1, 11]$ 。模型训练后, 3 个 SVR 参数的取值分别为 $\epsilon=0.0269$ 、 $C=8422.9534$ 、 $\gamma=0.1721$ 。

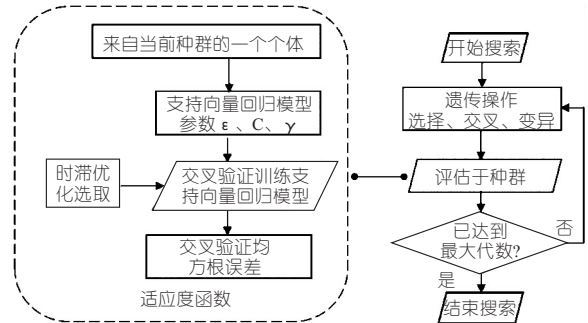


图 1 PSO-GA 算法和参数优化具体流程

Fig. 1 Flow chart of PSO-GA algorithm and parameter optimization

3.3 模型预测结果与分析

对于数据驱动的机器学习模型, 训练数据的信息越多, 模型的精度也就越高。以 2009~2012 年的数据为例, 由于 2010、2012 年模型各变量数据集的最大值、最小值波动范围更大, 在利用 PSO-GA-SVR 的鄱阳湖水位预测模型训练时, 模型期训练选取数据范围波动较大的 2010、2012 年, 模型验证期为 2009、2011 年。鄱阳湖水位预测模型精度的评估指标值见表 1、图 2。由表 1 可看出, 各代表性站点模型预测值与实测值拟合程度均较高, 决定系数均超过了 0.99, 模型训练集和验证集均方根误差范围分别为 0.037~0.107、0.053~0.124 m。由图 2 可看出, 鄱阳湖各站点水位预测模型的绝对误差大部分均处于 -0.03~0.03 m 的范围内。以模拟精度最差的吴城站为

表 1 鄱阳湖水位预测模型评估结果

Tab. 1 Evaluation results of water level prediction model for Poyang Lake

站点	训练期				验证期			
	R_{RMSE}/m	R^2	M_{MAE}/m	M_{MRE}	R_{RMSE}/m	R^2	M_{MAE}/m	M_{MRE}
湖口站	0.037	0.999 9	0.026	-0.000 02	0.057	0.999 8	0.035	0.003 1
星子站	0.076	0.999 6	0.056	0.000 30	0.121	0.997 6	0.057	0.005 1
都昌站	0.096	0.999 2	0.051	0.000 80	0.068	0.999 6	0.050	0.004 7
吴城站	0.107	0.998 8	0.067	-0.000 50	0.124	0.999 1	0.070	0.005 7
柴荫站	0.037	0.999 8	0.028	0.000 90	0.053	0.999 3	0.035	0.002 7
康山站	0.048	0.999 4	0.031	-0.000 40	0.114	0.997 3	0.046	0.003 3

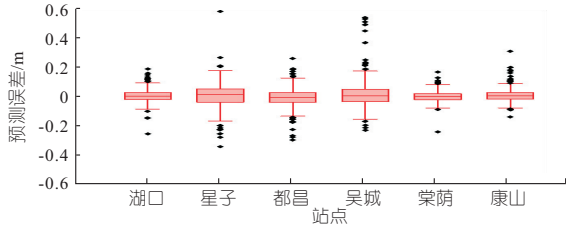


图 2 鄱阳湖水位预测结果误差箱型图

Fig. 2 Error box chart of water level prediction results of Poyang Lake

例,比较模型的模拟数据与实测数据,发现水位模拟值与实测值非常接近。由此可知,结合 PSO-GA 算法的 SVR 方法建立的鄱阳湖水位模型的预测精度较高,预测值与实测值拟合程度较好,即使对于误差最大的吴城站点,模型模拟也达到较好的效果。

4 鄱阳湖代表性站点水位对五河来水的响应

4.1 时间上鄱阳湖水位对五河来水变化的响应

基于所建立的鄱阳湖水位预测模型,根据五河站点历史径流资料,将五河全年的日均流量等比例增加,分析鄱阳湖各代表性站点水位的全年变化,进而确定鄱阳湖水位对五河来水响应程度较强的时段。模拟结果表明,鄱阳湖 5~7 月的水位对五河来流变化响应程度较强。以 2010 年为

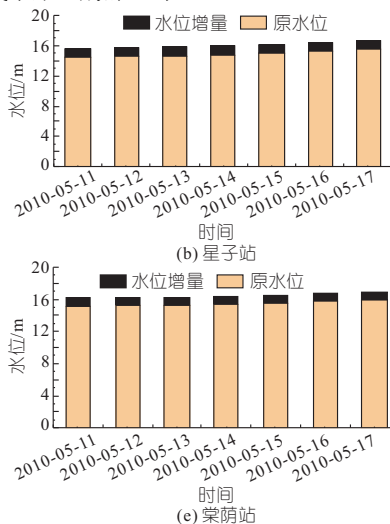
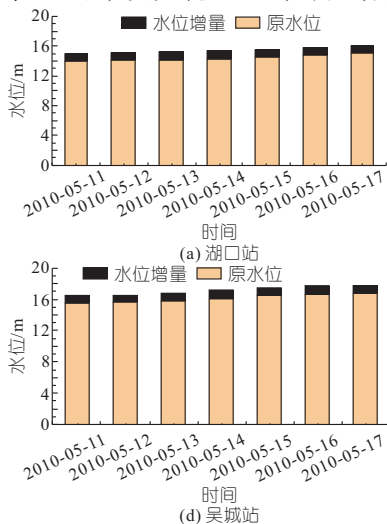


图 3 鄱阳湖代表性站点连续预测水位变化

Fig. 3 Continuous predicting water level changes of Poyang Lake

月均水位变化见表 2。由表 2 可看出,5~7 月的平均水位变化明显高于其他月份,说明鄱阳湖代表性站点在汛期时对五河来水响应程度较强。这可能是由于汛期 5~7 月五河水量较丰,入湖流量值的基数较大。鄱阳湖水位对五河来水响应程度取决于两方面:①五河入湖水量;②湖泊水位—湖容关系特征(即单位水位变化值下湖泊蓄水量的变化)。汛期五河来流变化 40% 时带来的入湖水量变化与单位水位变化值所需的湖泊蓄水量的比值较其他月份更大,因此在五河来水等比例变化下,鄱阳湖水位在汛期时对五河来水响应程度较强。

表 2 五河来流变化下鄱阳湖代表性站点全年月均水位变化
Tab. 2 Changes of Poyang Lake level during the whole year under effects of runoff change of five rivers

站点	月均水位抬高值/ $10^{-1}m$											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
湖口	0.40	0.24	0.10	0.78	1.15	1.03	1.32	0.95	0.66	0.80	0.33	0.06
星子	0.58	0.36	0.37	1.58	3.39	2.74	2.19	0.15	1.81	2.16	0.38	1.01
都昌	0.60	0.55	2.23	2.44	4.45	4.57	5.41	2.01	1.97	1.27	0.87	1.63
吴城	0.27	0.21	2.52	3.61	5.43	5.08	6.03	2.52	2.78	0.98	0.63	0.57
柴荫	0.19	0.07	0.17	0.19	1.60	1.50	1.29	0.94	0.16	0.54	0.21	0.27
康山	0.20	0.55	1.10	1.19	2.44	1.11	1.40	0.72	0.99	1.00	0.75	0.22

基于鄱阳湖水位预测模型,以前期模拟水位结果代替前期实测水位,循环调用模型连续预测鄱阳湖水位。以五河来水较丰的 2010 年 5 月为例,考虑时滞范围的设定,假设 5 月前 10 d 的水位保持不变,将 5 月五河来水改变后的日均流量和前 10 d 的水位作为初始条件,从第 11 d 开始,以模型计算出的水位作为后续水位的输入变量,依次预测鄱阳湖代表性站点未来一周的水位。预测结果见图 3。由图 3 可看出,五河来水增加 40% 的情况下,湖口站 11、17 日水位分别增加了 1.02、1.04 m;都昌站 11、17 日水位分别增加了

1.15、1.17 m,其余 4 个代表性站点水位在未来一周内也出现了较大幅度的增加。各代表性站点水位的明显抬高进一步表明了汛期五河来水的突增对鄱阳湖水位影响较大,鄱阳湖水位在这一时段对五河来水的响应程度较高。

4.2 空间上鄱阳湖水位对五河来水变化的响应

鄱阳湖代表性站点水位在空间分布上的变化见图 4。由图 4 可看出,都昌站一周内平均水位抬高了 1.16 m,星子站、湖口站平均水位分别抬高了 1.15、1.03 m,棠荫、康山、吴城站平均水位分别抬高了 0.97、0.97、0.96 m。由此可知,五河来水变化时,湖区中部的都昌站最为敏感,南部的康山站敏感程度较低,从湖区的南部至中部敏感性逐渐增加,从湖区的北部至中部敏感性也逐渐增加。

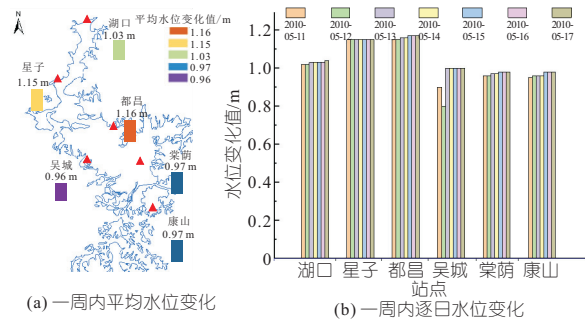


图 4 鄱阳湖水位对五河来水共同变化的空间响应
Fig. 4 Spatial response of water level in Poyang Lake to simultaneous increase of five rivers

5 结论

a. 时间尺度上鄱阳湖水位在汛期(5~7月)的变化量大于其他时段,即 5~7 月鄱阳湖水位对

五河来水变化的响应程度较强。

b. 空间分布上,五河来水增加 40% 时,都昌站水位一周内平均抬高了 1.16 m,星子、湖口站分别抬高了 1.15、1.03 m,由湖区南部至中部及由湖区北部至中部响应程度逐渐递增,其中,鄱阳湖湖区中部的都昌站更易受到五河来水变化的影响。

参考文献:

[1] 张云昌,张业刚,宋秋龄,等. 江湖关系的历史和未来[J]. 水利学报, 2021,52(10): 1183-1192.

[2] 万荣荣,杨桂山,王晓龙,等. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展[J]. 湖泊科学, 2014,26(1): 1-8.

[3] ZHANG Z, JIN G, TANG H, et al. How does the three gorges dam affect the spatial and temporal variation of water levels in the Poyang Lake? [J]. Journal of hydrology, 2022, 605: 127356.

[4] LI X, YAO J, LI Y, et al. A modeling study of the influences of Yangtze River and local catchment on the development of floods in Poyang Lake, China [J]. Hydrology research, 2016,47: 102-119.

[5] 陈炼钢,陈黎明,贾建伟,等. 鄱阳湖枯季水位变化对越冬水鸟生境面积的定量影响[J]. 水利学报, 2019,50(12):1502-1509.

[6] 郭燕,赖锡军. 基于长短时记忆神经网络的鄱阳湖水位预测[J]. 湖泊科学, 2020,32(3): 865-876.

[7] 于国强,张茂省,王根龙,等. 支持向量机和 BP 神经网络在泥石流平均流速预测模型中的比较与应用[J]. 水利学报, 2012,43(增刊 2):105-110.

[8] BABANGIDA N M, MUSTAFA M, YUSUF K W, et al. Prediction of pore-water pressure response to rainfall using support vector regression [J]. Hydrogeology journal, 2016,24(7): 1-13.

Spatio-temporal Response of Water Level in Poyang Lake to Runoff Change of Fiver Rivers

ZHANG Pei-pei¹, ZUO Tian-lin², DAI Hui-chao³, MAO Jing-qiao¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. PowerChina Beijing Engineering Corporation LTD, Beijing 100024, China; 3. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China)

Abstract: The water level of Poyang Lake is affected by both the Yangtze River mainstream and the Fiver Rivers (namely, Ganjiang River, Fuhe River, Xinjiang River, Raohe River and Xiushui River) in the lake basin. The runoff of the Five Rivers is the main inflow of Poyang Lake. In order to explore the temporal and spatial impact of the Five Rivers on the water level of Poyang Lake, the response of Poyang Lake level variation to the runoff change of the Five Rivers was quantitatively studied by data-driven simulation and sensitivity analysis. Firstly, the lake level prediction model was established by combining PSO-GA algorithm and support vector regression (SVR) technology. The temporal sensitivity of water level of Poyang Lake to runoff change of the Five Rivers was simulated. Then, based on this model, the spatial distribution characteristics of water level response of Poyang Lake to runoff change of the Five Rivers were studied using continuous model simulation. The results show that the most sensitive period that Poyang Lake level response to the runoff change of the Five Rivers is from May to July, especially in May. In terms of spatial distribution, water level in the middle part of Poyang Lake is most sensitive to the runoff change of the Five Rivers. For instance, based on the data in May 2010, when the runoff of the Five Rivers was increased by 40%, water level at Duchang station was averagely increased by 1.16 m within one week; Average water level increased at Xingzi station and Hukou station in the north lake area was 1.15 m and 1.03 m, respectively, and that at both Tangyin station and Kangshan station in the south lake area was 0.97 m. This study clarified the temporal and spatial response characteristics of water level of Poyang Lake to runoff of the Five Rivers, and provides scientific basis for water resources management and water projects optimization in the Poyang Lake basin.

Key words: Poyang Lake; water level prediction; inflow of five rivers; spatiotemporal characteristics; response relationship