

# 基于多因子回归的骆马湖洪水过程预报

姚思源, 李 凯, 栾承梅, 孙金凤, 闻余华

(江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 骆马湖直接承接沂河、运河等水系来水, 由于流域河道比降大、汇水速度快, 且汛期暴雨出现机会多, 导致骆马湖洪水涨速快, 防洪压力大, 因此对其洪水全过程的预报在实际的防洪工作中具有重要意义。通过选择水位、流量、降雨等因子, 对近20年的典型洪水采用多因子回归法预报洪水过程, 结合残差自回归模型对预报结果进行实时校正, 对骆马湖洪水过程进行预报, 预报精度为甲级, 过程趋势判断正确, 洪峰水位预测准确。

**关键词:** 洪水过程预报; 骆马湖; 沂沭泗流域; 回归分析

中图分类号: P338

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2025)04-0048-0005

## Flood process forecasting of Luoma Lake based on multi factor regression

YAO Siyuan, LI Kai, LUAN Chengmei, SUN Jinfeng, WEN Yuhua

(Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210000, China; )

**Abstract:** Luoma Lake directly receives water from Yi River, Canal and other water systems. Due to the steep gradient of river channels in the basin, rapid confluence, and more opportunities for rainstorm in flood season, the flood of Luoma Lake rises rapidly, leading to the great pressure of flood protection. Therefore, the prediction of the whole process of flood is of great significance in the actual flood control work. By selecting factors such as water level, flow rate, and rainfall, the multi factor regression method is used to forecast the flood process of typical floods in the past 20 years. Combined with the residual autoregressive model, the forecast results are corrected in real time to predict the flood process of Luoma Lake. The forecast accuracy reaches Grade A, the trend of the process is correctly judged, and the forecast of the flood peak water level is accurate.

**Key words:** flood process forecasting; Luoma Lake; Yishusi Basin; regression analysis

由于骆马湖所处的独特地理位置以及其在防汛抗旱中起到的重要调蓄作用<sup>[1]</sup>, 其洪水过程预报关系到防洪安全、水资源调度决策及水资源分配, 因此对其洪水过程的预报具有重要意义。在以往的洪水预报中, 常采用传统的产汇流模型, 但受制于水文要素测验的限制, 流量等要素往往很难有逐

时的测量成果, 因此预报洪水难以做到小颗粒度的全过程预报, 并且预报模式为链式, 对单独水文要素的依赖性强, 难以满足实际的工作需要。出于实际的作业预报需求, 本文采用适用性更强的回归方法, 降低预报模型对单独水文要素的依赖, 建立骆马湖水位与多个相关水文要素的多因子预报模型,

收稿日期: 2025-02-06

作者简介: 姚思源(1997—), 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事水文预报工作。E-mail: 517095924@qq.com

对洪水过程进行预报。

## 1 研究概况

骆马湖位于沂沭泗流域,处于江苏省宿迁市和徐州市之间,是南水北调的重要中转站、江苏省大型防洪蓄水水库<sup>[2]</sup>。骆马湖地理位置独特,承接中运河、沂河、邳苍分洪道的洪水以及房亭河等流域周边小河流的洪水<sup>[3]</sup>。骆马湖的主要泄洪方式为嶂山闸泄洪,将洪水排入新沂河,通过新沂河入海。

沂沭泗地区的水文气候类型独特<sup>[4]</sup>,其降雨主要集中在6-7月,降雨强度大、范围广,持续时间短,暴雨的主要成因是黄淮气旋和台风。沂沭河上中游河道比降大,洪水汇集快,洪峰尖瘦,由于骆马湖直接承接中运河、沂河洪水,因此其洪水汇集速度快,来水量集中,涨水速度快,一般1~3 d即出现洪峰,退水速度相对较慢。对过去已发生的洪水过程进行分析,发现骆马湖的洪水过程线较为尖瘦,涨水曲线斜率陡,退水曲线斜率相对较缓。

## 2 研究内容

### 2.1 研究方法

选择引起骆马湖水位变化的主要影响因子,本文选择水位因子、流量因子、降水因子,建立各因子与骆马湖水位的相关关系,采用多元回归模型对骆马湖的洪水过程进行预报。

对于某场特定的洪水过程,预报模型容易产生系统性误差,因此增加采用残差自回归模型,校正由回归方法得到的预报结果,以增强模型预报的稳定性,减少系统性误差。残差自回归模型假设每次的预报都有一定残差,并且认为此次的预报残差与以往的预报残差之间具有相关关系。将由残差自回归模型计算得到的预报残差加在之前由回归模型得到的预报结果上,得到校正后的最终预报结果。此外,残差自回归模型还具有实时校正的记忆功能,可以对已经发生过的预报结果和误差进行学习,以此对未来的预报进行实时校正,提高预报精度。

### 2.2 数据选择

本文主要针对骆马湖的洪水过程进行预报,预报时间间隔为1h。考虑到河道河宽和比降的变化、流域内气候变化及流域内水利工程建设引起的工况变化等因素,数据选择为流域内近20年,共13场次汛期典型洪水过程,其中10场数据用作模型参数

率定,3场数据用于模型参数验证。各水文要素的时间间隔均为1 h,不满足1 h间隔的数据采用插值法补齐。

水位因子选择为骆马湖水位、运河水位、港上水位。运河和港上为骆马湖上游汇流的代表站点,考虑到洪水传播时间,参与模型参数率定及验证的时间为洪水发生时刻的前6 h。考虑模型预报需要底水条件作为参考,因此选择增加骆马湖前6 h的水位作为影响因子,参与洪水预报。

流量因子选择为骆马湖入/出湖总流量。入湖流量代表站点选择为:运河(排水)、港上、刘集闸、皂河抽水站、皂河二站(抽水);出湖流量代表站点选择为:嶂山闸、运河(抽水)、杨河滩闸、皂河闸、刘集闸、皂河二站(发电)。以正表示入湖,负表示出湖。考虑洪水传播时间,运河和港上的流量数据选择洪水发生前6 h,其他站点选择洪水发生时刻。

降水因子选择为湖面产流和区间产流。湖面产流站点选择为窑湾、皂河闸、堰头、新店、宿迁闸,将5个站点的算术平均值作为骆马湖湖面的面雨量因子,数据选择为洪水发生时刻。区间产流站点选择为:运河、港上、刘集闸、华沂,将4个站点的算术平均作为骆马湖流域参与产汇流区域的面雨量因子,考虑产汇流时间,数据选择为洪水发生前6 h。

残差自回归模型由于其模型特性,因子的相关程度由预报时刻向前递减,考虑到预报精度和预见期,采用预报时刻前6 h和前7 h的预报残差作为相关因子。综合以上模型的预报方案和因子选择,设模型预见期为6 h。

### 2.3 精度评定指标

精度评定指标选择:(1)平均绝对误差,取预报序列与实测序列间绝对误差的均值;(2)合格率(合格限选取 $\pm 10$  cm、 $\pm 5$  cm、 $\pm 3$  cm),若预报值与实测值之差在合格限内,记为一次合格预报,合格率为预报合格场次与总预报场次之比;(3)相关系数 $R$ ,是计算预报值序列与实测值序列的相关系数;(4)场次平均确定性系数 $D_c$ ,计算单场洪水的确定性系数再取平均。

## 3 研究结果

在对骆马湖近20年的10场典型洪水进行参数率定后,得到以下的回归方程:

$$y=0.9887x_1+0.0083x_2+0.0014x_3+4.8\times 10^{-5}x_4+0.0036x_5+0.0035x_6+0.0246 \quad (1)$$

其中, $y$ 为骆马湖水位,m; $x_1$ 为杨河摊闸水位,m; $x_2$ 为运河水位,m; $x_3$ 为港上水位,m; $x_4$ 为入湖流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $x_5$ 为湖面面雨量,mm; $x_6$ 为区间面雨量,mm。

残差自回归方程为:

$$y' = 0.2457x'_1 + 0.2404x'_2 + 2.6 \times 10^{-6} \quad (2)$$

其中, $y'$ 为当前时刻的预报残差,m; $x'_1$ 为6 h前的残差,m; $x'_2$ 为7 h前的残差,m。

采用上述方法对13场洪水过程,共计5 019个时段的水位过程进行预报,其中模型参数率定期

4 373个时段,模型参数验证期646个时段。采用平均绝对误差、预报合格率、相关系数 $R$ 、场次平均确定性系数 $D_c$ 等精度评定指标对预报结果的精度进行评定。

率定期各精度评定指标的计算结果见表1,验证期各精度评定指标的计算结果见表2;选取骆马湖洪水过程预报结果作图,率定期节选见图1~3,验证期见图4~6。

由表1~2模型率定期和验证期的预报精度统计

表1 骆马湖率定期洪水过程预报精度评定结果

平均绝对误差/cm	合格限取 $\pm 10$ cm时 合格率/%	合格限取 $\pm 5$ cm时 合格率/%	合格限取 $\pm 3$ cm时 合格率/%	相关系数 $R$	场次平均确定性 系数 $D_c$
1.76	98.72	94.01	84.98	0.9983	0.9897

表2 骆马湖验证期洪水过程预报精度评定结果

平均绝对误差/cm	合格限取 $\pm 10$ cm时 合格率/%	合格限取 $\pm 5$ cm时 合格率/%	合格限取 $\pm 3$ cm时 合格率/%	相关系数 $R$	场次平均确定性 系数 $D_c$
3.03	94.89	82.51	65.79	0.9868	0.9721

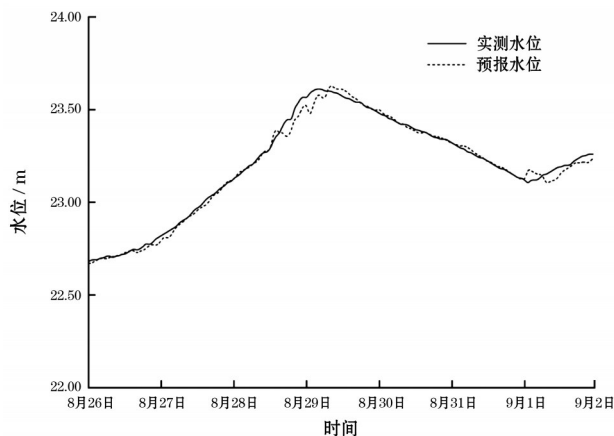


图1 2011年(率定期)骆马湖洪水预报过程

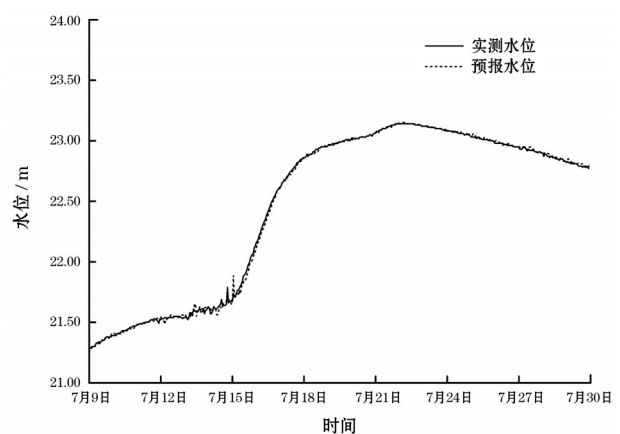


图2 2017年(率定期)骆马湖洪水预报过程

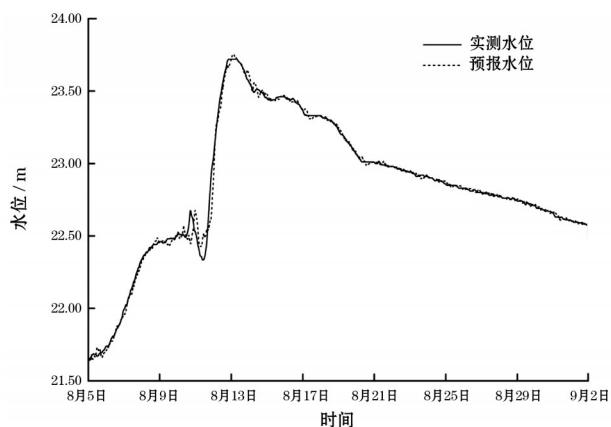


图3 2019年(率定期)骆马湖洪水预报过程

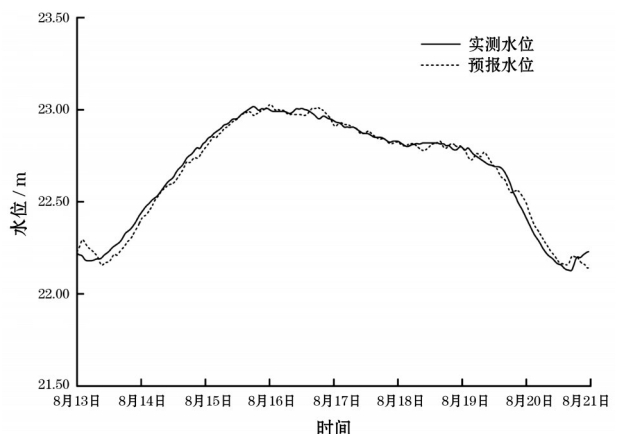


图4 2018年(验证期)骆马湖洪水预报过程

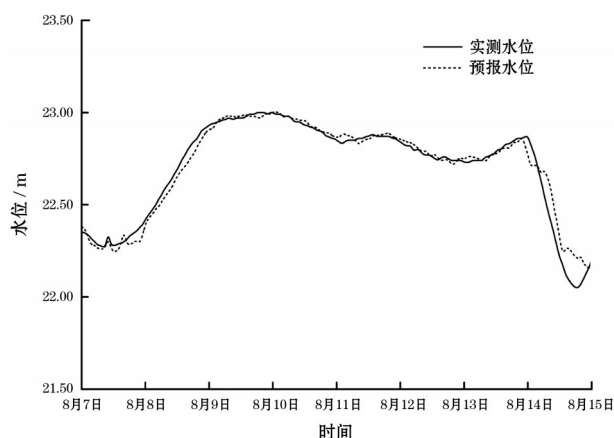


图5 2020年(验证期)骆马湖洪水预报过程

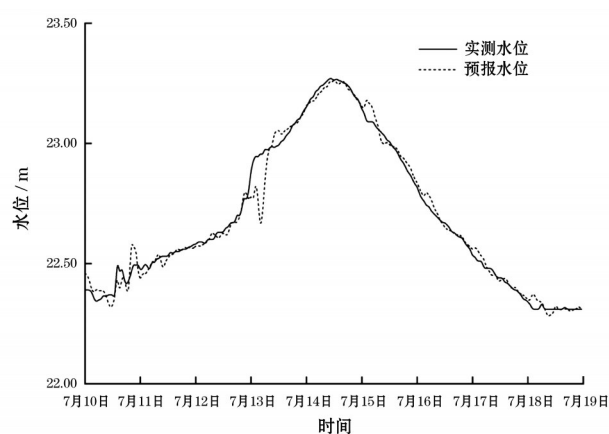


图6 2023年(验证期)骆马湖洪水预报过程

结果,可知该模型对骆马湖的水位预报具有较好的预报效果,预报精度高,验证期的平均预报误差仅为3.03 cm,率定期的预报精度高于验证期。

由图1~6预报与实测的洪水过程对比可知,预报洪水过程与实测洪水过程的相关性好,模型对于洪水趋势判断正确,线型相似,对洪峰水位的预测准确,预报效果较好。

对照《水文情报预报规范》<sup>[5]</sup>中对洪水过程的预报标准(见表3),采用合格率(场次洪水允许预报误差为洪水期间水位变幅的20%,经计算所选场次洪水的允许误差均大于10 cm)和场次平均确定性系数 $D_c$ 两种精度指标。

表3 预报项目精度等级

精度等级	合格率/%	确定性系数
甲	$Q_R \geq 85.0$	$D_c \geq 0.90$
乙	$70.0 \leq Q_R < 85.0$	$0.70 \leq D_c < 0.90$
丙	$60.0 \leq Q_R < 70.0$	$0.50 \leq D_c < 0.70$

模型在率定期和验证期的预报合格率分别为98.72%和94.89%,均达甲级精度;在率定期和验证期的场次平均确定性系数 $D_c$ 分别为0.9897和0.9721,均达甲级精度,率定期的预报精度略高于验证期。

由以上的精度评定结果以及预报和实测洪水过程对比可知,该模型的预报精度高,对洪水过程和洪峰水位的预报效果好,是适用于骆马湖地区的洪水过程预报方法。

在实用性方面,回归方法采用明式预报水位,操作简便且易于理解,参数率定方式简单,可以根据需要更换用来率定参数的数据、增减预报因子,

也可以根据经验或安全需要,更换模型参数,是一种实用的洪水预报方法。对比传统的产汇流模型,此种方法的优势在于操作更加简便易行,摆脱了预报依赖地区产汇流单位线的束缚和预报时间间隔的约束,理论上可以预报任意时刻的水位,可以对洪水全过程进行预报。

当然,此种洪水预报方式也存在其局限性。由于物理机制相对传统的产汇流模型较弱,即使增加了校正模块和前期水位作为底水条件的因子,仍然会表现出一些不稳定性。如,在洪峰到达前,水位应当持续上涨的过程中,或洪峰已过水位应当持续下降的过程中,由于一些因子的波动,预报水位过程偶见一些锯齿状波动或跳跃。在这种情况下,需要预报员结合其他预报方法或经验判断并修正。此外,由于增加了时实校正模块,因此难免出现矫枉过正的情况,特别是在洪水过程中趋势发生变化时,校正会存在一定的滞后性。

## 4 结 论

在采用多因子回归和残差校正方法,对骆马湖近20年的13场典型洪水进行了全过程共计5 019次预报后,得到以下的一些结论:

(1)预报方式采用明式进行计算预报,预报方法简单,可操作性强,具有较高的实用性。可以根据需要对模型因子、参数和数据进行随时调整,计算速度快,适合日常生产工作中使用。

(2)预报效果总体较好,从预报的结果来看,单次预报的平均绝对误差在3 cm左右,对照水文情报预报规范的标准,模型在率定期及验证期的预报均达甲级精度。此外,该预报方案可实现洪水全过程预报,满足实际工作需要。

(3)在实际预报中,此模型对洪水过程的趋势判断正确,洪峰水位预测准确,但也要注意模型可能产生的一些不稳定情况,需要结合实际及以往的洪水规律进行人为判断修正。

#### 参考文献:

- [1] 黄逾桂,章鹏,段蕾,等.宿迁大控制对流域洪水调度的影响研究[J].水利水电技术,2019,50(51):106-111.
- [2] 李褪来,曲红玲,陈黎明,等.骆马湖动库容分析[J].中国科技论文,2012,7(5):372-376.
- [3] 张晨,郑云鹤,刘殷竹,等.湖泊水力调控对河湖连通伴生洪水风险的缓释影响[J].水利学报,2022,53(3):316-324.
- [4] 田立中.沂沭河流域1000年来的洪涝灾害及气候背景[D].济南:山东师范大学,2014.
- [5] 中华人民共和国水利部. GB/T 22482—2008 水文情报预报规范[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- (上接第47页)
- [2] 罗爽,尤迎华,何玉秀,等.太湖平原河网地区水文要素变化特征[J].江苏水利,2022(12):30-33.
- [3] 缪岳军,邹明忠,张丽,等.圩区防洪调度研究——以江阴市马甲圩为例[J].中国水利,2020(5):32-35.
- [4] 黄正荣,缪毅,张振林.太湖流域平原河网城市防汛决策支持系统开发[J].人民长江,2023,54(增刊1):16-19.
- [5] 张翼,朱大伟,金星,等.江苏滨海平原河网地区排涝整治方案研究——以东台堤东垦区为例[J].江苏水利,2022(9):60-64.
- [6] 李淮东.苏南运河上游河网区洪水淹涝模型建立及应用[J].江苏水利,2022(3):31-35.
- [7] 李有为.长江干线宜昌—浏河口段一维河网水流数学模型[J].水运工程,2022(3):111-117.
- [8] 周宏,刘俊,刘鑫,等. MIKE 11模型在望虞河西控工程排涝计算中的应用[J].中国农村水利水电,2016(1):39-43.
- [9] 张晓波,闪丽洁,张瑶兰.追赶法在含闸分洪河道水动力计算中的改进研究[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2023,21(1):10-22.
- [10] 廖厚初,王建群,孙永贺,等.河网水动力模型在松花江流域的应用[J].水利科学与寒区工程,2023,6(4):57-60.
- [11] 缪俊,周顺,陆纪友,等.江阴市全面深入实施长江大保护的实践与思考[J].江苏水利,2019(9):56-59.
- [12] 庄钧惠,张楠,葛飞,等.江阴市“十四五”水利高质量发展规划的思考[J].江苏水利,2021(2):32-35.
- [13] 孙凌凯,胡子琛,李逸之.平原河网地区水域纳污能力与限排总量控制方案研究:以江阴城区为例[J].水利水电技术(中英文),2022,53(增刊2):320-329.
- [14] 徐军伟.江阴防汛防台工作的调查与思考[J].江苏水利,2019(4):70-72.